



Πανεπιστήμιο  
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΦΥΣΙΚΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ  
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ  
ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ  
ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ  
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ**

**ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ**

**2017**



Πανεπιστήμιο  
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΛΕΤΗ ΦΥΣΙΚΟ-ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ  
ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ  
ΤΗΣ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥΣ ΣΤΙΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ  
ΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ

Διατριβή η οποία υποβλήθηκε προς απόκτηση διδακτορικού τίτλου σπουδών  
στο Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δεκέμβριος 2017

ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ

© Fournari Revekka, 2017

## ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

**Υποψήφιος Διδάκτορας:** Ρεβέκκα Φούρναρη

**Τίτλος Διατριβής:** Μελέτη φυσικο-μηχανικών ιδιοτήτων λεπτόκοκκων αδρανών υλικών και διερεύνηση της επίδρασής τους στις ιδιότητες των κονιαμάτων και του σκυροδέματος.

*Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για απόκτηση Διδακτορικού Διπλώματος στο **Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος** και εγκρίθηκε στις ..... από τα μέλη της **Εξεταστικής Επιτροπής**.*

**Εξεταστική Επιτροπή:**

**Ερευνητικός Σύμβουλος:** Δρ. Ιωάννης Ιωάννου, Αναπληρωτής Καθηγητής

---

**Μέλος Επιτροπής:** Δρ. Μιχάλης Φ. Πέτρου, Καθηγητής

---

**Μέλος Επιτροπής:** Δρ. Δημήτριος Λουκίδης, Επίκουρος Καθηγητής

---

**Μέλος Επιτροπής:** Δρ. Μιχαήλ Σταματάκης, Καθηγητής

---

**Μέλος Επιτροπής:** Δρ. Βασίλειος Τσικούρας, Senior Assistant Professor

---



## ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ

Η παρούσα διατριβή υποβάλλεται προς συμπλήρωση των απαιτήσεων για απονομή Διδακτορικού Τίτλου του Πανεπιστήμιου Κύπρου. Είναι προϊόν πρωτότυπης εργασίας αποκλειστικά δικής μου, εκτός των περιπτώσεων που ρητώς αναφέρονται μέσω βιβλιογραφικών αναφορών, σημειώσεων ή και άλλων δηλώσεων.

.....

.....

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κατασκευαστική βιομηχανία στην Κύπρο αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες δραστηριότητες στο νησί, με μεγάλη συνεισφορά στην οικονομία του τόπου. Τη μεγαλύτερη σε αναλογία πρώτη ύλη για την παρασκευή σκυροδέματος και κονιαμάτων αποτελούν τα αδρανή υλικά. Γι' αυτό, η ποιότητά τους ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα και ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος.

Η διατριβή αυτή είχε ως στόχο τον έλεγχο τοπικών, λεπτόκοκκων αδρανών υλικών, προκειμένου να γίνουν εισηγήσεις ως προς τη διατήρηση ή/και επανακαθορισμό των ορίων των εργαστηριακών ελέγχων που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε επίσης προσπάθεια συσχέτισης της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών που εξετάστηκαν με την ποιότητα του τελικού προϊόντος (σκυροδέματος και κονιαμάτων).

Για την εκπόνηση της διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν διαβασικά, ασβεστολιθικά και ασβεσταρενιτικά θραυστά λεπτόκοκκα αδρανή υλικά. Τα αδρανή αυτά υποβλήθηκαν στις εξής δοκιμές: ισοδύναμου άμμου (SE), μπλε του μεθυλενίου (MB), απορροφητικότητας σε νερό (WA) και πυκνότητας ( $\rho_b$ ), αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και νάτριο (SS), και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD). Πραγματοποιήθηκαν επίσης ορυκτολογικές και χημικές αναλύσεις σε όλα τα δείγματα. Ακολούθως, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση των αδρανών υλικών στο τελικό προϊόν, παρασκευάστηκαν εργαστηριακά σκυροδέματα και κονιάματα, τα οποία ελέγχθηκαν ως προς τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες.

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα σκυροδέματα και στα κονιάματα, η ποιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών, όπως αυτή καθορίζεται από τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες και τα πετρογραφικά τους χαρακτηριστικά, όντως επηρεάζει τις ιδιότητες του σκληρυμένου τελικού προϊόντος. Ωστόσο, η επίδραση της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών είναι πιο εμφανής στην περίπτωση των κονιαμάτων, παρά σε αυτή των σκυροδεμάτων. Όπως διαπιστώθηκε, κονιάματα που παρασκευάστηκαν με αδρανή "κακής" ποιότητας, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και ψηλότερες τιμές φυσικών ιδιοτήτων (με εξαίρεση την πυκνότητα), και το αντίστροφο. Οι δοκιμές MB και MD παρουσίασαν ισχυρές συσχετίσεις με το τελικό προϊόν, γεγονός που επιβεβαιώνει την άποψη αρκετών

ερευνητών που υποστηρίζουν ότι οι δοκιμές αυτές συσχετίζονται επαρκώς με την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η δοκιμή MB παρουσίασε πολύ ψηλές τιμές, ειδικά στα διαβασικά αδρανή, οι οποίες παρόλα αυτά δεν ξεπερνούν το επίσης ψηλό όριο (10 g/kg για τα κονιάματα και 3 g/kg για τα σκυροδέματα) που καταγράφεται στην Κ.Δ.Π. 164/2011. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, συστήνεται η μείωση των υφιστάμενων ορίων για MB στο 2.5 g/kg. Το ίδιο ισχύει και για τη δοκιμή WA, της οποίας επίσης το υφιστάμενο όριο από την Κ.Δ.Π. 164/2011 (4%) κρίνεται υπερβολικά ψηλό για λεπτόκοκκα αδρανή, και άρα συστήνεται η αναθεώρησή του προς τα κάτω.

Από τα αποτελέσματα, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η δοκιμή MS οδηγεί σε πολύ ψηλά ποσοστά απώλειας μάζας στα λεπτά αδρανή. Περισσότερα από τα 2/3 των δειγμάτων που εξετάστηκαν ξεπερνούν την ανώτατη επιτρεπόμενη κατηγορία στις Ευρωπαϊκές Προδιαγραφές (35%). Τα δεδομένα αυτά καθιστούν τη δοκιμή MS ακατάλληλη για λεπτόκοκκα αδρανή υλικά. Ως πιθανότερος αντικαταστάτης της, θεωρείται η δοκιμή MD, αφού πέραν του ότι παρατηρήθηκε πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ των δύο δοκιμών, η δοκιμή MD αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και με καλή επαναληψιμότητα ή/και αναπαραγωγιμότητα δοκιμή.

Στις πλείστες δοκιμές προέκυψε διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων ανάλογα με τη γεωλογική προέλευση των αδρανών. Γι' αυτό, συστήνεται ο διαχωρισμός των αδρανών, και ο καθορισμός ανεξάρτητων ορίων, ανάλογα με το λιθότυπο του μητρικού πετρώματος. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ανομοιογένεια στις ιδιότητες των τοπικών αδρανών υλικών που ελέγχθηκαν. Γι' αυτό, η ποιότητά τους δεν μπορεί να καθοριστεί από μια μόνο δοκιμή, ή από πολλές δοκιμές ανεξάρτητα, όπως συμβαίνει τώρα.

Τέλος, επιβεβαιώθηκε ο σημαντικός ρόλος της πετρογραφικής εξέτασης τόσο στα αδρανή, όσο και στο τελικό προϊόν. Με αυτά τα δεδομένα, η πετρογραφική εξέταση μπορεί να αποτελέσει εξαιρετικά πολύτιμο εργαλείο για την εκτίμηση της ποιότητας τόσο των αδρανών, όσο και σύνθετων δομικών υλικών.

## ABSTRACT

The construction industry in Cyprus is the largest economic activity on the island, following tourism. Aggregates are among the primary raw materials used to produce concrete and mortar; therefore, their durability potentially affects the performance of the final product.

This thesis aims at the testing of local, fine aggregates, in order to provide recommendations regarding the revision of the current norms and regulations controlling the quality of aggregates in Cyprus (i.e. K.Δ.Π. 164/2011). An attempt is also made to correlate the quality of fine aggregates to the quality of the final product (concrete and mortar).

For the implementation of the thesis, diabasic, limestone and calcareous crushed local fine aggregates were used. These aggregates were subjected to the following tests: sand equivalent (SE), methylene blue (MB), water absorption (WA) and density ( $\rho_b$ ), magnesium sulphate (MS) and sodium sulphate (SS) soundness, resistance to degradation by abrasion (MD). Mineralogical and chemical analyses were also carried out on all samples. Subsequently, in order to investigate the effect of aggregates on the final product, concretes and mortars were prepared in the lab, and tested for their physical and mechanical properties.

The results of the tests carried out on concrete and mortars provide evidence that the quality of fine aggregates, as determined by their physico-mechanical properties and their petrographic characteristics, indeed affects the properties of the hardened final composite. The effect of fine aggregate quality is more pronounced in the case of mortars. Samples prepared with “bad quality” aggregates exhibited lower mechanical properties and higher physical property values (with the exception of density), and vice versa. MB and MD aggregate tests were successfully correlated with the final product properties; this confirms the findings of several researchers who suggest that these tests are well correlated with the quality of the final product.

MB tests revealed very high values, (especially in the case of diabasic aggregates), which nevertheless did not exceed the high limits (10 g/kg for mortars and 3 g/kg for concrete) set in K.Δ.Π. 164/2011. Based on the experimental results, it is recommended to reduce the existing MB limits to 2.5 g/kg. The WA test, also revealed high values, again not

exceeding the existing limit recorded in Κ.Δ.Π. 164/2011 (4%); this limit is also considered too high for fine aggregates, and therefore should be revised.

From the results, it is also clear that the MS soundness test leads to very high mass losses in the case of fine aggregates. More than 2/3 of the samples tested exceeded the maximum allowable category in European Norms (35%). These data suggest that the MS soundness test is unsuitable for fine aggregate materials. The MD test could potentially be used as a substitute, since there appears to be a very strong correlation between the results of the two tests. The MD test is an easy, fast to execute test, with very good reproducibility and/or repeatability.

Most tests revealed different results according to the geological origin of the aggregates. It is therefore recommended to separate the aggregates during quality control, and to establish independent limits depending on the lithology of the mother rock. In addition, noticeable heterogeneity was observed in the properties of local aggregates. Therefore, their quality cannot be determined by a single test, or by many tests independently, as it is the case now.

Finally, the important role of petrographic testing in both the aggregates and the final products has been confirmed; petrography could therefore be utilised as an extremely valuable tool for assessing the quality of both aggregates and composite materials.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή αποτελεί το επιστέγασμα μιας προσπάθειας που δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη συμβολή και υποστήριξη πολλών ανθρώπων, τους οποίους θα ήθελα να ευχαριστήσω ολόψυχα.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον επιβλέποντα της διατριβής μου, Δρ. Ιωάννη Ιωάννου, Αναπληρωτή Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, χωρίς την πολύτιμη συμβολή του οποίου θα ήταν αδύνατον να ολοκληρωθεί αυτή η διατριβή. Τον ευχαριστώ θερμά για την ανεκτίμητη ευκαιρία που μου έδωσε, την ουσιαστική καθοδήγηση, όλες τις πολύτιμες συμβουλές, τη στήριξη, την υπομονή και την εξαιρετική συνεργασία καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου στο Πανεπιστήμιο Κύπρου. Ακόμη, θέλω να τον ευχαριστήσω από καρδιάς για την προθυμία με την οποία μου προσέφερε οποιαδήποτε βοήθεια χρειάστηκα όλα αυτά τα χρόνια.

Οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερος και τον Δρ. Μιχάλη Πέτρου, Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, του οποίου η συνεισφορά, οι εποικοδομητικές υποδείξεις και οι επιστημονικές συμβουλές υπήρξαν καθοριστικές για τη διεκπεραίωση της διατριβής αυτής, ενώ η άψογη συνεργασία που είχαμε και η όλη βοήθειά του υπήρξε καταλυτική όλα αυτά τα χρόνια της παρουσίας μου στο Πανεπιστήμιο Κύπρου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμότατα και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής: Δρ. Δημήτρη Λουκίδη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, Δρ. Μιχάλη Σταματάκη, Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, και Δρ. Βασίλη Τσικούρα, Senior Assistant Professor in Mineralogy & Petrology, Universiti Brunei Darussalam, που με τίμησαν με τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή, όπως επίσης και για τις εύστοχες παρατηρήσεις και χρήσιμες συμβουλές τους, οι υποδείξεις των οποίων αναβάθμισαν το περιεχόμενο της παρούσας διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω και στον Δρ. Λούκα Πέτρου, Λειτουργό του Πανεπιστημίου Κύπρου στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, για τις πολύτιμες, επιστημονικής και τεχνικής φύσεως, συμβουλές, τον κ. Μιχάλη Μιχαήλ,

Τεχνικό Εργαστηρίου του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πανεπιστημίου Κύπρου, για τη μεγάλη συμβολή του στην εκτέλεση των εργαστηριακών δοκιμών, κυρίως όσον αφορά τα σκυροδέματα και κονιάματα, τον κ. Δημήτρη Βατυλιώτη για τη βοήθειά του όσον αφορά τις δοκιμές των αδρανών, αλλά και σε όσους εργάστηκαν στο εργαστήριο Δομικών Υλικών, οι οποίοι βοήθησαν ο καθένας με το δικό του τρόπο.

Οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στον Δρ. Ιωάννη Ρηγόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του ιδιαίτερα όσον αφορά την χρήση του πολωτικού μικροσκοπίου και του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης, όπως επίσης και για την όλη βοήθειά του, τις εύστοχες παρατηρήσεις και την καθοδήγησή του όσον αφορά γεωλογικά ζητήματα. Τεράστιο ευχαριστώ οφείλω και στους Δρ. Ρογήρο Ίλλαμπα και Δρ. Μαγδαληνή Θεοδωρίδου για την καλοπροαίρετη διάθεση να με βοηθήσουν σε οτιδήποτε και αν τους ζήτησα. Η βοήθειά τους ήταν άμεση και αποτελεσματική, βασιζόμενη πάντα σε επιστημονικά δεδομένα.

Ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στο Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, ειδικότερα στον κ. Χριστόδουλο Χατζηγεωργίου, για την συλλογή και παροχή των δειγμάτων των αδρανών από τις λατομικές ζώνες, ενώ ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στο Υπουργείο Εσωτερικών και ειδικότερα στην Εθνική Τεχνική Επιτροπή Αμμοχαλίκων του Κυπριακού Οργανισμού Τυποποίησης (CYS TE 02) για τη χρηματοδότη μέρους της παρούσας διατριβής. Αντίστοιχες ευχαριστίες οφείλω και στο Πανεπιστήμιο Κύπρου για την παροχή μονοετούς υποτροφίας κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Ευχαριστίες οφείλω και στον Δρ. Κωνσταντίνο Χατζηπαναγιώτου, Καθηγητή του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών, για την παραχώρηση του παρασκευαστηρίου του Εργαστηρίου Έρευνας Ορυκτών και Πετρωμάτων, του Τομέα Ορυκτών Πρώτων Υλών, του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών και τεχνικού προσωπικού για την παρασκευή των λεπτών τομών.

Πάνω από όλα, ωστόσο, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου για την αμέριστη συμπαράσταση και τη συνεχή παρότρυνση για την ολοκλήρωση της διδακτορικής διατριβής μου. Τους γονείς μου Νίκο και Ελισάβετ για την ανιδιοτελή αγάπη και συμπαράστασή τους. Είναι πάντα στο πλευρό μου, στηρίζοντάς με ηθικά και οικονομικά καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής μου. Τα αδέρφια μου Αντώνη και Νάντια για την αγάπη και τη στήριξή τους. Τέλος, θέλω να εκφράσω τη μεγάλη μου αγάπη και ευγνωμοσύνη στο σύζυγό μου Κώστα, που αποτελεί υπόδειγμα οικογενειάρχη, για τη

συμπαράσταση, την αγάπη και την υπομονή που επέδειξε όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα να εκφράσω επίσης την απέραντη μου αγάπη στο λατρεμένο μας γιο Θεόδουλο και στο νέο μέλος της οικογένειά μας, την αγαπημένη μας Ελισάβετ. Τους ευχαριστώ όλους για τις θυσίες και την κατανόηση που επέδειξαν από τη στέρηση της παρουσίας μου. Σας ευχαριστώ πολύ για όλα!

ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ



ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ

*Αφιερώνεται στην οικογένειά μου*

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ .....	i
ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ .....	ii
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	v
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	xi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xvi
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ .....	xxii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	xxviii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Γενικά .....	1
1.2 Σκοπός Διατριβής .....	3
1.3 Δομή Διατριβής .....	4
2 Αδρανή υλικά .....	7
2.1 Γενικά .....	7
2.2 Ταξινόμηση αδρανών υλικών .....	8
2.2.1 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση τον τρόπο σχηματισμού τους .....	8
2.2.2 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση την πηγή προέλευσής τους.....	9
2.2.3 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση την πηγή λήψης τους.....	9
2.2.4 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση το ειδικό βάρος τους.....	10
2.2.5 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση το μέγεθος των κόκκων τους.....	10
2.2.6 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση την χρήση τους.....	10
2.3 Ο ρόλος των αδρανών στα τεχνικά έργα .....	11
2.3.1 Ο ρόλος των αδρανών στο σκυρόδεμα.....	11

2.3.2	Ο ρόλος των αδρανών στην οδοποιία.....	11
2.3.3	Ο ρόλος των αδρανών στα έρμα των σιδηροδρομικών γραμμών .....	12
2.3.4	Ο ρόλος των αδρανών ως φίλτρα .....	12
2.3.5	Ο ρόλος των αδρανών στα κονιάματα.....	12
2.4	Ιδιότητες αδρανών υλικών.....	13
2.4.1	Γενικές ιδιότητες αδρανών υλικών .....	13
2.4.2	Γεωμετρικές ιδιότητες αδρανών υλικών.....	14
2.4.3	Φυσικές ιδιότητες αδρανών υλικών.....	17
2.4.4	Ιδιότητες αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές .....	20
2.4.5	Μηχανικές ιδιότητες αδρανών υλικών .....	24
2.4.6	Αναλυτικές τεχνικές χαρακτηρισμού αδρανών υλικών.....	27
2.5	Συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων των αδρανών.....	33
3	Επίδραση αδρανών σε σύνθετα δομικά υλικά.....	38
3.1	Γενικά .....	38
3.2	Επίδραση ιδιοτήτων των αδρανών στο σκυρόδεμα/κονίαμα .....	39
3.2.1	Γεωμετρικές ιδιότητες αδρανών υλικών.....	39
3.2.2	Φυσικές ιδιότητες αδρανών υλικών.....	47
3.2.3	Ιδιότητες αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές .....	50
3.2.4	Μηχανικές ιδιότητες αδρανών υλικών .....	53
3.2.5	Ορυκτολογία αδρανών υλικών .....	55
4	Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου .....	59
4.1	Γενικά .....	59
4.2	Γεωτεκτονική εξέλιξη της Κύπρου.....	59
4.3	Αδρανή υλικά της Κύπρου .....	68
4.3.1	Χρήση αδρανών υλικών κατά την εξέλιξη της οικοδομικής βιομηχανίας στην Κύπρο.....	68

4.3.2	Διαβασικά αδρανή .....	73
4.3.3	Ασβεστολιθικά αδρανή.....	76
4.3.4	Ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	79
4.4	Νομοθεσία – Διατάγματα ελέγχου ποιότητας αδρανών υλικών της Κύπρου .....	81
4.5	Ποιότητα αδρανών υλικών της Κύπρου .....	83
5	Υλικά διατριβής – Μεθοδολογία δοκιμών .....	89
5.1	Γενικά .....	89
5.2	Υλικά διατριβής.....	89
5.3	Δοκιμές αδρανών υλικών.....	93
5.3.1	Γενικές ιδιότητες.....	96
5.3.2	Γεωμετρικές ιδιότητες .....	97
5.3.3	Φυσικές ιδιότητες .....	104
5.3.4	Ιδιότητες αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές .....	106
5.3.5	Μηχανικές ιδιότητες .....	110
5.3.6	Αναλυτικές τεχνικές για χαρακτηρισμό αδρανών υλικών.....	111
5.4	Δοκιμές σκυροδεμάτων/κονιαμάτων .....	114
5.4.1	Σκυροδέματα.....	114
5.4.2	Κονιάματα.....	129
6	Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση .....	146
6.1	Ιδιότητες αδρανών υλικών.....	147
6.1.1	Αποτελέσματα ιδιοτήτων αδρανών υλικών δειγματοληψίας 1 <sup>ης</sup> φάσης.....	147
6.1.2	Αποτελέσματα ιδιοτήτων αδρανών υλικών δειγματοληψίας 2 <sup>ης</sup> φάσης.....	152
6.2	Συσχέτιση ορυκτολογίας με τις ιδιότητες των αδρανών .....	168
6.2.1	Διαβασικά αδρανή .....	169
6.2.2	Ασβεστολιθικά αδρανή.....	183
6.2.3	Ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	188

6.3	Χημικές αναλύσεις (XRF) .....	195
6.4	Συσχετίσεις μεταξύ ιδιοτήτων αδρανών υλικών .....	198
6.4.1	Συσχετίσεις γεωμετρικών ιδιοτήτων.....	199
6.4.2	Συσχετίσεις φυσικών ιδιοτήτων.....	201
6.4.3	Συσχετίσεις ιδιοτήτων αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές ... ..	203
6.4.4	Συσχετίσεις μηχανικών ιδιοτήτων .....	203
6.5	Συμπεράσματα .....	209
7	Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση .....	213
7.1	Σκυροδέματα.....	213
7.1.1	Αποτελέσματα μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων σκυροδεμάτων .....	214
7.2	Κονιάματα.....	230
7.2.1	Αποτελέσματα μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων κονιαμάτων.....	230
7.3	Συσχέτιση ιδιοτήτων αδρανών με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων / κονιαμάτων.....	248
7.3.1	Συσχέτιση με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου .....	249
7.3.2	Συσχέτιση με τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου και την ορυκτολογική σύσταση των αδρανών.....	250
7.3.3	Συσχέτιση με τη δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό .....	253
7.3.4	Συσχέτιση με τη δοκιμή αποσάθρωσης.....	254
7.3.5	Συσχέτιση με τη δοκιμή αντίστασης σε τριβή (Micro-Deval).....	256
7.3.6	Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης .....	259
7.4	Χρήση αναλυτικών τεχνικών για τον χαρακτηρισμό κονιαμάτων .....	265
7.4.1	Πολωτικό μικροσκόπιο.....	265
7.4.2	Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης .....	271
7.5	Συμπεράσματα .....	276
8	Συμπεράσματα.....	281

8.1	Συστάσεις για μελλοντική έρευνα .....	288
9	Βιβλιογραφία .....	292
	Ξένη Βιβλιογραφία .....	292
	Ελληνική Βιβλιογραφία .....	322
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α .....	327
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β .....	330
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ .....	332
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ .....	335

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Καμπύλη Fuller (Qin & Hua, 2012).....	15
Εικόνα 2.2: Αρχή λειτουργίας πολωτικού μικροσκοπίου (Slayter & Slayter, 1992). .....	29
Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας περιθλασιόμετρου ακτινών - X (Atkins et al., 2010). .....	31
Εικόνα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας φασματομέτρου φθορισμού ακτινών – X (Qutaishat, 2011).....	32
Εικόνα 3.1: (α) Καλά διαβαθμισμένο μίγμα, (β) περίσσεια χονδρόκοκκου κλάσματος και (γ) απουσία ενδιάμεσου κλάσματος (Gambhir, 2013).....	41
Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση της αλλοίωσης της επιφάνειας του σκυροδέματος όταν τα πλακοειδή αδρανή εμποδίζουν τη διέλευση του νερού της εξίδρωσης (Jana, 2007). .....	42
Εικόνα 3.3: Οι στρογγυλεμένοι κόκκοι παρουσιάζουν λιγότερο χώρο μεταξύ τους σε σχέση με τους γωνιώδεις κόκκους (Kwan & Mora, 2001).....	43
Εικόνα 3.4: Σχηματική απεικόνιση της σωματοποιημένης δομής των αργιλικών ορυκτών (μοντμοριλλονίτη) (Ng & Plank, 2012).....	45
Εικόνα 3.5: Σκυρόδεμα που αστόχησε κατά την ψύξη (Kosmatka, 2008).....	49
Εικόνα 3.6: Θρυμματισμός επιφανειακού μη “υγιούς” αδρανούς (Basham, 2013). .....	51
Εικόνα 3.7: Διαφορά στη διάδοση ρωγμών (α) σε σκυρόδεμα με σκληρά αδρανή και (β) σε σκυρόδεμα με αδύναμα αδρανή (Weimer & Hauptert, 2000). .....	53
Εικόνα 3.8: Ρηγμάτωση σκυροδέματος λόγω αλκαλοπυριτικής αντίδρασης (Kosmatka et al., 2003). .....	57
Εικόνα 3.9: (α) Απολέπιση επιφάνειας κολώνας σκυροδέματος λόγω παρουσίας ζεολιθών (μετασχηματισμού λωμοντίτη σε λεοναρδίτη) και (β) τομή σκυροδέματος όπου σημειώνεται το αδρανές που περιέχει ζεόλιθους (Erilin & Jana, 2003).....	58
Εικόνα 4.1: Οι γεωλογικές ακολουθίες της Κύπρου (Ιστοσελίδα Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου <a href="http://www.moa.gov.cy/gsd">www.moa.gov.cy/gsd</a> ).....	60

Εικόνα 4.2: Ανώτερο Κρητιδικό (πριν από 92 Ma), δημιουργία οφιόλιθου Τροόδους (Τσιολάκης, 2015). .....	62
Εικόνα 4.3: Ανώτερο Κρητιδικό (περίπου πριν από 70 Ma), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015).....	64
Εικόνα 4.4: Κατώτερο Μειόκαινο (23-20 εκατ. χρόνια πριν), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015).....	65
Εικόνα 4.5: Ανώτερο Μειόκαινο (πριν από 10 Ma), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015). .....	66
Εικόνα 4.6: Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο (πριν από 3-05 Ma), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015). .....	68
Εικόνα 4.7: Αμμοχάλικα των ποταμών και παραλιών των περιοχών νότια του Τροόδους.	70
Εικόνα 4.8: Αμμοχάλικα των ποταμών και παραλιών των περιοχών βόρεια του Τροόδους. ....	70
Εικόνα 4.9: Αμμοχάλικα των ποταμών και παραλιών των περιοχών της Πάφου.....	70
Εικόνα 4.10: Χάρτης Κύπρου με ενδεικτικές θέσεις ενεργών λατομείων. ....	72
Εικόνα 4.11: Μέτωπο λατόμευσης διαβασικών πετρωμάτων στην περιοχή Μοσφιλωτής (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο). .....	74
Εικόνα 4.12: (α) Διαβασικά σκύρα μεγέθους 8-20 mm, (β) Διαβασικά σκύρα μεγέθους 4-10 mm, (γ) Διαβασική άμμος μεγέθους 0-4 mm. ....	74
Εικόνα 4.13: Φλέβα διαβάση του Συστήματος Πολλαπλών Φλεβών (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).....	75
Εικόνα 4.14: Λεπτή τομή από διαβασικό δείγμα (Px: Πυρόξενος, Act: Ακτινόλιθος, Pl: Πλαγιόκλαστο), Κάθετα nicols.....	76
Εικόνα 4.15: Υφαλογενής ασβεστόλιθος του Μέλους Τέρρα στην περιοχή Κάβο Γκρέκο, νοτιοανατολικά της Κύπρου (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).....	77
Εικόνα 4.16: Λεπτή τομή Υφαλογενούς Ασβεστολίθου (P: Πόροι, F: Απολίθωμα (κοράλλια)), κάθετα nicols. ....	78
Εικόνα 4.17: Μέτωπο λατόμευσης ασβεστολιθικών πετρωμάτων στην περιοχή Μιτσερό (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο). .....	78



Εικόνα 4.18: (α) Ασβεστολιθικά σκύρα μεγέθους 8-20 mm, (β) Ασβεστολιθικά σκύρα μεγέθους 4-10 mm, (γ) Ασβεστολιθική άμμος μεγέθους 0-4 mm.....	79
Εικόνα 4.19: Το μέλος Αθαλάσσα του Σχηματισμού Λευκωσίας στην περιοχή Άγιος Σωζόμενος, Λευκωσία (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).....	79
Εικόνα 4.20: Λεπτή τομή ασβεσταρενίτη (4X) (F: Απολίθωματα, clas: Κλαστικοί κόκκοι), κάθετα nicols. ....	80
Εικόνα 4.21: Μέτωπο λατόμευσης ασβεσταρενιτικών πετρωμάτων στην περιοχή Ιδαίου ( <a href="http://www.latouros.com/Gallery/gallery_rd.htm">http://www.latouros.com/Gallery/gallery_rd.htm</a> ). ....	80
Εικόνα 4.22: Ασβεσταρενιτική άμμος μεγέθους 0-4 mm.....	81
Εικόνα 5.1: Τετραμερισμός δείγματος (Οικονομίδης, 1994). ....	97
Εικόνα 5.2: Συσκευή (riffle box) και διαδικασία διαχωρισμού δειγμάτων.....	98
Εικόνα 5.3: Πρότυπα κόσκινα τοποθετημένα στη συσκευή κοσκίνισματος.....	99
Εικόνα 5.4: Κοκκομετρική καμπύλη ασβεστολιθικού λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού....	101
Εικόνα 5.5: Πειραματική διάταξη για προσδιορισμό του συντελεστή ισοδύναμου άμμου. ....	102
Εικόνα 5.6: Πειραματική διάταξη για προσδιορισμό του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου. ....	104
Εικόνα 5.7: Προσδιορισμός κατάστασης επιφανειακής ξήρανσης (SSD) δείγματος άμμου με τη χρήση ειδικού κώνου.....	106
Εικόνα 5.8: Μέτρηση πυκνότητας θεικού μαγνησίου με υδρόμετρο.....	107
Εικόνα 5.9: Συρμάτινα καλαθάκια με διαβαθμισμένο υλικό. ....	109
Εικόνα 5.10: Συσκευή Micro Deval. ....	111
Εικόνα 5.11: (α) Συσκευή άλεσης και (β) κονιοποιητής από αχάτη. ....	112
Εικόνα 5.12: Περιθλασίμετρο ακτίνων-Χ. ....	113
Εικόνα 5.13: Φασματόμετρο. ....	114
Εικόνα 5.14: Ανάμιξη υλικών για παρασκευή σκυροδέματος σε κυλινδρικό αναδευτήρα. ....	115

Εικόνα 5.15: Δοκιμή κάθισης: (α) συμπλήρωση κώνου με σκυρόδεμα (β) συμπύκνωση στρώσης και (γ) μέτρηση κάθισης. ....	117
Εικόνα 5.16: Προσθήκη υπερρευστοποιητή στο μίγμα. ....	117
Εικόνα 5.17: Σκυροδέτηση (α) κυβικού δοκιμίου, (β) κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου (d) 150 mm και ύψους (h) 300 mm, (γ) πρισματικού δοκιμίου και (δ) κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου (d) 100 mm και ύψους (h) 200 mm. ....	118
Εικόνα 5.18: Κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος στη μηχανή θραύσης. ....	120
Εικόνα 5.19: Δοκιμή αντοχής σε κάμψη: (α) πρισματικό δοκίμιο σκυροδέματος στη μηχανή κάμψης, (β) αστοχία δοκιμίου σε καμπτική καταπόνηση. ....	121
Εικόνα 5.20: Κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος στη μηχανή θραύσης. ....	122
Εικόνα 5.21: Δοκιμή προσδιορισμού στατικού μέτρου ελαστικότητας σκυροδεμάτων: (α) επικόλληση ηλεκτρομηκυστόμετρων, (β) πειραματική διάταξη. ....	123
Εικόνα 5.22: Δοκιμή προσδιορισμού ανοικτού πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας σκυροδεμάτων. ....	125
Εικόνα 5.23: Δοκιμή προσδιορισμού τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας σκυροδέματος. ....	126
Εικόνα 5.24: Τριαξονικό κελί "Hassler cell (Green et al., 1999). ....	127
Εικόνα 5.25: Διάταξη για προσδιορισμό της διαπερατότητας σκυροδέματος (1 = τριαξονικό κελί, "Hassler cell", 2 = συσσωρευτής αζώτου, 3 = χρωματογραφική αντλία). ....	128
Εικόνα 5.26: Διάταξη για μέτρησης της αντίστασης στη διείσδυση χλωριόντων. ....	129
Εικόνα 5.27: Προσθήκη νερού και ανάμιξη υλικών για παρασκευή κονιαμάτων. ....	130
Εικόνα 5.28: Δοκιμή εργασιμότητας: (α) τράπεζα εξάπλωσης, (β) μέτρηση εξάπλωσης κονιάματος. ....	132
Εικόνα 5.29: Συμπύκνωση κονιαμάτων στη συσκευή συμπύκνωσης. ....	133
Εικόνα 5.30: Συντήρηση δοκιμίων κονιαμάτων σε μήτρες που καλύπτονται με γυαλί. ...	133
Εικόνα 5.31: Αστοχία πρισματικού δοκιμίου κονιάματος σε καμπτική καταπόνηση. ....	134
Εικόνα 5.32: Δοκίμιο κονιάματος κατά τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη. ....	135

Εικόνα 5.33: Δοκιμή προσδιορισμού στατικού μέτρου ελαστικότητας κονιαμάτων: (α) επικόλληση ηλεκτρομηκυνσιόμετρων, (β) πειραματική διάταξη.....	136
Εικόνα 5.34: Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου ελαστικότητας κονιάματος.....	137
Εικόνα 5.35: Δοκιμή προσδιορισμού ανοικτού πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας κονιάματος.....	138
Εικόνα 5.36: Δοκιμή προσδιορισμού τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας κονιάματος.....	139
Εικόνα 5.37: Κυβικά δοκίμια εμβαπτισμένα μέσα σε κορεσμένο διάλυμα θειικού μαγνησίου.....	140
Εικόνα 5.38: Κυβικά δοκίμια κατά την φάση ξήρανσης σε φούρνο.....	140
Εικόνα 5.39: Πολωτικό μικροσκόπιο.....	142
Εικόνα 5.40: Αρχή λειτουργίας ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Γκοργκόλης, 2015).....	143
Εικόνα 5.41: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.....	145
Εικόνα 7.1: (α) Σκυρόδεμα C6, (β) σκυρόδεμα C1.....	221
Εικόνα 7.2: Κυβικά δοκίμια κονιαμάτων CM1-CM3. Η στήλη αριστερή υποδεικνύει το δοκίμιο πριν ξεκινήσει η δοκιμή κρυστάλλωσης, και δεξιά το δοκίμιο μετά από 15 κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης.....	247
Εικόνα 7.3: Κυβικά δοκίμια κονιαμάτων CM4-CM6. Η στήλη αριστερή υποδεικνύει το δοκίμιο πριν ξεκινήσει η δοκιμή κρυστάλλωσης, και δεξιά στήλη μετά από 15 κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης.....	248
Εικόνα 7.4: Κονίαμα CM1: (α) βασालτικά τεμάχια, (β) έντονα εξαλλοιωμένα αδρανή (B: βασάλτης, P: πόροι, Act: ακτινόλιθος). Κάθετα nicols.....	266
Εικόνα 7.5: Κονίαμα CM2: (α) γαββρικά και διαβασικά τεμάχια, (β) υγιές πλαγιόκλαστο (G: γάββρος, D: διαβάσης, Pl: πλαγιόκλαστο). Κάθετα nicols.....	267
Εικόνα 7.6: (α) Κονίαμα CM4, (β) Κονίαμα CM5 (P: πόροι, το κόκκινο περίγραμμα παρουσιάζει τα όρια των κόκκων του αδρανούς). Κάθετα nicols.....	268
Εικόνα 7.7: Κονίαμα CM12: (α) παρουσία μοσχοβίτη, (β) πορώδες αδρανές (M: μοσχοβίτης, P: πόροι). Κάθετα nicols.....	269

Εικόνα 7.8: Κονίαμα CM3: (α) παρουσία χλωρίτη, (β) παρουσία ακτινόλιθου (Cl: χλωρίτης, Act: ακτινόλιθος). Κάθετα nicols.....	269
Εικόνα 7.9: (α) Κονίαμα CM7: (β) Κονίαμα CM9 (Cl: χλωρίτης, Pl: πλαγιόκλαστο). Κάθετα nicols.....	270
Εικόνα 7.10: (α) Κονίαμα CM15, κάθετα nicols, (β) Κονίαμα CM16, παράλληλα nicols (M: μοσχοβίτης, F: απολίθωμα (τρηματοφόρα)).....	271
Εικόνα 7.11: Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI), όπου φαίνεται το κονίαμα CM1. (α) παρουσία θεικών αλάτων ( $MgSO_4$ ) και ρωγμών και (β) διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών (ΕΠ38) και τσιμεντόπαστας (P: πόροι).....	272
Εικόνα 7.12: Εικόνα δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI) όπου φαίνεται το κονίαμα CM1. (α) παρουσία θεικών αλάτων ( $MgSO_4$ ) και (β) εικόνα EDX με ανίχνευση θείου (S).....	272
Εικόνα 7.13: Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI): (α) κονίαμα CM2 και (β) κονίαμα CM3 (σε κύκλο η παρουσία μικρορωγμών).....	274
Εικόνα 7.14: Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI): (α) κονίαμα CM4 και (β) κονίαμα CM5.....	275
Εικόνα 7.15: Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI): (α) κονίαμα CM6 και (β) κονίαμα CM12.....	275
Εικόνα Γ.0.1: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτινών X διαβασικών αδρανών.....	332
Εικόνα Γ.0.2: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτινών X ασβεστολιθικών αδρανών.....	333
Εικόνα Γ.0.3: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτινών X ασβεσταρενιτικών αδρανών.....	334

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 4.1: Πωλήσεις αδρανών υλικών από το 1993 μέχρι το 2016 (mt: μετρικοί τόνοι).....	72
Διάγραμμα 4.2: Αποτελέσματα δοκιμής απορροφητικότητας άμμων σε νερό (EN 1097-6). .....	85
Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή αποσάθρωσης με την χρήση επταένυδρου θεικού μαγνησίου ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) και άνυδρου θεικού νατρίου ( $Na_2SO_4$ ). .....	148
Διάγραμμα 6.2: Αποτελέσματα δοκιμής αποσάθρωσης (S) με την χρήση $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ και $Na_2SO_4$ κατά EN 1367-2:1998 (Ioannou et al., 2011). ....	150
Διάγραμμα 6.3: Συσχετισμός αποσάθρωσης θεικού μαγνησίου (MS) και απορροφητικότητας σε νερό (WA) (πράσινο: διαβασικά δείγματα, πορτοκαλί: ανθρακικά δείγματα).....	151
Διάγραμμα 6.4: Αποτελέσματα δοκιμής ισοδύναμου άμμου (SE) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά. ....	156
Διάγραμμα 6.5: Αποτελέσματα δοκιμής μπλε του μεθυλενίου (MB) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.....	158
Διάγραμμα 6.6: Αποτελέσματα δοκιμής απορροφητικότητας (WA) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.....	159
Διάγραμμα 6.7: Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά. ....	161
Διάγραμμα 6.8: Αποτελέσματα δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (MS) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά. Η κόκκινη γραμμή καθορίζει το ανώτατο επιτρεπτό όριο απώλειας με βάση το EN 12620.....	162

Διάγραμμα 6.9: Αποτελέσματα δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.....	164
Διάγραμμα 6.10: Αποτελέσματα δοκιμής αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.....	165
Διάγραμμα 6.11: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (α) της περιεκτικότητας σε λωμοντίτη (Lmt), (β) της περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl) και (γ) του ποσοστού λεπτών (f) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.....	170
Διάγραμμα 6.12: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και (α) της περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl), (β) της περιεκτικότητας σε αργιλικά και (γ) της περιεκτικότητας σε λωμοντίτη (Lmt) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.....	171
Διάγραμμα 6.13: Συσχέτιση μεταξύ της φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και (α) της περιεκτικότητας σε ζεόλιθους (Zeo) και (β) της περιεκτικότητας σε ασβεσίτη (Cal) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών. ....	173
Διάγραμμα 6.14: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και (α) του περιεχόμενου σε λωμοντίτη (Lmt) και (β) του περιεχόμενου σε ζεολίθους, αργιλικά ορυκτά και χλωρίτη (Zeolite, Clay, Chlorite) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών. ....	174
Διάγραμμα 6.15: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) και (α) της περιεκτικότητας σε λωμοντίτη (Lmt) και (β) της περιεκτικότητας σε επίδοτο (Ep) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.....	175
Διάγραμμα 6.16: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (α) του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_o/H$ ) και (β) του λόγου δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών ( $S_p/P$ ) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.....	178
Διάγραμμα 6.17: Συσχέτιση μεταξύ του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_o/H$ ) και (α) του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και (β) του συντελεστή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.....	178
Διάγραμμα 6.18: Συσχέτιση μεταξύ του μικροπετρογραφικού δείκτη αντοχής ( $I_{ps}$ ) και του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.....	182

Διάγραμμα 6.19: Συσχέτιση μεταξύ (α) του συντελεστή Micro-Deval (MD) και του μικροπετρογραφικού δείκτη αντοχής ( $I_{ps}$ ) και (β) του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και του δείκτη αντικατάστασης ( $I_{rep}$ ). .....	183
Διάγραμμα 6.20: Συσχέτιση της περιεκτικότητας σε μοσχοβίτη (Ms) με (α) το συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (β) το συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) των υπό εξέταση ασβεστολιθικών αδρανών.....	184
Διάγραμμα 6.21: Συσχέτιση του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και της περιεκτικότητας σε δολομίτη (Dol) των υπό εξέταση ασβεστολιθικών αδρανών. ....	186
Διάγραμμα 6.22: Συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και (α) της περιεκτικότητας σε ασβεστίτη (Cal) και (β) της περιεκτικότητας σε δολομίτη (Dol) των υπό εξέταση ασβεστολιθικών αδρανών.....	187
Διάγραμμα 6.23: Συσχέτιση συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (α) περιεχόμενου σε χαλαζία (Qzt) και (β) περιεχόμενου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.....	189
Διάγραμμα 6.24: Συσχέτιση συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και περιεχόμενου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.....	190
Διάγραμμα 6.25: Συσχέτιση συντελεστή απορροφητικότητας σε νερό (WA) και περιεχόμενου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.....	190
Διάγραμμα 6.26: Συσχέτιση μεταξύ (α) φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl) και (β) ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) και περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών. ....	191
Διάγραμμα 6.27: Συσχέτιση συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και (α) περιεκτικότητας σε χαλαζία (Qzt), (β) περιεκτικότητας σε ασβεστίτη (Cal) και (γ) περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών. ....	192
Διάγραμμα 6.28: Συσχέτιση συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS) και περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.....	193
Διάγραμμα 6.29: Συσχέτιση συντελεστή Micro-Deval (MD) και (α) περιεχομένου σε χαλαζία (Qzt) και (β) περιεχόμενου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.....	194

Διάγραμμα 6.30: Συσχετισμός ισοδύναμου άμμου (SE) και μπλε του μεθυλενίου (MB) (πράσινο: διαβασικά δείγματα, κίτρινο: ασβεστολιθικά δείγματα, πορτοκαλί: ασβεσταρενιτικά δείγματα).....	200
Διάγραμμα 6.31: Συσχετισμός απορροφητικότητας σε νερό (WA) και ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) (πράσινο: διαβασικά δείγματα, κίτρινο: ασβεστολιθικά δείγματα, πορτοκαλί: ασβεσταρενιτικά δείγματα, μαύρο: όλα τα δείγματα). ....	202
Διάγραμμα 6.32: Συσχετισμός συντελεστών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD). ....	204
Διάγραμμα 6.33: Διεργαστηριακά αποτελέσματα αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) (ΠΚ: Πανεπιστήμιο Κύπρου, ΤΔΕ: Τμήμα Δημοσίων Έργων). ....	206
Διάγραμμα 7.1: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή. Η κόκκινη γραμμή καθορίζει την ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή με βάση το σχεδιασμό μίγματος. ....	218
Διάγραμμα 7.2: Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη ( $f_{cf}$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.....	218
Διάγραμμα 7.3: Αποτελέσματα αντοχής σε εφελκυσμό ( $f_{ct}$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.....	219
Διάγραμμα 7.4: Αποτελέσματα στατικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{mod}$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή. ....	219
Διάγραμμα 7.5: Αποτελέσματα τριχοειδούς απορροφητικότητας (S) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.....	224
Διάγραμμα 7.6: Αποτελέσματα πορώδους ( $f_o$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή. ....	224



Διάγραμμα 7.7: Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.....	225
Διάγραμμα 7.8: Αποτελέσματα διαπερατότητας (K) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή. ....	225
Διάγραμμα 7.9: Συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) και πορώδους ( $f_o$ ) σκυροδεμάτων (28 ημέρες), (πράσινο: διαβασικά αδρανή και κίτρινο: ασβεστολιθικά αδρανή). ....	228
Διάγραμμα 7.10: Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	233
Διάγραμμα 7.11: Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη ( $f_{cf}$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	233
Διάγραμμα 7.12: Αποτελέσματα στατικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{mod}$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	234
Διάγραμμα 7.13: Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{dyn}$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	234
Διάγραμμα 7.14: Αποτελέσματα τριχοειδούς απορροφητικότητας (S) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	237
Διάγραμμα 7.15: Αποτελέσματα πορώδους ( $f_o$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.....	237
Διάγραμμα 7.16: Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά και πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά. ....	238

Διάγραμμα 7.17: Αποτελέσματα διαπερατότητας (K) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά και πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά. ....	238
Διάγραμμα 7.18: Συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) και πορώδους ( $f_o$ ) κονιαμάτων στις 28 ημέρες (πράσινο: διαβασικά δείγματα, πορτοκαλί: ανθρακικά δείγματα).....	240
Διάγραμμα 7.19: Συσχέτιση μεταξύ λόγου w/c και θλιπτικής αντοχής ( $f_c$ ) κονιαμάτων..	241
Διάγραμμα 7.20: Συσχέτιση μεταξύ λόγου w/c και ( $\alpha$ ) συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) διαβασικών αδρανών και ( $\beta$ ) ποσοστού λεπτών ( $f$ ) ασβεστολιθικών αδρανών. ....	243
Διάγραμμα 7.21: Συσχέτιση συντελεστή ισοδύναμου άμμου ανθρακικών αδρανών (SE) και διαπερατότητας (K) κονιαμάτων. ....	250
Διάγραμμα 7.22: Συσχέτιση συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και ( $\alpha$ ) πορώδους ( $f_o$ ) και ( $\beta$ ) θλιπτικής αντοχής ( $f_c$ ) κονιαμάτων με διαβασικά αδρανή. ....	252
Διάγραμμα 7.23: Συσχέτιση ( $\alpha$ ) πορώδους ( $f_o$ ) και περιεκτικότητας σε αργιλικά (Clay) και ( $\beta$ ) θλιπτικής αντοχής ( $f_c$ ) και περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl), στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή. ....	253
Διάγραμμα 7.24: Συσχέτιση συντελεστή αποσάθρωσης (MS) και ( $\alpha$ ) δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{dyn}$ ) και ( $\beta$ ) πορώδους ( $f_o$ ) κονιαμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή.....	255
Διάγραμμα 7.25: Συσχέτιση του συντελεστή Micro-Deval (MD) και ( $\alpha$ ) της αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ), ( $\beta$ ) του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{dyn}$ ) και ( $\gamma$ ) της πυκνότητας ( $\rho_b$ ) των κονιαμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή. ....	257
Διάγραμμα Δ.0.1: Κοκκομετρικές καμπύλες αδρανών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή σκυροδεμάτων και κονιαμάτων ( $\alpha$ ) διαβασικά αδρανή και ( $\beta$ ) ανθρακικά αδρανή. ....	335

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα αποσάθρωσης (MS) και υδαταπορροφητικότητας (WA) χονδρόκοκκων αδρανών (Φούρναρη, 2009).....	84
Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα συντελεστή αποσάθρωσης (MS) λεπτόκοκκων αδρανών (Φούρναρη, 2009).....	86
Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα αποσάθρωσης (MS) λεπτόκοκκων αδρανών από την οροσειρά του Πενταδακτύλου (Φούρναρη, 2009).....	87
Πίνακας 5.1: Κωδικοί - λιθότυπος αδρανών υλικών που εξετάστηκαν κατά την 1 <sup>η</sup> φάση.	90
Πίνακας 5.2: Κωδικοί - λιθότυπος αδρανών υλικών που εξετάστηκαν κατά τη 2 <sup>η</sup> φάση και κωδικοί σκυροδεμάτων και κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με επιλεγμένα δείγματα.	92
Πίνακας 5.3: Εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα υπό μελέτη αδρανή υλικά. ....	95
Πίνακας 5.4: Ελάχιστη ποσότητα δείγματος για δοκιμή κοκκομετρικής διαβάθμισης, ανάλογα με το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος του κόκκου του αδρανούς. ....	98
Πίνακας 5.5: Μέγεθος οπών κόσκινων για δοκιμή κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στις δοκιμές της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα με οπή $\leq 8$ mm. ....	99
Πίνακας 5.6: Μεγέθη κλασμάτων αδρανών και απαραίτητη μάζα υλικού για δοκιμή αποσάθρωσης.....	107
Πίνακας 5.7: Διαβάθμιση υλικού που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής.....	111
Πίνακας 5.8: Σύνθεση μιγμάτων και κάθιση νωπών σκυροδεμάτων. ....	116
Πίνακας 5.9: Διαπερατότητα χλωριόντων με βάση το ηλεκτρικό φορτίο που διαπέρασε τα δείγματα (ASTM C1202-12). ....	129
Πίνακας 5.10: Συνθέσεις κονιαμάτων με διαβασικά αδρανή. ....	131
Πίνακας 5.11: Συνθέσεις κονιαμάτων με ασβεστολιθικά (L) και ασβεσταρενιτικά (C) αδρανή. ....	131

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και θειικό νάτριο (EN 1367-2), και απορροφητικότητας σε νερό (WA), σε αδρανή υλικά που δειγματίστηκαν κατά την 1 <sup>η</sup> φάση της παρούσας διατριβής.....	148
Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα δοκιμών ισοδύναμου άμμου (SE), μπλε του μεθυλενίου (MB), απορροφητικότητας σε νερό (WA), αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και νάτριο (SS), αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD), φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ), ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) και κορεσμένης και επιφανειακά ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{ssd}$ ) σε αδρανή υλικά που δειγματίστηκαν κατά τη 2 <sup>η</sup> φάση της παρούσας διατριβής.....	153
Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων (XRD).....	154
Πίνακας 6.4: Πετρογραφικές παραμέτροι (S <sub>o</sub> : μαλακά ορυκτά, H: σκληρά ορυκτά, S <sub>e</sub> : δευτερογενή ορυκτά, P: πρωτογενή ορυκτά).....	177
Πίνακας 6.5: Μικροπετρογραφικοί δείκτες για τα υπό εξέταση διαβασικά αδρανή.....	181
Πίνακας 6.6: Χημικές αναλύσεις στα υπό εξέταση διαβασικά αδρανή της 2 <sup>ης</sup> φάσης. ....	196
Πίνακας 6.7: Χημικές αναλύσεις στα υπό εξέταση ασβεστολιθικά αδρανή της 2 <sup>ης</sup> φάσης. ....	197
Πίνακας 6.8: Χημικές αναλύσεις στα υπό εξέταση ασβεσταρενιτικά αδρανή της 2 <sup>ης</sup> φάσης. ....	198
Πίνακας 6.9: Συντελεστής συσχέτισης $r$ και p-value για τις γραμμικές συναρτήσεις που προέκυψαν μεταξύ των διαφόρων ιδιοτήτων των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν (εξαιρείται το δείγμα ΕΠ 38). Στις συσχετίσεις SS-WA, SS-MS και MS-WA λήφθηκαν υπόψη και τα αποτελέσματα δοκιμών της 1 <sup>ης</sup> φάσης. ....	199
Πίνακας 7.1: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδεμάτων ( $f_c$ = αντοχή σε θλίψη, $f_{cf}$ = αντοχή σε κάμψη, $f_{ct}$ = αντοχή σε εφελκυσμό, $E_{mod}$ = στατικό μέτρο ελαστικότητας, M.O. = μέσος όρος, τ.α. = τυπική απόκλιση, n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή). ....	215
Πίνακας 7.2: Φυσικές ιδιότητες σκυροδεμάτων (S = τριχοειδής απορροφητικότητα, $f_o$ = πορώδες, $\rho_b$ = φαινόμενη πυκνότητα, K = διαπερατότητα). Τα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορροφητικότητας είναι κανονικοποιημένα στους 20°C.....	216
Πίνακας 7.3: Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων σε σκυροδέματα (n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, N/A (very high) = πολύ ψηλή τιμή, εκτός ορίων), C= Coulombs. ....	217

Πίνακας 7.4: Μέτρο λεπτότητας (FM) και ποσοστό λεπτών (f) αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδετήσεις. ....	222
Πίνακας 7.5: Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων ( $f_c$ = αντοχή σε θλίψη, $f_{cf}$ = αντοχή σε κάμψη, $E_{mod}$ = στατικό μέτρο ελαστικότητας, $E_{dyn}$ = δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, M.O. = μέσος όρος, τ.α. = τυπική απόκλιση, n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή). ....	231
Πίνακας 7.6: Φυσικές ιδιότητες κονιαμάτων ( $S$ = τριχοειδής απορροφητικότητα, $f_o$ = πορώδες, $\rho_b$ = φαινόμενη πυκνότητα, $K$ = διαπερατότητα, n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, $f>s$ = πίεση ροής ψηλότερη από μέγιστη δυνατή περιβάλλουσα πίεση). Τα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορροφητικότητας είναι κανονικοποιημένα στους 20°C. ....	232
Πίνακας 7.7: Σύγκριση ιδιοτήτων κονιαμάτων CM2, CM3 και CM17 ( $f_c$ = αντοχή σε θλίψη, $f_{cf}$ = αντοχή σε κάμψη, $S$ = τριχοειδής απορροφητικότητα, $f_o$ = πορώδες, $\rho_b$ = φαινόμενη πυκνότητα, τ.α. = τυπική απόκλιση). ....	244
Πίνακας 7.8: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων στις 28 ημέρες ( $f_{cf}$ = αντοχή σε κάμψη και $E_{mod}$ = στατικό μέτρο ελαστικότητας). Όπου: F: σημαντικότητα, p-value: τιμή σημαντικότητας, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης, $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού. ....	260
Πίνακας 7.9: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις φυσικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων στις 28 ημέρες ( $f_o$ = πορώδες και $S$ = τριχοειδής απορροφητικότητα). Όπου: F: σημαντικότητα, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης, p-value: τιμή σημαντικότητας, $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού. ....	261
Πίνακας 7.10: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων στις 28 ημέρες ( $f_c$ = αντοχή σε θλίψη, $f_{cf}$ = αντοχή σε κάμψη, $E_{mod}$ = στατικό μέτρο ελαστικότητας, $E_{dyn}$ = δυναμικό μέτρο ελαστικότητας). Όπου: F: σημαντικότητα, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης, p-value: τιμή σημαντικότητας, $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού. ....	262

Πίνακας 7.11: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων στις 28 ημέρες ( $f_0$ = πορώδες, S = τριχοειδής απορροφητικότητα, $\rho_b$ = φαινόμενη πυκνότητα, K = διαπερατότητα). Όπου: F: σημαντικότητα, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης, p-value: τιμή σημαντικότητας, $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού.....	264
Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα δοκιμής αντίστασης σε κρυστάλλωση αλάτων. Οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν αύξηση μάζας. ....	273
Πίνακας A.0.1: Καθορισμός ορίων των διαφόρων ιδιοτήτων για αδρανή σκυροδεμάτων σύμφωνα με την Κ.Δ.Π. 164/2011.....	327
Πίνακας A.0.2: Καθορισμός ορίων των διαφόρων ιδιοτήτων για αδρανή κονιαμάτων σύμφωνα με την Κ.Δ.Π. 164/2011.....	329
Πίνακας B.0.1: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του συστήματος περιθλασιμετρίας ακτίνων X.....	330
Πίνακας B.0.2: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του συστήματος φθορισμού ακτινών X.....	330
Πίνακας B.0.3: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του πολωτικού μικροσκοπίου. ..	331
Πίνακας B.0.4: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.....	331
Πίνακας Δ.0.5: Στερεή πυκνότητα σκυροδεμάτων και κονιαμάτων ( $\rho_s$ ) και πυκνότητα ορυκτών των αδρανών ( $\rho_{cm}$ ).....	335
Πίνακας Δ.0.6: Αποσάθρωση κατά EN 1367-2 (MS) και απορροφητικότητα κατά EN 1097-6 (WA) υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδέματα με διαβασικά αδρανή, (D: Διαβασικά, C: Ασβεσταρενιτικά).....	336
Πίνακας Δ.0.7: Αποσάθρωση με θειικό μαγνήσιο κατά EN 1367-2 (MS) και απορροφητικότητα κατά EN 1097-6 (WA) υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή, (L: Ασβεστολιθικά, C: Ασβεσταρενιτικά).....	337

## 1 Εισαγωγή

### 1.1 Γενικά

Τα αδρανή είναι γεωλογικά υλικά αποτελούμενα από ορυκτά, συνήθως σε κοκκώδη μορφή. Χρησιμοποιούνται σε διαφορετικά μεγέθη (χονδρόκοκκα ή/και λεπτόκοκκα) για την παρασκευή σύνθετων δομικών υλικών (π.χ. σκυροδέματα, κονιάματα) (Alexander & Mindess, 2005). Τα αδρανή πρέπει να είναι καθαρά, ανθεκτικά, σκληρά και απαλλαγμένα από ουσίες που δύναται να επηρεάσουν το τελικό προϊόν (Kosmatka et al., 2003). Η επιλογή των κατάλληλων αδρανών για χρήση στην κατασκευαστική βιομηχανία προϋποθέτει γνώση τόσο των ιδιοτήτων, όσο και της συμπεριφοράς τους. Ιδιότητες, όπως η ορυκτολογική σύνθεση, η δομή, η υφή, το σχήμα, το μέγεθος, η διαβάθμιση και η απορροφητικότητα των αδρανών επηρεάζουν την ποιότητα του σκυροδέματος/κονιάματος. Δεδομένου ότι τα αδρανή υλικά αποτελούν τη μεγαλύτερη σε αναλογία πρώτη ύλη για την παρασκευή σκυροδέματος και κονιαμάτων, η ποιότητά τους ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά και την ανθεκτικότητα των δύο προαναφερθέντων υλικών (Sengul et al., 2002). Για το λόγο αυτό, επιβάλλεται ο έλεγχος των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών, πριν από την χρήση τους, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Με σκοπό τον έλεγχο των αδρανών, καθιερώθηκαν παγκόσμια κατευθυντήριες γραμμές και πρότυπα, ανάλογα με την προβλεπόμενη χρήση τους, για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους. Οι προδιαγραφές για τα αδρανή που προορίζονται για χρήση στην παραγωγή σύνθετων οικοδομικών υλικών καλύπτονται από ορισμένα πρότυπα. Αυτά τα πρότυπα καθορίζουν τις απαιτήσεις για την απόδοση των αδρανών, τη δειγματοληψία και τις δοκιμές που πρέπει να πραγματοποιηθούν για τον έλεγχό τους.

Τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα πρότυπα είναι εκείνα που καθορίστηκαν από την ASTM (Αμερικανική Εταιρεία Δοκιμών και Υλικών), ένα οργανισμό τυποποίησης που αναπτύσσει και δημοσιεύει συναινετικά τεχνικά πρότυπα για ένα ευρύ φάσμα υλικών, προϊόντων, συστημάτων και υπηρεσιών (ASTM International, 2017). Όσον αφορά την Ευρωπαϊκή Ένωση, υπάρχει μια τεχνική επιτροπή (TC 154 Aggregates), η οποία έχει την ευθύνη για την ετοιμασία προτύπων που αφορούν δοκιμές σε αδρανή υλικά. Από το 1987, οι περισσότερες από τις απαιτήσεις που περιλαμβάνονταν σε σχετικά εθνικά πρότυπα στην Ευρώπη έχουν εναρμονιστεί και αντικατασταθεί από τα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN).

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Τα ευρωπαϊκά πρότυπα έχουν κοινή διάρθρωση και καλύπτουν γενικές απαιτήσεις για όλα τα αδρανή. Ωστόσο, λόγω των διαφορετικών κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν στις διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες, συμπεριλαμβάνονται στα ευρωπαϊκά πρότυπα και διαφορετικές απαιτήσεις για τα αδρανή. Επομένως, οι εθνικές αρχές μπορούν να εισαγάγουν τις σχετικές κατηγορίες στην χώρα τους (Schouenborg & Akesson, 2004). Όλα τα πρότυπα αναθεωρούνται και τροποποιούνται κατά διαστήματα (Alexander & Mindess, 2005).

Η παραγωγή και η κατανάλωση των αδρανών υλικών ποικίλει, αναλόγως της ανάπτυξης μιας χώρας ή περιοχής, την οικονομική της δραστηριότητα, τη φύση του έργου που κατασκευάζεται κ.α. (Alexander & Mindess, 2005). Ο Ortiz (2016) αναφέρει ότι η παγκόσμια ζήτηση για αδρανή προσεγγίζει περίπου τα 40 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως, με την Κίνα να παράγει 15 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως, και να ακολουθούν η Ινδία και άλλες Ασιατικές χώρες με περίπου 10 δισεκατομμύρια τόνους ετησίως.

Οι Danielsen & Kuznetsova (2016) αναφέρουν ότι πριν από την οικονομική κρίση, η παγκόσμια ζήτηση σε αδρανή παρουσίαζε αυξητικές τάσεις περίπου 4,7% ανά έτος. Το 2014, μετά από 7 χρόνια κατά τα οποία η παραγωγή αδρανών στην Ευρώπη μειώθηκε κατά 30% λόγω της ευρύτερης οικονομικής κρίσης που έπληξε κυρίως τον κατασκευαστικό τομέα, παρατηρήθηκε αύξηση στην παραγωγή αδρανών υλικών περίπου 1,5% σε σχέση με το 2013 (Ortiz, 2016).

Σύμφωνα με την Αμερικανική Υπηρεσία Γεωλογικής Επισκόπησης (USGS), στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής εκτιμάται ότι 1,01 δισεκατομμύρια μετρικοί τόνοι άμμων και χαλικιών παρήχθησαν και μεταφέρθηκαν προς κατανάλωση για το έτος 2016, σημειώνοντας αύξηση 7% σε σύγκριση με την παραγωγή του 2015. Με σημαντική αύξηση της κατασκευαστικής δραστηριότητας σε ολόκληρη τη χώρα κατά το 2016, και σημαντική ανάκαμψη στον ιδιωτικό τομέα και την ιδιωτική οικοδομική δραστηριότητα, φαινόμενα που είχε να παρατηρηθούν από το 2005, αναμένεται ότι η κατανάλωση των αδρανών θα συνεχίσει την αυξητική της πορεία (Willett, 2017).

Στην Ευρώπη, τα αδρανή θεωρούνται τα σημαντικότερα υλικά της εξορυκτικής βιομηχανίας, όσον αφορά την παραγωγή, αλλά και τον όγκο που εξορύσσεται (Schouenborg & Akesson, 2004). Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση της ένωσης των παραγωγών αδρανών υλικών της Ευρώπης (UEPG), για το έτος 2015 η παραγωγή των αδρανών από τα 28 κράτη μέλη, μαζί με τις χώρες του ΕΖΕΣ (Ευρωπαϊκή Ζώνη



## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Ελευθέρων Συναλλαγών), ήταν περίπου στα 2,6 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους, με τη Γερμανία να παράγει τη μεγαλύτερη ποσότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες χώρες, που ανήλθε στα 564 εκατομμύρια μετρικούς τόνους. Ο μέσος όρος της συνολικής ζήτησης αδρανών υλικών στην Ευρώπη είναι 5 τόνοι ανά κάτοικο ετησίως. Περίπου το 87% όλων των παραγόμενων αδρανών είναι φυσικής προελεύσεως από λατομεία, ενώ περίπου το 8% προέρχεται από ανακυκλωμένα αδρανή, και το υπόλοιπο ποσοστό προέρχεται από θαλάσσια και τεχνητά αδρανή (Ortiz, 2016).

Στην Κύπρο, η κατασκευαστική βιομηχανία αποτελεί (με εξαίρεση τα τελευταία χρόνια, λόγω της οικονομικής κρίσης) τη μεγαλύτερη οικονομική δραστηριότητα στο νησί, και σε αυτήν επενδύεται μεγάλο μέρος των συνολικών επενδύσεων του κράτους. Η χώρα θεωρείται "αυτάρκης" όσον αφορά τις πρώτες ύλες για οικοδομές, δρόμους, υδατοφράκτες, μαρίνες, λιμάνια και άλλα κατασκευαστικά έργα. Παρόλα αυτά, δεν υπάρχουν αξιόπιστα στοιχεία σε σχέση με την ποιότητα των τοπικών αδρανών υλικών, πέρα από κάποιες μεμονωμένες ερευνητικές προσπάθειες (π.χ. Φούρναρη, 2009) που ολοκληρώθηκαν στο σχετικά πρόσφατο παρελθόν.

Με βάση τα πιο πάνω, και παρά τη σημαντική μείωση στην παραγωγή αδρανών που παρατηρείται τα τελευταία χρόνια στην Κύπρο, είναι προφανές ότι οποιαδήποτε έρευνα σχετίζεται με τα υλικά αυτά είναι σημαντική, αφού αποτελούν ουσιαστικό μέρος της οικονομίας της χώρας. Μείζονος σημασίας είναι ο ποιοτικός έλεγχος των αδρανών υλικών, και η μελέτη της επίδρασής τους στην ποιότητα των σκυροδεμάτων και κονιαμάτων, ώστε να επιλέγονται τέτοια υλικά που θα διασφαλίζουν την ανθεκτικότητα των κατασκευών.

### **1.2 Σκοπός Διατριβής**

Σκοπός της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής είναι, κατά κύριο λόγο, ο έλεγχος της ποιότητας των τοπικών λεπτόκοκκων αδρανών, και η συσχέτισή της με την ποιότητα του τελικού προϊόντος (σκυροδέματος και κονιαμάτων).

Οι επιμέρους στόχοι είναι:

- Πρότυπος έλεγχος ιδιοτήτων τοπικών λεπτόκοκκων αδρανών υλικών (με έμφαση στις ιδιότητες που εκτιμούν την ανθεκτικότητά τους).
- Συσχέτιση της ορυκτολογικής σύστασης των αδρανών με την ποιότητά τους και την ποιότητα του τελικού προϊόντος (σκυροδέματος και κονιάματος).

### Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

- Διερεύνηση της πιθανότητας αντικατάστασης της δοκιμής αποσάθρωσης σε λεπτόκοκκα αδρανή από άλλη δοκιμή προσδιορισμού της ανθεκτικότητας των αδρανών, η οποία να αντικατοπτρίζει την πραγματική εικόνα της ποιότητάς τους και να εκπονείται σε σχετικά πιο σύντομο χρονικό διάστημα.
- Συσχέτιση φυσικο-μηχανικών ιδιοτήτων αδρανών υλικών και τελικού προϊόντος.
- Μελέτη της δράσης αλάτων σε κονιάματα.
- Συσχέτιση πορώδους/απορροφητικότητας αδρανών με διείδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα.
- Μελέτη της ζώνης διεπιφάνειας αδρανών - συνδετικού υλικού με ηλεκτρονική/οπτική μικροσκοπία.

Σημειώνεται ότι μέρος της έρευνας που εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσας Διδακτορικής Διατριβής χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εσωτερικών, μέσω της Εθνικής Τεχνικής Επιτροπής Αμμοχαλικών του Κυπριακού Οργανισμού Τυποποίησης (CYS TE 02), με στόχο τον επανέλεγχο τοπικών, λεπτόκοκκων ( $d/D=0/4$  mm) αδρανών υλικών, προκειμένου να γίνουν εισηγήσεις ως προς τη διατήρηση ή/και επανακαθορισμό των ορίων των εργαστηριακών ελέγχων που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011. Ως εκ τούτου, η παρούσα διατριβή καταλήγει και σε συστάσεις σε σχέση με τα υφιστάμενα όρια που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011.

### **1.3 Δομή Διατριβής**

Η δομή της παρούσας διατριβής βασίζεται σε 8 κεφάλαια, τα οποία έχουν το εξής περιεχόμενο:

- Στο παρόν κεφάλαιο δίνεται έμφαση στη σημασία του ελέγχου των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών και στα πρότυπα που ακολουθούνται σε Η.Π.Α. και Ευρώπη. Αναφέρεται επίσης η παγκόσμια κατανάλωση των αδρανών.
- Στο δεύτερο κεφάλαιο ταξινομούνται τα αδρανή, σύμφωνα με τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, και γίνεται περιγραφή του ρόλου τους ως κύριο συστατικό της δομής των διαφόρων κατασκευαστικών υλικών και έργων. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στις ιδιότητες των αδρανών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

διατριβής, και σημειώνονται οι διάφορες συσχετίσεις που προέκυψαν μέσα από τη βιβλιογραφία μεταξύ των ιδιοτήτων αυτών.

- Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται η επίδραση των διαφόρων ιδιοτήτων των αδρανών στην ποιότητα των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων, όπως παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία, και επιχειρείται συσχέτιση των χαρακτηριστικών των αδρανών με τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.
- Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται συνοπτικά η γεωτεκτονική εξέλιξη της Κύπρου. Γίνεται αναφορά στην χρήση αδρανών υλικών κατά την εξέλιξη της οικοδομικής βιομηχανίας στο νησί, και περιγράφεται η ποιότητα και τα χαρακτηριστικά των τοπικών αδρανών υλικών. Επιπλέον, παρουσιάζεται η νομοθεσία που προβλέπεται για τον έλεγχο της ποιότητας των αδρανών υλικών της Κύπρου.
- Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφονται τα αδρανή υλικά που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την παρασκευή σκυροδεμάτων και κονιαμάτων. Ακολούθως, περιγράφεται η μεθοδολογία των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν τόσο σε αδρανή υλικά, όσο και σε σκυροδέματα/κονιάματα που σχεδιάστηκαν και παρασκευαστήκαν στο εργαστήριο.
- Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές γεωμετρικών, φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή, καθώς επίσης και από τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων τους σε θερμικές και καιρικές μεταβολές. Παρουσιάζονται επίσης ημι-ποσοτικά τα αποτελέσματα ορυκτολογικών και χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν σε τοπικά αδρανή υλικά. Ακολούθως, επιχειρείται συσχέτιση της πετρογραφίας των αδρανών με τις ιδιότητές τους, όπως επίσης και των διαφόρων ιδιοτήτων μεταξύ τους. Τα αποτελέσματα συγκρίνονται με διεθνή βιβλιογραφικά δεδομένα.
- Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές προσδιορισμού των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων των σκυροδεμάτων

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

και κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Γίνονται επίσης συγκρίσεις των ιδιοτήτων και της ορυκτολογίας των αδρανών με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Τέλος, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εξέταση στο πολωτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης συγκεκριμένων δειγμάτων κονιαμάτων, τα οποία επιλέχθηκαν κυρίως με βάση την θλιπτική τους αντοχή.

- Στο όγδοο κεφάλαιο παρατίθενται συνοπτικά τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα διατριβή καθώς και κάποιες προτάσεις για μελλοντική έρευνα πάνω στο εν λόγω αντικείμενο.

## 2 Αδρανή υλικά

### 2.1 Γενικά

Ο όρος *αδρανή υλικά* συνήθως χρησιμοποιείται για να χαρακτηρίσει τα κοκκώδη υλικά φυσικής ή βιομηχανικής προέλευσης, αλλά και ανάλογα υλικά ανακύκλωσης, τα οποία χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη στην παραγωγή σύνθετων δομικών υλικών (σκυρόδεμα, κονιάματα κλπ.) και γενικότερα στον κατασκευαστικό τομέα (Vieira, 2015). Η ονομασία τους προέκυψε από την αντίληψη ότι δεν αντιδρούν χημικά, παρά μόνο συγκρατούνται από το συγκολλητικό μέσο με το οποίο αναμιγνύονται. Ωστόσο, στην πραγματικότητα αποτελούν χημικά ενεργά υλικά, τα οποία ελέγχουν τις ιδιότητες και τη συμπεριφορά της μάζας στην οποία συμμετέχουν (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Όπως αναφέρουν οι Neville & Brooks (1993), τα υλικά αυτά δεν θεωρούνται αδρανή γιατί οι ιδιότητές τους (φυσικές, θερμικές, χημικές) επηρεάζουν την απόδοση του σκυροδέματος και των κονιαμάτων. Συγκεκριμένα, πέραν του γεγονότος ότι τα αδρανή θεωρούνται οικονομικά υλικά, χρησιμοποιούνται ευρέως στην οικοδομική βιομηχανία γιατί εξασφαλίζουν σημαντικά πλεονεκτήματα στα σύνθετα δομικά υλικά, συγκρίνοντάς τα για παράδειγμα με την ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα, όπως μεγάλη σταθερότητα όγκου και καλύτερη ανθεκτικότητα.

Στα διάφορα τεχνικά έργα, τα αδρανή υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα, είτε αυτούσια π.χ. ως έρμα σιδηροδρομικών γραμμών, στραγγιστήρια, επιχώματα, φίλτρα διήθησης ή καθαρισμού, υλικά οδοστρωσίας, για την ευστάθεια φυσικών και τεχνητών πρανών, στη σταθεροποίηση κατολισθητικών φαινομένων, ως ευτηκτικά σε βιομηχανικές επεξεργασίες κλπ., είτε με κάποιο συγκολλητικό μέσο για την παρασκευή σκυροδέματος, κονιαμάτων, ασφαλτομιγμάτων κ.α. (Herrick, 1994; Σπυρόπουλος, 2005; Τρεμοπούλου, 2007; Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007). Χρησιμοποιούνται επίσης, αν και σε μικρότερο βαθμό, στην ιατρική, στη γεωργία, σε προϊόντα οικιακής χρήσης, ενώ ολοένα και αυξάνεται η χρησιμότητά τους όσον αφορά στην προστασία του περιβάλλοντος, όπως π.χ. στα φίλτρα περιορισμού των εκπομπών διοξειδίου του θείου από τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (Acton, 2013).

Σύμφωνα με την ετήσια έκθεση παραγωγών αδρανών υλικών της Ευρώπης (UEPG), το 40% της παραγωγής των αδρανών στις Ευρωπαϊκές χώρες είναι τα ασύνδετα αδρανή υλικά, 25% χρησιμοποιείται στην παρασκευή σκυροδέματος, 15% στην παρασκευή

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

προκατασκευασμένου σκυροδέματος, 10% στην παρασκευή ασφαλτικού σκυροδέματος, 5% για προϊόντα αρχιτεκτονικού σκυροδέματος, 3% για αδρανή που χρησιμοποιούνται ως βράχοι θωράκισης (ογκόλιθοι) και 2% για αδρανή που χρησιμοποιούνται ως έρμα σιδηροδρομικών γραμμών (Ortiz, 2016).

Αν αναλογιστεί κανείς ότι για την κατασκευή μιας νέας κατοικίας απαιτούνται συνήθως μέχρι και 400 τόνοι αδρανών υλικών, ενώ για κάθε 1 km αυτοκινητόδρομου απαιτούνται μέχρι και 300,000 τόνοι αδρανών, μπορεί εύκολα να ειπωθεί ότι ο τομέας των αδρανών υλικών είναι μακράν ο μεγαλύτερος μεταξύ των μη ενεργειακών εξορυκτικών βιομηχανιών (Ortiz, 2016). Συνεπάγεται, λοιπόν, ότι η μελέτη και ο χαρακτηρισμός των αδρανών υλικών αποκτά ιδιαίτερη σημασία και καθίσταται επιτακτική, προκειμένου να ελέγχεται η ποιότητά τους και να βελτιστοποιείται η χρήση τους.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η ταξινόμηση των αδρανών με βάση τα διάφορα χαρακτηριστικά τους, ενώ περιγράφεται και ο ρόλος τους ως κύριο συστατικό της δομής των διαφόρων κατασκευαστικών υλικών και έργων. Τέλος, αναλύονται οι ιδιότητες των αδρανών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, και αναφέρονται διάφορες συσχετίσεις μεταξύ αυτών, όπως προέκυψαν μέσα από τη βιβλιογραφία.

### **2.2 Ταξινόμηση αδρανών υλικών**

Τα αδρανή υλικά, ταξινομούνται, μεταξύ άλλων, ανάλογα με τη γεωλογική προέλευση, το μέγεθος, το σχήμα, το ειδικό βάρος κ.α. (Gambhir, 2013). Σε αυτή την ενότητα αναφέρονται μερικές από τις ταξινομήσεις των αδρανών.

#### **2.2.1 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση τον τρόπο σχηματισμού τους**

Ανάλογα με τον τρόπο σχηματισμού τους, τα πετρώματα και κατά συνέπεια τα αδρανή υλικά, διακρίνονται στις τρεις πιο κάτω κατηγορίες:

- *Πυριγενή:* π.χ. γρανίτες, διορίτες, διαβάσης κ.α. τα οποία προκύπτουν από τη στερεοποίηση μάγματος. Τα ορυκτολογικά και ιστολογικά χαρακτηριστικά τους, όπως π.χ. η υφή, ο ιστός, η ορυκτολογική σύσταση, ο βαθμός εξαλλοίωσης και αποσάθρωσης, καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την καταλληλότητά τους για χρήση ως αδρανή υλικά (Κοκκινάκης, 2000; Ρηγόπουλος, 2009).
- *Ιζηματογενή:* π.χ. ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες, εβαπορίτες κ.α. που προκύπτουν από συσσώρευση υλικών τα οποία προέρχονται από αποσάθρωση και διάβρωση προϋπαρχόντων πετρωμάτων. Τα υλικά αυτά, τα οποία βρίσκονται διαλυμένα ή

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

αιωρούμενα στο νερό, σε άλλο μέσο ή στον αέρα, ανάλογα με τις διαδικασίες λιθοποίησης-διαγένεσης μετατρέπονται σε κλαστικά ή μηχανικά, χημικά και βιοχημικά ιζηματογενή συμπαγή πετρώματα (Τσιπούρα-Βλάχου, 2005).

- *Μεταμορφωμένα*: π.χ. γνεύσιοι, χαλαζίτες κ.α. πετρώματα που προκύπτουν από προϋπάρχοντα πυριγενή, ιζηματογενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, στα οποία λόγω αλλαγών των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας μεταβάλλονται τα ιστολογικά και ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά (Κωστόπουλος, 2011).

### 2.2.2 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση την πηγή προέλευσής τους

Ανάλογα με την πηγή προέλευσής τους, τα αδρανή διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες:

- *Φυσικής προέλευσης αδρανή υλικά*: λαμβάνονται από το φυσικό περιβάλλον και, πέραν από μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος και διαλογής, δεν έχουν υποβληθεί σε άλλη διαδικασία. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα θραυστά αδρανή, καθώς και αυτά που προέρχονται από φυσικές αποθέσεις π.χ. αμμοχαλικώδεις χαλαρές αποθέσεις.
- *Τεχνητά ή βιομηχανικά αδρανή υλικά*: είναι προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (π.χ. σκωρίες υψικαμίνων, ιπτάμενη τέφρα λιγνιτών, μπεντονίτης, περλίτης, βερμικουλίτης κ.α.).
- *Ανακυκλωμένα αδρανή υλικά*: προκύπτουν από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υφιστάμενες κατασκευές (π.χ. κατεδάφιση κατασκευών σκυροδέματος, ασφαλικών έργων, τοιχοποιίας κ.α.) (Σπυρόπουλος, 2005; Ρηγόπουλος, 2009).

### 2.2.3 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση την πηγή λήψης τους

Ανάλογα με την πηγή λήψης τους, τα αδρανή διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες:

- *Φυσικά (ή συλλεκτά)*: η λήψη τους πραγματοποιείται από φυσικές αποθέσεις (ποταμών, θαλασσών κ.α.). Χρησιμοποιούνται χωρίς θραύση, μπορούν ωστόσο να κοσκινιστούν και να πλυθούν (λόγω του αυξημένου ποσοστού σε αργιλική παιπάλη που περιέχουν). Είναι γενικά στρογγυλεμένα και με λεία επιφάνεια.
- *Θραυστά*: η λήψη τους πραγματοποιείται από λατομεία (ανοικτά ή υπόγεια) και μετά την εξόρυξή τους υπόκεινται σε ειδική επεξεργασία. Είναι γενικά κυβόμορφα,

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

γωνιώδη, πλακοειδή ή επιμήκη, με τραχιά επιφάνεια (Τριανταφύλλου, 2013; Gambhir, 2013).

### 2.2.4 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση το ειδικό βάρος τους

Ανάλογα με το ειδικό τους βάρος, τα αδρανή υλικά ταξινομούνται στις πιο κάτω κατηγορίες (Dean, 1996):

- *Ελαφροβαρή*: με ειδικό βάρος μικρότερο από  $2000 \text{ kg/m}^3$  που οφείλεται στο μεγάλο πορώδες τους.
- *Κανονικού ειδικού βάρους*: με ειδικό βάρος μεταξύ  $2000$  έως  $3000 \text{ kg/m}^3$ .
- *Βαρέα*: με ειδικό βάρος μεγαλύτερο από  $3000 \text{ kg/m}^3$ .

Τα ελαφροβαρή αδρανή (π.χ. κίσηρης, σκωρία, ηφαιστειακή τέφρα, βερμικουλίτης, περλίτης, διατομίτης κ.α.) χρησιμοποιούνται μεταξύ άλλων για την παρασκευή διαφόρων τύπων ελαφροβαρών σκυροδεμάτων, ενώ τα βαρέα αδρανή (βαρύτης, αιματίτης, μαγνητίτης κ.α.) για την κατασκευή σκυροδεμάτων με σκοπό τη θωράκιση από τη ραδιενέργεια (Mehta & Monteiro, 2013).

### 2.2.5 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση το μέγεθος των κόκκων τους

Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους, τα αδρανή υλικά, όπως ορίζεται και από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620, διακρίνονται στις πιο κάτω κατηγορίες:

- *Χονδρόκοκκα αδρανή*: των οποίων το μέγιστο μέγεθος κόκκων είναι  $>4 \text{ mm}$  και το ελάχιστο  $<2 \text{ mm}$ .
- *Λεπτόκοκκα αδρανή*: των οποίων το μέγιστο μέγεθος κόκκων είναι  $\leq 4 \text{ mm}$ .
- *Παιπάλη (filler)*: υλικό το οποίο διέρχεται από κόσκινο με μέγεθος οπών  $0,063 \text{ mm}$  σε ποσοστό 70-100%.
- *Μη διαχωρισμένα αδρανή (all-in)*: τα οποία αποτελούνται από μίγμα χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών.

### 2.2.6 Ταξινόμηση αδρανών υλικών με βάση την χρήση τους

Οι χρήσεις των αδρανών υλικών ποικίλουν και βρίσκουν θεμελιώδη εφαρμογή σε τεχνικά έργα. Ανάλογα με την χρήση τους, τα αδρανή, όπως αναφέρεται και στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12620, ταξινομούνται ως ακολούθως:

- *Αδρανή για σκυρόδεμα.*



## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

- *Αδρανή ασφαλτομιγμάτων και επιφανειακών επιστρώσεων, οδών, αεροδρομίων και άλλων περιοχών κυκλοφορίας οχημάτων.*
- *Ελαφρά αδρανή για σκυροδέματα, κονιάματα και ενέματα, ασφαλτομιγμάτων, επιφανειακών επιστρώσεων και εφαρμογών με σταθεροποιημένα ή μη σταθεροποιημένα υλικά.*
- *Αδρανή κονιαμάτων.*
- *Αδρανή υλικών σταθεροποιημένων με υδραυλικές κονίες ή μη σταθεροποιημένων για χρήση σε τεχνικά έργα και οδοποιία.*
- *Αδρανή που χρησιμοποιούνται ως ογκόλιθοι για υδραυλικά και λιμενικά έργα.*
- *Αδρανή για έρμα σιδηροδρομικών γραμμών.*

### **2.3 Ο ρόλος των αδρανών στα τεχνικά έργα**

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται η σημασία και ο ρόλος των αδρανών ως κύριο συστατικό της δομής διαφόρων τεχνικών έργων στον κατασκευαστικό τομέα και την οδοποιία.

#### **2.3.1 Ο ρόλος των αδρανών στο σκυρόδεμα**

Τα αδρανή αποτελούν περίπου το 65-80% του όγκου του σκυροδέματος και το 70 – 85% του βάρους του, και για το λόγο αυτό επηρεάζουν καθοριστικά τις ιδιότητες, τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Λόγω του ότι είναι λιγότερο παραμορφώσιμα από τον τσιμεντοπολτό, τα αδρανή αντιστέκονται στην ανάπτυξη και τη διάδοση των μικρορωγματώσεων που προκαλούνται από τη συστολή κατά την ξήρανση. Γενικά, χρειάζεται να δίδεται προσοχή κατά την επιλογή των αδρανών υλικών που προορίζονται για χρήση στο σκυρόδεμα σε ότι αφορά την αντοχή και σκληρότητά τους, την ορυκτολογική τους σύσταση, τις διαστάσεις τους και την παρουσία αργιλικών ή οργανικών προσμίξεων, ενώσεων του θείου καθώς και παιπάλης.

#### **2.3.2 Ο ρόλος των αδρανών στην οδοποιία**

Τα αδρανή βοηθούν με την χρήση τους, είτε ως υλικά βάσης είτε ως υπόβασης, στην καλή λειτουργία του οδοστρώματος. Γι' αυτό πρέπει να εξασφαλίζουν τις συγκεκριμένες αντοχές που απαιτούν οι τάσεις που αναπτύσσονται από τις κυκλοφοριακές συνθήκες. Πρέπει επίσης να συμβάλουν στην αποστράγγιση και στην ανθεκτικότητα ενάντια στον παγετό. Τα αδρανή που προορίζονται για χρήση ως υλικά υπόβασης πρέπει επιπρόσθετα

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

να παρέχουν προστασία από ανάμιξη με εδαφικά υλικά (οργανικά, άργιλο κ.α.). Με την χρήση τους ως υλικά υπόβασης βοηθούν στην ομοιόμορφη φέρουσα συμπεριφορά του οδοστρώματος, με στόχο να μην σημειώνονται τοπικές αστοχίες.

Τα αδρανή αποτελούν επίσης το 90-95% του βάρους του συμπυκνωμένου ασφαλτομίγματος. Μεταφέρουν τα φορτία κάθετα στα υποκείμενα στρώματα, με τη μικρότερη συμμετοχή του συνδετικού ασφαλτικού υλικού, διατηρώντας το έργο σε καλή κατάσταση. Τα πιο χονδρά κλάσματα των αδρανών μπορούν επίσης να προσδώσουν ειδικές αντιολισθητικές ιδιότητες στο οδόστρωμα.

### **2.3.3 Ο ρόλος των αδρανών στα έρμα των σιδηροδρομικών γραμμών**

Τα αδρανή στις σιδηροδρομικές γραμμές παρεμβάλλονται μεταξύ των στρωτήρων – σιδηροτροχιών και του εδαφικού σχηματισμού, μεταφέροντας τα δυναμικά φορτία κυκλοφορίας των συρμών στο έδαφος, διατηρώντας παράλληλα τη σιδηροτροχιά στη θέση της και διευκολύνοντας την αποστράγγιση του νερού των βροχών. Τα αδρανή που θα χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό πρέπει να είναι από μια μόνο πηγή λήψης και να αποτελούνται από υγιείς, σκληρούς και ανθεκτικούς κόκκους χωρίς βλαπτικές προσμίξεις.

### **2.3.4 Ο ρόλος των αδρανών ως φίλτρα**

Τα χονδρόκοκκα αδρανή χρησιμοποιούνται ως φίλτρα σε κατασκευές όπως τα φράγματα, στις περιπτώσεις όπου είναι αναγκαία η μείωση της δράσης του νερού μέσα στο σώμα της κατασκευής. Αυτό γίνεται ώστε να αποφευχθούν ανεπιθύμητες διαβρώσεις και αποπλύσεις. Η χρήση των αδρανών ως φίλτρα βοηθά στην ελεγχόμενη πορεία των γραμμών ροής, ώστε να εκμηδενίζεται η πιθανότητα της αστοχίας από τη δράση του νερού. Τα αδρανή που προορίζονται για χρήση ως φίλτρα δεν πρέπει να περιέχουν εδαφικά σωματίδια, και η διαπερατότητά τους πρέπει να είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από αυτήν του υλικού που δομεί το σώμα της κατασκευής (Ρόζος, 2007).

### **2.3.5 Ο ρόλος των αδρανών στα κονιάματα**

Τα αδρανή αποτελούν σημαντικό συστατικό του κονιάματος. Ιστορικά, η χαρακτηριστική κατά βάρος αναλογία συνδετικού υλικού/αδρανούς ήταν 1:3 (Elsen, 2006; Fournari et al., 2015). Αυτή η αναλογία διαφοροποιήθηκε σταδιακά με την χρήση του τσιμέντου Portland. Τα αδρανή ωστόσο παραμένουν σημαντικό συστατικό των κονιαμάτων. Ο ρόλος τους στη διαμόρφωση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νωπού και σκληρυμένου κονιάματος

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

είναι καθοριστικός, αφού επηρεάζουν τόσο την εργασιμότητα όσο και τις μηχανικές ιδιότητες (Amenta et al., 2014).

### **2.4 Ιδιότητες αδρανών υλικών**

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, οι ιδιότητες και η απόδοση του σκυροδέματος και των κονιαμάτων, και γενικά όλων των σύνθετων δομικών υλικών, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την απόδοση των αδρανών από τα οποία αποτελούνται. Σε γενικές γραμμές, τα αδρανή πρέπει να είναι καθαρά, ανθεκτικά, καλοσχηματισμένα και με καλή διαβάθμιση. Πρέπει επίσης να διαθέτουν χημική σταθερότητα, αντοχή στην τριβή και σε ψύξη-απόψυξη. Επιπλέον, δεν πρέπει να περιέχουν επιβλαβή σωματίδια που να προκαλούν φυσικές και χημικές ζημιές (Gambhir, 2013). Η καταλληλότητα των αδρανών υλικών προσδιορίζεται από διάφορες ιδιότητες που σχετίζονται με τα γεωμετρικά, φυσικά, μηχανικά και άλλα χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα, υπάρχει ένας αριθμός ιδιοτήτων κάθε αδρανούς υλικού που καθορίζει τη συμπεριφορά του κάτω από διάφορες συνθήκες. Οι ιδιότητες αυτές ομαδοποιούνται στις πιο κάτω κατηγορίες: φυσικές, μηχανικές, χημικές, θερμικές, ηλεκτρικές, οπτικές, αισθητικές (Σαχαζής, 1988), καθώς επίσης και γεωμετρικές. Στις πιο κάτω παραγράφους, αναλύονται οι ιδιότητες των αδρανών που εξετάζονται, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

#### **2.4.1 Γενικές ιδιότητες αδρανών υλικών**

Οι γενικές ιδιότητες των αδρανών περιλαμβάνουν, εκτός των άλλων, τη δειγματοληψία και το διαχωρισμό των δειγμάτων για την εξέτασή τους στο εργαστήριο.

##### **2.4.1.1 Δειγματοληψία και διαχωρισμός αδρανών υλικών**

Η δειγματοληψία και ο διαχωρισμός αντιπροσωπευτικών δειγμάτων για την εκτέλεση εργαστηριακών δοκιμών θεωρούνται πολύ σημαντικές διαδικασίες γιατί, αν και δεν προσδιορίζουν φυσικά κάποια ιδιότητα των αδρανών, εντούτοις μπορεί να επηρεάζουν σημαντικά τα αποτελέσματα των δοκιμών που θα πραγματοποιηθούν στο δείγμα και κατά συνέπεια των ιδιοτήτων που θα προσδιοριστούν. Γι' αυτό πρέπει να λαμβάνεται κάθε δυνατή μέριμνα ώστε τα δείγματα που λαμβάνονται να αντιπροσωπεύουν τη φυσική κατάσταση των υλικών του κοιτάσματος (Σπυρόπουλος, 2005).

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

Οι γενικές ιδιότητες που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή προσδιορίζονται σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο: EN 932-2: Μέθοδος διαχωρισμού του εργαστηριακού δείγματος.

### 2.4.2 Γεωμετρικές ιδιότητες αδρανών υλικών

Οι γεωμετρικές ιδιότητες των αδρανών περιλαμβάνουν τους δείκτες που μπορούν να περιγράψουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υλικών αυτών, όπως για παράδειγμα η επιφανειακή υφή, το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων, καθώς επίσης και η κοκκομετρική κατανομή.

Οι γεωμετρικές ιδιότητες που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή προσδιορίζονται σύμφωνα με τα ακόλουθα Ευρωπαϊκά πρότυπα: EN 933-1: Κοκκομετρική διαβάθμιση, EN 933-8: Ισοδύναμο άμμου και EN 933-9: Μπλε του μεθυλενίου.

#### 2.4.2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση

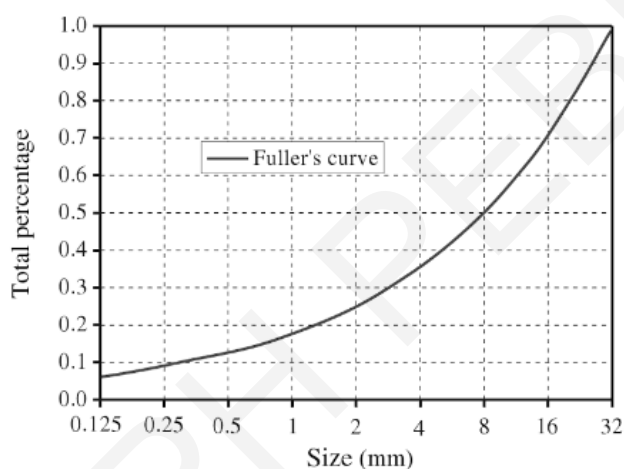
Είναι η διαδικασία διαχωρισμού και κατάταξης των κόκκων των αδρανών σε ομάδες με βάση το μέγεθός τους. Η διαδικασία πραγματοποιείται με το κοσκίνισμα των αδρανών από ειδικά κόσκινα και το διαχωρισμό τους αναλόγως του μεγέθους των κόκκων τους. Η κοκκομετρική διαβάθμιση έχει μεγάλη σημασία στη μελέτη σύνθεσης του σκυροδέματος γιατί παρέχει σημαντικές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα το δείκτη λεπτότητας, που χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των αναλογιών των υλικών. Ο σκοπός της κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι να παρέχει το μέγιστο σχετικό όγκο που καταλαμβάνεται από τα αδρανή, διατηρώντας παράλληλα την ελάχιστη ειδική επιφάνεια των αδρανών (Newman & Choo, 2003).

Στις Ευρωπαϊκές χώρες η διαδικασία της κοκκομετρικής διαβάθμισης πραγματοποιείται με βάση το πρότυπο EN 933-1, ενώ στις Η.Π.Α. η ASTM International καλύπτει τη σχετική διαδικασία με το ASTM C136. Οι κυριότερες διαφορές μεταξύ των δύο αυτών διαδικασιών είναι ότι χρησιμοποιούνται διαφορετικές σειρές κοσκίνων. Η παιπάλη στο Ευρωπαϊκό πρότυπο είναι το διερχόμενο του κόσκινου με άνοιγμα οπής 0,063 mm, ενώ στο Αμερικάνικο του κόσκινου No.200 (άνοιγμα οπής 0,075 mm). Επιπλέον, με το ASTM C136 δε δύναται να προσδιοριστεί με ακρίβεια η παιπάλη. Για αυτό, συστήνεται επιπρόσθετα η εφαρμογή του προτύπου C117.

Απώτερος σκοπός της δοκιμής της κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι ο καθορισμός της κοκκομετρικής καμπύλης των αδρανών. Η κλίση της καμπύλης σε κάθε περιοχή

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

παριστάνει το κατ' όγκο ποσοστό του υλικού της περιοχής αυτής (Οικονόμου, 2003). Ως ιδανική κοκκομετρική διαβάθμιση ορίζεται η διαβάθμιση με ένα τελικό μίγμα από κόκκους αδρανών που διαθέτει τα λιγότερα κενά, αφού κάθε ομάδα από άποψη διαμέτρου εισχωρεί στη θέση των κενών που σχηματίζουν οι κόκκοι της αμέσως μεγαλύτερης ομάδας, και το αποτέλεσμα αυτό συμβάλλει σε πιο εργάσιμο και πιο ανθεκτικό σκυρόδεμα (Cramer et al., 1995; Οικονόμου, 2003). Στο παρελθόν έγιναν πολλές προτάσεις για τη διατύπωση μιας ιδανικής κοκκομετρικής καμπύλης, ωστόσο η πιο γνωστή και πλέον αποδεκτή είναι η καμπύλη Fuller (Εικόνα 2.1), η οποία υποδεικνύει το βέλτιστο μίγμα κόκκων των αδρανών και κατ' επέκταση προσδίδει τις καλύτερες ιδιότητες στο σκυρόδεμα (Wriggers & Moftah, 2006).



Εικόνα 2.1: Καμπύλη Fuller (Qin & Hua, 2012).

### 2.4.2.2 Ισοδύναμο άμμου

Η δοκιμή αυτή πραγματοποιείται με σκοπό τον προσδιορισμό των ποσοστών της παιπάλης (<0,063 mm) στα αδρανή. Σύμφωνα με τους Prowell et al. (2005), η δοκιμή ισοδύναμου άμμου αναπτύχθηκε από τον Francis Hveem το 1952 και όπως αναφέρουν οι Petkonšek et al. (2010), η δοκιμή είχε σκοπό να καθορίσει το ποσοστό των ορυκτών μεγέθους αργίλου που συμμετέχει στα λεπτόκοκκα αδρανή, επειδή αυτά τα ορυκτά θεωρήθηκαν ότι είναι επιβλαβή στην απόδοση του ασφαλικού σκυροδέματος. Στη συνέχεια, η δοκιμή αυτή καθιερώθηκε ως πρότυπη δοκιμή για αδρανή οδοποιίας.

Στις Ευρωπαϊκές χώρες, η δοκιμή ισοδύναμου άμμου πραγματοποιείται με βάση το πρότυπο EN 933-8, ενώ στις Η.Π.Α. καλύπτεται από το ASTM D2419. Μια από τις κυριότερες διαφορές μεταξύ των δύο προαναφερθεισών δοκιμών είναι το μέγεθος των κόκκων του δείγματος που χρησιμοποιείται στη δοκιμή, αφού στο ASTM D2419

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

διαμορφώνεται δείγμα με υλικό που διαπερνά το κόσκινο με άνοιγμα οπής 4,75 mm (No.4), ενώ στο EN 933-8 χρησιμοποιούνται δύο δείγματα με υλικό 0/2 mm. Σημειώνεται ότι σε παράρτημα του EN 933-8 περιγράφεται επίσης η διαδικασία με υλικό 0/4 mm.

Υψηλό ποσοστό συντελεστή ισοδύναμου άμμου υποδηλώνει καθαρότερο δείγμα, δηλαδή δείγμα που περιέχει λιγότερο ποσοστό σκόνης ή υλικό μεγέθους αργίλου (Kondelchuk & Miskovsky, 2009). Σύμφωνα με τους Westerholm et al. (2008), οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου άμμου, σύμφωνα με τις πρόνοιες του Ευρωπαϊκού προτύπου, για θραυστά γρανιτοειδή πετρώματα κυμαίνονται από 41% μέχρι 89%. Όσον αφορά ασβεστολιθικά αδρανή, όπως αναφέρουν οι Nikolaidis et al. (2007), οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου άμμου κυμαίνονται από 58% μέχρι 80%. Από τις μελέτες αυτές, είναι προφανές ότι οι τιμές του συντελεστή ισοδύναμου άμμου κυμαίνονται αναλόγως της ορυκτολογικής σύστασης του μητρικού πετρώματος. Αυτό εξηγεί και το μεγάλο σχετικά εύρος των τιμών που παραθέτουν οι μελετητές.

Παρόλο που πρόκειται για μια δοκιμή που εκτελείται σε σύντομο χρονικό διάστημα, και κατά την οποία δεν απαιτείται ακριβός εξοπλισμός, ούτε και χρειάζεται ιδιαίτερη εξειδίκευση ή πείρα από το προσωπικό (Kondelchuk & Miskovsky, 2009), από τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου δεν μπορεί να διευκρινιστεί κατά πόσο τα αργιλικά υλικά είναι διογκούμενα (π.χ. μπεντονίτης) ή όχι (π.χ. καολινίτης), αφού και στις δύο περιπτώσεις η δοκιμή θα δώσει χαμηλές τιμές συντελεστή στην παρουσία των πιο πάνω υλικών (Mukhopadhyay et al., 2013).

### **2.4.2.3 Μπλε του μεθυλενίου**

Σε αντίθεση με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου, η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου καθορίζει τον τύπο των αργιλικών ορυκτών στην παιπάλη, αφού η παρουσία διογκούμενων αργιλικών ορυκτών οδηγεί στην απορρόφηση του μπλε του μεθυλενίου, ενώ τα μη διογκούμενα αργιλικά ορυκτά δεν απορροφούν (Kondelchuk & Miskovsky, 2009). Για την ακρίβεια, η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου είναι η πιο εύκολη και η πλέον γνωστή διαδικασία προκειμένου να προσδιοριστούν τα ενεργά αργιλικά ορυκτά σε έδαφος και πετρώματα. Η βασική αρχή πίσω από τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου είναι ότι τα ανόργανα κατιόντα  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  και  $\text{Na}^+$  που βρίσκονται στην επιφάνεια και σε θέσεις ανάμεσα στις στρώσεις μερικών αργίλων μπορεί να ανταλλάσσονται με μόρια μπλε του μεθυλενίου. Η απορρόφηση των μορίων του μπλε του μεθυλενίου από τα αργιλικά ορυκτά

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

οδηγεί στη μείωση της συγκέντρωσης του διαλύματος του μπλε του μεθυλενίου (Grattan-Bellew, 2000).

Η δοκιμή αυτή σχεδιάστηκε αρχικά από τους Fairbairn και Robertson και πλέον ενσωματώθηκε στο Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C837-9 και το Ευρωπαϊκό EN 933-9 (Nehdi, 2014). Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των δύο αυτών διαδικασιών είναι ότι, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο ASTM C837-9, το δείγμα πρέπει να διέρχεται από το κόσκινο με άνοιγμα οπής 0,075 mm (No.200), ενώ σύμφωνα με το EN 933-9 το κλάσμα του ξηρού δείγματος ( $\geq 200$  g) πρέπει να είναι 0/2 mm. Χαμηλές τιμές στην τιμή μπλε του μεθυλενίου, συνήθως υποδηλώνουν μικρό ποσοστό σε ενεργά αργιλικά ορυκτά. Σύμφωνα με τους Tugrul & Yilmaz (2012), εάν η τιμή του μπλε του μεθυλενίου υπολογιστεί  $< 1$  g/kg, τότε δεν υπάρχει αρνητική επίδραση στην αντοχή του σκυροδέματος. Οι Kandhal & Parker (1998) υποστηρίζουν ότι τα πυριγενή πετρώματα τείνουν να παρουσιάζουν ψηλότερες τιμές μπλε του μεθυλενίου, λόγω της παρουσίας μοντμοριλλονίτη. Σύμφωνα με την έρευνα των Nikolaidis et al. (2007), οι τιμές μπλε του μεθυλενίου για οχτώ διαφορετικά δείγματα ασβεστολιθικών αδρανών κυμαίνονταν από 0,3 μέχρι 1,3 g/kg, ενώ οι τιμές του μπλε του μεθυλενίου για μη ασβεστολιθικά αδρανή κυμαίνονταν μεταξύ 0,3 και 11,3 g/kg. Από τα αποτελέσματα αυτά είναι εμφανές ότι τα μη ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν δυνητικά ψηλότερες τιμές μπλε του μεθυλενίου, λόγω της παρουσίας ενεργών αργιλικών ορυκτών.

### **2.4.3 Φυσικές ιδιότητες αδρανών υλικών**

Οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών ποικίλουν αναλόγως της πηγής προέλευσης, του τύπου, της ορυκτολογικής σύστασης, του μεγέθους, της κοκκομετρικής διαβάθμισης, του σχήματος και της επιφανειακής τους υφής (Yzenas Jr, 2006). Οι κυριότερες φυσικές ιδιότητες των αδρανών είναι η απορροφητικότητα, η πυκνότητα, το πορώδες, η περιεχόμενη υγρασία και η διαπερατότητα.

Οι φυσικές ιδιότητες που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή προσδιορίζονται σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο: EN 1097-6: Προσδιορισμός της πυκνότητας και απορρόφησης νερού.

#### **2.4.3.1 Απορροφητικότητα και σχετική πυκνότητα**

Η απορροφητικότητα θεωρείται μια από τις πλέον σημαντικές φυσικές ιδιότητες των αδρανών υλικών και χρησιμοποιείται για να παρέχει πληροφορίες για την ποιότητά τους.

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

Ως απορροφητικότητα ορίζεται η ιδιότητα που έχουν τα αδρανή υλικά να απορροφούν (χωρίς εξωτερική πίεση) νερό, σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (24 ώρες). Το αποτέλεσμα της μέτρησης εκφράζεται ως ποσοστό επί τοις εκατό του ξηρού βάρους του δείγματος (Κούκης & Σαμπατακάκης, 2007).

Τα αδρανή, ως πορώδη υλικά, δύναται να συρρικνωθούν ή να διογκωθούν με την απελευθέρωση ή απορρόφηση νερού αντίστοιχα. Ως εκ τούτου, έχουν σημαντική επίδραση στη συρρίκνωση (και άρα στη ρηγμάτωση), στην αντοχή και σε άλλες ιδιότητες των σύνθετων δομικών υλικών (Cortas et al., 2014). Το εσωτερικό πορώδες σύστημα ενός αδρανούς, θεωρείται πολύ σημαντικό χαρακτηριστικό. Το μέγεθος, ο αριθμός και η σύνδεση των πόρων των αδρανών μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό τη χημική σταθερότητα, τη σκληρότητα, την αντοχή, την παραμόρφωση και τις θερμικές ιδιότητες των υλικών, ενώ επίσης ελέγχει την ανθεκτικότητά και την "υγεία" τους (Poronics, 1992).

Η σχετική πυκνότητα είναι επίσης μια σημαντική φυσική ιδιότητα των αδρανών υλικών, η οποία χρησιμοποιείται για να παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή στα διάφορα μίγματα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί ο όγκος των κενών σε ένα αδρανές (Alqarni, 2013). Η πυκνότητα εξαρτάται από το πόσο πυκνή είναι η ύλη ενός αδρανούς και κατά συνέπεια από την κατανομή των πόρων και το σχήμα των κόκκων του (Neville & Brooks, 1993). Υπολογίζεται από το λόγο μάζας προς όγκο. Η μάζα καθορίζεται ζυγίζοντας το κορεσμένο και επιφανειακά στεγνό δείγμα, και ακολούθως το ξηρό δείγμα, ενώ ο όγκος καθορίζεται από τη μάζα του εκτοπισμένου νερού.

Η διαδικασία προσδιορισμού της πυκνότητας και της απορρόφησης σε νερό των λεπτόκοκκων αδρανών περιγράφεται στο Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C128. Το αντίστοιχο ευρωπαϊκό πρότυπο, για χονδρόκοκκα ή λεπτόκοκκα αδρανή υλικά, είναι το EN 1097-6. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο προαναφερθεισών διαδικασιών είναι ότι το Ευρωπαϊκό πρότυπο απαιτεί την αφαίρεση του λεπτού υλικού (δηλ. του υλικού που διαπερνά κόσκινο με άνοιγμα οπής 0,063 mm) πριν από τη δοκιμή. Η αφαίρεση της παιπάλης στο Ευρωπαϊκό πρότυπο ενδεχομένως να επηρεάσει το αποτέλεσμα της απορροφητικότητας, καθώς αφαιρείται το κλάσμα με τη μεγαλύτερη ειδική επιφάνεια.

Ο Fookes (1980) σημειώνει ότι η απορροφητικότητα καλής ποιότητας αδρανών πρέπει να είναι <1,5%. Οι Krynine & Judd (1957) διαπιστώνουν ότι πολύ χαμηλές απορροφητικότητες (<1%) παρατηρούνται συνήθως σε ανθεκτικά πετρώματα, ενώ ο Eze



## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

(1997) αναφέρει ότι δείγματα με απορροφητικότητες >4% χρειάζεται να υποβληθούν σε περαιτέρω δοκιμές προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Σύμφωνα με τους Cortas et al (2014), η απορροφητικότητα των αδρανών κυμαίνεται συνήθως από 0,5% έως 2%, ανάλογα με το είδος των αδρανών που εξετάζονται. Οι Zarif & Tugrul (2003), μετά από πειράματα σε χονδρόκοκκα ασβεστολιθικά αδρανή, αναφέρουν τιμές απορροφητικότητας από 0,15 έως 1,25 % και πυκνότητας από 2,65 έως 2,73 Mg/m<sup>3</sup>. Οι Korkanc & Tugrul (2004), μετά από δοκιμές σε χονδρόκοκκα βασάλτικα πετρώματα, παρατήρησαν απορροφητικότητα 0,92 έως 1,93% και πυκνότητα 2,51 έως 2,86 Mg/m<sup>3</sup>. Από τις πιο πάνω μελέτες, προκύπτει ότι η απορροφητικότητα των αδρανών υλικών, ανεξαρτήτως σύστασης, κυμαίνεται γενικά στα χαμηλά αποδεκτά όρια που ορίζουν υλικά καλής ποιότητας. Υπάρχουν ωστόσο και οι εξαιρέσεις. Για παράδειγμα, οι Brandes et al. (2011) σε έρευνα τους αναφέρουν ότι τα βασάλτικα χονδρόκοκκα αδρανή της Χαβάης παρουσιάζουν απορροφητικότητα μέχρι και 8,8%. Ψηλές τιμές απορροφητικότητας έχουν καταγραφεί και σε ανθρακικά και διαβασικά αδρανή της Κύπρου (Ioannou et al., 2010; Fournari et al., 2015).

Μεγάλη διακύμανση στις τιμές της απορροφητικότητας σε νερό και της πυκνότητας καταγράφεται από τους Kasim & Shakoor (1996) σε χονδρόκοκκα ψαμμιτικά υλικά, με τις τιμές να κυμαίνονται από 0,62 έως 5,85% και 2,10 έως 2,61 Mg/m<sup>3</sup> αντίστοιχα. Παρόμοιες διακυμάνσεις κατέγραψαν οι ίδιοι μελετητές (Kasim & Shakoor, 1996) για ασβεστόλιθους και δολομίτες, με τις τιμές απορροφητικότητας σε αυτές τις περιπτώσεις να κυμαίνονται από 0,21 έως 4,33% και της πυκνότητας από 2,43 έως 2,83 Mg/m<sup>3</sup>. Μικρότερες διακυμάνσεις παρατήρησαν ωστόσο σε πυριγενή πετρώματα, όπως γρανίτες και συηνίτες, όπου η απορροφητικότητα κυμάνθηκε σε πολύ χαμηλά ποσοστά από 0,02 έως 0,25%, με την πυκνότητα να καταγράφει τιμές από 2,68 έως 3,00 Mg/m<sup>3</sup>.

Οι Tugrul & Yilmaz (2012), σε δοκιμές που πραγματοποίησαν σε χονδρόκοκκα (>4 mm) ψαμμιτικά πετρώματα, παρατήρησαν τιμές απορροφητικότητας από 0,37 μέχρι 3,65%, ενώ λίγο μεγαλύτερες ήταν οι τιμές που καταγράφηκαν για λεπτόκοκκα αδρανή (<4 mm) οι οποίες κυμαίνονταν από 1,6 μέχρι 3,75%. Τα αποτελέσματα αυτά συμφωνούν με τους Hu & Wang (2007) που υποστηρίζουν ότι τα αδρανή με μικρότερο μέγεθος κόκκου συνήθως παρουσιάζουν ψηλότερο ποσοστό απορροφητικότητας.

#### 2.4.4 Ιδιότητες αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές

Πέραν από τις πιο πάνω ιδιότητες, τα αδρανή υλικά πρέπει επίσης να είναι ανθεκτικά προκειμένου να αποδίδουν ικανοποιητικά στις διάφορες κατασκευές ή στα οδοστρώματα. Η ανθεκτικότητα περιγράφει την αντίσταση των αδρανών στην αλλοίωση των φυσικών, μηχανικών και χημικών τους χαρακτηριστικών μετά από έκθεση στις περιβαλλοντικές και φυσικές συνθήκες. Επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, την ηλιακή ακτινοβολία, τον άνεμο, την υγρασία, την έκθεση σε χημικές ουσίες και σε κύκλους ψύξης – απόψυξης (Williams & Cunningham, 2012; Τριανταφύλλου, 2013). Τα αδρανή υλικά που παρουσιάζουν μειωμένη ανθεκτικότητα τείνουν να διασπώνται εύκολα, με αποτέλεσμα να προκύπτουν προβλήματα στις διάφορες κατασκευές.

Τα κυριότερα φυσικά αίτια που προκαλούν μεγάλες ή μόνιμες αλλαγές στον όγκο των αδρανών είναι η ψύξη - απόψυξη, οι θερμοκρασιακές αλλαγές πάνω από τις θερμοκρασίες παγετού και οι εναλλαγές ύγρανσης – ξήρανσης, σε συνδυασμό με την παρουσία αλάτων. Οι αλλαγές αυτές επηρεάζουν τη φυσική ανθεκτικότητα των αδρανών υλικών, η οποία είναι μια σημαντική παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του σκυροδέματος και άλλων σύνθετων υλικών (Alexander & Mindess, 2005).

Η ανθεκτικότητα των αδρανών χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει την "υγεία" και τη "σκληρότητα" τους. Ο όρος "υγεία" (soundness) αναφέρεται στην ικανότητα των αδρανών να αντιστέκονται στις περιβαλλοντικές μεταβολές, ενώ ο όρος "σκληρότητα" στην ικανότητα τους να αντιστέκονται στις πιέσεις που ενδεχομένως να υποστούν κατά την παραγωγή, τη μεταφορά τους και κατά τη διάρκεια της χρήσης της κατασκευής (Wu et al., 1998). Πιο συγκεκριμένα, ο Bloem (1956) καθορίζει τον όρο soundness ως την ικανότητα των αδρανών να αντιστέκονται σε πολύ μεγάλες ή μόνιμες μεταβολές στον όγκο τους, όταν υποβάλλονται σε ψύξη – απόψυξη, θέρμανση – ψύξη ή ύγρανση – ξήρανση.

Οι ιδιότητες των αδρανών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή προσδιορίζονται σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1367-2: Δοκιμή με Θεϊκό Μαγνήσιο, καθώς επίσης και το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C88: Δοκιμή με Θεϊκό Νάτριο ή Θεϊκό Μαγνήσιο.

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

### 2.4.4.1 Αποσάθρωση με θειικό μαγνήσιο ( $MgSO_4$ ) – θειικό νάτριο ( $Na_2SO_4$ )

Ο καθορισμός της υγείας των αδρανών προκύπτει μέσα από τη δοκιμή αποσάθρωσης, που πρωτοεμφανίστηκε το 1818 από τον Brard στη Γαλλία, ο οποίος περιέγραψε μια μέθοδο για την αξιολόγηση της επιδεκτικότητας των λίθων κάτω από συνθήκες ψύξης – απόψυξης με την χρήση του άλατος Glauber (δηλ. θειικού νατρίου). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των χρόνων, υπήρξαν πολλές παραλλαγές της μεθόδου αυτής που περιλάμβαναν την χρήση διαφορετικών αλάτων, όπως του θειικού μαγνησίου, θειικού καλίου και ασβεστίου, νιτρικού καλίου και χλωριούχου νατρίου (West, 2000).

Στις Η.Π.Α., όπως αναφέρει ο Forster (1994), η δοκιμή αποσάθρωσης δημοσιεύτηκε αρχικά το 1931, ως μια προσωρινή πειραματική διαδικασία, και εγκρίθηκε ως πρότυπη μέθοδος (ASTM C88) το 1963. Στη Μεγάλη Βρετανία, η δοκιμή αποσάθρωσης αποτέλεσε πρότυπο το 1970 (Smith & Collis, 2001). Και οι δύο δοκιμές, παρά τις κάποιες διαφορές στη διαδικασία, βασίζονται στην ίδια φιλοσοφία, της προσομοίωσης δηλαδή της μεταβολής της μικροδομής των αδρανών που γίνεται με την κρυστάλλωση αλάτων, είτε  $MgSO_4$  ή  $Na_2SO_4$ , κατά τη φάση ξήρανσης των κορεσμένων αδρανών (Ioannou et al., 2013).

Η δοκιμή αποσάθρωσης διεξάγεται με επαναλαμβανόμενες εμβαπτίσεις του δείγματος των αδρανών σε κορεσμένο διάλυμα, είτε θειικού μαγνησίου ή θειικού νατρίου, που εναλλάσσονται με ξήρανση σε φούρνο, ώστε να επιταχυνθεί η κρυστάλλωση του άλατος στους διαπερατούς πόρους των αδρανών. Κατά τη διάρκεια της επανενυδάτωσης με το διάλυμα του άλατος, ασκούνται εφελκυστικές δυνάμεις στους πόρους από τους κρυστάλλους των αλάτων. Η τάση αυτή προσομοιάζει την πίεση που ασκεί το νερό κατά την ψύξη (Forster, 1994).

Η Μηλιοπούλου (2009), συγκρίνοντας την Αμερικάνικη δοκιμή (ASTM) με την αντίστοιχη Ευρωπαϊκή (EN), διαπιστώνει αρκετές ομοιότητες ως προς τη μεθοδολογία (π.χ. στους κύκλους εμβάπτισης των αδρανών στο διάλυμα). Παρόλα αυτά, σημειώνει ότι υπάρχουν διαφοροποιήσεις, οι οποίες επηρεάζουν τα αποτελέσματα, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι το  $MgSO_4$  που απαιτείται από την EN οδηγεί σε μεγαλύτερες απώλειες μάζας από ότι το  $Na_2SO_4$ , ένα εκ των δύο αλάτων που καθορίζονται από την ASTM. Αναφέρει επίσης ότι οι περιγραφές και οι οδηγίες των ASTM είναι λεπτομερέστερες/εκτενέστερες και καλύπτουν πλήρως την πρακτική διαδικασία και

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

σχεδόν όλες τις πιθανές περιπτώσεις. Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγουν και οι Ioannou et al. (2013), οι οποίοι αναφέρουν ωστόσο ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν σε ίδια υλικά από τις δύο δοκιμές είναι παρόμοια, όταν ο συντελεστής αποσάθρωσης υπολογιστεί με βάση το σταθμικό μέσο όρο. Οι ίδιοι συγγραφείς (Ioannou et al. 2013) αναφέρουν επίσης ότι, παρόλο που η Ευρωπαϊκή δοκιμή με την χρήση του  $MgSO_4$  μπορεί να θεωρείται κατάλληλη για εξέταση των χονδρόκοκκων αδρανών, εν τούτοις θεωρείται ακατάλληλη για τα λεπτόκοκκα αδρανή, αφού με αυτήν προκύπτουν πολύ υψηλά ποσοστά απώλειας μάζας. Επιπλέον, σημειώνουν ότι το ποσοστό της απώλειας μάζας των χονδρόκοκκων αδρανών αυξάνεται καθώς μειώνεται το μέγεθος κόκκου, ενώ όσον αφορά τα λεπτόκοκκα η απώλεια μάζας μειώνεται ή παραμένει σταθερή με μείωση του μεγέθους του κόκκου. Το γεγονός αυτό, αναφέρουν οι συγγραφείς, επιφέρει πρακτικές επιπτώσεις στον υπολογισμό του ποσοστού απώλειας με την υιοθέτηση του σταθμικού μέσου όρου και καθιστά παραπλανητική την πρότυπη Ευρωπαϊκή μεθοδολογία, η οποία καθορίζει τη δοκιμή υποχρεωτική μόνο με το κλάσμα 10-14 mm. Σημειώνεται ότι από το 2009, το αναθεωρημένο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1367-2:2009 (Παράρτημα Γ) επιτρέπει την πραγματοποίηση της δοκιμής αποσάθρωσης σε αδρανή υλικά <10 mm, υιοθετώντας το σταθμικό μέσο όρο για την ανάλυση των αποτελεσμάτων, την ίδια δηλαδή διαδικασία που ακολουθεί και το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C88 για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων.

Ο Goswami (1984) εκτέλεσε τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο, με βάση το ASTM C88, σε πυριγενή αδρανή (γρανίτες, γρανοδιορίτες και διορίτες) και κατέληξε σε τιμές που κυμαίνονται από 4,2 έως 11,9%. Αρκετά χαμηλές είναι και οι τιμές για τα χονδρόκοκκα βασαλτικά αδρανή που εξέτασαν οι Korkanc & Tugrul (2004) με βάση την ίδια δοκιμή, με αποτελέσματα να κυμαίνονται από 0,95 έως 4,66%. Αντίθετα, με την χρήση θειικού μαγνησίου με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο, οι Yilmaz & Tugrul (2012) σημείωσαν αρκετά ψηλότερα ποσοστά, από 10 έως και 87%, σε ψαμμιτικά αδρανή.

Όπως φαίνεται από τα πιο πάνω αποτελέσματα, και όπως καταγράφεται στη βιβλιογραφία (Forster, 1994; Basista & Weglewski, 2009), το θειικό μαγνήσιο είναι γενικά πιο καταστρεπτικό σε σχέση με το θειικό νάτριο. Το υδατικό σύστημα θειικού νατρίου έχει δύο σταθερές φάσεις που μπορούν να παρουσιαστούν στα πλαίσια των θερμοκρασιών που κυμαίνεται η δοκιμή αποσάθρωσης: τον μιραμπιλίτη ( $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$ ) και τον θεναρντίτη ( $Na_2SO_4$ ) (Steiger & Asmussen, 2008). Όσον αφορά το θειικό μαγνήσιο, οι τρεις κύριες φάσεις που μπορούν να παρουσιαστούν στο εύρος των θερμοκρασιών που κυμαίνεται η δοκιμή αποσάθρωσης είναι το επταένυδρο θειικό μαγνήσιο ή επσομίτης ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ), ο

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

εξαεδρίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) και ο κιεσερίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) (Ruiz-Agudo et al., 2007), ενώ όπως αναφέρουν οι Garrity & Kriege (1935) μπορεί να υπάρξουν και άλλες φάσεις ( $\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$  όπου  $n = 1,5, 2, 5, 6$ ) που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία. Οι αλλαγές αυτές που καταγράφονται στις φάσεις των αλάτων ενδεχομένως να ενισχύουν την κρυστάλλωση του θειικού μαγνησίου σε σχέση με την κρυστάλλωση του θειικού νατρίου, οδηγώντας σε μεγαλύτερες απώλειες μάζας. Για την ακρίβεια, οι La Iglesia et al., (1997) και ο Hayens (2005) αναφέρουν ότι ο επσομίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) είναι πιο δραστικός από το μιραμπιλίτη ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) που είναι πιο δραστικός από το θεναρντίτη ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ). Πιο συγκεκριμένα, ο Hayens (2005) αναφέρει ότι:

α) κατά τη διάρκεια του σταδίου βύθισης-ξήρασης στο διάλυμα του  $\text{MgSO}_4$ , εισχωρεί μεγαλύτερη ποσότητα άλατος στους πόρους των υλικών, από ότι  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  κατά την αντίστοιχη διαδικασία. Επομένως, οι πιέσεις των κρυστάλλων ασκούνται σε μεγαλύτερη επιφάνεια στα τοιχώματα των πόρων.

β) το διάλυμα  $\text{MgSO}_4$  μπορεί να προκαλέσει καταστροφή σε μικρότερες θερμοκρασίες από ότι το διάλυμα του  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

γ) το  $\text{MgSO}_4$  έχει χαμηλότερο pH στο νερό των πόρων της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας από ότι το  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

Επιπλέον, οι Ioannou et al. (2013) σε δοκιμές που πραγματοποίησαν σε ίδια δείγματα τόσο με την χρήση θειικού μαγνησίου, όσο και θειικού νατρίου, παρατήρησαν ότι η απώλεια που προέκυπτε με την χρήση θειικού μαγνησίου ήταν κατά μέσο όρο  $4,27 (\pm 1,61)$  φορές μεγαλύτερη, σε σχέση με την απώλεια που προέκυπτε με την χρήση του θειικού νατρίου. Οι συγγραφείς (Ioannou et al., 2013) θεώρησαν ότι αυτή η απώλεια ήταν απόρροια της αρκετά μεγαλύτερης συγκέντρωσης του διαλύματος του θειικού μαγνησίου (2,8 M σε αντίθεση με 0,6 M του διαλύματος του θειικού νατρίου) που χρησιμοποιήθηκε, γεγονός που υποδήλωνε ότι περισσότερο άλας ήταν διαθέσιμο για κρυστάλλωση μέσα στους πόρους των αδρανών. Πιθανόν όμως η απώλεια που παρατηρήθηκε στα δείγματα με την χρήση θειικού μαγνησίου να σχετιζόταν και με το ιξώδες του διαλύματος. Σύμφωνα με το CRC Handbook of Chemistry and Physics (Weast & Astle, 1978), το  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  για συγκέντρωση 20% w/w παρουσιάζει κινηματικό ιξώδες 3,400 cS (ή δυναμικό ιξώδες 4,147 cP), ενώ το  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ , για την ίδια συγκέντρωση, παρουσιάζει κινηματικό ιξώδες 1,871 cS (ή δυναμικό ιξώδες 2,223 cP). Το άνυδρο θειικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), για συγκέντρωση 16% w/w, παρουσιάζει δυναμικό ιξώδες 1,812 cP (Rodriguez-Navarro &

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

Doehne, 1999). Οι Ruiz-Agudo et al. (2007), αναφέρουν ότι οι φυσικές ιδιότητες ενός διαλύματος άλατος, όπως για παράδειγμα η πυκνότητα, η επιφανειακή τάση και ειδικότερα το ιξώδες, ελέγχουν τη δυναμική της ροής και εξάτμισης του διαμέσου του δικτύου των πόρων των αδρανών. Πιο συγκεκριμένα, το υψηλότερο ιξώδες του θεικού μαγνησίου οδηγεί σε βραδύτερη ροή διαμέσου των τριχοειδών κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, σε σύγκριση με τη ροή του θεικού νατρίου το οποίο έχει χαμηλότερο ιξώδες. Η βραδύτερη ροή μπορεί να οδηγήσει σε κρυστάλλωση τόσο σε μικρούς, όσο και σε μεγάλους πόρους εντός της μικροδομής του αδρανούς. Αντίθετα, η γρηγορότερη ροή οδηγεί σε κρυστάλλωση σε μεγαλύτερους πόρους, κοντά ή πάνω στην επιφάνεια των υλικών. Αυτή η θέση/μορφή της κρυστάλλωσης ελαχιστοποιεί τη ζημιά που προκαλείται στο υλικό.

Στη φύση τα άλατα απαντώνται στο έδαφος και στο εδαφικό νερό, με τη βοήθεια του οποίου μεταφέρονται με τριχοειδή φαινόμενα στους πόρους του υλικού. Τα θειικά άλατα πιθανόν να προέρχονται και από τα διαλυτά συστατικά των αργιλοπυριτικών κυρίως, αλλά και των υπολοίπων πετρωμάτων, το έδαφος, το ατμοσφαιρικό SO<sub>3</sub> και τα διάφορα βιομηχανικά απόβλητα και λιπάσματα. Μπορεί επίσης να προέρχονται από το ίδιο το σκυρόδεμα, δηλαδή από το τσιμέντο, τα πρόσθετα υλικά (π.χ. ιπταμένη τέφρα, σκωρία κλπ.), τα αδρανή, το νερό ή ακόμα και από τα χημικά πρόσμικτα (Skalny et al., 2002). Τα άλατα μπορούν να προέλθουν και από το θαλασινό νερό, ενώ η μεταφορά τους μπορεί να γίνει με αλατονέφωση. Σύμφωνα με τον Λαμπρόπουλο (1992), τα άλατα της θάλασσας, με τη βοήθεια του αέρα, μπορούν να εισχωρήσουν μέχρι και 10 km στην ενδοχώρα.

Τα άλατα που συναντώνται συνηθέστερα είναι :

- τα χλωριούχα (νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου κ.α.) που προκαλούν σοβαρή επίδραση στον οπλισμό του σκυροδέματος.
- τα νιτρικά και νιτρώδη άλατα (νατρίου, καλίου και αμμωνίου).
- τα ανθρακικά άλατα (ασβεστίου και μαγνησίου).
- τα θειικά άλατα (νατρίου, μαγνησίου, ασβεστίου και αμμωνίου) που είναι τα περισσότερο επικίνδυνα για το σκυρόδεμα (Ρούτουλας, 1999).

### **2.4.5 Μηχανικές ιδιότητες αδρανών υλικών**

Οι μηχανικές ιδιότητες των αδρανών, όπως η αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, η αντίσταση στην τριβή (και υγρή τριβή), και η αντοχή στη λείανση, έχουν όλες επίδραση στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (Thomas & Forriald, 2007). Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ανθεκτικότητα των αδρανών είναι ένας όρος που χρησιμοποιείται για να

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

περιγράψει την “υγεία” και τη “σκληρότητα” τους. Ενώ η “υγεία” συνδέεται με την υποβάθμιση των αδρανών λόγω καιρικών συνθηκών, η “σκληρότητα” ή η “ανθεκτικότητα / αντοχή στην τριβή” σχετίζεται με μηχανική υποβάθμιση. Τα αδρανή πρέπει να είναι σκληρά και ανθεκτικά στην τριβή για την πρόληψη της σύνθλιψης, της υποβάθμισης και της αποσάθρωσης κατά τη διάρκεια της παραγωγής, της μεταφοράς και της χρήσης τους στην κατασκευή. Τα αδρανή που δεν έχουν επαρκή ανθεκτικότητα και αντίσταση στην τριβή μπορούν να οδηγήσουν σε προβλήματα στην κατασκευή (Wu et al., 1998). Μία μέθοδος η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να χαρακτηρίσει τη συνολική αντίσταση των αδρανών υλικών σε τριβή είναι η δοκιμή Micro-Deval. Όπως αναφέρει ο Rogers (1998), η δοκιμή αυτή είναι αρκετά καλή για τον υπολογισμό της ποσότητας των αδύναμων και μαλακών υλικών στην άμμο.

Οι μηχανικές ιδιότητες που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή προσδιορίζονται σύμφωνα με το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM D7428: Πρότυπη μέθοδος καθορισμού της αντίστασης των λεπτόκοκκων αδρανών στην τριβή με την χρήση της συσκευής Micro-Deval.

### **2.4.5.1 Αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής με χρήση της συσκευής Micro-Deval**

Η δοκιμή αυτή, που αρχικά ονομαζόταν δοκιμή Deval, αναπτύχθηκε στη Γαλλία το 1870 και καθορίστηκε ως πρότυπη δοκιμή από την ASTM το 1908, με σκοπό τον προσδιορισμό της ποιότητας των αδρανών που χρησιμοποιούνται στην οδοποιία, ενώ τροποποιήθηκε το 1928 (Sweet, 1948). Οι Γάλλοι ερευνητές στη δεκαετία του '60 ήθελαν να τροποποιήσουν τη δοκιμή Deval, ώστε τα αδρανή να λειαινούνται και όχι να θραύονται (Clement et al., 2014). Διαπίστωσαν όμως ότι τα αδρανή λειαινόνταν περισσότερο με την παρουσία νερού (Jayawickrama et al., 2007). Ως εκ τούτου, η δοκιμή Deval τροποποιήθηκε αναλόγως.

Στις Η.Π.Α., η δοκιμή που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της αντίστασης των (λεπτόκοκκων) αδρανών σε τριβή με την παρουσία νερού είναι η ASTM D7428. Στην Ευρώπη, η δοκιμή Micro-Deval (EN 1097-1) συνιστάται μόνο για χονδρόκοκκο αδρανές υλικό. Μια άλλη διαφορά μεταξύ των δύο προαναφερθεισών πρότυπων δοκιμών σχετίζεται με το δείγμα. Στη δοκιμή ASTM, η μάζα του δείγματος για κάθε κλάσμα που διέρχεται από τα διάφορα κόσκινα με άνοιγμα οπής μεταξύ 4,75 mm και 0,075 m είναι καθορισμένη, ενώ στη δοκιμή EN η ταξινόμηση του δείγματος που διέρχεται από το κόσκινο με άνοιγμα οπής 14 mm και παραμένει στο κόσκινο με άνοιγμα οπής 10 mm

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

πρέπει να πληροί τουλάχιστον μία από τις ακόλουθες απαιτήσεις: το 30 - 40% του δείγματος θα πρέπει να διαπεράσει το κόσκινο με άνοιγμα οπής 11,2 mm, ή το 60 - 70% του δείγματος θα πρέπει να διαπεράσει το κόσκινο με άνοιγμα οπής 12,5 mm. Επίσης, κατά τη δοκιμή ASTM το δείγμα πρέπει να παραμείνει για τουλάχιστον 1 ώρα σε νερό πριν από την έναρξη της δοκιμής. Αντίθετα, η δοκιμή EN δεν αναφέρεται σε παραμονή του δείγματος στο νερό πριν από την έναρξη της περιστροφής των τύμπανων.

Οι Rached et al. (2012), σε δοκιμές που πραγματοποίησαν σε λεπτόκοκκα ανθρακικά πετρώματα (δολομίτες, ψαμμίτες, ασβεστόλιθους κ.α.) με βάση το Αμερικάνικο πρότυπο, κατέγραψαν τιμές συντελεστή MD που κυμαίνονταν από 12 έως 24%. Όπως σημειώνουν, οι ψηλές τιμές του συντελεστή φανερώνουν την παρουσία σχιστόλιθου ή κερατόλιθου. Αυτό, όπως αναφέρουν, μπορεί να εξηγήσει και το γεγονός γιατί μερικά αδρανή, παρά το ότι παρουσιάζουν ψηλά ποσοστά MD, παράλληλα παρουσιάζουν καλή απόδοση.

Οι Jayawickrama et al., (2007), σε έρευνα τους σε χονδρόκοκκα ανθρακικά (ασβεστόλιθους και ψαμμίτες) και πυριγενή αδρανή με βάση το Αμερικάνικο πρότυπο, κατέγραψαν τιμές συντελεστή MD που κυμαίνονταν για τους μεν ασβεστόλιθους από 4,8 έως 33,2%, για τους δε ψαμμίτες από 12,6 έως 19,4%. Στην ίδια έρευνα, για τα πυριγενή αδρανή καταγράφηκαν χαμηλότερες τιμές συντελεστή MD που κυμαίνονταν από 3,7 έως 10,2 %.

Ο Ρηγόπουλος (2009) πραγματοποίησε τη δοκιμή σε χονδρόκοκκα πυριγενή αδρανή με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο και παρατήρησε χαμηλές τιμές συντελεστή MD, κυρίως για τα αδρανή βασικής σύστασης. Όπως αναφέρει, οι τιμές του συντελεστή MD για τα αδρανή βασικής σύστασης κυμαίνονταν από 5,74 έως 8,10%, ενώ οι τιμές για τα υπερβασικά πετρώματα ήταν αρκετά ψηλότερες και κυμαίνονταν από 11,16 έως 22,00%. Όπως σημειώνει ο συγγραφέας, η μεγαλύτερη διακύμανση των προσδιορισθεισών τιμών των υπερβασικών πετρωμάτων αντανάκλα το μεγάλο εύρος του βαθμού σερπεντινίωσης και τεκτονικής καταπόνησης που παρουσιάζουν. Χαμηλότερες τιμές με μικρότερη διακύμανση παρουσίασαν οι τραχίτες, με συντελεστή MD από 7,72 έως 9,08%.

Σημειώνεται ότι αρκετοί ερευνητές (Wu et al., 1998; Cuelho et al., 2007) υποστηρίζουν ότι η δοκιμή Micro-Deval είναι πολύ καλή επιλογή για τον έλεγχο της ποιότητας των αδρανών υλικών. Παράλληλα, κάποιοι άλλοι ερευνητές (Phillips, 2000; Hanna, 2003) αναφέρουν



## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

ότι η δοκιμή Micro-Deval παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα, τόσο ενδο-εργαστηριακά, όσο και μεταξύ διαφορετικών εργαστηρίων.

### 2.4.6 Αναλυτικές τεχνικές χαρακτηρισμού αδρανών υλικών

Η γνώση των ιδιαίτερων πετρογραφικών χαρακτηριστικών του εκάστοτε λιθότυπου που χρησιμοποιείται στα διάφορα τεχνικά έργα, αποτελεί κλειδί για την κατανόηση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών υλικών και για την εκτίμηση της απόδοσής τους κατά τη διάρκεια "ζωής" ενός κατασκευαστικού έργου (Ρηγόπουλος, 2009). Πιο συγκεκριμένα, η ορυκτολογική σύσταση (Phillips, 2000), τα ιστολογικά χαρακτηριστικά, το μέγεθος, το σχήμα και η διάταξη των ορυκτών, η φύση και ο βαθμός σύνδεσης μεταξύ τους (Pomonis et al., 2007), όπως επίσης και ο βαθμός εξαλλοίωσης, αποσάθρωσης και παραμόρφωσης, αποτελούν τους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν τις φυσικομηχανικές ιδιότητες και συνεπώς την καταλληλότητα των αδρανών υλικών για χρήση τους σε διάφορες εφαρμογές (Ρηγόπουλος et al., 2008). Οι Akesson et al. (2001) συμφωνούν ότι η ορυκτολογία, η δομή, τα ιστολογικά χαρακτηριστικά και η αποσάθρωση των πετρωμάτων επηρεάζουν ιδιαίτερα τις μηχανικές τους ιδιότητες. Σημαντικό ρόλο ως προς τις μηχανικές ιδιότητες διαδραματίζει επίσης και η επαφή που υπάρχει μεταξύ των ορυκτών.

Από τα πιο πάνω, συνεπάγεται ότι η πετρογραφική εξέταση είναι σημαντική στην ανάλυση των αδρανών, αφού στοιχειοθετεί τις πληροφορίες που αφορούν ένα πέτρωμα, καθορίζοντας έτσι το βαθμό καταλληλότητας του λιθότυπου. Με την πετρογραφική εξέταση μπορούν επίσης να υπολογιστούν και οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος (Johansson, 2011). Στα μεταμορφωμένα πετρώματα, τη μεγαλύτερη επίδραση έχει η φύλλωση, ενώ στα πυριγενή και ιζηματογενή οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση του πετρώματος είναι κυρίως το μέγεθος του κόκκου και η ορυκτολογική σύσταση. Αρκετά από τα παραπάνω χαρακτηριστικά μπορούν να εξεταστούν με ορυκτολογική και πετρογραφική εξέταση.

Πετρογραφική εξέταση των αδρανών μπορεί να πραγματοποιηθεί με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 932-3 (Δοκιμές για τον προσδιορισμό των γενικών ιδιοτήτων των αδρανών. Μέρος 3: Διαδικασία και ορολογία για απλοποιημένη πετρογραφική περιγραφή). Οι Williams et al. (2005), παρόλο που σημειώνουν ότι η πετρογραφική εξέταση των ορυκτών των αδρανών μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό εργαλείο για την αξιολόγηση της ποιότητάς τους, εντούτοις θεωρούν ότι από μόνη της δεν είναι επαρκής για να προβλέψει

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

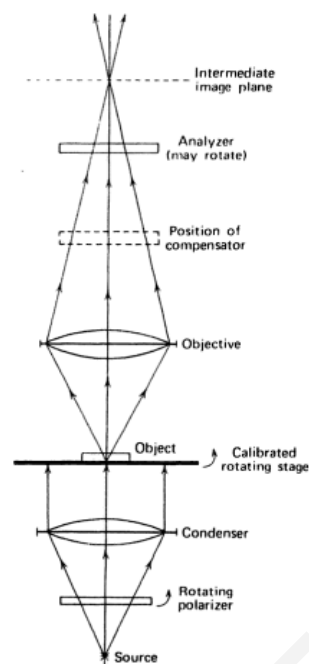
την απόδοση του τελικού προϊόντος. Οι Fowler et al. (2006) υποστηρίζουν, μέσα από βιβλιογραφική ανασκόπηση, ότι η πετρογραφική εξέταση πρέπει να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες δοκιμές. Ο Hanna (2003) σημειώνει ότι εκτός από το πετρογραφικό μικροσκόπιο, το οποίο όπως αναφέρει μπορεί να προσδιορίσει τα "βλαβερά" συστατικά που ενδεχομένως να επηρεάσουν το σκυρόδεμα, πολύ χρήσιμη μπορεί να θεωρηθεί και η ορυκτολογική ανάλυση με τη μέθοδο ακτινών X. Η περιθλασιμετρία ακτινών X θεωρείται πολύ καλή μέθοδος για τον εντοπισμό αργιλικών ορυκτών (π.χ. σμεκτίτες), καθώς και μη ανθεκτικών δολομιτικών αδρανών. Επίσης βοηθητικές μέθοδοι είναι και οι θερμοβαρυτικές (TGA) και χημικές (XRF) αναλύσεις.

Σήμερα υπάρχει πληθώρα αναλυτικών τεχνικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον χαρακτηρισμό των δομικών υλικών και των συστατικών τους. Μπορεί ωστόσο να υπάρξει διαχωρισμός αυτών των τεχνικών σε δυο ευρείες κατηγορίες: 1) τεχνικές άμεσης παρατήρησης: οπτική μικροσκοπία και ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM) (η οποία αναλύεται στην Παράγραφο 5.4.2.13.2), και 2) τεχνικές έμμεσης παρατήρησης: περιθλασιμετρία ακτινών X (XRD), φασματοσκοπία φθορισμού ακτινών X (XRF), ανιχνευτής ενεργειακής διασποράς ακτινών (EDXA). Αυτές οι τεχνικές παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες και σαφείς απαντήσεις αναφορικά με τα δοκίμια και τα υλικά τα οποία εξετάζονται (Sarkar & Samet, 1994).

### 2.4.6.1 **Πολωτικό μικροσκόπιο**

Το πολωτικό μικροσκόπιο είναι ένα θεμελιώδες εργαλείο για τους γεωλόγους που χρησιμοποιείται για την ταυτοποίηση των ορυκτών και την περιγραφή των πετρωμάτων. Ωστόσο, η χρήση του βρίσκει εφαρμογή και σε διάφορες άλλες επιστήμες, όπως για παράδειγμα αρχαιολογία, χημεία, φυσική, βιολογία, κεραμική, επιστήμη του περιβάλλοντος, μηχανική κ.α. (Stoiber & Morse, 1994).

Η βασική αρχή ενός οπτικού μικροσκοπίου είναι το φως που προέρχεται από μια λυχνία και κατευθύνεται προς ένα φακό, το συμπυκνωτή, ο οποίος το κατευθύνει στο υπό εξέταση δείγμα. Ακολούθως, καθώς το φως περνά μέσα από το δείγμα που εξετάζεται, δημιουργεί μια εικόνα με την αρχή της διάθλασης, την οποία λαμβάνει ένας μεγεθυντικός φακός, που ονομάζεται αντικειμενικός φακός. Στη συνέχεια, την εικόνα του αντικειμένου φακού την παραλαμβάνει ο προσοφθάλμιος φακός, που είναι αυτός με τον οποίο θα παρατηρήσει το δείγμα ο ερευνητής (Rack, 2004), (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2: Αρχή λειτουργίας πολωτικού μικροσκοπίου (Slayter & Slayter, 1992).

Η εφεύρεση του πρώτου μικροσκοπίου αποδίδεται στον Ζαχαρία Γιάνσεν που πριν πολλές εκατοντάδες χρόνια, περίπου το 1600, με την επαναστατική του εφεύρεση για τα τότε δεδομένα έδωσε τη δυνατότητα να μελετηθεί ο μικρόκοσμος σε λεπτομέρεια (Römer, 2005). Ακολούθως, με την πάροδο των χρόνων και την εξέλιξη της τεχνολογίας, οδηγηθήκαμε στη συνεχή βελτίωση των επιδόσεων του μικροσκοπίου και στη δημιουργία διαφορετικών τύπων μικροσκοπίου, όπως για παράδειγμα του πολωτικού μικροσκοπίου.

Το πολωτικό πετρογραφικό μικροσκόπιο διαφοροποιείται από το κοινό μικροσκόπιο λόγω της ύπαρξης περιστρεφόμενης τράπεζας, αλλά και των δύο πολωτικών φίλτρων, του πολωτή και του αναλυτή (Haynes, 1984).

#### 2.4.6.2 Περιθλασιμετρία ακτίνων X (X-Ray Diffraction – XRD)

Μια από τις σημαντικότερες τεχνικές χαρακτηρισμού που χρησιμοποιείται στην επιστήμη υλικών για τη μελέτη της δομής των ενώσεων στη στερεή κατάσταση είναι η φασματοσκοπία περίθλασης ακτίνων X (XRD). Η περίθλαση ακτίνων - X είναι η διαδικασία εκπομπής ακτίνων - X που οφείλεται στην αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη (Bell, 2008). Η περίθλαση πραγματοποιείται όταν ένα κύμα συναντά μια σειρά από εμπόδια, τα οποία είναι τοποθετημένα σε τακτική διάταξη και είτε είναι ικανά να σκεδάσουν το κύμα, είτε έχουν αποστάσεις συγκρίσιμες με το μήκος κύματος της ακτινοβολίας (Γραμματικόπουλος, 2013). Με την περίθλαση ακτίνων - X μπορεί να

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

προσδιοριστεί η μικροσκοπική δομή της ύλης και οι κρυσταλλογραφικές ιδιότητες των υλικών. Κάθε ορυκτό έχει ένα μοναδικό διάγραμμα περίθλασης ακτινών - X (XRD) το οποίο εξαρτάται από την κρυσταλλική του δομή, και σε μικρότερο βαθμό από τη σύνθεσή του. Τα διαγράμματα XRD χρησιμοποιούνται για να ταυτοποιήσουν ορυκτά και να προσδιορίσουν την αναλογία των διαφόρων ορυκτών (Petruk, 2000). Μπορεί επίσης να παρέχουν πληροφορίες για το βαθμό κρυσταλλικότητας των ορυκτών, τον προσανατολισμό των κρυστάλλων, καθώς και το περιεχόμενο σε άμορφη φάση (Ζαχαράκη, 2009).

Η κρυσταλλογραφία ακτινών - X έχει τις ρίζες της στις μελέτες που πραγματοποιήθηκαν τον 19<sup>ο</sup> αιώνα για να ανακαλύψουν τη φύση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από τους καθοδικούς σωλήνες, η οποία ήταν γνωστή την εποχή εκείνη ως "ακτίνες Roentgen" ή "ακτινοβολία X" (Brittain, 2006). Ανακαλύφθηκε το 1895 από τον W.C. Roentgen, ο οποίος πειραματιζόμενος με ένα καθοδικό σωλήνα παρήγαγε ακτίνες X που προκάλεσαν το φθορισμό ενός παρακείμενου αντικειμένου (Glasser, 1993). Το 1912, ο Max von Laue σε πειραματική διάταξη που προτάθηκε από τον ίδιο επιβεβαίωσε την κρυσταλλική δομή της ύλης μέσω της περίθλασης ακτινών - X (Eckert, 2012). Το 1913, ο Bragg χρησιμοποίησε την περίθλαση ακτινών - X για να προσδιορίσει την κρυσταλλική δομή, και ταυτόχρονα εισήγαγε την έννοια της ανάκλασης, αφού σημείωσε ότι εάν μια δέσμη ακτινών - X πέσει πάνω σε τρισδιάστατη πλεγματοκή διάταξη, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι η περίθλαση ακτινών - X ισοδυναμεί γεωμετρικά με ανάκλαση της προσπίπτουσας δέσμης από τις διάφορες ομάδες των παράλληλων πλεγματοκών επιπέδων (Brittain, 2006). Για να προσδιορίσει τις δομές απλών κρυσταλλικών υλικών, ο Bragg ανέπτυξε μια σχέση η οποία είναι τώρα γνωστή ως ο νόμος Bragg (2.1):

$$2d \sin\theta = n\lambda \quad (2.1)$$

όπου:

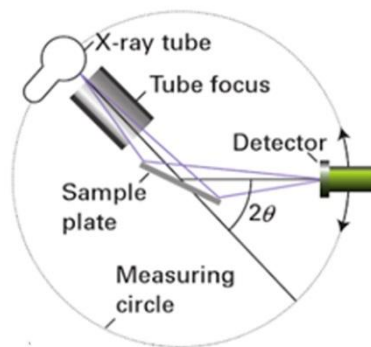
$d$  = η ισο-απόσταση μεταξύ των επιπέδων των ατόμων (d-spacing)

$\lambda$  = το μήκος κύματος των ακτινών - X

$n$  = η τάξη της ανάκλασης, ακέραιος αριθμός

$\theta$  = η συμπληρωματική γωνία πρόσπτωσης.

Ο νόμος αυτός υποδηλώνει ότι οι ακτίνες - X με μήκος κύματος  $\lambda$  περιθλώνται σε μια σειρά από γωνίες, οι οποίες ικανοποιούν την Εξίσωση ((2.1) (Smith, 2012) (Εικόνα 2.3).

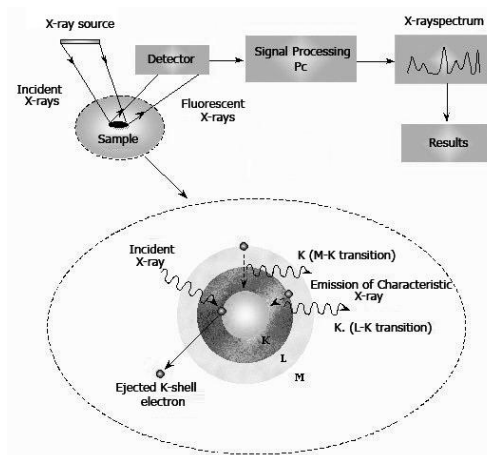


Εικόνα 2.3: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας περιθλασιόμετρου ακτίνων - X (Atkins et al., 2010).

#### 2.4.6.3 Φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (*X-Ray Fluorescence – XRF*)

Η Φασματοσκοπία φθορισμού ακτίνων X (XRF) είναι μια αναλυτική τεχνική που έχει σκοπό τη στοιχειακή ανάλυση των υλικών, και χρησιμοποιείται τόσο στη βιομηχανία, όσο και στην έρευνα (Potts, 2005), και ειδικότερα στην αρχαιολογία, γεωλογία, επιστήμη υλικών, περιβάλλον κ.α. (Strelt et al., 1999). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της τεχνικής XRF είναι ο ταυτόχρονος και γρήγορος προσδιορισμός στοιχείων από όλο σχεδόν τον περιοδικό πίνακα ( $Z=14-92$ ), αλλά και η μεγάλη ευαισθησία στην ανάλυση με ανιχνευτικά όρια που κυμαίνονται συνήθως στην περιοχή των  $\mu\text{g/g}$  (ppm) (Σιανούδης et al., 2006).

Η βασική αρχή της φασματομετρίας φθορισμού ακτίνων - X βασίζεται στη θεωρία ότι σταθερά άτομα εκπέμπουν χαρακτηριστικές ακτίνες - X όταν εκτίθενται σε ιονίζουσα ακτινοβολία, όπως είναι για παράδειγμα οι ακτίνες -  $\gamma$  ή τα φωτόνια ακτίνων - X που παράγονται από λυχνία ακτίνων - X ή από ραδιενεργό πηγή (Hansson et al., 2009). Εάν ένας στόχος ακτινοβολείται με φωτόνια ή φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια ή ιόντα) με ενέργεια που υπερβαίνει την ενέργεια δέσμευσης των δεσμευμένων εσωτερικών ηλεκτρονίων, τότε μπορεί να εκτοξευθεί ένα ηλεκτρόνιο από το εσωτερικό τροχιακό των ατόμων-στόχων (Kramar, 1999) (Εικόνα 2.4).



**Εικόνα 2.4:** Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας φασματομέτρου φθορισμού ακτίνων - X (Qutaishat, 2011).

Η τεχνική της φασματοσκοπίας φθορισμού ακτίνων X παρέχει τα μέσα για την ταυτοποίηση ενός στοιχείου μετρώντας το μήκος κύματος των χαρακτηριστικών ακτίνων - X που εκπέμπονται ή την ενέργειά τους. Αν και οι ρίζες της μεθόδου πάνε πίσω στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, μόνο κατά τη διάρκεια των τελευταίων περίπου εβδομήντα χρόνων η τεχνική αυτή έχει αποκτήσει μεγάλη σημασία ως ένα μέσο ρουτίνας για τη στοιχειακή ανάλυση των υλικών. Ο πρώτος που εφάρμοσε την τεχνική αυτή ήταν ο Moseley το 1912 (Jenkins, 2008). Με την χρήση του μοντέλου του, ο Moseley μέτρησε τις χαρακτηριστικές ενέργειες σε ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων και κυρίως σε μέταλλα, και συσχέτισε την χαρακτηριστική τους ενέργεια με το εκάστοτε ατομικό αριθμό  $Z$  του κάθε στοιχείου. Επιπλέον, απέδειξε τη μαθηματική σχέση που συνδέει τα μήκη κύματος των φασματικών γραμμών από ένα μεγάλο αριθμό στοιχείων με τον ατομικό τους αριθμό  $Z$ . Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως ο νόμος Moseley (2.2).

$$1/\lambda = C(Z-\sigma)^2 \quad (2.2)$$

όπου:

$\lambda$  = το μήκος κύματος της ακτινοβολίας X

$Z$  = ο ατομικός αριθμός του στοιχείου

$C$  και  $\sigma$  = σταθερές,  $C \approx R$  (σταθερά Rydberg) και  $\sigma \sim 1$ , γνωστή ως σταθερά προάσπισης (Σιανούδης et al., 2006).

## 2.5 Συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων των αδρανών

Οι συσχετίσεις μεταξύ διαφόρων ιδιοτήτων βοηθούν στην αντίληψη του τρόπου με τον οποίο μεταβάλλονται οι ιδιότητες, ενώ επίσης μπορούν να εκτιμήσουν την τάση που ακολουθεί μια ιδιότητα σε σχέση με κάποια άλλη. Οι παράγραφοι που ακολουθούν αφορούν μόνο συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων των αδρανών που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή.

Εξετάζοντας τις δοκιμές ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου μέσα από πειραματικές μελέτες, οι Νικολαΐδης et al. (2005) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο αυτών δοκιμών, λόγω της διαφορετικής τους φύσης. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Petkonšek et al. (2010), οι οποίοι τονίζουν ότι οι δύο προαναφερθείσες δοκιμές είναι συμπληρωματικές και δεν μπορούν να αντικαταστήσουν η μια την άλλη στον ποιοτικό έλεγχο των αδρανών. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι ίδιοι μελετητές, όταν τα αδρανή παρουσιάζουν ισοδύναμο άμμου  $SE > 40$  είναι βέβαιο ότι πληρείται το κριτήριο 1,5 g/kg για το μπλε του μεθυλενίου. Στη διαφορετική φύση των δύο δοκιμών αποδίδουν την ασθενή έως μέση ( $R^2 = 0,33$ ,  $R^2 = 0,39$  και  $R^2 = 0,57$ ) αρνητική συσχέτιση που παρατήρησαν και οι Mpalatsas et al. (2013), οι οποίοι πραγματοποίησαν δοκιμές σε διαφορετικούς τύπους ασβεστολιθικών αδρανών (βιομικρίτες, σπαρίτες και απολιθωματοφόρους μικρίτες).

Οι Xirouchakis & Theodoropoulos (2009), μετά από δοκιμές σε ασβεστολιθικά αδρανή δεν παρατήρησαν ιδιαίτερη συσχέτιση ( $r = -0,23$ ) μεταξύ των δοκιμών ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου. Αυτό το απέδωσαν στην απουσία αργιλικών ορυκτών στα υλικά που εξέτασαν. Καμία συσχέτιση ( $r = -0,04$ ) μεταξύ των δοκιμών ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου δεν παρατήρησαν ούτε και οι Rigopoulos et al. (2013) που εξέτασαν οφιολιθικά αδρανή (δουνίτες, χαρτζβουργίτες, διορίτες κ.α.). Αντίθετα, αρκετά καλή αρνητική συσχέτιση ( $R^2 = 0,94$ ) σε άμμους με προσθήκη ασβεστολιθικής και αργιλικής παιπάλης σε διαφορετικά ποσοστά παρατήρησαν οι Ρουβέλας et al. (2009), παρόλο που σε αυτή τη μελέτη η δοκιμή ισοδύναμου άμμου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις πρόνοιες του Αμερικάνικου Προτύπου ASTM D2419. Όπως αναφέρουν οι ίδιοι συγγραφείς (Ρουβέλας et al., 2009), σε χαμηλά ποσοστά συνολικής παιπάλης (ασβεστολιθικής και αργιλικής), το μπλε του μεθυλενίου ανιχνεύει αρκετά καλά τα επιβλαβή για το σκυρόδεμα αργιλικά, ενώ οι μετρήσεις ισοδύναμου άμμου δεν οδηγούν σε ασφαλή συμπεράσματα.

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

Ο Richardson (2009) αναφέρει ότι το ισοδύναμο άμμου είναι μια δοκιμή που δεν παρουσιάζει συσχετίσεις με άλλες δοκιμές, αφού παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής της, π.χ. διείδυση των λεπτών (fines) στο στρώμα της άμμου. Επίσης, η διαβάθμιση και το σχήμα των μεγαλύτερων κόκκων των αδρανών ποικίλλει από υλικό σε υλικό, και φαίνεται ότι μεταβάλλει τα αποτελέσματα της δοκιμής. Οι Prowell et al. (2005) σημειώνουν ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου μπορεί να είναι παραπλανητικά για τη θραυστή άμμο, ενώ θεωρούν ότι η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου είναι η καλύτερη μέθοδος για να προσδιοριστούν τα ενεργά αργιλικά ορυκτά.

Οι Rigoroulos et al. (2013), εξετάζοντας το ισοδύναμο άμμου και τη δοκιμή Micro-Deval σε οφιολιθικά πετρώματα δεν παρατήρησαν κάποια συσχέτιση ( $r = 0,15$ ). Εμφανώς καλύτερη ήταν η συσχέτιση του ισοδύναμου άμμου με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο ( $r = -0,55$ ). Ενώ οι Xirouchakis & Theodoropoulos (2009), δεν παρατήρησαν ιδιαίτερη συσχέτιση ( $r = -0,24$ ) μεταξύ των δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και ισοδύναμου άμμου σε ασβεστολιθικά αδρανή.

Όσον αφορά τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, οι Rigoroulos et al. (2013) συσχετίζοντας την, τόσο με τη δοκιμή αποσάθρωσης, όσο και με τη δοκιμή Micro-Deval, παρατήρησαν ασθενείς συσχετίσεις ( $r = 0,43$  και  $r = -0,38$ , αντίστοιχα). Σε παρόμοια αποτελέσματα κατέληξαν και οι Xirouchakis & Theodoropoulos (2009) αναφορικά με τις δοκιμές μπλε του μεθυλενίου και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο ( $r = 0,40$ ).

Οι Fowler et al. (2006) αναφέρουν ότι έγιναν πολλές προσπάθειες από διάφορους μελετητές για να συνδέσουν την απορροφητικότητα με άλλες δοκιμές ποιοτικού ελέγχου, όπως για παράδειγμα με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο, χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Σημειώνουν ωστόσο ότι, παρόλο που δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των δύο αυτών ιδιοτήτων, εντούτοις σε σχετική έρευνα το 82% των αδρανών με απορροφητικότητα >2% θεωρήθηκαν μη υγιή με βάση τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο. Οι Xirouchakis & Theodoropoulos (2009), σε πειραματικές δοκιμές που πραγματοποίησαν σε ασβεστολιθικά αδρανή προκειμένου να συσχετίσουν τη δοκιμή της απορροφητικότητας με τις δοκιμές μπλε του μεθυλενίου, ισοδύναμου άμμου και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, δεν παρατήρησαν ιδιαίτερες συσχετίσεις ( $r = -0,07$ ,  $r = -0,27$  και  $r = -0,20$ , αντίστοιχα). Απουσία συσχέτισης παρατήρησαν και οι Rigoroulos et al. (2013) σε δοκιμές που πραγματοποίησαν σε οφιολιθικά αδρανή όσον αφορά τις δοκιμές απορροφητικότητας και μπλε του μεθυλενίου ( $r = 0,18$ ). Χαμηλού βαθμού ήταν και οι



## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

συσχετίσεις που παρατήρησαν οι ίδιοι ερευνητές (Rigoroulos et al., 2013) μεταξύ των δοκιμών απορροφητικότητας, Micro-Deval και ισοδύναμου άμμου ( $r = 0,29$  και  $r = -0,44$ , αντίστοιχα). Αντίθετα, ισχυρή ήταν η συσχέτιση μεταξύ των δοκιμών απορροφητικότητας και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο ( $r = 0,77$ ). Όπως αναφέρουν οι συγγραφείς (Rigoroulos et al., 2013), η συσχέτιση αυτή υποδεικνύει ότι αδρανή με υψηλά ποσοστά απορροφητικότητας τείνουν να έχουν χαμηλή αντίσταση σε αποσάθρωση. Σε αντίθεση με τους πιο πάνω συγγραφείς, οι Rogers et al. (1991) παρατήρησαν πολύ ισχυρή συσχέτιση ( $R^2 = 0,81$ ) μεταξύ των δοκιμών απορροφητικότητας και Micro-Deval. Όπως σχολιάζουν οι πιο πάνω μελετητές, όσο πιο πορώδες είναι ένα υλικό, τόσο πιο αδύναμο και πιο επιδεκτικό σε φθορά είναι.

Ο Williamson (2005), μετά από σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό νάτριο και απορροφητικότητας, παρατήρησε μέση συσχέτιση ( $R^2 = 0,30$ ). Σχολίασε δε ότι αυτό οφείλεται στο ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό νάτριο παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα. Οι Koukis et al. (2007) και Goswami (1984) παρατήρησαν ενδιάμεσο βαθμό θετικής συσχέτισης μεταξύ των δύο προαναφερθεισών ιδιοτήτων. Ενδιάμεσου βαθμού συσχέτιση παρατήρησε και ο Ρηγόπουλος (2009) μεταξύ των δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και απορροφητικότητας. Όπως σημειώνουν οι πιο πάνω ερευνητές (Goswami, 1984; Koukis et al., 2007; Ρηγόπουλος, 2009), πετρώματα τα οποία έχουν αυξημένες τιμές απορροφητικότητας αναμένεται να είναι ιδιαίτερα επιδεκτικά στην αποσάθρωση. Οι Koukis et al. (2007), συγκεκριμένα, αναφέρουν ότι η απορροφητικότητα σε νερό είναι ένα χρήσιμο εργαλείο προσδιορισμού της ανθεκτικότητας των αδρανών. Αδρανή με απορροφητικότητα  $>3\%$  δύναται να υποστούν ζημιά λόγω ψύξης-απόψυξης. Οι Aghamelu and Okogbue (2013) συμφωνούν ότι η ιδιότητα της απορροφητικότητας είναι πολύ σημαντική προκειμένου να διαπιστωθεί η αντοχή, η ανθεκτικότητα και γενικότερα η "υγεία" των πετρωμάτων. Οι Tia et al. (2012) σημειώνουν ότι η απορροφητικότητα σε νερό είναι μια έμμεση μέθοδος μέτρησης της διαπερατότητας ενός αδρανούς υλικού, και προσθέτουν ότι η πιο πάνω ιδιότητα μπορεί να συσχετιστεί με άλλα χαρακτηριστικά του, όπως για παράδειγμα τις μηχανικές αντοχές, την αποσάθρωση, και γενικά την ανθεκτικότητα.

Πολύ ισχυρή συσχέτιση της δοκιμής Micro-Deval με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο ( $R^2 = 0,85$ ), όσον αφορά λεπτόκοκκα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα, παρατήρησαν οι Rogers et al. (1991). Οι Brandes & Robinson (2006) υποστηρίζουν ότι είναι λογική η συσχέτιση των δοκιμών αποσάθρωσης και Micro-Deval,

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

λόγω του ότι και οι δύο δοκιμές πραγματοποιούνται σε υγρές συνθήκες. Από τις πειραματικές τους δοκιμές, οι πιο πάνω ερευνητές παρατήρησαν οριακά καλύτερη συσχέτιση της δοκιμής Micro-Deval με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο ( $r = 0,87$ ), σε σχέση με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο ( $r = 0,77$ ).

Όσον αφορά τα χονδρόκοκκα αδρανή, οι Senior & Rogers (1991) συμφωνούν με τους πιο πάνω συγγραφείς, ότι δηλαδή παρατηρείται πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των δοκιμών Micro-Deval και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο. Σημειώνεται ότι οι Senior & Rogers (1991) αναφέρουν πως η ακρίβεια της δοκιμής Micro-Deval, ειδικά για υλικά που παρουσιάζουν ψηλές απώλειες μάζας, είναι καλύτερη, από ότι η αντίστοιχη ακρίβεια της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο. Οι ίδιοι ερευνητές υποστηρίζουν επίσης ότι η δοκιμή Micro-Deval, σε συνδυασμό με τη δοκιμή απορροφητικότητας και την πετρογραφική εξέταση του δείγματος, μπορεί να προβλέψουν την απόδοση των οριακών αδρανών. Σε πετρογραφική εξέταση που πραγματοποίησαν (Senior & Rogers, 1991), φάνηκε ότι "κακής" ποιότητας αδρανή υλικά παρουσιάζουν απώλεια μάζας >20% στη δοκιμή Micro-Deval. Στην καλή συσχέτιση μεταξύ των δοκιμών Micro-Deval και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, κατέληξαν και οι Rogers et al. (2003) σε σχετική έρευνά τους. Αντίθετα με τους πιο πάνω συγγραφείς, οι Rigoroulos et al. (2013), δεν παρατήρησαν κάποια συσχέτιση ( $r = -0,12$ ) μεταξύ των δοκιμών αυτών στα δικά τους δείγματα. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Rangaraju and Edlinski (2008), που υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη συσχέτιση της δοκιμής Micro-Deval με τις δοκιμές αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και θειικό νάτριο.

Οι Prowell et al. (2005) και Hoare (2003) σημειώνουν ότι, παρόλο που ο στόχος των δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και Micro-Deval είναι η αξιολόγηση της ποιότητας των αδρανών, εντούτοις πρόκειται για δύο εντελώς διαφορετικής φύσης δοκιμές. Οι μηχανισμοί στους οποίους οφείλεται η αποσάθρωση λόγω θειικού μαγνησίου είναι διαφορετικοί από τους μηχανισμούς που προκαλούν φθορά κατά τη δοκιμή Micro-Deval. Στη δοκιμή αποσάθρωσης, η αποσύνθεση των αδρανών οφείλεται στις εσωτερικές τάσεις που προκαλούν οι κρύσταλλοι άλατος στα τοιχώματα των πόρων του υλικού όπου αναπτύσσονται, και οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μικρορωγμών υπό την επίδραση θέρμανσης-ψύξης και διαβροχής-ξηράνσης. Αντίθετα, η διάβρωση στην οποία υπόκεινται τα αδρανή κατά τη δοκιμή Micro-Deval οφείλεται στη διαβροχή τους και στις εξωτερικές μηχανικές τάσεις που ασκούνται κατά την τριβή τους με τις μεταλλικές σφαίρες που τοποθετούνται στο τύμπανο της μηχανής. Ως εκ τούτου, το αδρανές

## Κεφάλαιο 2: Αδρανή Υλικά

επηρεάζεται εξωτερικά και στην ουσία απομακρύνονται οι διάφορες επιφανειακές ανωμαλίες/αδυναμίες που μπορεί να υπάρχουν. Κατά συνέπεια, όπως αναφέρει ο Hoare (2003), αναμένεται ένα αδρανές να παρουσιάσει μεγαλύτερες απώλειες όταν είναι πεπλατυσμένο ή επίμηκες, σε σύγκριση με ένα άλλο το οποίο είναι πιο στρογγυλεμένο. Παρόλα αυτά, και στις δύο περιπτώσεις ο βαθμός συγκόλλησης (cementation) και το είδος του συνδετικού υλικού είναι αυτά που καθορίζουν την τελική αντοχή του υπό εξέταση δείγματος.

Ο Hoare (2003), στην προσπάθειά του να ελέγξει κατά πόσο κάποιες διαφοροποιήσεις στη μεθοδολογία εκτέλεσης της δοκιμής Micro-Deval επηρεάζουν τη συσχέτισή της με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, πραγματοποίησε τη δοκιμή Micro-Deval με τις εξής παραλλαγές: α) αύξησε το χρόνο παραμονής των αδρανών στο νερό από 1 ώρα σε 24 ώρες, β) έβαλε τα αδρανή σε νερό και τα ζέστανε για 2 ώρες πριν τη δοκιμή, και γ) διαφοροποίησε την καθορισμένη από το πρότυπο διαβάθμιση, ώστε να πλησιάζει αυτή της δοκιμής αποσάθρωσης με χρήση θειικού μαγνησίου. Ωστόσο, καμία από αυτές τις μετατροπές δεν επηρέασε τη συσχέτιση των δύο δοκιμών. Ο ίδιος συγγραφέας υποστηρίζει ότι η δοκιμή Micro-Deval θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί συμπληρωματικά, όταν κάποιο υλικό βρίσκεται εκτός ορίων της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο.

## **3 Επίδραση αδρανών σε σύνθετα δομικά υλικά**

### **3.1 Γενικά**

Τα αδρανή υλικά καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της μάζας του σκυροδέματος, αφού όπως αναφέρουν αρκετοί ερευνητές (Wu et al., 2001a; Alexander & Mindess, 2005; Mindess, 2008; Alhozaimy, 2009; Tugrul & Yilmaz, 2012) η συμμετοχή τους στο συνολικό όγκο του σκυροδέματος είναι περίπου 75-80%. Αναφορικά με τα κονιάματα, η συμμετοχή των αδρανών είναι  $\geq 50\%$  λόγω του ότι η συνηθέστερη αναλογία αδρανών/συνδετικού υλικού είναι 3:1 αντίστοιχα (Reichel et al., 2005; Stefanidou & Paragianni, 2005; Gambhir, 2013). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η ποιότητα και οι ιδιότητες των αδρανών να επηρεάζουν σημαντικά τη μακροχρόνια συμπεριφορά των δύο προαναφερθέντων σύνθετων δομικών υλικών, και ιδιαίτερα την ανθεκτικότητά τους.

Όσον αφορά το σκυρόδεμα, αρκετοί είναι οι ερευνητές (Hanna, 2003; Brandes & Robinson, 2006; Rangaraju & Edlinski, 2008) οι οποίοι επιβεβαιώνουν το γεγονός ότι τα αδρανή υλικά επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Τα αδρανή ασκούν σημαντική επίδραση στην αντοχή και στην ακαμψία του σκυροδέματος. Γενικά, από όλα τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ενός συμβατικού σκυροδέματος, τα αδρανή θεωρούνται τα πιο ανθεκτικά και σταθερά υλικά (Alexander & Mindess, 2005). Γι' αυτό παρέχουν ανθεκτικότητα στο τελικό προϊόν, με την προϋπόθεση ωστόσο ότι χρησιμοποιούνται καλής ποιότητας αδρανή.

Σχετικά με τα κονιάματα, οι Haach et al. (2011) αναφέρουν ότι η γνώση των διαφόρων ιδιοτήτων των αδρανών, όπως για παράδειγμα η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, είναι θεμελιώδης για την εξασφάλιση της καλής τους απόδοσης στην τοιχοποιία. Οι Reichel et al. (2005), σημειώνουν ότι τα αδρανή επηρεάζουν την πυκνότητα, το πορώδες, τη θλιπτική αντοχή και την ανθεκτικότητα στις περιβαλλοντικές συνθήκες των κονιαμάτων, ενώ οι Zhang et al. (2013), υποστηρίζουν ότι τα λεπτόκοκκα αδρανή επηρεάζουν σημαντικά τη συστολή ξήρανσης των κονιαμάτων. Οι Lanas & Alvares (2003) συσχετίζουν άμεσα τα χαρακτηριστικά των αδρανών (π.χ. είδος και σχήμα) με τις μηχανικές αντοχές των κονιαμάτων. Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν και οι De Schutter & Poppe (2004), αλλά και οι Maza et al. (2016), που υποστηρίζουν ότι ο τύπος της άμμου που χρησιμοποιείται στα κονιάματα επηρεάζει τις ρεολογικές και μηχανικές τους ιδιότητες.

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

Συνεπάγεται λοιπόν ότι η επιλογή των κατάλληλων αδρανών ώστε να παραχθεί ένα προϊόν με τις καλύτερες ιδιότητες είναι πολύ σημαντική (Abu Seif, 2013). Επιβεβαιώνεται άρα η ανάγκη για ενδελεχή έλεγχο των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών υλικών, πριν από την χρήση τους, προκειμένου να διασφαλιστεί η βέλτιστη ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται βιβλιογραφικά η επίδραση των διαφόρων ιδιοτήτων των αδρανών υλικών στην ποιότητα των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων, και επιχειρείται μια συσχέτιση των χαρακτηριστικών τους με τα χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος.

#### **3.2 Επίδραση ιδιοτήτων των αδρανών στο σκυρόδεμα/κονίαμα**

Η καταλληλότητα των αδρανών υλικών προσδιορίζεται από διάφορες ιδιότητες που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά τους. Είναι δεδομένο ότι οι ιδιότητες των αδρανών δεν επηρεάζουν μόνο τις αναλογίες του μίγματος που συμμετέχουν, αλλά και τη συμπεριφορά του νωπού και σκληρυμένου σκυροδέματος (Mehta & Monteiro, 2013), όπως επίσης και των κονιαμάτων (Gonçalves et al., 2007). Όπως αναφέρει ο Vieira (2015), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αδρανών επηρεάζουν κυρίως το σκυρόδεμα/κονίαμα στη νωπή του κατάσταση, ενώ τα ορυκτολογικά τους χαρακτηριστικά επηρεάζουν κυρίως τις φυσικές ιδιότητες του σκυροδέματος/κονιάματος κατά τη σκληρυμένη του κατάσταση.

##### **3.2.1 Γεωμετρικές ιδιότητες αδρανών υλικών**

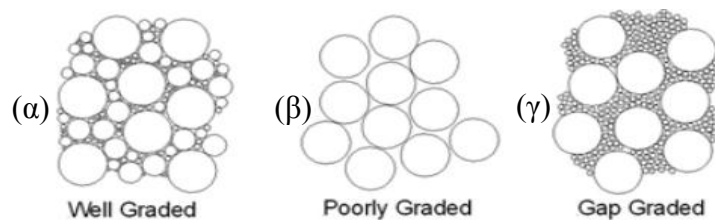
Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των αδρανών, όπως για παράδειγμα η επιφανειακή τους υφή, το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων, η κοκκομετρική κατανομή τους κ.α. επηρεάζουν τις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος/κονιάματος (Cetin & Carrasquillo, 1998; Wu et al., 2001b; Basheer et al., 2005). Συγκεκριμένα, έχει παρατηρηθεί ότι η μεταβολή του μεγέθους του μέγιστου κόκκου καλά διαβαθμισμένων αδρανών δεδομένης ορυκτολογικής σύστασης, μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του σκυροδέματος (Τριανταφύλλου, 2013). Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος των κόκκων των αδρανών, τόσο μικρότερη είναι και η ειδική επιφάνεια που διαβρέχεται. Ως εκ τούτου, αυξάνοντας το μέγεθος των κόκκων των αδρανών, μειώνεται και η απαίτηση σε νερό στο μίγμα. Άρα, μειώνεται ο λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c), με συνέπεια την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος/κονιάματος (Neville & Brooks, 1993). Ο Daniel (2006), συγκρίνοντας το μέγεθος των κόκκων της άμμου, αναφέρει ότι σκυροδέματα τα οποία

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

περιέχουν λεπτόκοκκη άμμο απαιτούν περισσότερο νερό για να έχουν την ίδια συνεκτικότητα με σκυροδέματα που περιέχουν ίδιας ποσότητας χονδρόκοκκη άμμο. Ωστόσο, από την άλλη, όπως σημειώνει ο ίδιος ερευνητής (Daniel, 2006), περισσότερη χονδρόκοκκη άμμος μπορεί να έχει αρνητική επίδραση στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

Η κατανομή του μεγέθους των κόκκων των αδρανών επηρεάζει σημαντικά κάποια χαρακτηριστικά του νωπού σκυροδέματος/κονιάματος, όπως για παράδειγμα την πυκνότητα και το περιεχόμενο του σε κενά (Neville & Brooks, 1993). Έτσι, επηρεάζονται η εργασιμότητα (και η αντλησιμότητα) του σκυροδέματος/κονιάματος, ενώ μπορεί επίσης να υποστεί απόμιξη το νωπό μίγμα (Sims & Brown, 1988; Quiroga & Fowler, 2004).

Μίγματα με ομοιόμορφα κατανεμημένα αδρανή (Εικόνα 3.1 (α)) γενικά σχηματίζουν πυκνότερα σκυροδέματα/κονιάματα με καλύτερη δομή, και κατά συνέπεια μικρότερη διαπερατότητα (Goltermann et al., 1997). Περίσσεια (Εικόνα 3.1 (β)) ή απουσία (Εικόνα 3.1 (γ)) οποιουδήποτε κλάσματος αδρανών οδηγεί σε μειωμένη εργασιμότητα, και ως εκ τούτου σε μειωμένη ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος (Shilstone, 1990). Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ότι για τον ίδιο μέγιστο κόκκο αδρανών, και τον ίδιο λόγο N/T, η μεταβολή της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος/κονιάματος λόγω μεταβολής της εργασιμότητας του νωπού μίγματος. Σε ένα μίγμα σκυροδέματος/κονιάματος που περιέχει καλά διαβαθμισμένα αδρανή, με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν ολόκληρο το φάσμα, απαιτείται μικρή ποσότητα τσιμεντοπολτού (ή άλλης κονιάς), αφού τα κενά μεταξύ των αδρανών είναι λίγα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους και την αύξηση της ογκοσταθερότητας του τελικού προϊόντος (Τριανταφύλλου, 2013). Είναι γενικά αποδεκτό από αρκετούς ερευνητές (Scholer & Baker, 1973; Arum & Olotuah, 2006; Graves, 2006; Meddah et al., 2010) ότι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος και των κονιαμάτων (McIntosh, 1970) είναι άμεσα συνδεδεμένη με τις αναλογίες μεταξύ των μεγεθών των αδρανών και συγκεκριμένα με την κοκκομετρική τους κατανομή.



**Εικόνα 3.1: (α) Καλά διαβαθμισμένο μίγμα, (β) περίσσεια χονδρόκοκκου κλάσματος και (γ) απουσία ενδιάμεσου κλάσματος (Gambhir, 2013).**

Ο Graves (2006), αναφέρει ότι η επίδραση που έχει η κοκκομετρική διαβάθμιση των λεπτόκοκκων αδρανών στην εργασιμότητα του σκυροδέματος είναι αρκετά μεγαλύτερη από την επίδραση που έχει η κοκκομετρική διαβάθμιση των χονδρόκοκκων αδρανών. Αν τα λεπτόκοκκα αδρανή αποτελούνται από μεγάλα τεμάχια, τότε δημιουργείται απόμιξη, διαχωρισμός και τραχύτητα στο μίγμα. Αν ωστόσο αποτελούνται από πολύ μικρά τεμάχια, αυξάνεται η απαίτηση σε νερό (Galloway, 1994), λόγω της πολύ μεγαλύτερης επιφάνειας των σωματιδίων τους. Παρόλα αυτά, μπορεί να βελτιωθεί η συνεκτικότητα του μίγματος (Ahn & Fowler, 2001).

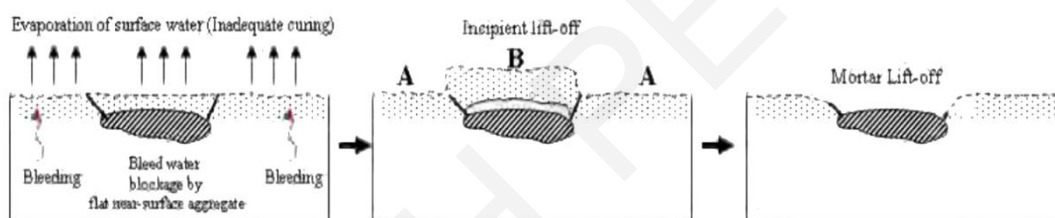
Όσον αφορά τα κονιάματα, ισχύει ότι και για το σκυρόδεμα, αφού όπως σημειώνει ο Abu Seif (2013) η κατανομή των κόκκων των αδρανών επηρεάζει την πυκνότητα, το περιεχόμενο των κενών και κατά συνέπεια την ανθεκτικότητα των κονιαμάτων.

Το σχήμα και η επιφανειακή υφή των αδρανών μεταβάλλει τις απαιτήσεις σε νερό σε ένα μίγμα και άρα επίσης επηρεάζει τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος (Neville & Brooks, 1993) και των κονιαμάτων (Gonçalves et al., 2007), αλλά και την αντοχή και ανθεκτικότητα των σκληρυμένων σύνθετων υλικών (Quiroga, 2003; Polat et al., 2013). Τα πιο πάνω χαρακτηριστικά των αδρανών (σχήμα και επιφανειακή υφή) επηρεάζονται από τη φύση του πετρώματος και τη γεωλογική του ιστορία, καθώς και από το βαθμό και τη μέθοδο που έγινε η θραύση του (Dewar & Anderson, 1992). Τα θραυστά αδρανή περιέχουν γενικά πιο γωνιώδη τεμάχια, με τραχύτερες και πιο επίπεδες επιφάνειες, σε σχέση με τα τεμάχια των φυσικών (ή συλλεκτών) αδρανών, που είναι πιο στρογγυλεμένα λόγω της αποσάθρωσης που έχουν υποστεί κατά τη διάρκεια των χρόνων (Ahn & Fowler, 2001).

Τα πλακοειδή και επιμήκη αδρανή, τα οποία έχουν λόγο πλάτους προς πάχος ή μήκους προς πάχος, αντίστοιχα, μεγαλύτερο από 3:1, επηρεάζουν την εργασιμότητα και την τελική ποιότητα του σκυροδέματος (Daniel, 2006). Αυτό οφείλεται κυρίως στην αύξηση του περιεχομένου των κενών και στη διεπαφή μεταξύ των σωματιδίων (Gambhir, 2013). Πιο

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

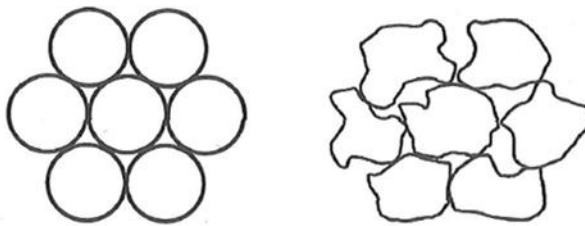
συγκεκριμένα, τα πλακοειδή, επιμήκη, γωνιώδη και τραχιά αδρανή παρουσιάζουν περισσότερα κενά, και άρα απαιτούν περισσότερη άμμο για να πληρώσουν αυτά τα κενά και να παρέχουν εργάσιμο σκυρόδεμα. Με αυτό τον τρόπο, αυξάνεται η απαίτηση σε νερό του νωπού σκυροδέματος (Legg, 1998). Οι Yilmaz & Tugul (2012), σε σκυροδέματα που παρασκεύασαν με ψαμμιτικά αδρανή, παρατήρησαν μείωση της θλιπτικής και εφελκυστικής τους αντοχής με αύξηση του ποσοστού των πλακοειδών αδρανών. Ο Galloway (1994) αναφέρει ότι τα πλακοειδή αδρανή μπορεί να προσανατολιστούν με τέτοιο τρόπο μέσα στο μίγμα, ώστε να επηρεαστεί η αντοχή και η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Επιπλέον, όπως σημειώνουν οι Muhit et al. (2013), σε δάπεδα από σκυρόδεμα στα οποία υπάρχουν πλακοειδή αδρανή τα οποία βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια, εμποδίζεται το νερό της εξίδρωσης να περάσει στο κονίαμα που είναι πάνω από το αδρανές, σχηματίζοντας περιοχές αδυναμίας και συμβάλλοντας έτσι στην αλλοίωση της επιφάνειας (Εικόνα 3.2).



**Εικόνα 3.2:** Σχηματική αναπαράσταση της αλλοίωσης της επιφάνειας του σκυροδέματος όταν τα πλακοειδή αδρανή εμποδίζουν τη διέλευση του νερού της εξίδρωσης (Jana, 2007).

Οι Hu & Wang (2007), σε εργαστηριακές τους δοκιμές, παρατήρησαν ότι κονιάματα που παρασκευάστηκαν με γωνιώδη ασβεστολιθική άμμο παρουσίασαν μειωμένη ρευστότητα, σε σχέση με τη ρευστότητα κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με αποστρογγυλεμένη ποτάμια άμμο. Αυτό αποδόθηκε από τους πιο πάνω ερευνητές στο γεγονός ότι η ασβεστολιθική άμμος, λόγω του σχήματός της, παρουσίασε μεγαλύτερο χώρο μη συμπιεσμένων κενών (Εικόνα 3.3), με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη τσιμεντόπαστα για να καλύψει τα κενά μεταξύ των αδρανών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα επίσης να παραμείνει διαθέσιμη λιγότερη ποσότητα από την επιπλέον τσιμεντόπαστα για την επικάλυψη των αδρανών. Έτσι, δημιουργήθηκε υψηλότερος βαθμός αλληλοσύνδεσης και εσωτερικής τριβής μεταξύ των αδρανών, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερη ενέργεια για να είναι πιο ρευστό το κονίαμα.





**Εικόνα 3.3:** Οι στρογγυλεμένοι κόκκοι παρουσιάζουν λιγότερο χώρο μεταξύ τους σε σχέση με τους γωνιώδεις κόκκους (Kwan & Mora, 2001).

Από την άλλη, ο Τριανταφύλλου (2013) αναφέρει ότι, παρά το γεγονός ότι τα γωνιώδη και επιμήκη αδρανή χρειάζονται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντοπολτού σε σχέση με τα στρογγυλεμένα για την ίδια εργασιμότητα, ωστόσο παρουσιάζουν καλύτερη συνοχή μεταξύ τους και καλύτερη πρόσφυση με το κονίαμα. Επιπλέον, ο Quiroga (2003) διαπιστώνει ότι η αντοχή του σκυροδέματος ενδεχομένως να επηρεάζεται θετικά από τα γωνιώδη αδρανή. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και ο Kaplan (1959), που αναφέρει ότι τα γωνιώδη τεμάχια τείνουν να αυξάνουν τις θλιπτικές/καμπτικές αντοχές των σύνθετων δομικών υλικών. Ο Willis (1967), συμφωνεί με τα πιο πάνω, ωστόσο σημειώνει ότι η επίδραση του σχήματος και της υφής των αδρανών στη θλιπτική αντοχή είναι μεγαλύτερη στα λεπτόκοκκα παρά στα χονδρόκοκκα αδρανή.

Όσον αφορά τα κονιάματα, οι Ρανία & Toomey (2008) θεωρούν ότι ισχύει το ίδιο, αφού όπως ισχυρίζονται ισχυρότερα και ανθεκτικότερα κονιάματα παράγονται με πιο γωνιώδη και λεπτόκοκκα αδρανή. Η χρήση στρογγυλεμένων αδρανών αυξάνει το πορώδες του τελικού προϊόντος. Οι Dossey et al. (1994), σημειώνουν ότι κατά τη διάρκεια της δοκιμής θλιπτικής αντοχής ενός κυλίνδρου, είναι πιο πιθανόν να δημιουργηθούν ρωγμές γύρω από ένα στρογγυλεμένο, λείο αδρανές, ενώ αντίθετα η ρωγμή θα διαπεράσει διαμέσου ενός γωνιώδους αδρανούς. Αυτό υποδηλώνει ότι ένα λείο αδρανές δεν παρέχει την πλήρη του δυναμική μέσα στο σκυρόδεμα, εξαιτίας της μειωμένης πρόσφυσης του με το κονίαμα.

Παρόλα αυτά, επικρατεί και η άποψη, αναφορικά με το ιδανικό σχήμα των αδρανών, ότι πρέπει να είναι σφαιρικό ή κυβικό (Graves, 2006), αφού τα στρογγυλεμένα και με λείες επιφάνειες λεπτόκοκκα αδρανή συμβάλλουν σε καλύτερη εργασιμότητα με λιγότερα μη συμπίεσιμα κενά και λιγότερες απαιτήσεις σε νερό (Dewar & Anderson, 1992). Έτσι, με το ίδιο περιεχόμενο σε τσιμέντο παράγεται υλικό με μεγαλύτερες αντοχές (Abu Seif, 2013). Επιπλέον, τα σφαιρικά και κυβικά αδρανή διευκολύνουν την άντληση και βελτιώνουν το τελικό "φινίρισμα" του σκυροδέματος, ενώ μπορούν να οδηγήσουν σε

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

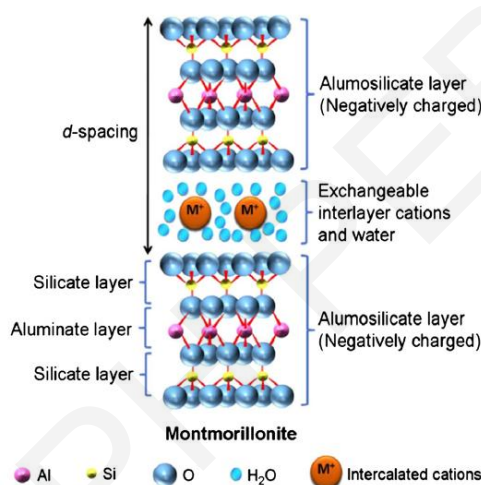
μειωμένη συρρίκνωση σε σχέση με τα επιμήκη και πλακοειδή αδρανή, καθώς επίσης και σε υψηλότερες αντοχές (Shilstone, 1990), αφού τείνουν να είναι πιο σταθερά κάτω από φορτία (Bahabri, 2016).

Οι Neville & Brooks (1993) αναφέρουν ότι, τόσο το σχήμα όσο και η επιφανειακή υφή των αδρανών επηρεάζουν σημαντικά τις αντοχές του σκυροδέματος, αφού η τραχειά υφή συμβάλει σε καλύτερη σύνδεση μεταξύ αδρανών και συνδετικού υλικού. Ο Kaplan (1959), σε δοκιμές που πραγματοποίησε, παρατήρησε ότι τη μεγαλύτερη επίδραση στη θλιπτική αντοχή έχει η επιφανειακή υφή των αδρανών. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην πρόσθετη μηχανική αλληλοσύνδεση και στην αυξημένη επιφάνεια που είναι διαθέσιμη για σύνδεση μεταξύ της τραχιάς υφής των αδρανών. Γενικά, όπως αναφέρει ο Gambhir (2013), προτιμούνται τα αδρανή με τραχιά και πορώδη επιφάνεια, σε σχέση με τα αδρανή με λεία επιφάνεια, αφού τα πρώτα μπορούν να οδηγήσουν σε αύξηση της σύνδεσης των αδρανών με το συνδετικό υλικό κατά 75%, και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της θλιπτικής και καμπτικής αντοχής του σκυροδέματος κατά 20%. Από την άλλη, ο Τριανταφύλλου (2013) σημειώνει ότι, παρά το γεγονός ότι τα σκυροδέματα των οποίων τα αδρανή έχουν τραχείες επιφάνειες εμφανίζουν σε νεαρές ηλικίες αυξημένες αντοχές (κυρίως εφελκυστικές), σε σχέση με τα αντίστοιχα σκυροδέματα που περιέχουν κάπως λεία αδρανή, ωστόσο με την αύξηση του βαθμού ενυδάτωσης, οπότε και ενεργοποιείται η χημική συνάφεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού, η επίδραση της τραχύτητας αυτής στην αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται. Οι Ahn & Fowler (2001), ως συμπέρασμα της έρευνάς τους, αναφέρουν ότι η επιφανειακή υφή επηρεάζει την εργασιμότητα, την ποσότητα του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί ώστε να παραχθεί ένα ικανοποιητικό μίγμα κονιάματος, και την επαφή μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας ενός σκληρυμένου κονιάματος.

Ωστόσο, τις ιδιότητες των σύνθετων δομικών υλικών επηρεάζει και το λεπτόκοκκο υλικό με διάμετρο  $\leq 0,063$  mm (παιπάλη ή άργιλος). Το υλικό αυτό μπορεί να παρουσιάζεται ως σκόνη διασκορπισμένη ανάμεσα στα αδρανή, ή να τα επικαλύπτει, και ακόμα και σε μικρές ποσότητες ενδέχεται να αποδυναμώσει το δεσμό μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των αδρανών (Kosmatka et al., 2003), ενώ μπορεί να εμποδίσει και την ενυδάτωση του τσιμέντου (Langer, 1993). Τα περισσότερα αργιλικά ορυκτά παρουσιάζουν φυλλοπυριτική ή φυλλόμορφη δομή, όπου η μία διάσταση (πάχος) των κρυστάλλων είναι σχεδόν μηδενική σε σχέση με τις άλλες δύο.

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

Μια χαρακτηριστική ιδιότητα συγκεκριμένων αργιλικών ορυκτών είναι ότι μπορούν να μεταβάλλουν τον όγκο τους με την απορρόφηση μορίων νερού. Σύμφωνα με αυτό το χαρακτηριστικό, οι άργιλοι διακρίνονται σε διογκούμενους (π.χ. σμεκτίτες) και σε μη διογκούμενους (Velde, 1992). Η ιδιότητα αυτή, γνωστή ως δραστηριότητα, καθιστά τα αργιλικά ορυκτά ακατάλληλα για χρήση στην παραγωγή σκυροδέματος/κονιάματος, καθώς αυξάνουν την απαίτηση σε νερό του νωπού μίγματος, επηρεάζοντας έτσι δυσμενώς την εργασιμότητά του, και προκαλώντας προβλήματα στην πρόσφυση και συνάφεια μεταξύ των κόκκων των αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Κατ' επέκταση, τα αργιλικά ορυκτά επηρεάζουν τις μηχανικές αντοχές του σκυροδέματος/κονιάματος, αλλά και την ανθεκτικότητά του σε διάρκεια (Bonavetti & Irassar, 1994; Τριανταφύλλου, 2013).



**Εικόνα 3.4:** Σχηματική απεικόνιση της σωματοποιημένης δομής των αργιλικών ορυκτών (μοντμοριλλονίτη) (Ng & Plank, 2012).

Έχει αποδειχτεί (Nehdi, 2014) ότι τα αργιλικά ορυκτά τα οποία επικαλύπτουν χονδρόκοκκα αδρανή, ακόμα και αν παρουσιάζονται σε ποσοστό <1,5%, μπορεί να επηρεάσουν τις ιδιότητες τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος/κονιάματος. Το μέγεθος και η φύση των επιπτώσεων εξαρτάται από το είδος και την ποσότητα των αργιλικών ορυκτών. Τα αργιλικά ορυκτά αποτελούνται από πλακόμορφους σχηματισμούς και ο χώρος μεταξύ των στρώσεων, καθώς επίσης τα ελεύθερα κατιόντα που βρίσκονται στον ενδοστρωματικό χώρο (Εικόνα 3.4), είναι οι κύριες αιτίες της διόγκωσης ή μη της αργίλου (Nehdi, 2014). Αργιλικά ορυκτά με ψηλότερη ικανότητα ανταλλαγής κατιόντων (π.χ. μοντμοριλλονίτης) παρουσιάζουν συνήθως σοβαρότερες επιπτώσεις στις ιδιότητες του σκυροδέματος/κονιάματος. Τα ορυκτά αυτά απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

ακαμψία των μιγμάτων σκυροδέματος/κονιάματος. Αυτό οδηγεί σε μίγματα με μειωμένη ρευστότητα και με πολλά κενά, με τελικό επακόλουθο μειωμένες αντοχές και χαμηλή ανθεκτικότητα και ογκοσταθερότητα (Yool et al., 1998; Muñoz et al., 2010). Επιπλέον, είναι πολύ πιθανόν να υπάρξει σε μερικά σημεία θρυμματισμός επιφανειακών αδρανών (pop-outs), ή να σχηματιστούν κοιλότητες στην επιφάνεια (rock-marks) όπου οι σβώλοι των αδρανών θα διαλυθούν (Forster, 2006). Όσον αφορά τα κονιάματα, ο McKay (2015), αναφέρει ότι δεν υπάρχει ικανοποιητική συνάφεια μεταξύ αδρανών και συνδετικού υλικού, εάν τα αδρανή δεν είναι "καθαρά" και περιέχουν επιβλαβείς ουσίες. Η ύπαρξη των ουσιών αυτών, όπως αναφέρει ο πιο πάνω ερευνητής, επηρεάζει τις αντοχές των κονιαμάτων.

Οι δοκιμές που πραγματοποιούνται με σκοπό την εξακρίβωση των ενεργών αργιλικών ορυκτών, αλλά και για το γρήγορο καθορισμό της αναλογίας της λεπτόκοκκης αργιλώδους σκόνης, είναι οι δοκιμές μπλε του μεθυλενίου και ισοδύναμου άμμου αντίστοιχα. Όπως φαίνεται και στις επόμενες παραγράφους, αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να συσχετίσουν την απόδοση του σκυροδέματος/κονιάματος με τις ιδιότητες αυτές. Πιο συγκεκριμένα, οι Torcu & Demir (2008) διατύπωσαν την άποψη ότι το περιεχόμενο σε αργιλικά ορυκτά των αδρανών υλικών, που καθορίζεται με τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, επηρεάζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Οι ίδιοι ερευνητές τονίζουν ότι για να προβλεφθεί η απόδοση του σκυροδέματος είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση της δοκιμής του μπλε του μεθυλενίου. Οι Beixing et al. (2011), σε εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποίησαν, παρατήρησαν ότι αυξανόμενης της τιμής του μπλε του μεθυλενίου, ενθαρρύνεται η εμφάνιση πλαστικής συστολής και συστολής ξήρανσης, ενώ επιταχύνεται σημαντικά η φθορά που προκαλείται λόγω ψύξης – απόψυξης και τριβής. Όπως οι ίδιοι οι συγγραφείς (Li et al., 2011) συμπεραίνουν, η κρίσιμη τιμή της δοκιμής μπλε του μεθυλενίου θεωρείται το 1.4 g/kg. Κάτω από αυτή την τιμή δεν παρατηρείται μείωση της απόδοσης του σκυροδέματος. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Liu et al. (2014), που μέσα από τις πειραματικές τους δοκιμές παρατήρησαν ότι η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου είναι πολύ σημαντική για τον ποιοτικό έλεγχο κονιαμάτων. Όπως αναφέρουν οι πιο πάνω συγγραφείς (Liu et al., 2014), όταν αυξάνεται ο συντελεστής μπλε του μεθυλενίου, αυξάνονται οι ανάγκες σε νερό του μίγματος και η συστολή ξήρανσης του κονιάματος. Παρατήρησαν επίσης μείωση της θλιπτικής αντοχής και της αντίστασης σε ψύξη – απόψυξη, καθώς επίσης και αύξηση της διαπερατότητας του τελικού προϊόντος.

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

Η δοκιμή ισοδύναμου άμμου βασίζεται στις διαφορές της φαινόμενης πυκνότητας μεταξύ των λεπτών αδρανών που θεωρούνται αποδεκτά και των επιβλαβών αδρανών που περιέχουν αργιλικά. Όπως σημειώνει ο Nehdi (2014), παρά το γεγονός ότι υπάρχει σημαντική διαφορά ως προς το τι προκαλούν στις ιδιότητες του σκυροδέματος τα αποδεκτά λεπτά αδρανή και η επιβλαβής άργιλος που θεωρείται ακατάλληλη για χρήση, εντούτοις μπορεί να μην καταστεί δυνατό να υπάρξει διαχωρισμός τους κατά τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου. Γι' αυτό, όπως αναφέρει ο συγγραφέας (Nehdi, 2014), η συσχέτιση μεταξύ της δοκιμής ισοδύναμου άμμου και της απόδοσης του σκυροδέματος αμφισβητείται.

Οι Brandes & Robinson (2006), από την άλλη, αναφέρουν ότι αυξημένο ποσοστό ισοδύναμου άμμου υποδηλώνει λιγότερα επιβλαβή αδρανή μεγέθους αργίλου, και αυτό συμβάλει στην καλύτερη απόδοση του τελικού προϊόντος. Όπως αναφέρουν οι πιο πάνω ερευνητές (Brandes & Robinson, 2006), παρατηρείται αρκετά καλή συσχέτιση της απόδοσης του τελικού προϊόντος, στην προκειμένη περίπτωση ασφαλτικού οδοστρώματος, με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου.

Ο Alhozaimy (1998) προσπάθησε να συσχετίσει τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου με τα λεπτά αδρανή που είναι μικρότερα από 0.075 mm. Ενώ παρατήρησε πολύ καλή συσχέτιση σε δείγματα πυριτικής άμμου, δεν παρατήρησε κάτι αντίστοιχο για δείγματα θραυστής ασβεστολιθικής άμμου, και υποστήριξε ότι η δοκιμή ισοδύναμου άμμου μπορεί να είναι παραπλανητική όταν πραγματοποιείται σε δείγματα θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών υλικών.

Οι Westerholm et al. (2008), σε εργαστηριακές δοκιμές που εκπόνησαν, δεν παρατήρησαν ιδιαίτερες συσχετίσεις μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου και των ρεολογικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων, ιδιαίτερα για τιμές ισοδύναμου άμμου >75%. Ωστόσο, για τιμές ισοδύναμου άμμου  $\leq 75\%$  παρατηρήθηκε σημαντική αύξηση της διατμητικής τάσης των κονιαμάτων, και οι απαιτήσεις σε νερό του νωπού μίγματος αυξάνονταν με μείωση της τιμής του ισοδύναμου άμμου. Η συσχέτιση των τιμών του ισοδύναμου άμμου με το πλαστικό ιξώδες των κονιαμάτων ήταν περισσότερο ασαφής.

#### **3.2.2 Φυσικές ιδιότητες αδρανών υλικών**

Οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών, όπως για παράδειγμα η απορροφητικότητα και η πυκνότητα, θεωρούνται χρήσιμα εργαλεία για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή σκυροδεμάτων/κονιαμάτων (Korkanc &

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

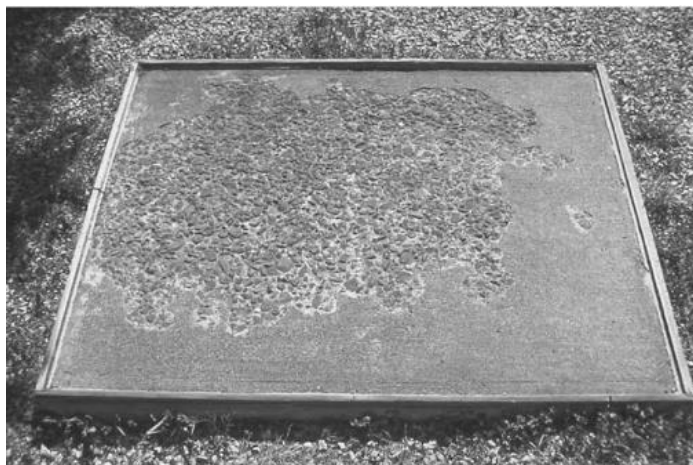
Tugrul, 2004). Για την ακρίβεια, τόσο η απορροφητικότητα, όσο και η πυκνότητα των αδρανών υλικών θεωρούνται πολύ σημαντικές ιδιότητες, κυρίως όσον αφορά το σχεδιασμό ενός μίγματος σκυροδέματος. Η μεν απορροφητικότητα χρησιμοποιείται για τη διόρθωση του λόγου N/T, η δε πυκνότητα για τις μετατροπές του όγκου και βάρους των διαφόρων ποσοτήτων των αδρανών (Lewis & Dolch, 1955). Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδεμάτων (ή κονιαμάτων) συνήθως δεν είναι εντελώς ξηρά, οπότε ενδέχεται να απορροφήσουν μέρος του υπολογισμένου νερού που χρησιμοποιείται για την ανάμιξη (Poronics, 1992). Αναλόγως της ποσότητας του νερού που μπορεί να απορροφήσει ένα αδρανή, γίνονται και οι απαραίτητες διορθώσεις προκειμένου να διατηρηθεί σταθερός ο λόγος N/T, έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιζητούμενη αντοχή.

Παρόλο που θεωρείται δεδομένο ότι αν αυξηθεί το ποσοστό του νερού σε ένα μίγμα σκυροδέματος/κονιάματος, ώστε να καλυφθούν οι απαιτήσεις των αδρανών σε νερό, θα μειωθούν οι αντοχές του τελικού προϊόντος (Tugrul & Yilmaz, 2012; Yilmaz & Tugrul, 2012), εντούτοις υπάρχουν ερευνητές (Neville, 2011; Gambhir, 2013) που αναφέρουν ότι δεν υπάρχει σαφής συσχέτιση μεταξύ της αντοχής του σκυροδέματος και της απορροφητικότητας των αδρανών. Παρόλα αυτά, οι ίδιοι ερευνητές σημειώνουν ότι οι πόροι στην επιφάνεια των αδρανών επηρεάζουν την επαφή μεταξύ των αδρανών και του συνδετικού υλικού, και άρα αυτό μπορεί να επηρεάσει την αντοχή του σκυροδέματος/κονιάματος. Θεωρούν επίσης ότι η απορροφητικότητα, η διαπερατότητα και το πορώδες των αδρανών επηρεάζουν την αντίσταση του σκυροδέματος/κονιάματος σε ψύξη – απόψυξη, τη χημική σταθερότητα και την αντίστασή του σε τριβή. Οι Brandes & Robinson (2006) ομοίως παρατήρησαν καλή συσχέτιση των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος, και συγκεκριμένα ασφαλικών οδοστρωμάτων, με την απορροφητικότητα των αδρανών, ενώ οι Larrard & Belloc (1997) και Mehta & Monteiro (2013) αναφέρουν ότι τα αδρανή που απορροφούν περισσότερο νερό τείνουν να είναι πιο αδύναμα, και αυτό επηρεάζει αρνητικά την αντοχή του σκυροδέματος.

Οι Thomas & Forriald (2007) ισχυρίζονται ότι οι τιμές της απορροφητικότητας και της πυκνότητας μπορεί να χρησιμεύσουν ως δείκτες αντοχής στον παγετό. Γι' αυτό και θεωρούνται σημαντικές ιδιότητες όσον αφορά την ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος. Σε παρόμοιο συμπέρασμα καταλήγει και ο Hanna (2003), που αναφέρει ότι η απορροφητικότητα των αδρανών έχει σημαντική επίδραση στην αντίσταση σε ψύξη –

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

απόψυξη, γιατί τα αδρανή που απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού μπορεί να αστοχήσουν κατά την ψύξη (Εικόνα 3.5).



**Εικόνα 3.5: Σκυρόδεμα που αστόχησε κατά την ψύξη (Kosmatka, 2008).**

Οι Dossey et al. (1994) σημειώνουν ότι οι φυσικές ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν την αντοχή και την ανθεκτικότητα μιας κατασκευής από τα αρχικά στάδια, αφού καθορίζουν πως θα συμπεριφερθούν τα αδρανή κατά την ανάμιξή τους με το συνδετικό υλικό. Όπως αναφέρουν οι ίδιοι ερευνητές (Dossey et al., 1994), η ανθεκτικότητα των δαπέδων από σκυρόδεμα επηρεάζεται από την ικανότητα των αδρανών να συγκρατούν νερό διαμέσου των πόρων τους, καθώς και μεταξύ των κενών ανάμεσα στα αδρανή. Η αλλαγή μορφής του νερού μέσα στους πόρους των αδρανών και στα κενά, λόγω κλιματολογικών μεταβολών, μπορεί να οδηγήσει σε μικρορωγμές και θρυμματισμό αδρανών που βρίσκονται στην επιφάνεια του δαπέδου. Οι Maslehuddin et al. (2003) επίσης σημειώνουν ότι η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται από την ποιότητα των αδρανών, ειδικά στις περιπτώσεις που αυτά είναι αδύναμα και παρουσιάζουν μεγάλη απορροφητικότητα.

Οι Polivka & Mehta (1979) διαπιστώνουν ότι τα αδρανή που έχουν ψηλότερη απορροφητικότητα είναι υπεύθυνα για την εκτεταμένη συστολή ξήρανσης που θα υποστεί το σκυρόδεμα. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και ο Washa (1998), που αναφέρει ότι αδρανή με χαμηλή απορροφητικότητα τείνουν να μειώνουν τη συρρίκνωση και τον ερπυσμό. Επιπλέον, ο Poitevin (1999) απέδειξε ότι υψηλής αντοχής σκυροδέματα μπορούν να παρασκευαστούν με αδρανή με χαμηλές τιμές απορροφητικότητας (<2%). Ο Hanna (2003) υποστηρίζει ότι αδρανή με υψηλή απορροφητικότητα διασπώνται κατά τη διάρκεια της ανάμιξης και τοποθέτησης του σκυροδέματος. Αυτό οφείλεται κυρίως στις χαμηλές

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

αντοχές των αδρανών που σχετίζονται με το υψηλό πορώδες τους. Η διάσπαση των αδρανών δημιουργεί επιπλέον λεπτά αδρανή (<0.075 mm), τα οποία συμβάλουν στη μείωση της εργασιμότητας του νωπού μίγματος. Η περίσσεια των λεπτών αδρανών και η προσθήκη νερού ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή εργασιμότητα, τείνουν να αυξήσουν τη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος, η οποία συμβάλει στην αύξηση των εγκάρσιων (και διαμηκών) ρωγμών του τελικού προϊόντος.

Καθώς τα αδρανή συμμετέχουν στο συνολικό όγκο του σκυροδέματος, είναι προφανές ότι το πορώδες τους συμβάλει στο συνολικό πορώδες του σκυροδέματος (Korkanc & Tugrul, 2004). Το πορώδες των αδρανών καθορίζει την ικανότητα απορρόφησης νερού από ένα αδρανές, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει το λόγο N/T του σκυροδέματος (Grattan-Bellew, 2000). Όπως αναφέρουν οι Korkanc & Tugrul (2004), το υψηλό πορώδες των αδρανών προκαλεί μείωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.

Τα αδρανή με αδιαπέρατους και μη συνδεδεμένους πόρους προτιμούνται στα σκυροδέματα, σε σχέση με τα αδρανή με διαπερατούς πόρους, τα οποία επιτρέπουν στο νερό να διέρχεται διαμέσου των πόρων τους και να διογκώνεται ανάλογα με τις κλιματολογικές συνθήκες. Το πορώδες των αδρανών, πέραν της αντίστασής τους σε συνθήκες ψύξης – απόψυξης, επηρεάζει επίσης σε μεγάλο βαθμό την αντίστασή τους σε χημική "επίθεση" (Akroyd, 1962). Επιπλέον, οι Neville & Brooks (1993) αναφέρουν ότι η χρήση πορωδών αδρανών αυξάνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος.

Σημειώνεται ότι η δομή των πόρων και η κατανομή του μεγέθους τους, και πιο συγκεκριμένα το μικροπορώδες, θεωρείται πιο κρίσιμο σε σχέση με το συνολικό πορώδες των αδρανών όσον αφορά την αντίστασή τους σε ψύξη – απόψυξη, όταν είναι να χρησιμοποιηθούν στο σκυρόδεμα ή στο κονίαμα (Newman & Choo, 2003).

#### **3.2.3 Ιδιότητες αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές**

Τα αδρανή με μεγάλη απορροφητικότητα, που περιέχουν "αδύναμα" σωματίδια, που διασπώνται, και που είναι διογκώσιμα, δεν θεωρούνται "υγιή" (Langer, 1993). Είναι υλικά που είναι συνήθως χαμηλής ποιότητας, μαλακά, πορώδη, επιρρεπή σε παγετό και με χαμηλό μέτρο ελαστικότητας (Jana, 2007). Τα μη "υγιή" και γενικώς τα πολύ αποσαθρωμένα αδρανή θεωρούνται ανεπιθύμητα γιατί θεωρητικά είναι αρκετά πορώδη και με υψηλό ποσοστό απορροφητικότητας, ενώ μπορεί πολύ εύκολα να αποκολληθούν από το υπόλοιπο υλικό, μειώνοντας έτσι τη συνοχή που υπάρχει ανάμεσα στα υλικά. Η παρουσία αποσαθρωμένων αδρανών σε ποσοστό μεγαλύτερο από 5% κατά βάρος μειώνει



### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

την αντοχή και την αντίσταση σε φθορά του σκυροδέματος/κονιάματος (Akroyd, 1962). Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγει και ο Gillott (1980), ο οποίος αναφέρει ότι οι μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων/κονιαμάτων επηρεάζονται από την αποσάθρωση των αδρανών. Οι Krishna et al. (2016) σημειώνουν ότι τα μη "υγιή" αδρανή είναι η βασική αιτία για τις αλλοιώσεις που προκαλούνται στο σκυρόδεμα/κονίαμα.

Τα αδρανή θεωρούνται μη "υγιή" όταν οι μεταβολές στον όγκο τους καταλήγουν στην υποβάθμιση του τελικού προϊόντος. Αυτό μπορεί να εμφανιστεί με τη μορφή τοπικής αποφλοιώσης, μέχρι και έως εκτεταμένη ρωγμή επιφανείας, ή με αποσάθρωση σε σημαντικό βάθος, και έτσι μπορεί να ποικίλλει από μια εξασθενημένη εμφάνιση σε μια κατάσταση δομικά επικίνδυνη (Troxell & Davis, 1956; Gambhir, 2013). Οι Mindess & Young (1981) αναφέρουν ότι έχουν παρατηρηθεί διάφορα προβλήματα ανθεκτικότητας σε δάπεδα σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα pop-outs και D-cracking, τα οποία συσχετίζονται με μη "υγιή" αδρανή (Εικόνα 3.6). Ο Neville (2011) σημειώνει ότι ένας εξαλλοιωμένος δολερίτης παρουσιάζει αλλαγή διαστάσεων κατά  $600 \times 10^{-6}$  φορές με διαβροχή και ξήρανση. Οπότε, είναι εμφανές ότι σκυρόδεμα που περιέχει αυτού του είδους αδρανή θα αστογήσει κάτω από συνθήκες διαβροχής και ξήρανσης.



**Εικόνα 3.6: Θρυμματισμός επιφανειακού μη "υγιούς" αδρανούς (Basham, 2013).**

Ο Kanbar-Agha (1953) διατυπώνει την άποψη ότι τα μη "υγιή" αδρανή διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε σχέση με τις αλλαγές που θα υποστούν στον όγκο. Στην πρώτη περίπτωση, όπου περιλαμβάνονται οι μαλακοί ψαμμίτες, αδρανή με αργιλικά κ.α., η αλλοίωση που θα υποστεί το σκυρόδεμα είναι ο θρυμματισμός των αδρανών. Στη δεύτερη περίπτωση, που θεωρείται και πιο επικίνδυνη, περιλαμβάνονται τα αδρανή που διαστέλλονται καταστροφικά στο σκυρόδεμα, όπως για παράδειγμα πετρώματα με διογκώσιμες άργιλους, πορώδεις πυριτόλιθοι και σχιστόλιθοι. Αυτά τα πετρώματα, όταν

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

ψυχθούν σε κορεσμένη κατάσταση, ή σε μερικές περιπτώσεις όταν εκτεθούν σε νερό, αυξάνονται σε όγκο ασκώντας πίεση, με αποτέλεσμα να προκαλούν μεγάλη αλλοίωση στο σκυρόδεμα.

Η δομή των πόρων των αδρανών διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην αντίστασή τους στις μεταβολές των κλιματολογικών συνθηκών. Γενικά θεωρείται ότι ένας πόρος με μεγαλύτερο όγκο και μικρότερη διάμετρο είναι πιο επιδεκτικός σε αποσάθρωση, σε σχέση με ένα πόρο ίδιου ή μικρότερου όγκου με μεγαλύτερη διάμετρο (Sims & Brown, 1988). Ο Stark (1975) αναφέρει ότι αδρανή με μικρούς πόρους και υψηλή απορροφητικότητα μπορεί να κορεστούν σχετικά σύντομα, ενώ αδρανή με μεγάλους πόρους θεωρούνται υγιή επειδή είναι πιο δύσκολο να κορεστούν. Σημειώνεται ότι αδρανή με μικρούς πόρους και σχετικά χαμηλή απορροφητικότητα μπορεί να είναι υγιή γιατί, παρόλο που μπορεί τελικά να κορεστούν, εντούτοις δεν επιτρέπουν την ανάπτυξη καταστρεπτικών τάσεων.

Ωστόσο, παρά τα όσα αναφέρονται πιο πάνω, υπάρχουν ερευνητές (Newman & Choo, 2003) που ισχυρίζονται ότι δεν υπάρχει σαφής συσχέτιση μεταξύ της αποσάθρωσης των αδρανών και της απόδοσής τους μέσα στο σκυρόδεμα. Αυτή η κατηγορία των ερευνητών αποτελεί όμως τη μειοψηφία.

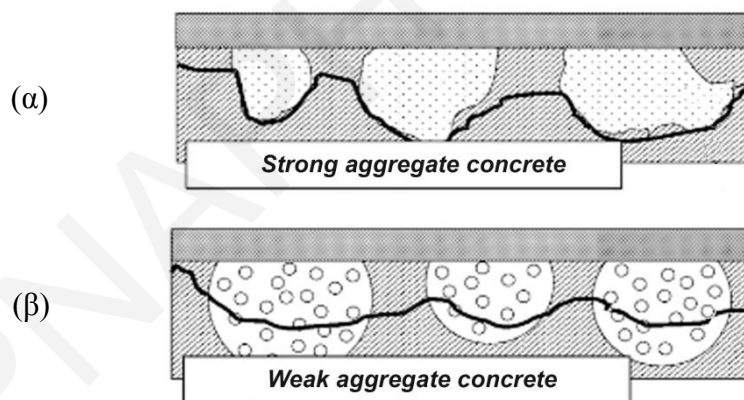
Ο προσδιορισμός της υγείας των αδρανών πραγματοποιείται με τις δοκιμές αποσάθρωσης, είτε με τη χρήση του θεικού μαγνησίου, είτε με τη χρήση θεικού νατρίου (βλ. Κεφάλαια 2 και 5). Οι Brandes & Robinson (2006), μέσα από πειραματικές δοκιμές που πραγματοποίησαν, παρατήρησαν πολύ ισχυρή συσχέτιση της δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο ( $r = -0.89$ ) με το τελικό προϊόν (ασφαλτικό οδόστρωμα), ενώ μέση ήταν η συσχέτιση του τελικού προϊόντος με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό νάτριο ( $r = -0.66$ ). Αρκετά καλή συσχέτιση της δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο με τη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με ψαμμιτικά αδρανή παρατήρησαν και οι Yilmaz & Tugrul (2012). Όπως αναφέρουν οι πιο πάνω ερευνητές (Yilmaz & Tugrul, 2012), οι αντοχές των σκυροδεμάτων μειώνονται με αύξηση του συντελεστή αποσάθρωσης. Οι Kandhal & Parker (1998) παρατήρησαν ότι η συσχέτιση μεταξύ της αποσάθρωσης των αδρανών και της απόδοσης του τελικού προϊόντος είναι ισχυρότερη στο σκυρόδεμα, παρά στο ασφαλτοσκυρόδεμα. Από την άλλη, ο Cunningham (2011) θεωρεί ότι, παρόλο που η δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο παρουσιάζει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα, σε σχέση με τη δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θεικού νατρίου, εντούτοις δεν παρουσιάζει καλή συσχέτιση με την ποιότητα του τελικού

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

προϊόντος. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Gandhi & Lytton (1984), οι οποίοι αναφέρουν ότι η δοκιμή αποσάθρωσης δεν είναι αξιόπιστος δείκτης της απόδοσης του ασφαλτοσκυροδέματος, ενώ σημειώνουν επίσης ότι τα αδρανή δεν πρέπει να απορρίπτονται λαμβάνοντας υπόψη μόνο το αποτέλεσμα της δοκιμής αποσάθρωσης.

#### 3.2.4 Μηχανικές ιδιότητες αδρανών υλικών

Η αντοχή και η σκληρότητα των αδρανών επηρεάζουν την ικανότητά τους να αντιστέκονται στις μηχανικές φθορές (Langer, 1993). Τα αδρανή που περιέχουν ορυκτά με πολύ χαμηλό βαθμό σκληρότητας θεωρούνται μαλακά, ενώ αδύναμα θεωρούνται τα αδρανή που μπορούν να διασπαστούν πολύ εύκολα λόγω του αδύναμου δεσμού μεταξύ τους ή με το συνδετικό υλικό (McLaughlin et al., 1960). Ο Neville (2011) αναφέρει ότι η σκληρότητα των αδρανών εξαρτάται από τη σύνθεση, την υφή και τη δομή τους. Οπότε, η μειωμένη σκληρότητα ενός αδρανούς μπορεί να οφείλεται, είτε στη σύσταση των κόκκων του, είτε στο συνδετικό υλικό που συνδέει τους κόκκους μεταξύ τους. Οι Kozul & Darwin (1997) διαπιστώνουν ότι, όταν τα αδρανή είναι πιο αδύναμα από τη μεταβατική ζώνη, σε περίπτωση αστοχίας η ρωγμή διαδίδεται διαμέσου του αδρανούς, μειώνοντας έτσι την ενέργεια θραύσης (Εικόνα 3.7).



**Εικόνα 3.7: Διαφορά στη διάδοση ρωγμών (α) σε σκυρόδεμα με σκληρά αδρανή και (β) σε σκυρόδεμα με αδύναμα αδρανή (Weimer & Hauptert, 2000).**

Ο Poronics (1992) ισχυρίζεται ότι, με αδρανή τα οποία είναι αρκετά αδύναμα σε σχέση με την τσιμεντόπαστα δεν μπορεί να παρασκευαστεί ικανοποιητικών αντοχών σκυρόδεμα, ενώ σημειώνει ότι την παραμορφωσιμότητα του σκυροδέματος την καθορίζει το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών.

Ο Hanna (2003) αναφέρει ότι η αντίσταση των αδρανών σε τριβή θεωρείται αρκετά σημαντική, γιατί επηρεάζει τόσο τις ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος, όσο και του

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

σκληρυμένου υλικού. Δάπεδα σκυροδέματος επηρεάζονται από i) την αστοχία των αδρανών κατά τη διάρκεια της διακίνησης, της αποθήκευσης, της ανάμιξης και της κατασκευής, ii) την τριβή στην επιφάνεια ή κοντά σε αυτήν και iii) την τριβή των αδρανών κατά μήκος της σύνδεσης στήριξης. Η αστοχία των αδρανών, ειδικότερα των λεπτόκοκκων, κατά τη διάρκεια της διακίνησης και ακολούθως κατά τη διάρκεια της ανάμιξης για την παρασκευή σκυροδέματος πιθανόν να δημιουργήσει πολύ λεπτούς κόκκους αδρανών. Τα λεπτά αυτά αδρανή επηρεάζουν αρνητικά την εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος, και γενικότερα το σκυρόδεμα καθ' όλη τη διάρκεια της κατασκευής (τοποθέτηση, συμπύκνωση και φινίρισμα). Αυξάνοντας το περιεχόμενο του νερού για να αντισταθμιστεί η απώλεια εργασιμότητας, αυξάνεται ο λόγος N/T, μειώνεται η αντοχή και αυξάνεται η συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος.

Οι Korkanc & Tugrul (2004) διατύπωσαν την άποψη ότι η παρασκευή σκυροδέματος υψηλών αντοχών εξαρτάται από την αντοχή των αδρανών. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Zhou et al. (1995), που θεωρούν ότι τα αδύναμα αδρανή μειώνουν την αντοχή κυρίως των σκυροδεμάτων υψηλών αντοχών. Οι Parka & Hansen (1982) παρατήρησαν ότι άμμος με υψηλό ποσοστό απώλειας σε τριβή αστόχησε κατά τη διάρκεια της ανάμιξής της για την παρασκευή σκυροδέματος. Επιπλέον, το σκυρόδεμα που παρασκευάστηκε με την άμμο αυτή παρουσίασε μικρή κάθιση και χαμηλότερες αντοχές σε σταθερό λόγο N/T.

Μια από τις μεθόδους που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ανθεκτικότητας των αδρανών σε τριβή είναι η δοκιμή Micro-Deval. Αρκετοί είναι οι ερευνητές (Wu et al., 1998; Rogers et al., 2003; Williams et al., 2005; Cuelho et al., 2007) που θεωρούν ότι η δοκιμή Micro-Deval συσχετίζεται άμεσα με την απόδοση του τελικού προϊόντος. Αυτός είναι και ο λόγος που οι Rogers et al. (2003) συστήνουν την πραγματοποίηση μόνο αυτής της δοκιμής για την αξιολόγηση της υγρής μηχανικής αντοχής και της αντίστασης σε τριβή, τόσο για χονδρόκοκκα, όσο και για λεπτόκοκκα αδρανή. Μάλιστα, οι Fowler et al. (2006), θεωρούν ότι η συγκεκριμένη δοκιμή απέδειξε ότι είναι η μοναδική η οποία συσχετίζεται με την απόδοση του τελικού προϊόντος. Γι' αυτό και θεωρείται μια πολύ καλή επιλογή για τον έλεγχο της ποιότητας των αδρανών υλικών. Οι Yilmaz & Tugrul (2012) παρατήρησαν καλή (αντιστρόφως ανάλογη) γραμμική συσχέτιση του συντελεστή Micro-Deval με τη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με ψαμμιτικά αδρανή. Επίσης, ο Rogers (1998), σε δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με την χρήση θραυστής άμμου με διαφορετικά ποσοστά σχιστολίθων

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

αναμεμιγμένων με πυριτική άμμο, αναφέρει ότι παρουσιάστηκε καλή συσχέτιση μεταξύ της συστολής ξήρανσης και του ποσοστού απώλειας Micro –Deval.

#### 3.2.5 Ορυκτολογία αδρανών υλικών

Αρκετοί είναι οι ερευνητές (Hartley, 1974; Aitcin & Mehta, 1990; Bérubé, 2001; Smith & Collis, 2001; Al-Oraimi et al., 2006; Ραβία & Toomey, 2008) που υποστηρίζουν ότι, η ορυκτολογική σύσταση των αδρανών και τα ιστολογικά τους χαρακτηριστικά γενικότερα, επηρεάζουν τις ιδιότητές τους και συνεπώς την καταλληλότητά τους για χρήση σε διάφορες κατασκευές.

Τα χαρακτηριστικά ενός πετρώματος, η σύνδεση μεταξύ των κόκκων και πιο συγκεκριμένα η μικροδομή, επηρεάζουν τη γωνιότητα, την ευθρυπτότητα και την αντοχή των αδρανών (Järvenpää, 2001). Επιπλέον, όπως αναφέρει η ίδια συγγραφέας, πέρα από το σχήμα και την υφή, τις αντοχές των σύνθετων υλικών επηρεάζουν επίσης το μέγεθος των αδρανών, αλλά και η σύσταση των ορυκτών τους. Η σύνθεση των αδρανών μπορεί επίσης να επηρεάσει τη φύση και την αντοχή της σύνδεσης μεταξύ αδρανών και τσιμέντου (Sims & Brown, 1988). Την ίδια άποψη διατύπωσαν και οι Yilmaz & Tugrul (2012), οι οποίοι σημειώνουν ότι η διεπαφή μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας επιδρά σημαντικά στην αντοχή του σκυροδέματος. Η διεπαφή αυτή επηρεάζεται σημαντικά από την ορυκτολογική σύσταση των αδρανών. Όπως αναφέρουν οι Yilmaz & Tugrul (2012), συνήθως τα αδρανή με ανθρακικό συνδετικό υλικό σχηματίζουν ανθεκτικότερους δεσμούς μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας, παρά τα αδρανή με αργιλικό συνδετικό υλικό, γιατί οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ ανθρακικών αδρανών και τσιμεντόπαστας βελτιώνουν τη μηχανική σύνδεση.

Ο Alexander (1989) αναφέρει ότι, τόσο η αντοχή των αδρανών, όσο και η ορυκτολογία τους, επηρεάζουν την αντοχή των σύνθετων δομικών υλικών, και κυρίως των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής. Οι Beshr et al. (2003) συμφωνούν με τα πιο πάνω και συμπληρώνουν ότι το είδος των αδρανών επηρεάζει επίσης και την εφελκυστική αντοχή του τελικού προϊόντος. Ο Alexander (1996) διαπιστώνει επίσης ότι το είδος των αδρανών, πέραν από την αντοχή, επηρεάζει την ακαμψία και τις μακροχρόνιες παραμορφώσεις του σκληρυμένου σκυροδέματος. Οι Thomas & Forriald (2007) σημειώνουν ότι οι χημικές και οι ορυκτολογικές ιδιότητες των αδρανών μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του σκυροδέματος, καθώς επίσης και την ανθεκτικότητά του διαμέσου των χρόνων.

### Κεφάλαιο 3: Επίδραση Αδρανών σε Σύνθετα Δομικά Υλικά

Οι Gonçaves et al. (2007) και οι Maza et al. (2016) συμφωνούν ότι, πέρα από την αντοχή και την ορυκτολογία των αδρανών, σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες των κονιαμάτων και σκυροδεμάτων διαδραματίζει και η εξαλλοίωση των ορυκτών των αδρανών. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Danielsen & Rueslatten (1984), που σε πειραματικές δοκιμές παρατήρησαν ενδεικτικά ότι, όχι μόνο η ποσότητα των αστρίων, αλλά και ο βαθμός εξαλλοίωσής τους, φαίνεται ότι επηρεάζει την αντοχή των κονιαμάτων.

Η παρουσία φυλλωδών ορυκτών στα αδρανή, όπως για παράδειγμα τα ορυκτά της ομάδας των μαρμαρυγιών, επίσης μπορεί να οδηγήσει σε μειωμένη ανθεκτικότητα του σκυροδέματος/κονιάματος (McArthur & Spalding, 2004). Πιο συγκεκριμένα, η παρουσία μαρμαρυγιών (>10% σε συγκεκριμένο μέγεθος κλάσματος) μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της ζήτησης σε νερό, σε απόμιξη και διαχωρισμό του νωπού σύνθετου υλικού (Thomas & Forriald, 2007). Ο επικρατέστερος λόγος που οι μαρμαρυγίες παρουσιάζουν τα προβλήματα αυτά είναι η μειωμένη πρόσφυση του συνδετικού υλικού με την επιφάνεια των ορυκτών αυτών (Neville, 2011). Η Järvenpää (2001) αναφέρει ότι, όταν οι μαρμαρυγίες παρουσιάζονται στα χονδρόκοκκα αδρανή, ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την απόδοση των αδρανών αυτών δεν είναι η συνολική ποσότητά τους, αλλά η κατανομή τους. Εάν είναι σε δεσμίδες, τότε ακόμα και σε μικρή ποσότητα μπορεί να είναι επιβλαβείς. Το ίδιο ισχύει και για τα κονιάματα, όπου όπως αναφέρει ο Dewar (1963), η παρουσία των μαρμαρυγιών στα αδρανή αυξάνει τη ζήτηση του νωπού υλικού σε νερό, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του σκληρυμένου κονιάματος.

Είναι επίσης ευρέως γνωστό (Poole, 1992; Ponce & Batic, 2006) ότι η παρουσία άμορφου διοξειδίου του πυριτίου, συνήθως με τη μορφή οπάλιου ή ηφαιστειακού γυαλιού, μπορεί να αντιδράσει με τα αλκάλια που υπάρχουν στο τσιμέντο στην παρουσία νερού, και έτσι να προκληθεί η λεγόμενη αλκαλοπυριτική αντίδραση. Κατά την αντίδραση αυτή, δημιουργείται κολλοειδής ουσία που μπορεί να επεκταθεί και στο συνδετικό υλικό. Η αλκαλοπυριτική αντίδραση μπορεί να διαρκέσει έως και αρκετά χρόνια και τα τυπικά επιβλαβή χαρακτηριστικά της περιλαμβάνουν ρηγματώσεις (Εικόνα 3.8), θρυμματισμό επιφανειακών αδρανών και παρουσία κολλοειδούς ουσίας στις ρωγμές.

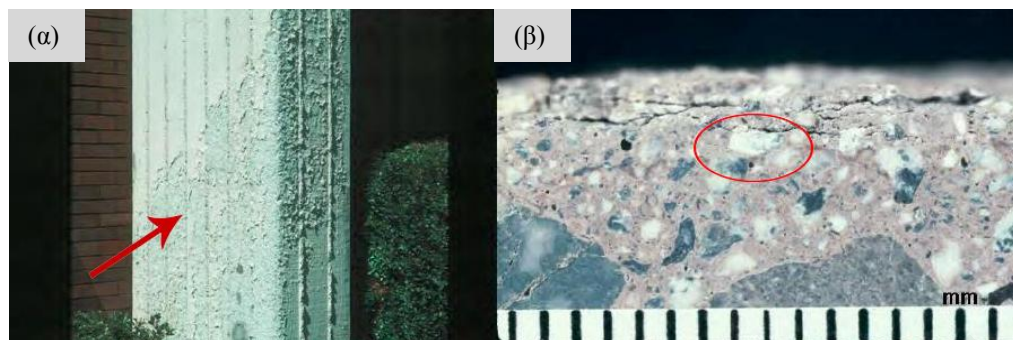


**Εικόνα 3.8: Ρηγμάτωση σκυροδέματος λόγω αλκαλοπυριτικής αντίδρασης (Kosmatka et al., 2003).**

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω στην παράγραφο 3.2.1, τα ενεργά αργιλικά ορυκτά επιδρούν αρνητικά στις ιδιότητες σύνθετων δομικών υλικών. Οι Muñoz et al. (2005) και Norveell et al. (2007) αναφέρουν ότι η παρουσία αργιλικών ορυκτών στα αδρανή μειώνει τη θλιπτική αντοχή και αυξάνει τη συρρίκνωση του σκυροδέματος. Όπως είναι επίσης γνωστό (Korkanc & Tugrul, 2004), τα επιβλαβή ορυκτά, όπως η άργιλος, η ιλύς ή το ενεργό διοξείδιο του πυριτίου, προκαλούν διόγκωση της τσιμεντόπαστας ή διασπών το δεσμό μεταξύ αδρανών και τσιμέντου.

Σύμφωνα με τον Wong (2006), οι σχιστόλιθοι, οι αργιλόλιθοι, οι ζεόλιθοι (λεοναρδίτης - λωμοντίτης) (Εικόνα 3.9), αλλά και οι πολύ εξαλλοιωμένοι βασάλτες και διαβάσεις που περιέχουν νοντρονίτη, μπορεί εύκολα να διασπαστούν, παρά το γεγονός ότι μπορεί να εμφανίζονται υγιείς. Οπότε, είναι εμφανές ότι αδρανή με τα πιο πάνω χαρακτηριστικά δύναται να επηρεάσουν σημαντικά τις ιδιότητες των τελικών προϊόντων. Οι Aitcin & Mehta (1990), σε εργαστηριακές δοκιμές, παρατήρησαν ότι σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά, αλλά και με ασβεστολιθικά αδρανή, παρουσίασαν πολύ ψηλότερες αντοχές και μέτρο ελαστικότητας, σε σχέση με σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με γρανιτικά πετρώματα και ποτάμια πυριτικά αμμοχάλικα. Οι ίδιοι συγγραφείς (Aitcin & Mehta, 1990) θεωρούν ότι οι ορυκτολογικές διαφορές των αδρανών είναι υπεύθυνες για την τελική απόδοση των σκυροδεμάτων. Οι Tugrul et al. (2015) αναφέρουν ότι κονιάματα με διαφορετικούς τύπους αδρανών παρουσιάζουν διαφορετικές αντοχές. Ειδικά η προσθήκη μαρμαρυγιών και αργιλικών ορυκτών, όπως για παράδειγμα ο ιλλίτης και ο μοντμοριλλονίτης, αυξάνουν τη ζήτηση του νερού μίγματος σε νερό και έτσι μειώνουν την αντοχή του σκληρυμένου κονιάματος.





Εικόνα 3.9: (α) Απολέπιση επιφάνειας κολώνας σκυροδέματος λόγω παρουσίας ζεολίθων (μετασχηματισμού λωμοντίτη σε λεοναρδίτη) και (β) τομή σκυροδέματος όπου σημειώνεται το αδρανές που περιέχει ζεόλιθους (Erlin & Jana, 2003).



## 4 Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

### 4.1 Γενικά

Η γεωλογία ενός τόπου αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη διαμόρφωση του φυσικού του περιβάλλοντος, αφού όλοι οι σχετικοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα η μορφολογία του εδάφους, το κλίμα, το έδαφος, η θάλασσα, είναι περιβαλλοντικοί παράγοντες που εξαρτώνται άμεσα από το γεωλογικό καθεστώς.

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η γεωτεκτονική εξέλιξη της Κύπρου. Επιχειρείται επίσης μια ιστορική αναδρομή στην χρήση αδρανών υλικών στο νησί, και γίνεται μια ανασκόπηση της ποιότητας και των χαρακτηριστικών τους. Τέλος, παρουσιάζεται η νομοθεσία που προβλέπεται για τον έλεγχο της ποιότητας των αδρανών υλικών της Κύπρου.

### 4.2 Γεωτεκτονική εξέλιξη της Κύπρου

Η Κύπρος είναι το τρίτο μεγαλύτερο σε έκταση (9,251 km<sup>2</sup>) και πληθυσμό νησί της Μεσογείου Θάλασσας (Delipetrou et al., 2008). Η δημιουργία του νησιού ήταν το αποτέλεσμα μιας σειράς πολύπλοκων γεωλογικών διεργασιών, με πυρήνα το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Τροόδους, που διήρκεσαν αρκετά εκατομμύρια χρόνια (Κωνσταντίνου et al., 2002). Γεωλογικά η Κύπρος διακρίνεται στις πιο κάτω ακολουθίες: (α) την Ακολουθία της Κερύνειας (ή του Πενταδακτύλου), (β) το Οφιολιθικό Σύμπλεγμα του Τροόδους, (γ) την Ιζηματογενή Ακολουθία του Τροόδους και (δ) το Σύμπλεγμα των Μαμωνιών (Iosif-Stylianou et al., 2016) (Εικόνα 4.1).



**Εικόνα 4.1:** Οι γεωλογικές ακολουθίες της Κύπρου (Ιστοσελίδα Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου [www.moa.gov.cy/gsd](http://www.moa.gov.cy/gsd)).

Όπως αναφέρει ο Τσιολάκης (2015), οι ακολουθίες Κερύνειας, Μαμωνιών και Τροόδους σχηματίστηκαν σε διαφορετικά περιβάλλοντα και στη συνέχεια συνενώθηκαν. Κατά τη διάρκεια της Πέρμιας περιόδου (πριν από 299-252 Ma), η Κύπρος αποτελούσε μέρος του βόρειου ηπειρωτικού περιθωρίου της Γκοντβάνας (αρχαία υπερήπειρος που περιελάμβανε τις χώρες του νότιου ημισφαιρίου), όπου ασβεστόλιθοι αβαθούς θάλασσας (τα αρχαιότερα ανθρακικά πετρώματα της Κύπρου), υπό τη μορφή ολισθόλιθων της ακολουθίας της Κερύνειας (Robertson & Woodcock, 1986) συσσωρεύονταν πάνω σε μία ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα εκτεινόμενη προς βορρά στον Ωκεανό της Παλαιτηθούς (ωκεάνια λεκάνη που χώριζε τη Γκοντβάνα από την Ευρασία). Ωστόσο, κατά τη διάρκεια του Κατώτερου έως Μέσου Τριαδικού (πριν από 252-237 Ma), η ανθρακική αυτή πλατφόρμα του Περμίου κατακερματίστηκε και οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες αβαθούς θάλασσας της ακολουθίας της Κερύνειας συσσωρεύτηκαν πάνω σε μία ασταθώς καταβυθιζόμενη πλατφόρμα, ενώ ταυτόχρονα έγιναν και αποθέσεις ιζημάτων (Σχηματισμός Συγχαρίου) δολομιτικών ασβεστόλιθων και δολομιτών σκούρου έως ανοιχτού γκριζού χρώματος (Ducloz, 1972).

Αργότερα, κατά το Ανώτερο Τριαδικό (πριν από 237-201 Ma), λόγω έντονου τεκτονισμού στην περιοχή ξεκίνησε η δημιουργία αλληλοσυνδεόμενων ωκεάνιων λεκανών με ταυτόχρονη έκχυση λαβών (Σχηματισμός Φασούλας που αποτελείται από προσκεφαλοειδείς λάβες -pillow lavas-, θολειτικούς ολιβινικούς βασάλτες και αλκαλικούς βασάλτες έως τραχίτες (Garzanti et al., 2000)). Αποτέλεσμα της έκχυσης αυτής ήταν ο σχηματισμός ενδοωκεάνιων ηφαιστειακών νησιών, στην περιφέρεια των οποίων

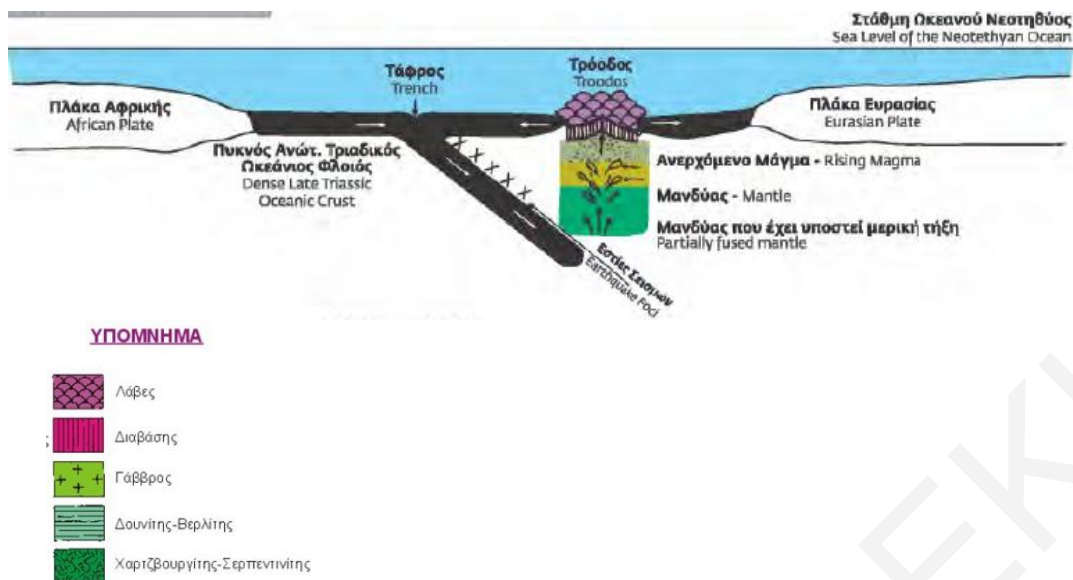
#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

εμφανίζεται ο Σχηματισμός της Πέτρας του Ρωμιού, που αποτελείται από τεμάχη λευκού, ανακρυσταλλωμένου ασβεστόλιθου (Garzanti et al., 2000). Ακολούθησαν εναποθέσεις ιζημάτων, τόσο πάνω στο ηφαιστειακό υπόβαθρο, όσο και μακριά από αυτό, όπως για παράδειγμα πελαγικών ραδιολαριτικών πηλιτών, τουρβιδιτών, ασβεστολίθων, αργιλικών σχιστολίθων. Αυτά αποτελούν σήμερα μέλη και Σχηματισμούς (π.χ. Χολέτρια, Μαυροκόλυμπος, Βλάμπουρου, Μαρώνας) του Συμπλέγματος Μαμωνίων (Τσιολάκης, 2015).

Κατά την περίοδο του Ιουρασικού έως το Κατώτερο Κρητιδικό (πριν από 201-100 Ma), στην περιοχή των Μαμωνίων κυριάρχησε ο Σχηματισμός Επισκοπής, με εναλλαγές ιλουλίθων, ραδιολαριτικών κερατόλιθων, πηλιτών και ψαμμιτών (Bragin & Krylov, 1996). Το ίδιο περίπου διάστημα, στην περιοχή της Κερύνειας συσσωρεύτηκαν αρκετές εκατοντάδες μέτρα από συμπαγείς ή μεσοστρωματώδεις έως παχυστρωματώδεις ασβεστόλιθους μικρού βαθμού μεταμόρφωσης (Σχηματισμός Αγίου Ιλαρίωνα) (Ducloz, 1972).

Πριν από 92 Ma περίπου (Τουρόνιο), η διάνοιξη του Νότιου Ατλαντικού Ωκεανού οδήγησε στην κίνηση της Αφρικανικής πλάκας προς βορρά, με αποτέλεσμα τη σύγκλιση της με την Ευρασιατική πλάκα. Η σύγκλιση αυτή οδήγησε στη δημιουργία ζωνών καταβύθισης στα βάθη του ωκεανού της Νεοτηθύος, και κατά συνέπεια στο σπάσιμο του παλαιού ωκεάνιου φλοιού και στην καταβύθιση ενός τμήματος του κάτω από το άλλο. Μετά την καταβύθιση κάθε νέου Κρητιδικού ωκεάνιου φλοιού, εισερχόταν στην τάφρο καταβύθισης πυκνός Τριαδικός ωκεάνιος φλοιός. Βορειότερα της ζώνης καταβύθισης άρχισε η ταυτόχρονη διάνοιξη του ωκεανού. Σε αυτή τη ζώνη, και πάνω από τη ζώνη καταβύθισης, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών, προκλήθηκε μερική τήξη των ανερχόμενων ρευμάτων του μανδουακού υλικού και δημιουργήθηκε μάγμα, το οποίο λόγω υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης κινήθηκε ανοδικά. Το μάγμα κατά την άνοδό του γέμισε τους μαγματικούς θαλάμους, εισχώρησε μέσα σε αγωγούς μεταφοράς και εκχύθηκε στον πυθμένα του ωκεανού. Με τη ψύξη του σε καθένα από αυτά τα περιβάλλοντα, σχημάτισε μια διαφορετική ομάδα πετρωμάτων, που όλα μαζί συνέθεσαν το Οφιολιθικό Σύμπλεγμα του Τροόδου (Ανώτερο Κρητιδικό) πλάτους 200 χιλιομέτρων περίπου (Εικόνα 4.2) (Τσιολάκης, 2015).

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου



Εικόνα 4.2: Ανώτερο Κρητιδικό (πριν από 92 Ma), δημιουργία οφιολίθου Τροόδους (Τσιολάκης, 2015).

Το Οφιολιθικό Σύμπλεγμα του Τροόδους είναι ένα πλήρες αναπτυγμένο και καλά διατηρημένο σύμπλεγμα με έκταση 3000 km<sup>2</sup>. Θεωρείται μοναδικό στον κόσμο και αποτελεί αντικείμενο μελέτης των γεωλόγων ανά το παγκόσμιο (Margaritz & Taylor, 1974; Varga & Moores, 1985; Schiffman & Smith, 1988; Alt & Teagle, 2000; Robinson et al., 2003; Sredojevic, 2012). Η εμφάνιση του οφιολίθου έχει σχήμα ελλειπτικό και ο μεγάλος άξονάς του έχει διεύθυνση ΒΔ-ΝΑ. Η σειρά ωστόσο των πετρωμάτων εμφανίζεται ως ανεστραμμένη, αφού παρόλο που τα υπερβασικά πετρώματα είναι στρωματογραφικά τα κατώτερα, εντούτοις εμφανίζονται στο ψηλότερο σημείο της οροσειράς, λόγω της έντονης και διαφορικής διάβρωσης που ακολούθησε την ανύψωση του Τροόδους πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας. Έτσι, από τα κατώτερα προς τα ανώτερα μέλη συναντά κανείς τα πιο κάτω πετρώματα: (α) την ακολουθία του μανδύα, που περιλαμβάνει χαρτζβουργίτη, δουνίτη και σερπεντινίτη, (β) τα σωρευτικά πετρώματα, δηλαδή δουνίτη, βερλίτη, πυροξενίτη, γάββρο και πλαγιογρανίτη, (γ) το σύστημα πολλαπλών φλεβών που αποτελείται από φλεβικά διαβασικά πετρώματα βασαλτικής έως δολεριτικής σύστασης, (δ) τα ηφαιστειακά πετρώματα, που αποτελούνται από δύο οριζόντες προσκεφαλοειδών λαβών και ροές λάβας βασαλτικής σύστασης και (ε) το Σχηματισμό Πέρα Πέδι, που αποτελείται από φαιοχώματα (ούμπρες) που εναλλάσσονται με ραδιολαρίτες, πηλίτες και αργιλικούς σχιστόλιθους (Moores & Vine, 1971; Κωνσταντίνου et al., 2002).

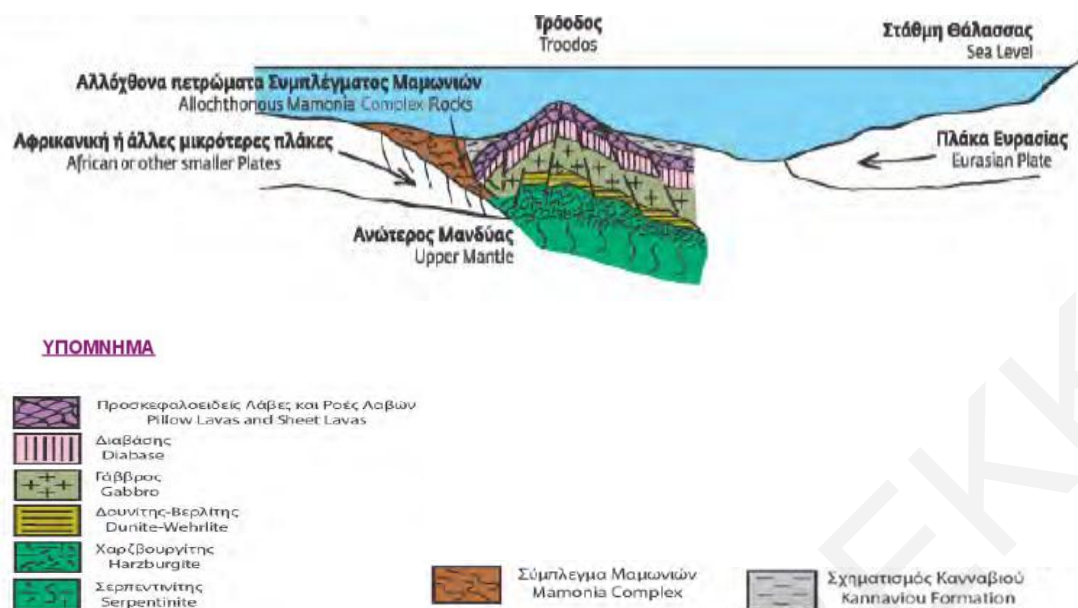
#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

Πάνω από τις λάβες και το Σχηματισμό του Πέρα Πέδι αποτέθηκαν μπεντονιτικές άργιλοι και ηφαιστειοκλαστικοί ψαμμίτες του Σχηματισμού της Κανναβιού κατά το Ανώτερο Κρητιδικό (Καμπάνιο-Μέσο Μαιστρίχτιο) πριν από 75-70 εκατ. χρόνια (Robertson, 1977).

Η σύγκρουση της πλάκας της Αραβίας, πριν από περίπου 70 Ma, (η οποία τότε ήταν ενωμένη με την πλάκα της Αφρικής), με ένα τμήμα του νέου ωκεάνιου φλοιού, κομμάτι του οποίου είναι το Τρόδος, είχε ως αποτέλεσμα τη διακοπή της δημιουργίας νέου ωκεάνιου φλοιού, την αποκοπή της μικροπλάκας του Τροόδους από τον υπόλοιπο ωκεανό και την περιστροφή της κατά 90° (Clube et al., 1985). Την ίδια περίοδο, τεμάχια του συμπλέγματος Μαμωνιών βρέθηκαν μέσα στην τάφρο καταβύθισης και επωθήθηκαν βορειότερα, πάνω στα κράσπεδα της ζώνης του Τροόδους και των μπεντονιτικών αργίλων του Σχηματισμού της Κανναβιού (Εικόνα 4.3). Η σύγκρουση αυτή οδήγησε στη δημιουργία χαοτικών συναθροίσεων μεταξύ των πετρωμάτων του Σχηματισμού Κανναβιού και των πετρωμάτων της Ακολουθίας των Μαμωνιών (Συνοθύλευμα της Μονής). Σημειώνεται ότι σε ορισμένες περιοχές της Ζώνης Μαμωνιών επικάθεται ο Σχηματισμός Κάθηκα, που αποτελείται από ένα συνονθύλευμα θραυσμάτων από πετρώματα που προέρχονται από την Ακολουθία Μαμωνιών, μαζί με αργιλικά και άλλα λεπτόκοκκα υλικά, αποτέλεσμα θαλάσσιας διάβρωσης, μετακίνησης και εναπόθεσης (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013; Τσιολάκης, 2015).

Κατά τη διάρκεια της έναρξης της αποκόλλησης της μικροπλάκας του Τροόδους, στην περιοχή της Κερύνειας, η Μεσοζωϊκή ασβεστιτική πλατφόρμα κατακερματίστηκε και ανακρυσταλλώθηκε. Μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως σχιστόλιθοι και μάρμαρα, σχηματίστηκαν σε βάθος, τεμαχίστηκαν και κινήθηκαν προς τα πάνω μέσω ενεργών ρηγμάτων.

## Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου



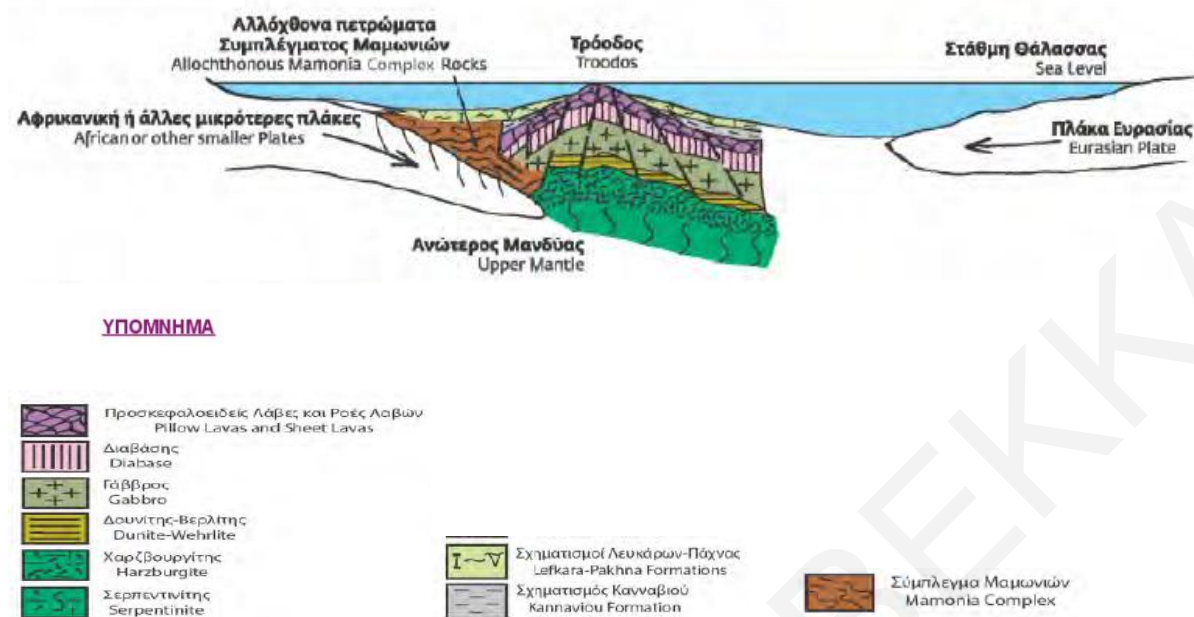
Εικόνα 4.3: Ανώτερο Κρητιδικό (περίπου πριν από 70 Ma), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015).

Επίσης, στην περιοχή της Κερύνειας, την ίδια περίοδο ιζηματογένεσης με αυτή του Σχηματισμού της Κανναβιού, αποτέθηκαν τουρβιδιτικοί ψαμμίτες, πάνω από το ήδη κατακερματισμένο και μεταμορφωμένο υπόβαθρο. Λόγω της περιστροφής της μικροπλάκας του Τροόδους, η περιοχή της Κερύνειας υπέστη καθιζήσεις, με αποτέλεσμα κατά την περίοδο αυτή να παρατηρηθεί ηφαιστειότητα, ενώ ταυτόχρονα αποτέθηκαν πελαγικά ανθρακικά πετρώματα από ασβεστόλιθο, κρητίδες και μάργες (Σχηματισμός Λαπήθου) (Ducloz, 1972; Τσιολάκης, 2015).

Προς το τέλος του Ανώτερου Μαιστρίχιου (περίπου 66 εκατ. χρόνια πριν), ξεκίνησε η συσσώρευση πελαγικών ανθρακικών ιζημάτων βαθιάς θάλασσας, όπως μαργών, κρητίδων και κερατόλιθων (Σχηματισμός Λευκάρων). Η ιζηματογένεση του Σχηματισμού αυτού διήρκησε για πολλά εκατομμύρια χρόνια, μέχρι και το τέλος του Ολιγοκαίνου με αρχές Μειοκαίνου (πριν από 23 Ma) (Eaton, 1987) (Εικόνα 4.4).

Ωστόσο, προς το τέλος του Ηωκαίνου (πριν από 33 Ma), λόγω του ότι η πλάκα της Ανατολίας συνενώθηκε με άλλες μικροπλάκες, και η ωκεάνια λεκάνη βόρεια της Κύπρου έκλεισε, η περιοχή της Κερύνειας ανυψώθηκε, παραμορφώθηκε και επωθήθηκε προς νότο.

## Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου



**Εικόνα 4.4:** Κατώτερο Μειόκαινο (23-20 εκατ. χρόνια πριν), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015).

Στο χώρο της γεωτεκτονικής ζώνης της Κερύνειας, παρατηρήθηκε εναπόθεση του Σχηματισμού Μπελαπαΐς, που είναι μερικώς αντίστοιχος του Σχηματισμού Λευκάρων και αποτελείται από ανακρυσταλλωμένο λατυποπαγές, μάργες, ψαμμίτες ενώ περιέχει ολισθοστρώματα παλαιότερων πετρωμάτων (από Σχηματισμούς Λευκάρων και Καντάρας) που παραμορφώθηκαν μαζί με φλύσχη (Ducloz, 1972; Τσιολάκης, 2015).

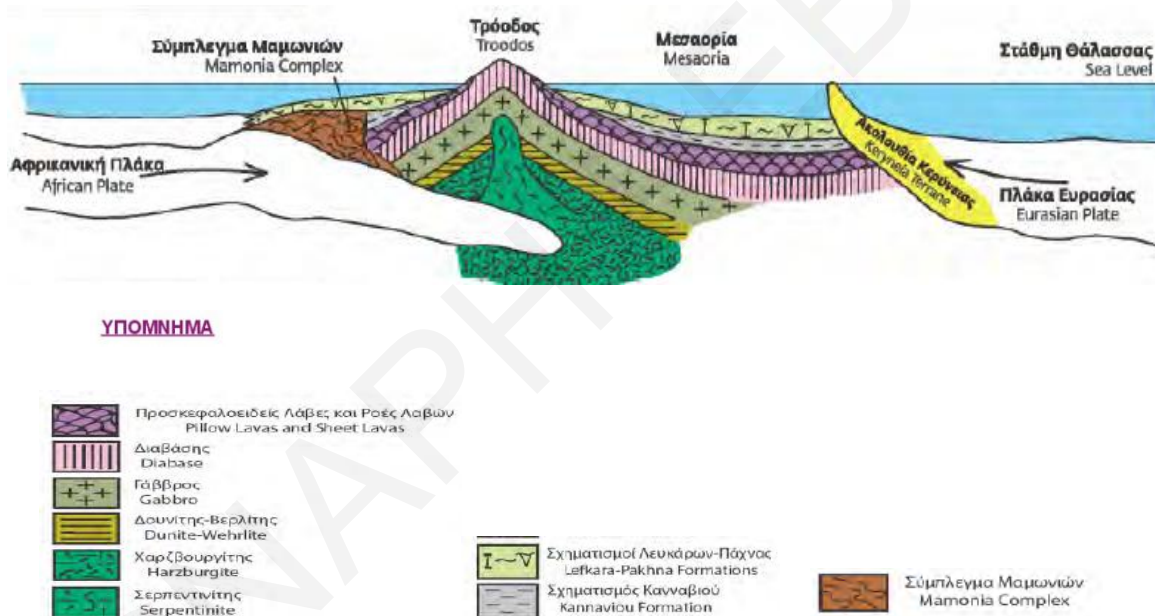
Η συνέχιση της σύγκλισης μεταξύ της Αφρικανικής και της Ευρασιατικής πλάκας, νότια και δυτικά της Κύπρου, περίπου κατά το Κατώτερο Μειόκαινο (πριν από 22 Ma), είχε ως αποτέλεσμα οι συνενωμένες ζώνες του Τροόδους και των Μαμωνιών να ανυψώνονται σταδιακά, ενώ η περιοχή της Κερύνειας να καταβυθίζεται δραστικά.

Κατά τη διάρκεια του Μειόκαινου (από 22 μέχρι 5 Ma πριν), τόσο νότια του Τροόδους, όσο και βόρεια αποτέθηκαν ανθρακικά ιζήματα, όπως κρητίδες, μαργαϊκές κρητίδες, μάργες, ασβεσταρενίτες κροκαλλοπαγή του Σχηματισμού Πάχνας. Στη βάση και τη κορυφή του Σχηματισμού Πάχνας, υπάρχουν κατά τόπους και σε ορισμένες περιοχές υφαλογενείς και βιοκλαστικοί ασβεστόλιθοι, που έχουν αποτεθεί σε αβαθή θαλάσσια νερά και αποτελούν τα Μέλη Τέρρα και Κορωνιά. Την ίδια περίοδο (κατά το Μέσο Μειόκαινο), μέσα στην επιμήκη τάφρο που υπήρχε βόρεια του Τροόδους, αποτέθηκαν αβυσσικοί τουρβιδίτες (Φλύσχης του Σχηματισμού Κυθρέας) (Follows, 1990; Κωνσταντίνου et al., 2002; Τσιολάκης, 2015).



#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

Κατά το Κατώτερο Τορτόνιο (πριν από 9 Ma), η αλλαγή της διεύθυνσης των πλακών της Αφρικής και της Ευρασίας σε πλάγιο-συγκλίνουσα, οδήγησε σε ανύψωση του Τροόδους, πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, σε διάβρωση και αποσάθρωση των πετρωμάτων του, και στην παρουσία κλαστικού υλικού, από το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Τροόδους, στους ανώτερους ορίζοντες του Σχηματισμού της Πάχνας. Επιπλέον, κατά το διάστημα αυτό, η οροσειρά των αλλόχθονων ασβεστολίθων της Κέρυνειας κινήθηκε νοτιότερα (Εικόνα 4.5) (Τσιολάκης, 2015). Κατά το ίδιο διάστημα, η ιζηματογένεση στις νότιες παρυφές της οροσειράς του Πενταδακτύλου άλλαξε και από φλύσχη (Φλύσχης Κυθρέας που αποτελείται από κροκαλοπαγές με εναλλαγές γραουβάκων, ιλυόλιθων, μαργών και ψαμμιτών (Weiler, 1970)) αποτέθηκαν ανθρακικά ιζήματα αβαθούς θάλασσας, όπως κρητίδες, γυψούχες μάργες και ψαμμίτες (Σχηματισμός Λαπάτσας) (Ducloz, 1972).



Εικόνα 4.5: Ανώτερο Μειόκαινο (πριν από 10 Ma), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Τσιολάκης, 2015).

Πριν από 6 Ma (Μεσσήνιο), η Μεσόγειος Θάλασσα, αποκόπηκε από τον Ατλαντικό Ωκεανό, και η εξάτμιση που ακολούθησε είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία του Σχηματισμού Καλαβασού που αποτελείται από κοιτάσματα εβαποριτών (γύψοι και ορυκτό άλας) και γυψούχες μάργες (Robertson et al., 1995).

Κατά το Κατώτερο Πλειόκαινο (πριν από 5 Ma), η πλάκα της Αφρικής από βορειανατολικά κινήθηκε πλέον προς βόρεια, και η σύγκλιση με τη πλάκα της Ανατολίας έγινε κάθετη, με αποτέλεσμα τη σταδιακή ανύψωση του Οφιολιθικού Συμπλέγματος του



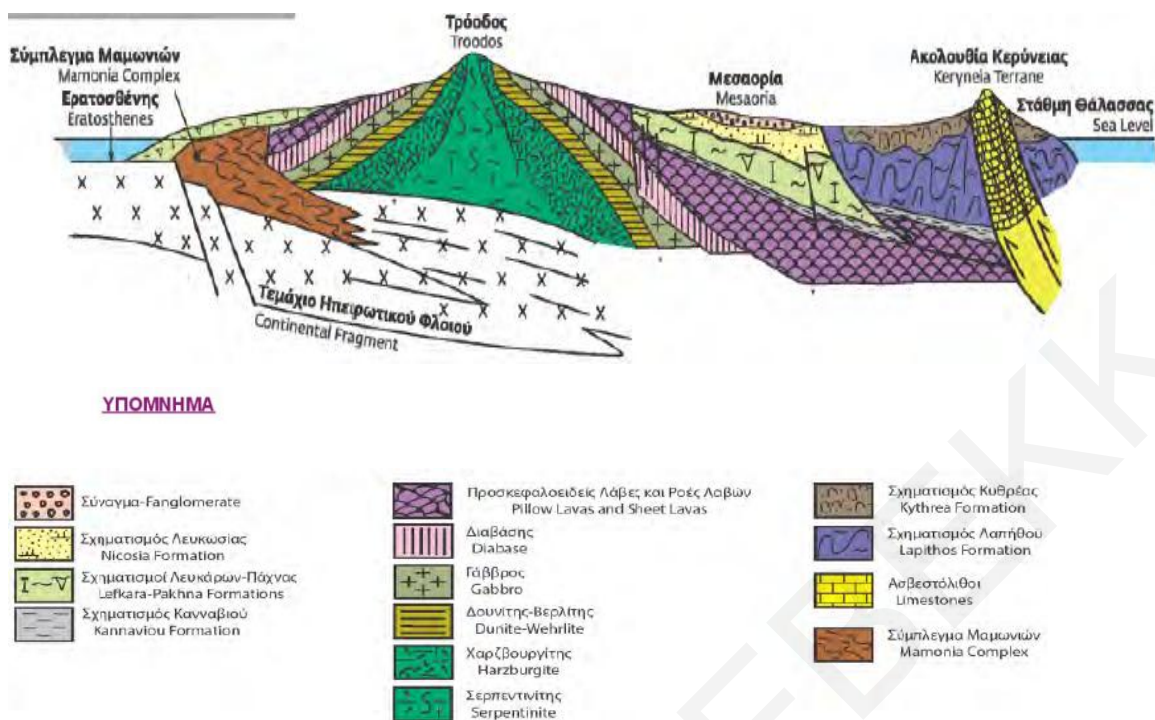
#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

Τροόδους. Την περίοδο μετά την αποκατάσταση της επικοινωνίας της Μεσογείου με τον Ατλαντικό Ωκεανό, και τον κατακλυσμό της με τα νερά του Ατλαντικού, η στάθμη του νερού ανέβηκε και στις θαλάσσιες λεκάνες μεταξύ Τροόδους και Πενταδακτύλου, καθώς και στο χώρο της πεδιάδας της Μεσαορίας, και έτσι ξεκίνησε ένας νέος κύκλος ιζηματογένεσης (Harrison et al., 2004). Κατά τη διάρκεια του κύκλου αυτού, σχηματίστηκαν τα πετρώματα του Σχηματισμού Λευκωσίας που αποτελείται από τα εξής μέλη: το Μέλος Μάργας (ιλυώδεις μάργες και αμμόδεις απολιθωματοφόρες μάργες), το Μέλος Κεφαλές (δελταϊκές αποθέσεις κροκαλλοπαγών), το Μέλος Αθαλάσσας (ασβεσταρενίτες, βιοασβεσταρενίτες και κροκαλλοπαγή), το Μέλος Λιθικός Άμμος (ψαμμίτες οφιολιθικής προέλευσης), το Μέλος Ασπροάμπουλος (λεπτόκοκκος ωόλιθος με σταυρωτή στρώση) και το Μέλος Παράκτιων Αποθέσεων (χαλίκια, άμμος και ιλύς) (Zomeni, 2012).

Η τελική τοποθέτηση, των αλλόχθονων σχηματισμών της ακολουθίας της Κερύνειας, αποδίδεται στην επαναδραστηριοποίηση κατά το Ανώτερο Μειόκαινο και Κατώτερο Πλειόκαινο παλαιότερων ρηγμάτων εφίππευσης.

Κατά τη διάρκεια του Τεταρτογενούς (από 2.5 μέχρι 0.005 Ma), η ανύψωση του νησιού επιταχύνθηκε λόγω της σύγκρουσης του ηπειρωτικού φλοιού, του υποθαλάσσιου βουνού του Ερατοσθένη, με τον ωκεάνιο φλοιό του Τροόδους νότια της Κύπρου. Το νερό που περιεχόταν στο καταβυθιζόμενο ηπειρωτικό φλοιό, μετανάστευσε προς τα πάνω και προκάλεσε серπεντινίωση και διαπυρισμό των υπερβασικών πετρωμάτων του μανδύα του Τροόδους (Poole & Robertson, 1991). Η ανυψωτική κίνηση του Τροόδους, σε συνδυασμό με τις ψηλές βροχοπτώσεις, οδήγησαν σε διάβρωση της οροσειράς και τη μεταφορά συγκεντρώσεων μεγάλου πάχους αλλουβιακών ριπιδίων (Σχηματισμός Απαλού, Σύναγμα) (Εικόνα 4.6), πλούσιες σε κλαστικό υλικό, από τα οφιολιθικά πετρώματα του Τροόδους (Τσιολάκης, 2015).

## Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου



Εικόνα 4.6: Πλειόκαινο-Πλειστόκαινο (πριν από 3-05 Ma), γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου (Γσιολάκης, 2015).

Η γεωλογία διαδραμάτισε πρωταρχικό ρόλο στη διαμόρφωση του φυσικού περιβάλλοντος της Κύπρου, το οποίο με τη σειρά του επηρέασε την ιστορική και πολιτιστική της εξέλιξη. Καθοριστική για την εξέλιξη αυτή ήταν κυρίως η εκτεταμένη εκμετάλλευση των πλούσιων φυσικών της πόρων, όπως για παράδειγμα τα ορυκτά, τα μεγάλης έκτασης ανανεώσιμα δάση και το νερό. Οι πόροι αυτοί προέρχονται κατά κύριο λόγο από την οροσειρά του Τροόδους και συνδέονται άμεσα με τη γεωλογική του εξέλιξη (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).

### 4.3 Αδρανή υλικά της Κύπρου

#### 4.3.1 Χρήση αδρανών υλικών κατά την εξέλιξη της οικοδομικής βιομηχανίας στην Κύπρο

Η κατασκευαστική βιομηχανία είναι μια από τις σημαντικότερες οικονομικές δραστηριότητες της Κύπρου, με διαχρονική συνεισφορά στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Α.Ε.Π.) πέραν του 7 - 8% (Αντωνίου et al., 2013). Σε αυτή τη βιομηχανία επενδύονται τεράστια χρηματικά ποσά, ενώ απασχολείται και ένα μεγάλο ποσοστό του εργατικού δυναμικού.

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

Το κυριότερο κατασκευαστικό υλικό του νησιού, το σκυρόδεμα, ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στα μέσα της δεκαετίας του 1930. Για την παρασκευή του γινόταν χρήση φυσικών αμμοχάλικων, τα οποία συλλέγονταν από τις κοίτες και τις εκβολές των ποταμών, καθώς επίσης και από εναποθέσεις σε παράλιες περιοχές. Τα υλικά αυτά ήταν προϊόντα διάβρωσης των πετρωμάτων του Τροόδους και των ιζηματογενών πετρωμάτων που το περιβάλλουν.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των φυσικών αμμοχάλικων είναι ότι κατά τη μεταφορά τους υφίστανται έντονη τριβή, με αποτέλεσμα να στρογγυλοποιούνται. Περισσότερο αποστρογγυλεμένα είναι τα αμμοχάλικα που βρίσκονται στις κοίτες των ποταμών, και αυτό οφείλεται στην κύλιση εξαιτίας της ποτάμιας δράσης. Αντίθετα, το σχήμα των αμμοχάλικων των παραθαλάσσιων περιοχών είναι πεπλατυσμένο. Επίσης, τα αμμοχάλικα των παράλιων περιοχών δεν περιέχουν παιπάλη, εν αντιθέσει με τα αμμοχάλικα των ποταμών που περιέχουν μεγάλο ποσοστό παιπάλης (Σπυρόπουλος, 2005; Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των φυσικών αμμοχάλικων είναι ότι η ορυκτολογική τους σύσταση διαφέρει ανά περιοχή. Αναλόγως της διαδρομής που καλύπτει ο ποταμός που τα μεταφέρει, είναι και αντίστοιχη η αναλογία και το είδος των αμμοχάλικων που απαντώνται στις κοίτες και εκβολές των διαφόρων ποταμών του νησιού. Για παράδειγμα, στη νότια πλευρά του Τροόδους, οι ποταμοί Κούρης, Γερμασόγειας, Βασιλοπόταμος κ.α. διασχίζουν κρητίδες και κερατόλιθους, με αποτέλεσμα τα αμμοχάλικα στις κοίτες και εκβολές τους να περιέχουν μεγάλο ποσοστό από αυτά τα πετρώματα (Εικόνα 4.7). Στη βόρεια πλευρά του Τροόδους, τα αμμοχάλικα προκύπτουν από τα πυριγενή πετρώματα, αφού οι ποταμοί Γιαλιάς, Πεδιαίος, Σερράχης κ.α. διέρχονται κυρίως πάνω από αυτά τα πετρώματα (Εικόνα 4.8). Στην Πάφο, τα αμμοχάλικα που απαντώνται στις κοίτες και εκβολές των ποταμών Διαρίζος, Ξερός, Έξουσας κ.α. περιλαμβάνουν πυριγενή, ιζηματογενή καθώς επίσης και πετρώματα από το Σύμπλεγμα Μαμωνιών, γι' αυτό και τα συγκεκριμένα αμμοχάλικα παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλία χρωμάτων (Εικόνα 4.9).

Η λατόμευση των φυσικών αμμοχάλικων προκάλεσε ανεπανόρθωτη ζημιά στον εμπλουτισμό των υδροφορέων των μεγάλων ποταμών και στο φυσικό περιβάλλον των πλείστων παραλιών της Κύπρου, και κατ' επέκταση οδήγησε στην υποβάθμισή τους.

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου



**Εικόνα 4.7:** Αμμοχάλικα των ποταμών και παραλιών των περιοχών νότια του Τροόδους.

**Εικόνα 4.8:** Αμμοχάλικα των ποταμών και παραλιών των περιοχών βόρεια του Τροόδους.

**Εικόνα 4.9:** Αμμοχάλικα των ποταμών και παραλιών της Πάφου.

Σε πολλές περιοχές παρατηρήθηκε διάβρωση των ακτών, η οποία επιδεινώθηκε μετά την κατασκευή των υδατοφρακτών στους μεγάλους ποταμούς, που σταμάτησαν τη μεταφορά των υλικών της διάβρωσης του Τροόδους προς τις ακτές. Επιπρόσθετα, τα αποθέματα των φυσικών αδρανών υλικών ήταν περιορισμένα και μόνο βραχυπρόθεσμα θα μπορούσαν να ικανοποιήσουν μέρος των αναγκών της οικοδομικής βιομηχανίας του νησιού (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).

Γι' αυτό, παράλληλα με τη χρήση των φυσικών αμμοχάλικων, ξεκίνησε σταδιακά, κατά τη δεκαετία του 1950, και η εκμετάλλευση ασβεστολιθικών πετρωμάτων από την οροσειρά του Πενταδακτύλου, τα οποία αποτελούσαν υποπροϊόν της βιομηχανίας του ασβέστη. Τα υλικά αυτά θεωρούνταν πολύ καλής ποιότητας και παρουσίαζαν εξαιρετική απόδοση, όσον αφορά την αντοχή τους (Κωνσταντίνου et al., 2002). Ωστόσο, η απώλεια της σημαντικής αυτής πηγής αδρανών, λόγω της Τουρκικής εισβολής το 1974, δημιούργησε την ανάγκη για εξεύρεση νέων σημείων λατόμευσης αδρανών στο νησί. Έτσι αναπτύχθηκαν νέα λατομεία για θραυστά αδρανή υλικά, χρησιμοποιώντας ως πρώτες ύλες διαβάση και ασβεστόλιθο.

Μετά το 1983, λόγω της υποχρεωτικής εφαρμογής του Κυπριακού Προτύπου CYS 64 - Αδρανή για σκυροδέματα (Εκθεση Γενικού Ελεκτή, 1995), η χρήση φυσικών αδρανών απαγορεύτηκε, όχι μόνο γιατί προκαλούσε ανεπανόρθωτη ζημιά στο περιβάλλον (Hadjirpanayiotou, 1997), αλλά και λόγω του ότι μέσα από εργαστηριακούς ελέγχους αποδείχθηκε ότι περιείχαν ποικίλες ποσότητες δραστικών ορυκτών και πετρωμάτων που τα καθιστούσαν ακατάλληλα για χρήση στο σκυρόδεμα, γιατί αντιδρούσαν χημικά με την

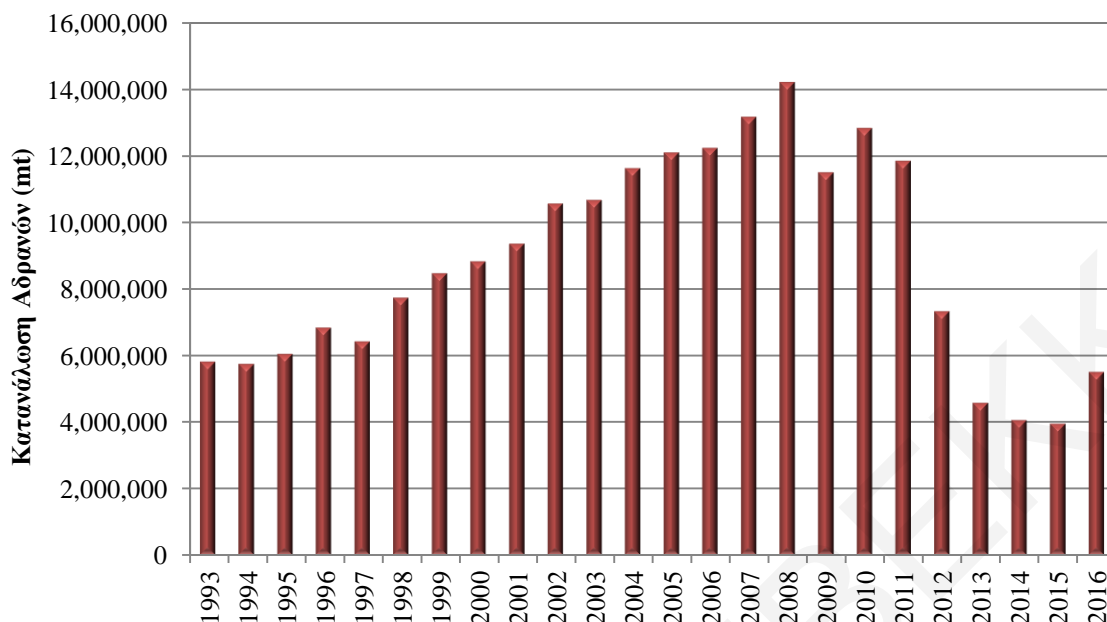
#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

τσιμεντόπαστα και προκαλούσαν μείωση της αντοχής του τελικού προϊόντος και ρηγματώσή του, καθώς επίσης και οξείδωση του οπλισμού στο οπλισμένο σκυρόδεμα (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013). Επομένως, η οικοδομική βιομηχανία στο νησί στράφηκε αποκλειστικά στην χρήση θραυστών αδρανών.

Από τα στατιστικά δεδομένα της Υπηρεσίας Μεταλλείων (Υπηρεσία Μεταλλείων, 2017), επιβεβαιώνεται ότι η λατομική βιομηχανία στην Κύπρο είναι έντονα δραστηριοποιημένη (Διάγραμμα 4.1). Η δραστική μείωση στην παραγωγή αδρανών που παρατηρείται τα τελευταία 4-5 χρόνια οφείλεται στην οικονομική κρίση που μαστίζει την οικοδομική βιομηχανία στο νησί. Συγκεκριμένα, το 2009 παρατηρήθηκε μείωση στις πωλήσεις αδρανών υλικών κατά περίπου 2.7 εκατομμύρια μετρικούς τόνους (σε σχέση με το 2008). Αυτή η μείωση οφειλόταν στη μειωμένη αγορά ακινήτων, απόρροια της παγκόσμιας οικονομικής κρίσης που ξεκίνησε στα τέλη του 2008. Παρά την ανάκαμψη που παρουσιάστηκε το 2010, κυρίως λόγω της αύξησης των έργων οδοποιίας στο νησί, από το 2011 μέχρι και σήμερα η παραγωγή των αδρανών υλικών συνεχίζει να παρουσιάζεται αισθητά μειωμένη. Ειδικότερα, κατά τα έτη 2013-2015, παρουσιάστηκε η χαμηλότερη κατανάλωση αδρανών υλικών στο νησί, τουλάχιστον των τελευταίων είκοσι ετών. Αυτό οφείλεται στη μείωση της αγοράς ακινήτων και του ρυθμού ανάπτυξης νέων κατασκευαστικών έργων, συνέπεια της ευρύτερης οικονομικής κρίσης. Παρόλα αυτά, λόγω της ανάκαμψης της αγοράς ακινήτων, αλλά και λόγω της κατασκευής νέων έργων υποδομής, το 2016 η παραγωγή των αδρανών παρουσίασε αύξηση κατά περίπου 30% (Υπηρεσία Μεταλλείων, 2017). Σήμερα, βρίσκονται σε ισχύ περί τις 25-30 άδειες για λατομικά υλικά, ενώ άλλες 7 αιτήσεις βρίσκονται υπό εξέταση από την Υπηρεσία Μεταλλείων (Υπηρεσία Μεταλλείων, 2017).

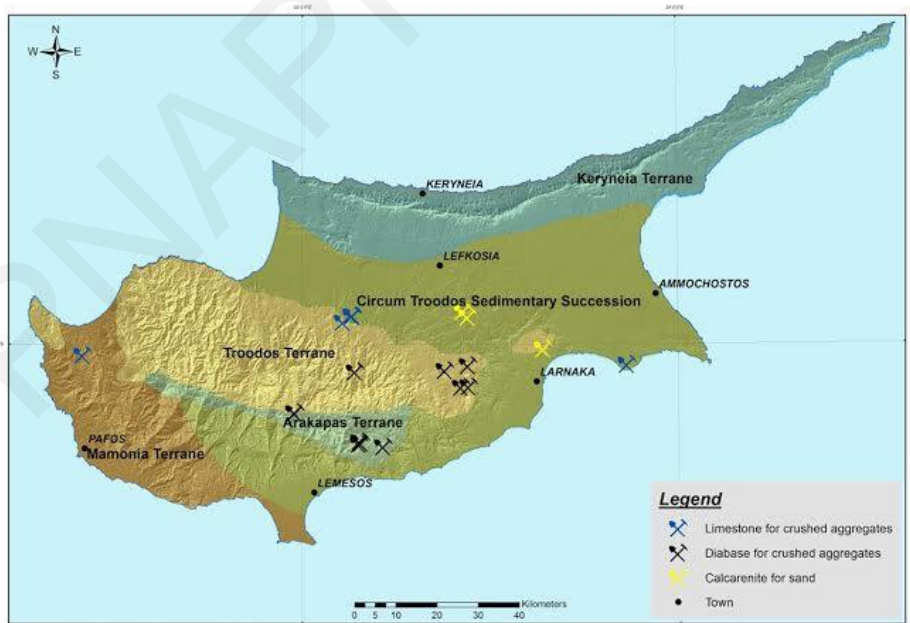
Στην πιο κάτω εικόνα (Εικόνα 4.10) παρουσιάζεται χάρτης της Κύπρου με ενδεικτικές θέσεις των ενεργών λατομείων.

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου



Διάγραμμα 4.1: Πωλήσεις αδρανών υλικών από το 1993 μέχρι το 2016 (mt: μετρικοί τόνοι).

Σημειώνεται ότι η Κύπρος θεωρείται αυτάρκης όσον αφορά τα αποθέματα των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες σε οικοδομές, δρόμους, υδατοφράκτες, μαρίνες, λιμάνια, και άλλα κατασκευαστικά έργα.



Εικόνα 4.10: Χάρτης Κύπρου με ενδεικτικές θέσεις ενεργών λατομείων.

#### 4.3.2 Διαβασικά αδρανή

Διάφορες μελέτες, όπως αναφέρουν οι Κωνσταντίνου και Παναγίδης (2013), κατέδειξαν ότι τα διαβασικά πετρώματα του Συστήματος Πολλαπλών Φλεβών του Οφιολιθικού Συμπλέγματος του Τροόδους, πέραν του ότι παρουσιάζουν αρκετά καλές φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην οικοδομική βιομηχανία και οδοποιία, διαθέτουν επίσης επαρκή αποθέματα για τη μακροπρόθεσμη παραγωγή θραυστών σκύρων και άμμου. Τα διαβασικά πετρώματα καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της έκτασης του Τροόδους, με πάχος που ξεπερνά τα 1000 μέτρα. Λόγω της γεωγραφικής τους κατανομής, διευκολύνθηκε η επιλογή των λατομικών περιοχών, ώστε να εξυπηρετούνται τα αστικά κέντρα με μειωμένο κόστος μεταφοράς. Για τη Λεμεσό και την Ανατολική Πάφο, επιλέχθηκαν λατομικές ζώνες στην Παρεκκλησιά, στο Μοναγρούλι και στον Άγιο Μάμα. Για τη Λευκωσία, Λάρνακα και ελεύθερη Αμμόχωστο, στο Σταυροβούνι, στα Πυργά και στη Μοσφιλωτή (Εικόνα 4.11), για τη Δυτική Λευκωσία στο Φαρμακά και για την Πάφο στην Κανναβιού, η οποία όμως έκλεισε την προηγούμενη δεκαετία, όταν κατασκευάστηκε φράγμα στην περιοχή (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013). Όπως αναφέρεται στην ιστοσελίδα της Υπηρεσία Μεταλλείων Κύπρου ([www.moa.gov.cy/mines](http://www.moa.gov.cy/mines), 2017), στο παρόν χρονικό διάστημα λειτουργούν 10 λατομεία που παράγουν διαβασικά αδρανή, τα οποία όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.10. βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή του Οφιολιθικού Συμπλέγματος του Τροόδους.

Η παραγωγή θραυστών σκύρων και άμμου διαβασικής σύστασης γίνεται σε σκυροθραυστικές μονάδες που συνήθως βρίσκονται εντός ή κοντά στα λατομεία. Αρχικά, γίνεται η εξόρυξη του υλικού από τα μέτωπα λατόμευσης. Αυτό μεταφέρεται στη συνέχεια στις σκυροθραυστικές μονάδες, όπου πραγματοποιούνται διαδοχικές θραύσεις. Ακολούθως, το προϊόν ταξινομείται στις επιθυμητές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και τα τελικά προϊόντα συσσωρεύονται σε σωρούς (Γιασεμής et al., 2005). Στην περίπτωση των λεπτόκοκκων αδρανών ( $d/D=0/4$  mm), όταν υπάρχει ανάγκη παραγωγής άμμου για σκυρόδεμα, σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 12620, το προϊόν πλένεται για να απομακρυνθεί η παιπάλη.





**Εικόνα 4.11: Μέτωπο λατόμευσης διαβασικών πετρωμάτων στην περιοχή Μοσφιλωτής (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο).**

Τα λατομεία παράγουν διαφορετικές διαβαθμίσεις αδρανών, ανάλογα με την χρήση για την οποία προορίζονται (π.χ. σκυρόδεμα, ασφαλτοσκυρόδεμα, θεμέλια-υποθεμέλια, επιχωματώσεις κ.α.). Για παράδειγμα, οι διαβαθμίσεις των διαβασικών αδρανών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του σκυροδέματος στην Κύπρο είναι, όσον αφορά τα σκύρα  $d/D=8/20$  mm (Εικόνα 4.12 (α)) και  $d/D=4/10$  mm (Εικόνα 4.12 (β)), και όσον αφορά την άμμο  $d/D=0/4$ mm (Εικόνα 4.12 (γ)).



**Εικόνα 4.12: (α) Διαβασικά σκύρα μεγέθους 8-20 mm, (β) Διαβασικά σκύρα μεγέθους 4-10 mm, (γ) Διαβασική άμμος μεγέθους 0-4 mm.**

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, τα διαβασικά αδρανή αποτελούν τμήμα του Οφιολιθικού Συμπλέγματος του Τροόδους (Κάτω Κρητιδικό). Τα φλεβικά αυτά πετρώματα (Σύστημα Πολλαπλών Φλεβών) είναι βασαλτικής έως δολεριτικής σύστασης και προήλθαν από τη στερεοποίηση του μάγματος στις διόδους διείδυσης και μεταφοράς του από τους



#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

μαγματικούς θαλάμους στη βάση του ωκεάνιου φλοιού, τροφοδοτώντας ταυτόχρονα τις υποθαλάσσιες εκχύσεις λαβών στον ωκεάνιο πυθμένα (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013). Πρόκειται για μια αλληλουχία φλεβών που αντιπροσωπεύει το γέμισμα του κενού χώρου που δημιουργήθηκε με την απομάκρυνση των τεκτονικών πλακών στα αποκλίνοντα περιθώρια. Το σύστημα πολλαπλών φλεβών εμφανίζεται σε ολόκληρη σχεδόν την έκταση της οροσειράς του Τροόδους (Εικόνα 4.13), σχηματίζοντας ένα ελλειπτικό δακτύλιο που περιβάλλει τα σωρευτικά πετρώματα του Τροόδους και ταυτόχρονα περιβάλλεται από τα έκχυτα ηφαιστειακά (Cann, 2003; Τσιντίδης et al., 2013).

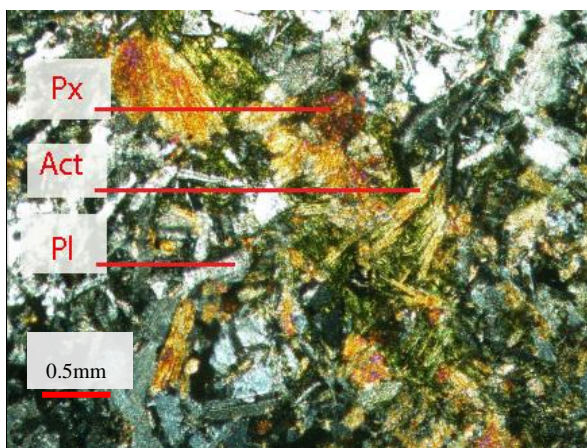


**Εικόνα 4.13:** Φλέβα διαβάση του Συστήματος Πολλαπλών Φλεβών (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).

Όπως αναφέρουν οι Κωνσταντίνου & Παναγίδης (2013), το διαβασικό πέτρωμα τα οροσειράς του Τροόδους είναι ολοκρυσταλλικό, με κρυστάλλους μικρού έως μέσου μεγέθους. Συχνά, στις εξωτερικές πλευρές των φλεβών, υπάρχουν ζώνες με πολύ μικροκρυσταλλικό υλικό. Η μικροκρυσταλλική αυτή υφή δίνει μεγάλη σκληρότητα και αντοχή στην τριβή και διάβρωση. Τα πρωτογενή ορυκτά των διαβασικών πετρωμάτων έχουν αλλοιωθεί στην πρασινοσχιστοειδή φάση και αποτελούνται από αλβίτη, χλωρίτη, χαλαζία, ακτινόλιθο, επίδοτο, μαγνητίτη και σφήνα (Richardson et al., 1987; Vibett, 1993) (Εικόνα 4.14). Στη διεθνή βιβλιογραφία ενδεχομένως ο όρος "διαβάσης" να αντικαθίσταται από τον όρο "δολερίτης". Ο όρος δολερίτης χρησιμοποιείται συνήθως στις γερμανόφωνες χώρες, καθώς και στη Βόρεια Αμερική, για τα χονδροκοκκώδη βασαλτικά πετρώματα με διαφορετική χημική σύσταση. Αντίθετα, οι Άγγλοι πετρολόγοι χρησιμοποιούν τον όρο "διαβάσης" για τους αλλοιωμένους δολερίτες, στους οποίους τα πλαγιόκλαστα έχουν υποστεί αλβιτίωση, ενώ οι πυρόξενοι έχουν μετατραπεί σε αθροίσματα αμφιβόλων και χλωριτών (Κορωναίος, 2016). Όπως αναφέρεται και στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 932-3, ο

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

όρος “δολερίτης” αφορά μικροκρυσταλλικά πετρώματα συνώνυμα με το γάββρο, και συνήθως αποτελείται από ασβεστούχους αστρίους, πυρόξενους και οξειδία του σιδήρου. Ο όρος “διαβάσης” αφορά εξαλλοιωμένους δολερίτες στους οποίους τα πρωτογενή ορυκτά έχουν αντικατασταθεί από ασβεστίτη, αλβίτη, χλωρίτη, σερπεντινίτη κ.α.



**Εικόνα 4.14:** Λεπτή τομή από διαβασικό δείγμα (Px: Πυρόξενος, Act: Ακτινόλθος, Pl: Πλαγιόκλαστο), Κάθετα nicols.

#### 4.3.3 Ασβεστολιθικά αδρανή

Πέραν των διαβασικών αδρανών, για την παρασκευή σκυροδέματος στην Κύπρο παράγονται και ανθρακικά (ασβεστολιθικά και ασβεσταρενιτικά) αδρανή, τα οποία προέρχονται από το Ιζηματογενές Σύμπλεγμα της Ακολουθίας του Τροόδου (Εικόνα 4.10). Από το Σχηματισμό Πάχνας, και συγκεκριμένα από τα μέλη Τέρρα και Κορωνιά, προκύπτουν τα ασβεστολιθικά αδρανή, τα οποία αναλύονται στην παρούσα ενότητα.

Η ιζηματογένεση του Σχηματισμού Πάχνας άρχισε και τελείωσε σε περιβάλλον αβαθών θαλασσών, με την ανάπτυξη υφαλογενών ασβεστολίθων. Στη βάση του Σχηματισμού απαντάται το Μέλος Τέρρα και στην κορυφή του το Μέλος Κορωνιά. Το Μέλος Τέρρα αποτελεί την πρώτη φάση υφαλογενούς ιζηματογένεσης στην Κύπρο, η οποία έλαβε χώρα κατά το Κατώτερο Μειόκαινο, και συγκεκριμένα μεταξύ των βαθμίδων του Άνω Ακουιτάνιου και Κάτω Βουρδιγάλιου (Banner et al., 1999), περίπου πριν 20 Ma. Σύμφωνα με τους Ιωαννου et al. (2010), τα πετρώματα που προέρχονται από το Μέλος Τέρρα του Σχηματισμού Πάχνας είναι σκληρά και γενικά πορώδη, με ένα κρεμώδες-υπόλευκο χρώμα. Οι Κωνσταντίνου & Παναγίδης (2013), αναφέρουν ότι το Μέλος Τέρρα είναι πλούσιο σε ευμεγέθη μικρο-απολιθώματα και κοράλλια, και το γεγονός ότι εμφανίζεται υπό μορφή δευτερογενών ροών κορημάτων και λατυποπαγών φανερώνει ότι αποτέθηκε σε

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

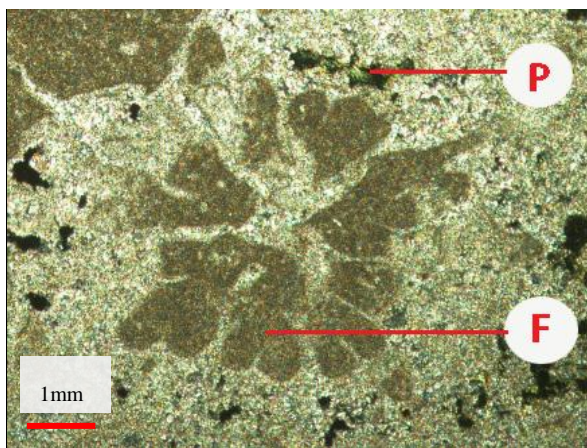
ένα ενεργό τεκτονικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από ποικίλες οργανογενείς δομές κοραλλιών, οι οποίες περιλαμβάνουν κοράλλια της τάξης των *faviidae* και *poritidae*, καθώς επίσης και δευτερογενείς υφαλογενείς δομές κοραλλιών. Το μέλος αυτό εμφανίζεται δυτικά και νοτιοανατολικά της Κύπρου (Εικόνα 4.15).



**Εικόνα 4.15:** Υφαλογενής ασβεστόλιθος του Μέλους Τέρρα στην περιοχή Κάβο Γκρέκο, νοτιοανατολικά της Κύπρου (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).

Το Μέλος Κορωνιά αντιπροσωπεύει τη δεύτερη φάση υφαλογενούς ιζηματογένεσης που έλαβε χώρα κατά το Κατώτερο Μειόκαινο, και συγκεκριμένα το Τορτόνιο-Άνω Μεσσήνιο (Follows, 1992), πριν από 7 Ma. Εμφανίζεται στη νότια και στη βόρεια πλευρά του Τροόδους. Στη νότια πλευρά, οι εμφανίσεις αποτελούνται από χονδρόκοκκα, ανθεκτικά ανθρακικά ιζήματα, τα οποία περικλείουν οργανικά είδη που ζουν σε αβαθείς θάλασσες, όπως θραύσματα από θαλάσσια όστρακα, φύκη, εχινοειδή και κοράλλια. Στα πετρώματα του Μέλους Κορωνιά περιέχονται επίσης τεμάχια από τα υποκείμενα ιζηματογενή, όπως κρητίδες, μάργες και κερατόλιθοι, καθώς και υλικό από τα οφιολιθικά πετρώματα του Τροόδους. Στη βόρεια πλευρά του Τροόδους, το Μέλος Κορωνιά εμφανίζεται τοπικά ως ύφαλοι (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013). Όπως αναφέρουν οι Ιωάννου et al. (2010), τα πετρώματα του Μέλους Κορωνιά είναι πορώδη και αποτελούνται κατά βάση από μικριτικό ασβεστίτη, με πληθώρα απολιθωμάτων (Εικόνα 4.16), ενώ ενδεχομένως να περιέχουν ενδοκλάστες, χαλαζία, άστριους, αδιαφανή ορυκτά και σπάνια αργιλικά ορυκτά.





**Εικόνα 4.16:** Λεπτή τομή Υφαλογενούς Ασβεστολίθου (P: Πόροι, F: Απολίθωμα (κοράλλια)), κάθετα nicols.

Οι υφαλογενείς ασβεστόλιθοι του Σχηματισμού Πάγκας εξορύσσονται από τις λατομικές ζώνες Μιτσερού (Εικόνα 4.17), Ανδρολύκου και Ξυλοφάγου. Για την ικανοποίηση των αναγκών της οικοδομικής βιομηχανίας του νησιού σε ασβεστολιθικά αδρανή, αυτή τη στιγμή λειτουργούν 12 σκυροθραυστικές μονάδες.



**Εικόνα 4.17:** Μέτωπο λατόμευσης ασβεστολιθικών πετρωμάτων στην περιοχή Μιτσερό (φωτογραφία από προσωπικό αρχείο).

Όπως και στην περίπτωση των διαβασικών αδρανών, έτσι και για τα ασβεστολιθικά, οι διαβαθμίσεις που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα είναι, όσον αφορά τα σκύρα  $d/D=8/20$  mm (Εικόνα 4.18 (α)) και  $d/D=4/10$  mm (Εικόνα 4.18 (β)), και όσον αφορά την άμμο  $d/D=0/4$  mm (Εικόνα 4.18 (γ)).



**Εικόνα 4.18:** (α) Ασβεστολιθικά σκύρα μεγέθους 8-20 mm, (β) Ασβεστολιθικά σκύρα μεγέθους 4-10 mm, (γ) Ασβεστολιθική άμμος μεγέθους 0-4 mm.

#### 4.3.4 Ασβεσταρενιτικά αδρανή

Τα ασβεσταρενιτικά πετρώματα, τα οποία επίσης προέρχονται από την Ιζηματογενή Ακολουθία του Τροόδους (Εικόνα 4.10), αποτελούν μέρος του Μέλους Αθαλάσσα του Σχηματισμού Λευκωσίας (Πλειόκαινο, περίπου πριν από 5 Ma). Ο Σχηματισμός Λευκωσίας εμφανίζεται στο βόρειο και στο ανατολικό τμήμα της Νεογενούς ιζηματογενούς λεκάνης της Μεσαορίας (McCallum & Robertson, 1995). Πιο συγκεκριμένα, παρατηρούνται εμφανίσεις στην ευρύτερη περιοχή της Λευκωσίας (Εικόνα 4.19), καθώς επίσης και στις περιοχές Κάβο Γκρέκο, Πισσουρίου, στην Πόλη Χρυσοχούς, στη Χερσόνησο Καρπασίας και αλλού.



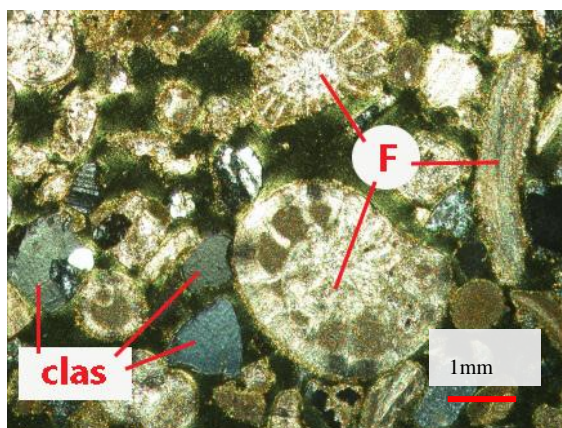
**Εικόνα 4.19:** Το μέλος Αθαλάσσα του Σχηματισμού Λευκωσίας στην περιοχή Άγιος Σωζόμενος, Λευκωσία (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013).

Η ιζηματογένεση του Σχηματισμού Λευκωσίας ξεκίνησε αμέσως μετά το άνοιγμα των στενών του Γιβραλτάρ και τον κατακλυσμό της Μεσογείου από τα νερά του Ατλαντικού (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013). Το μέλος Αθαλάσσα του Σχηματισμού Λευκωσίας περιλαμβάνει σειρές από απολιθωματοφόρα στρώματα ενδιάμεσου έως μεγάλου μεγέθους κόκκου, δηλαδή ασβεσταρενίτες, βιοασβεσταρενίτες και κροκαλοπαγή ρηχής θάλασσας με



#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

σταυρωτή στρώση (Zomeni, 2012). Τα ιζήματα αυτά είναι εμπλουτισμένα με σκελετικό υλικό ανθρακικής σύστασης, το οποίο σε αρκετές περιπτώσεις μπορεί να φτάσει και το 50% κατ'όγκο (Εικόνα 4.20).



**Εικόνα 4.20:** Λεπτή τομή ασβεσταρενίτη (4X) (F: Απολίθωματα, clas: Κλαστικοί κόκκοι), κάθετα nicols.

Στο νησί υπάρχει μεγάλη ζήτηση για τη λεπτόκοκκη άμμο ( $d/D=0/4$  mm) (Εικόνα 4.22) που παράγεται από τα 3 λατομεία παραγωγής ασβεσταρενίτη (Εικόνα 4.21). Το υλικό αυτό εντοπίζεται κυρίως στην ευρύτερη περιοχή Λευκωσίας (Δάλι, Άγιος Σωζόμενος), καθώς και στην περιοχή Λάρνακας (Κελιά-Ορόκλινη).



**Εικόνα 4.21:** Μέτωπο λατόμευσης ασβεσταρενιτικών πετρωμάτων στην περιοχή Ιδαλίου ([http://www.latouros.com/Gallery/gallery\\_rd.htm](http://www.latouros.com/Gallery/gallery_rd.htm)).



Εικόνα 4.22: Ασβεσταρενιτική άμμος μεγέθους 0-4 mm.

#### 4.4 Νομοθεσία – Διατάγματα ελέγχου ποιότητας αδρανών υλικών της Κύπρου

Με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας των αδρανών υλικών του νησιού και την άσκηση αποτελεσματικού ελέγχου, θεσμοθετήθηκαν γύρω στο 1980, σύμφωνα με τον περί Κυπριακών Προτύπων και Ελέγχου Ποιότητας Νόμο, τα ακόλουθα υποχρεωτικά πρότυπα: CYS 64/86 - Αδρανή για σκυροδέματα, CYS 14/86 - Άμμος δόμησης και επιχρισμάτων, CYS 99/86 - Αδρανή για χρήση στην οδοποιία (Κ.Δ.Π.284/86, 1986). Πιο συγκεκριμένα, το CYS 64 - Αδρανή για σκυροδέματα, ετοιμάστηκε το 1978 και δημοσιεύτηκε στην Επίσημη Εφημερίδα της Δημοκρατίας μετά από τέσσερα χρόνια, το 1982. Ένα χρόνο μετά τη δημοσίευσή του αναθεωρήθηκε και αποφασίστηκε η υποχρεωτική εφαρμογή του, ενώ το 1986 αναθεωρήθηκε για δεύτερη φορά (Έκθεση Γενικού Ελεκτή, 1995). Μετά την ένταξη της Κύπρου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, τα μέχρι τότε ισχύοντα Κυπριακά Πρότυπα αντικαταστάθηκαν από αντίστοιχα Ευρωπαϊκά Πρότυπα για τα Αδρανή Υλικά (Κ.Δ.Π.448/2005, 2005), τα οποία περιγράφονται στη ενότητα 5.3 του Κεφαλαίου 5.

Η ισχύουσα νομοθεσία σχετικά με τα πρότυπα για τα αδρανή βασίζεται στον Κανονισμό (ΕΕ) 305/2011, ο οποίος αντικατέστησε την 1<sup>η</sup> Ιουλίου 2013 την Οδηγία 89/106/ΕΟΚ του Συμβουλίου της Ευρώπης για την προσέγγιση των νομοθετικών, κανονιστικών και διοικητικών διατάξεων των κρατών μελών, όσον αφορά τα δομικά προϊόντα του τομέα των κατασκευών. Ο στόχος του πιο πάνω Κανονισμού είναι να διασφαλίσει ότι οι τεχνικές πληροφορίες που παρουσιάζονται σε σχέση με τις αποδόσεις των δομικών προϊόντων κατά τη διάθεση/διαθεσιμότητα τους στην αγορά είναι αξιόπιστες (Υπουργείο Εσωτερικών, 2017).

Στη Κύπρο, Αρμόδια Αρχή για εφαρμογή του Κανονισμού (ΕΕ) 305/2011 ορίστηκε το Υπουργείο Εσωτερικών (ΥΠΕΣ) που είναι ταυτόχρονα και ο Επιτηρητής της Αγοράς. Το

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

ΥΠΕΣ, με βάση τον "Περί των Βασικών Απαιτήσεων που πρέπει να πληρούν Καθορισμένες Κατηγορίες Προϊόντων" Νόμο, ετοίμασε εθνικούς Κανονισμούς που τιτλοφορούνται: "Οι περί των Βασικών Απαιτήσεων (Προϊόντα Δομικών Κατασκευών) Κανονισμοί του 2003". Οι Κανονισμοί δημοσιεύθηκαν στην Επίσημη Εφημερίδα της Δημοκρατίας ως Κ.Δ.Π.832/2003 και τέθηκαν σε ισχύ από την 1/05/2004. Το Διάταγμα που εκδόθηκε αρχικά δυνάμει του Κανονισμού 13, σύμφωνα με τον οποίο παρέχεται στον Υπουργό Εσωτερικών η δυνατότητα κατά καιρούς να εκδίδει σχετικά Διατάγματα, ήταν το "Το περί του Καθορισμού των Επιπέδων των Βασικών Απαιτήσεων Ορισμένων Προϊόντων Δομικών Κατασκευών Διάταγμα του 2005", το οποίο τέθηκε σε ισχύ την 1/05/2005 (Κ.Δ.Π.177/2005, 2005). Το Διάταγμα αυτό αντικαταστάθηκε αργότερα από το Διάταγμα με συνοπτικό τίτλο "Το περί του Καθορισμού των Επιπέδων των Βασικών Απαιτήσεων Ορισμένων Προϊόντων Δομικών Κατασκευών Διάταγμα του 2006", το οποίο τέθηκε σε ισχύ στις 16/06/2006 (Κ.Δ.Π.253/2006, 2006). Το πιο πάνω Διάταγμα αντικαταστάθηκε κατά την 6<sup>η</sup> Μαΐου 2011 από "Το περί του Καθορισμού των Επιπέδων των Βασικών Απαιτήσεων Ορισμένων Προϊόντων Δομικών Κατασκευών Διάταγμα του 2011" (Κ.Δ.Π.164/2011, 2011).

Η κυριότερη διαφορά μεταξύ των τελευταίων τροποποιήσεων στα Διατάγματα που αφορούν τον έλεγχο της ποιότητας των αδρανών υλικών της Κύπρου αφορά στη δοκιμή αποσάθρωσης. Το 2005, με την Κ.Δ.Π. 177/2005, το όριο για τα αδρανή σκυροδέματος καθορίστηκε στο 18% για τα χονδρόκοκκα αδρανή και στο 25% για τα λεπτόκοκκα, ενώ ένα χρόνο αργότερα, με την Κ.Δ.Π. 253/2006, αναθεωρήθηκε στο 25% για τα χονδρόκοκκα αδρανή και στο 35% για τα λεπτόκοκκα. Τέλος, το 2011 με την Κ.Δ.Π. 164/2011, το όριο για τα χονδρόκοκκα αδρανή παρέμεινε στο 25%, ενώ για τα λεπτόκοκκα αδρανή το Υπουργείο Εσωτερικών αποφάσισε να αναστείλει προσωρινά την εφαρμογή της δοκιμής αποσάθρωσης κατά EN 1367-2 και να προχωρήσει στη διεξαγωγή έρευνας για τον καθορισμό ορίων ή/και εναλλακτικών μεθόδων αναφορικά με τον έλεγχο της υγείας αυτών των υλικών. Στους Πίνακες Α.0.1 και Α.0.2 του Παραρτήματος Α παρουσιάζονται τα όρια που καθορίζονται με βάση το τελευταίο Διάταγμα (Κ.Δ.Π. 164/2011) για τις διάφορες δοκιμές που πραγματοποιούνται στα αδρανή που προορίζονται για χρήση στο σκυρόδεμα και στα αδρανή που θα χρησιμοποιηθούν στα κονιάματα αντίστοιχα.



#### 4.5 Ποιότητα αδρανών υλικών της Κύπρου

Παρά την έντονη δραστηριοποίηση της λατομικής βιομηχανίας στην Κύπρο, υπάρχουν πολύ περιορισμένα αξιόπιστα στοιχεία σε σχέση με την ποιότητα των τοπικών αδρανών υλικών. Αυτό εν μέρει οφείλεται στο γεγονός ότι, πριν την υιοθέτηση των Ευρωπαϊκών προτύπων (2004), οι έλεγχοι γίνονταν με βάση τα Κυπριακά πρότυπα (CYS), οι μεθοδολογίες των οποίων, στις πλείστες περιπτώσεις, ήταν διαφορετικές από αυτές των αντίστοιχων Ευρωπαϊκών προτύπων. Ως εκ τούτου, αξιόπιστη βάση δεδομένων για τα χαρακτηριστικά των τοπικών αδρανών άρχισε να δημιουργείται μόλις τα τελευταία 10 χρόνια, ιδιαίτερα με τη συνεισφορά του Εργαστηρίου Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου και τη συνεργασία του Κεντρικού Εργαστηρίου του Τμήματος Δημοσίων Έργων.

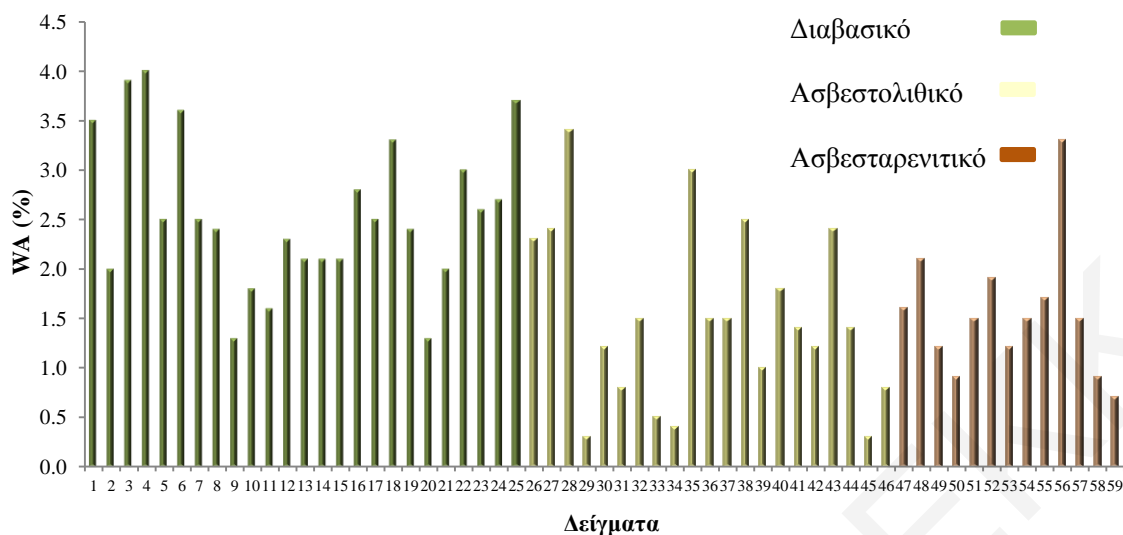
Σε σχετικά πρόσφατη έρευνα που εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (Φούρναρη, 2009), πραγματοποιήθηκαν δοκιμές που είχαν ως στόχο να διερευνηθούν οι φυσικομηχανικές ιδιότητες των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται σε κατασκευαστικά έργα στο νησί. Από τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής (Πίνακας 4.1), που περιελάμβανε, μεταξύ άλλων, δοκιμές (i) αποσάθρωσης (MS) με τη χρήση Θεϊκού Μαγνησίου ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) (EN 1367-2) και (ii) απορροφητικότητας σε νερό (EN 1097-6), σε 19 δείγματα χονδρόκοκκων διαβασικών και ασβεστολιθικών αδρανών υλικών μεγέθους 10-14 mm, τα οποία λήφθηκαν από τη γραμμή παραγωγής ενεργών λατομείων του νησιού, προέκυψε ότι με βάση το όριο απώλειας μάζας MS 25%, που καθοριζόταν από το τότε ισχύον Διάταγμα περί του Καθορισμού των Επιπέδων των Βασικών Απαιτήσεων Προϊόντων Δομικών Κατασκευών (Κ.Δ.Π. 253/2006), 2 διαβασικά (Δ8 και ΔΑ2) και 2 ασβεστολιθικά (Δ6 και ΔΑ4) δείγματα ήταν εκτός ορίων, ενώ 1 άλλο διαβασικό δείγμα (Δ10) ήταν οριακά εντός ορίων. Όσον αφορά τα αποτελέσματα της απορροφητικότητας (WA) στα ίδια χονδρόκοκκα υλικά, διαφάνηκε ότι το 95% των δειγμάτων που ελέγχθηκαν παρουσίαζαν αρκετά υψηλές τιμές (>2%). Μάλιστα, σε αρκετά δείγματα η απορροφητικότητα πλησίασε ή ξεπέρασε το όριο του 4%, που καθοριζόταν από την Κ.Δ.Π. 253/2006 για αδρανή τα οποία προορίζονταν για χρήση σε σκυρόδεμα ή/και κονιάματα.

Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

Πίνακας 4.1: Αποτελέσματα αποσάθρωσης (MS) και υδαταπορροφητικότητας (WA) χονδρόκοκκων αδρανών (Φούρναρη, 2009).

Δείγματα		MS (%) 10 - 14 mm	WA (%) 10 - 14 mm
Διαβάσις	Δ1	15	2.1
	Δ5	15	2.2
	Δ8	37	3.4
	Δ9	14	1.7
	Δ10	25	2.3
	Δ14	14	2.8
	Δ17	12	2.7
	Δ20	8	3.0
	Δ21	18	4.2
	ΔΑ1	16	3.7
	ΔΑ2	33	4.8
Ασβεστόλιθος	Δ2	17	3.3
	Δ3	22	3.5
	Δ4	5	3.1
	Δ6	29	5.6
	Δ7	14	4.3
	Δ18	14	3.6
	ΔΑ3	14	4.5
	ΔΑ4	73	9.0

Αναφορικά με την απορροφητικότητα των λεπτόκοκκων αδρανών ( $d/D=0/4$  mm) της Κύπρου, μια πληρέστερη εικόνα δίδεται στο Διάγραμμα 4.2. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν κατά την περίοδο 2007-2013 στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου. Από τα 59 δείγματα που παρουσιάζονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα, τα 25 είναι διαβασικής προέλευσης (1-25), τα 21 ασβεστολιθικής (26-46) και τα 13 ασβεσταρενιτικής (47-59).



Διάγραμμα 4.2: Αποτελέσματα δοκιμής απορροφητικότητας άμμων σε νερό (EN 1097-6).

Στο Διάγραμμα 4.2 παρατηρείται ότι σχεδόν το 60% των δειγμάτων παρουσιάζουν τιμές απορροφητικότητας >1.5%. Σε αρκετές περιπτώσεις μάλιστα, οι απορροφητικότητες των δειγμάτων ξεπερνούν το 3%. Παρόλα αυτά, σε γενικές γραμμές, οι απορροφητικότητες των λεπτόκοκκων αδρανών ( $d/D=0/4$  mm) που εξετάστηκαν είναι συστηματικά χαμηλότερες από τις αντίστοιχες απορροφητικότητες των χονδρόκοκκων αδρανών μεγέθους 10-14 mm (βλ. Πίνακα 4.1).

Σημειώνεται ότι τα αδρανή υλικά σε όλο σχεδόν τον κόσμο (όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.4.3.1, στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο), παρουσιάζουν σχετικά χαμηλές τιμές απορροφητικότητας, με εξαίρεση μεμονωμένες περιπτώσεις, όπως τη Χαβάη, όπου σύμφωνα με τους Brandes et al. (2011) σε χονδρόκοκκα βασαλτικά αδρανή παρατηρήθηκε απορροφητικότητα μέχρι και 8.8%. Για παράδειγμα, οι Kazi and Al-Mansour (1980) αναφέρουν ότι, σε χονδρόκοκκα πυριγενή πετρώματα, παρατήρησαν απορροφητικότητα που κυμαινόταν από 0.1% έως 1.5%. Στον Ελλαδικό χώρο, τα ποσοστά της απορροφητικότητας σε νερό των αδρανών επίσης κυμαίνονται σε χαμηλές τιμές. Ο Ρηγόπουλος (2009), που έχει μελετήσει χονδρόκοκκα (8-16 mm) πυριγενή πετρώματα, αναφέρει ότι σε υπερβασικά πετρώματα (π.χ. δουνίτης) η απορροφητικότητα σε νερό κυμαίνεται από 0.14% έως 1.02%. Εξαίρεση αποτελούν τα πιο σερπεντινωμένα υπερβασικά πετρώματα (π.χ. σερπεντινωμένοι χαρτζβουργίτες), λόγω της φυλλόμορφης δομής του σερπεντίνης. Σε αυτά τα πετρώματα, η απορροφητικότητα σε νερό φτάνει έως και το 3.17%. Όσον αφορά τα βασικά πετρώματα (π.χ. διαβάσης και διορίτης) παρατηρούνται τιμές από 0.23% μέχρι 0.70%. Από τα πιο πάνω, είναι εμφανές ότι οι τιμές

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

που παρουσιάζουν τα διαβασικά πετρώματα τα οποία έχει μελετήσει ο Ρηγόπουλος (2009) είναι κατά πολύ χαμηλότερες σε σχέση με τις τιμές των διαβασικών χονδρόκοκκων αδρανών (10-14 mm) της Κύπρου, που κυμαίνονται από 1.7% έως 4.8% (Πίνακας 4.1). Λίγο μικρότερες παρουσιάζονται οι τιμές της απορροφητικότητας όσον αφορά τα λεπτόκοκκα διαβασικά αδρανή της Κύπρου, που όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 4.2 κυμαίνονται από 1.3% έως 4%.

Εργαστηριακές δοκιμές κατά EN 1367-2:1998, με σκοπό την εκτίμηση της αποσάθρωσης με την χρήση  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , πραγματοποιήθηκαν (Φούρναρη, 2009) και σε λεπτόκοκκα διαβασικά, ασβεστολιθικά και ασβεσταρενιτικά αδρανή της Κύπρου, παρόλο που το σχετικό πρότυπο δεν το απαιτεί. Από τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών (Πίνακας 4.2), διαφάνηκε ότι ο συντελεστής αποσάθρωσης υπερέβηκε, σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις, το ανώτατο όριο απώλειας μάζας MS 35%, που καθοριζόταν από την Κ.Δ.Π. 253/2006 για αδρανή τα οποία προορίζονταν για χρήση σε σκυρόδεμα ή/και κονιάματα.

**Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα συντελεστή αποσάθρωσης (MS) λεπτόκοκκων αδρανών (Φούρναρη, 2009).**

		Δ11	Δ15	Δ16	ΔΑ1	ΔΑ2	Δ12	Δ13	Δ19	ΔΑ3	ΔΑ4
Ορυκτολογική Σύσταση		Ασβεσταρενίτης			Διαβάσης		Ασβεστόλιθος				
		MS (%)									
Μέγεθος Κόσκινου (mm)	5.0-3.35	88	46	85	44	76	37	72	35	24	35
	3.35-2.36	89	69	88	43	73	41	76	40	52	46
	2.36-1.18	91	85	85	34	71	43	72	37	48	51
	1.18-0.60	74	92	62	27	66	43	81	40	49	60
	0.60-0.30	59	93	37	25	55	43	80	40	45	62

Η ίδια δοκιμή (EN 1367-2:1998) πραγματοποιήθηκε επίσης σε άμμους που προήλθαν από λατομεία που βρίσκονται στις κατεχόμενες περιοχές της Κύπρου (Σύσκληπος και Κυθρέα), (Πίνακας 4.3). Από τα αποτελέσματα αυτά (Φούρναρη, 2009), φαίνεται ότι ο συντελεστής αποσάθρωσης των συγκεκριμένων υλικών είναι χαμηλότερος από τον αντίστοιχο συντελεστή των άμμων από τις ελεύθερες περιοχές (Πίνακας 4.2). Ωστόσο, μόνο 1 (Κυθρέα 1) από τα 3 δείγματα που εξετάστηκαν θα πληρούσε τις προδιαγραφές που καθορίζονταν από την Κ.Δ.Π. 253/2006, όσον αφορά τη δοκιμή της αποσάθρωσης, και άρα δεν θα απορριπτόταν.

#### Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

**Πίνακας 4.3: Αποτελέσματα αποσάθρωσης (MS) λεπτόκοκκων αδρανών από την οροσειρά του Πενταδακτύλου (Φούρναρη, 2009).**

Περιοχή		Σύσκληπος	Κυθρέα 1	Κυθρέα 2
Ορυκτολογική Σύσταση		Ανακρυσταλλωμένος Ασβεστόλιθος		
		MS (%)		
Μέγεθος Κόσκινου (mm)	5.0-3.35	58	26	42
	3.35-2.36	59	20	26
	2.36-1.18	49	28	24
	1.18-0.60	51	33	27
	0.60-0.30	47	26	25

Σημειώνεται ότι στην Κύπρο ο έλεγχος του συντελεστή αποσάθρωσης κατά το παρελθόν γινόταν με την χρήση  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , με βάση το πρότυπο ASTM C88, στο οποίο στηριζόταν το αντίστοιχο Κυπριακό Πρότυπο (CYS 64). Μετά τον Ιούνιο του 2004, και την πλήρη υιοθέτηση των Ευρωπαϊκών Προτύπων CYS EN 12620, CYS EN 13043, CYS EN 13139 και CYS EN 13242, ο έλεγχος του συντελεστή αποσάθρωσης γίνεται με  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , στη βάση του προτύπου EN 1367-2. Τα αποτελέσματα των δοκιμών EN 1367-2 με  $\text{MgSO}_4$  και ASTM C88 με  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , όμως, παρουσιάζουν εντελώς διαφορετική εικόνα για την ποιότητα των αδρανών υλικών (Fournari et al., 2011; Ioannou et al., 2013). Υλικά τα οποία κρίνονται με το ASTM C88 αποδεκτά, με τη μεθοδολογία του EN 1367-2 δεν ικανοποιούν τις πρόνοιες των πιο πάνω Ευρωπαϊκών Προτύπων και των εθνικών διαταγμάτων, αφού η χρήση θειικού μαγνησίου οδηγεί σε πολύ ψηλά ποσοστά απώλειας μάζας, ιδιαίτερα όσον αφορά τα λεπτόκοκκα αδρανή. Αυτό προκαλεί κατά καιρούς μεγάλη αναστάτωση στην τοπική κατασκευαστική βιομηχανία, και οδηγεί σε μη ορθολογιστική εκμετάλλευση των φυσικών πόρων και μεγάλη αύξηση στο κόστος παραγωγής των αδρανών. Επιπλέον, έχει υποχρεώσει το Υπουργείο Εσωτερικών, που είναι η αρμόδια Αρχή για την εφαρμογή της νομοθεσίας για τα δομικά προϊόντα και την εποπτεία της αγοράς, να αναστείλει προσωρινά από το 2011 την εφαρμογή της δοκιμής αποσάθρωσης κατά EN 1367-2 σε λεπτόκοκκα αδρανή (βλ. ενότητα 4.4).

Τα πιο πάνω, σε συνδυασμό με τη φτωχή ποιότητα των τοπικών αδρανών υλικών και το γεγονός ότι τα όρια που θεσπίστηκαν στα αρχικά Διατάγματα περί του Καθορισμού των Επιπέδων των Βασικών Απαιτήσεων Προϊόντων Δομικών Κατασκευών δεν βασίζονταν σε εργαστηριακά δεδομένα, αλλά σε εμπειρικές τιμές, οδήγησαν στην χρηματοδότηση έρευνας, όπως αναφέρθηκε και στην Εισαγωγή, από το Υπουργείο Εσωτερικών, μέσω του Κυπριακού Οργανισμού Τυποποίησης και της αντίστοιχης Εθνικής Επιτροπής για τα

Κεφάλαιο 4: Γεωλογία και Αδρανή Υλικά της Κύπρου

Αμμοχάλικα (CYS/TC 02), με σκοπό τον επανέλεγχο ή/και επανακαθορισμό των ορίων των εργαστηριακών ελέγχων που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011, και τον καθορισμό εναλλακτικών μεθόδων ελέγχου της υγείας λεπτόκοκκων αδρανών. Η έρευνα αυτή εκπονήθηκε στα πλαίσια της παρούσης διατριβής και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στα κεφάλαια που ακολουθούν.

ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ

## **5 Υλικά διατριβής – Μεθοδολογία δοκιμών**

### **5.1 Γενικά**

Η πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών για τον καθορισμό των ιδιοτήτων των πρώτων υλών, ιδιαίτερα των αδρανών υλικών, και των σύνθετων δομικών υλικών (κονιαμάτων/σκυροδεμάτων), έχει ως στόχο τον προσδιορισμό της καταλληλότητας τους για χρήση σε διάφορα κατασκευαστικά έργα. Πέρα από τις διάφορες δοκιμές για τον καθορισμό των φυσικομηχανικών χαρακτηριστικών των πιο πάνω πρώτων υλών και υλικών, στο εργαστήριο μπορεί να γίνει επίσης προσομοίωση των περιβαλλοντικών συνθηκών στις οποίες εκτίθενται τα υλικά κατά τη διάρκεια της χρήσης τους σε βάθος χρόνου.

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα αδρανή υλικά που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για την παρασκευή σκυροδεμάτων και κονιαμάτων. Ακολούθως, περιγράφονται οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν τόσο σε αδρανή υλικά, όσο και σε σκυροδέματα/κονιάματα που σχεδιάστηκαν και παρασκευαστήκαν στο εργαστήριο. Να σημειωθεί ότι όλες οι εργαστηριακές δοκιμές, πλην της παρασκευής στιλπνών τομών, πραγματοποιήθηκαν στα Εργαστήρια Δομικών Υλικών και "ΛΗΔΡΑ" του Πανεπιστημίου Κύπρου.

### **5.2 Υλικά διατριβής**

Για τη διεκπεραίωση της παρούσης διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν φυσικής προέλευσης θραυστά αδρανή υλικά. Πρόκειται για πυριγενή και ιζηματογενή λεπτόκοκκα αδρανή ( $d/D=0/4$  mm), κανονικού ειδικού βάρους, τα οποία, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 4, προήλθαν από τον Οφιόλιθο και την Ιζηματογενή Ακολουθία του Τροόδους. Πιο συγκεκριμένα, παραλήφθηκαν στο εργαστήριο αδρανή υλικά σε δύο φάσεις, από τη γραμμή παραγωγής ενεργών λατομείων/σκυροθραυστικών μονάδων. Η δειγματοληψία των υλικών έγινε από το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, το οποίο είναι υπεύθυνο για την επιτήρηση της αγοράς και τη διασφάλιση της απαιτούμενης ποιότητας των αμμοχαλίκων που χρησιμοποιούνται στην Κύπρο.

Κατά την 1<sup>η</sup> φάση δειγματοληψίας, μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου δεκαεπτά (17) συσκευασίες λεπτόκοκκων αδρανών υλικών, προκειμένου να υποβληθούν σε δοκιμή αποσάθρωσης με βάση τη διαδικασία που

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

περιγράφεται στο πρότυπο EN 1367-2 (Annex C), και σε δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο EN 1097-6.

Παρά το γεγονός ότι το πρότυπο CYS EN 1367-2 παραπέμπει σε χρήση διαλύματος επταένυδρου θεικού μαγνησίου, εντούτοις κρίθηκε αναγκαίο στα περισσότερα δείγματα να πραγματοποιηθεί η δοκιμή και με τη χρήση διαλύματος άνυδρου θεικού νατρίου, προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του συντελεστή αποσάθρωσης μεταξύ των δύο διαλυμάτων.

Από τις δεκαεπτά (17) συσκευασίες λεπτόκοκκων αδρανών που παραλήφθηκαν αρχικά, οι δέκα (10) ήταν διαβασικής σύστασης, οι τέσσερις (4) ασβεστολιθικής σύστασης και οι τρεις (3) ασβεσταρενιτικής σύστασης. Στον πιο κάτω πίνακα (Πίνακας 5.1) φαίνονται οι κωδικοί των δειγμάτων που εξετάστηκαν.

**Πίνακας 5.1: Κωδικοί - λιθότυπος αδρανών υλικών που εξετάστηκαν κατά την 1<sup>η</sup> φάση.**

Κωδικός Δείγματος	Λιθότυπος
Δ1	Ασβεστόλιθος
Δ2	Ασβεσταρενίτης
Δ3	Ασβεσταρενίτης
Δ4	Ασβεστόλιθος
Δ5	Διαβάσης
Δ6	Διαβάσης
Δ7	Διαβάσης
Δ8	Διαβάσης
Δ9	Διαβάσης
Δ10	Διαβάσης
Δ11	Διαβάσης
Δ12	Ασβεσταρενίτης
Δ13	Ασβεστόλιθος
Δ14	Διαβάσης
Δ15	Διαβάσης
Δ16	Διαβάσης
Δ17	Ασβεστόλιθος

Κατά τη 2<sup>η</sup> φάση δειγματοληψίας, μεταφέρθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου άλλες τριανταμία (31) συσκευασίες λεπτόκοκκων αδρανών υλικών. Από αυτά τα δείγματα, τα δεκατρία (13) ήταν διαβασικής σύστασης, τα δώδεκα



### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

(12) ασβεστολιθικής σύστασης και τα έξι (6) ασβεσταρενιτικής σύστασης. Στον πιο κάτω πίνακα (Πίνακας 5.2) φαίνονται οι κωδικοί των δειγμάτων που εξετάστηκαν.

Αυτά τα δείγματα αδρανών εξετάστηκαν αρχικά με βάση τις δοκιμές που περιγράφονται στην ενότητα 5.3, και στη συνέχεια επιλέχθηκαν ορισμένα για να παρασκευαστούν εργαστηριακά σκυροδέματα και κονιάματα, με σκοπό να μελετηθεί η επίδραση των ιδιοτήτων των αδρανών υλικών στην ποιότητα του τελικού προϊόντος. Οι κωδικοί των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή σκυροδεμάτων και κονιαμάτων επίσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2. Συνολικά, επιλέχθηκαν 8 διαβασικά και 6 ασβεστολιθικά δείγματα αδρανών υλικών, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των σκυροδεμάτων με κωδικούς C1-C14. Τα ίδια δείγματα, με την προσθήκη των ασβεσταρενιτικών αδρανών ΕΠ2 και ΕΠ32, χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των κονιαμάτων CM1-CM16.

Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

Πίνακας 5.2: Κωδικοί - λιθότυπος αδρανών υλικών που εξετάστηκαν κατά τη 2<sup>η</sup> φάση και κωδικοί σκυροδεμάτων και κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με επιλεγμένα δείγματα.

Κωδικός Δείγματος	Λιθότυπος	Κωδικός Σκυροδέματος	Κωδικός Κονιάματος
ΕΠ1	Διαβάσης	---	---
ΕΠ2	Ασβεσταρενίτης	---	CM6
ΕΠ3	Διαβάσης	---	---
ΕΠ4	Ασβεστόλιθος	C5	CM5
ΕΠ5	Ασβεστόλιθος	C11	CM12
ΕΠ6	Ασβεσταρενίτης	---	---
ΕΠ7	Διαβάσης	C6	CM7
ΕΠ8	Ασβεστόλιθος	---	---
ΕΠ9	Ασβεσταρενίτης	---	---
ΕΠ10	Ασβεστόλιθος	---	---
ΕΠ11	Διαβάσης	---	---
ΕΠ12	Διαβάσης	C2	CM2
ΕΠ13	Διαβάσης	C3	CM3
ΕΠ14	Ασβεστόλιθος	C4	CM4
ΕΠ15	Ασβεστόλιθος	---	---
ΕΠ23	Διαβάσης	C7	CM8
ΕΠ24	Ασβεσταρενίτης	---	---
ΕΠ25	Ασβεστόλιθος	---	---
ΕΠ26	Ασβεστόλιθος	C12	CM13
ΕΠ27	Διαβάσης	C8	CM9
ΕΠ28	Διαβάσης	C9	CM10
ΕΠ29	Ασβεστόλιθος	---	---
ΕΠ30	Διαβάσης	---	---
ΕΠ31	Ασβεσταρενίτης	---	---
ΕΠ32	Ασβεσταρενίτης	---	CM16
ΕΠ33	Ασβεστόλιθος		
ΕΠ34	Ασβεστόλιθος	C13	CM14
ΕΠ35	Ασβεστόλιθος	C14	CM15
ΕΠ36	Διαβάσης	---	---
ΕΠ37	Διαβάσης	C10	CM11
ΕΠ38	Διαβάσης	C1	CM1

Όλα τα λεπτόκοκκα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στις σκυροδετήσεις επιλέχθηκαν με βάση την απόδοσή τους στις δοκιμές που περιγράφονται στην πιο κάτω ενότητα. Τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών αδρανών υλικών παρατίθενται στον Πίνακα 6.2 του 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

### 5.3 Δοκιμές αδρανών υλικών

Ανάλογα με τη χρήση τους, τα αδρανή υλικά διέπονται από τα ακόλουθα πρότυπα:

- **CYS EN 12620:** Αδρανή για σκυρόδεμα.

Στο πρότυπο αυτό καθορίζονται οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα αδρανή υλικά (και η παιπάλη) που προέρχονται από την επεξεργασία φυσικών, τεχνητών ή ανακυκλωμένων υλικών, καθώς και από την ανάμειξη των υλικών αυτών, για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην παρασκευή σκυροδέματος. Το πρότυπο CYS EN 12620 αναφέρεται σε αδρανή των οποίων η ξηρή πυκνότητα είναι μεγαλύτερη από 2.00 Mg/m<sup>3</sup> για όλα τα είδη σκυροδέματος.

- **CYS EN 13043:** Αδρανή ασφαλτομιγμάτων και επιφανειακών επιστρώσεων, οδών, αεροδρομίων και άλλων περιοχών κυκλοφορίας οχημάτων.

Το πρότυπο αυτό αφορά τα αδρανή υλικά (και την παιπάλη) που προέρχονται από την επεξεργασία φυσικών, τεχνητών ή ανακυκλωμένων υλικών και προορίζονται για χρήση στην παραγωγή ασφαλτομιγμάτων και επιφανειακών επιστρώσεων για δρόμους, αεροδρόμια και άλλες περιοχές κυκλοφορίας οχημάτων. Το πρότυπο δεν καλύπτει την χρήση ανακτώμενων και ανακυκλωμένων αδρανών από ασφαλτομίγματα.

- **CYS EN 13139:** Αδρανή κονιαμάτων.

Στο συγκεκριμένο πρότυπο καθορίζονται οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα αδρανή (και η παιπάλη) που προέρχονται από φυσικά, τεχνητά ή ανακυκλωμένα υλικά, καθώς και από την ανάμειξη των υλικών αυτών, για χρήση στην παραγωγή των πιο κάτω κονιαμάτων:

α. τοιχοποιίας (*masonry mortar*),

β. δαπέδου/υποδαπέδου (*floor/screed mortar*),

γ. τελικής επίχρισης της επιφάνειας εσωτερικής τοιχοποιίας (*surfacing of internal walls*),

δ. επιχρίσματος εξωτερικής τοιχοποιίας (*rendering of external walls*),

ε. ειδικών υλικών βάσης (*special bedding materials*),

στ. επισκευής (*repair mortar*),

ζ. αυξημένης ρευστότητας (*grouts*) για οικοδομές, έργα οδοποιίας και άλλα τεχνικά έργα.

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

- **CYS EN 13242:** Αδρανή υλικών σταθεροποιημένων με υδραυλικές κονίες ή μη σταθεροποιημένων για χρήση σε τεχνικά έργα και οδοποιία.

Στο πρότυπο αυτό καθορίζονται οι ιδιότητες που πρέπει να έχουν τα αδρανή που προέρχονται από την επεξεργασία φυσικών, τεχνητών ή ανακυκλωμένων υλικών για χρήση στην παρασκευή σταθεροποιημένων με υδραυλικές κονίες ή μη σταθεροποιημένων υλικών, καθώς και σε τεχνικά έργα και οδοποιία (θεμέλιο, υποθεμέλιο, επιχώσεις, επιχωματώσεις) (Παντελή et al., 2009).

Σύμφωνα με τα τέσσερα πιο πάνω πρότυπα, οι διάφορες δοκιμές που πραγματοποιούνται στα αδρανή υλικά αποσκοπούν στον προσδιορισμό των γεωμετρικών, φυσικών και χημικών τους χαρακτηριστικών (βλ. επίσης Κεφάλαιο 2). Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζεται το σύνολο των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα υπό μελέτη αδρανή υλικά στα πλαίσια της παρούσης διατριβής. Σημειώνεται ότι πραγματοποιήθηκαν επίσης δύο δοκιμές με βάση τα Αμερικάνικα πρότυπα, εκ των οποίων η ASTM D7428 διερευνάται για πρώτη φορά σε τοπικό επίπεδο.

Πίνακας 5.3: Εργαστηριακές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα υπό μελέτη αδρανή υλικά.

Ιδιότητες Αδρανών Υλικών	Δοκιμή	Πρότυπο	Βασική Αρχή
Γενικές Ιδιότητες	Διαχωρισμός	EN 932-2 Test for the general properties of aggregates – Part 2: Methods for reducing laboratory samples.	Ελάττωση του δείγματος στην αναγκαία ποσότητα που προνοείται για κάθε δοκιμή.
Γεωμετρικές Ιδιότητες	Κοκκομετρική Διαβάθμιση	EN 933-1 Tests for the geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution – Sieving method	Διαχωρισμός και κατανομή των διαστάσεων των κόκκων των αδρανών σε ομάδες με βάση το μέγεθός τους.
	Ισοδύναμο Άμμου	EN 933-8 Tests for the geometrical properties of aggregates – Part 8: Assessment of fines – Sand Equivalent test.	Προσδιορισμός της παρουσίας λεπτόκοκκης (<63 μm), αργιλώδους σκόνης στα αδρανή υλικά.
	Μπλε του Μεθυλενίου	EN 933-9 Tests for the geometrical properties of aggregates – Part 9: Assessment of fines – Methylene blue test.	Εξακρίβωση της δραστηριότητας των αργλικών ορυκτών.
Φυσικές Ιδιότητες	Φαινόμενη Πυκνότητα και Απορροφητικότητα σε νερό	EN 1097-6 Tests for the mechanical and physical properties of aggregates – Part 6: Determination of particle density and water absorption.	Καθορισμός της πυκνότητας των κόκκων των αδρανών καθώς και της ποσότητας του νερού που μπορεί να απορροφηθεί από τα αδρανή.
Φυσικοχημικές Ιδιότητες	Αποσάθρωση με Θεϊκό Μαγνήσιο	EN 1367-2 Tests for thermal and weathering properties of aggregates. Magnesium sulfate test.	Καθορισμός της ανθεκτικότητας των αδρανών μετά την έκθεσή τους σε κρυστάλλωση αλάτων. Η δοκιμή πραγματοποιείται με θεϊκό μαγνήσιο.
	Αποσάθρωση με Θεϊκό Νάτριο	ASTM C88 Standard test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate.	Καθορισμός της ανθεκτικότητας των αδρανών μετά την έκθεσή τους σε κρυστάλλωση αλάτων. Δίνεται η δυνατότητα επιλογής μεταξύ θεϊκού νατρίου ή θεϊκού μαγνησίου.
Μηχανικές Ιδιότητες	Micro-Deval	ASTM D7428 Standard test method for resistance of fine aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus.	Καθορισμός της φθοράς που επέρχεται στα διαβαθμισμένα λεπτόκοκκα αδρανή υπό την επίδραση δυνάμεων τριβής και κρούσης.

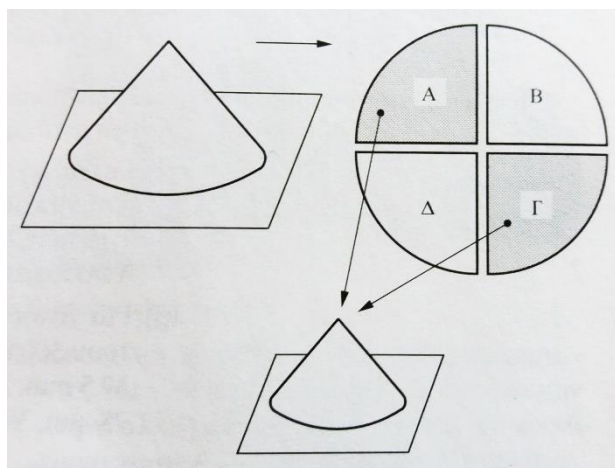
### 5.3.1 Γενικές ιδιότητες

#### 5.3.1.1 Δειγματοληψία-Διαχωρισμός

Κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή ούτως ώστε να λαμβάνεται το πλέον αντιπροσωπευτικό δείγμα υλικού για την πραγματοποίηση των διαφόρων εργαστηριακών δοκιμών. Η δειγματοληψία των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής πραγματοποιήθηκε από τεχνικούς του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης Κύπρου, στα πλαίσια της επιτήρησης της τοπικής αγοράς. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι σύμφωνη με τις πρόνοιες του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 932-1. Στο συγκεκριμένο Ευρωπαϊκό Πρότυπο, καθορίζονται οι μέθοδοι για τη σωστή δειγματοληψία των αδρανών υλικών, με στόχο να ληφθεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα στο οποίο να αντικατοπτρίζονται οι ιδιότητες της συνολικής παρτίδας.

Μετά και τις δύο φάσεις δειγματοληψίας, τα δείγματα παραδόθηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2, κατά την 1<sup>η</sup> φάση δειγματοληψίας προσκομίστηκαν 17 διαφορετικά δείγματα λεπτόκοκκων αδρανών υλικών (0-4 mm), ενώ κατά τη 2<sup>η</sup> φάση συνολικά 30 διαφορετικά δείγματα λεπτόκοκκων αδρανών υλικών (0-4 mm). Πέραν των 30 δειγμάτων, κατά τη 2<sup>η</sup> φάση δειγματοληψίας προσκομίστηκε στο εργαστήριο και ένα επιπλέον δείγμα αναφοράς αδρανών “κακής” ποιότητας (βλ. Πίνακα 6.2, ΕΠ38) για τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δείγματος). Για το κάθε δείγμα, προσκομίστηκαν 6 συσκευασίες των 20-25 kg.

Στη συνέχεια, προκειμένου να εξασφαλιστεί ότι η απαιτούμενη ποσότητα για την εκτέλεση της κάθε δοκιμής θα ήταν αντιπροσωπευτική της συνολικής ποσότητας, πραγματοποιήθηκε διαχωρισμός της συνολικής ποσότητας (~150 kg) για το κάθε υλικό, σύμφωνα με τις πρόνοιες του EN 932-2. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε ήταν αυτή του τετραμερισμού (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1: Τετραμερισμός δείγματος (Οικονομίδης, 1994).

### 5.3.2 Γεωμετρικές ιδιότητες

#### 5.3.2.1 Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η σωστή διαβάθμιση των κόκκων των αδρανών έχει μεγάλη σημασία όσον αφορά τις ιδιότητες που θα έχει το τελικό προϊόν (σκυρόδεμα ή/και κονίαμα), αφού σχετίζεται με την καλύτερη δυνατή πλήρωση των κενών στο δείγμα. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 933-1, κοκκομετρική διαβάθμιση είναι η διαδικασία διαχωρισμού και κατάταξης των κόκκων των αδρανών σε ομάδες με βάση το μέγεθός τους.

Βασική προϋπόθεση για την ορθή εκτέλεση της δοκιμής της κοκκομετρικής διαβάθμισης είναι η λήψη αντιπροσωπευτικής ποσότητας υλικού, η οποία είναι συνάρτηση της μέγιστης ονομαστικής διάστασης του κόκκου του αδρανούς (βλ. Πίνακα 5.4). Η μείωση του αρχικού δείγματος στην απαιτούμενη ποσότητα γίνεται κατά EN 932-2, με την χρήση συσκευών διαχωρισμού δειγμάτων (riffle boxes) (Εικόνα 5.2). Τα δοχεία αυτά διαχωρίζουν το δείγμα σε δύο ομοιόμορφες ίσες ποσότητες.



Εικόνα 5.2: Συσκευή (riffle box) και διαδικασία διαχωρισμού δειγμάτων.

Πίνακας 5.4: Ελάχιστη ποσότητα δείγματος για δοκιμή κοκκομετρικής διαβάθμισης, ανάλογα με το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος του κόκκου του αδρανούς.

Ονομαστικό μέγιστο μέγεθος κόκκου (mm)	Ελάχιστη ποσότητα δείγματος αδρανών (kg)
90	80
32	10
16	2.6
8	0.6
≤4	0.2

Στην παρούσα διατριβή, επειδή όλα τα υπό εξέταση δείγματα ήταν λεπτόκοκκα (0-4 mm), η ποσότητα δείγματος που λήφθηκε για την κάθε δοκιμή κοκκομετρικής διαβάθμισης ήταν >200 g. Αυτή η ποσότητα τοποθετήθηκε σε φούρνο στους  $110 \pm 5$  °C μέχρι να σταθεροποιηθεί η μάζα της. Στη συνέχεια, αφέθηκε να ανακτήσει θερμοκρασία δωματίου και ζυγίστηκε ( $M_1$ ). Ακολούθως, το δείγμα τοποθετήθηκε σε κόσκινο με μέγεθος οπής 0.063 mm και πλύθηκε με νερό προκειμένου να απομακρυνθεί η παιπάλη. Το υλικό που παρέμεινε στο κόσκινο ξηράθηκε στο φούρνο στους  $110 \pm 5$  °C και ζυγίστηκε ( $M_2$ ). Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε σε σειρά πρότυπων κοσκίνων με βάση το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 933-1 (βλ. Πίνακα 5.5).



Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

Πίνακας 5.5: Μέγεθος οπών κόσκινων για δοκιμή κοκκομετρικής διαβάθμισης. Στις δοκιμές της παρούσας διατριβής χρησιμοποιήθηκαν κόσκινα με οπή  $\leq 8$  mm.

Σειρά πρότυπων κόσκινων κατά EN 933-1
63.0 mm
31.5 mm
16.0 mm
8.0 mm
4.0 mm
2.0 mm
1.0 mm
0.500 mm
0.250 mm
0.125 mm
0.063 mm



Εικόνα 5.3: Πρότυπα κόσκινα τοποθετημένα στη συσκευή κοσκίνιματος.

Το κοσκίνισμα έγινε με ειδική συσκευή (Εικόνα 5.3). Μετά την ολοκλήρωσή του, το υλικό που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο ζυγίστηκε ( $R_i$ ) και υπολογίστηκε το ποσοστό (%) του συγκρατούμενου υλικού ανά κόσκινο με την πιο κάτω σχέση (5.1)

$$\frac{R_i}{M_1} \times 100 \quad (5.1)$$

όπου:

$R_i$  = η μάζα του συγκρατούμενο υλικού στο κόσκινο για το οποίο γίνεται ο υπολογισμός (kg),

$M_1$  = η ολική μάζα του ξηρού δείγματος (kg).

Με βάση τα παραπάνω προσδιορίστηκαν τα αθροιστικά ποσοστά (%) διερχομένων από κάθε πρότυπο κόσκινο, χρησιμοποιώντας τη σχέση (5.2), και σχεδιάστηκε η κοκκομετρική καμπύλη για το κάθε δείγμα (Εικόνα 5.4):

$$100 - \sum \left( \frac{R_i}{M_1} \times 100 \right) \quad (5.2)$$

Υπολογίστηκε επίσης το ποσοστό των λεπτών,  $f$  (%), που διέρχεται από το κόσκινο των 0.063 mm, με την πιο κάτω σχέση (5.3):

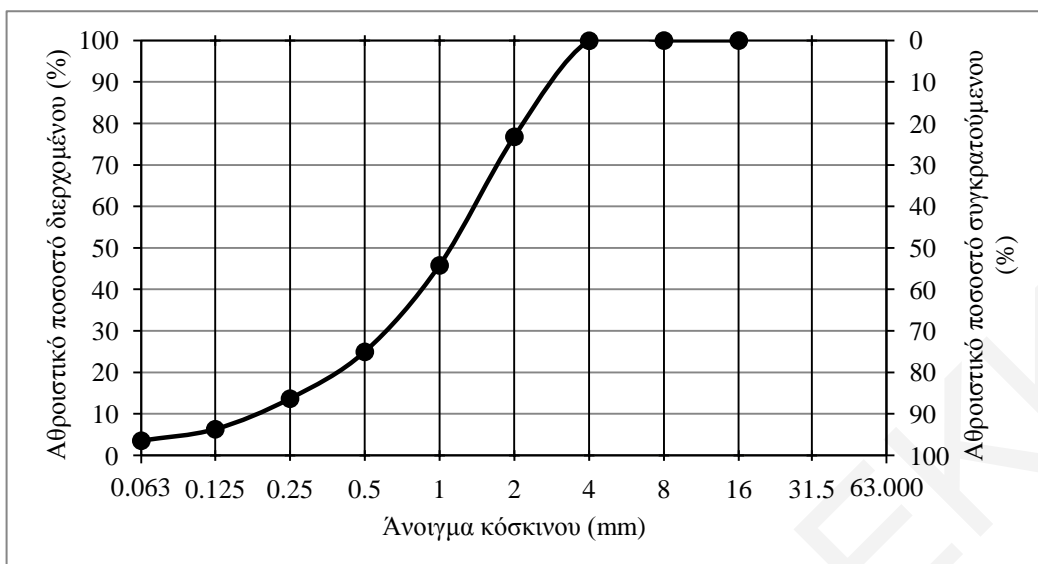
$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \times 100 \quad (5.3)$$

όπου:

$M_1$  = η ολική μάζα του ξηρού δείγματος (kg),

$M_2$  = ξηρή μάζα του δείγματος μετά από τη διαδικασία πλυσίματος (kg),

$P$  = η μάζα της παιπάλης που συλλέχθηκε στο τυφλό κόσκινο (kg).



Εικόνα 5.4: Κοκκομετρική καμπύλη ασβεστολιθικού λεπτόκοκκου αδρανούς υλικού.

### 5.3.2.2 Ισοδύναμο άμμου

Η δοκιμή ισοδύναμου άμμου, όπως αναφέρεται στο Συνοπτικό Οδηγό Χρήσης Κυπριακών Προτύπων CYS EN (Παντελή et al., 2009), διεξάγεται με σκοπό το γρήγορο καθορισμό της αναλογίας της λεπτόκοκκης αργιλώδους σκόνης στα υλικά που προορίζονται για χρήση στην παρασκευή σκυροδέματος/κονιάματος/ασφαλτομίγματος ή στρώσεων οδοστρωσίας. Χαμηλό ποσοστό ισοδύναμου άμμου χαρακτηρίζει τα αδρανή ως «μη καθαρά» και είναι ένδειξη για πιθανή ύπαρξη επιβλαβούς ποσότητας λεπτών αργιλικών κόκκων (Νικολαΐδης et al., 2005).

Για την εκτέλεση της δοκιμής ισοδύναμου άμμου, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 933-8. Το προς εξέταση υλικό διαχωρίστηκε αρχικά κατά το πρότυπο EN 932-2 και λήφθηκαν δύο δείγματα ποσότητας 120 g το καθένα. Αυτά τοποθετήθηκαν σε ογκομετρικούς σωλήνες, οι οποίοι περιείχαν ειδικό υδατικό διάλυμα μέχρι περίπου το ύψος των 100 mm. Το ειδικό αυτό υδατικό διάλυμα περιείχε άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), γλυκερίνη και φορμαλδεΰδη. Ο λόγος που προστέθηκε στο διάλυμα το χλωριούχο ασβέστιο και η γλυκερίνη ήταν για να επιταχύνουν την καθίζηση των κόκκων της αργίλου, ενώ η προσθήκη φορμαλδεΰδης έγινε για λόγους αποστείρωσης του διαλύματος (Σπυρόπουλος, 2005). Οι ογκομετρικοί σωλήνες με το δείγμα και το διάλυμα αφέθηκαν σε ηρεμία για 10 λεπτά (Εικόνα 5.5). Με το πέρας του χρονικού αυτού διαστήματος, το περιεχόμενο του σωλήνα αναταράχθηκε με παλινδρομικές κινήσεις για  $30 \pm 1$  sec. Κατόπιν, προστέθηκε επιπλέον ποσότητα

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

διαλύματος από σωλήνα με σύστημα άρδευσης, μέχρι τη στάθμη των 380 mm. Το διάλυμα με τα αδρανή αφέθηκε σε ηρεμία για 20 min και κατόπιν μετρήθηκε το ύψος της αργίλου ( $h_1$ ). Τέλος, εισήχθη ειδικό πιεστικό στέλεχος μέχρι να ακουμπήσει το αμμώδες υλικό και μετρήθηκε το ύψος της άμμου ( $h_2$ ). Η τιμή του ισοδύναμου άμμου, SE (%), για κάθε δείγμα υπολογίστηκε από την πιο κάτω σχέση (5.4):

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \quad (5.4)$$

όπου:

$h_1$  = ύψος αργίλου (mm),

$h_2$  = ύψος άμμου (mm).

Λήφθηκε υπόψη ο μέσος όρος δύο δειγμάτων, των οποίων η διαφορά δεν υπερέβαινε το 4%.



**Εικόνα 5.5: Πειραματική διάταξη για προσδιορισμό του συντελεστή ισοδύναμου άμμου.**

Σημειώνεται ότι από τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου δεν είναι δυνατόν να διακριθούν τα “ενεργά” αργιλικά, τα οποία προκαλούν διόγκωση (Ρηγόπουλος, 2009). Για την εξακρίβωση των ενεργών αργιλικών ορυκτών πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος του μπλε του μεθυλενίου (βλ. ενότητα 5.3.2.3).

5.3.2.3 *Μπλε του μεθυλενίου*

Το μπλε του μεθυλενίου είναι μια κατιονική χρωστική, που όταν αναμιγνύεται με αργιλικά ορυκτά απορροφάται ταχύτατα από τις επιφάνειες των ορυκτών αυτών (Bujdák et al., 2001). Για το λόγο αυτό, η χρωστική αυτή χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση της παρουσίας αργιλικών ορυκτών στα αδρανή. Η δοκιμή βασίζεται, δηλαδή, στην αρχή της προσρόφησης επί της ενεργής επιφάνειας των αργιλικών ορυκτών των μορίων του μπλε του μεθυλενίου, και ουσιαστικά μέσω αυτής υπολογίζεται η ποσότητα μπλε του μεθυλενίου που χρειάζεται για τη μοριακή επικάλυψη όλων των αργιλικών συστατικών των αδρανών (Νικολαΐδης et al., 2005).

Στην παρούσα διατριβή, η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 933-9. Αρχικά το υπό μελέτη δείγμα κοσκινίστηκε χρησιμοποιώντας κόσκινο μεγέθους οπής 2 mm και εν συνεχεία, με τη βοήθεια διαχωριστήρων (βλ. Εικόνα 5.2) λήφθηκαν 200 g υλικού ( $M_1$ ). Το δείγμα προστέθηκε σε 500 + 5 ml αποσταγμένου νερού και το διάλυμα αναδεύτηκε για 5 min. Μετά το πέρας της ανάδευσης, τιτλοδοτήθηκε στο διάλυμα μία δόση 5 ml χρωστικής ουσίας (μπλε του μεθυλενίου). Εκτελέστηκε νέα ανάδευση για τουλάχιστον 1 min και στη συνέχεια μεταφέρθηκε με τον αναδευτήρα μια σταγόνα σε διηθητικό χαρτί (δοκιμή «κηλίδας»).

Σύμφωνα με το πρότυπο, η δοκιμή θεωρείται θετική όταν σχηματιστεί, περιφερειακά της κηλίδας, μία στεφάνη από ένα συνεχή δακτύλιο χρώματος ανοιχτού μπλε, πάχους περίπου 1 mm. Εάν δεν εμφανιστεί η στεφάνη, προστίθενται επιπλέον 5 ml χρωστικού διαλύματος, πραγματοποιείται ανάδευση για 1 min και εκτελείται μία δεύτερη δοκιμή «κηλίδας» (Εικόνα 5.6). Η στεφάνη πρέπει να παραμείνει για 5 min, ώστε να θεωρηθεί ότι η δοκιμή περατώθηκε.

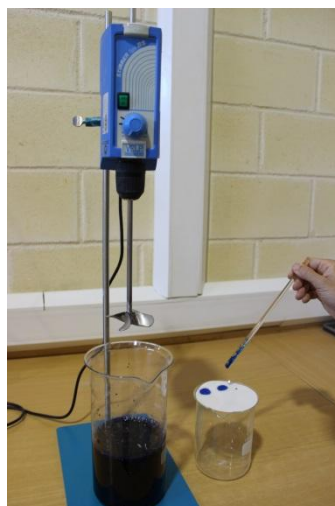
Μετά το πέρας της δοκιμής, καταγράφηκε ο συνολικός όγκος (με ακρίβεια  $\pm 1$  ml) χρωστικού διαλύματος ( $V_1$ ) που προστέθηκε για να παραχθεί η στεφάνη. Η τιμή του μπλε του μεθυλενίου, MB (g/kg), υπολογίστηκε από την πιο κάτω σχέση (5.5):

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (5.5)$$

όπου

$V_1$  = ο συνολικός όγκος χρωστικού διαλύματος (ml),

$M_1$  = η μάζα του δείγματος (g).



Εικόνα 5.6: Πειραματική διάταξη για προσδιορισμό του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου.

### 5.3.3 Φυσικές ιδιότητες

#### 5.3.3.1 Φαινόμενη πυκνότητα και απορροφητικότητα σε νερό

Ο έλεγχος αυτός αφορά τον καθορισμό της πυκνότητας των κόκκων των αδρανών, καθώς επίσης και της ποσότητας του νερού που μπορεί να απορροφηθεί από τα αδρανή σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (24 ώρες) χωρίς εξωτερική πίεση. Η απορροφητικότητα είναι μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει άμεσα το σχεδιασμό μιγμάτων κονιαμάτων και σκυροδέματος, καθώς και την απαιτούμενη ποσότητα ασφάλτου στα ασφαλτομίγματα (Παντελή et al., 2009).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή για την εκτέλεση της δοκιμής της φαινόμενης πυκνότητας και απορροφητικότητας σε λεπτόκοκκα αδρανή ήταν σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 1097-6. Αρχικά, διαχωρίστηκε το προς εξέταση υλικό σύμφωνα με το EN 932-2, ώστε να προκύψει τελική μάζα άμμου >1 kg, και στη συνέχεια το δείγμα κοσκινίστηκε χρησιμοποιώντας τα κόσκινα 4 mm και 0.063 mm. Το υλικό που προέκυψε μεταξύ των δύο προαναφερόμενων κλασμάτων πλύθηκε και τοποθετήθηκε μέσα σε πυκνόμετρο. Στη συνέχεια, το πυκνόμετρο τοποθετήθηκε σε δοχείο με νερό σε θερμοκρασία  $22 \pm 3$  °C για  $24 \pm 0.5$  ώρες. Με το τέλος της περιόδου αυτής, το πυκνόμετρο πληρώθηκε με νερό και ζυγίστηκε ( $M_2$ ). Στη συνέχεια, το δείγμα αφαιρέθηκε από το πυκνόμετρο, απλώθηκε σε μια ομοιόμορφη στρώση σε ένα δίσκο και εκτέθηκε σε ήπιο ρεύμα αέρα, ώστε να εξατμιστεί η επιφανειακή υγρασία. Για να εκτιμηθεί κατά πόσο επιτεύχθηκε η κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή (SSD) κατάσταση, χρησιμοποιήθηκε ο

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

μεταλλικός κώνος και το ειδικό γουδοχέρι (Εικόνα 5.7). Με την επίτευξη της κορεσμένης και επιφανειακά ξηρής κατάστασης, το δείγμα ζυγίστηκε ( $M_1$ ) και ακολούθως ξηράθηκε σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C, μέχρι να φτάσει σε σταθερή μάζα ( $M_4$ ). Στη συνέχεια, πληρώθηκε το πυκνόμετρο που είχε χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή με νερό και ζυγίστηκε ( $M_3$ ). Με βάση τις πιο πάνω μάζες, υπολογίστηκαν (i) η απορροφητικότητα σε νερό,  $WA_{24}$  (%) (Σχέση (5.6)), (ii) η φαινόμενη πυκνότητα,  $\rho_a$  ( $Mg/m^3$ ) (Σχέση (5.7)), (iii) η ξηρή πυκνότητα,  $\rho_{rd}$  ( $Mg/m^3$ ) (Σχέση (5.8)) και (iv) η κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή πυκνότητα,  $\rho_{ssd}$  ( $Mg/m^3$ ) (Σχέση (5.9)):

$$WA_{24} = \frac{(M_1 - M_4)}{M_4} \times 100 \quad (5.6)$$

$$\rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)} \quad (5.7)$$

$$\rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.8)$$

$$\rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)} \quad (5.9)$$

όπου:

$M_1$  = η μάζα του δείγματος σε κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή κατάσταση (g),

$M_2$  = η μάζα του πυκνόμετρου που περιείχε το κορεσμένο δείγμα και νερό (g),

$M_3$  = η μάζα του πυκνόμετρου που περιείχε μόνο νερό (g),

$M_4$  = η μάζα του ξηρού δείγματος (g),

$\rho_w$  = η πυκνότητα του νερού ( $Mg/m^3$ ) στη θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε το πείραμα.



**Εικόνα 5.7:** Προσδιορισμός κατάστασης επιφανειακής ξήρανσης (SSD) δείγματος άμμου με τη χρήση ειδικού κώνου.

#### 5.3.4 Ιδιότητες αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές

Η καταλληλότητα/ανθεκτικότητα των αδρανών μπορεί να ελεγχθεί με τη δοκιμή αποσάθρωσης (soundness), η οποία διενεργείται με την χρήση θεικού μαγνησίου ( $MgSO_4$ ) στην Ευρώπη ή/και θεικού νατρίου ( $Na_2SO_4$ ) στις Η.Π.Α. Οι έλεγχοι αποσάθρωσης ουσιαστικά εκτιμούν την υγεία των αδρανών και την αντίστασή τους στις περιβαλλοντικές συνθήκες, σε περιβάλλον αλάτων. Στο πρότυπο ASTM C88 αναφέρεται ότι "η μέθοδος αφορά εργαστηριακές δοκιμές σε αδρανή με σκοπό να καθοριστεί η υγεία τους, όταν αυτά υποστούν αποσάθρωση μέσα στο σκυρόδεμα ή σε άλλες εφαρμογές".

Για τον προσδιορισμό της αντοχής των αδρανών στην αποσάθρωση, στην παρούσα διατριβή υιοθετήθηκαν δύο διεθνή πρότυπα: το Αμερικάνικο ASTM C88 (με την χρήση θεικού νατρίου) και το Ευρωπαϊκό EN 1367-2 (με την χρήση θεικού μαγνησίου). Και οι δύο δοκιμές βασίζονται στην ίδια φιλοσοφία, δηλαδή της προσομοίωσης της μεταβολής της μικροδομής των αδρανών που γίνεται με την κρυστάλλωση αλάτων, είτε  $MgSO_4$  ή  $Na_2SO_4$ , στους πόρους τους, κατά τη φάση ξήρανσης των κορεσμένων αδρανών (Ioannou et al., 2013).

##### 5.3.4.1 Αποσάθρωση με Θεικό Μαγνήσιο

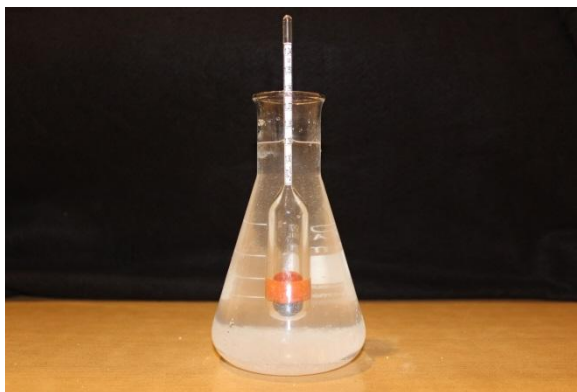
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εκτέλεση της πρότυπης δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (EN 1367-2, Παράρτημα Γ) σε λεπτόκοκκα αδρανή ήταν η ακόλουθη: αρχικά παρασκευάστηκε το διάλυμα, προσθέτοντας σε κάθε λίτρο απιονισμένου νερού 1500 g κρυσταλλικού άλατος  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ , διατηρώντας τη θερμοκρασία σταθερή μεταξύ 25-30 °C. Το διάλυμα αναδευόταν συνεχώς μέχρι την προσθήκη όλης της ποσότητας του άλατος. Μετά την προσθήκη του άλατος, το διάλυμα αφέθηκε να φτάσει σε θερμοκρασία 20±2 °C και παρέμεινε σε αυτή τη θερμοκρασία για 48±1 ώρες. Η πυκνότητα του



### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

διαλύματος μετρήθηκε με υδρόμετρο και κυμαινόταν από 1.284-1.300 g/ml (Εικόνα 5.8).

Η ελάχιστη ποσότητα διαλύματος για κάθε δοκιμή ήταν 3 L.



**Εικόνα 5.8: Μέτρηση πυκνότητας θειικού μαγνησίου με υδρόμετρο.**

Όσον αφορά το υλικό που χρησιμοποιήθηκε, αυτό αρχικά διαχωρίστηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 932-2, ώστε να προκύψουν δύο δείγματα άμμου. Το κάθε δείγμα ξηράθηκε σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C για  $24 \pm 1$  ώρες, και ακολούθως κοσκινίστηκε χρησιμοποιώντας τα κόσκινα 6.3 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0.500 mm και 0.250 mm, όπως προβλέπεται από το Παράρτημα Γ του EN 1367-2. Το υλικό που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο πλύθηκε με απιονισμένο νερό και ξηράθηκε εκ νέου σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C για  $24 \pm 1$  ώρες. Επαναλήφθηκε το κοσκίνισμα χρησιμοποιώντας τα πιο πάνω κόσκινα και από το υλικό που παρέμεινε σε κάθε κόσκινο λήφθηκαν οι ποσότητες ( $M_1$ ) που φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα (Πίνακας 5.6):

**Πίνακας 5.6: Μεγέθη κλασμάτων αδρανών και απαραίτητη μάζα υλικού για δοκιμή αποσάθρωσης.**

Μέγεθος κλάσματος		Μάζα Δείγματος (g)
Διαπερνά (mm)	Παραμένει (mm)	
6.3	4	200-210
4	2	200-210
2	1	100-110
1	0.500	100-110
0.500	0.250	100-110

Το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε ξεχωριστά συρμάτινα καλάθια (Εικόνα 5.9), τα οποία βυθίστηκαν στο κορεσμένο διάλυμα επταένυδρου θειικού μαγνησίου ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) για  $17 \pm 0.5$  ώρες. Με το πέρας της περιόδου βύθισης στο διάλυμα, τα καλάθια αφαιρέθηκαν και παρέμειναν σε θερμοκρασία δωματίου για  $2 \pm 0.25$  ώρες. Στη συνέχεια, το κάθε καλάθι

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

ξηράθηκε στο φούρνο σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C για  $24 \pm 1$  ώρες. Με τη συμπλήρωση της περιόδου ξήρανσης, μετακινήθηκαν τα καλάθια από το φούρνο και αφέθηκαν για  $5 \pm 0.25$  ώρες σε θερμοκρασία δωματίου. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε ακόμα 4 φορές. Ακολούθως, τα καλάθια με το υλικό, αφού πλύθηκαν με νερό και ξηράθηκαν σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C για  $24 \pm 1$  ώρες, κοσκινίστηκαν χρησιμοποιώντας τα ίδια κόσκινα με τα οποία είχαν κοσκινιστεί αρχικά, και ζυγίστηκαν ( $M_2$ ). Η διαφορά για το κάθε καλάθι ( $M_1 - M_2$ ) ορίστηκε ως η απώλεια λόγω αποσάθρωσης,  $MS_i$  (%), και εκφράστηκε ως ποσοστό επί του αρχικού βάρους ( $M_1$ ). Πιο συγκεκριμένα, το ποσοστό απώλειας μάζας για κάθε ένα καλάθι υπολογίστηκε σύμφωνα με την πιο κάτω σχέση (5.10):

$$MS_i = \frac{(M_{1,i} - M_{2,i})}{M_{1,i}} \times 100 \quad (5.10)$$

όπου:

$M_{1,i}$  = η αρχική μάζα υλικού στο καλάθι (g),

$M_{2,i}$  = η μάζα υλικού από το καλάθι που συγκρατείται στο παραμένον κόσκινο μετά το τέλος της δοκιμής (g).

Ο συντελεστής αποσάθρωσης υπολογίστηκε από το σταθμικό μέσο όρο των πιο πάνω αποτελεσμάτων, για την εκτίμηση του οποίου λήφθηκε υπόψη η συμμετοχή του κάθε κλάσματος στο δείγμα ( $k_i$ ). Δηλαδή, για κάθε κλάσμα υπολογίστηκε ο σταθμισμένος συντελεστής απώλειας θειικού μαγνησίου πολλαπλασιάζοντας την απώλεια μάζας ( $MS_i$ ) που σημειώθηκε στο κάθε καλάθι επί την αντίστοιχη τιμή ποσοστού συμμετοχής στο δείγμα ( $k_i \times MS_i$ ). Ακολούθως, για κάθε ένα από τα 2 δείγματα, υπολογίστηκε ο συνολικός συντελεστής απώλειας θειικού μαγνησίου ως το άθροισμα των σταθμισμένων συντελεστών απώλειας θειικού μαγνησίου όλων των κλασμάτων του δείγματος ( $\sum k_i \times MS_i$ ). Τέλος, ο συντελεστής απώλειας θειικού μαγνησίου όλου του υλικού,  $MS$  (%), υπολογίστηκε από το μέσο όρο των συνολικών συντελεστών απώλειας θειικού μαγνησίου των 2 δειγμάτων.



Εικόνα 5.9: Συρμάτινα καλάθια με διαβαθμισμένο υλικό.

#### 5.3.4.2 Αποσάθρωση με Θεικό Νάτριο

Η δοκιμή αποσάθρωσης με τη χρήση θεικού νατρίου πραγματοποιήθηκε με βάση το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM C88. Αρχικά παρασκευάστηκε το διάλυμα χρησιμοποιώντας 215 g άνυδρου θεικού νατρίου ανά λίτρο παρασκευαζόμενου διαλύματος. Κατά τη διάρκεια της προσθήκης του άλατος γινόταν συνεχής ανάδευση, ενώ η θερμοκρασία ήταν σταθερή μεταξύ 25-30 °C. Μετά το τέλος της προσθήκης και της διάλυσης του άλατος, μειώθηκε η θερμοκρασία στους 20±2 °C και το διάλυμα αφέθηκε να ηρεμήσει για 48±1 ώρες. Η πυκνότητα του διαλύματος ήταν μεταξύ 1.151 και 1.174 g/ml.

Όσον αφορά το δείγμα, αυτό αρχικά διαχωρίστηκε με βάση το πρότυπο ASTM C702 προκειμένου να αποκτηθεί η απαιτούμενη ποσότητα. Στη συνέχεια πλύθηκε από το κόσκινο 0.300 mm και ξηράθηκε σε φούρνο στους 110±5 °C μέχρι να αποκτήσει σταθερή μάζα. Ακολούθως, κοσκινίστηκε και διαχωρίστηκε χρησιμοποιώντας τα κόσκινα 4.75 mm, 2.36 mm, 1.18 mm, 0.600 mm και 0.300 mm. Στη συνέχεια, 100 g από το κάθε μέγεθος κλάσματος (M<sub>1</sub>) τοποθετήθηκε ξεχωριστά σε συρμάτινα καλάθια.

Τα καλάθια με τα δείγματα βυθίστηκαν στο διάλυμα άνυδρου θεικού νατρίου για 16-18 ώρες. Με το τέλος της περιόδου αυτής, μετακινήθηκαν από το διάλυμα και αφέθηκαν σε συνθήκες δωματίου για 15±5 λεπτά ώστε να στραγγίσουν. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν σε φούρνο σε θερμοκρασία 110±5 °C και παρέμειναν σε αυτόν μέχρι να επιτευχθεί σταθερή μάζα. Ακολούθως, αφέθηκαν μέχρι να ανακτήσουν θερμοκρασία περιβάλλοντος και, αφού ελέγχθηκε η πυκνότητα του διαλύματος, βυθίστηκαν και πάλι στο διάλυμα για την έναρξη του επόμενου κύκλου. Η διαδικασία αυτή επαναλήφθηκε για ακόμα 4 φορές.

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

Μετά την ολοκλήρωση και των 5 κύκλων, τα καλάθια με το υλικό πλύθηκαν με νερό και τοποθετήθηκαν σε φούρνο σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C μέχρι να αποκτήσουν σταθερή μάζα. Τέλος, το υλικό κοσκινίστηκε από τα ίδια κόσκινα που κοσκινίστηκε αρχικά και ζυγίστηκε ( $M_2$ ).

Η διαφορά των τιμών ( $M_1 - M_2$ ) ορίστηκε ως η απώλεια λόγω αποσάθρωσης κάθε δείγματος, και εκφράστηκε ως ποσοστό επί του αρχικού βάρους. Ο συντελεστής αποσάθρωσης υπολογίστηκε (όπως έχει περιγραφεί και στην παράγραφο 5.3.4.1) από το σταθμικό μέσο όρο των αποτελεσμάτων, για την εκτίμηση του οποίου λήφθηκε υπόψη η συμμετοχή του κάθε κλάσματος στο δείγμα.

### 5.3.5 Μηχανικές ιδιότητες

#### 5.3.5.1 Αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής

Η δοκιμή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το Αμερικάνικο πρότυπο ASTM D7428, χρησιμοποιώντας τη συσκευή Micro-Deval (Εικόνα 5.10). Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη δοκιμή, ο προσδιορισμός της ανθεκτικότητας των αδρανών προκύπτει από συνδυασμό δράσεων, συμπεριλαμβανομένων της τριβής και της λείανσης στην επαφή τους με χαλύβδινες σφαίρες, στην παρουσία νερού. Η δοκιμή αυτή, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, εφαρμόστηκε για πρώτη φορά σε τοπικό επίπεδο, σε λεπτόκοκκα αδρανή διαφορετικής ορυκτολογικής σύστασης και γεωλογικής προέλευσης, με στόχο τον προσδιορισμό της ποιότητάς τους.

Για την εκτέλεση της δοκιμής, ένα δείγμα βάρους 500 g ( $M_1$ ) με καθορισμένη διαβάθμιση (Πίνακας 5.7) βυθίστηκε αρχικά σε νερό, για μία ώρα τουλάχιστον, χρησιμοποιώντας ένα από τα τύμπανα της συσκευής Micro-Deval. Μαζί με το δείγμα τοποθετήθηκαν και 1250 g χαλύβδινες σφαίρες διαμέτρου ( $d$ ) 9.5 mm. Τα πιο πάνω υποβλήθηκαν σε περιστροφή με ρυθμό 100 στροφές ανά λεπτό για 15 λεπτά. Το δείγμα στη συνέχεια πλύθηκε χρησιμοποιώντας το κόσκινο 0.075 mm και ξηράθηκε σε θερμοκρασία  $110 \pm 5$  °C. Η απώλεια, MD (%), ορίστηκε ως η ποσότητα του υλικού που διήλθε από το κόσκινο 0.075 mm, και εκφράστηκε ως το ποσοστό κατά μάζα του αρχικού δείγματος ( $M_1$ ), σύμφωνα με την πιο κάτω σχέση (5.11):

$$MD = \frac{(M_1 - M_2)}{M_1} \times 100 \quad (5.11)$$

όπου:

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

$M_1$  = η αρχική μάζα του δείγματος (g),

$M_2$  = η μάζα του υλικού που συγκρατήθηκε στο κόσκινο 0.075 mm μετά το τέλος της δοκιμής (g).

**Πίνακας 5.7:** Διαβάθμιση υλικού που χρησιμοποιήθηκε στη δοκιμή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής.

Μέγεθος κλάσματος		Μάζα Δείγματος (g)
Διαπερνά (mm)	Παραμένει (mm)	
4.75	2.36	50
2.36	1.18	125
1.18	0.600	125
0.600	0.300	100
0.300	0.150	75
0.150	0.075	25



**Εικόνα 5.10:** Συσσκευή Micro Deval.

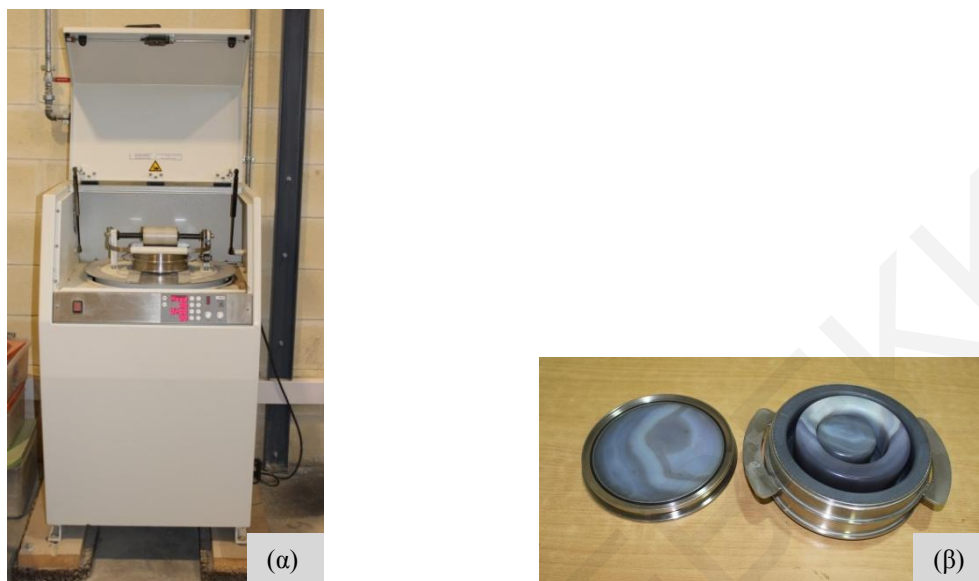
### 5.3.6 Αναλυτικές τεχνικές για χαρακτηρισμό αδρανών υλικών

#### 5.3.6.1 Περιθλασιμετρία ακτίνων X (X-Ray Diffraction – XRD)

Προκειμένου να ταυτοποιηθούν οι ορυκτολογικές φάσεις για κάθε δείγμα λεπτόκοκκων αδρανών που εξετάστηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκαν ορυκτολογικές αναλύσεις με την χρήση περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD) σε σκόνη από κονιοποιημένα αδρανή. Δείγμα από το κάθε είδος αδρανών που παραλήφθηκε στο εργαστήριο κονιοποιήθηκε αρχικά σε ειδική συσκευή άλεσης τύπου Fritsch Pulverisette 9 (Εικόνα 5.11 (α)) με την χρήση κονιοποιητή από αχάτη (Εικόνα 5.11 (β)), και ακολούθως

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

επιλέχθηκε μετά από κοσκίνισμα το κλάσμα του δείγματος που ήταν μικρότερο από 0.063 mm για ανάλυση.



**Εικόνα 5.11: (α) Συσκευή άλεσης και (β) κονιοποιητής από αχάτη.**

Το περιθλασίμετρο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου Bruker D8 Advance (Εικόνα 5.12), ενώ η πηγή από όπου προέρχονταν οι ακτίνες X ήταν μια λυχνία χαλκού (Cu) με  $\lambda=1.5406$  nm. Για τις μετρήσεις ορίστηκε βήμα σάρωσης  $0.01^\circ$  και ταχύτητα σάρωσης  $0.5^\circ$  ανά λεπτό, σε περιοχή  $2\theta$  από  $2^\circ$  έως  $100^\circ$ . Για την ανάλυση του φάσματος των κρυσταλλικών φάσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό πακέτο EVA της εταιρείας Bruker. Με την χρήση του λογισμικού Topas καθορίστηκαν ημι-ποσοτικά οι αναλογίες των ορυκτών. Οι προδιαγραφές και οι συνθήκες ανάλυσης του συστήματος περιθλασιμετρίας ακτίνων X που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των δειγμάτων της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα Β.0.1 του Παραρτήματος Β.



**Εικόνα 5.12:** Περιθλασίμετρο ακτινών-Χ.

#### 5.3.6.2 Φασματοσκοπία φθορισμού ακτινών Χ (*X-Ray Fluorescence – XRF*)

Πέραν της ορυκτολογικής ανάλυσης των αδρανών, πραγματοποιήθηκαν και χημικές αναλύσεις με τη μέθοδο φθορισμού ακτινών Χ (XRF - X-Ray Fluorescence). Η μέθοδος φθορισμού ακτινών Χ παρέχει ποιοτική και ποσοτική μέτρηση της στοιχειακής δομής στερεών υλικών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε κονιοποιημένο υλικό (σκόνη), σε όλα τα αδρανή που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή. Τα δείγματα σε σκόνη αναλύθηκαν στο φασματόμετρο τύπου S2 Ranger ED-XRF (Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence) της εταιρείας Bruker (Εικόνα 5.13) σε περιβάλλον He. Για την ανάλυση των δειγμάτων χρησιμοποιήθηκε το ενσωματωμένο λογισμικό του οργάνου, το οποίο εκτιμά τη συγκέντρωση (%) του κάθε στοιχείου στο δείγμα, ημι-ποσοτικά, υπό τη μορφή οξειδίου. Οι προδιαγραφές και οι συνθήκες ανάλυσης του συστήματος φθορισμού ακτινών Χ που χρησιμοποιήθηκε για την χημική ανάλυση των δειγμάτων παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα Β.0.2 του Παραρτήματος Β.





**Εικόνα 5.13: Φασματόμετρο.**

## **5.4 Δοκιμές σκυροδεμάτων/κονιαμάτων**

Τα αδρανή υλικά καταλαμβάνουν σημαντικό μέρος της μάζας του σκυροδέματος και των κονιαμάτων. Ως αποτέλεσμα, η ποιότητα και οι ιδιότητες των αδρανών ενδεχομένως να επηρεάζουν σημαντικά τη μακροχρόνια συμπεριφορά των πιο πάνω σύνθετων δομικών υλικών. Με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή στο τελικό προϊόν, παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου διάφορα σκυροδέματα και κονιάματα. Τα αδρανή υλικά που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν ανάλογα με την απόδοσή τους στις δοκιμές που περιγράφονται στην ενότητα 5.3.

### **5.4.1 Σκυροδέματα**

#### **5.4.1.1 Σχεδιασμός σκυροδεμάτων**

Πραγματοποιήθηκαν 14 σκυροδετήσεις (C1 – C14), με διαφοροποίηση του ενός από τα δύο λεπτόκοκκα αδρανή που συμμετείχαν στο κάθε μίγμα. Στον Πίνακα 5.2 καταγράφονται τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των σκυροδεμάτων. Ο σχεδιασμός των μιγμάτων έγινε σύμφωνα με την έκδοση ACI 211.1-91 και αφορούσε την παραγωγή σκυροδέματος κατηγορίας C16/20. Η επιλογή της συγκεκριμένης κατηγορίας σκυροδέματος έγινε προκειμένου να τονιστεί η όποια πιθανή επίδραση των αδρανών στο τελικό προϊόν. Σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε σύνθετο τσιμέντο Portland CEM II 32.5R. Στον πιο κάτω πίνακα (Πίνακας 5.8) φαίνεται η σύνθεση του κάθε μίγματος (πριν



### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

τις οποιοσδήποτε διορθώσεις λόγω απορροφητικότητας και υγρασίας των αδρανών), καθώς και η κάθιση των νωπών σκυροδεμάτων.

#### 5.4.1.2 Σκυροδέτηση

Τα μίγματα παρασκευάστηκαν σε κυλινδρικό αναδευτήρα. Αρχικά, τοποθετήθηκαν τα χονδρόκοκκα αδρανή μεγέθους 8/20 mm, τα οποία ανακατεύτηκαν με το τσιμέντο εν ξηρώ για λίγα δευτερόλεπτα. Στη συνέχεια, προστέθηκαν τα αδρανή μεγέθους 4/10 mm, ανακατεύτηκαν όλα τα υλικά μαζί, και προστέθηκε η άμμος 0/4 mm. Τέλος, προστέθηκε το νερό και ανακατεύτηκε το μίγμα για λίγα λεπτά, ώστε να ομογενοποιηθεί πλήρως (Εικόνα 5.14).



Εικόνα 5.14: Ανάμιξη υλικών για παρασκευή σκυροδέματος σε κυλινδρικό αναδευτήρα.

#### 5.4.1.3 Δοκιμή κάθισης

Η δοκιμή κάθισης πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο EN 12350-2. Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκαν: ένας μεταλλικός κόνουρος κώνος, ύψους (h) 300 mm, με διάμετρο (d) βάσης 200 mm και κορυφής 100 mm, καθώς επίσης και μια μεταλλική ράβδος κυκλικής διατομής, με διάμετρο (d) 16 mm και μήκος (L) 600 mm. Ο κώνος τοποθετήθηκε πάνω σε μια επίπεδη επιφάνεια και γέμισε με σκυρόδεμα σε τρεις ισοπαχείς περίπου στρώσεις (Εικόνα 5.15 (α)). Με τη βοήθεια της ράβδου, το σκυρόδεμα συμπυκνώθηκε σε κάθε στρώση με 25 κτυπήματα (Εικόνα 5.15 (β)), ξεκινώντας από την περιφέρεια του κώνου και καταλήγοντας στο κέντρο, με σπειροειδή κίνηση.

Με το τέλος της διαδικασίας, το σκυρόδεμα που περίσσεψε στην κορυφή του κώνου αφαιρέθηκε και η επιφάνεια του σκυροδέματος επιπεδώθηκε με τη βοήθεια της ράβδου. Στη συνέχεια, ο κώνος ανασηκώθηκε κατακόρυφα εντός ολίγων δευτερολέπτων και τοποθετήθηκε δίπλα από τη μάζα του σκυροδέματος. Πάνω από τον κώνο τοποθετήθηκε η ράβδος και με τη βοήθεια ενός μέτρου μετρήθηκε η απόσταση από το υψηλότερο σημείο της μάζας του σκυροδέματος μέχρι τη ράβδο (Εικόνα 5.15 (γ)).

Πίνακας 5.8: Σύθεση μιγμάτων και κάθιση νοπών σκυροδεμάτων.

Σκυροδέματα	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14
Τσιμέντο (kg/m <sup>3</sup> )	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5	327,5
Αδρανή 8/20 (kg/m <sup>3</sup> )	563,9	618,1	597,1	603,8	592,7	606,4	571,1	608,3	596,6	615,1	603,8	628,2	589,9	611
Αδρανή 4/10 (kg/m <sup>3</sup> )	282	309,1	298,5	301,9	296,3	303,2	285,5	304,1	298,3	307,5	301,9	314,1	295	305,5
Άμμος (1) 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	413,6	391,7	403,6	342,4	344,2	406,8	430,7	408,5	415,7	393,1	347,5	321,8	373,3	370,5
Άμμος (2) 0/4 (kg/m <sup>3</sup> )	413,6	391,7	403,6	342,4	344,2	406,8	430,7	408,5	415,7	393,1	347,5	321,8	373,3	370,5
Νερό (kg/m <sup>3</sup> )	205	205	205	205	205	205	205	205	205	205	205	205	205	205
Λόγος w/c	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626	0,626
Πρόσθετα (ml): Υπερρυστοποιητής Sika Viscocrete 4000	-	40	195	-	-	40	50	52	200	37	-	-	-	-
Κάθιση (mm)	75	75	78	78	75	75	75	75	75	78	80	78	80	78



**Εικόνα 5.15: Δοκιμή κάθισης: (α) συμπλήρωση κώνου με σκυρόδεμα (β) συμπύκνωση στρώσης και (γ) μέτρηση κάθισης.**

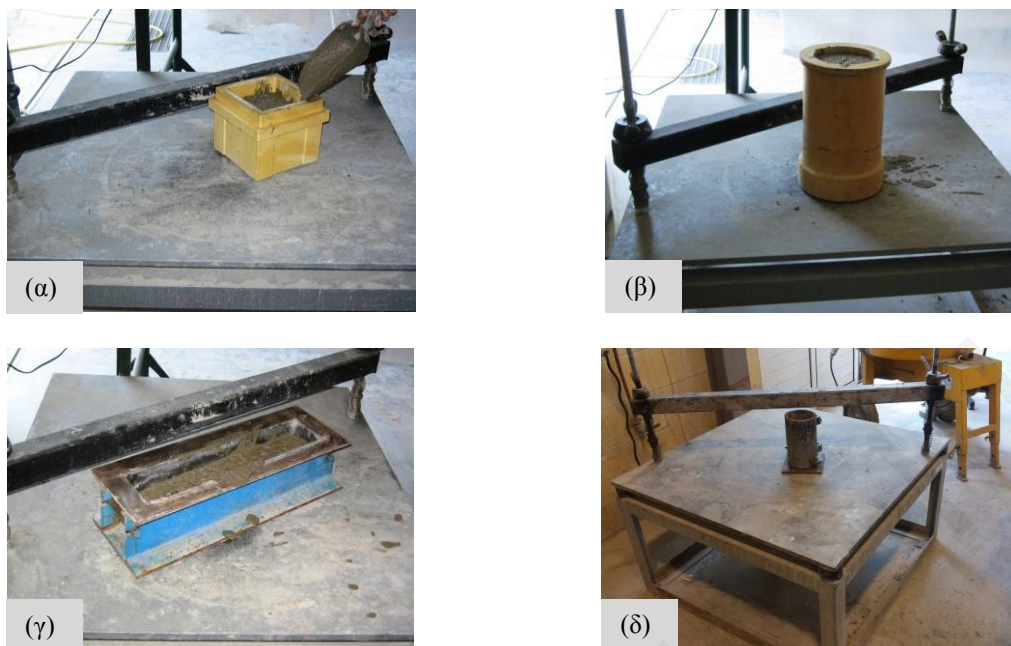
Στις περιπτώσεις που δεν επιτεύχθηκε η επιθυμητή κάθιση (75-100 mm), προστέθηκε στο σκυρόδεμα που παρέμεινε στον κυλινδρικό αναδευτήρα υπερρρευστοποιητής Sika Viscocrete 4000 (Εικόνα 5.16). Η δοσολογία του υπερρρευστοποιητή (όπως φαίνεται και στον Πίνακα 5.8) ήταν ανάλογα με τις ανάγκες του κάθε παρασκευαζόμενου σκυροδέματος, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κάθιση. Σε καμία περίπτωση δεν χρησιμοποιήθηκε υπερρρευστοποιητής σε αναλογία  $>2.0\%$  κ.β. τσιμέντου που ορίζει ο προμηθευτής.



**Εικόνα 5.16: Προσθήκη υπερρρευστοποιητή στο μίγμα.**

#### 5.4.1.4 Παρασκευή και συντήρηση δοκιμών

Κατά τη σκυροδέτηση, η λήψη δοκιμών πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12390-2. Από το κάθε μίγμα, σκυροδετήθηκαν κύβοι διαστάσεων 100 x 100 mm, πρισματικό δοκίμιο 100 x 100 x 500 mm και κύλινδροι διαμέτρου (d) 150/100 mm και ύψους (h) 300/200 mm αντίστοιχα (Εικόνα 5.17).



Εικόνα 5.17: Σκυροδέτηση (α) κυβικού δοκιμίου, (β) κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου (d) 150 mm και ύψους (h) 300 mm, (γ) πρισματικού δοκιμίου και (δ) κυλινδρικού δοκιμίου διαμέτρου (d) 100 mm και ύψους (h) 200 mm.

Αρχικά έγινε επάλειψη της εσωτερικής επιφάνειας της μήτρας με λιπαντικό, ώστε να μπορούν να αποκολληθούν εύκολα τα δοκίμια μετά τη σκλήρυνσή τους. Η μήτρα τοποθετήθηκε στη δονητική τράπεζα και με την εκκίνησή της ξεκίνησε και η πλήρωσή της. Αφού γέμισε περίπου το 1/2 του ύψους της μήτρας με σκυρόδεμα, και συμπυκνώθηκε για λίγα δευτερόλεπτα, ακολούθησε ακόμα μία στρώση με τον ίδιο τρόπο. Στην περίπτωση των μεγάλων κυλινδρικών δοκιμίων (διάμετρος:  $d=150$  mm και ύψος:  $h=300$  mm) οι στρώσεις σκυροδέματος ήταν τρεις. Η δόνηση συνέχισε μέχρι που σταμάτησαν να εμφανίζονται φυσαλίδες αέρα στη μήτρα και η άνω επιφάνεια της στρώσης του σκυροδέματος ομαλοποιήθηκε.

Σε όλες τις περιπτώσεις, τα δοκίμια παρέμειναν στις μήτρες για 24 ώρες ενώ σκεπάστηκαν με βρεγμένες λινάτσες, έτσι ώστε να αποφευχθεί η εξάτμιση του νερού. Η θερμοκρασία κατά τη διάρκεια αυτών των 24<sup>ωv</sup> ωρών διατηρήθηκε στους  $20\pm 5$  °C. Μετά την αφαίρεση από τις μήτρες, τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε νερό σε θερμοκρασία  $20\pm 2$  °C μέχρι και την εκτέλεση των δοκιμών που περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους, οι οποίες επαναλήφθηκαν 28, 56 και 90 ημέρες μετά την κάθε σκυροδέτηση.

5.4.1.5 Δοκιμή αντοχής σε θλίψη

Ο όρος "αντοχή" στο σκυρόδεμα αναφέρεται στη μέγιστη τάση που μπορεί να μεταφέρει το υλικό, η οποία προκαλεί θραύση. Το σκυρόδεμα αστοχεί σε θλίψη λόγω ανάπτυξης και επέκτασης ρωγμών στη μάζα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού (Τριανταφύλλου, 2013).

Η δοκιμή αντοχής σε θλίψη πραγματοποιήθηκε με βάση το πρότυπο EN 12390-3. Με την πάροδο 28, 56 και 90 ημερών από την ημέρα παρασκευής του μίγματος σκυροδέματος, τρεις διαφορετικοί κύβοι αφαιρέθηκαν από τη δεξαμενή με το νερό στην οποία συντηρούνταν. Σκουπίστηκαν οι επιφάνειές τους ώστε να μην υπάρχει νερό και ζυγίστηκαν. Στη συνέχεια, ο κάθε κύβος τοποθετήθηκε ξεχωριστά στη μηχανή θραύσης (Εικόνα 5.18) με τρόπο ώστε η διεύθυνση εφαρμογής του φορτίου να είναι κάθετη στην κατακόρυφη διεύθυνση που είχε ο κύβος κατά τη σκυροδέτηση. Εφαρμόστηκε φορτίο με ρυθμό φόρτισης 0.5 MPa/s μέχρι που ο κύβος να αστοχήσει. Καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο θραύσης του δοκιμίου και υπολογίστηκε η αντοχή του σε θλίψη,  $f_c$  (MPa), από την πιο κάτω σχέση (5.12):

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (5.12)$$

όπου:

P= φορτίο αστοχίας στη μέση του κύβου (kN),

A= Εμβαδόν επιφάνειας κύβου (mm<sup>2</sup>).

Λήφθηκε ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων των τριών δοκιμών.



Εικόνα 5.18: Κυβικό δοκίμιο σκυροδέματος στη μηχανή θραύσης.

#### 5.4.1.6 Δοκιμή αντοχής σε κάμψη

Η αστοχία δοκιμίων σκυροδέματος σε μονοαξονικό εφελκυσμό οφείλεται στην επέκταση ρωγμών κάθετα στη διεύθυνση της φόρτισης. Μία εύκολη δοκιμή έμμεσου εφελκυσμού είναι η δοκιμή πρισμάτων που υποβάλλονται σε κάμψη ως αμφιέριστες δοκοί με φορτίο στη μέση, ή δύο φορτία στα τρίτα του ανοίγματος (Τριανταφύλλου, 2013).

Η δοκιμή αντοχής σε κάμψη 3 σημείων πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις πρόνοιες του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 12390-5, σε πρισματικά δοκίμια, μετά την πάροδο 28, 56 και 90 ημερών από την ημέρα παρασκευής τους. Για την εργαστηριακή δοκιμή, ένα πρισματικό δοκίμιο διαστάσεων 500 x 100 x 100 mm αφαιρέθηκε από τη δεξαμενή με νερό, με μια στεγνή πετσέτα απομακρύνθηκε η επιπλέον υγρασία από τις επιφάνειές του και ζυγίστηκε. Ακολούθως, τοποθετήθηκε στο πλαίσιο φόρτισης πάνω σε δύο κυλινδρικές στηρίξεις, οι οποίες απείχαν 400 mm (Εικόνα 5.19 (α)). Στη συνέχεια, επιβλήθηκε φορτίο με ρυθμό 0.45 MPa/s στο κέντρο της δοκού, μέχρι που επήλθε αστοχία (Εικόνα 5.19 (β)). Η αντοχή του δοκίμιου σε κάμψη 3 σημείων,  $f_{cf}$  (MPa), υπολογίστηκε από την πιο κάτω σχέση (5.13):

$$f_{cf} = \frac{3 \times F \times I}{2 \times d^3} \quad (5.13)$$

όπου:

F = το μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία (N),

I = η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων (mm),

d = η πλευρά τετραγωνικής διατομής πρίσματος (mm).





Εικόνα 5.19: Δοκιμή αντοχής σε κάμψη: (α) πρισματικό δοκίμιο σκυροδέματος στη μηχανή κάμψης, (β) αστοχία δοκίμιου σε καμπτική καταπόνηση.

#### 5.4.1.7 Δοκιμή έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με διάρρηξη ή βραζιλιάνικη δοκιμή

Η πλέον συνηθισμένη δοκιμή της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι αυτή του έμμεσου εφελκυσμού από διάρρηξη (ή Βραζιλιάνικη δοκιμή), κατά την οποία κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε θλίψη υπό ομοιόμορφα κατανεμημένες δυνάμεις κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενέτειρων της παράπλευρης επιφάνειας (Τριανταφύλλου, 2013).

Η δοκιμή έμμεσης εφελκυστικής αντοχής με διάρρηξη πραγματοποιήθηκε με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12390-6 σε κυλινδρικό δοκίμιο μήκους ( $L$ ) 300 mm και διαμέτρου ( $d$ ) 150 mm. Μετά την πάροδο 28, 56 και 90 ημερών από την ημέρα παρασκευής του, το δοκίμιο αφαιρέθηκε από τη δεξαμενή με νερό. Αφού σκουπίστηκε περιφερειακά, εφαρμόστηκε σε μεταλλικό πλαίσιο και ακολούθως τοποθετήθηκε συμμετρικά στη μηχανή φόρτισης (Εικόνα 5.20). Επιβλήθηκε φορτίο με ρυθμό 0.5 MPa/s μέχρι που επήλθε αστοχία στο δοκίμιο. Καταγράφηκε το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο και υπολογίστηκε η έμμεση εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη,  $f_{ct}$  (MPa), από την πιο κάτω σχέση (5.14):

$$f_{ct} = \frac{2 \times F}{\pi \times L \times d} \quad (5.14)$$

όπου:

$F$  = το μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία (N),

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

$L$  = το μήκος του δοκιμίου (mm),

$d$  = η διάμετρος του δοκιμίου (mm).



**Εικόνα 5.20:** Κυλινδρικό δοκίμιο σκυροδέματος στη μηχανή θραύσης.

### 5.4.1.8 Δοκιμή προσδιορισμού στατικού μέτρου ελαστικότητας

Η διαδικασία προσδιορισμού του στατικού μέτρου ελαστικότητας καλύπτεται από το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12390-13 και βασίζεται στην εφαρμογή διαδοχικών κύκλων φόρτισης σε μονοαξονική θλίψη και στην ταυτόχρονη μέτρηση των επιβαλλόμενων δυνάμεων και των παραμορφώσεων του υλικού.

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικό δοκίμιο μήκους ( $L$ ) 300 mm και διαμέτρου ( $d$ ) 150 mm, μετά την πάροδο 28, 56 και 90 ημερών από την ημερομηνία παρασκευής του. Αρχικά, το δοκίμιο αφαιρέθηκε από τη δεξαμενή με νερό και απομακρύνθηκε η επιπλέον υγρασία από τις επιφάνειές του. Ακολούθως, επικολλήθηκαν πλευρικά και αντιδιαμετρικά ηλεκτρομηκυσσιόμετρα (*strain gages*) μήκους ( $L$ ) 30 mm, με προσοχή, έτσι ώστε να διασφαλιστεί ότι οι θέσεις των πιο πάνω συστημάτων μέτρησης ήταν συμμετρικά διατεταγμένες (Εικόνα 5.21 (α)). Το δοκίμιο με τα ηλεκτρομηκυσσιόμετρα τοποθετήθηκε στη μηχανή φόρτισης και υποβλήθηκε σε κύκλους φόρτισης-αποφόρτισης (Εικόνα 5.21 (β)). Ως μέγιστο της επιβαλλόμενης φόρτισης θεωρήθηκε το 1/3 της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων. Ο ρυθμός φόρτισης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας ελέγχου ορίστηκε στα  $0.6 \pm 0.2$  MPa/s.

Η αντίσταση των ηλεκτρομηκυσσιόμετρων μεταβλήθηκε ανάλογα με την παραμόρφωση του δοκιμίου. Οι τιμές αυτές καταγράφηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, και μέσω λογισμικού δημιουργήθηκε διάγραμμα των τάσεων – παραμορφώσεων. Από την κλίση του



## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

ευθύγραμμου τμήματος της γραφικής παράστασης τάσης – παραμόρφωσης υπολογίστηκε το τέμνον μέτρο ελαστικότητας,  $E_{C,S}$  (GPa), σύμφωνα με την πιο σχέση (5.15):

$$E_{C,S} = \frac{\sigma_a - \sigma_p}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{p,2}} \quad (5.15)$$

όπου:

$\sigma_a$  = η μέγιστη επιβαλλόμενη τάση (MPa),

$\sigma_p$  = η τάση προ-φόρτισης (MPa),

$\varepsilon_{a,3}$  = η μέση ανηγμένη αξονική παραμόρφωση όταν το μέγιστο επιβαλλόμενο φορτίο ( $\sigma_a$ ) σταθεροποιηθεί κατά τον τρίτο κύκλο φόρτισης (mm /mm),

$\varepsilon_{p,2}$  = η μέση ανηγμένη αξονική παραμόρφωση όταν η τάση προ-φόρτισης ( $\sigma_p$ ) σταθεροποιηθεί πριν από την έναρξη του τρίτου κύκλου φόρτισης (mm /mm).

Με το τέλος της διαδικασίας υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας, το δοκίμιο φορτίστηκε μέχρι που επήλθε αστοχία.



**Εικόνα 5.21: Δοκιμή προσδιορισμού στατικού μέτρου ελαστικότητας σκυροδεμάτων: (α) επικόλληση ηλεκτρομηκυσσιόμετρων, (β) πειραματική διάταξη.**

Για τη διεξαγωγή των πιο πάνω δοκιμών προσδιορισμού των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος (Παράγραφοι 5.4.1.5 - 5.4.1.8), χρησιμοποιήθηκε η μηχανή CONTROLS Advantest 9. Η μηχανή αυτή αποτελείται από δύο παράλληλες, λείες πλάκες φόρτισης και έχει τη δυνατότητα εφαρμογής φορτίου μέχρι 5000 kN. Οι πλάκες της μηχανής έχουν δυνατότητα περιστροφής, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ομοιόμορφη φόρτιση σε δοκίμια που δεν έχουν παράλληλες επιφάνειες.

### 5.4.1.9 Δοκιμή ανοικτού πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας

Μια από τις πλέον συνήθεις μεθόδους προσδιορισμού του ανοικτού πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας δομικών υλικών είναι αυτή του κορεσμού υπό συνθήκες κενού

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

(Hall & Hoff, 2012). Όπως αναφέρουν οι πιο πάνω συγγραφείς, το ανοικτό πορώδες,  $f_o$  (%), εκφράζεται ως ο λόγος του όγκου των ανοικτών πόρων προς το φαινόμενο όγκο του δοκιμίου, ενώ υπολογίζεται από την πιο κάτω σχέση (5.16):

$$f_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad (5.16)$$

όπου:

$m_d$  = το βάρος του ξηρού δοκιμίου (g),

$m_s$  = το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου (g),

$m_h$  = το βάρος του δοκιμίου εμβαπτισμένο μέσα σε νερό (g).

Η φαινόμενη πυκνότητα,  $\rho_b$  (kg/m<sup>3</sup>), υπολογίζεται από το λόγο της μάζας του ξηρού δείγματος προς το φαινόμενο του όγκο, με την πιο κάτω σχέση (5.17):

$$\rho_b = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_{rh} \quad (5.17)$$

όπου:

$m_d$  = το βάρος του ξηρού δοκιμίου (g),

$m_s$  = το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου (g),

$m_h$  = το βάρος του δοκιμίου εμβαπτισμένο μέσα σε νερό (g),

$\rho_{rh}$  = η πυκνότητα του νερού (kg/m<sup>3</sup>).

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον υπολογισμό του ανοικτού πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας των εργαστηριακών σκυροδεμάτων ήταν η εξής: ένα κυβικό δοκίμιο διαστάσεων 100 x 100 mm αφαιρέθηκε από τη δεξαμενή με νερό. Με μια στεγνή πετσέτα απομακρύνθηκε η επιπλέον υγρασία περιφερειακά και τοποθετήθηκε σε δοχείο κενού (Εικόνα 5.22), στο οποίο η πίεση μειώθηκε σταδιακά στα 2.0±0.7 kPa = 15±5 mm Hg. Η μειωμένη πίεση διατηρήθηκε για 2±0.2 ώρες και στη συνέχεια εισήχθη στο δοχείο απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία 20±5 °C, ενώ η πίεση παρέμεινε σταθερή. Όταν το δοκίμιο βυθίστηκε πλήρως, το δοχείο επαναφέρθηκε σε ατμοσφαιρική πίεση και το δοκίμιο παρέμεινε στο νερό για ακόμα 24±2 ώρες. Ακολούθως, το δοκίμιο ζυγίστηκε εμβαπτισμένο σε νερό ( $m_h$ ) και εκτός αυτού ( $m_s$ ), αφού πρώτα σκουπίστηκε ελαφρά με ένα υγρό ρούχο. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε για ξήρανση στους 70±5 °C μέχρι που σταθεροποιήθηκε η μάζα του, και έπειτα τοποθετήθηκε σε δοχείο αφύγρανσης μέχρι που

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

απέκτησε θερμοκρασία δωματίου, οπότε και ζυγίστηκε ( $m_d$ ). Λόγω του ότι η δοκιμή δεν είναι καταστρεπτική, χρησιμοποιήθηκε το ίδιο δοκίμιο και για τις τρεις χρονικές περιόδους (28, 56 και 90 ημέρες) που πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές.



Εικόνα 5.22: Δοκιμή προσδιορισμού ανοικτού πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας σκυροδεμάτων.

### 5.4.1.10 Δοκιμή τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας

Ο συντελεστής τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας εκφράζει την ικανότητα ενός υλικού να απορροφά νερό μέσω τριχοειδών δυνάμεων. Ο προσδιορισμός του συντελεστή τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας αποτελεί μια έμμεση μέθοδο εκτίμησης της ανθεκτικότητας πορωδών δομικών υλικών (Kanellopoulos et al., 2012) καθώς συσχετίζεται άμεσα με τη μικροδομή τους.

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η δοκιμή προσδιορισμού του συντελεστή τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας πραγματοποιήθηκε στους ίδιους κύβους που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας, με τη μέθοδο που περιγράφουν οι Hall & Hoff (2012). Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: στο ξηρό κυβικό δοκίμιο, στο οποίο διεξάχθηκε η δοκιμή προσδιορισμού του πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας, μετρήθηκαν οι διαστάσεις και το βάρος του. Ακολούθως, το δοκίμιο τοποθετήθηκε σε δοχείο, πάνω σε λεπτά πλαστικά στηρίγματα, και προστέθηκε απιονισμένο νερό σε ύψος  $3 \pm 1$  mm από τη βάση του (Εικόνα 5.23). Ταυτόχρονα, ξεκίνησε η καταμέτρηση του χρόνου. Σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, το δοκίμιο απομακρυνόταν από το δοχείο με το νερό και αφού σκουπιζόταν ελαφρά σε υγρό ύφασμα, ζυγιζόταν και επανατοποθετούταν ξανά πίσω στο δοχείο. Παράλληλα, γινόταν καταγραφή και της θερμοκρασίας του νερού. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, δόθηκε ιδιαίτερη σημασία στη διατήρηση της επιφάνειας του νερού στο δοχείο σε σταθερή

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

στάθμη. Η δοκιμή, πέραν από τις 28 ημέρες από την ημερομηνία παρασκευής του δοκιμίου, επαναλήφθηκε επίσης στις 56 και στις 90 ημέρες.

Ο συντελεστής τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας εκτιμήθηκε από την αρχική κλίση γραφικής παράστασης της ποσότητας του νερού που απορροφήθηκε από το κάθε δοκίμιο, ανά μονάδα επιφάνειας απορρόφησης, ως συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, σύμφωνα με την πιο κάτω σχέση (5.18):

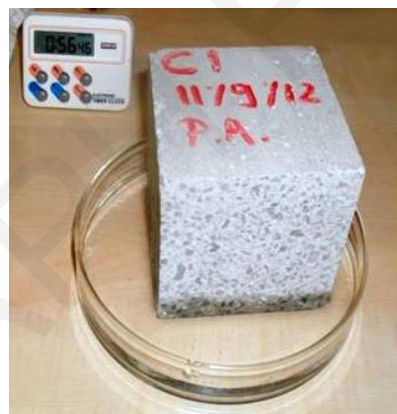
$$i = S \times t^{\frac{1}{2}} \quad (5.18)$$

όπου:

$i$  = ο όγκος του νερού που απορροφάται ανά μονάδα επιφάνειας (mm),

$S$  = η τριχοειδής υδαταπορροφητικότητα ( $\text{mm}/\text{min}^{1/2}$ ),

$t$  = χρόνος (min).



Εικόνα 5.23: Δοκιμή προσδιορισμού τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας σκυροδέματος.

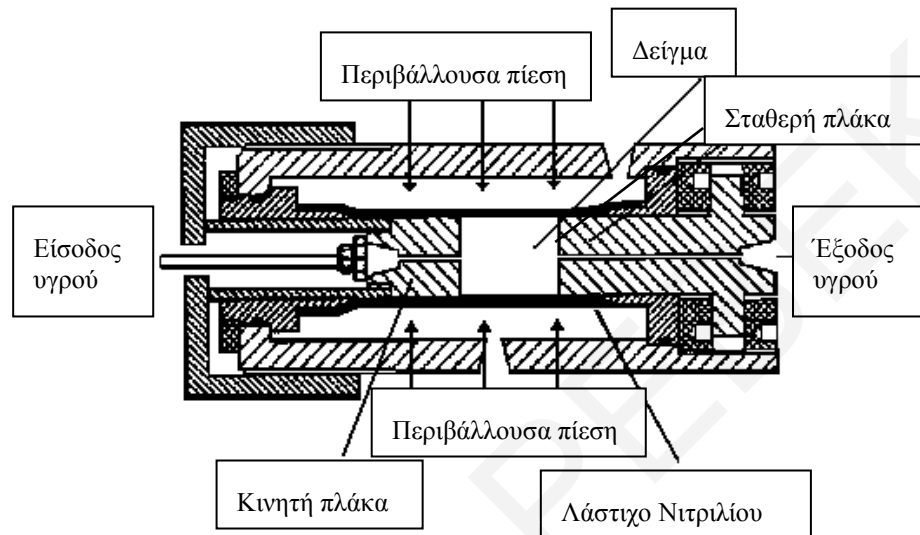
#### 5.4.1.11 Δοκιμή διαπερατότητας

Η διαπερατότητα είναι μια φυσική ιδιότητα των υλικών με συνεκτικούς πόρους, κατά την οποία μετριέται ο ρυθμός με τον οποίο μπορεί ένα υγρό να διεισδύσει διαμέσου του πορώδους υλικού (Hall & Hoff, 2012). Όπως το πορώδες και η τριχοειδής υδαταπορροφητικότητα, έτσι και η διαπερατότητα αποτελεί μια έμμεση μέθοδο εκτίμησης της ανθεκτικότητας πορωδών δομικών υλικών.

Για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας, στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, υιοθετήθηκε η μέθοδος που περιγράφεται από τους Green et al., (1999). Για την

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

υλοποίηση της συγκεκριμένης μεθόδου, χρησιμοποιήθηκε ειδική διάταξη που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου. Χρησιμοποιήθηκε ένα κορεσμένο κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου (d) 100 mm και ύψους (h) 200 mm, το οποίο στη συνέχεια τεμαχίστηκε σε μηχάνημα κοπής με οδοντωτό τροχό μέχρι να φτάσει σε πάχος 50 mm. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε μέσα σε τριαξονικό κελί τύπου "Hassler" (Εικόνα 5.24).



**Εικόνα 5.24:** Τριαξονικό κελί "Hassler cell (Green et al., 1999).

Μέσα στο κελί (Εικόνα 5.25 (1)), το κυλινδρικό δοκίμιο περιβλήθηκε από λάστιχο νιτριλίου, το οποίο συμπίεστηκε από νερό. Το κελί συνδέθηκε με συσσωρευτή αζώτου (Εικόνα 5.25 (2)), ώστε να παραμένει για αρκετές ώρες σταθερή η περιβάλλουσα πίεση του δοκιμίου. Επιπρόσθετα, το τριαξονικό κελί συνδέθηκε με χρωματογραφική αντλία (Εικόνα 5.25 (3)), η οποία έχει τη δυνατότητα να παρέχει σταθερή ροή σε ευρύ φάσμα πίεσης. Ο υπολογισμός της διαπερατότητας του δείγματος έγινε αφού μετρήθηκε η πίεση ροής (*fluid pressure*) που δημιουργήθηκε από διάφορες ταχύτητες (*flow rates*) στο δείγμα. Οι μετρήσεις αυτές χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία γραφικής παράστασης, η κλίση της οποίας εισήχθη στην εξίσωση του Darcy (Σχέση (5.19)), έτσι ώστε να υπολογιστεί η διαπερατότητα  $K$  (mm/min) :

$$K = \frac{Q \times L}{\Delta P \times A} = \frac{L}{Gp \times A} \quad (5.19)$$

όπου:

$Q$  = ροή διαμέσου του υλικού (μL/min),

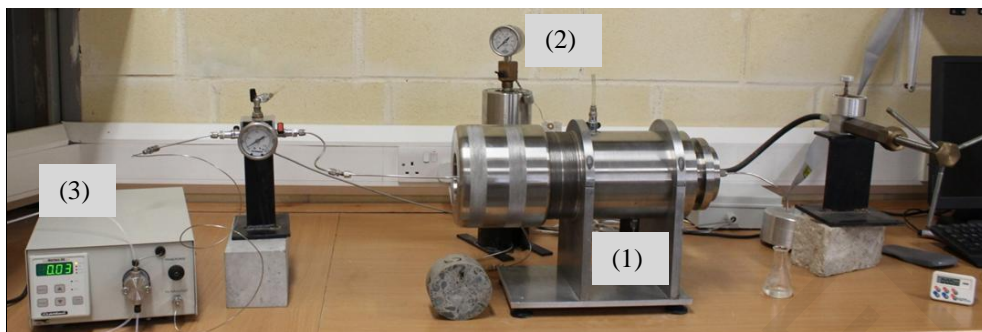
$L$  = μήκος δείγματος (mm),

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

$\Delta P$  = διαφορά πίεσης από την αρχή μέχρι το τέλος του δείγματος (mm H<sub>2</sub>O),

$A$  = διατομή δείγματος (mm<sup>2</sup>),

$G_p$  = κλίση γραφικής παράστασης ( $\Delta P/Q$ ) (mm H<sub>2</sub>O • min /  $\mu$ L).



Εικόνα 5.25: Διάταξη για προσδιορισμό της διαπερατότητας σκυροδέματος (1 = τριαξονικό κελί, "Hassler cell", 2 = συσσωρευτής αζώτου, 3 = χρωματογραφική αντλία).

Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο ίδιο κυλινδρικό δοκίμιο μετά από 28, 56 και 90 ημέρες από την ημερομηνία παρασκευής του.

#### 5.4.1.1 Δοκιμή μέτρησης αντίστασης στη διείσδυση χλωριόντων

Η διάβρωση του χάλυβα θεωρείται ένας από τους σοβαρότερους μηχανισμούς απώλειας φέρουσας ικανότητας μελών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η εν λόγω διάβρωση μπορεί να επέλθει λόγω παρουσίας χλωριόντων (ανεξαρτήτου προελεύσεως) στο εσωτερικό του σκυροδέματος (Hunkeler, 2005).

Η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε στην παρούσα διατριβή προκειμένου να μετρηθεί η αντίσταση των εργαστηριακών σκυροδεμάτων στη διείσδυση χλωριόντων ήταν σύμφωνη με την Αμερικάνικη δοκιμή ASTM C1202. Χρησιμοποιήθηκε ένα κορεσμένο κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου (d) 100 mm και ύψους (h) 200 mm, το οποίο στη συνέχεια τεμαχίστηκε σε μηχανήμα κοπής με οδοντωτό τροχό μέχρι που προέκυψαν τρία κυλινδρικά δοκίμια πάχους 50 mm το καθένα. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν μέσα στα τρία ειδικά κελιά της συσκευής PROOVE'it (Εικόνα 5.26). Το αριστερό τμήμα του κάθε κελιού (κάθοδος) πληρώθηκε με διάλυμα 3% χλωριούχου νατρίου (NaCl), ενώ το δεξί (άνοδος) πληρώθηκε με διάλυμα 0.3N υδροξειδίου του νατρίου (NaOH). Το σύστημα ενώθηκε με τη συσκευή μέσω ηλεκτροδίων και τα δοκίμια υποβλήθηκαν σε ηλεκτρική τάση ισχύος 60 V για 6 ώρες. Η συσκευή κατέγραφε το ηλεκτρικό φορτίο που διερχόταν από τα δοκίμια κάθε 5 λεπτά. Μετά το τέλος της χρονικής περιόδου τα δοκίμια, υπολογίστηκε το συνολικό ηλεκτρικό φορτίο (σε Coulombs) που διαπέρασε τα δοκίμια, το οποίο

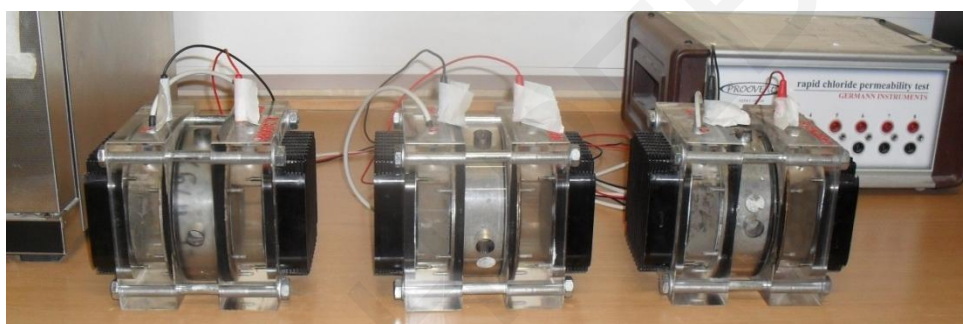


## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

χρησιμοποιήθηκε για την κατάταξη του δείγματος σύμφωνα με τα κριτήρια του προτύπου (Πίνακας 5.9).

**Πίνακας 5.9: Διαπερατότητα χλωριόντων με βάση το ηλεκτρικό φορτίο που διαπέρασε τα δείγματα (ASTM C1202-12).**

Ηλεκτρικό φορτίο (C)	Διαπερατότητα χλωριόντων
>4000	High
4000 - 2000	Moderate
2000 - 1000	Low
1000 -100	Very low
<100	Negligible



**Εικόνα 5.26: Διάταξη για μέτρησης της αντίστασης στη διείσδυση χλωριόντων.**

### 5.4.2 Κονιάματα

#### 5.4.2.1 Σχεδιασμός κονιαμάτων

Σχεδιάστηκαν 16 μίγματα τσιμεντοκονιαμάτων (CM1-CM16), με διαφορετικό είδος λεπτόκοκκου αδρανούς για καθένα από αυτά. Στον Πίνακα 5.2 καταγράφονται τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των κονιαμάτων. Σε όλα τα μίγματα, η αναλογία τσιμέντου (CEM II 32.5R) προς αδρανές ήταν 1:3 (κατά βάρος). Η ποσότητα νερού μεταβαλλόταν για κάθε μίγμα προκειμένου η εργασιμότητα να παραμείνει σταθερή ( $170 \pm 10$  mm). Σημειώνεται ότι η διατήρηση σταθερής εργασιμότητας είναι συνήθης πρακτική στο σχεδιασμό και στην παρασκευή εργαστηριακών κονιαμάτων (EN1015-2), σε αντίθεση με την πρακτική που ακολουθείται στο σχεδιασμό σκυροδέματος, όπου ορίζεται αυστηρά ο λόγος w/c.

5.4.2.2 **Παρασκευή κονιαμάτων**

Για την παρασκευή των κονιαμάτων, αρχικά ζυγίστηκαν με ακρίβεια τα ξηρά υλικά (τσιμέντο και άμμος), και ακολούθως προστέθηκαν στο μηχανικό αναμεικτήρα όπου αναδεύτηκαν για 30 δευτερόλεπτα σε χαμηλές στροφές. Τέλος, προστέθηκε σταδιακά το νερό, το οποίο αναδεύτηκε μαζί με τα ξηρά υλικά για 120 δευτερόλεπτα, έως ότου επήλθε πλήρης ομογενοποίηση του νωπού μίγματος (Εικόνα 5.27).



**Εικόνα 5.27: Προσθήκη νερού και ανάμιξη υλικών για παρασκευή κονιαμάτων.**

Οι αναλογίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των εργαστηριακών κονιαμάτων με διαβασικά αδρανή παρουσιάζονται αναλυτικά στον Πίνακα 5.10, ενώ οι αναλογίες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των κονιαμάτων με ασβεστολιθικά και ασβεσταρενιτικά αδρανή παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.11.



**Πίνακας 5.10: Συνθέσεις κονιαμάτων με διαβασικά αδρανή.**

Κονιάματα	CM1	CM2	CM3	CM7	CM8	CM9	CM10	CM11
Κωδικός Αδρανούς	ΕΠ38	ΕΠ12	ΕΠ13	ΕΠ7	ΕΠ23	ΕΠ27	ΕΠ28	ΕΠ37
Τσιμέντο (kg)	3	3	3	3	3	3	3	3
Άμμος 0/4 (kg)	9	9	9	9	9	9	9	9
Νερό (l)	2.45	1.89	2.27	1.69	1.77	2.19	1.82	2.15
Εργασιμότητα (mm)	165	169	165	165	164	169	170	175
w/c	0.82	0.63	0.76	0.56	0.59	0.73	0.61	0.72

**Πίνακας 5.11: Συνθέσεις κονιαμάτων με ασβεστολιθικά (L) και ασβεσταρενιτικά (C) αδρανή.**

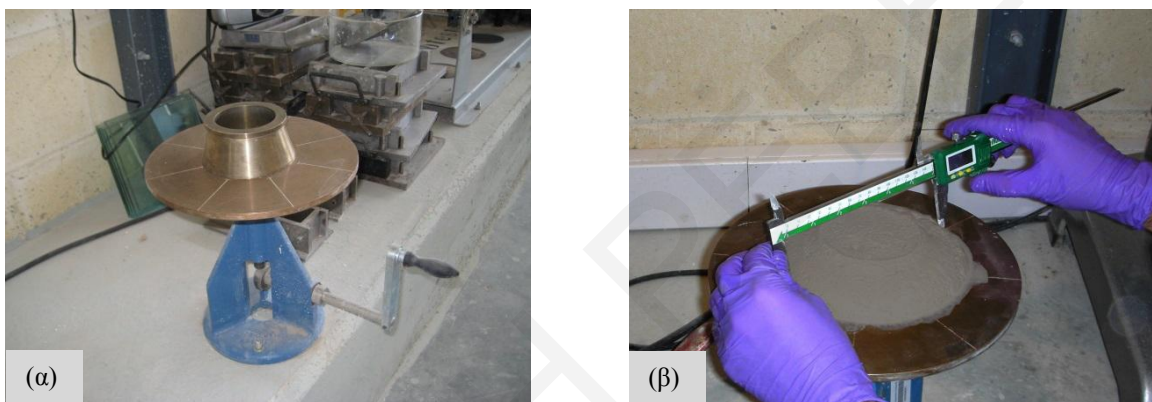
Κονιάματα	CM4	CM5	CM12	CM13	CM14	CM15	CM6	CM16
Κωδικός Αδρανούς	ΕΠ14	ΕΠ4	ΕΠ5	ΕΠ26	ΕΠ34	ΕΠ35	ΕΠ2	ΕΠ32
Ορυκτολογική Σύσταση Αδρανούς	L	L	L	L	L	L	C	C
Τσιμέντο (kg)	3	3	3	3	3	3	3	3
Άμμος 0/4 (kg)	9	9	9	9	9	9	9	9
Νερό (l)	1.50	1.70	2.10	2.03	1.82	1.75	1.78	2.37
Εργασιμότητα (mm)	175	163	171	176	170	172	163	175
w/c	0.50	0.57	0.68	0.61	0.58	0.59	0.70	0.79

#### 5.4.2.3 *Εργασιμότητα κονιαμάτων*

Μετά την ανάμιξη, προσδιορίστηκε η εργασιμότητα του κάθε νωπού μίγματος με τη βοήθεια της τράπεζας εξάπλωσης (Εικόνα 5.28 (α)), σύμφωνα με τις πρόνοιες του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 1015-3. Η συσκευή αυτή αποτελείται από μια μεταλλική βάση, η οποία φέρει ένα έκκεντρο στο κάτω μέρος της, που σε κάθε περιστροφή της λαβής ανασκόνεται και στην συνέχεια αφήνεται να πέσει ελεύθερα.

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

Πριν την έναρξη της δοκιμής, η βάση βρέχθηκε ελαφρώς με νερό και τοποθετήθηκε στο κέντρο της ένας μεταλλικός κόλουρος κώνος, ο οποίος ήταν επίσης ελαφρώς βρεγμένος. Ο κώνος αυτός γέμισε κατά το ήμισυ του με το παρασκευασμένο κονίαμα, το οποίο συμπυκνώθηκε ομοιόμορφα με 10 ελαφριά κτυπήματα με τη βοήθεια μιας πλαστικής ράβδου. Στη συνέχεια, επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία με μια δεύτερη στρώση. Μετά τη συμπύκνωση του νωπού μίγματος, επιπεδώθηκε η επιφάνεια του κονιάματος με μια σπάτουλα. Με το πέρας 15 δευτερολέπτων, ανασηκώθηκε με προσοχή ο κώνος και περιστράφηκε η λαβή της τράπεζας 15 φορές με σταθερό ρυθμό. Τέλος, με τη βοήθεια ενός παχύμετρου μετρήθηκε η διάμετρος του εξαπλωμένου κονιάματος σε δύο, κάθετες μεταξύ τους, διευθύνσεις (Εικόνα 5.28 (β)).



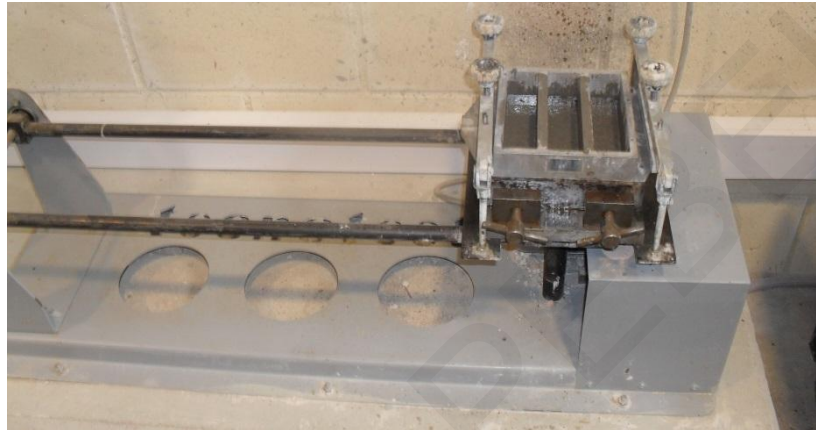
Εικόνα 5.28: Δοκιμή εργασιμότητας: (α) τράπεζα εξάπλωσης, (β) μέτρηση εξάπλωσης κονιάματος.

### 5.4.2.4 Συμπύκνωση και συντήρηση κονιαμάτων

Για την παρασκευή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν πρότυπες και άλλες μεταλλικές μήτρες, οι οποίες αρχικά επικαλύφθηκαν εσωτερικά με λιπαντικό ώστε μετά τη σκλήρυνσή τους να μπορούν τα δοκίμια να αποκολληθούν με ευκολία. Για την κάθε σύνθεση ετοιμάστηκαν δοκαράκια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm, κύλινδροι με διάμετρο (d) 38/100 mm και ύψος (h) 76/200 mm αντίστοιχα, καθώς και κυβικά δοκίμια 50 x 50 mm. Η συμπύκνωση των δοκιμίων έγινε μηχανικά με την χρήση δονητικής τράπεζας. Όσον αφορά τα δοκαράκια, η διαδικασία της συμπύκνωσης ήταν η ακόλουθη: χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά μια τρίδυμη μήτρα, η οποία και τοποθετήθηκε πάνω στη μεταλλική βάση της συσκευής συμπύκνωσης, όπου και στερεώθηκε πολύ καλά. Ακολούθως, τοποθετήθηκε σε κάθε τμήμα της μήτρας μια στρώση κονιάματος, το οποίο και απλώθηκε ομοιόμορφα με τη βοήθεια μιας μεταλλικής σπάτουλας. Τέθηκε σε λειτουργία η συσκευή συμπύκνωσης, η οποία με τη βοήθεια ενός ηλεκτρικού κινητήρα και με ταχύτητα μίας στροφής ανά δευτερόλεπτο ολοκλήρωσε 60 κτύπους (Εικόνα 5.29). Στη

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

συνέχεια, απλώθηκε μια ακόμη στρώση και επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία. Μετά τη συμπίκνωση και της δεύτερης στρώσης, η μήτρα αφαιρέθηκε από τη συσκευή και τοποθετήθηκε προσεκτικά σε δωμάτιο με ελεγχόμενη θερμοκρασία και υγρασία. Επικαλύφθηκε με ένα τεμάχιο από γυαλί για αποφυγή της εξάτμισης του περιεχόμενου νερού (Εικόνα 5.30). Η ίδια διαδικασία συμπίκνωσης ακολουθήθηκε και για τα υπόλοιπα δοκίμια, με εξαίρεση τα μεγαλύτερα κυλινδρικά (διάμετρος = 100 mm και ύψος = 200 mm), όπου το μίγμα τοποθετήθηκε σε τρεις στρώσεις.



**Εικόνα 5.29:** Συμπύκνωση κονιαμάτων στη συσκευή συμπίκνωσης.



**Εικόνα 5.30:** Συντήρηση δοκιμίων κονιαμάτων σε μήτρες που καλύπτονται με γυαλί.

Μετά την πάροδο 24<sup>ωv</sup> ωρών, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τις μήτρες και συντηρήθηκαν σε νερό σε θερμοκρασία 20±2 °C μέχρι και την εκτέλεση των δοκιμών που περιγράφονται πιο κάτω, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν 28, 56 και 90 ημέρες από την ημερομηνία παρασκευής των κονιαμάτων.

#### 5.4.2.5 Δοκιμή αντοχής σε κάμψη

Η δοκιμή αντοχής σε κάμψη 3 σημείων πραγματοποιήθηκε ακολουθώντας τις πρόνοιες του Ευρωπαϊκού προτύπου EN 1015-11. Η αντοχή σε κάμψη λήφθηκε από το μέσο όρο της αντοχής 3 πρισματικών δοκιμίων διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm.

Αρχικά, τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από το νερό, με μια στεγνή πετσέτα απομακρύνθηκε η επιπλέον υγρασία από τις επιφάνειές τους και ζυγίστηκαν. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκαν το καθένα ξεχωριστά στη μηχανή κάμψης, κατά τρόπο ώστε μια από τις πλάγιες έδρες τους (που ακουμπούσαν στα τοιχώματα τις μήτρας) να εδράζεται στους δύο κυλίνδρους στήριξης, ενώ ο κύλινδρος επιβολής του φορτίου να βρίσκεται στο μέσο της παράλληλης έδρας. Ακολούθως, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε φόρτιση με ρυθμό 50 N/s μέχρι που αστόχησε (Εικόνα 5.31). Η αντοχή δοκιμίου σε κάμψη,  $f_{cf}$  (MPa), υπολογίστηκε από την πιο κάτω σχέση (5.20):

$$f_{cf} = 1,5 \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (5.20)$$

όπου:

F = το μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία (N),

l = η απόσταση μεταξύ των στηριγμάτων (100 mm),

b = πλάτος δοκιμίου (mm) = d = ύψος δοκιμίου (mm) = 40 mm.



**Εικόνα 5.31:** Αστοχία πρισματικού δοκιμίου κονιάματος σε καμπτική καταπόνηση.

#### 5.4.2.6 Δοκιμή αντοχής σε θλίψη

Μετά τον έλεγχο της αντοχής σε κάμψη, τα δύο κομμάτια που προέκυψαν από την θραύση του κάθε πρισματικού δοκιμίου τοποθετήθηκαν, ένα κάθε φορά, στη μηχανή

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

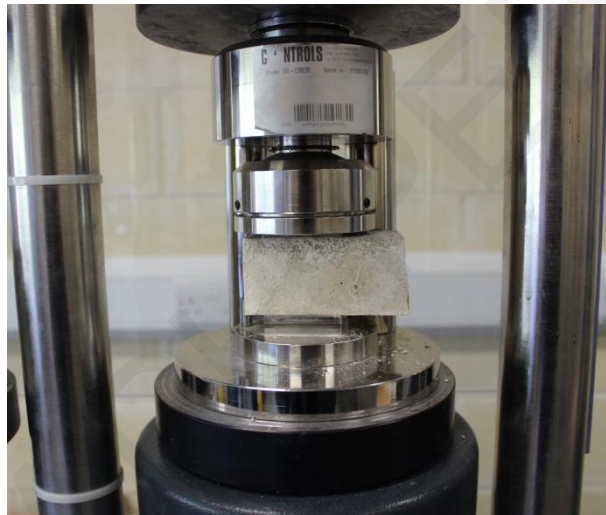
θλίψης για τον υπολογισμό των θλιπτικών αντοχών τους, όπως περιγράφεται στο Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1015-11. Το κάθε δοκίμιο τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δύο τετράγωνα πλάκες φόρτισης ακμής 40 mm (Εικόνα 5.32). Ακολούθως, το δοκίμιο υποβλήθηκε σε φόρτιση με ρυθμό 500 N/s μέχρι που αστόχησε. Η αντοχή σε θλίψη,  $f_c$  (MPa), υπολογίστηκε από την πιο κάτω σχέση (5.21):

$$f_c = \frac{F}{b \times b} \quad (5.21)$$

όπου

$F$  = το μέγιστο φορτίο κατά την αστοχία (N),

$b$  = πλευρά τετραγωνικής διατομής πρίσματος (40 mm).



**Εικόνα 5.32: Δοκίμιο κονιάματος κατά τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη.**

Ως τελικό αποτέλεσμα θεωρήθηκε ο μέσος όρος από 6 μισά δοκίμια.

#### 5.4.2.7 *Δοκιμή προσδιορισμού στατικού μέτρου ελαστικότητας*

Η δοκιμή προσδιορισμού του στατικού μέτρου ελαστικότητας πραγματοποιήθηκε σε κυλινδρικό δοκίμιο μήκους (L) 76 mm και διαμέτρου (d) 38 mm μετά την πάροδο 28, 56 και 90 ημερών από την ημερομηνία παρασκευής του. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν η ίδια με αυτήν που περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.1.8 (βλ. επίσης Εικόνα 5.33). Από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης που προέκυψε υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας,  $E_{C,S}$  (GPa) σύμφωνα με τη σχέση (5.15). Με το τέλος της διαδικασίας υπολογισμού του μέτρου ελαστικότητας, το δοκίμιο φορτίστηκε μέχρι που επήλθε αστοχία.





Εικόνα 5.33: Δοκιμή προσδιορισμού στατικού μέτρου ελαστικότητας κονιαμάτων: (α) επικόλληση ηλεκτρομηκυνσιόμετρων, (β) πειραματική διάταξη.

Για τη διεξαγωγή των πιο πάνω μηχανικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η μηχανή CONTROLS Advantest 9.

#### 5.4.2.8 Δοκιμή προσδιορισμού δυναμικού μέτρου ελαστικότητας

Για τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας χρησιμοποιήθηκε συσκευή υπερήχων Pundit Plus. Η αρχή της δοκιμής βασίζεται στο γεγονός ότι, η ταχύτητα του ήχου,  $V$ , που διαδίδεται μέσω ενός στερεού σώματος, συνδέεται με το μέτρο ελαστικότητας  $E$ , και την πυκνότητα,  $\rho$ , του στερεού μέσου (Τριανταφύλλου, 2013). Λόγω του ότι η διαδικασία αυτή δεν είναι καταστρεπτική, και για τις τρεις χρονικές περιόδους ελέγχου (28, 56 και 90 ημέρες) χρησιμοποιήθηκε το ίδιο κυλινδρικό δοκίμιο.

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η εξής: κυλινδρικό δοκίμιο μήκους ( $L$ ) 76 mm και διαμέτρου ( $d$ ) 38 mm αφαιρέθηκε από το νερό και με μια στεγνή πετσέτα απομακρύνθηκε η επιπλέον υγρασία από την επιφάνειά του. Οι δύο απέναντι επίπεδες πλευρές του κυλίνδρου επικαλύφθηκαν με λεπτό στρώμα λιπαντικού και εφαρμόστηκαν τα βύσματα της συσκευής υπερήχων, ο πομπός στα αριστερά και ο δέκτης στα δεξιά. Τέθηκε σε λειτουργία η εκπομπή υπερήχων παλαμών διαμέσου του δοκιμίου, ενώ ταυτόχρονα στην οθόνη της συσκευής καταγράφηκε σε  $\mu\text{sec}$  ο χρόνος που χρειάστηκε ο παλμός του υπερήχου για να ταξιδέψει διαμέσου του υλικού (Εικόνα 5.34). Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με την καταγραφή του χρόνου  $\Delta t$  στην οθόνη της συσκευής, ενώ σύμφωνα με την πιο κάτω σχέση (5.22) υπολογίστηκε η ταχύτητα διάδοσης του κύματος ( $V$ ):

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (5.22)$$

όπου:

L = το μήκος του δοκιμίου (mm),

$\Delta t$  = το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε το κύμα για να διανύσει το μήκος του δοκιμίου (μsec).

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E_{dyn}$  (GPa) μέσω της πιο κάτω σχέσης (5.23):

$$V = \sqrt{\frac{E_{dyn}}{\rho} \times \frac{(1-\nu)}{(1+\nu) \times (1-2\nu)}} \quad (5.23)$$

όπου :

$\rho$  = η πυκνότητα του υλικού ( $\text{g/cm}^3$ ),

$\nu$  = ο λόγος Poisson,

V = ταχύτητα διάδοσης του κύματος (m/sec).



**Εικόνα 5.34: Προσδιορισμός δυναμικού μέτρου ελαστικότητας κονιάματος.**

#### 5.4.2.9 Δοκιμή ανοικτού πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας

Ο προσδιορισμός του ανοικτού πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας των κονιαμάτων πραγματοποιήθηκε σε πρισματικό δοκίμιο διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm με τη μέθοδο κορεσμού υπό συνθήκες κενού (Hall & Hoff, 2012), όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.1.9 (βλ. επίσης Εικόνα 5.35). Το ανοικτό πορώδες και η φαινόμενη πυκνότητα υπολογίστηκαν με τη βοήθεια των σχέσεων (5.16) και (5.17), αντίστοιχα.

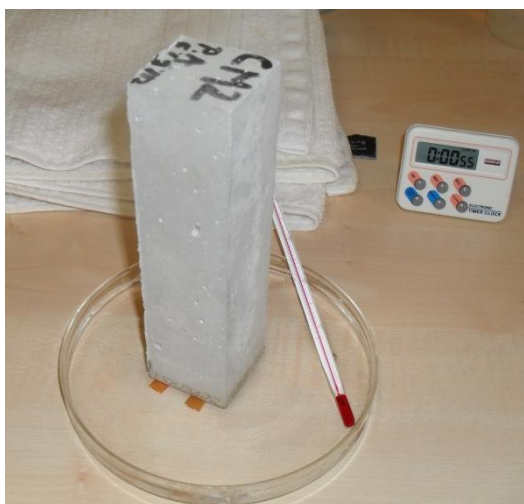


**Εικόνα 5.35:** Δοκιμή προσδιορισμού ανοικτού πορώδους και φαινόμενης πυκνότητας κονιάματος.

#### 5.4.2.10 Δοκιμή τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας

Η δοκιμή τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται από τους Hall & Hoff (2012) στα ίδια πρισματικά δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό του πορώδους και της φαινόμενης πυκνότητας. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.1.10 (βλ. επίσης Εικόνα 5.36). Η δοκιμή, εκτός από τις 28 ημέρες από την ημερομηνία παρασκευής του δοκιμίου, επαναλήφθηκε επίσης στις 56 και στις 90 ημέρες. Ο συντελεστής τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας υπολογίστηκε από την αρχική κλίση γραφικής παράστασης της ποσότητας του νερού που απορροφήθηκε, ανά μονάδα επιφάνειας απορρόφησης, ως συνάρτηση της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, σύμφωνα με τη σχέση (5.18).





Εικόνα 5.36: Δοκιμή προσδιορισμού τριχοειδούς υδαταπορροφητικότητας κονιάματος.

#### 5.4.2.11 Δοκιμή διαπερατότητας

Για τον προσδιορισμό της διαπερατότητας των εργαστηριακών κονιαμάτων, ακολουθήθηκε η μέθοδος που υιοθετήθηκε από τους Green et al., (1999), όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.1.11. Μέσα στο τριαξονικό κελί "Hassler" τοποθετήθηκε κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου (d) 100 mm και ύψους (h) 50 mm. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο ίδιο δοκίμιο στις 28, 56 και 90 ημέρες από την ημερομηνία παρασκευής του.

#### 5.4.2.12 Δοκιμή αντίστασης σε κρυστάλλωση αλάτων

Η δοκιμή αντίστασης σε κρυστάλλωση αλάτων πραγματοποιήθηκε σε 6 μίγματα κονιαμάτων (CM1-CM6). Τα δοκίμια, διαστάσεων  $50 \pm 1$  mm, ξηράθηκαν αρχικά στους  $70 \pm 5$  °C μέχρι που σταθεροποιήθηκε η μάζα τους. Ακολούθως, ζυγίστηκαν χωρίς τα ειδικά καρτελάκια σήμανσης ( $M_d$ ), καθώς και με τα ειδικά καρτελάκια σήμανσης ( $M_{d1}$ ). Για τη δοκιμή χρησιμοποιήθηκε υπερκορεσμένο διάλυμα θειικού μαγνησίου ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ). Η διαδικασία παρασκευής του διαλύματος έγινε σύμφωνα με τις πρόνοιες του Ευρωπαϊκού Προτύπου EN 1367-2 (όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.3.4.1), και η πυκνότητα του διαλύματος, το οποίο χρησιμοποιείται μόνο για ένα κύκλο δοκιμής, κυμαινόταν από 1,284 έως 1,300 g/ml. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε δοχείο και βυθίστηκαν στο διάλυμα για 2 ώρες σε θερμοκρασία  $20 \pm 5$  °C (Εικόνα 5.37). Έπειτα, απομακρύνθηκαν από το διάλυμα και τοποθετήθηκαν για ξήρανση στους  $70 \pm 5$  °C (Εικόνα 5.38). Τα δοκίμια παρέμειναν στο φούρνο συνολικά για τουλάχιστον 16 ώρες. Στη συνέχεια, αφέθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου για  $2 \pm 0,5$  ώρες και βυθίστηκαν ξανά σε

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

νέο διάλυμα θειικού μαγνησίου. Η διαδικασία επαναλήφθηκε άλλες 14 φορές. Τέλος, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε νερό σε θερμοκρασία  $20 \pm 5$  °C για  $24 \pm 1$  ώρες, και έπειτα πλύθηκαν προσεκτικά με τρεχούμενο νερό. Μετά τη ξήρανσή τους σε φούρνο, ζυγίστηκαν και καταγράφηκε η μάζα τους ( $M_f$ ). Τα αποτελέσματα εκφράστηκαν με τη σχετική διαφορά μάζας ( $\Delta M$ ), σύμφωνα με την πιο κάτω σχέση (5.24):

$$\Delta M = \frac{(M_f - M_{d1})}{M_d} \times 100 \quad (5.24)$$

όπου:

$M_f$  = μάζα ξηρού δοκιμίου (g),

$M_{d1}$  = μάζα δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής μαζί με τα ειδικά καρτελάκια σήμανσης (g),

$M_d$  = μάζα δοκιμίου πριν την έναρξη της δοκιμής χωρίς τα ειδικά καρτελάκια σήμανσης (g).



Εικόνα 5.37: Κυβικά δοκίμια εμβαπτισμένα μέσα σε κορεσμένο διάλυμα θειικού μαγνησίου.

Εικόνα 5.38: Κυβικά δοκίμια κατά την φάση ξήρανσης σε φούρνο.

Η φωτογραφική αποτύπωση της αρχικής και τελικής κατάστασης των δοκιμίων επίσης χρησιμοποιήθηκε κατά την εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

#### 5.4.2.13 Αναλυτικές τεχνικές για χαρακτηρισμό κονιαμάτων

Η κυριότερη πρόκληση στον κατασκευαστικό τομέα είναι η δημιουργία λειτουργικών, οικονομικών και ανθεκτικών κατασκευών. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό, μια βασική προϋπόθεση είναι η πλήρης κατανόηση των ιδιοτήτων των χρησιμοποιούμενων υλικών,

### Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

συμπεριλαμβανομένης και της κατάστασης της μικροδομής τους. Αναντικατάστατα εργαλεία για την άμεση παρατήρηση και μελέτη της μικροδομής δοκιμών υλικών παραμένουν οι μικροσκοπικές τεχνικές, όπως το οπτικό μικροσκόπιο και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης. Ο σωστός συνδυασμός των μικροσκοπικών αυτών τεχνικών συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση της δομής των υλικών σε διαφορετικές κλίμακες (Stefanidou et al., 2014).

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM) κατέχει σημαντικό ρόλο στον χαρακτηρισμό της μικροδομής των υλικών που παρασκευάζονται από τσιμέντο (Stutzman, 1994). Το ίδιο ισχύει και για το πολωτικό μικροσκόπιο, αφού εξετάζοντας τη μικροδομή του υλικού παρέχεται μια εις βάθος κατανόηση των ιδιοτήτων του τσιμέντου και των αδρανών (Ahmed, 1994). Τα δύο αυτά μικροσκόπια μπορούν να χρησιμοποιηθούν συνδυαστικά, γιατί παρόλο που η ανάλυση με το πολωτικό μικροσκόπιο θεωρείται ένα ανεκτίμητο εργαλείο για την ταυτοποίηση της σύστασης των ορυκτών, του σχήματος, του μεγέθους τους κ.α., το SEM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καθορίσει την φύση και την χημική δομή των επιβλαβών συστατικών των αδρανών (αργιλικά, οργανικά, σουλφίδια σιδήρου, προσμίξεις θεικών αλάτων κλπ.). Μπορεί επίσης να προσδιορίσει τα επιβλαβή προϊόντα της αντίδρασης των αδρανών με το τσιμέντο, καθώς και το πορώδες και τη συνδεσιμότητα των πόρων των αδρανών. Τέλος, πολύ σημαντική είναι και η εξέταση της μεταβατικής ζώνης μεταξύ αδρανών και τσιμέντου, η οποία θεωρείται η ασθενέστερη συνιστώσα του σκυροδέματος/κονιάματος (Sarkar et al., 2001).

Για το λόγο αυτό, πραγματοποιήθηκαν πετρολογικές αναλύσεις σε συγκεκριμένα δείγματα κονιαμάτων, τα οποία επιλέχθηκαν κυρίως με βάση την θλιπτική τους αντοχή, με την χρήση πολωτικού μικροσκοπίου, καθώς και με την χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης.

#### **5.4.2.13.1 Πολωτικό μικροσκόπιο**

Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, για την παρατήρηση της μικροδομής συγκεκριμένων κονιαμάτων, ετοιμάστηκαν 7 στιλπνές τομές από κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή, 4 από κονιάματα με ασβεστολιθικά αδρανή και 1 από κονίαμα με ασβεσταρενιτικά αδρανή. Οι στιλπνές τομές παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο του Τομέα Ορυκτών Πρώτων Υλών του Τμήματος Γεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών.

Τμήμα από συγκεκριμένα κονιάματα, τα οποία αρχικά υποβλήθηκαν σε δοκιμή αντοχής σε θλίψη και κάμψη, στάλθηκαν στο εργαστήριο του Πανεπιστημίου Πατρών. Από το κάθε δείγμα αφαιρέθηκε η υγρασία, και στη συνέχεια τεμαχίστηκε σε μέγεθος μικρότερο από 3 mm. Ακολούθως, το κάθε δείγμα τοποθετήθηκε σε ειδικές πλαστικές μήτρες και εμποτίστηκε με εποξική ρητίνη σε συνθήκες κενού αέρα. Τέλος, οι τομές λειάνθηκαν και στιλβώθηκαν, ενώ το τελικό πάχος του υλικού έφτασε 30 μm. Για την παρατήρηση των λεπτών τομών χρησιμοποιήθηκε το οπτικό, πετρογραφικό, πολωτικό μικροσκόπιο τύπου Meiji MT9930 (Εικόνα 5.39), ενώ για την αποτύπωση των μικροφωτογραφιών χρησιμοποιήθηκε ψηφιακή φωτογραφική μηχανή και λογισμικό από την εταιρεία Luminera. Οι προδιαγραφές του πολωτικού μικροσκοπίου που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη των εργαστηριακών κονιαμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.0.3 του Παραρτήματος Β.

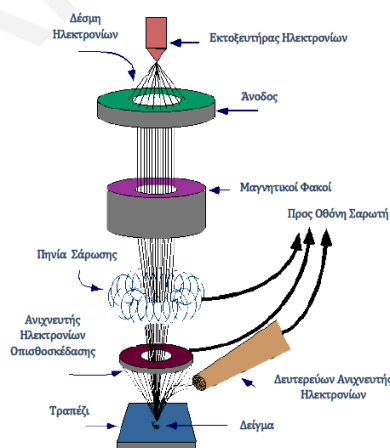


**Εικόνα 5.39: Πολωτικό μικροσκόπιο.**

### 5.4.2.13.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης θεωρείται ένα ισχυρότατο εργαλείο για την εξέταση και ανάλυση της μικροδομής στερεών υλικών (Goldstein et al., 1992). Αποτελεί μια μέθοδο απεικόνισης επιφανειών υψηλής ευκρίνειας, η οποία χρησιμοποιεί μια εστιασμένη δέσμη ηλεκτρονίων μεγάλης ενέργειας, με τον τρόπο που ένα οπτικό μικροσκόπιο χρησιμοποιεί το ορατό φως, για να παράγει τις εικόνες επιφάνειας ενός δείγματος. Ακολούθως, εύκολα ο χειριστής, μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή, μπορεί να ελέγξει και να προσαρμόσει τη δέσμη ώστε να επιτύχει την επιθυμητή μεγέθυνση, καθώς και για να ορίσει την επιφάνεια του δείγματος που πρόκειται να σαρωθεί (Γκοργκόλης, 2015).

Η βασική αρχή λειτουργίας του μικροσκοπίου (Εικόνα 5.40) βασίζεται στην εκπομπή δευτερογενών (SE = Secondary Electrons) ή οπισθοσκεδαζόμενων (BSE = Backscattered Electrons) ηλεκτρονίων από μια επιφάνεια, όταν αυτή σαρώνεται από μια καλά εστιασμένη προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων αρκετά υψηλής ενέργειας. Η ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας της επιφάνειας. Η διακύμανση στην ένταση των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων επηρεάζει τη φωτεινότητα ενός καθοδικού σωλήνα (CRT), ο οποίος σαρώνεται συγχρονισμένα με την προσπίπτουσα δέσμη ηλεκτρονίων. Με τον τρόπο αυτό αναπαράγεται η εικόνα της επιφάνειας στην οθόνη του καθοδικού σωλήνα (Παπατρέχας, 2011).



Εικόνα 5.40: Αρχή λειτουργίας ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (Γκοργκόλης, 2015).

Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης κατασκευάστηκε από τον von Ardenne το 1937 και αποτελεί πλέον μία από τις πιο διαδεδομένες στη σύγχρονη εποχή μορφές ηλεκτρονικής μικροσκοπίας. Οι πολλαπλές δυνατότητες ανάλυσης του δείγματος που παρέχει, σε

## Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

συνδυασμό με την πολύ καλή διακριτική ικανότητά του, το καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για πολλές επιστήμες, από τη βιολογία, τη γεωλογία μέχρι τη μεταλλουργία (Κυριτσάκης, 2014). Εκτός από τις πληροφορίες για την τοπογραφία, τη μορφολογία και τη σύνθεση ενός δείγματος, ένα ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μπορεί να εντοπίσει και να αναλύσει χωρικές μεταβολές στις χημικές συνθέσεις, να παρέχει ποιοτικές χημικές αναλύσεις και να εντοπίσει κρυσταλλικές δομές (Γκοργκόλης, 2015).

Αρκετά είναι τα πλεονεκτήματα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης έναντι του οπτικού μικροσκοπίου, όπως για παράδειγμα το ότι χρησιμοποιεί ηλεκτρομαγνητικούς φακούς συμπίκνωσης, δίνοντας στον ερευνητή μεγαλύτερο έλεγχο του βαθμού μεγέθυνσης. Ένα άλλο σημαντικό χαρακτηριστικό του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης είναι η τρισδιάστατη εμφάνιση της εικόνας του δείγματος, που είναι άμεσο αποτέλεσμα του αισθητά μεγαλύτερου βάθους πεδίου. Επίσης, παρέχει πολύ υψηλή ανάλυση, η οποία επιτυγχάνεται όταν εξετάζονται αντικείμενα με όγκο (Goldstein et al., 1992). Τέλος, χρησιμοποιώντας ένα φασματόμετρο διασποράς ενέργειας ακτινών-X μαζί με το SEM, ο χρήστης μπορεί να έχει πληροφορίες τόσο για την ποιοτική, όσο και για την ποσοτική χημική ανάλυση του δείγματος (Γκοργκόλης, 2015).

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρονική μικροσκοπία προκειμένου να μελετηθούν 7 δείγματα κονιαμάτων, 6 από τα οποία αρχικά είχαν υποστεί τη διαδικασία της κρυστάλλωσης αλάτων, όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.4.2.12. Η τεχνική SEM απαιτεί την χρήση αγώγιμων δειγμάτων για να αποφευχθεί η φόρτιση των επιφανειών μέτρησης που οδηγεί σε αστάθεια στην εικόνα που λαμβάνεται (Lyman et al., 1992). Για το λόγο αυτό, τα μονωτικά δείγματα χρειάζεται να επικαλυφθούν από ένα λεπτό (1-10 nm) αγώγιο επιφανειακό στρώμα. Η επικάλυψη, που πραγματοποιείται με τη βοήθεια συσκευής κενού, συνήθως γίνεται με χρυσό ή άνθρακα σε ατμόσφαιρα αργού (Kozaris et al., 2013). Τα 6 διαφορετικά δείγματα κονιαμάτων που υποβλήθηκαν σε αναλύσεις με τη βοήθεια SEM προέκυψαν μετά από τεμαχισμό του αρχικού κύβου, από όπου λήφθηκε τεμάχιο από την εσωτερική επιφάνεια. Τα τεμάχια αυτά τοποθετήθηκαν στη συσκευή SC7620 Sputter Coater της εταιρείας Quorum και επικαλύφθηκαν με χρυσό. Μετά την ολοκλήρωση της επικάλυψης, επικολλήθηκαν σε ειδικούς δειγματοφορείς και τοποθετήθηκαν στο θάλαμο κενού του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου τύπου JSM-6610LV της εταιρείας Jeol (Εικόνα 5.41). Με τη βοήθεια ανιχνευτών δευτερογενών ηλεκτρονίων, λήφθηκαν εικόνες από την επιφάνεια των δειγμάτων, ενώ σε κάποια δείγματα

Κεφάλαιο 5: Υλικά μελέτης – Μεθοδολογία δοκιμών

πραγματοποιήθηκε και ημι-ποσοτική στοιχειακή ανάλυση μέσω του φασματομέτρου διασποράς ενέργειας ακτινών-X. Οι προδιαγραφές του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης που χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των εργαστηριακών κονιαμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα Β.0.4 του Παραρτήματος Β.



**Εικόνα 5.41: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.**



## 6 Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές προσδιορισμού των γεωμετρικών, φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων, καθώς επίσης και των ιδιοτήτων σε θερμικές και καιρικές μεταβολές, των αδρανών υλικών που ελέγχθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Παρουσιάζονται επιπλέον τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών και των χημικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν.

Ακολούθως, επιχειρείται συσχέτιση της πετρογραφίας και των ιδιοτήτων των αδρανών υλικών, όπως επίσης και των διαφόρων ιδιοτήτων μεταξύ τους, με ανάλυση παλινδρόμησης (*regression analysis*). Σημειώνεται ότι στην απλή γραμμική ανάλυση, ο συντελεστής προσδιορισμού ( $0 < R^2 \leq 1$ ) που χρησιμοποιείται είναι ίσος με το μέτρο του ποσοστού της μεταβλητότητας των τιμών της  $Y$  που υπολογίζεται από τη  $X$  (και αντίστροφα). Όσο πιο κοντά βρίσκεται στη μονάδα, σημαίνει ότι τόσο περισσότερο ποσοστό διακύμανσης της εξαρτημένης μεταβλητής εξηγείται από την παλινδρόμηση, άρα τόσο μεγαλύτερη γραμμική συσχέτιση υπάρχει μεταξύ  $X$  και  $Y$  (Archdeacon, 1994). Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson ( $-1 < r \leq 1$ ) αξιολογεί κατά πόσο υπάρχει συνάφεια μεταξύ δύο μεταβλητών. Συντελεστής  $r = 1$  σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται τέλεια, ενώ  $r = -1$  σημαίνει ότι οι δύο μεταβλητές εξακολουθούν να συσχετίζονται τέλεια, αλλά αντιστρόφως. Αν  $r = 0$ , τότε οι δύο μεταβλητές δεν συσχετίζονται (Sharma, 2005). Μπορεί να γίνει επίσης η εξής διάκριση:

Αν  $-0,3 \leq r < 0,3$ , δεν υπάρχει γραμμική συσχέτιση.

Αν  $-0,5 < r \leq -0,3$  ή  $0,3 \leq r < 0,5$ , υπάρχει ασθενής γραμμική συσχέτιση.

Αν  $-0,7 < r \leq -0,5$  ή  $0,5 \leq r < 0,7$ , υπάρχει μέση γραμμική συσχέτιση.

Αν  $-0,8 < r \leq -0,7$  ή  $0,7 \leq r < 0,8$ , υπάρχει ισχυρή γραμμική συσχέτιση.

Αν  $-1 < r \leq -0,8$  ή  $0,8 \leq r < 1$ , υπάρχει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση (Παπαδόπουλος, 2010).

Στις διάφορες συσχετίσεις καταγράφεται επίσης η τιμή σημαντικότητας ( $p$ -value), που θεωρείται το μικρότερο επίπεδο σημαντικότητας στο οποίο η μηδενική υπόθεση ( $r = 0$ ) μπορεί να απορριφθεί. Δηλαδή είναι η πιθανότητα, αν ίσχυε η μηδενική υπόθεση, να βρίσκαμε ισχυρές αντίθετες ενδείξεις (Bhattacharya & Habtzghi, 2002). Τιμές  $p \leq 0,05$



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

υποδεικνύουν ισχυρές ενδείξεις κατά της μηδενικής υπόθεσης (Elliott & Woodward, 2007).

### **6.1 Ιδιότητες αδρανών υλικών**

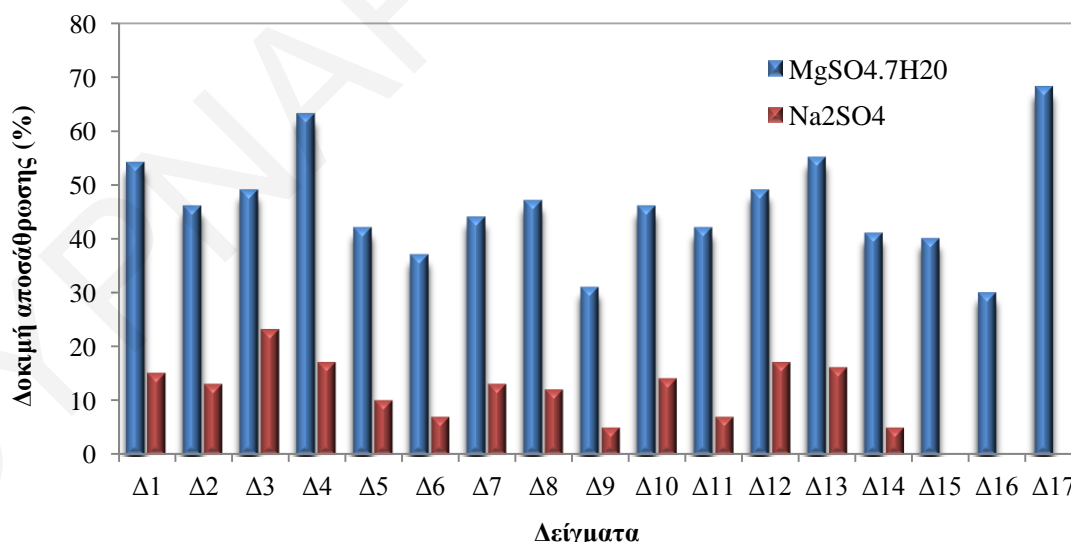
#### **6.1.1 Αποτελέσματα ιδιοτήτων αδρανών υλικών δειγματοληψίας 1<sup>ης</sup> φάσης**

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.2, τα αδρανή υλικά που προσκομίστηκαν στο Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου κατά την 1<sup>η</sup> φάση δειγματοληψίας, που έγινε στα πλαίσια της γενικότερης επιτήρησης της τοπικής αγοράς, υποβλήθηκαν σε δοκιμή αποσάθρωσης με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο EN 1367-2 (Annex C), τόσο με την χρήση διαλύματος επταένδρου θεικού μαγνησίου, όσο και με την χρήση διαλύματος άνυδρου θεικού νατρίου. Επίσης, υποβλήθηκαν σε δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό με βάση τη διαδικασία που περιγράφεται στο πρότυπο EN 1097-6. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1.

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και θειικό νάτριο (EN 1367-2), και απορροφητικότητα σε νερό (WA), σε αδρανή υλικά που δειγματίστηκαν κατά την 1<sup>η</sup> φάση της παρούσας διατριβής.

Δείγμα		EN 1367-2		WA (%)
		MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
Δ1	Ασβεστόλιθος	54	15	2,3
Δ2	Ασβεσταρενίτης	46	13	1,6
Δ3	Ασβεσταρενίτης	49	23	2,1
Δ4	Ασβεστόλιθος	63	17	2,4
Δ5	Διαβάσης	42	10	3,5
Δ6	Διαβάσης	37	7	2,0
Δ7	Διαβάσης	44	13	3,9
Δ8	Διαβάσης	47	12	4,0
Δ9	Διαβάσης	31	5	2,5
Δ10	Διαβάσης	46	14	3,6
Δ11	Διαβάσης	42	7	2,5
Δ12	Ασβεσταρενίτης	49	17	1,2
Δ13	Ασβεστόλιθος	55	16	3,4
Δ14	Διαβάσης	41	5	2,4
Δ15	Διαβάσης	40	n/a	1,3
Δ16	Διαβάσης	30	n/a	1,8
Δ17	Ασβεστόλιθος	68	n/a	0,3



Διάγραμμα 6.1: Σύγκριση αποτελεσμάτων συντελεστή αποσάθρωσης με την χρήση επταένυδρου θειικού μαγνησίου (MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) και άνυδρου θειικού νατρίου (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

Από τα αποτελέσματα (Πίνακας 6.1 και Διάγραμμα 6.1) προκύπτει ότι, σε όλες τις περιπτώσεις, ο συντελεστής αποσάθρωσης με την χρήση επταένυδρου θειικού μαγνησίου

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

είναι αρκετά μεγαλύτερος, σε σχέση με τον αντίστοιχο συντελεστή με την χρήση άνυδρου θεικού νατρίου. Όπως επιβεβαιώνεται από τη βιβλιογραφία (Forster, 1994; Basista & Weglewski, 2009), το θεικό μαγνήσιο είναι γενικά πιο καταστρεπτικό σε σχέση με το θεικό νάτριο. Στην προκειμένη περίπτωση, όμως, η κατά μέσο όρο  $4,27 (\pm 1,61)$  φορές μεγαλύτερη απώλεια υλικού που προκύπτει με την χρήση θεικού μαγνησίου, μάλλον οφείλεται στην αρκετά ψηλότερη συγκέντρωση του διαλύματος θεικού μαγνησίου (2,8 M σε αντίθεση με 0,6 M του διαλύματος θεικού νατρίου) που χρησιμοποιήθηκε ακολουθώντας τις οδηγίες του ASTM C88 (Ioannou et al., 2013). Αυτό το γεγονός αδιαμφισβήτητα υποδηλώνει ότι περισσότερη ποσότητα άλατος ήταν διαθέσιμη για κρυστάλλωση μέσα στους πόρους των αδρανών. Όπως αναφέρουν αρκετοί ερευνητές (Rodriguez-Navarro & Doehne, 1999; Scherer, 2004), ένας από τους λόγους που προκαλείται ζημιά στα πορώδη υλικά από κρυστάλλωση των αλάτων είναι ο υπερκορεσμός του διαλύματος. Πέρα από αυτό, ο θεικονάτριο (άνυδρο θεικό νάτριο) επίσης μπορεί να υπερκορεστεί σε χαμηλή σχετική υγρασία και θερμοκρασία ( $<32^{\circ}\text{C}$ ) (Flatt, 2002). Ωστόσο, λόγω του χαμηλού ιξώδους που παρουσιάζει, δεν είναι τόσο καταστροφικός όσο το θεικό μαγνήσιο. Συγκεκριμένα, ο εμποσίτης ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) για συγκέντρωση 20% w/w παρουσιάζει κινηματικό ιξώδες 3,400 cS (ή δυναμικό ιξώδες 4,147 cP), ενώ το άνυδρο θεικό νάτριο ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), για συγκέντρωση 16% w/w, παρουσιάζει δυναμικό ιξώδες 1,812 cP. Το υψηλότερο ιξώδες του κορεσμένου θεικού μαγνησίου οδηγεί σε βραδύτερη ροή διαμέσου των τριχοειδών κατά τη διάρκεια της ξήρανσης των αδρανών, σε σύγκριση με τη ροή του κορεσμένου θεικού νατρίου, το οποίο έχει χαμηλότερο ιξώδες (Ioannou et al., 2013). Η βραδύτερη ροή διαλύματος άλατος επιτρέπει την ταχύτερη εξάτμιση παρά αναπλήρωση του διαλύματος μέσω της τριχοειδούς μετανάστευσης που γίνεται από το εσωτερικό του υλικού. Αυτό συμβάλει σε γρήγορο υπερκορεσμό, κρυστάλλωση τόσο σε μικρούς, όσο και σε μεγάλους πόρους, εντός της μικροδομής του αδρανούς, και άρα μεγαλύτερη ζημιά στο εσωτερικό του υλικού (Lewin, 1981). Αντίθετα, η ταχύτερη ροή οδηγεί σε κρυστάλλωση σε μεγαλύτερους πόρους, κοντά ή πάνω στην επιφάνεια των υλικών. Αυτή η θέση/μορφή κρυστάλλωσης ελαχιστοποιεί τη ζημιά που προκαλείται στο υλικό (Ruiz-Agudo et al., 2007).

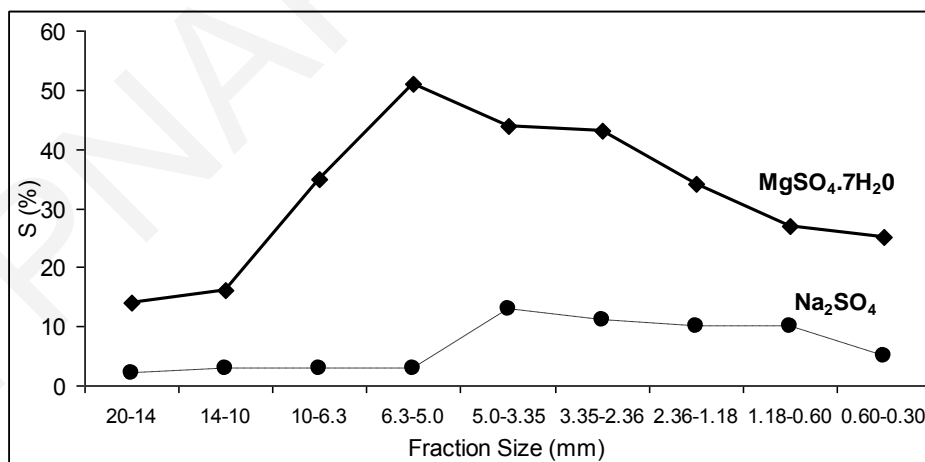
Από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 6.1 και στο Διάγραμμα 6.1, αξιοσημείωτο είναι και το γεγονός ότι οι συντελεστές αποσάθρωσης με την χρήση επταένυδρου θεικού μαγνησίου κυμαίνονται από 30% έως 68%. Μόνο ένα (Δ9) από τα δεκαεπτά δείγματα που ελέγχθηκαν παρουσίασε ποσοστό απώλειας  $<35\%$ , που είναι και

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

το ανώτατο επιτρεπτό όριο απώλειας που θα μπορούσε να θεσπιστεί με βάση το EN 12620. Από τα πιο πάνω, προκύπτει ότι η δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θειικού μαγνησίου παρουσιάζει πολύ ψηλά ποσοστά απώλειας σε τοπικά λεπτόκοκκα αδρανή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να κρίνεται ακατάλληλη για τα συγκεκριμένα αδρανή. Σημειώνεται ότι, σύμφωνα με το EN 1367-2, η δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θειικού μαγνησίου είναι υποχρεωτική μόνο για το κλάσμα 10-14 mm. Επιπρόσθετα, αρκετοί ερευνητές (Rogers et al., 1991) επίσης θεωρούν τη δοκιμή ακατάλληλη για λεπτόκοκκα αδρανή.

Όσον αφορά το άνυδρο θειικό νάτριο, τα αποτελέσματα που καταγράφηκαν (Πίνακας 6.1 και Διάγραμμα 6.1) κυμαίνονται από 5% έως 23%. Αν ληφθούν υπόψη τα όρια που ίσχυαν στην Κύπρο όταν η δοκιμή αποσάθρωσης γινόταν με βάση το CYS 64 (δηλαδή 10%), τότε μόνο τέσσερα (Δ6, Δ9, Δ11 και Δ14) από τα δεκατέσσερα δείγματα θεωρούνται αποδεκτά. Αυτό επιβεβαιώνει ότι η δοκιμή αποσάθρωσης κατά EN 1367-2 μάλλον πρέπει να θεωρείται ακατάλληλη για τον έλεγχο λεπτόκοκκων αδρανών υλικών.

Από τα αποτελέσματα των Ιοαννου et al. (2011) σε διαβασικά αδρανή, φαίνεται (Διάγραμμα 6.2) ότι το ποσοστό απώλειας υλικού στη δοκιμή αποσάθρωσης είναι αισθητά μεγαλύτερο για τα λεπτόκοκκα αδρανή (<5 mm), σε σύγκριση με την απώλεια που παρατηρείται στα χονδρόκοκκα αδρανή. Αυτό εξηγεί γιατί η δοκιμή θεωρείται ακατάλληλη για τον έλεγχο λεπτόκοκκων αδρανών υλικών.



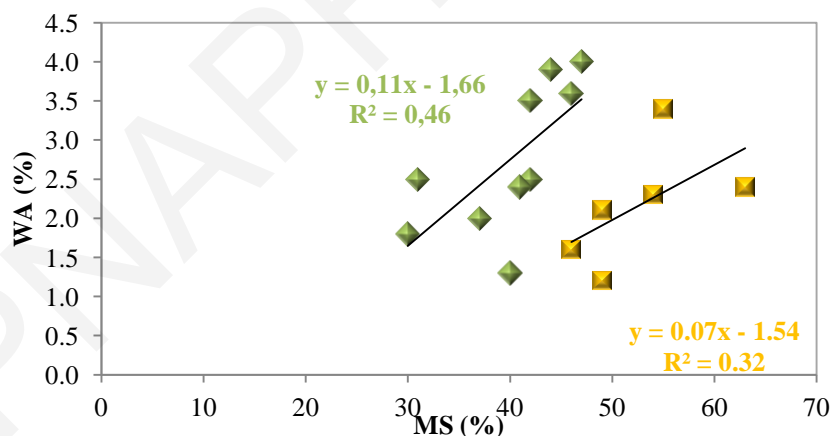
**Διάγραμμα 6.2:** Αποτελέσματα δοκιμής αποσάθρωσης (S) με την χρήση MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O και Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> κατά EN 1367-2:1998 (Ιοαννου et al., 2011).

Στον Πίνακα 6.1 παρουσιάζονται επίσης τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό (WA). Όπως προκύπτει από αυτά τα αποτελέσματα, κανένα από τα δείγματα που ελέγχθηκαν δεν υπερβαίνει το καθορισμένο από την Κ.Δ.Π. 164/2011

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

ανώτατο όριο (4%) που αφορά την απορροφητικότητα σε νερό για αδρανή που χρησιμοποιούνται σε σκυρόδεμα και κονιάματα (Πίνακας Α.0.1 και Πίνακας Α.0.2, του Παραρτήματος Α). Παρόλα αυτά, είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι το 82% των υπό εξέταση δειγμάτων παρουσιάζει αρκετά ψηλό ποσοστό απορροφητικότητας (>1,5%). Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2 (παράγραφος 2.4.3.1), παρά τις εξαιρέσεις που έχουν διαπιστωθεί (Brandes et al., 2011), η απορροφητικότητα των αδρανών υλικών παγκοσμίως, ανεξαρτήτως σύστασης, κυμαίνεται γενικά στα χαμηλά αποδεκτά όρια (<1,5%) που ορίζουν υλικά καλής ποιότητας (Kazi & Al-Mansour, 1980; Zarif & Tugrul, 2003; Korkanc & Tugrul, 2004; Aquino et al., 2010; Cortas et al., 2014). Αντίθετα, τα αδρανή υλικά της Κύπρου διακρίνονται για τις σχετικά ψηλές τιμές απορροφητικότητάς τους (Ioannou et al., 2010; Fournari et al., 2015). Αυτό καθιστά τον περαιτέρω έλεγχο τους αναγκαίο, προκειμένου να διαπιστωθεί η ποιότητά τους, και η επίδραση αυτής στις ιδιότητες σύνθετων δομικών υλικών.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του συντελεστή αποσάθρωσης (MS) με αυτά της απορροφητικότητας σε νερό (WA) (Διάγραμμα 6.3), παρατηρείται καλύτερη συσχέτιση ( $r = 0,68$ ,  $p = 0,032 < 0,05$ ) για τα διαβασικά αδρανή, παρά για τα ανθρακικά ( $r = 0,57$ ,  $p = 0,241 > 0,05$ ). Σε κάθε περίπτωση όμως, η συσχέτιση δεν θεωρείται ισχυρή.



**Διάγραμμα 6.3:** Συσχετισμός αποσάθρωσης θεικού μαγνησίου (MS) και απορροφητικότητας σε νερό (WA) (πράσινο: διαβασικά δείγματα, πορτοκαλί: ανθρακικά δείγματα).

Οι Fowler et al. (2006) αναφέρουν ότι έγιναν πολλές προσπάθειες από διάφορους μελετητές για να συνδέσουν την απορροφητικότητα με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό νάτριο, χωρίς ιδιαίτερη επιτυχία. Οι Xirouchakis & Theodoropoulos (2009) παρατήρησαν ασθενή συσχέτιση ( $r = 0,20$ ) μεταξύ των δύο ιδιοτήτων σε ασβεστολιθικά αδρανή. Χαμηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2 = 0,30$ ) παρατήρησε και ο Williamson (2005),

### Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

μετά από σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό νάτριο και απορροφητικότητα. Ο πιο πάνω ερευνητής σχολίασε ότι αυτό οφείλεται στο ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό νάτριο παρουσιάζουν μεγάλη μεταβλητότητα. Καλύτερες συσχετίσεις μεταξύ των δύο προαναφερθεισών ιδιοτήτων παρατήρησαν οι Koukis et al. (2007) σε χαλαρές αποθέσεις και ιζηματογενή πετρώματα και ο Goswami (1984) σε όξινα πυριγενή πετρώματα, οι οποίοι αναφέρουν ότι πετρώματα τα οποία έχουν αυξημένες τιμές απορροφητικότητας αναμένεται να είναι ιδιαίτερα επιδεκτικά στην αποσάθρωση. Επίσης, ισχυρή είναι η συσχέτιση ( $r = 0,77$ ) που παρατήρησαν οι Rigoroulos et al. (2013) μεταξύ των δοκιμών απορροφητικότητας και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο σε πυριγενή πετρώματα.

#### **6.1.2 Αποτελέσματα ιδιοτήτων αδρανών υλικών δειγματοληψίας 2<sup>ης</sup> φάσης**

Στα αδρανή υλικά που δειγματίστηκαν κατά τη 2<sup>η</sup> φάση της παρούσας διατριβής, πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές που περιγράφονται στην ενότητα 5.3. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν καταγράφονται στον πιο κάτω πίνακα (Πίνακας 6.2). Επιπλέον, στον Πίνακα 6.3 παρατίθενται τα αποτελέσματα των ημι-ποσοτικών ορυκτολογικών αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν. Στις Εικόνες Γ.0.1, Γ.0.2 και Γ.0.3 του Παραρτήματος Γ παρουσιάζονται τα ακτινογραφήματα των δειγμάτων.

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 6.2: Αποτελέσματα δοκιμών ισοδύναμου άμμου (SE), μπλε του μεθυλενίου (MB), απορροφητικότητας σε νερό (WA), αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και νάτριο (SS), αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD), φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ), ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) και κορεσμένης και επιφανειακά ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{ssd}$ ) σε αδρανή υλικά που δειγματολήφθηκαν κατά τη 2<sup>η</sup> φάση της παρούσας διατριβής.

Δείγμα		SE (%)	MB (g/kg)	WA (%)	MS (%)	SS (%)	MD (%)	$\rho_a$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{rd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{ssd}$ (Mg/m <sup>3</sup> )
Διαβάσης	ΕΠ 1	28	2,2	2,1	34	5	18,0	2,78	2,62	2,68
	ΕΠ 3	53	1,2	2,1	38	7	17,1	2,78	2,62	2,68
	ΕΠ 7	63	1,0	2,1	33	3	17,6	2,85	2,68	2,74
	ΕΠ 11	65	1,2	2,8	32	5	17,6	2,79	2,58	2,66
	ΕΠ 12	41	1,5	2,5	24	4	16,3	2,79	2,60	2,67
	ΕΠ13	50	2,7	3,3	36	11	21,4	2,78	2,54	2,63
	ΕΠ23	83	1,5	2,4	20	6	16,3	2,81	2,63	2,69
	ΕΠ27	34	3,0	1,3	26	5	16,1	2,82	2,72	2,76
	ΕΠ28	36	2,7	2,0	31	9	17,8	2,85	2,70	2,75
	ΕΠ30	73	2,0	3,0	32	16	15,6	2,81	2,59	2,67
	ΕΠ36	64	1,5	2,6	42	17	20,6	2,79	2,60	2,66
	ΕΠ37	35	2,5	2,7	51	23	20,0	2,79	2,59	2,66
ΕΠ38 <sup>1</sup>	66	3,7	3,7	61	12	27,0	2,77	2,51	2,61	
Ασβεστόλιθος	ΕΠ 4	77	0,2	3,0	63	13	36,1	2,73	2,52	2,59
	ΕΠ 5	76	0,2	1,5	68	8	38,5	2,84	2,72	2,76
	ΕΠ 8	75	0,5	1,5	29	2	15,5	2,80	2,68	2,73
	ΕΠ10	66	0,8	2,5	45	10	19,1	2,79	2,60	2,67
	ΕΠ14	87	0,2	1,0	14	4	14,4	2,71	2,64	2,66
	ΕΠ15	75	0,7	1,8	29	7	20,7	2,71	2,58	2,63
	ΕΠ25	72	1,0	1,4	47	16	36,5	2,72	2,62	2,66
	ΕΠ26	79	0,2	1,2	60	16	31,2	2,75	2,66	2,69
	ΕΠ29	63	2,5	2,4	41	18	32,2	2,72	2,56	2,62
	ΕΠ33	85	0,5	1,4	37	5	19,4	2,68	2,58	2,62
	ΕΠ34	67	2,0	0,3	39	15	23,8	2,73	2,70	2,71
	ΕΠ35	79	0,2	0,8	53	10	23,2	2,79	2,73	2,75
Ασβεστοαργίτης	ΕΠ 2	77	1,0	1,5	45	9	19,7	2,71	2,60	2,64
	ΕΠ 6	68	1,0	1,9	42	10	22,1	2,72	2,58	2,63
	ΕΠ 9	78	1,2	1,2	40	14	19,3	2,70	2,61	2,65
	ΕΠ24	71	1,2	1,5	36	14	22,4	2,71	2,60	2,64
	ΕΠ31	74	1,7	1,7	42	13	18,6	2,72	2,60	2,65
	ΕΠ32	64	1,7	3,3	49	16	25,2	2,72	2,50	2,58

<sup>1</sup> το διαβαστικό αδρανές ΕΠ38 αποτελεί δείγμα αναφοράς αδρανούς “κακής” ποιότητας.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

**Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα ορυκτολογικών αναλύσεων (XRD).**

Δείγματα	Ορυκτολογικές αναλύσεις
<b>Διαβασικά Αδρανή</b>	
<b>ΕΠ 1</b>	Αλβίτης (33%), Χλωρίτης (27%), Χαλαζίας (17%), Ανορθίτης (9%), Ασβεστίτης (5%), Αυγίτης (4%), Πυρολουσίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Ακτινόλιθος (1%), Νατρόλιθος (1%), Χαλκοπυρίτης (1%), Πυρίτης (ίχνη), Μαγνητίτης (ίχνη), Ανάλκιμο (ίχνη), Νοντρονίτης (ίχνη) και Τιτανίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ 3</b>	Ανορθίτης (22%), Αλβίτης (21%), Χλωρίτης (17%), Ακτινόλιθος (9%), Χαλαζίας (7%), Λωμοντίτης (6%), Αυγίτης (6%), Ασβεστίτης (5%), Ανάλκιμο (3%), Χαβαζίτης (2%), Επίδοτο (1%), Τιτανίτης (1%), Μαγνητίτης (ίχνη), Χαλκοπυρίτης (ίχνη), Αιματίτης (ίχνη) και Πυρίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ 7</b>	Αλβίτης (39%), Χλωρίτης (16%), Χαλαζίας (12%), Ανορθίτης (11%), Ακτινόλιθος (6%), Επίδοτο (4%), Αυγίτης (4%), Μαγνητίτης (2%), Νατρόλιθος (2%), Ασβεστίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Τιτανίτης (1%), Πυρίτης (ίχνη), Ιμμενίτης (ίχνη), Χαλκοπυρίτης (ίχνη) και Απατίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ 11</b>	Ανορθίτης (25%), Αλβίτης (22%), Χλωρίτης (18%), Ακτινόλιθος (8%), Λωμοντίτης (6%), Χαλαζίας (6%), Αυγίτης (4%), Ασβεστίτης (4%), Ανάλκιμο (2%), Χαβαζίτης (2%), Επίδοτο (1%), Μαγνητίτης (ίχνη), Τιτανίτης (ίχνη), Ιλλίτης (ίχνη), Πυρίτης (ίχνη), Αιματίτης (ίχνη) και Χαλκοπυρίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ 12</b>	Ανορθίτης (26%), Ακτινόλιθος (25%), Αλβίτης (15%), Λωμοντίτης (11%), Νατρόλιθος (5%), Χλωρίτης (5%), Χαλαζίας (3%), Ανάλκιμο (3%), Ασβεστίτης (2%), Επίδοτο (2%), Αυγίτης (2%), Τιτανίτης (1%), Ιμμενίτης (ίχνη) και Ιλλίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ13</b>	Αλβίτης (27%), Χλωρίτης (22%), Ανορθίτης (15%), Χαλαζίας (10%), Ακτινόλιθος (8%), Αυγίτης (6%), Ασβεστίτης (5%), Ανάλκιμο (3%), Τιτανίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Επίδοτο (1%), Χαλκοπυρίτης (1%), Μοντμορϋλλονίτης (ίχνη) και Μαγνητίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ23</b>	Ανορθίτης (26%), Ακτινόλιθος (23%), Αλβίτης (22%), Χλωρίτης (10%), Χαλαζίας (6%), Αυγίτης (4%), Ανάλκιμο (3%), Λωμοντίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Ασβεστίτης (1%), Τιτανίτης (1%), Σοδάλιθος (1%), Χαλκοπυρίτης (1%), Μαγνητίτης (ίχνη) και Πυρίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ27</b>	Χλωρίτης (27%), Αλβίτης (27%), Ανορθίτης (12%), Χαλαζίας (12%), Ακτινόλιθος (8%), Ασβεστίτης (4%), Αυγίτης (4%), Νατρόλιθος (2%), Μαγνητίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Πυρολουσίτης (1%), Νοντρονίτης (1%), Μοντμορϋλλονίτης (ίχνη), Πυρίτης (ίχνη), Τιτανίτης (ίχνη) και Χαλκοπυρίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ28</b>	Αλβίτης (31%), Χλωρίτης (24%), Ανορθίτης (12%), Χαλαζίας (10%), Ακτινόλιθος (9%), Επίδοτο (4%), Αυγίτης (3%), Νατρόλιθος (2%), Μαγνητίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Νοντρονίτης (1%), Πυρίτης (ίχνη), Ασβεστίτης (ίχνη), Χαλκοπυρίτης (ίχνη) και Ρουτίλιο (ίχνη).
<b>ΕΠ30</b>	Ανορθίτης (24%), Ακτινόλιθος (22%), Χλωρίτης (13%), Αυγίτης (12%), Αλβίτης (10%), Ανάλκιμο (7%), Χαλαζίας (5%), Νατρόλιθος (3%), Χαβαζίτης (2%), Ασβεστίτης (1%), Χαλκοπυρίτης (1%), Επίδοτο (ίχνη), Τιτανίτης (ίχνη), Ιμμενίτης (ίχνη), Σοδάλιθος (ίχνη) και Χρωμίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ36</b>	Ακτινόλιθος (24%), Αλβίτης (22%), Ανορθίτης (17%), Χλωρίτης (14%), Λωμοντίτης (8%), Αυγίτης (4%), Ανάλκιμο (3%), Χαβαζίτης (2%), Χαλαζίας (2%), Νατρόλιθος (2%), Ασβεστίτης (1%), Τιτανίτης (ίχνη), Μαγνητίτης (ίχνη), Πυρίτης (ίχνη) και Χαλκοπυρίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ37</b>	Αλβίτης (29%), Χλωρίτης (19%), Λωμοντίτης (15%), Ακτινόλιθος (13%), Ανορθίτης (11%), Αυγίτης (4%), Χαλαζίας (4%), Χαβαζίτης (2%), Ασβεστίτης (1%), Επίδοτο (1%), Χαλκοπυρίτης (ίχνη), Πυρίτης (ίχνη), Ανάλκιμο (ίχνη), Μαγνητίτης (ίχνη) και Χρωμίτης (ίχνη).
<b>ΕΠ38</b>	Ανορθίτης (32%), Χλωρίτης (17%), Αλβίτης (17%), Ακτινόλιθος (13%), Χαλαζίας (8%), Αυγίτης (3%), Λωμοντίτης (2%), Τιτανίτης (1%), Μαγνητίτης (1%), Χαβαζίτης (1%), Σοδάλιθος (1%), Μοντμορϋλλονίτης (1%), Χαλκοπυρίτης (ίχνη), Πυρίτης (ίχνη) και Ασβεστίτης (ίχνη).



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

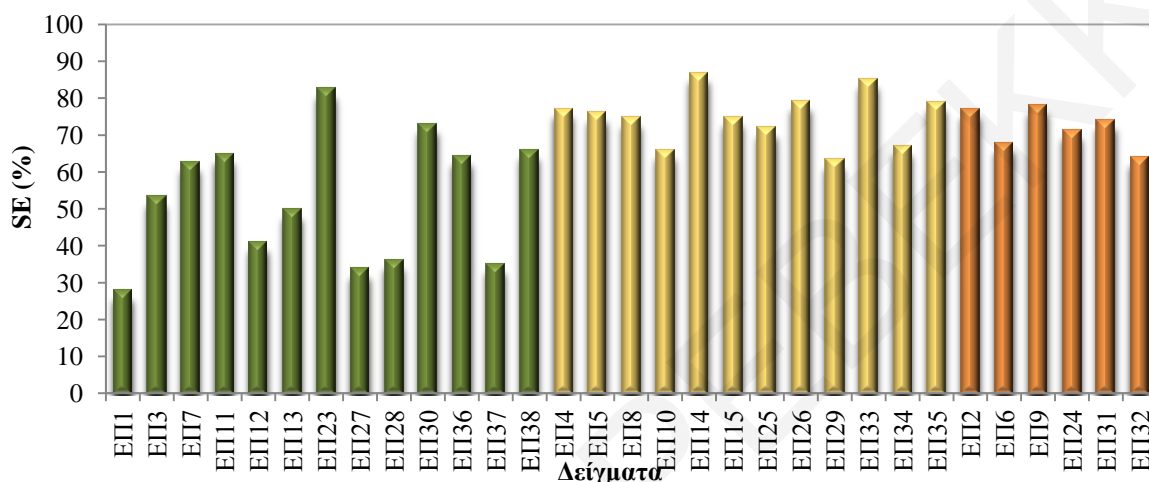
Δείγματα	Ορυκτολογικές αναλύσεις
<b>Ασβεστολιθικά Αδρανή<sup>2</sup></b>	
ΕΠ 4	Ασβεστίτης (61%), Δολομίτης (38%), Αλίτης (1%), Μαγνησίτης (ίχνη), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ 5	Ασβεστίτης (58%), Δολομίτης (39%), Αλίτης (1%), Μαγνησίτης (1%), Μοσχοβίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ 8	Δολομίτης (83%), Ασβεστίτης (16%), Μαγνησίτης (1%), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ10	Δολομίτης (76%), Ασβεστίτης (24%), Μαγνησίτης (ίχνη), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ14	Ασβεστίτης (98%), Δολομίτης (1%), Χαλαζίας (1%) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ15	Ασβεστίτης (95%), Δολομίτης (4%), Μοσχοβίτης (ίχνη), Χαλαζίας (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ25	Ασβεστίτης (86%), Δολομίτης (6%), Μοσχοβίτης (6%), Χαλαζίας (1%), Μαγνησίτης (1%), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ26	Δολομίτης (49%), Ασβεστίτης (47%), Μοσχοβίτης (2%), Αλίτης (1%), Μαγνησίτης (1%), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ29	Ασβεστίτης (82%), Δολομίτης (9%), Μοσχοβίτης (7%), Χαλαζίας (2%), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ33	Ασβεστίτης (95%), Δολομίτης (3%), Χαλαζίας (1%), Μοσχοβίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ34	Ασβεστίτης (61%), Δολομίτης (34%), Μοσχοβίτης (4%), Χαλαζίας (1%), Μαγνησίτης (1%) και Νοντρονίτης (ίχνη).
ΕΠ35	Δολομίτης (67%), Ασβεστίτης (30%), Μαγνησίτης (1%), Μοσχοβίτης (1%), Αλίτης (1%), Ανυδρίτης (ίχνη) και Νοντρονίτης (ίχνη).
<b>Ασβεσταρενιτικά Αδρανή<sup>3</sup></b>	
ΕΠ 2	Ασβεστίτης (52%), Αλβίτης (17%), Χαλαζίας (12%), Ανορθίτης (6%), Δολομίτης (4%), Τιτανίτης (3%), Χλωρίτης (2%), Ακτινόλιθος (1%), Μοσχοβίτης (1%) και Μοντμοριλλονίτης (1%).
ΕΠ 6	Ασβεστίτης (49%), Χαλαζίας (14%), Αλβίτης (14%), Ανορθίτης (8%), Δολομίτης (5%), Τιτανίτης (3%), Μοσχοβίτης (2%), Χλωρίτης (2%), Ακτινόλιθος (1%) και Μοντμοριλλονίτης (1%).
ΕΠ 9	Ασβεστίτης (47%), Αλβίτης (17%), Χαλαζίας (12%), Ανορθίτης (8%), Δολομίτης (5%), Μοσχοβίτης (4%), Χλωρίτης (3%), Τιτανίτης (3%), Ακτινόλιθος (1%) και Μοντμοριλλονίτης (ίχνη).
ΕΠ24	Ασβεστίτης (37%), Αλβίτης (19%), Χαλαζίας (15%), Ανορθίτης (11%), Δολομίτης (5%), Μοσχοβίτης (4%), Τιτανίτης (4%), Χλωρίτης (3%), Ακτινόλιθος (2%), Αλίτης (1%), Μοντμοριλλονίτης (ίχνη) και Ιλλίτης (ίχνη).
ΕΠ31	Ασβεστίτης (43%), Αλβίτης (18%), Χαλαζίας (12%), Ανορθίτης (7%), Δολομίτης (7%), Τιτανίτης (3%), Μοσχοβίτης (3%), Χλωρίτης (2%), Ακτινόλιθος (2%), Μοντμοριλλονίτης (1%), Σελεστίνης (1%) και Χρωμίτης (ίχνη).
ΕΠ32	Ασβεστίτης (82%), Αλβίτης (3%), Μοντμοριλλονίτης (3%), Χαλαζίας (3%), Δολομίτης (2%), Τιτανίτης (2%), Ανορθίτης (1%), Σελεστίνης (1%), Μοσχοβίτης (1%), Χαλκοπυρίτης (1%), Χλωρίτης (1%) και Ακτινόλιθος (ίχνη).

<sup>2</sup> Παρά το γεγονός ότι τα πλείστα δείγματα περιέχουν δολομίτη σε ποσοστό >10% και έπρεπε να χαρακτηρίζονται ως δολομιτικοί ασβεστόλιθοι (δολομίτης: 10-50%) και ασβεστιτικοί δολομίτες (δολομίτης: 50-90%), ωστόσο τοπικά χαρακτηρίζονται ως ασβεστόλιθοι.

<sup>3</sup> Ο όρος "ασβεσταρενιτικής" επικράτησε τα τελευταία χρόνια στην τοπική αγορά. Κατά το παρελθόν αυτά τα αδρανή χαρακτηρίζονταν εκ παραδρομής ως "ψαμμιτικά".

6.1.2.1 Ισοδύναμο άμμου

Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου (SE) (Πίνακας 6.2 και Διάγραμμα 6.4), παρατηρείται ότι οι τιμές στα διαβασικά δείγματα παρουσιάζουν εντονότερες διακυμάνσεις (SE: 28-83%), σε σχέση με τα άλλα δύο είδη αδρανών που εξετάστηκαν (Ασβεστολιθικά SE: 63-87% και Ασβεσταρενιτικά SE: 64-78%).



Διάγραμμα 6.4: Αποτελέσματα δοκιμής ισοδύναμου άμμου (SE) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

Η εντονότερη διακύμανση των τιμών SE στα διαβασικά αδρανή ενδεχομένως να οφείλεται στο βαθμό εξαλλοίωσης του μητρικού πετρώματος, το οποίο διαφοροποιείται ανά περιοχή (ακόμα και εντός του ίδιου λατομείου). Η εξαλλοίωση ενός πετρώματος οδηγεί στη διαφοροποίηση του ποσοστού των λεπτών (αργιλικών και μη), και σε αντίστοιχες διακυμάνσεις στα αποτελέσματα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου. Σημειώνεται ότι οι ορυκτολογικές, χημικές και φυσικομηχανικών ιδιότητες των πετρωμάτων επηρεάζονται άμεσα από το βαθμό εξαλλοίωσής τους (Rigoroulos et al., 2010; Pola et al., 2014). Οι τυπικές αλλοιώσεις που υφίστανται τα πετρώματα περιλαμβάνουν από αλλαγή χρώματος μέχρι ανάπτυξη πορώδους συστήματος και μείωση αντοχής (Yildiz et al., 2010). Όπως αναφέρουν οι Marinos et al. (2006), η δομή των οφιολιθικών πετρωμάτων ποικίλει και μπορεί να είναι πολύ συμπαγής και σκληρή μέχρι αρκετά αδύναμη. Αυτό είναι ανάλογο της τεκτονικής καταπόνησης που έχουν υποστεί και του βαθμού σερπεντινίωσης. Ομοίως, οι Ramana et al. (1986) παρατήρησαν ότι οι φυσικές ιδιότητες των οφιολιθικών πετρωμάτων επηρεάζονται από τις διαδικασίες ωκεάνιας μεταμόρφωσης, την επακόλουθη υδροθερμική εξαλλοίωση και το βαθμό σερπεντινίωσης. Τα πιο πάνω δύναται να

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

επηρεάσουν το ποσοστό των λεπτών στα διαβασικά αδρανή, και κατ' επέκταση τις τιμές SE.

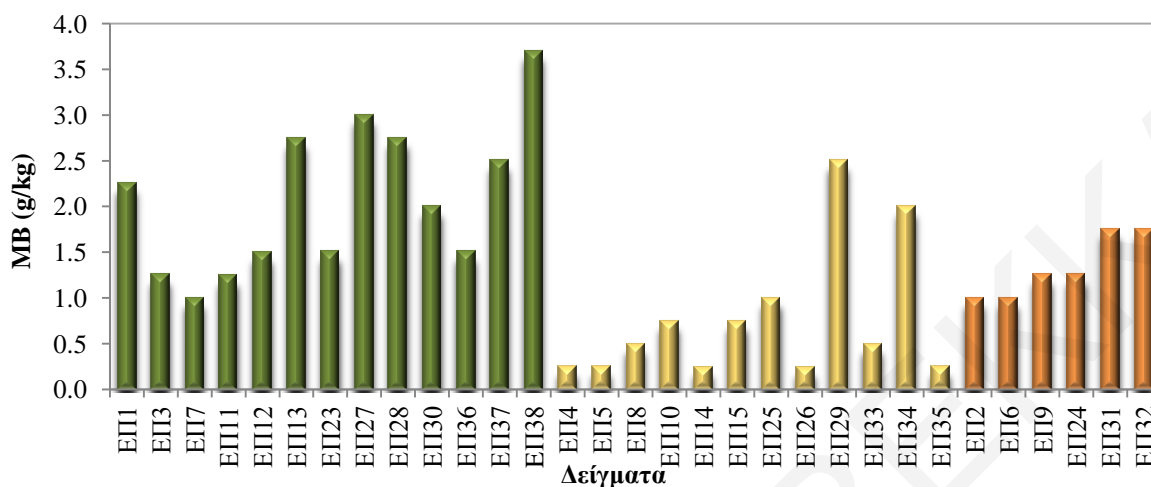
Επιπλέον, από τα αποτελέσματα που καταγράφονται στον Πίνακα 6.2 και στο Διάγραμμα 6.4, παρατηρείται ότι τα διαβασικά δείγματα παρουσιάζουν, ως επί το πλείστον, μικρότερες τιμές ισοδύναμου άμμου, σε σχέση με τα άλλα δύο είδη τοπικών αδρανών που εξετάστηκαν. Αυτό συμφωνεί με το γεγονός ότι στα διαβασικά πετρώματα η παρουσία αργιλικών ορυκτών, και γενικότερα των φυλλοπυριτικών (π.χ. μαρμαρυγίες, χλωρίτες, αργιλικά κ.α.), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.3, είναι πιο έντονη, σε σχέση με τα ανθρακικά πετρώματα, γεγονός που προσδίδει στα διαβασικά αδρανή μεγαλύτερο ποσοστό λεπτού υλικού, και άρα μειωμένη τιμή ισοδύναμου άμμου (βλ. επίσης ενότητα 6.2.1). Οι Rigoroulos et al. (2014) αναφέρουν ότι η παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών (σερπεντίνη και χλωρίτη), που προκύπτουν από τις διεργασίες μεταμόρφωσης του ωκεάνιου πυθμένα, επηρεάζουν τις τιμές του ισοδύναμου άμμου επειδή παραμένουν σε αιώρηση λόγω της φυλλοειδούς μορφής των σωματιδίων τους.

### 6.1.2.2 *Μπλε του μεθυλενίου*

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, υψηλή τιμή του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου υποδεικνύει αυξημένο ποσοστό διογκούμενων αργιλικών ορυκτών (Yool et al., 1998; Harris & Chowdhury, 2007). Από τα αποτελέσματα της δοκιμής μπλε του μεθυλενίου (MB) (Πίνακας 6.2 και Διάγραμμα 6.5), επιβεβαιώνεται η δραστικότητα του αργιλικού υλικού στα διαβασικά δείγματα, τα οποία παρουσιάζουν τιμές συστηματικά  $>1$  g/kg, παρά το γεγονός ότι μετά τη θραύση τους τα αδρανή υποβάλλονται σε πλύσιμο ώστε να απομακρυνθούν τα συγκολλημένα αργιλικά και οι άλλες τυχόν επιβλαβείς προσμίξεις που περιβάλλουν τους κόκκους. Ειδικά στα δείγματα ΕΠ38 και ΕΠ27, η τιμή MB φτάνει τα 3,7 και 3 g/kg αντίστοιχα, ξεπερνώντας το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο για τα σκυροδέματα που είναι το 3 g/kg σύμφωνα με την Κ.Δ.Π. 164/2011 (για τα κονιάματα το ανώτατο όριο είναι 10 g/kg). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.3, το δείγμα ΕΠ38 περιέχει τη μεγαλύτερη ποσότητα μοντμοριλλονίτη, σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Όπως αναφέρθηκε και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, πετρώματα με αυξημένο ποσοστό μοντμοριλλονίτη, τείνουν να παρουσιάζουν ψηλότερες τιμές μπλε του μεθυλενίου (Kandhal & Parker, 1998). Επίσης, στο δείγμα ΕΠ27 περιέχεται νοντρονίτης, ο οποίος μαζί με τον μοντμοριλλονίτη ανήκουν στην ομάδα των σμεκτιτών. Όπως αναφέρει ο Higgs (1986), η χρωστική ουσία

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

του μπλε μεθυλενίου απορροφάται περισσότερο από τους σμεκτίτες, σε σχέση με τα υπόλοιπα αργιλικά ορυκτά.



**Διάγραμμα 6.5:** Αποτελέσματα δοκιμής μπλε του μεθυλενίου (MB) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

Αντίθετα, στα ασβεστολιθικά αδρανή οι τιμές MB είναι  $\leq 1,0$  g/kg, με εξαίρεση τα δείγματα ΕΠ29 και ΕΠ34 που περιέχουν ψηλό ποσοστό μοσχοβίτη. Ο μοσχοβίτης, κοινό μέλος της ομάδας των μαρμαρυγιών, επηρεάζει το αποτέλεσμα του μπλε του μεθυλενίου, παρόλο που θεωρείται λιγότερο επιβλαβής από ότι ο μοντμοριλλονίτης (Stapel & Verhoef, 1989). Το δείγμα ΕΠ29, που εμφανίζει την ψηλότερη τιμή μπλε του μεθυλενίου (2,5 g/kg), έχει και το υψηλότερο ποσοστό μοσχοβίτη (βλ. Πίνακα 6.3). Οι Kondelchuk & Miskovsky (2009) παρατήρησαν υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2 = 0,94$ ) μεταξύ της τιμής μπλε του μεθυλενίου με τους μαρμαρυγίες, και αναφέρουν ότι λόγω της υψηλής αντίδρασης των επιφανειών των μαρμαρυγιών παρατηρείται αισθητή αύξηση της ειδικής επιφάνειας του δείγματος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα διαλύματος μπλε του μεθυλενίου για να καλύψει τη συνολική επιφάνεια του δείγματος. Γι' αυτό, η τιμή του μπλε του μεθυλενίου είναι ανάλογη του περιεχομένου σε μαρμαρυγίες. Ακόμα ένας παράγοντας που αυξάνει την απορρόφηση του διαλύματος του μπλε του μεθυλενίου είναι η φυλλώδης δομή των μαρμαρυγιών, αλλά και το γεγονός ότι μπορούν πολύ εύκολα να απορροφούν υγρά.

Όσον αφορά τα ασβεσταρενιτικά δείγματα, είναι εμφανές από τα αποτελέσματα ότι τα δείγματα που παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό μοντμοριλλονίτη και μοσχοβίτη

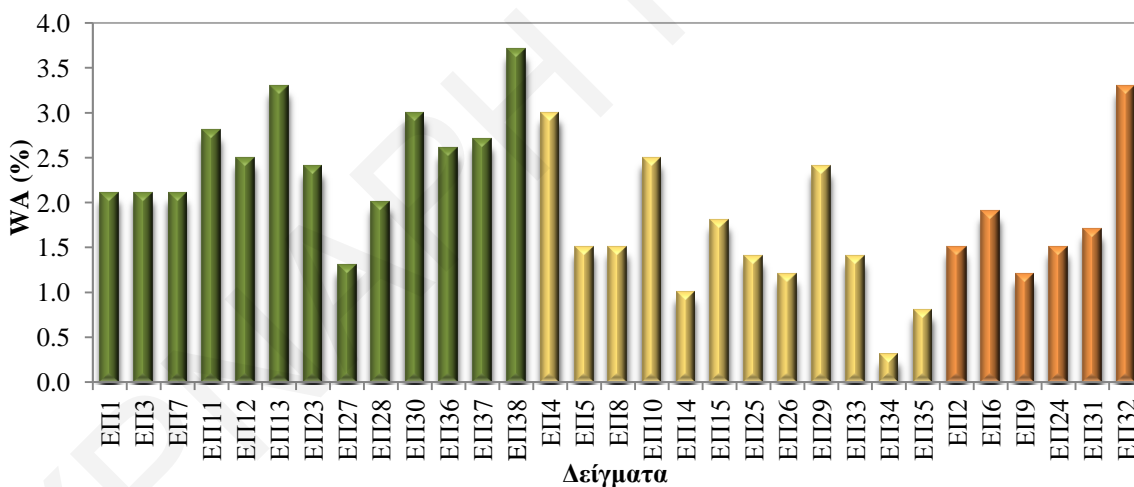
## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

(Πίνακας 6.3) (π.χ. ΕΠ31 και ΕΠ32) εμφανίζουν και τη μεγαλύτερη τιμή μπλε του μεθυλενίου.

### 6.1.2.3 Φαινόμενη πυκνότητα και απορροφητικότητα σε νερό

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής απορροφητικότητας (WA) (Πίνακας 6.2 και Διάγραμμα 6.6), φαίνεται ότι τα διαβασικά αδρανή παρουσιάζουν ελαφρώς ψηλότερες τιμές ( $WA_{av.}$ : 3,7%) σε σχέση με τα άλλα δύο είδη αδρανών υλικών που εξετάστηκαν (ασβεστολιθικά  $WA_{av.}$ : 3% και ασβεσταρενιτικά  $WA_{av.}$ : 3,3%).

Το πορώδες σύστημα των πετρωμάτων, και κατά συνέπεια των αδρανών, επηρεάζεται από το μέγεθος και το σχήμα των κόκκων τους, τη συνεκτικότητα, το βαθμό ομοιομορφίας τους, τη φύση του συνδετικού υλικού, τα αποσαθρωμένα και αυθιγενή πληρωτικά υλικά, καθώς και από την επίδραση που είχαν τα πετρώματα αυτά από τη θερμοκρασία και την πίεση. Αυτές οι παράμετροι σχετίζονται άμεσα με τις διάφορες πετροφυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων, συμπεριλαμβανομένης και της απορροφητικότητας (Timur et al., 1971).



Διάγραμμα 6.6: Αποτελέσματα δοκιμής απορροφητικότητας (WA) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

Είναι γνωστό ότι το πρωτογενές πορώδες, που είναι διακοκκικό (intergranular), οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού ενός πετρώματος. Συνήθως το πορώδες των ψαμμιτών (και γενικά των κλαστικών πετρωμάτων) υπάγεται σε αυτή την κατηγορία. Αντίθετα, το δευτερογενές πορώδες οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης λόγω κυκλοφορίας

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

υδροθερμικών διαλυμάτων, διάλυσης ορυκτών λόγω αποσάθρωσης κ.α. (Warren & Root, 1963). Οι διαδικασίες της αποσάθρωσης που υπόκεινται τα πετρώματα, προκαλούν προοδευτικές μεταβολές στο πορώδες τους, λόγω της αλλαγής στην κατανομή του μεγέθους των πόρων, στη γεωμετρία των πόρων, στη συνδεσιμότητά τους, στην πλήρωση των πόρων και στη δημιουργία νέων κενών. Τα πυριγενή πετρώματα, όπως τα διαβασικά που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή, εμφανίζουν συνήθως δευτερογενές πορώδες (πορώδες ρωγμών) υπό μορφή σχισμών, ρωγμών, ασυνεχειών κ.α. (Tugrul, 2004) που δημιουργούνται λόγω τεκτονισμού (Kelsall et al., 1986).

Η παρουσία πόρων και ειδικότερα μικρορωγμών επηρεάζουν τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των πετρωμάτων (Sousa et al., 2005). Οποιοδήποτε εύθραυστο πέτρωμα, ανεξάρτητα από την πυκνότητα και την αντοχή του, μπορεί να γίνει πορώδες και διαπερατό λόγω ρωγμών, σχισμών και θρυμματισμού (Toth, 2009). Οι αλλαγές στη μικροδομή, καθώς και η δημιουργία νέων ορυκτών λόγω αποσάθρωσης, επηρεάζουν τις τιμές της απορροφητικότητας (Tugrul, 2004). Από τον Πίνακα 6.3 στον οποίον παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές αναλύσεις των αδρανών, επιβεβαιώνεται ότι τα διαβασικά πετρώματα που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή είναι γενικά εξαλλοιωμένα. Όπως αναφέρει ο Toth (2009), η αποσάθρωση που υφίστανται τα πυριγενή πετρώματα αυξάνει το πορώδες τους, και κατά συνέπεια την ικανότητά τους να απορροφούν νερό. Οι Dokic et al. (2015) επίσης παρατήρησαν ότι οι αποσαθρωμένοι δολερίτες παρουσιάζουν ψηλά ποσοστά πορώδους και απορροφητικότητας, επειδή περιέχουν αφθονία μικρορωγμών και πόρων και χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό εξαλλοίωσης και χαμηλό βαθμό σύνδεσης μεταξύ των ορυκτών τους.

Οι Lindquist et al. (2007), αναφέρουν ότι τα ιζηματογενή πετρώματα, όπως οι ασβεστόλιθοι, έχουν πιο στρογγυλεμένους πόρους σε σχέση με τα πυριγενή πετρώματα. Ο λόγος είναι ότι το πορώδες των ιζηματογενών πετρωμάτων αντανακλά τις ιζηματογενείς διεργασίες που δημιούργησαν το πέτρωμα. Επιπλέον, τα ασβεστολιθικά αδρανή συνήθως περιέχουν ταυτόχρονα μεγάλους και μικρούς πόρους. Η παρουσία διαφορετικού μεγέθους πόρων στα ασβεστολιθικά αδρανή που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή (βλ. ενότητα 7.4.1) είναι πιθανότατα και η αιτία που παρουσιάζεται διακύμανση στα αποτελέσματα της απορροφητικότητας (WA: 0,3-3,0%), όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.2.

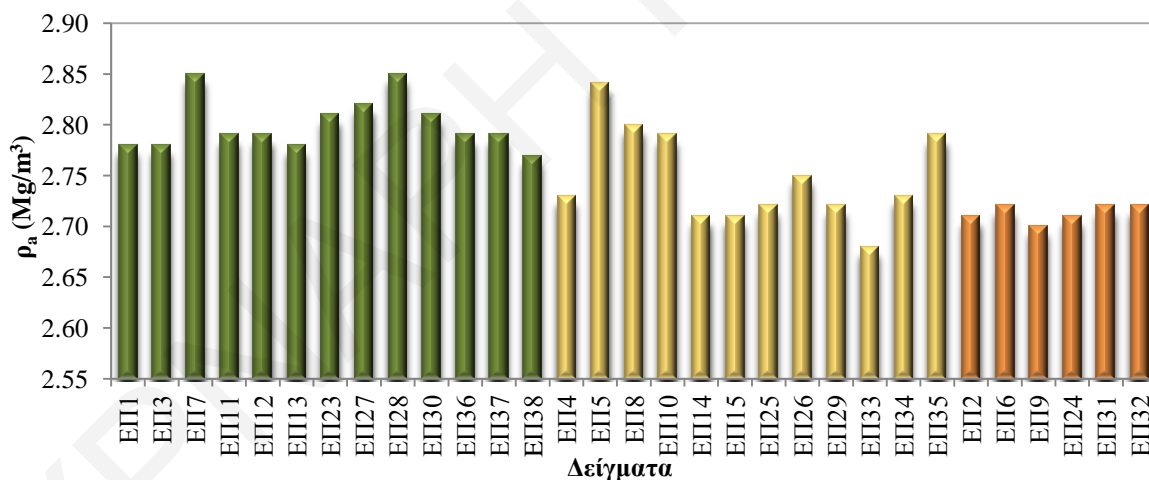
Όσον αφορά τα ασβεσταρενιτικά αδρανή, η απαίτηση σε νερό φαίνεται ότι επηρεάζεται επίσης από την περιεκτικότητα σε μοντμοριλλονίτη. Για παράδειγμα, το δείγμα ΕΠ32 με

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

το υψηλότερο ποσοστό μοντμοριλλονίτη (3%) (βλ. Πίνακα 6.3), παρουσιάζει το ψηλότερο ποσοστό απορροφητικότητας (3,3%), ενώ τα υπόλοιπα δείγματα ασβεσταρενιτών που εξετάστηκαν παρουσιάζουν απορροφητικότητα <2%.

Όσον αφορά την πυκνότητα των αδρανών, που υπολογίστηκε με βάση το EN 1097-6, τα αποτελέσματα (φαινόμενη, ξηρή και κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή πυκνότητα) παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2.

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.7, τα διαβασικά αδρανή παρουσιάζουν σχετικά ψηλότερες τιμές φαινόμενης πυκνότητας. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στα ορυκτολογικά και ιστολογικά χαρακτηριστικά των αδρανών αυτών. Τα λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα, όπως είναι τα διαβασικά, συνήθως παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα και έχουν πιο γωνιώδεις και καλύτερα συνδεδεμένους κόκκους (Zou, 2016). Μεγαλύτερη διακύμανση στις τιμές τις φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ : 2,68-2,84  $\text{Mg/m}^3$ ), σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες, παρουσιάζουν τα ασβεστολιθικά δείγματα. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο πορώδες σύστημά τους, αφού όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η ίδια διακύμανση εμφανίζεται και στην απορροφητικότητα (Διάγραμμα 6.6).



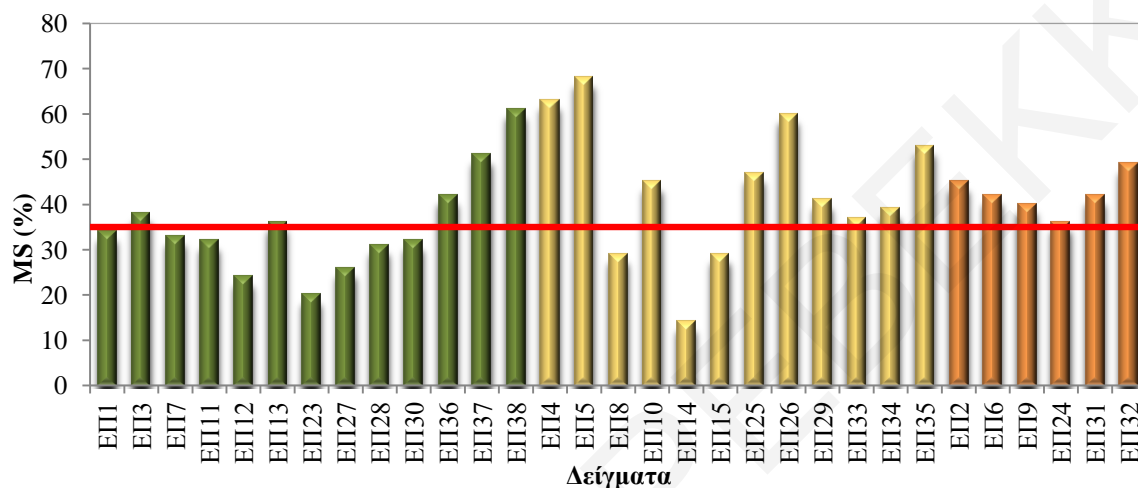
**Διάγραμμα 6.7:** Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

### 6.1.2.1 Αποσάθρωση με Θεικό Μαγνήσιο

Από τον Πίνακα 6.2 και το Διάγραμμα 6.8, παρατηρείται ότι οι συντελεστές αποσάθρωσης (MS) είναι γενικά αρκετά ψηλοί, όπως και στην περίπτωση των αδρανών που είχαν ελεγχθεί στα πλαίσια της 1<sup>ης</sup> φάσης της διατριβής (βλ. παράγραφο 6.1.1). Συγκεκριμένα, προκύπτει ότι 20 από τα 31 δείγματα που εξετάστηκαν, ειδικότερα αυτά τα οποία είναι

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

ανθρακικής ορυκτολογικής σύστασης, παρουσιάζουν τιμές συντελεστή αποσάθρωσης >35% που, όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.1.1, είναι το ανώτατο επιτρεπτό όριο απώλειας που θα μπορούσε να θεσπιστεί με βάση το EN 12620 (βλ Διάγραμμα 6.8). Αυτό οδηγεί για ακόμη μια φορά σε εύλογο προβληματισμό ως προς την καταλληλότητα της δοκιμής αποσάθρωσης με την χρήση θεικού μαγνησίου (EN 1367-2) για λεπτόκοκκα αδρανή.



**Διάγραμμα 6.8:** Αποτελέσματα δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (MS) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά. Η κόκκινη γραμμή καθορίζει το ανώτατο επιτρεπτό όριο απώλειας με βάση το EN 12620.

Τα πολύ ψηλά ποσοστά απώλειας υλικού που παρουσιάζουν τα ασβεστολιθικά δείγματα στη δοκιμή αποσάθρωσης, αλλά και η μεγάλη διακύμανση στις τιμές του συντελεστή MS, οφείλεται, όπως αναφέρουν οι Jayawickrama et al. (2007), στο ότι η ποιότητα των ασβεστολιθικών αδρανών ποικίλει, αναλόγως της περιοχής λατόμευσης. Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά των ασβεστολιθικών αδρανών, που έχει άμεση σχέση με την ανθεκτικότητά τους, είναι το πορώδες. Πιο συγκεκριμένα, οι McLaughlin et al. (1960) αναφέρουν ότι το μέγεθος, ο όγκος και η συνοχή των πόρων, των καναλιών και των ρωγμών στα ασβεστολιθικά πετρώματα επηρεάζουν την ανθεκτικότητά τους.

Πολλοί ασβεστόλιθοι, ειδικά αυτοί που είναι βιογενούς προέλευσης, έχουν μέτριο έως μεγάλο πορώδες. Βιογενείς θεωρούνται οι ασβεστόλιθοι στους οποίους ο οργανικός κόσμος (ζωικός ή/και φυτικός), συμμετέχει στη γένεση και εμφάνιση των πετρωμάτων της ομάδας αυτής (Bissell & Chilingar, 1967). Σύμφωνα με τους Modestou et al. (2015), οι βιογενείς ασβεστόλιθοι Μιτσερού (MLS) και Γερόλακκου (GER) (μέρος των οποίων διοχετεύεται για την παραγωγή αδρανών) κατατάσσονται ως μέτριου και πολύ ψηλού



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

πορώδους αντίστοιχα. Αναλόγως του πορώδους τους, μπορεί να υποστούν εύκολα και γρήγορα διάσπαση λόγω κύκλων ψύξης-απόψυξης ή ύγρανσης-ξηράνσης. Οι Modestou et al. (2015) σημειώνουν επίσης ότι τα πετρώματα που παρουσιάζουν τη λιγότερη αντίσταση όσον αφορά την ανθεκτικότητα σε κρυστάλλωση αλάτων, είναι αυτά που παρουσιάζουν πολύ υψηλό πορώδες, ασθενές συνδετικό υλικό, χαμηλές εφελκυστικές αντοχές και έντονη ετερογένεια. Στην έρευνά τους οι πιο πάνω ερευνητές συγκεκριμένα παρατηρούν ότι το πέτρωμα (GER) που παρουσίασε το μεγαλύτερο πορώδες (49,5%), εμφάνισε πολύ μικρή αντίσταση σε κρυστάλλωση αλάτων, με απώλεια μάζας 12,53%. Αντίθετα, το πέτρωμα (MLS) με το μέτριο πορώδες (10%) παρουσίασε μικρότερη απώλεια μάζας (2,41%). Όπως φαίνεται και από τις εικόνες του πολωτικού μικροσκοπίου (Εικόνα 7.6 (β), Εικόνα 7.7 (β) και Εικόνα 7.10 (β)), τα ασβεστολιθικά και ασβεσταρενιτικά αδρανή που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή παρουσιάζουν μεγάλο ποσοστό πορώδους (λόγω και της παρουσίας απολιθωμάτων). Αυτό επηρεάζει δυσμενώς την ανθεκτικότητά τους.

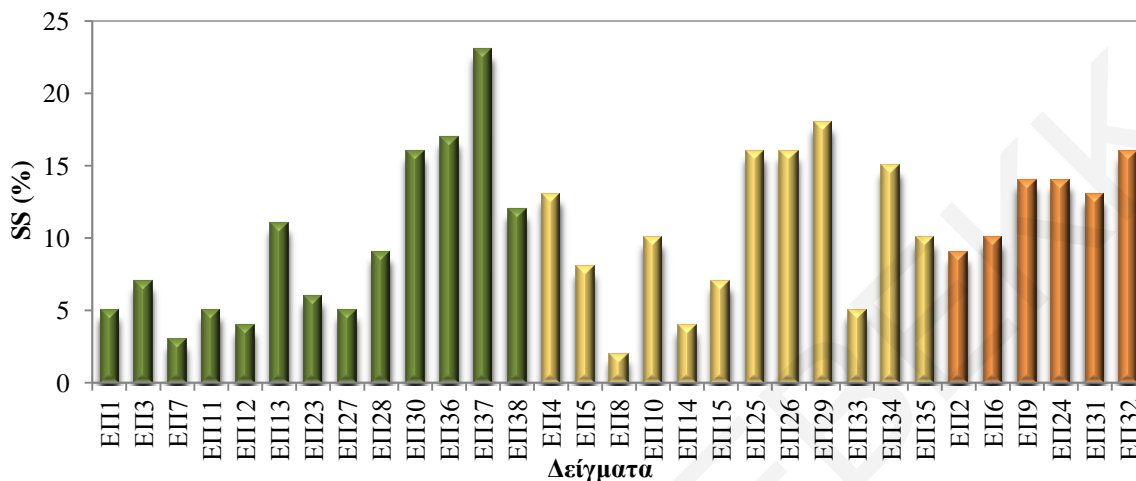
Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των ασβεστόλιθων είναι ότι θεωρούνται σχετικά μαλακά πετρώματα. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι συνεπακόλουθο της ορυκτολογικής τους σύστασης. Ο ασβεσίτης, που είναι το κυρίαρχο ορυκτό των ασβεστόλιθων, έχει σκληρότητα 3 στην κλίμακα Mohs, ενώ ο δολομίτης και ο αραγωνίτης (που επίσης εντοπίζονται στη σύσταση ασβεστόλιθων) έχουν ελαφρώς μεγαλύτερη σκληρότητα (3,5-4 στην κλίμακα Mohs) (Nichols, 2009). Η σκληρότητα των ορυκτών αποτελεί ένα διαγνωστικό χαρακτηριστικό προσδιορισμού των φυσικών τους ιδιοτήτων. Είναι στην ουσία το μέτρο αντίστασης των ορυκτών στην χάραξη, και για τον προσδιορισμό της χρησιμοποιείται η εμπειρική κλίμακα Mohs, η οποία αποτελείται από 10 ορυκτά τοποθετημένα κατά σειρά αυξανόμενης σκληρότητας, όπου τη μικρότερη σκληρότητα (1) παρουσιάζει ο τάλκης και τη μεγαλύτερη (10) το διαμάντι (Κατερινόπουλος & Μαγκανάς, 1998). Εξαιτίας αυτής της χαμηλής σκληρότητας που παρουσιάζει ο ασβεσίτης, είναι προφανές ότι οι ασβεστόλιθοι και τα ασβεστολιθικά αδρανή μπορούν να διασπαστούν εύκολα λόγω κρυστάλλωσης αλάτων.

### **6.1.2.2 Αποσάθρωση με Θεϊκό Νάτριο**

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με τη χρήση θεϊκού νατρίου (SS) (Πίνακας 6.2 και Διάγραμμα 6.9), παρατηρείται ότι οι απώλειες υλικού κυμαίνονται μεταξύ 2% έως 23%. Αν λάβουμε υπόψη τα όρια που ίσχυαν παλαιότερα στην Κύπρο (με βάση το CYS 64:1986), δηλαδή 10%, μόνο 17 από τα 31 δείγματα θα θεωρούνταν

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

αποδεκτά. Άρα, επιβεβαιώνεται για μια ακόμη φορά ότι τα όρια που θεσπίστηκαν κατά το παρελθόν στο νησί, και τα οποία δεν βασίζονταν σε εργαστηριακά δεδομένα, δεν αντικατόπτριζαν την πραγματική εικόνα των αδρανών της Κύπρου, αφού είχαν καθιερωθεί κυρίως με βάση την ποιότητα αδρανών στις Η.Π.Α.



**Διάγραμμα 6.9:** Αποτελέσματα δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

Στη βιβλιογραφία, όπως αναφέρουν αρκετοί ερευνητές (Fowler et al., 2006; Cuelho et al., 2007; Ioannou et al., 2013) επικρατούν δισταμένες απόψεις όσον αφορά την καταλληλότητα της δοκιμής αποσάθρωσης (είτε με  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ή με  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), με αποτέλεσμα σε αρκετές χώρες στον κόσμο, ο συγκεκριμένος έλεγχος να μην αποτελεί κριτήριο για τον έλεγχο της ανθεκτικότητας των αδρανών υλικών και άρα να μην χρησιμοποιείται. Στις Η.Π.Α., για παράδειγμα, το 16% των πολιτειών δεν απαιτεί κανένα έλεγχο αποσάθρωσης, το 9% απαιτεί έλεγχο ψύξης-απόψυξης, το 2% προδιαγράφει συντελεστή ανθεκτικότητας, ενώ το 54% απαιτεί έλεγχο αποσάθρωσης με θειικό νάτριο και το 19% με θειικό μαγνήσιο (Kandhal et al., 1997).

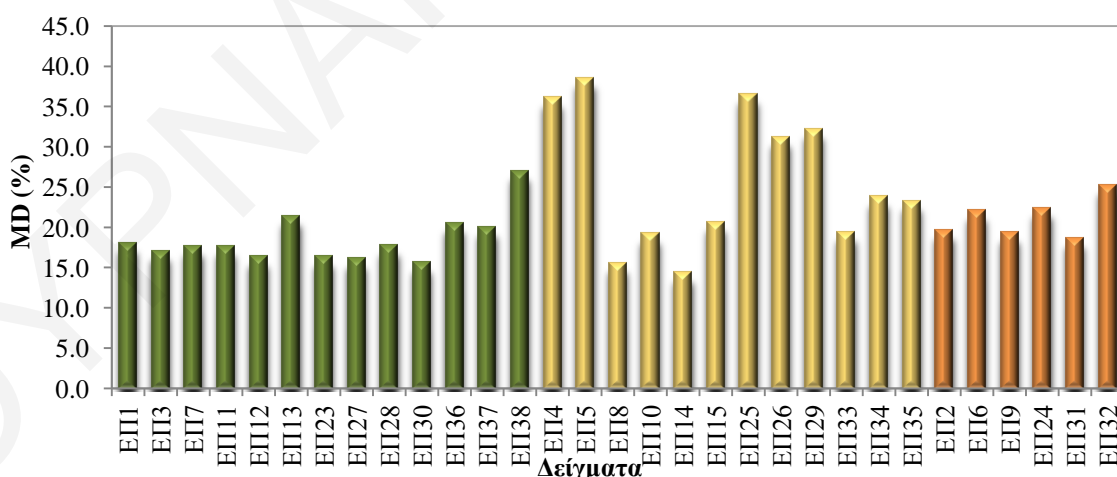
Ο Hoare (2003) υποστηρίζει ότι η δοκιμή της αποσάθρωσης, είτε με θειικό μαγνήσιο είτε με θειικό νάτριο, είναι χρονοβόρα και δεν παρουσιάζει καλή επαναληψιμότητα ή/και αναπαραγωγιμότητα. Οι Cuelho et al. (2007), συνοψίζοντας διάφορες έρευνες που αφορούν τη δοκιμή αποσάθρωσης με διάλυμα θειικού νατρίου, κατέληξαν ότι πρόκειται για μια δύσκολη δοκιμή, η οποία έχει περιορισμένη σχέση με την απόδοση του σκυροδέματος ή με τις ιδιότητες (π.χ. απορροφητικότητα) των αδρανών υλικών.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Οι Fowler et al. (2006) αναφέρονται στη συμφωνία αρκετών συγγραφέων ότι η δοκιμή αποσάθρωσης παρουσιάζει φτωχή επαναληψιμότητα ή/και αναπαραγωγιμότητα. Παράλληλα, επισημαίνουν ότι η δοκιμή αυτή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την αποδοχή των αδρανών, αλλά όχι απαραίτητα για την απόρριψή τους. Σύμφωνα με τους πιο πάνω συγγραφείς (Fowler et al., 2006), η δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θεικού νατρίου παρουσιάζει μεγαλύτερη μεταβλητότητα, σε σχέση με την αντίστοιχη δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θεικού μαγνησίου. Αυτό οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες, όπως την επίδραση που έχει η μικρή μεταβολή της θερμοκρασίας στη διαλυτότητα του διαλύματος. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Fowler et al. (2006), η μεταβολή στη διαλυτότητα του θεικού μαγνησίου με την αλλαγή της θερμοκρασίας είναι αρκετά μικρότερη από αυτή του θεικού νατρίου. Οι Williams et al. (2005) επίσης σημειώνουν ότι η μικρή μεταβλητότητα του διαλύματος του θεικού μαγνησίου στις διαφορετικές θερμοκρασίες το κάνει πιο αξιόπιστο, και άρα καθιστά τη σχετική δοκιμή περισσότερο επαναλήψιμη.

### 6.1.2.3 Αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής

Από τα αποτελέσματα της δοκιμής Micro-Deval (MD) (Πίνακας 6.2 και Διάγραμμα 6.10), παρατηρείται ότι τα ασβεστολιθικά δείγματα παρουσιάζουν σχετικά μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας υλικού, σε σχέση με τα διαβασικά δείγματα. Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση στα αποτελέσματα, τα οποία κυμαίνονται από 14,4% έως 38,5%.



**Διάγραμμα 6.10:** Αποτελέσματα δοκιμής αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) ανά κατηγορία υλικού. Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά δείγματα, με κίτρινο ασβεστολιθικά και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

Παρατηρώντας τα δείγματα μακροσκοπικά, φαίνεται ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή, που είναι πιο μαλακά, κατέληξαν πιο στρογγυλεμένα μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Micro-Deval, σε σχέση με τα διαβασικά αδρανή που είναι πιο πλακοειδή και επιμήκη. Ο Clement (2013), μετά από δοκιμές Micro-Deval που πραγματοποίησε σε διαφορετικά είδη χονδρόκοκκων αδρανών (πυριγενή, ποτάμιες αποθέσεις, δολομίτες, ασβεστόλιθους), παρατήρησε ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή παρουσίασαν το μεγαλύτερο ποσοστό απώλειας μάζας σε σχέση με τα υπόλοιπα είδη, ξεπερνώντας κατά πολύ το 17% που θεωρείται το ανώτατο όριο σύμφωνα με τα πρότυπα του Καναδά. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξε και ο Gatchalian (2005). Επιπλέον, σύμφωνα με την ίδια έρευνα, όλα τα αδρανή που εξετάστηκαν πλην των ασβεστολιθικών (πυριγενή, χαλίκια από ποτάμιες και παγετώδεις αποθέσεις) εμφάνισαν σημαντική διαφορά στη σφαιρικότητά τους μετά το τέλος της δοκιμής. Όπως αναφέρει ο συγγραφέας (Gatchalian, 2005), η αλλαγή αυτή είναι ένδειξη θραύσης των αδρανών, σε αντίθεση με την αλλαγή στη γωνιότητα που υποδεικνύει απώλεια γωνιωδών τεμαχίων από την επιφάνεια των αδρανών. Κατά την αλλαγή στη γωνιότητα, συνήθως προκύπτει μικρότερη απώλεια υλικού σε σχέση με την αλλαγή στη σφαιρικότητα. Επομένως, η μεγαλύτερη απώλεια στα ασβεστολιθικά αδρανή, πέραν από το πορώδες τους, μπορεί να αποδοθεί και στη σφαιρικότητά τους.

Αντίθετα, οι Prowell et al. (2005) και Hoare (2003) σημειώνουν ότι αναμένεται ένα αδρανή να παρουσιάσει μεγαλύτερες απώλειες όταν είναι πεπλατυσμένο ή επίμηκες, σε σύγκριση με ένα άλλο το οποίο είναι πιο στρογγυλεμένο. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις ο βαθμός συγκόλλησης (cementation) και το είδος του συνδετικού υλικού είναι αυτά που καθορίζουν την τελική αντοχή του υπό εξέταση δείγματος (McFeat Smith, 1977). Η αντοχή των μαλακών πετρωμάτων, όπως ο ασβεστόλιθος, καθορίζεται από το είδος του συνδετικού υλικού, και γενικά θεωρείται ότι είναι αρκετά χαμηλότερη από την αντοχή των σκληρών πετρωμάτων, όπως ο διαβάσης (AL-Ameen & Waller, 1994).

Οι Cooley et al. (2002), επίσης παρατήρησαν ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή, εκτός από μεγαλύτερη απώλεια, παρουσίασαν και μεγαλύτερο εύρος αποτελεσμάτων (7,8 έως 29,4%), συγκρινόμενα με γρανιτικά αδρανή (6,3 έως 14,5%). Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Mahmoud & Masad (2007) με βάση τις δοκιμές που πραγματοποίησαν.

Ο Bach (2013) ισχυρίζεται ότι τα διαβασικά πετρώματα παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση όσον αφορά την αντίσταση σε κατακερματισμό. Όπως σημειώνει, η επίδραση της διακύμανσης της πετρογραφικής σύνθεσης στο βαθμό κατακερματισμού των αδρανών έχει αποδειχθεί ότι είναι ισχυρότερη από ότι η επίδραση του σχήματος. Οι διαφορές στο σχήμα των αδρανών επηρεάζουν μόνο όταν το πέτρωμα είναι πετρογραφικά ομοιογενές.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Ο Rismantojo (2002) αναφέρει ότι τόσο η ορυκτολογία όσο και η υφή των αδρανών μπορεί να έχουν επίδραση στην αντίσταση σε τριβή. Ο ασβεστίτης και ο δολομίτης, που είναι θεμελιώδη ορυκτά των ασβεστολίθων, είναι πιο μαλακά σε σχέση με τα πιο σκληρά ορυκτά που περιέχονται στα διαβασικά και διάφορα άλλα πυριγενή πετρώματα. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.3 το ποσοστό μαλακών ορυκτών στα ασβεστολιθικά αδρανή είναι πολύ μεγάλο (>87%). Αυτός μπορεί να είναι και ο πιο σημαντικός λόγος που τα ασβεστολιθικά αδρανή που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσιάζουν μειωμένη αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής. Ο Langer (2006) αναφέρει ότι οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες τείνουν να παρουσιάζουν χαμηλότερη αντίσταση σε τριβή από αντίστοιχα πυριτωμένα ανθρακικά. Αυτό οφείλεται στα ορυκτά με μικρή σκληρότητα και με σχισμό, τα οποία παρουσιάζονται στους νεότερους ασβεστόλιθους και στους δολομίτες.

Οι Masad et al. (2009) ισχυρίζονται ότι οι ψαμμίτες έχουν πολύ καλή απόδοση όσον αφορά την ιδιότητα αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής. Η ομάδα των ψαμμιτών συνήθως αποτελείται από σκληρούς κόκκους χαλαζία σε εύθρυπτο συνδετικό υλικό, και η αντίσταση των κόκκων αυτών ενάντια στην τριβή είναι πολύ ικανοποιητική. Αντίθετα, οι ασβεστόλιθοι εμφανίζουν την χαμηλότερη αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής. Τα αδρανή αυτά παρουσιάζουν μια απλή λεπτή κρυπτοκρυσταλλική δομή με ομοιόμορφη σκληρότητα. Επιπλέον, την απόδοσή των ασβεστόλιθων σε τριβή επηρεάζουν και οι πόροι που υπάρχουν στη μάζα τους. Άλλες ομάδες πετρωμάτων, όπως για παράδειγμα οι βασάλτες, γρανίτες κ.α., παρουσιάζουν ενδιάμεση αντίσταση σε τριβή, λόγω της παρουσίας εξαλλοιωμένων αστρίων αλλά και κατακερματισμένων κόκκων χαλαζία.

Σύμφωνα με τον Luce (2006), η ορυκτολογία των κόκκων των αδρανών είναι πολύ σημαντική ώστε να προβλεφθεί η μακροχρόνια αντίστασή τους στην τριβή. Όπως αναφέρει ο πιο πάνω συγγραφέας, τα αδρανή με μεγαλύτερο ποσοστό σε πυρίτιο παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε τριβή. Το μέγεθος των κόκκων των αδρανών επίσης επηρεάζει την αντίστασή τους σε τριβή, αφού αδρανή με ομοιόμορφα κατανεμημένους λεπτούς κόκκους είναι πιο ανθεκτικά σε φθορά λόγω τριβής.

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Akesson et al. (2001), που αναφέρουν ότι η τριβή επηρεάζεται από το μέγεθος των κόκκων, παρόλο που το σχήμα και η κατανομή των ορυκτών επίσης διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο, ειδικά στην αντίσταση σε κατακερματισμό. Όπως αναφέρουν οι πιο πάνω ερευνητές, τα πετρώματα με μικρούς

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

κόκκους αδρανών έχουν μικρότερη επιφάνεια για τριβή, σε σχέση με αυτά με τους μεγαλύτερους κόκκους. Γι' αυτό το λόγο, τα διαβασικά αδρανή, τα οποία είναι λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα, παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντίσταση σε τριβή.

Επιπλέον, όπως σημειώνουν οι Akesson et al. (2001), η σύνδεση των ορυκτών επίσης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις μηχανικές ιδιότητες των αδρανών, αφού πετρώματα με καλύτερα κατανεμημένα ορυκτά και με σύνδεση μεταξύ διαφορετικών ορυκτών (π.χ. χαλαζίας-άστριοι) παρουσιάζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες, σε σχέση με πετρώματα με σύνδεση μεταξύ ίδιων ορυκτών (π.χ. χαλαζίας-χαλαζίας). Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα στην περίπτωση των διαβασικών αδρανών, τα οποία αποτελούνται από πολύ περισσότερα ορυκτά σε σχέση με τα άλλα δύο είδη αδρανών που εξετάστηκαν (Πίνακας 6.3).

Οι Wang et al. (2015) αναφέρουν ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής MD επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα η αυξημένη αντίθεση μεταξύ της σκληρότητας των ορυκτών, η οποία οδηγεί σε ψηλότερες τιμές MD. Αντίθετα, το υψηλότερο ποσοστό ορυκτών με μεγάλη σκληρότητα συμβάλει σε χαμηλότερες τιμές MD.

### **6.2 Συσχέτιση ορυκτολογίας με τις ιδιότητες των αδρανών**

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενα κεφάλαια, η υφή, το μέγεθος, το σχήμα, η ορυκτολογική και χημική σύσταση των αδρανών επηρεάζει τις μηχανικές και φυσικές τους ιδιότητες (Shakoor & Bonelli, 1991; Miskovsky et al., 2004; Yzenas Jr, 2006; Pomonis et al., 2007; Makani & Vidal, 2013). Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθώς και ο βαθμός εξαλλοίωσης, η αποσάθρωση και η παραμόρφωση των αδρανών επηρεάζουν την ποιότητά τους, και κατ' επέκταση την καταλληλότητά τους για χρήση σε διάφορες εφαρμογές (Rigopoulos et al., 2010).

Η πετρογραφική εξέταση αποτελεί σημαντικό εργαλείο για την ανάλυση των αδρανών, αφού στοιχειοθετεί τις πληροφορίες που αφορούν ένα πέτρωμα, καθορίζοντας έτσι το βαθμό καταλληλότητας του λιθότυπου. Παρόλα αυτά, αρκετοί ερευνητές (Boucher & Selig, 1987; Mielenz, 1994) θεωρούν ότι από μόνη της δεν είναι επαρκής για να προβλέψει την απόδοση του τελικού προϊόντος, αλλά συστήνεται να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με άλλες δοκιμές.

Συμπληρωματικές τεχνικές της πετρογραφικής εξέτασης είναι οι ορυκτολογικές και χημικές αναλύσεις (Swamy, 1992). Στην ενότητα αυτή επιχειρείται συσχέτιση των αποτελεσμάτων των ορυκτολογικών αναλύσεων (Πίνακας 6.3) με τις ιδιότητες των

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

αδρανών που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Οι συσχετίσεις πραγματοποιήθηκαν ξεχωριστά για κάθε τύπο αδρανών με ανάλυση παλινδρόμησης (*regression analysis*), ώστε να προσδιοριστεί η συνάρτηση που ορίζει την καλύτερη δυνατή καμπύλη συσχέτισης.

### 6.2.1 Διαβασικά αδρανή

Η παρουσία χλωρίτη ή/και λωμοντίτη (ζεόλιθος) είναι εμφανής σε όλα τα διαβασικά αδρανή που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, τα οποία υπέστησαν υδροθερμική εξαλλοίωση μετά τη στερεοποίηση των φλεβών και όταν το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Τροόδους ήταν κάτω από το βυθό της θάλασσας (Κωνσταντίνου & Παναγίδης, 2013). Όπως αναφέρει ο Wilson (1974), στις περισσότερες περιπτώσεις η παρουσία του λωμοντίτη είναι αποτέλεσμα της υδροθερμικής εξαλλοίωσης των πλούσιων σε ασβέστιο πλαγιόκλαστων. Σύμφωνα με τους Richardson et al. (1987) και Gillis (2002), ο χλωρίτης επίσης αποτελεί δευτερογενές ορυκτό που προέκυψε από υδροθερμική εξαλλοίωση κλινοπυρόξενου (αυγίτη).

Αρκετοί είναι οι ερευνητές που αναφέρουν ότι ο χλωρίτης και ο λωμοντίτης επηρεάζουν την απόδοση των αδρανών. Για παράδειγμα, οι Aghamelu & Okogbue (2013) θεωρούν υπεύθυνο τον χλωρίτη για την κακή απόδοση των πυροκλαστικών αδρανών που εξέτασαν. Επίσης, οι Wakizaka et al. (2001) αναφέρουν ότι ο λωμοντίτης προκαλεί θρυμματισμό (*pop-outs*) στα επιφανειακά αδρανή, απολέπιση και μικρορωγμές στην επιφάνεια του κονιάματος και του σκυροδέματος. Και τα δύο αυτά ορυκτά έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, οπότε έχουν την ικανότητα να απορροφούν νερό. Η έκθεση των αδρανών που περιέχουν χλωρίτη και λωμοντίτη σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ύγρανσης/ξήρανσης οδηγεί στη ρηγμάτωσή τους, με συνεπακόλουθο αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος και του κονιάματος (Fookes & Walker, 2011).

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα του ισοδύναμου άμμου (SE) με το ποσοστό του λωμοντίτη (Lmt), παρατηρείται πολύ ισχυρή συσχέτιση ( $r = -0,92$ ,  $p = 0,009$ ). Η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.11 (α) είναι εκθετική και περιγράφεται από την πιο κάτω συνάρτηση (6.1):

$$SE = 91,22e^{-0,07Lmt} \quad (6.1)$$

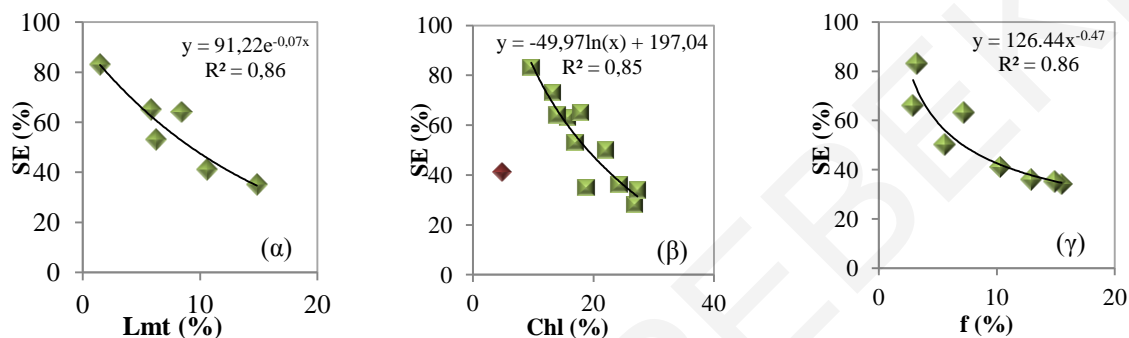
Πολύ ισχυρή είναι και η συσχέτιση ( $r = -0,90$ ,  $p = 0,000$ ) μεταξύ των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου άμμου (SE) με το ποσοστό του χλωρίτη (Chl) (Διάγραμμα 6.11 (β)), που ορίζεται από την πιο κάτω λογαριθμική συνάρτηση (6.2):

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

$$SE = -49,97\ln(\text{Chl}) + 197,04 \quad (6.2)$$

Όπως φαίνεται από τα Διαγράμματα 6.11 (α) και (β), με αύξηση του περιεχομένου σε λωμοντίτη και χλωρίτη αυξάνεται και το ποσοστό σε λεπτά αδρανή. Η πολύ ισχυρή συσχέτιση ( $r = -0,90$ ,  $p = 0,003$ ) του ποσοστού λεπτών ( $f$ ) με το αποτέλεσμα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου (SE) επιβεβαιώνεται από την υπερβολική συνάρτηση (6.3) που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.11 (γ):

$$SE = 126,44 f^{-0,47} \quad (6.3)$$



**Διάγραμμα 6.11:** Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (α) της περιεκτικότητας σε λωμοντίτη (Lmt), (β) της περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl) και (γ) του ποσοστού λεπτών ( $f$ ) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

Το κόκκινο σημείο που δεν συμπεριλαμβάνεται στη συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου άμμου (SE) με το ποσοστό του χλωρίτη (Chl) (Διάγραμμα 6.11 (β)), είναι το δείγμα ΕΠ12, το οποίο παρουσιάζει σχετικά χαμηλό ποσοστό ισοδύναμου άμμου, παρά το γεγονός ότι περιέχει το χαμηλότερο ποσοστό χλωρίτη (7%), σε σχέση με τα υπόλοιπα διαβασικά αδρανή. Το συγκεκριμένο δείγμα, με βάση και τα αποτελέσματα των άλλων δοκιμών (Πίνακας 6.2), φαίνεται ότι είναι ένα καλής ποιότητας αδρανές υλικό, παρά το σχετικά ψηλό ποσοστό λωμοντίτη που περιέχει (11%). Παρόλα αυτά, από την κοκκομετρική διαβάθμιση του δείγματος αυτού (βλ. Διάγραμμα Δ.0.1 (α), Παραρτήματος Δ) προκύπτει ότι το ποσοστό των λεπτών ( $f$ ) είναι σχετικά ψηλό (10,3%), σε σχέση με άλλα διαβασικά αδρανή (βλ. επίσης Πίνακα 7.4). Αυτό επηρεάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου και ενδεχομένως να συσχετίζεται με την παρουσία λωμοντίτη.

Όσον αφορά τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου (MB), παρατηρείται μέση συσχέτιση ( $r = 0,67$ ,  $p = 0,018$ ) με τα ποσοστά χλωρίτη (Chl), παρόλο που η γενική εικόνα επιβεβαιώνει την αύξηση της τιμής MB με την αύξηση του ποσοστού χλωρίτη, όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 6.12 (α) και τη γραμμική συνάρτηση (6.4):



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

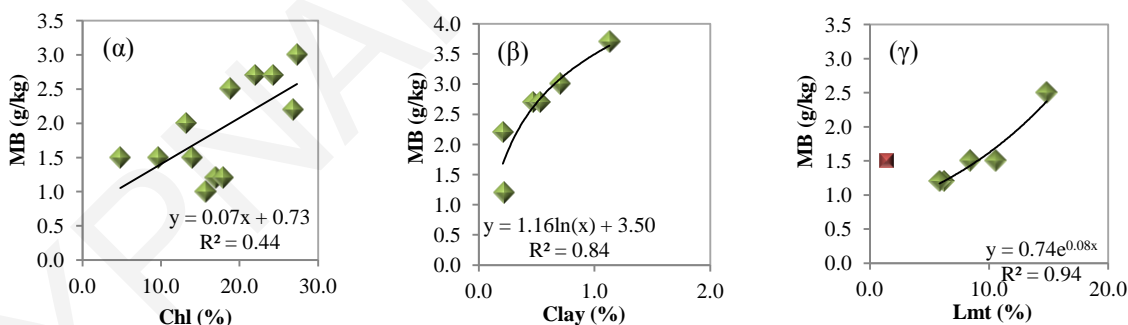
$$MB = 0,07Chl + 0,73 \quad (6.4)$$

Ωστόσο, αυτό συμφωνεί με την άποψη του Higgs (1986), ο οποίος σημειώνει ότι χρειάζεται μέχρι και 3 φορές περισσότερο ποσοστό χλωρίτη για να δώσει το ίδιο αποτέλεσμα τιμής μπλε του μεθυλενίου όσο θα έδινε ένα αργιλικό ορυκτό από την ομάδα των σμεκτιτών. Σε παρόμοια συμπεράσματα καταλήγει και ο Topal (1996), που αναφέρει ότι η τιμή του μπλε του μεθυλενίου που προκύπτει για το χλωρίτη είναι 0,6 (g/100 g) ενώ για τον μοντμοριλλονίτη κυμαίνεται από 4,7 έως 23 (g/100 g). Αυτό επιβεβαιώνει τη πολύ ισχυρή συσχέτιση που προέκυψε ( $r = 0,89$ ,  $p = 0,016$ ) μεταξύ του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου και των ποσοστών των αργιλικών ορυκτών (μοντμοριλλονίτη, νοντρονίτη και ιλλίτη). Στο Διάγραμμα 6.12 (β) παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ των δύο μεταβλητών, η οποία περιγράφεται από την πιο κάτω λογαριθμική συνάρτηση (6.5):

$$MB = 1,16\ln(\text{Clay}) + 3,50 \quad (6.5)$$

Πολύ ισχυρή είναι και η συσχέτιση ( $r = 0,95$ ,  $p = 0,011$ ) που προκύπτει, αν η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου (MB) συσχετιστεί με τα ποσοστά του λωμονίτη (Lmt) (εκτός από το δείγμα ΕΠ23, που περιέχει πολύ χαμηλό ποσοστό λωμονίτη). Στο Διάγραμμα 6.12 (γ), φαίνεται η εκθετική συσχέτιση που περιγράφεται από την πιο κάτω συνάρτηση (6.6):

$$MB = 0,74e^{0,08Lmt} \quad (6.6)$$



**Διάγραμμα 6.12:** Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και (α) της περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl), (β) της περιεκτικότητας σε αργιλικά και (γ) της περιεκτικότητας σε λωμονίτη (Lmt) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

Οι Cole & Sandy (1980) σημειώνουν ότι η παρουσία δευτερογενών ορυκτών (όπως ο λωμονίτης και ο χλωρίτης), συσχετίζεται αρκετά καλά με τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου.

Όσον αφορά τη δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό (WA), όταν τα αποτελέσματά της συσχετιστούν με τα ποσοστά χαλαζία (Qtz) στα διάφορα δείγματα που εξετάστηκαν,

### Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

παρατηρείται μέση αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,67$ ,  $p = 0,023$ ), που περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.7). Αυτό υποδεικνύει ότι αύξηση του περιεχόμενου σε χαλαζία συμβάλει σε μειωμένη απορροφητικότητα στα αδρανή. Οι Romonis et al. (2007) επίσης παρατήρησαν ότι η αύξηση του περιεχόμενου σε χαλαζία των αδρανών οδηγεί σε μείωση του ολικού πορώδους, και επομένως της απορροφητικότητας.

$$WA = -0,07Qtz + 2,86 \quad (6.7)$$

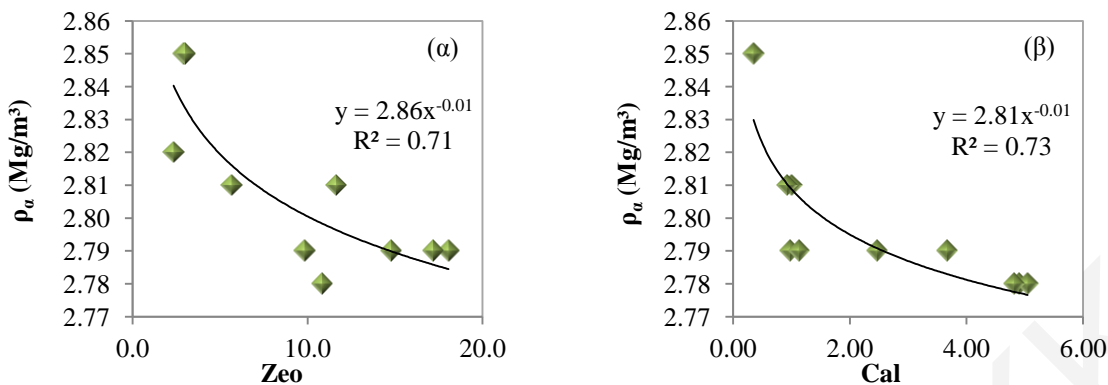
Επιπλέον, παρατηρείται μέση γραμμική συσχέτιση ( $r = 0,68$ ,  $p = 0,022$ ), όταν η απορροφητικότητα (WA) συσχετιστεί με τα ποσοστά των ζεολίθων (ανάλκιμο, λωμοντίτης, νατρόλιθος και χαβαζίτης). Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από τη λογαριθμική εξίσωση (6.8). Από την εξίσωση αυτή φαίνεται ότι, όταν το περιεχόμενο σε ζεόλιθους (Zeo) αυξάνεται, παρατηρείται αύξηση της απορροφητικότητας και άρα υποβάθμιση της ποιότητας των δειγμάτων. Οι Haskins & Bell (1995) επιβεβαιώνουν ότι η απορροφητικότητα βασαλικών πετρωμάτων επηρεάζεται από την παρουσία ζεολίθων, κυρίως λωμοντίτη.

$$WA = 0,43\ln(Zeo) + 1,50 \quad (6.8)$$

Ισχυρή είναι η αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,79$ ,  $p = 0,007$ ) της φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) με τα ποσοστά των ζεολίθων (Zeo). Η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.13 (α) είναι υπερβολική και περιγράφεται από την ακόλουθη συνάρτηση (6.9):

$$\rho_a = 2,86Zeo^{-0,01} \quad (6.9)$$

Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.13 (α), η φαινόμενη πυκνότητα μειώνεται στα αδρανή με αύξηση του περιεχόμενου σε ζεόλιθους. Η φαινόμενη πυκνότητα των αδρανών επηρεάζεται άμεσα από το ειδικό βάρος των συμμετεχόντων ορυκτών. Με την εξαλλοίωση των πρωτογενών ορυκτών, δημιουργούνται δευτερογενή ορυκτά, όπως οι ζεόλιθοι, τα οποία είναι μικρότερου ειδικού βάρους (2,0-2,4) (Jha & Singh, 2016) σε σχέση με τα πρωτογενή (π.χ. αυγίτης: 3,2-3,6) (Fenton & Fenton, 2003).



Διάγραμμα 6.13: Συσχέτιση μεταξύ της φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και (α) της περιεκτικότητας σε ζεόλιθους (Zeo) και (β) της περιεκτικότητας σε ασβεστίτη (Cal) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

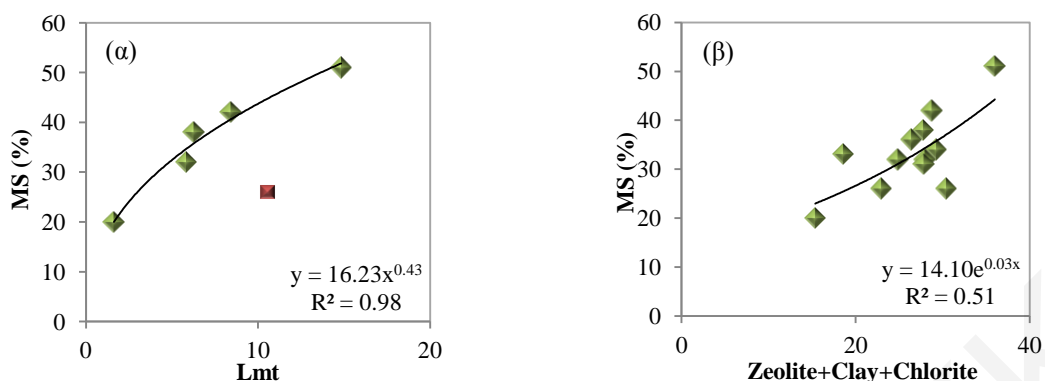
Επιπλέον, η δομή που αποκτά το πέτρωμα είναι χαλαρότερη κατά τις διεργασίες αντικατάστασης των πρωτογενών φάσεων από δευτερογενείς (Ρηγόπουλος, 2009).

Ισχυρή είναι και η αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,72$ ,  $p = 0,019$ ) που παρατηρείται μεταξύ της φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και του ποσοστού ασβεστίτη (Cal). Η καμπύλη που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.13 (β) είναι υπερβολική και περιγράφεται από την εξίσωση (6.10):

$$\rho_a = 2,81\text{Cal}^{-0,01} \quad (6.10)$$

Πολύ ισχυρή είναι η συσχέτιση ( $r = 0,96$ ,  $p = 0,009$ ) που παρατηρείται μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (MS) και των ποσοστών του λωμοντίτη (Lmt) στα δείγματα που εξετάστηκαν (με εξαίρεση το δείγμα ΕΠ12). Η υπερβολική καμπύλη που φαίνεται στο Διάγραμμα 6.14 (α) περιγράφεται από την ακόλουθη συνάρτηση (6.11):

$$\text{MS} = 16,23\text{Lmt}^{0,43} \quad (6.11)$$



Διάγραμμα 6.14: Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και (α) του περιεχόμενου σε λωμοντίτη (Lmt) και (β) του περιεχόμενου σε ζεολίθους, αργιλικά ορυκτά και χλωρίτη (Zeolite, Clay, Chlorite) των υπό εξέταση διαβαστικών αδρανών.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2, το δείγμα ΕΠ37 παρουσιάζει το υψηλότερο ποσοστό απώλειας στη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS), σε σχέση με τα υπόλοιπα διαβαστικά δείγματα που επιλέχθηκαν τυχαία. Αυτό το δείγμα παρουσιάζει επίσης το υψηλότερο ποσοστό λωμοντίτη, επιβεβαιώνοντας το γεγονός ότι το συγκεκριμένο ορυκτό επηρεάζει την υγεία των αδρανών. Για την ακρίβεια, αν προσθέσουμε τα ποσοστά όλων των φυλλοπυριτικών ορυκτών (χλωρίτη και αργίλων) και των ζεόλιθων (ανάλκιμο, λωμοντίτης, χαβαζίτης, νατρόλιθος) στο συγκεκριμένο δείγμα, η τιμή φτάνει το 36%, που είναι και το μεγαλύτερο ποσοστό που προκύπτει από όλα τα διαβαστικά δείγματα. Συσχετίζοντας τα πιο πάνω ορυκτά (ζεόλιθοι, αργιλικά και χλωρίτης) με το συντελεστή αποσάθρωσης, προκύπτει ισχυρή θετική συσχέτιση ( $r = 0,71$ ,  $p = 0,009$ ). Αύξηση του ποσοστού των ζεόλιθων, αργιλικών και χλωρίτη οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή αποσάθρωσης. Στο Διάγραμμα 6.14 (β) παρουσιάζεται η εκθετική καμπύλη που προέκυψε από τις δύο αυτές μεταβλητές και η οποία περιγράφεται από την πιο κάτω συνάρτηση (6.12):

$$MS = 14,10e^{0,03(Zeo+Clay+Chl)} \quad (6.12)$$

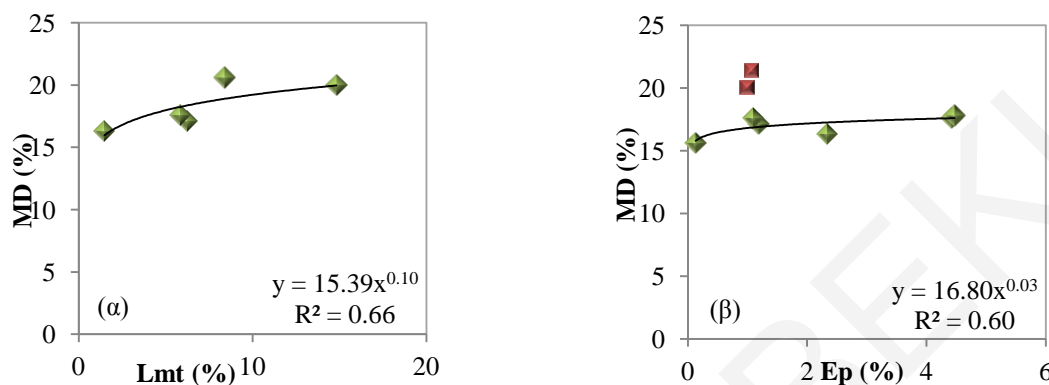
Οι Koukis et al. (2007) παρατηρούν ότι πετρώματα στα οποία υπάρχουν σημαντικά ποσοστά αργιλικών ορυκτών είναι πιο επιρρεπή σε μεταβολές όγκου (βλ. δοκιμή αποσάθρωσης). Πέραν της ποσότητας των πιο πάνω ορυκτών, σημαντικό ρόλο διαδραματίζει και η κατανομή των δευτερογενών ορυκτών στη μάζα των πετρωμάτων (Van Atta & Ludowise, 1976).

Ισχυρή συσχέτιση ( $r = 0,79$ ,  $p = 0,050$ ) παρατηρήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) με τα ποσοστά του λωμοντίτη (Lmt). Στο

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Διάγραμμα 6.15 (α) φαίνεται η καμπύλη που περιγράφεται από την ακόλουθη υπερβολική συνάρτηση (6.13):

$$MD = 15,39e^{0,10Lmt} \quad (6.13)$$



**Διάγραμμα 6.15:** Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) και (α) της περιεκτικότητας σε λωμοντίτη (Lmt) και (β) της περιεκτικότητας σε επίδοτο (Ep) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

Μέση θετική συσχέτιση ( $r = 0,65$ ,  $p = 0,050$ ) παρατηρήθηκε μεταξύ των αποτελεσμάτων της δοκιμής αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) με το ποσοστό του επιδότου (Ep) (χωρίς τα δείγματα ΕΠ13 και ΕΠ37 που παρουσιάζουν ψηλά ποσοστά MD). Η συσχέτιση που φαίνεται στο Διάγραμμα 6.15 (β) περιγράφεται από την υπερβολική συνάρτηση (6.14):

$$MD = 16,80Ep^{0,03} \quad (6.14)$$

Οι πιο πάνω συσχετίσεις υποδηλώνουν ότι αύξηση του βαθμού εξαλλοίωσης των διαβασικών αδρανών, που εκφράζεται από την περιεκτικότητά τους σε λωμοντίτη και επίδοτο, συνοδεύεται από μείωση της αντίστασής τους σε φθορά λόγω τριβής. Οι Wyring et al. (2015) αναφέρουν ότι, παρόλο που τα πρωτογενή και δευτερογενή ορυκτά επηρεάζουν εξίσου την αντοχή των πετρωμάτων, πετρώματα στα οποία υπάρχει έντονη παρουσία δευτερογενών ορυκτών (π.χ. επιδότου, ζεολίθων) εμφανίζουν χαμηλότερες αντοχές. Η απουσία συσχέτισης των αποτελεσμάτων της δοκιμής αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) με το χαλαζία, που είναι και το σκληρότερο ορυκτό στα υπό εξέταση δείγματα, συμπίπτει με το συμπέρασμα του Nalsund (2014), ο οποίος ισχυρίζεται ότι η συσχέτιση αυτή είναι εφικτή για περιεκτικότητες χαλαζία >20%.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Οι Wang et al. (2015) σημειώνουν ότι δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερη συσχέτιση μεταξύ της ορυκτολογικής σύστασης των αδρανών και της δοκιμής MD, λόγω του ότι τα ορυκτά επηρεάζουν τη διαδικασία της στίλβωσης σε περισσότερα από ένα επίπεδο και με διάφορους συνδυασμούς. Ο Σαχπαζής (1988) σημειώνει ότι η αντίσταση σε φθορά λόγω τριβής σχετίζεται περισσότερο με τη σύνδεση μεταξύ των ορυκτών κόκκων των αδρανών. Όσο ισχυρότερη είναι αυτή η σύνδεση, τόσο ψηλότερη είναι η αντίσταση των αδρανών σε τριβή. Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής επιβεβαιώνουν τους πιο πάνω ερευνητές. Παρά τις όποιες συσχετίσεις έχουν αναφερθεί, διαφαίνεται ότι η ορυκτολογία των αδρανών, όπως αυτή προέκυψε μέσα από τις αναλύσεις XRD, δεν καθορίζει τα αποτελέσματα της δοκιμής Micro-Deval. Αυτό το συμπέρασμα ενισχύεται από το γεγονός ότι δεν παρατηρήθηκαν συσχετίσεις μεταξύ των υπολοίπων δευτερογενών ορυκτών (π.χ. χλωρίτη, ακτινόλιθου), πέραν του επίδοτου και των ζεολίθων που ούτως ή άλλως συμμετέχουν στα δείγματα σε χαμηλότερα ποσοστά, με τα αποτελέσματα της δοκιμής Micro-Deval.

Πέραν των συσχετίσεων μεμονωμένων ορυκτών με τις διάφορες ιδιότητες των αδρανών που εξετάστηκαν, επιχειρήθηκε να γίνει συσχέτιση και μεταξύ των λόγων μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_o/H$ ) και δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών ( $S_e/P$ ) με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα αδρανή υλικά της 2<sup>ης</sup> φάσης. Αρχικά υπολογίστηκαν οι λόγοι  $S_o/H$  και  $S_e/P$  με βάση τις ημι-ποσοτικές αναλογίες των ορυκτών από τις ορυκτολογικές αναλύσεις (Πίνακας 6.3). Ως σκληρά ορυκτά θεωρήθηκαν εκείνα με σκληρότητα  $H \geq 5$ , σύμφωνα με την κλίμακα Mohs, και ως μαλακά εκείνα με σκληρότητα  $H < 5$ . Για τα μαλακά ορυκτά ( $S_o$ ) αθροίστηκαν τα ποσοστά των χλωρίτη, ασβεστίτη, λωμοντίτη, μοντμοριλλονίτη, ιλλίτη, νοντρονίτη, χαλκοπυρίτη και χαβαζίτη. Για τα σκληρά ορυκτά ( $H$ ) αθροίστηκαν τα ποσοστά των αλβίτη, χαλαζία, ανορθίτη, αυγίτη, ακτινόλιθου, επίδοτου, μαγνητίτη, πυρίτη, ανάλκιμου, τιτανίτη, νατρόλιθου, αιματίτη, ρουτίλιου, ιλμενίτη, πυρολουσίτη, απατίτη, χρωμίτη και σοδάλιθου. Για τα δευτερογενή ορυκτά ( $S_e$ ), αθροίστηκαν τα ποσοστά των αλβίτη, χλωρίτη, χαλαζία, ασβεστίτη, ακτινόλιθου, επίδοτου, λωμοντίτη, ανάλκιμου, νατρόλιθου, μοντμοριλλονίτη, ιλλίτη, νοντρονίτη, σοδάλιθου, πυρολουσίτη και χαβαζίτη. Για τα πρωτογενή ορυκτά ( $P$ ), αθροίστηκαν τα ποσοστά των ανορθίτη, αυγίτη, μαγνητίτη, πυρίτη, τιτανίτη, χαλκοπυρίτη, αιματίτη, ρουτίλιου, απατίτη, χρωμίτη και ιλμενίτη. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 6.4: Πετρογραφικές παραμέτροι (S<sub>0</sub>: μαλακά ορυκτά, Η: σκληρά ορυκτά, S<sub>e</sub>: δευτερογενή ορυκτά, Ρ: πρωτογενή ορυκτά).

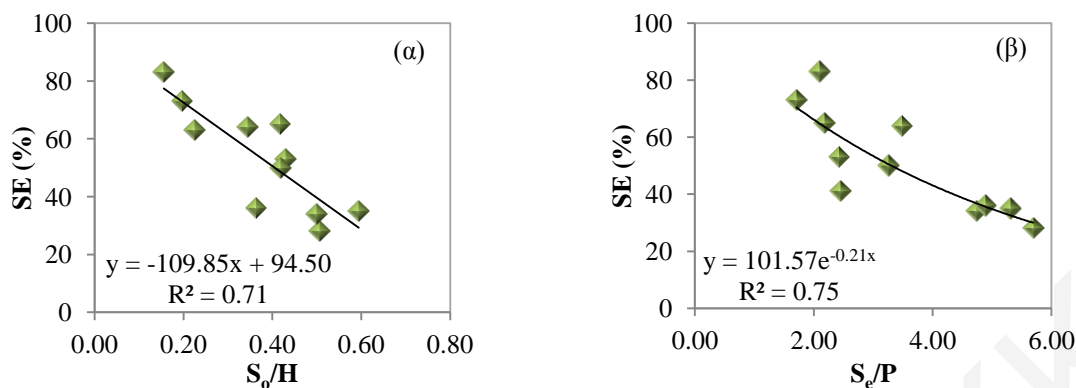
Κωδικός Δείγματος	S <sub>0</sub>	Η	S <sub>e</sub>	Ρ
ΕΠ1	33,62	66,38	85,1	15,0
ΕΠ3	30,02	69,97	70,8	29,2
ΕΠ7	18,31	81,70	80,9	19,2
ΕΠ11	29,43	70,58	68,6	31,4
ΕΠ12	17,89	82,11	71,1	29,0
ΕΠ13	29,51	70,49	76,5	23,5
ΕΠ23	13,43	86,57	67,7	32,3
ΕΠ27	33,31	66,69	82,6	17,4
ΕΠ28	26,62	73,37	83,0	17,0
ΕΠ30	16,42	83,59	63,0	37,0
ΕΠ36	25,57	74,44	77,7	22,3
ΕΠ37	37,28	62,72	84,2	15,8
ΕΠ38	22,20	77,80	61,2	38,9

Με ανάλυση παλινδρόμησης προσδιορίστηκαν οι διάφορες συναρτήσεις που αναφέρονται πιο κάτω. Οι μόνες αξιόλογες συσχετίσεις που παρατηρούνται είναι με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου (SE), όπου προκύπτει πολύ ισχυρή αρνητική συσχέτιση, τόσο με το λόγο μαλακών/σκληρών ορυκτών S<sub>0</sub>/Η ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,001$ ), όσο και με το λόγο δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών (S<sub>e</sub>/Ρ) ( $r = -0,83$ ,  $p = 0,002$ ). Οι πιο πάνω συσχετίσεις παρουσιάζονται στα Διάγραμμα 6.16 (α) και (β), και περιγράφονται από τις συναρτήσεις (6.15) και (6.16) αντίστοιχα:

$$SE = -109,85(S_0/H) + 94,50 \quad (6.15)$$

$$SE = 101,57e^{-0,21(S_e/P)} \quad (6.16)$$

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

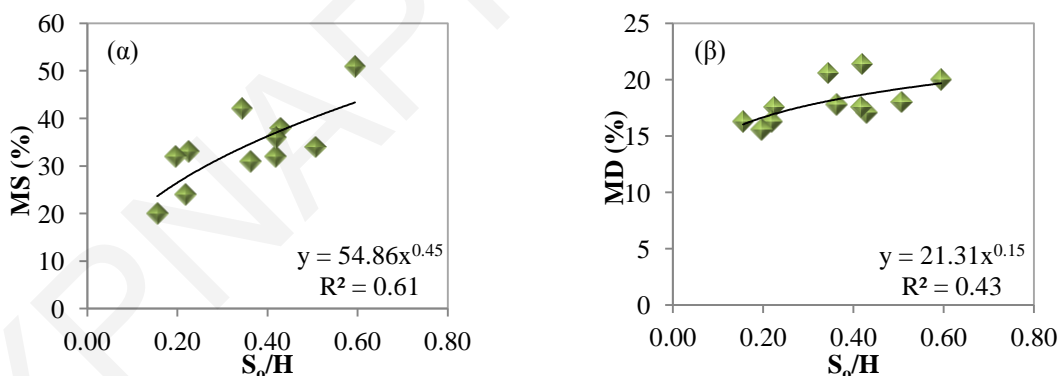


**Διάγραμμα 6.16:** Συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (α) του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_0/H$ ) και (β) του λόγου δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών ( $S_e/P$ ) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

Ισχυρή ( $r = 0,77$ ,  $p = 0,006$ ) και μέση θετική ( $r = 0,60$ ,  $p = 0,049$ ) συσχέτιση προκύπτει μεταξύ του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_0/H$ ) και των συντελεστών αποσάθρωσης με θεϊκό μαγνήσιο (MS) και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) αντίστοιχα. Οι υπερβολικές συναρτήσεις που προέκυψαν από τις πιο πάνω συσχετίσεις φαίνονται στο Διάγραμμα 6.17 και περιγράφονται από τις συναρτήσεις (6.17) και (6.18):

$$MS = 54,86(S_0/H)^{0,45} \tag{6.17}$$

$$MD = 21,31(S_0/H)^{0,15} \tag{6.18}$$



**Διάγραμμα 6.17:** Συσχέτιση μεταξύ του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_0/H$ ) και (α) του συντελεστή αποσάθρωσης με θεϊκό μαγνήσιο (MS) και (β) του συντελεστή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

Με τις υπόλοιπες ιδιότητες που εξετάστηκαν στα αδρανή της 2<sup>ης</sup> φάσης, δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες συσχετίσεις, όπως φαίνεται από τις εξισώσεις (6.19) έως (6.24) που συνδέουν τους λόγους δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών ( $S_e/P$ ) και μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_0/H$ ) με τις ιδιότητες μπλε του μεθυλενίου (MB),



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

απορροφητικότητας σε νερό (WA), αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και αντίστασης σε τριβή (MD).

$$MB = 0,27(S_e/P) + 0,95 \quad (R^2 = 0,31) \quad (6.19)$$

$$WA = 3,28(S_e/P)^{-0,28} \quad (R^2 = 0,23) \quad (6.20)$$

$$MS = 24,53(S_e/P)^{0,23} \quad (R^2 = 0,15) \quad (6.21)$$

$$MD = 15,68(S_e/P)^{0,11} \quad (R^2 = 0,18) \quad (6.22)$$

$$MB = 2,56(S_o/H) + 0,99 \quad (R^2 = 0,27) \quad (6.23)$$

$$WA = 2,94e^{-0,53(S_o/H)} \quad (R^2 = 0,07) \quad (6.24)$$

Οι ασθενείς αυτές τάσεις υποδεικνύουν ότι οι ιδιότητες των αδρανών δεν εξαρτώνται μόνο από τις μεταμορφικές επιδράσεις που έχουν υποστεί, αλλά και από το βαθμό τεκτονικής καταπόνησης που παρουσιάζουν. Επιπλέον, όπως αναφέρει ο Σαχπαζής (1988), όλα τα πετρώματα που έχουν στη σύνθεσή τους ορυκτά ποικίλης σκληρότητας, δεν έχουν ακριβώς την ίδια απόδοση, επειδή επιδρούν στις ιδιότητές τους και άλλοι μεταβλητοί παράγοντες, όπως για παράδειγμα η εκατοστιαία αναλογία και η κατανομή στη μάζα του πετρώματος των σκληρών και μαλακών ορυκτών, η μέση σκληρότητά τους, η διαφορά της μέσης σκληρότητάς τους, το μέγεθος των ορυκτών κόκκων ή κρυστάλλων, η μορφή τους, ο βαθμός σύνδεσης ή αλληλοεμπλοκής, κ.α.

### 6.2.1.1 Μικροπετρογραφικοί δείκτες

Σύμφωνα με τον Ceryan (2017), αρκετοί είναι οι ερευνητές (όπως για παράδειγμα ο Lumb το 1962, ο Weinert το 1964, οι Mendes et al. το 1966, ο Dixon το 1969, οι Onodera et al. το 1974, οι Irfan & Dearman το 1978, οι Cole & Sandy το 1980, οι Howarth & Rowlands το 1987, οι Tugrul & Gurpinar το 1997, οι Rigopoulos et al. το 2010, οι Yildiz et al. το 2010, οι Hu et al. το 2014, οι Momeni et al. το 2015 κ.α.) που πρότειναν κατά καιρούς διάφορες ορυκτολογικές και μικροπετρογραφικές παραμέτρους, ως βάση για δείκτες εκτίμησης της αποσάθρωσης διαφόρων πυριγενών πετρωμάτων. Οι πιο συνηθισμένοι δείκτες που έχουν επινοηθεί μπορούν να ταξινομηθούν ευρέως ως χημικοί, ορυκτολογικοί-πετρογραφικοί και μηχανικοί (Gupta & Rao, 2001).

Οι Rigopoulos et al. (2010) πρότειναν μικροπετρογραφικούς δείκτες που αφορούν κυρίως δολερίτες στους οποίους έχουν επιδράσει διεργασίες μεταμόρφωσης ωκεάνιου πυθμένα, με αποτέλεσμα να προκληθούν συγκεκριμένες ορυκτολογικές μετατροπές. Για να εκφράσουν ποσοτικά τις μετατροπές αυτές, εισήγαγαν τον μικροπετρογραφικό δείκτη

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

αντοχής ( $I_{ps}$ ) και το δείκτη αντικατάστασης ( $I_{rep}$ ). Οι δείκτες αυτοί περιγράφονται από τις σχέσεις (6.25) και (6.26) αντίστοιχα:

$$I_{ps} = \frac{S_o}{H} + \frac{S_e}{P} \quad (6.25)$$

όπου:

$S_o$  = το ποσοστό των μαλακών ορυκτών (σκληρότητα  $<5$  σύμφωνα με την κλίμακα Mohs) (% κατ' όγκο),

$H$ : το ποσοστό των σκληρών ορυκτών (σκληρότητα  $\geq 5$  σύμφωνα με την κλίμακα Mohs) (% κατ' όγκο),

$S_e$  = το ποσοστό των δευτερογενών ορυκτών (% κατ' όγκο) και των μετρούμενων μικρορωγμών κατά τη σημειακή καταμέτρηση,

$P$  = το ποσοστό των πρωτογενών ορυκτών (% κατ' όγκο).

Ο λόγος  $S_o/P$  εκφράζει ποσοτικά το βαθμό εξαλλοίωσης των πετρωμάτων και συσχετίζεται συχνά με τις μηχανικές τους ιδιότητες. Από την άλλη πλευρά, ο λόγος  $S_o/H$  θεωρείται ιδιαίτερης σημασίας για την αντοχή των πετρωμάτων, λόγω της σημαντικά διαφορετικής μηχανικής συμπεριφοράς των μαλακών και των σκληρών ορυκτών.

$$I_{rep} = \frac{\sum_{i=1}^n AP_i}{\sum_{j=1}^m PM_j} \quad (6.26)$$

όπου:

$AP$  = οι ορυκτές φάσεις που αποτελούν προϊόντα εξαλλοίωσης των πρωτογενών μαφικών συστατικών (% κατ' όγκο),

$PM$  = τα υπολειμματικά πρωτογενή μαφικά ορυκτά (% κατ' όγκο).

Ο δείκτης  $I_{rep}$  εκφράζει ποσοτικά το βαθμό αντικατάστασης των πρωτογενών μαφικών ορυκτών από δευτερογενή. Το πρωτογενή μαφικά ορυκτά που περιέχονται στα οφιολιθικά πετρώματα, λόγω διεργασιών μεταμόρφωσης ωκεάνιου πυθμένα, μετατρέπονται σε μία ή περισσότερες δευτερογενείς φάσεις, οι οποίες συνήθως έχουν διαφορετική μηχανική συμπεριφορά σε σχέση με τις πρωτογενείς, οπότε αναμένεται να επηρεάσουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων.

Προκειμένου να εξεταστεί κατά πόσο προκύπτουν διάφορες συσχετίσεις μεταξύ των πιο πάνω δεικτών και των αποτελεσμάτων από τις εργαστηριακές δοκιμές που

### Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

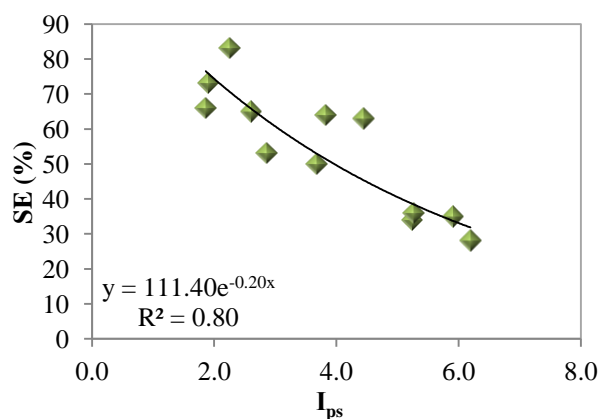
πραγματοποιήθηκαν στα αδρανή υλικά της 2<sup>ης</sup> φάσης, χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι που καταγράφονται στον Πίνακα 6.4. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.5.

**Πίνακας 6.5: Μικροπετρογραφικοί δείκτες για τα υπό εξέταση διαβασικά αδρανή.**

Κωδικός Δείγματος	$I_{ps}$	$I_{rep}$
ΕΠ1	6,20	6,66
ΕΠ3	2,85	4,32
ΕΠ7	4,45	5,07
ΕΠ11	2,60	5,87
ΕΠ12	2,67	14,32
ΕΠ13	3,68	4,94
ΕΠ23	2,25	8,31
ΕΠ27	5,23	9,72
ΕΠ28	5,26	11,50
ΕΠ30	1,90	2,90
ΕΠ36	3,82	10,35
ΕΠ37	5,91	8,20
ΕΠ38	1,86	9,73

Από τα αποτελέσματα δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες συσχετίσεις μεταξύ των δεικτών που υπολογίστηκαν και των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των υπό εξέταση διαβασικών δειγμάτων. Η μόνη αξιοσημείωτη συσχέτιση ( $r = -0,89$ ,  $p = 0,000$ ) παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.18, όπου φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και του μικροπετρογραφικού δείκτη αντοχής ( $I_{ps}$ ) σε όλα τα διαβασικά δείγματα. Η συγκεκριμένη συσχέτιση ορίζεται από την πιο κάτω εκθετική συνάρτηση (6.27), η οποία υποδηλώνει ότι, αυξανόμενου του ποσοστού των πρωτογενών και μαλακών ορυκτών, αυξάνεται το ποσοστό του λεπτού υλικού που περιέχεται στα υπό εξέταση αδρανή υλικά:

$$SE = 111,40e^{-0,20I_{ps}} \quad (6.27)$$



**Διάγραμμα 6.18:** Συσχέτιση μεταξύ του μικροπετρογραφικού δείκτη αντοχής ( $I_{ps}$ ) και του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών.

Η απουσία συσχετίσεων, τουλάχιστον με τις μηχανικές ιδιότητες των υπό εξέταση διαβασικών αδρανών, στις οποίες εστίασαν οι Rigoroulos et al. (2010), ενδεχομένως να οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο υπολογίστηκαν τα ποσοστά των συμμετεχόντων ορυκτών στα δείγματα και στο βαθμό εξαλλοίωσής τους. Οι Rigoroulos et al. (2010) χρησιμοποίησαν σημειακή ανάλυση στο πολωτικό μικροσκόπιο κατά την οποία καταμετρήθηκαν επίσης οι μικρορωγμές. Στην παρούσα διατριβή, η ανάλυση περιορίστηκε σε δοκιμές XRD. Επιπλέον, τα τοπικά δείγματα που εξετάστηκαν είναι εμφανώς πιο εξαλλοιωμένα από τα αντίστοιχα που εξέτασαν οι Rigoroulos et al. (2010), παρά το γεγονός ότι πρόκειται για ίδιους λιθότυπους.

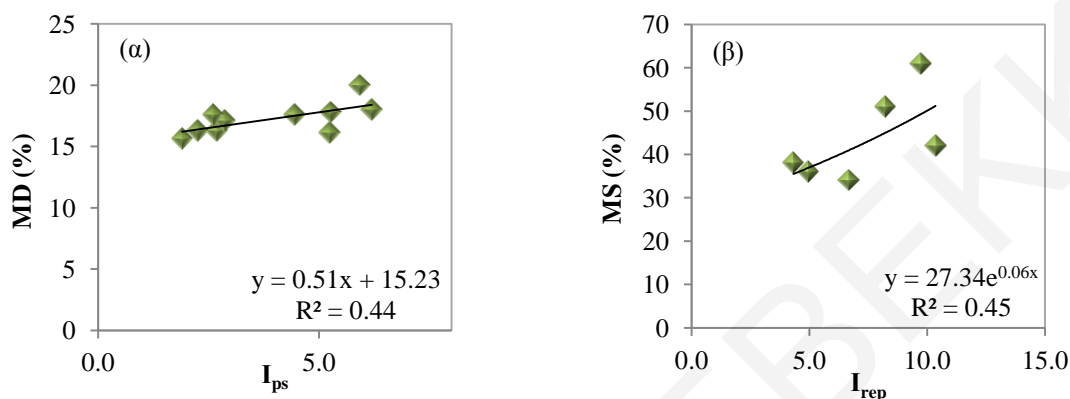
Ωστόσο, αν χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα από τη δοκιμή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής ( $MD \leq 20\%$  που θεωρείται (Senior & Rogers, 1991) ένα από τα ανώτερα όρια για αδρανή σκυροδέματος), παρατηρείται (Διάγραμμα 6.19 (α)) μέση θετική συσχέτιση ( $r = 0,66$ ,  $p = 0,038$ ) με τον μικροπετρογραφικό δείκτη αντοχής ( $I_{ps}$ ), η οποία περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.28):

$$MD = 0,51I_{ps} + 15,23 \quad (6.28)$$

Από το Διάγραμμα 6.19 (α) φαίνεται ότι η αντίσταση των αδρανών υλικών σε φθορά λόγω τριβής (MD) μειώνεται όσο αυξάνεται ο δείκτης  $I_{ps}$ . Αυτό υποδεικνύει ότι η μηχανική αντοχή των δειγμάτων μειώνεται όσο αυξάνεται η εξαλλοίωσή τους. Το ίδιο ισχύει και για τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης (MS) ( $r = 0,66$ ,  $p = 0,049$ ), η συσχέτιση των οποίων με τον συντελεστή αντικατάστασης ( $I_{rep}$ ) οδηγεί στην πιο κάτω εκθετική συνάρτηση:

$$MS = 27,34e^{-0,06I_{rep}} \quad (6.29)$$

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.19 (β), όσο αυξάνεται ο συντελεστής αντικατάστασης ( $I_{rep}$ ) των μαφικών ορυκτών από δευτερογενείς φάσεις, αυξάνεται και η επιδεκτικότητα των αδρανών σε αποσάθρωση ( $MS > 35\%$ ).



Διάγραμμα 6.19: Συσχέτιση μεταξύ (α) του συντελεστή Micro-Deval (MD) και του μικροπετρογραφικού δείκτη αντοχής ( $I_{ps}$ ) και (β) του συντελεστή αποσάθρωσης με θεϊκό μαγνήσιο (MS) και του δείκτη αντικατάστασης ( $I_{rep}$ ).

### 6.2.2 Ασβεστολιθικά αδρανή

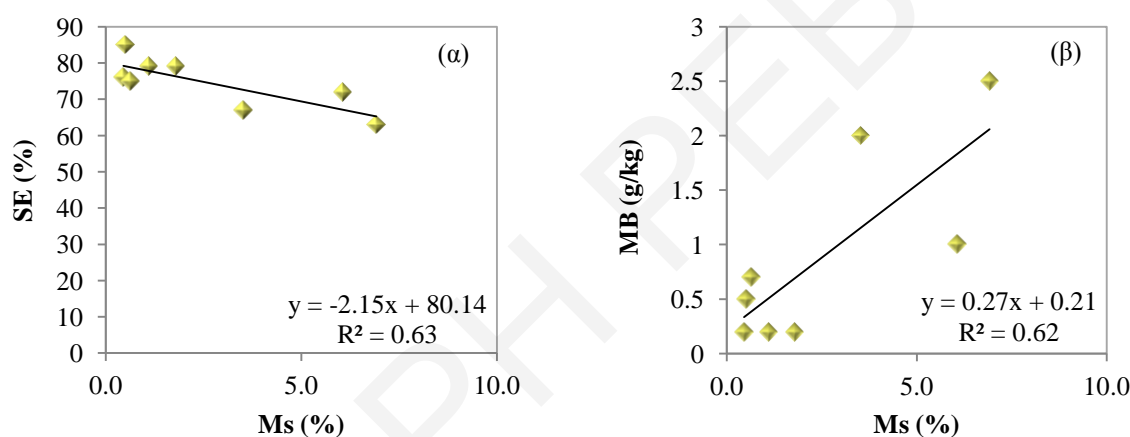
Οι ασβεστόλιθοι και οι δολομίτες γενικά αποτελούν καλή πηγή θραυστών αδρανών. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου τα πιο πάνω πετρώματα μπορεί είναι μαλακά, απορροφητικά και εύθραυστα, με αποτέλεσμα να προκύπτουν κακής ποιότητας αδρανή υλικά (Langer, 2006). Η αντοχή των ασβεστόλιθων και των δολομιτών εξαρτάται κυρίως από την αλληλοσύνδεση των κόκκων και την ορυκτολογία τους, ενώ ενδεχομένως να αυξάνεται κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου λόγω της ανακρυστάλλωσης που συνοδεύεται από μείωση του πορώδους.

Οι υφαλογενείς ασβεστόλιθοι που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.3, αποτελούνται κατά κύριο λόγο από ασβεσίτη και δολομίτη, ενώ περιέχουν και επουσιώδη ορυκτά, όπως μοσχοβίτη, μαγνησίτη, χαλαζία, αλίτη, ανυδρίτη και νοντρονίτη. Τα ορυκτά αυτά είναι υλικά διάβρωσης παλαιότερων πετρωμάτων, κυρίως από το οφιολιθικό σύμπλεγμα, το σύμπλεγμα Μαμωνιάν και το σχηματισμό Καλαβασού, τα οποία μεταφέρθηκαν από τους ποταμούς και αποτέθηκαν στις ρηχές θαλάσσιες λεκάνες ιζηματογένεσης.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Εξετάζοντας την ορυκτολογία των ασβεστόλιθων και τις ιδιότητές τους που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2, δεν παρατηρήθηκαν ιδιαίτερες συσχετίσεις. Οι Sabatakakis et al. (2008) ισχυρίζονται ότι η υφή και η δομή των ασβεστόλιθων συσχετίζονται καλύτερα με τις ιδιότητες (ειδικότερα τις μηχανικές) των πετρωμάτων αυτών, σε σχέση με την ορυκτολογική τους σύσταση. Όπως αναφέρουν χαρακτηριστικά οι πιο πάνω ερευνητές, το μέγεθος των κόκκων της σπαριτικής υφής είναι συνήθως μεγάλο, επηρεάζοντας έτσι την πυκνότητα του πετρώματος και την αντοχή του.

Οι πιο αξιόλογες συσχετίσεις που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής παρουσιάζονται πιο κάτω. Όσον αφορά τις γεωμετρικές ιδιότητες SE και MB, παρατηρήθηκαν ισχυρές συσχετίσεις, ( $r = -0,79$ ,  $p = 0,019$ ) και ( $r = 0,79$ ,  $p = 0,021$ ) αντίστοιχα, με το περιεχόμενο των αδρανών σε μοσχοβίτη.



**Διάγραμμα 6.20:** Συσχέτιση της περιεκτικότητας σε μοσχοβίτη (Ms) με (α) το συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (β) το συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) των υπό εξέταση ασβεστολιθικών αδρανών.

Στο Διάγραμμα 6.20 (α), παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και περιεκτικότητας σε μοσχοβίτη (Ms), που περιγράφεται από την πιο κάτω γραμμική συνάρτηση (6.30):

$$SE = -2,15Ms + 80,14 \quad (6.30)$$

Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 6.2, το δείγμα ΕΠ29 που παρουσιάζει το χαμηλότερο ποσοστό ισοδύναμου άμμου φαίνεται ότι περιέχει το υψηλότερο ποσοστό μοσχοβίτη (7%) (Πίνακας 6.3), σε σχέση με τα υπόλοιπα ασβεστολιθικά δείγματα. Οι Kondelchuk & Miskovsky (2009) σε δοκιμές σε διαφορετικά πετρώματα (μεταμορφωμένα και πυριγενή) παρατήρησαν εξαιρετική συσχέτιση, με πολύ υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2 =$

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

0,97), της δοκιμής ισοδύναμου άμμου με το ποσοστό των μαρμαρυγιών. Από τα αποτελέσματά τους, φαίνεται ότι τα υλικά που περιέχουν μαρμαρυγίες σε πολύ ψηλό ποσοστό ( $\geq 40\%$ ) έχουν και το μικρότερο ποσοστό ισοδύναμου άμμου. Από αυτό συμπεραίνεται ότι οι μαρμαρυγίες αιωρούνται στο διάλυμα αντί να κροκιδώνονται. Παρά το γεγονός ότι οι μαρμαρυγίες έχουν σχετικά υψηλή πυκνότητα, σε σχέση με παρόμοια σωματίδια όπως ο χαλαζίας και οι αστρίοι, εντούτοις ο ρυθμός κροκίδωσής τους είναι πολύ χαμηλότερος. Αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί από τις γεωμετρικές παραμέτρους των μαρμαρυγιών. Τα φυλλοειδούς μορφής σωματίδια μαρμαρυγιών μπορούν να παραμείνουν σε αιώρηση σε υγρά, σε αντίθεση με τους στρογγυλεμένους κόκκους χαλαζία και αστρίων που κροκιδώνονται αμέσως.

Η συσχέτιση που παρατηρήθηκε μεταξύ του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και του περιεχομένου σε μοσχοβίτη (Ms) και φαίνεται στο Διάγραμμα 6.20 (β) περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.31):

$$MB = 0,27Ms + 0,21 \quad (6.31)$$

Η παρουσία δολομίτη στα ασβεστολιθικά δείγματα φαίνεται ότι επηρεάζει τα αποτελέσματα της αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, όπως προκύπτει από τη μέση θετική συσχέτιση ( $r = 0,71$ ,  $p = 0,014$ ) που παρατηρήθηκε. Στο Διάγραμμα 6.21 παρουσιάζεται η συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας των αδρανών σε δολομίτη (Dol) και του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) που περιγράφεται από την υπερβολική συνάρτηση (6.32):

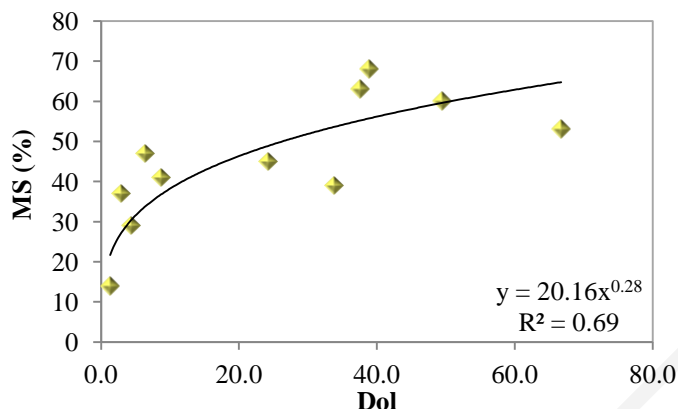
$$MS = 20,16Dol^{0,28} \quad (6.32)$$

Από το Διάγραμμα 6.21 φαίνεται ότι η αύξηση του δολομίτη στα δείγματα των αδρανών που εξετάστηκαν συμβάλει στην αύξηση του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο. Οι Balboni et al. (2011) αναφέρουν έντονη αποσάθρωση δολομιτικών ασβεστόλιθων που εκτέθηκαν σε δοκιμή κρυστάλλωσης αλάτων με την χρήση θειικού μαγνησίου. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Lopez-Arce et al. (2008), που σημειώνουν ότι τα δολομιτικά πετρώματα επηρεάζονται κυρίως από τον εпсоμίτη ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ).

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ίδιο το EN 1367-02 αναφέρει ότι η δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θειικού μαγνησίου μπορεί να μην είναι κατάλληλη για όλα τα είδη

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

πετρωμάτων. Συγκεκριμένα, ιδιαίτερες επιφυλάξεις εκφράζονται για ανθρακικά αδρανή και αδρανή πλούσια σε ορυκτά που περιέχουν μαγνήσιο (π.χ. δολομιτικά αδρανή).



**Διάγραμμα 6.21:** Συσχέτιση του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και της περιεκτικότητας σε δολομίτη (Dol) των υπό εξέταση ασβεστολιθικών αδρανών.

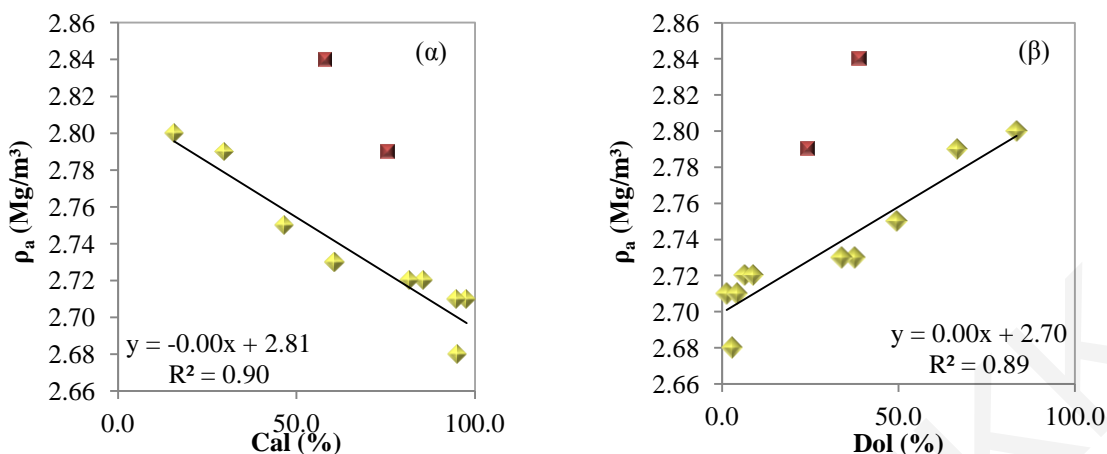
Πολύ ισχυρή είναι η αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,95$ ,  $p = 0,000$ ) της φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) με το ποσοστό του ασβεστίτη (Cal) (χωρίς τα δείγματα ΕΠ5 και ΕΠ10), όπως περιγράφεται από την γραμμική εξίσωση (6.33):

$$\rho_a = -0,00\text{Cal} + 2,81 \quad (6.33)$$

Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.22 (α), η αύξηση του περιεχόμενου ασβεστίτη στα αδρανή οδηγεί σε μείωση της φαινόμενης πυκνότητας. Η φαινόμενη πυκνότητα επηρεάζεται άμεσα από το πορώδες και το ειδικό βάρος των ορυκτών που συμμετέχουν στο πέτρωμα (Bruner et al., 1996). Ο ασβεστίτης είναι ορυκτό με ειδικό βάρος 2,71 (Davis, 1959). Γι' αυτό, όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.22 (α), τα αδρανή που έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ασβεστίτη παρουσιάζουν πυκνότητα που πλησιάζει στο ειδικό βάρος του ασβεστίτη. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του δολομίτη, που έχει μεγαλύτερο ειδικό βάρος από ότι ο ασβεστίτης (2,85). Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 6.22 (β), όσο περισσότερη ποσότητα δολομίτη περιέχεται στα αδρανή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η φαινόμενη πυκνότητα των αδρανών. Η συσχέτιση που προκύπτει μεταξύ των δύο αυτών μεταβλητών (χωρίς τα δείγματα ΕΠ5 και ΕΠ10) είναι πολύ ισχυρή ( $r = 0,94$ ,  $p = 0,000$ ) και περιγράφεται από την πιο κάτω γραμμική συνάρτηση (6.35):

$$\rho_a = 0,00\text{Dol} + 2,81 \quad (6.34)$$





Διάγραμμα 6.22: Συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και (α) της περιεκτικότητας σε ασβεστίτη (Cal) και (β) της περιεκτικότητας σε δολομίτη (Dol) των υπό εξέταση ασβεστολιθικών αδρανών.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η φαινόμενη πυκνότητα συνδέεται άμεσα με τη σύνθεση, την ορυκτολογία και τη μικροδομή ενός πετρώματος. Γι' αυτό αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τον ακριβή προσδιορισμό του πορώδους (Hall & Hamilton, 2015). Το δείγμα ΕΠ5 εμφανίζει την υψηλότερη τιμή φαινόμενης πυκνότητας (βλ. Διάγραμμα 6.22). Ωστόσο, αυτό ενδεχομένως να οφείλεται σε πειραματικό σφάλμα. Παρατηρώντας τον Πίνακα 6.3, και συγκρίνοντας την ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων ΕΠ4 και ΕΠ5, φαίνεται ότι δεν υπάρχουν ιδιαίτερες διαφορές. Άρα, θα ανέμενε κανείς τα δυο πιο πάνω δείγματα να έχουν παρόμοιες πυκνότητες. Αυτό επιβεβαιώνει ότι ενδεχομένως να υπήρξαν σφάλματα κατά την εκτέλεση της δοκιμής προσδιορισμού της φαινόμενης πυκνότητας του δείγματος ΕΠ5. Οι Hall & Hamilton (2016) αναφέρουν ότι αποκλίσεις στα αποτελέσματα της πυκνότητας, οι οποίες δεν μπορούν να αποδοθούν στην ορυκτολογική σύσταση των δειγμάτων, προκύπτουν από πειραματικά σφάλματα. Η μέθοδος υπολογισμού της πυκνότητας (μέθοδος του Αρχιμήδη) είναι πολύ εύκολη διαδικασία. Παρόλα αυτά, μπορεί να προκύψουν διάφορα σφάλματα κατά τη διάρκεια της εκτέλεσής της. Αν για παράδειγμα τα αδρανή δεν ξηραθούν εντελώς, τότε η ξηρή μάζα είναι μεγαλύτερη, οπότε επηρεάζεται το τελικό αποτέλεσμα της πυκνότητας. Επίσης, τα αποτελέσματα επηρεάζονται αν το αδρανές δεν κορεστεί πλήρως ή δεν έχει επιτευχθεί η κατάσταση *ssd*. Στην προκειμένη περίπτωση, για να αυξηθούν οι πυκνότητες ενδεχομένως να παρουσιάστηκε σφάλμα κατά τη μέτρηση της μάζας του πυκνομέτρου που περιείχε νερό. Σύμφωνα με τα πιο πάνω, και όπως συμπερασματικά καταλήγουν οι Hall & Hamilton (2016), η ορυκτολογική και ποσοτική ανάλυση των ορυκτών (XRD) αποτελεί ένα πολύ σημαντικό συμπληρωματικό εργαλείο που μπορεί να παρέχει πληροφορίες για την πυκνότητα των πετρωμάτων.

### 6.2.3 Ασβεσταρενιτικά αδρανή

Τα κλαστικά ιζηματογενή πετρώματα περιλαμβάνουν μια μεγάλη γκάμα πετρωμάτων των οποίων η ορυκτολογία, τα πετρογραφικά χαρακτηριστικά και οι μηχανικές ιδιότητες ποικίλουν (Ulusay et al., 1994). Γενικά, όταν στα πετρώματα περιέχεται αρκετή ποσότητα σε χαλαζία, τότε αυτά είναι σκληρά, αρκούντως συνεκτικά και αποτελούν συνήθως καλή πηγή θραυστών αδρανών. Παρόλα αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις που μπορεί αντίστοιχα πετρώματα να είναι μαλακά, απορροφητικά και εύθραυστα, με αποτέλεσμα να προκύπτουν κακής ποιότητας αδρανή υλικά (Langer, 2006). Οι ασβεσταρενίτες που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.3, αποτελούνται από ασβεστίτη, πλαγιόκλαστα (αλβίτη και ανορθίτη), χαλαζία, δολομίτη, μοσχοβίτη, ακτινόλιθο, χλωρίτη και μοντμοριλλονίτη σε διαφορετικές αναλογίες. Παρόλο που όλα τα δείγματα παρουσιάζουν περίπου τα ίδια ποσοστά ορυκτών, το δείγμα ΕΠ32 διαφοροποιείται. Το συγκεκριμένο δείγμα παρουσιάζει επίσης τη χειρότερη απόδοση όσον αφορά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες, σε σχέση με τα υπόλοιπα (Πίνακας 6.2). Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 6.3, το πιο πάνω δείγμα παρουσιάζει αρκετά ψηλό ποσοστό ασβεστίτη και μοντμοριλλονίτη, και χαμηλά ποσοστά χαλαζία, δολομίτη, πλαγιόκλαστων, ακτινόλιθου και χλωρίτη, συγκρινόμενο με τα υπόλοιπα δείγματα που εξετάστηκαν. Οι αναλογίες αυτές δικαιολογούν τη συμπεριφορά του στις διάφορες δοκιμές που υποβλήθηκε, όπως φαίνεται και από τις πιο κάτω συσχετίσεις.

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου (SE) με το περιεχόμενο των δειγμάτων σε χαλαζία (Qzt), προκύπτει μια μέση θετική συσχέτιση ( $r = 0,51$ ,  $p = 0,048$ ). Η υπερβολική συνάρτηση (6.35) που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.23 (α) υποδηλοί ότι όσο αυξάνεται το περιεχόμενο του χαλαζία στα δείγματα αυξάνεται και το ποσοστό σε ισοδύναμο άμμου, και άρα μειώνεται το λεπτό υλικό.

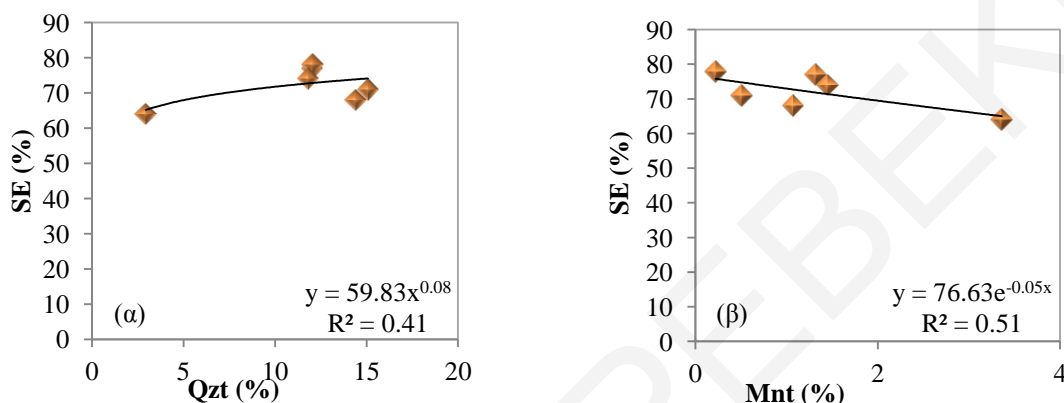
$$SE = 59,83Qzt^{0,08} \quad (6.35)$$

Η πιο πάνω συσχέτιση είναι λογική καθώς, όπως είναι γνωστό, ο χαλαζίας είναι ένα από τα σκληρότερα ορυκτά, με σκληρότητα 7 στην κλίμακα του Mohs. Ως εκ τούτου, πρόκειται για ορυκτό ανθεκτικό στην αποσάθρωση (de Freitas, 2009). Άρα, το λεπτό υλικό που δύναται να προκύψει από τις διάφορες διαδικασίες της επεξεργασίας του είναι λιγότερο, σε σχέση με κάποια άλλα ορυκτά που είναι πιο εύθραυστα, όπως για παράδειγμα ο μοντμοριλλονίτης (Mnt).

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα της δοκιμής ισοδύναμου άμμου (SE) με το περιεχόμενο των δειγμάτων σε μοντμοριλλονίτη (Mnt), προκύπτει μια μέση αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,69$ ,  $p = 0,050$ ). Η εκθετική συνάρτηση (6.36) που παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 6.23 (β) υποδηλώνει ότι η αύξηση του λεπτού υλικού που περιέχεται στα δείγματα συμβάλλει στη μείωση του συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE).

$$SE = 76,63e^{-0,05Mnt} \quad (6.36)$$



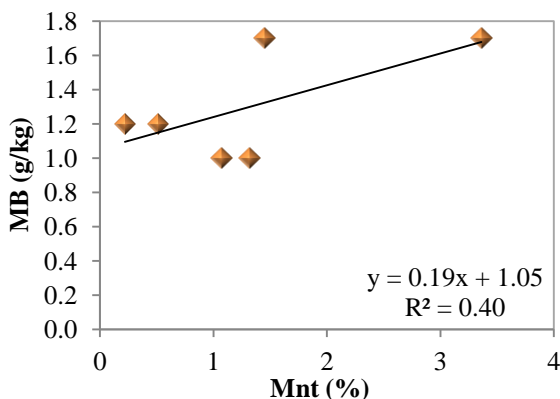
Διάγραμμα 6.23: Συσχέτιση συντελεστή ισοδύναμου άμμου (SE) και (α) περιεχομένου σε χαλαζία (Qzt) και (β) περιεχομένου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

Το δείγμα ΕΠ32 που έχει το ψηλότερο ποσοστό μοντμοριλλονίτη (3%) (Πίνακας 6.3), εμφανίζει το χαμηλότερο ποσοστό ισοδύναμου άμμου (Πίνακας 6.2), σε σχέση με τα υπόλοιπα ασβεσταρενιτικά δείγματα. Αυτό ήταν αναμενόμενο, δεδομένου του εξαιρετικά μικρού μεγέθους των κόκκων των ορυκτών της ομάδας των σμεκτιτών (Murray, 1991).

Παρόμοια συσχέτιση ( $r = -0,62$ ,  $p = 0,490$ ) παρατηρείται και μεταξύ των αποτελεσμάτων του ισοδύναμου άμμου (SE) με το περιεχόμενο των δειγμάτων σε ασβεσίτη (Cal). Η εκθετική συνάρτηση που προέκυψε περιγράφεται από την πιο κάτω εξίσωση (6.37):

$$SE = 84,38e^{0,00Cal} \quad (6.37)$$

Όσον αφορά τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου (MB), η πιο αξιόλογη συσχέτιση ( $r = 0,64$ ,  $p = 0,050$ ) που παρατηρήθηκε είναι με το περιεχόμενο σε μοντμοριλλονίτη (Mnt). Συγκεκριμένα, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 6.24 και στην εξίσωση (6.38), τα δείγματα που περιέχουν αυξημένο ποσοστό σε μοντμοριλλονίτη παρουσιάζουν μεγαλύτερο συντελεστή μπλε του μεθυλενίου. Ο μοντμοριλλονίτης είναι ενεργό αργιλικό ορυκτό, οπότε η συσχέτιση ήταν αναμενόμενη.



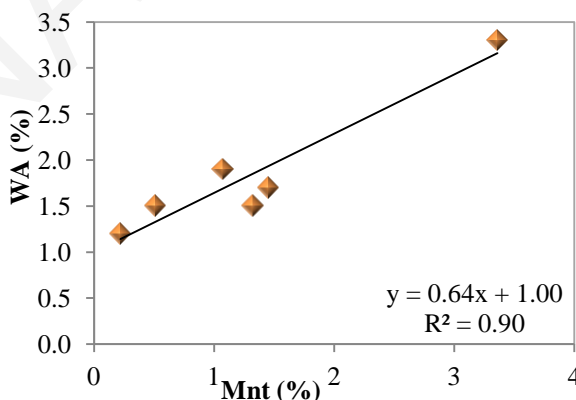
Διάγραμμα 6.24: Συσχέτιση συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και περιεχόμενου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

$$MB = 0,19Mnt + 1,05 \quad (6.38)$$

Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα της δοκιμής απορροφητικότητας σε νερό (WA) με το περιεχόμενο σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) στα υπό εξέταση ασβεσταρενιτικά αδρανή, παρατηρείται μια πολύ ισχυρή ( $r = 0,95$ ,  $p = 0,004$ ) γραμμική συνάρτηση (6.39), που υποδηλώνει ότι αδρανή τα οποία περιέχουν αυξημένο ποσοστό μοντμοριλλονίτη απορροφούν περισσότερο νερό (Διάγραμμα 6.25).

$$WA = 0,64Mnt + 1,00 \quad (6.39)$$

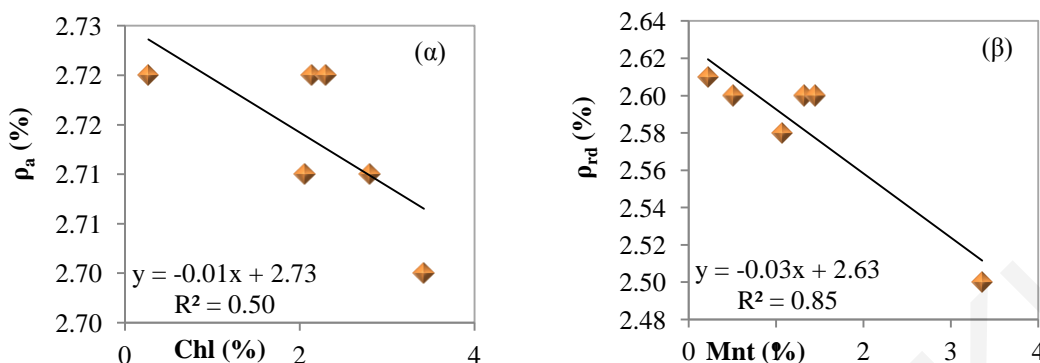
Οι Franzini et al. (2007) επίσης παρατήρησαν πολύ ισχυρή συσχέτιση ( $r = 0,90$ ) μεταξύ της περιεκτικότητας ψαμμιτών σε σμεκτίτες και της ικανότητάς τους να απορροφούν νερό.



Διάγραμμα 6.25: Συσχέτιση συντελεστή απορροφητικότητας σε νερό (WA) και περιεχόμενου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

Ισχυρή ( $r = -0,70$ ,  $p = 0,050$ ) είναι η αρνητική συσχέτιση που παρατηρήθηκε μεταξύ της φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και του περιεχόμενου των δειγμάτων που εξετάστηκαν σε χλωρίτη (Chl). Η πιο πάνω συσχέτιση περιγράφεται από τη γραμμική εξίσωση (6.40):

$$\rho_a = -0,01\text{Chl} + 2,73 \quad (6.40)$$



Διάγραμμα 6.26: Συσχέτιση μεταξύ (α) φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_a$ ) και περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl) και (β) ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) και περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

Όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 6.26 (α), η φαινόμενη πυκνότητα των αδρανών που εξετάστηκαν μειώνεται με αύξηση του περιεχομένου σε χλωρίτη. Η φαινόμενη πυκνότητα επηρεάζεται άμεσα από το ειδικό βάρος των συμμετεχόντων ορυκτών. Ο χλωρίτης έχει ειδικό βάρος 2,7-3,3 (Schumann, 2008).

Πολύ ισχυρή ( $r = -0,92$ ,  $p = 0,009$ ) είναι και η αρνητική συσχέτιση μεταξύ της ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) και του ποσοστού του μοντμοριλλονίτη (Mnt) (Διάγραμμα 6.26 (β)), η οποία περιγράφεται από τη συνάρτηση (6.41) που υποδηλώνει ότι η παρουσία δευτερογενών ορυκτών στα δείγματα μειώνει την πυκνότητά τους:

$$\rho_{rd} = -0,03\text{Mnt} + 2,63 \quad (6.41)$$

Όσον αφορά τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS), η παρουσία χαλαζία (Qzt) φαίνεται να διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στα αποτελέσματά της. Από το Διάγραμμα 6.27 (α) παρατηρείται πολύ ισχυρή ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,037$ ) αρνητική συσχέτιση που ορίζεται από την πιο κάτω γραμμική συνάρτηση (6.42), η οποία υποδηλώνει ότι ο συντελεστής αποσάθρωσης μειώνεται με την αύξηση του περιεχομένου σε χαλαζία στα δείγματα. Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ο χαλαζίας είναι γενικά ανθεκτικό ορυκτό στην αποσάθρωση λόγω της σκληρότητάς του.

$$\text{MS} = -0,85\text{Qzt} + 51,99 \quad (6.42)$$

Πολύ ισχυρή ( $r = 0,89$ ,  $p = 0,016$ ) είναι και η συσχέτιση που παρατηρήθηκε μεταξύ του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και της περιεκτικότητας σε ασβεσίτη

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

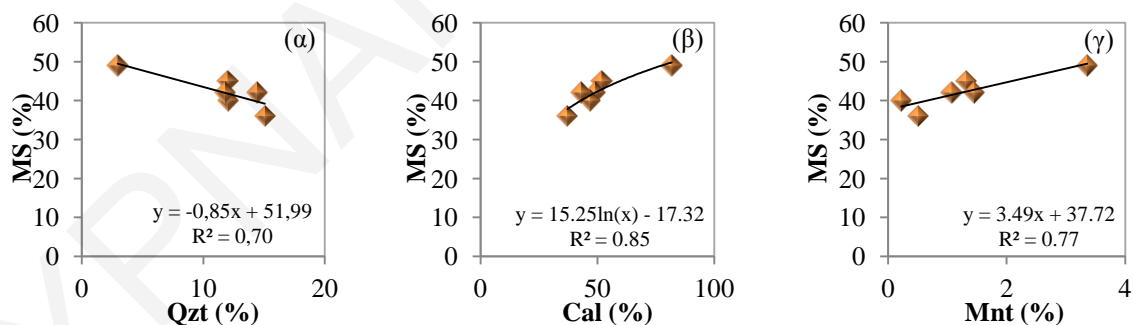
(Cal) των υπό εξέταση δειγμάτων (Διάγραμμα 6.27 (β)). Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από τη λογαριθμική συνάρτηση (6.43):

$$MS = 15,25\ln(\text{Cal}) - 17,32 \quad (6.43)$$

Στα δείγματα στα οποία παρουσιάζεται ψηλότερος συντελεστής αποσάθρωσης (MS), εντοπίζεται μεγαλύτερο ποσοστό ασβεστίτη (Cal). Η Johansson (2011) αναφέρει ότι ο ασβεστίτης αποτελεί ένα αδύναμο ορυκτό, το οποίο επηρεάζει την ανθεκτικότητα των πετρωμάτων, κυρίως λόγω του τέλειου του σχισμού και των αδύναμων διακρυσταλλικών δεσμών. Για τους λόγους αυτούς, φαίνεται ότι είναι πιο επιδεκτικός στην αποσάθρωση. Οι Cardell et al. (2008) επιβεβαιώνουν ότι οι ασβεστόλιθοι (με κύριο ορυκτό τον ασβεστίτη) είναι πολύ επιδεκτικοί στην αποσάθρωση από διάφορα άλατα.

Πολύ ισχυρή είναι και η θετική συσχέτιση ( $r = 0,88$ ,  $p = 0,022$ ) που παρατηρήθηκε μεταξύ του συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και της περιεκτικότητας των δειγμάτων που εξετάστηκαν σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) (Διάγραμμα 6.27 (γ)). Η συσχέτιση αυτή περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.44):

$$MS = 3,49(\text{Mnt}) + 37,72 \quad (6.44)$$



**Διάγραμμα 6.27:** Συσχέτιση συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και (α) περιεκτικότητας σε χαλαζία (Qzt), (β) περιεκτικότητας σε ασβεστίτη (Cal) και (γ) περιεκτικότητας σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

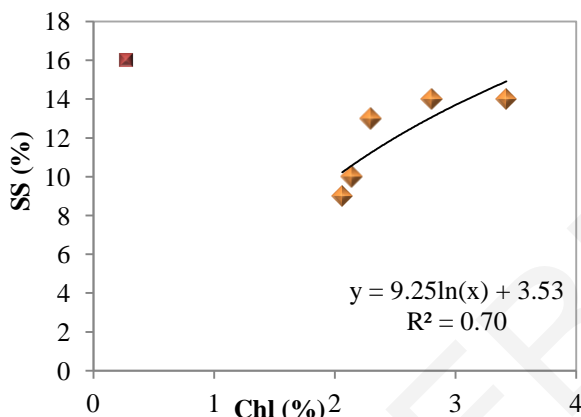
Αντίθετα, η μόνη αξιόλογη συσχέτιση ( $r = 0,80$ ,  $p = 0,048$ ) που παρατηρήθηκε όσον αφορά τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS) είναι με το περιεχόμενο των δειγμάτων σε χλωρίτη (Chl) (εξαιρείται το δείγμα ΕΠ32 που περιέχει ίχνη χλωρίτη). Η

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

συσχέτιση μεταξύ των δυο πιο πάνω παραμέτρων ορίζεται από τη λογαριθμική συνάρτηση (6.45):

$$SS = 9,25\ln(\text{Chl}) + 3,53 \quad (6.45)$$

Από το Διάγραμμα 6.28 φαίνεται ότι τα δείγματα που εμφανίζουν αυξημένη περιεκτικότητα σε χλωρίτη είναι πιο ευάλωτα στην αποσάθρωση με θειικό νάτριο.

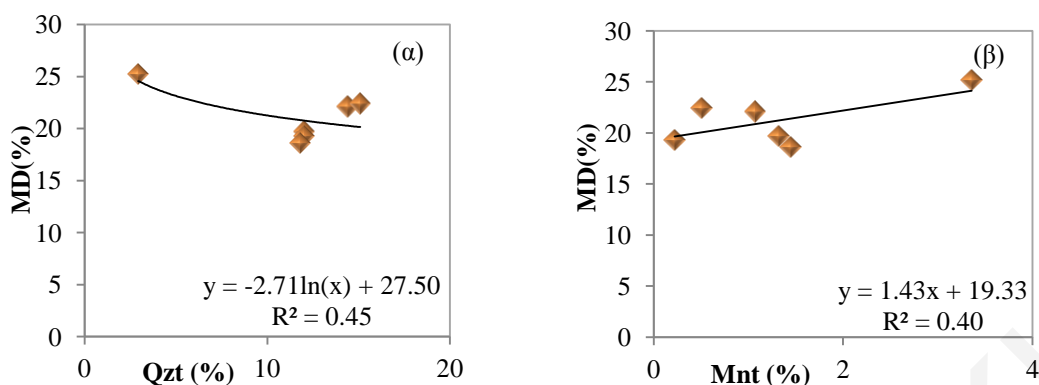


**Διάγραμμα 6.28:** Συσχέτιση συντελεστή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS) και περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της δοκιμής Micro-Deval (MD), προκύπτει μέση αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,55$ ,  $p = 0,050$ ) με το περιεχόμενο των δειγμάτων σε χαλαζία (Qzt). Στο Διάγραμμα 6.29 (α) παρουσιάζεται μια λογαριθμική καμπύλη που ορίζεται από την ακόλουθη συνάρτηση (6.46):

$$MD = -2,71\ln(\text{Qzt}) + 27,50 \quad (6.46)$$

Όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα των δειγμάτων σε χαλαζία (Qzt), μειώνεται το ποσοστό απώλειας μάζας στη δοκιμή Micro-Deval (MD), και άρα αυξάνεται η αντίσταση σε τριβή των δειγμάτων.



Διάγραμμα 6.29: Συσχέτιση συντελεστή Micro-Deval (MD) και (α) περιεχομένου σε χαλαζία (Qzt) και (β) περιεχομένου σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) των υπό εξέταση ασβεσταρενιτικών αδρανών.

Πολύ καλύτερη συσχέτιση, με ιδιαίτερα υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2 = 0,91$ ) παρατήρησαν οι Romonis et al. (2007) μεταξύ των δύο πιο πάνω παραμέτρων. Οι συγκεκριμένοι ερευνητές απέδωσαν αυτή τη συσχέτιση στην απουσία σχισμού στον χαλαζία, με αποτέλεσμα η αφθονία του στα δείγματα να συμβάλει σε ψηλότερη αντίσταση σε τριβή. Οι Keikha & Keykha (2013), Yusof & Zabidi (2016), Bell & Lindsay (1999) και Sabatakakis et al. (2008) επίσης παρατήρησαν ότι αυξημένα ποσοστά χαλαζία οδηγού σε αύξηση της αντοχής αδρανών σε τριβή.

Σε παρόμοια επίπεδα με τη συσχέτιση με το ποσοστό χαλαζία, κυμαίνεται και η συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του συντελεστή Micro-Deval (MD) με το περιεχόμενο των δειγμάτων σε μοντμοριλλονίτη (Mnt) ( $r = 0,63$   $p = 0,049$ ). Η συσχέτιση αυτή είναι γραμμική και ορίζεται πιο κάτω (6.47):

$$MD = 1,43(Mnt) + 19,33 \quad (6.47)$$

Στο Διάγραμμα 6.29 (β) φαίνεται ότι, όσο αυξάνεται το περιεχόμενο των δειγμάτων σε μοντμοριλλονίτη (Mnt), αυξάνεται η απώλεια μάζας στη δοκιμή Micro-Deval (MD), και άρα μειώνεται η αντίσταση σε τριβή των δειγμάτων. Υπάρχουν ωστόσο ερευνητές που υποστηρίζουν ότι η αντίσταση σε τριβή των κλαστικών ιζηματογενών πετρωμάτων συνήθως εξαρτάται από το πορώδες τους, και τη φύση/ποσότητα του συνδετικού υλικού των κόκκων (Langer, 2006). Οι Zorlu et al. (2004), αφού παρατήρησαν ότι υπάρχει μικρή έως και καθόλου συσχέτιση της πετρογραφίας με τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των ψαμμιτικών αδρανών που εξέτασαν, συμπέραναν ότι από μόνα τους τα ποσοστά των ορυκτών δεν μπορούν να προβλέψουν την απόδοση των αδρανών. Γι' αυτό πρέπει η πετρογραφική εξέταση να χρησιμοποιείται παράλληλα με τις υπόλοιπες δοκιμές. Οι Tugrul



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

& Zarif (1998) επίσης ισχυρίζονται ότι η υφή και η δομή των ψαμμιτών φαίνεται να συσχετίζεται καλύτερα με την ανθεκτικότητα, σε σχέση με την ορυκτολογική τους σύσταση. Οι ίδιοι ερευνητές μάλιστα αναφέρουν ότι αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να προβλέψουν καλύτερα τις μηχανικές ιδιότητες των ψαμμιτών.

### 6.3 Χημικές αναλύσεις (XRF)

Οι χημικές αναλύσεις XRF πραγματοποιήθηκαν σε κονιοροποιημένο υλικό σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν στη 2<sup>η</sup> φάση της παρούσας διατριβής. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.6-6.8. Σημειώνεται ότι το πυρίτιο (Si) περιέχεται στα πυριτικά ορυκτά και κυρίως στον χαλαζία, το αργίλιο (Al) στους αστρίους, μαρμαρυγίες και στα αργιλικά. Το κάλιο (K) και το νάτριο (Na) βρίσκονται συνήθως σε καλιούχους αστρίους, στα πλαγιόκλαστα, στον ιλλίτη, σε ζεόλιθους και σε αργιλικά ορυκτά. Το ασβέστιο (Ca) συμμετέχει στα πλαγιόκλαστα αλλά και ως συνδετικό υλικό. Το μαγνήσιο (Mg) περιέχεται στον χλωρίτη, στα αργιλικά, στα ανθρακικά και ως συνδετικό υλικό. Το τιτάνιο (Ti) βρίσκεται σε μερικά αργιλικά και το μαγγάνιο (Mn) συνήθως σε οξειδία (Τσιπούρα-Βλάχου, 2005).

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των διαβασικών αδρανών (Πίνακας 6.6) συμφωνούν με τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων (Πίνακας 6.3). Το ποσοστό του διοξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) κυμαίνεται μέσα στα όρια που καθορίζονται για τα βασικά πετρώματα (45-54%) (Gill, 2010). Στην παρούσα διατριβή, τα ορυκτά που περιέχουν πυρίτιο στα διαβασικά αδρανή είναι τα ακόλουθα (βλ. επίσης Πίνακα 6.3): πλαγιόκλαστα (αλβίτης, ανορθίτης), χλωρίτης, αργιλικά (νοντρονίτης, ιλλίτης, μοντμοριλλονίτης), χαλαζίας, κλινοπυρόξενος (αυγίτης), αμφίβολος (ακτινόλιθος), ζεόλιθοι (λωμοντίτης, χαβαζίτης, νατρόλιθος, ανάλκιμο), επίδοτο, τιτανίτης, αστριοειδή (σοδάλιθος).

Ο σίδηρος (Fe) είναι επίσης συνηθισμένο συστατικό πολλών ορυκτών. Το ποσοστό συμμετοχής σε Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> αντικατοπτρίζει κυρίως την περιεκτικότητα των αδρανών σε χλωρίτη, αυγίτη, ακτινόλιθο, χαλκοπυρίτη, πυρίτη, μαγνητίτη, αιματίτη, επίδοτο, και αργιλικά. Το αργίλιο (Al) βρίσκεται κυρίως στα αργιλικά ορυκτά, στα πλαγιόκλαστα, στους ζεόλιθους, και στους αυγίτη, επίδοτο, σοδάλιθο. Το μαγνήσιο (Mg) περιέχεται στο χλωρίτη, στα αργιλικά, στον ακτινόλιθο, στον αυγίτη. Το ασβέστιο (Ca) συμμετέχει στον ανορθίτη, στον ασβεστίτη, στο επίδοτο, στους ζεόλιθους, στα αργιλικά. Το νάτριο (Na) βρίσκεται κυρίως στον αλβίτη, στον αυγίτη, στους ζεόλιθους και στα αργιλικά. Το τιτάνιο

### Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

(Ti) συμμετέχει κυρίως στον τιτανίτη, στο ρουτίλιο, στον ιλμενίτη και στον αυγίτη. Το κάλιο (K) περιέχεται στους χαβαζίτη και ιλλίτη. Το θείο (S) περιέχεται στον χαλκοπυρίτη και στον πυρίτη. Να σημειωθεί ότι η συνολική περιεκτικότητα θείου στο διαβασικό δείγμα ΕΠ13 θεωρείται αρκετά μεγάλη, σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα, δεδομένου ότι ξεπερνά το καθορισμένο όριο του 1% (σύμφωνα με την Κ.Δ.Π. 164/2011). Το μαγγάνιο (Mn) οφείλεται στον πυρολουσίτη, ενώ το φωσφόρο (P) στον απατίτη. Τέλος, η παρουσία του χλωρίτη (Cl) και του χρωμίτη (Cr) οφείλονται στον σοδάλιθο και στον χρωμίτη αντίστοιχα.

**Πίνακας 6.6: Χημικές αναλύσεις στα υπό εξέταση διαβασικά αδρανή της 2<sup>ης</sup> φάσης.**

Αποτελέσματα (%)													
	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
ΕΠ 1	50,6	14,2	11,8	9,5	6,9	3,7	1,2	0,6	1,0	0,1			
ΕΠ 3	48,8	13,8	11,5	9,6	9,6	4,2	0,9	0,5	0,6				
ΕΠ 7	49,7	15,9	11,5	9,2	6,1	4,6	1,7	0,8	0,5		0,1		
ΕΠ 11	49,4	13,6	11,6	10,0	8,8	4,2	1,0	0,5	0,5				
ΕΠ 12	51,3	12,5	11,3	9,3	10,6	3,5	0,6	0,4					
ΕΠ 13	49,1	13,2	11,4	10,6	9,5	3,4	0,8	0,4	1,1				
ΕΠ 23	51,2	12,8	11,6	8,4	9,2	4,6	0,8	0,3	0,6			0,1	0,1
ΕΠ 27	47,0	15,9	11,9	11,2	6,9	3,5	1,4	0,7	0,9	0,1			
ΕΠ 28	49,9	16,2	11,2	9,8	6,1	3,9	1,6	0,2	0,6				
ΕΠ 30	50,6	11,3	10,7	11,1	11,3	3,2	0,6	0,7	0,1			0,1	0,1
ΕΠ 36	50,1	13,0	11,7	10,3	8,9	4,2	0,8	0,3	0,2				
ΕΠ 37	50,5	14,0	11,4	10,3	7,6	4,1	0,8	0,2	0,5				0,1
ΕΠ 38	47,1	16,3	12,1	11,7	8,0	2,8	0,9	0,2	0,5				0,1

Τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων των ασβεστολιθικών αδρανών (Πίνακας 6.7) επίσης φαίνεται ότι συσχετίζονται με τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων (Πίνακας 6.3). Το κύριο συστατικό των ασβεστόλιθων είναι το ανθρακικό ασβέστιο, το οποίο βρίσκεται στα δείγματα που εξετάστηκαν με τη μορφή ασβεστίτη. Επειδή συνήθως ο ασβεστίτης δεν είναι τελείως καθαρός, παρατηρούνται και μικρές συγκεντρώσεις άλλων στοιχείων, όπως για παράδειγμα σιδήρου, οι οποίες όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω προέκυψαν από τη διάβρωση παλαιότερων πετρωμάτων του οφιολιθικού συμπλέγματος. Συγκεντρώσεις MgO>1% υποδηλώνουν την παρουσία δολομίτη (Κελεπερτζής & Μητρόπουλος, 1995). Αν συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων με τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων, στα δείγματα στα οποία υπερτερεί ο δολομίτης (ΕΠ8, ΕΠ10, ΕΠ26 και ΕΠ35) παρατηρούμε ότι το ποσοστό MgO είναι

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

μεγαλύτερο, σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα. Οι συγκεντρώσεις αργιλίου (Al) και πυριτίου (Si) στον μοσχοβίτη, και το πυρίτιο (Si) στο χαλαζία.

**Πίνακας 6.7: Χημικές αναλύσεις στα υπό εξέταση ασβεστολιθικά αδρανή της 2<sup>ης</sup> φάσης.**

Δείγματα	Αποτελέσματα (%)								
	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	Cl
ΕΠ 4	87,93	8,4	1,55	0,53	0,15	0,8		0,12	0,39
ΕΠ 5	87,9	8,8	1,3	0,52	0,1	0,9			0,28
ΕΠ 8	72,3	21,5	3,38	1,2	0,76		0,19	0,37	
ΕΠ 10	74,62	19,5	2,78	0,96	0,6	0,7	0,18	0,39	
ΕΠ 14	96,68	1,1	1,36	0,56	0,13				
ΕΠ 15	96,08	1,1	1,72	0,57	0,25		0,13		
ΕΠ 25	91,42	2,2	3,33	0,98	0,82	0,7	0,23	0,13	
ΕΠ 26	85,03	11,4	1,39	0,52	0,13	0,8		0,16	0,43
ΕΠ 29	89,33	2,8	4,35	1,21	1,07	0,6	0,29	0,13	
ΕΠ 33	96,39	0,9	1,37	0,48	0,16	0,4	0,1		
ΕΠ 34	86,75	6,8	3,46	1,13	0,61	0,7	0,23		
ΕΠ 35	80,75	15,8	1,42	0,56	0,14	0,7		0,2	0,18

Η παρουσία του σιδήρου (Fe) οφείλεται κατά κύριο λόγο στα αργιλικά. Το περιεχόμενο σε νάτριο (Na) οφείλεται στα αργιλικά και στον αλίτη. Η συγκέντρωση του καλίου (K) οφείλεται στους ιλλίτη και μοσχοβίτη. Τέλος, η παρουσία του θείου (S) οφείλεται στον ανυδρίτη και του χλωρίτη (Cl) στον αλίτη.

Όσον αφορά τα ασβεσταρενιτικά δείγματα, είναι επίσης εμφανές ότι οι ορυκτολογικές (Πίνακας 6.3) με τις χημικές (Πίνακας 6.8) αναλύσεις συμφωνούν. Στα δείγματα στα οποία υπάρχει μεγαλύτερο ποσοστό ασβεστίτη (π.χ. ΕΠ32, ΕΠ2, παρουσιάζεται επίσης ψηλότερο ποσοστό CaO. Το ίδιο φαίνεται να ισχύει και για τα SiO<sub>2</sub> και MgO, όταν συγκριθούν με τα ποσοστά του χαλαζία και του δολομίτη αντίστοιχα, ορυκτά από τα οποία προέρχονται. Το αργίλιο (Al) προέρχεται από τα πλαγιόκλαστα και τα φυλλοπυριτικά ορυκτά. Ο σίδηρος (Fe) αντικατοπτρίζει κυρίως την περιεκτικότητα των δειγμάτων σε χλωρίτη, ακτινόλιθο και ιλλίτη. Το νάτριο (Na) περιέχεται στον αλβίτη, στον αλίτη και στο μοντμοριλλονίτη. Το κάλιο (K) στο μοσχοβίτη και στον ιλλίτη, ενώ το τιτάλιο (Ti) στον τιτανίτη. Το χλώριο (Cl) στον αλίτη, το χρώμιο (Cr) στον χρωμίτη, το στρόντιο (Sr) στον σελεστίτη και τέλος το θείο (S) οφείλεται στον χαλκοπυρίτη.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 6.8: Χημικές αναλύσεις στα υπό εξέταση ασβεσταρενιτικά αδρανή της 2<sup>ης</sup> φάσης.

Αποτελέσματα (%)												
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	Cl	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	SO <sub>3</sub>
ΕΠ 2	61,4	25,54	3,86	3,33	2,3	1,7	1,01	0,44				
ΕΠ 6	57,3	27,86	4,28	4,01	2,8	1,8	1,07	0,46				
ΕΠ 9	59,9	26,63	4,08	3,4	2,5	1,6	1,04	0,43				
ΕΠ 24	50,4	33,35	5,01	4,13	2,9	2,1	1,19	0,49	0,12			
ΕΠ 31	58,9	26,26	4,13	3,62	3,3	1,7	0,97	0,51		0,14	0,13	
ΕΠ 32	86,2	7,41	1,64	1,64	1,2	0,8	0,41	0,11			0,13	0,13

### 6.4 Συσχετίσεις μεταξύ ιδιοτήτων αδρανών υλικών

Με βάση τα αποτελέσματα που παρατίθενται στον Πίνακα 6.2, είναι εμφανές ότι παρατηρείται ανομοιογένεια στις ιδιότητες των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Για παράδειγμα, ένα δείγμα (ΕΠ27) με ικανοποιητικό ποσοστό απώλειας μάζας κατά τη δοκιμή αποσάθρωσης (MS=26%; SS=5%), παρουσιάζει πολύ υψηλή τιμή μπλε του μεθυλενίου (3 g/kg). Τα δείγματα ΕΠ12 και ΕΠ23, τα οποία παρουσίασαν ίδιο ποσοστό απώλειας υλικού κατά τη δοκιμή Micro-Deval (16,3%), παρουσίασαν μεγάλη διαφορά στην τιμή ισοδύναμου άμμου (41% και 83% αντίστοιχα). Άρα, συνεπάγεται ότι η ποιότητα του κάθε αδρανούς δεν μπορεί να καθοριστεί μόνο από μια δοκιμή. Αντίθετα, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη αριθμός ιδιοτήτων, αν όχι το σύνολό τους. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Paige-Green (2007) “δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ότι απαιτούνται περισσότερες από μια δοκιμές για να εξασφαλιστεί ότι ένα υλικό θα είναι ανθεκτικό, καθώς τα αντικρουόμενα αποτελέσματα μεταξύ διαφόρων δοκιμών φαίνεται ότι είναι κανόνας”.

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται συσχέτιση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τις δοκιμές ισοδύναμου άμμου (SE), μπλε του μεθυλενίου (MB), απορροφητικότητας (WA), αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS) και θειικό μαγνήσιο (MS) και Micro-Deval (MD). Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζεται η τιμή του συντελεστή συσχέτισης ( $r$ ) των γραμμικών συναρτήσεων που προέκυψαν. Καταγράφεται επίσης η τιμή σημαντικότητας ( $p$ -value) μεταξύ των μεταβλητών. Όπου  $p > 0,05$ , η συσχέτιση δεν είναι στατιστικά σημαντική.

Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 6.9: Συντελεστής συσχέτισης  $r$  και  $p$ -value για τις γραμμικές συναρτήσεις που προέκυψαν μεταξύ των διαφόρων ιδιοτήτων των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν (εξαιρείται το δείγμα ΕΠ 38). Στις συσχετίσεις SS-WA, SS-MS και MS-WA λήφθηκαν υπόψη και τα αποτελέσματα δοκιμών της 1<sup>ης</sup> φάσης.

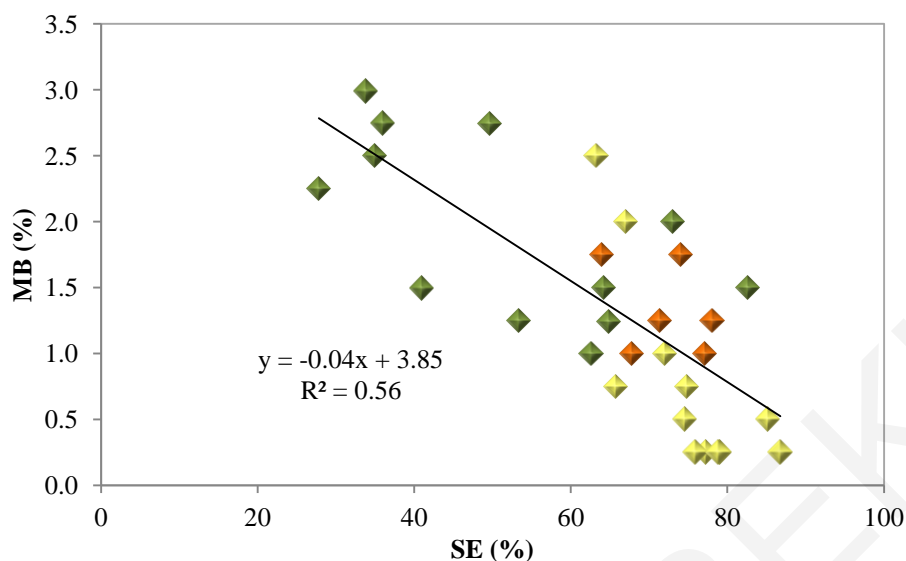
	SE	MB	WA	MS	SS	MD	$\rho_a$	$\rho_{rd}$	$\rho_{ssd}$
<b>SE</b>	1,00								
<b>MB</b>	-0,75	1,00							
<i>p-value</i>	0,000								
<b>WA</b>	-0,32	0,34	1,00						
<i>p-value</i>	0,082	0,070							
<b>MS</b>	0,17	-0,30	0,01	1,00					
<i>p-value</i>	0,370	0,105	0,925						
<b>SS</b>	0,01	0,27	0,15	0,59	1,00				
<i>p-value</i>	0,969	0,153	0,335	0,000					
<b>MD</b>	0,25	-0,27	-0,05	0,78	0,45	1,00			
<i>p-value</i>	0,183	0,142	0,808	0,000	0,012				
<b><math>\rho_a</math></b>	-0,47	0,26	0,26	-0,09	-0,27	-0,21	1,00		
<i>p-value</i>	0,009	0,174	0,172	0,645	0,143	0,274			
<b><math>\rho_{rd}</math></b>	-0,06	-0,09	-0,69	-0,06	-0,33	-0,08	0,51	1,00	
<i>p-value</i>	0,751	0,633	0,000	0,741	0,074	0,657	0,004		
<b><math>\rho_{ssd}</math></b>	-0,23	0,10	-0,07	-0,18	-0,41	-0,17	0,48	0,42	1,00
<i>p-value</i>	0,212	0,592	0,715	0,342	0,026	0,362	0,007	0,021	

**6.4.1 Συσχετίσεις γεωμετρικών ιδιοτήτων**

Ισχυρή αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,75$ ,  $p = 0,000$ ), η οποία περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.48), παρατηρήθηκε μεταξύ των δοκιμών ισοδύναμου άμμου (SE) και μπλε του μεθυλενίου (MB):

$$MB = -0,04(SE) + 3,85 \quad (6.48)$$

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 6.30, τα δείγματα που παρουσιάζουν αυξημένο ποσοστό ισοδύναμο άμμου, εμφανίζουν ταυτόχρονα χαμηλό συντελεστή μπλε του μεθυλενίου.



**Διάγραμμα 6.30:** Συσχετισμός ισοδύναμου άμμου (SE) και μπλε του μεθυλενίου (MB) (πράσινο: διαβασικά δείγματα, κίτρινο: ασβεστολιθικά δείγματα, πορτοκαλί: ασβεσταρενιτικά δείγματα).

Μέση αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,65$ ) για τις δυο αυτές παραμέτρους παρατήρησαν και οι Tugrul & Yilmaz (2012), συσχετίζοντας αποτελέσματα που προέκυψαν από δοκιμές σε ψαμμίτες. Παρόμοια συσχέτιση ( $r = -0,69$ ) παρατήρησε ο Rismantojo (2002), σε δοκιμές που αφορούσαν δολομίτες και πυριγενή πετρώματα. Ο Aschenbrener (1992) αναφέρει ότι οι δοκιμές ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου παρέχουν συγκρίσιμα αποτελέσματα για το χαρακτηρισμό αδρανών με μέγεθος κόκκου  $<0,075$  mm. Ωστόσο, όπως αναφέρεται και στο 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο (ενότητα 2.5), οι περισσότεροι ερευνητές (π.χ. Nikolaidis et al., 2007; Ρηγόπουλος, 2009; Petkonšek et al., 2010) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει ιδιαίτερη συσχέτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο αυτών δοκιμών, λόγω της διαφορετικής τους φύσης. Οι ίδιοι ερευνητές σημειώνουν επίσης ότι οι δοκιμές SE και MB είναι συμπληρωματικές και δεν μπορούν να αντικαταστήσουν η μια την άλλη στον ποιοτικό έλεγχο των αδρανών.

Πέρα από την πιο πάνω συσχέτιση, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του Πίνακα 6.9, οι υπόλοιπες συσχετίσεις μεταξύ της δοκιμής ισοδύναμου άμμου και των υπολοίπων ιδιοτήτων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής είναι ασθενείς ή ανύπαρκτες. Αυτό συμφωνεί με το συμπέρασμα του Richardson (2009), που αναφέρει ότι το ισοδύναμο άμμου είναι μια παράμετρος που δεν παρουσιάζει συσχετίσεις με άλλες δοκιμές, αφού παρουσιάζονται αρκετά προβλήματα κατά τη διάρκεια του προσδιορισμού της, π.χ. διείδυση των λεπτών (fines) στο στρώμα της άμμου. Επίσης, η διαβάθμιση και

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

το σχήμα των μεγαλύτερων κόκκων των αδρανών ποικίλει από δείγμα σε δείγμα, και επηρεάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής.

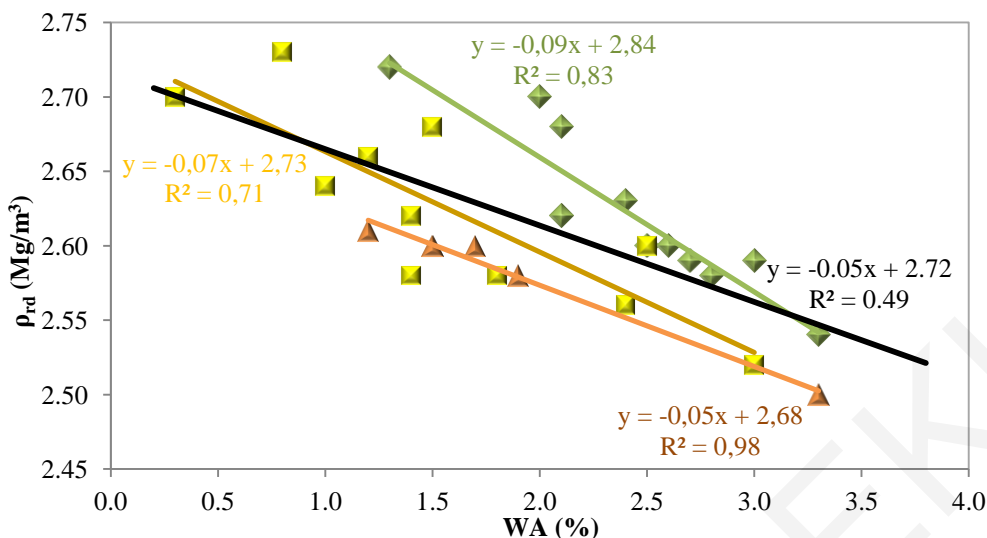
Το ίδιο ισχύει και για τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, που επίσης δεν φαίνεται να συσχετίζεται με τις υπόλοιπες ιδιότητες που εξετάστηκαν (Πίνακας 6.9). Οι Xirouchakis & Theodoropoulos (2009) και Rigoroulos et al. (2013) επίσης παρατήρησαν χαμηλού βαθμού συσχετίσεις της δοκιμής μπλε του μεθυλενίου με τις δοκιμές αποσάθρωσης και Micro-Deval.

### 6.4.2 Συσχετίσεις φυσικών ιδιοτήτων

Σε αυτή την κατηγορία συσχετίσεων, σημειώνεται ιδιαίτερα η απουσία ουσιαστικής συσχέτισης μεταξύ της απορροφητικότητας (WA) και των υπολοίπων ιδιοτήτων που εξετάστηκαν, πλην της ξηρής πυκνότητας  $\rho_{rd}$ , όπου παρατηρήθηκε (Πίνακας 6.9) αξιόλογη συσχέτιση ( $r = -0,69$   $p = 0,000$ ). Στο Διάγραμμα 6.31, πέραν της συγκεκριμένης συσχέτισης για το σύνολο των υλικών που εξετάστηκαν (μαύρο χρώμα), και η οποία περιγράφεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.49), παρουσιάζονται και συσχετίσεις ανά είδος υλικού.

$$\rho_{rd} = -0,05(WA) + 2,72 \quad (6.49)$$

Όπως φαίνεται, οι συσχετίσεις μεταξύ των δύο μεταβλητών γίνονται ισχυρότερες όταν πραγματοποιηθούν ανά είδος λιθότυπου. Για παράδειγμα, όσον αφορά τα ασβεσταρενιτικά αδρανή, προκύπτει ότι οι δύο μεταβλητές συσχετίζονται σχεδόν τέλεια ( $r = -0,99$ ,  $p = 0,000$ ). Πολύ ισχυρή είναι και η συσχέτιση που παρατηρήθηκε τόσο στα διαβασικά αδρανή ( $r = -0,91$ ,  $p = 0,000$ ), όσο και στα ασβεστολιθικά αδρανή ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,003$ ). Το γεγονός ότι οι δύο πρώτες κατηγορίες λιθότυπων εμφανίζουν ισχυρότερες συσχετίσεις ενδεχομένως να οφείλεται στο ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν μεγαλύτερες διακυμάνσεις, τόσο στα αποτελέσματα της πυκνότητας, όσο και της απορροφητικότητας.



Διάγραμμα 6.31: Συσχετισμός απορροφητικότητας σε νερό (WA) και ξηρής πυκνότητας ( $\rho_{rd}$ ) (πράσινο: διαβασικά δείγματα, κίτρινο: ασβεστολιθικά δείγματα, πορτοκαλί: ασβεσταρενιτικά δείγματα, μαύρο: όλα τα δείγματα).

Οι κατά γενική ομολογία σχετικά υψηλές τιμές απορροφητικότητας (>1,5%) των Κυπριακών αδρανών υλικών πιθανότατα να ευθύνονται για την απουσία περαιτέρω συσχετίσεων με την απορροφητικότητα, καθώς σε όλες τις περιπτώσεις που αναφέρονται στη βιβλιογραφία (Kazi & Al-Mansour, 1980; Zarif & Tugrul, 2003; Ρηγόπουλος, 2009), και στις οποίες παρουσιάζεται συσχέτιση της απορροφητικότητας με κάποια άλλη ιδιότητα, τα υπό εξέταση αδρανή είχαν απορροφητικότητες <1,5%. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση των Kandhal & Parker (1998), Rismantojo (2002), Brennan et al. (2003) και Weyers et al., (2005), που παρατήρησαν πολύ καλές συσχετίσεις της δοκιμής απορροφητικότητας με τη δοκιμή Micro-Deval.

Τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής συμπίπτουν με τα συμπεράσματα των Williamson (2005), Fowler et al. (2006), Xirouchakis & Theodoropoulos (2009), Rigoropoulos et al. (2013) και Nalsund (2014), που παρατήρησαν πολύ χαμηλές συσχετίσεις μεταξύ της απορροφητικότητας και άλλων ιδιοτήτων. Σημειώνεται ότι, παρόλο που κάποια δείγματα (π.χ. ΕΠ5, ΕΠ26, ΕΠ35) που εξετάστηκαν παρουσιάζουν χαμηλές απορροφητικότητες και μεγάλη απώλεια στις δοκιμές αποσάθρωσης και Micro-Deval, γενικά επικρατεί η άποψη (Goswami, 1984; Koukis et al., 2007; Aghamelu & Okogbue, 2013) ότι ένα αδρανές με χαμηλή απορροφητικότητα τείνει να είναι πιο ανθεκτικό στις μηχανικές καταπονήσεις και στην αποσάθρωση.



#### 6.4.3 Συσχετίσεις ιδιοτήτων αδρανών υλικών σε θερμικές και καιρικές μεταβολές

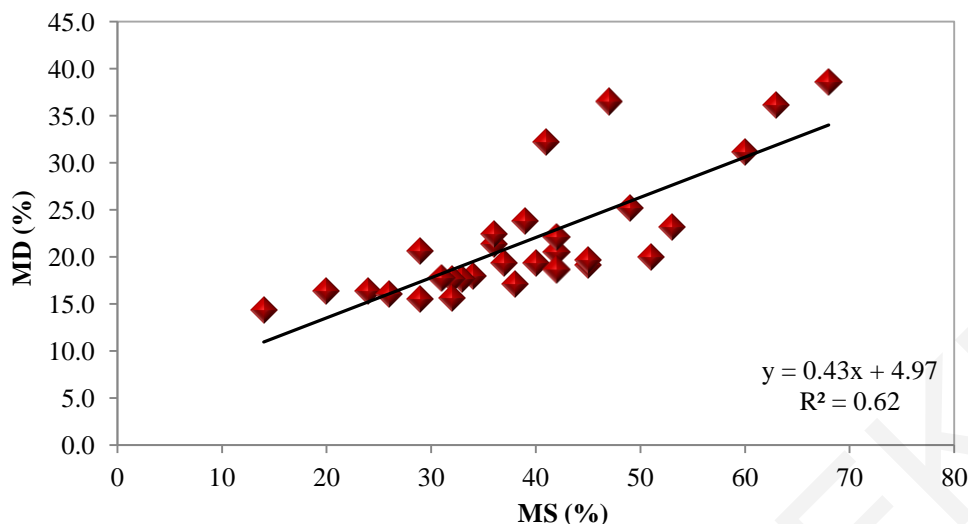
Παρόλο που η συσχέτιση μεταξύ των δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και θειικό νάτριο (SS) αναμενόταν να ήταν πιο ισχυρή, καθώς πρόκειται για δύο ίδιας φύσεως δοκιμές που προκαλούν φυσικοχημική αποσάθρωση, εντούτοις αυτή παρουσιάζεται ως μέση συσχέτιση ( $r = 0,59$ ,  $p = 0,000$ ) (βλ Πίνακα 6.9). Αυτό εικάζεται ότι οφείλεται στη διαφορετική μεθοδολογία που ακολουθούν οι δύο πρότυπες δοκιμές. Σημειώνεται ότι οι δοκιμές αποσάθρωσης με θειικό νάτριο ή/και θειικό μαγνήσιο έχουν αμφισβητηθεί από πολλούς ερευνητές (Hoare, 2003; Fowler et al., 2006) λόγω της αναξιοπιστίας τους, κυρίως όσον αφορά την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα. Παρά το γεγονός ότι η δοκιμή αποσάθρωσης αμφισβητείται, οι Ioannou et al. (2013) παρατήρησαν πολύ καλή αναπαραγωγιμότητα σε διεργαστηριακά αποτελέσματα για τη δοκιμή με τη χρήση θειικού μαγνησίου, ειδικά όσον αφορά τα διαβασικά αδρανή. Ωστόσο, όπως αναφέρουν, η δοκιμή πρέπει να εκτελείται προσεκτικά, αφού πολύ μικρές τροποποιήσεις στη μεθοδολογία μπορεί να επιφέρουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στο τελικό αποτέλεσμα.

#### 6.4.4 Συσχετίσεις μηχανικών ιδιοτήτων

Αξιοσημείωτη, ισχυρή συσχέτιση ( $r = 0,78$ ,  $p = 0,000$ ) παρατηρήθηκε μεταξύ των δοκιμών αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο (MS) και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) (Πίνακας 6.9). Η συσχέτιση αυτή ορίζεται από τη γραμμική συνάρτηση (6.50):

$$MD = 0,43(MS) + 4,97 \quad (6.50)$$

Όπως βλέπουμε από το Διάγραμμα 6.32, όσο αυξάνεται ο συντελεστής αποσάθρωσης των δειγμάτων, αυξάνεται και ο συντελεστής απώλειας υλικού σε αντίσταση σε τριβή.



Διάγραμμα 6.32: Συσχετισμός συντελεστών αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (MS) και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD).

Αν διαχωριστούν τα δείγματα που εξετάστηκαν ανά κατηγορία λιθότυπου, τότε προκύπτει ότι τα ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν γενικά καλύτερη συσχέτιση ( $r = 0,81$ ,  $p = 0,001$ ) μεταξύ των δοκιμών Micro-Deval και αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο, σε σχέση με τα διαβασικά ( $r = 0,70$ ,  $p = 0,011$ ). Για τα ασβεσταρενιτικά αδρανή, η συσχέτιση ( $r = 0,36$ ,  $p = 0,480$ ) που παρατηρήθηκε δεν είναι στατιστικά σημαντική. Αυτό συμπίπτει με τις παρατηρήσεις των Fowler et al. (2006), οι οποίοι αναφέρουν, όσον αφορά τα ασβεστολιθικά και δολομιτικά αδρανή, ότι η δοκιμή Micro-Deval δείχνει σαφή διαχωρισμό μεταξύ αυτών που θεωρούνται "καλής" ποιότητας και αυτών που θεωρούνται "κακής" ποιότητας.

Αντίστοιχα, πολύ καλή συσχέτιση, που απέδωσε συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,66$ , παρατήρησε και ο Phillips (2000), συσχετίζοντας τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο με αυτά της δοκιμής Micro-Deval για διαφορετικά πετρώματα (ανθρακικά, πυριγενή, πυριτιόλιθοι κ.α.). Ακόμη καλύτερη ήταν η συσχέτιση ( $r = 0,85$ ) που παρουσίασαν οι Kandhal & Parker (1998) σε πυριγενή πετρώματα, ασβεστόλιθους και ψαμμίτες, ενώ ισχυρή είναι και η συσχέτιση ( $r = 0,76$ ) που παρατήρησε ο Rismantojo (2002) σε λεπτόκοκκα πυριγενή και δολομιτικά αδρανή.

Οι Cuelho et al. (2007) παρατήρησαν αρκετά καλή συσχέτιση, με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,72$ , της δοκιμής Micro-Deval με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό νάτριο. Μάλιστα, οι πιο πάνω ερευνητές πρότειναν την αντικατάστασή της δοκιμής αποσάθρωσης με θεικό νάτριο από τη δοκιμή Micro-Deval, αφού όπως αναφέρουν

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

πρόκειται για μια επαναλήψιμη και γρήγορη σε εκτέλεση δοκιμή. Από την άλλη, οι Jayawickrama et al. (2007), παρόλο που επίσης παρατήρησαν αρκετά καλή συσχέτιση μεταξύ των δύο προαναφερθεισών δοκιμών, με συντελεστή προσδιορισμού  $R^2 = 0,70$ , αναφέρουν ότι η συσχέτιση δεν ήταν τόσο ισχυρή ώστε να δικαιολογείται η αντικατάσταση της δοκιμής αποσάθρωσης. Αντίθετα, θεωρούν ότι είναι προτιμότερο η δοκιμή Micro-Deval να χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τη δοκιμή αποσάθρωσης, επειδή δεν παρουσιάζει την ίδια ευαισθησία που θα της επέτρεπε να εντοπίζει εύκολα τυχόν αλλαγές στην ποιότητα ενός υλικού. Εντούτοις, οι ίδιοι συγγραφείς αναφέρουν ότι η δοκιμή Micro-Deval είναι ένα καλό εργαλείο ελέγχου ποιότητας, επειδή είναι πιο γρήγορη και αρκούντως επαναλήψιμη.

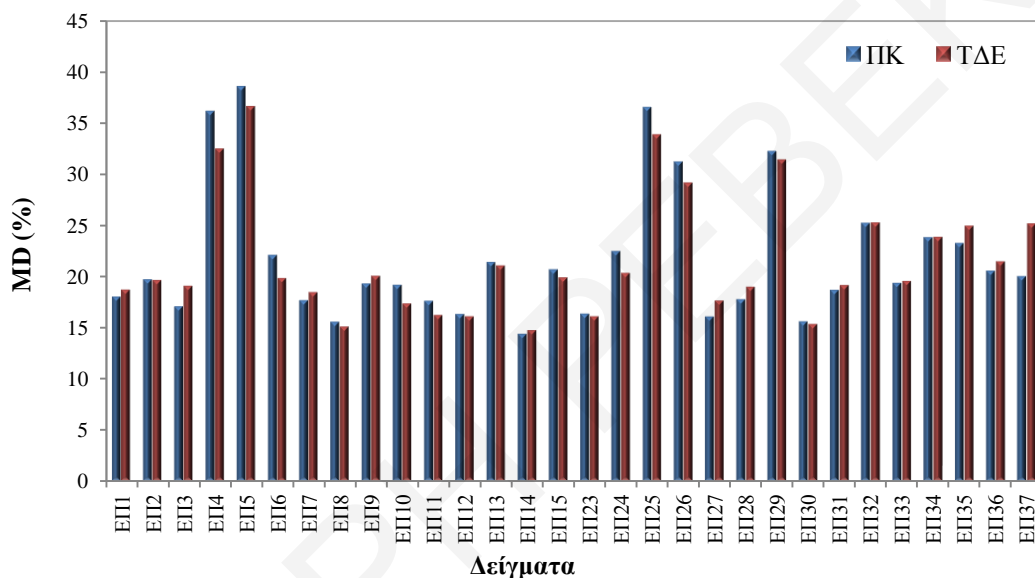
Αντίθετα με τους πιο πάνω ερευνητές, οι Cooley et al. (2002) δεν παρατήρησαν κάποια συσχέτιση μεταξύ των δοκιμών Micro-Deval και αποσάθρωσης με θειικό νάτριο σε γρανίτες, ασβεστόλιθους και ψαμμίτες. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Rangaraju & Edlinski (2008), που εκτός από τη δοκιμή με θειικό νάτριο, δεν παρατήρησαν συσχέτιση της δοκιμής Micro-Deval ούτε και με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο για ασβεστολιθικά, γρανιτικά και μεταμορφωμένα πετρώματα. Ωστόσο, όπως αναφέρουν οι πιο πάνω ερευνητές, η απουσία συσχέτισης οφείλεται στα σχετικά χαμηλά ποσοστά απώλειας μάζας που παρατηρήθηκαν κατά τη δοκιμή αποσάθρωσης, λόγω της χρήσης γρανιτών και γνευσίων. Αυτό δεν ισχύει για τα αδρανή της Κύπρου (βλ. Πίνακα 6.1 και Πίνακα 6.2).

Στην παρούσα διατριβή, σε αντίθεση με την ισχυρή συσχέτιση που παρατηρήθηκε μεταξύ της δοκιμής Micro-Deval και της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, καταγράφηκε ασθενής συσχέτιση ( $r = 0,45$ ,  $p = 0,012$ ) μεταξύ των αποτελεσμάτων των δοκιμών Micro-Deval και αποσάθρωσης με θειικό νάτριο. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στη μεγαλύτερη μεταβλητότητα που παρουσιάζουν τα αποτελέσματα με θειικό νάτριο, σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα με θειικό μαγνήσιο (Williamson, 2005). Οι Fowler et al. (2006) σημειώνουν ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό νάτριο επηρεάζονται από αλλαγές στην πυκνότητα και δραστηκότητα του διαλύματος άλατος, λόγω μικρών μεταβολών στη θερμοκρασία κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, η δοκιμή Micro-Deval, σε αντίθεση με τη δοκιμή αποσάθρωσης, θεωρείται από πολλούς ερευνητές (Rogers et al., 1991; Phillips, 2000; Little et al., 2001; Rogers et al., 2003; Tarefder et al., 2003; Fowler et al., 2006;

### Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Jayawickrama et al., 2007; Tia et al., 2012) ότι έχει πολύ καλή επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα. Ο Rogers (1998) αναφέρει ότι, όσο μεγαλύτερη είναι η απώλεια υλικού που προκύπτει από τη δοκιμή αυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι και η μεταβλητότητα μεταξύ δύο εργαστηρίων. Διεργαστηριακές δοκιμές που εκπονήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής ανάμεσα στα εργαστήρια του Πανεπιστημίου Κύπρου και του Τμήματος Δημοσίων Έργων (Διάγραμμα 6.33) επιβεβαιώνουν την εξαιρετική αναπαραγωγιμότητα της δοκιμής Micro-Deval. Συσχετίζοντας τα αποτελέσματα των δύο εργαστηρίων, προκύπτει πολύ ισχυρή γραμμική συσχέτιση ( $r = 0,97$ ,  $p = 0,000$ ).



**Διάγραμμα 6.33: Διεργαστηριακά αποτελέσματα αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) (ΠΚ: Πανεπιστήμιο Κύπρου, ΤΔΕ: Τμήμα Δημοσίων Έργων).**

Αρκετοί είναι και οι ερευνητές (Phillips, 2000; Little et al., 2001; Cooper et al., 2003; Tia et al., 2012) που θεωρούν ότι η δοκιμή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (MD) είναι ευκολότερη και γρηγορότερη σε εκτέλεση, σε σχέση με τη δοκιμή αποσάθρωσης. Πρόκειται όντως για μια δοκιμή αξιόπιστη, για την εκτέλεση της οποίας απαιτείται σχετικά φθηνός εξοπλισμός (Rogers et al., 2003; Wang et al., 2015). Το κόστος του εξοπλισμού, οι λιγότερες ποσότητες υλικού που απαιτούνται για τη διεξαγωγή της δοκιμής και η απλή διαδικασία που ακολουθείται, κατατάσσουν τη δοκιμή Micro-Deval ως την ευκολότερη και φθηνότερη, σε σχέση με τις παραδοσιακές δοκιμές ανθεκτικότητας (Liu et al., 2013). Οι Rogers et al. (2003) αναφέρουν επίσης ότι η δοκιμή Micro-Deval θεωρείται καλή, όσον αφορά τα λεπτόκοκκα αδρανή, ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό των αδύναμων και μαλακών ορυκτών (π.χ. αργιλικών) σε αυτά.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Οι Prowell et al., (2005) θεωρούν ότι η δοκιμή Micro-Deval υπερισχύει έναντι της δοκιμής αποσάθρωσης, γιατί προβλέπει την απόδοση των αδρανών τόσο σε τριβή, όσο και σε αποσάθρωση. Παρόλο που η δοκιμή Micro-Deval χρησιμοποιείται πρωτίστως για να εκτιμήσει τις μηχανικές ιδιότητες αδρανών, το γεγονός ότι εκτελείται σε υγρές συνθήκες επιτρέπει ταυτόχρονα και την εκτίμηση της υγείας των αδρανών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η δοκιμή αυτή να συσχετίζεται καλύτερα με την απόδοση του τελικού προϊόντος, ειδικά σε ανεπιθύμητες περιβαλλοντικές συνθήκες (Liu et al., 2013).

Οι Hossain et al. (2007) συμπέραναν ότι η δοκιμή Micro-Deval μπορεί να αξιολογήσει με ακρίβεια την ανθεκτικότητα των αδρανών, σε σύγκριση με τη δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο ή τη δοκιμή Los Angeles. Επιπρόσθετα, οι πιο πάνω ερευνητές σημειώνουν ότι η δοκιμή Micro-Deval μπορεί να προβλέψει την απόδοση του τελικού προϊόντος με μεγάλη ακρίβεια, σε σχέση με τη δοκιμή αποσάθρωσης. Τέλος, αναφέρουν ότι η δοκιμή Micro-Deval συνιστάται για τον ποιοτικό έλεγχο των λεπτόκοκκων αδρανών υλικών, και μπορεί να αντικαταστήσει τη δοκιμή αποσάθρωσης και ψύξης-απόψυξης.

Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Jayawickrama et al. (2007), που σημειώνουν ότι η δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό νάτριο δεν συσχετίζεται με την απόδοση του τελικού προϊόντος. Οι Kline et al. (2007) συμφωνούν ότι η δοκιμή αποσάθρωσης έχει περιορισμένη σχέση με το τελικό προϊόν, και αναφέρουν ότι η εν λόγω δοκιμή δεν συσχετίζεται με άλλες ιδιότητες των αδρανών, και άρα δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας τους για χρήση σε διάφορες εφαρμογές.

Σημειώνεται ότι η δοκιμή Micro-Deval πραγματοποιείται ήδη σε αρκετές χώρες. Για παράδειγμα, στις Η.Π.Α. αρκετές πολιτείες υιοθέτησαν τη συγκεκριμένη δοκιμή για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας αδρανών που προορίζονται για χρήση σε ασφαλτοσκυρόδεμα (Allam & Ebrahimpour, 2014). Στην Ισπανία, η δοκιμή Micro-Deval χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση της ψαθυρότητας αδρανών (Quiroga & Fowler, 2004). Οι Cooper et al. (2003) υποστηρίζουν ότι η δοκιμή Micro-Deval αποτελεί ένα σημαντικό δείκτη της ποιότητας των αδρανών υλικών. Η υπεροχή της δοκιμής Micro-Deval στο να διαχωρίζει τα "καλής" ποιότητας από τα "κακής" ποιότητας αδρανά έγκειται στο γεγονός ότι είναι μια δοκιμή στην οποία η τριβή γίνεται στην παρουσία νερού, και άρα θεωρείται ότι προσομοιάζει τις πραγματικές συνθήκες, αφού τα αδρανά σπανίως είναι εντελώς ξηρά στην πράξη και η επίδραση της υγρασίας μπορεί να επηρεάσει τις μηχανικές τους ιδιότητες. Οι Fowler et al. (2006) σημειώνουν ότι τα "κακής" ποιότητας αδρανά

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

τείνουν να θρυμματίζονται ή να έχουν μειωμένη αντοχή όταν είναι υγρά. Στην ουσία, στη δοκιμή Micro-Deval τα αδρανή καταπονούνται σε συνδυασμό τριβής, λόγω της παρουσίας μεταλλικών σφαιρών, και αποσάθρωσης, λόγω της παρουσίας νερού (Phillips, 2000).

Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της δοκιμής Micro-Deval είναι το γεγονός ότι θεωρείται λιγότερο ευαίσθητη σε διάφορες παραλλαγές στη μεθοδολογία της. Για αυτό το λόγο, προσφέρει πιο αξιόπιστα και επαναλήψιμα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, σε δοκιμές που πραγματοποίησε ο Rogers (1998) σε δείγματα αργιλικού δολομίτη, δεν παρατήρησε διαφορά στα αποτελέσματα διαφοροποιώντας το χρόνο παραμονής των αδρανών στο νερό. Για το λόγο αυτό, ο συγκεκριμένος χρόνος καθορίστηκε στη μια ώρα. Παρόλα αυτά, ο ίδιος ερευνητής (Rogers, 1998) σημειώνει ότι στα λεπτόκοκκα αδρανή, σε αντίθεση με τα χονδρόκοκκα, η κατάσταση του δοχείου που χρησιμοποιείται στη δοκιμή Micro-Deval μπορεί να επηρεάσει τα αποτελέσματα. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι, όταν το δοχείο εσωτερικά είναι γυαλισμένο, τότε οι απώλειες μάζας μπορεί να μειωθούν στο μισό, παρά όταν το δοχείο είναι “θαμπό” και μη λείο. Το γυαλισμένο ή λείο δοχείο μπορεί να προκύψει μετά από δοκιμή χονδρόκοκκων ανθρακικών αδρανών. Ωστόσο, το σημαντικότερο πλεονέκτημα της δοκιμής Micro-Deval, σύμφωνα με αρκετούς ερευνητές (Rogers et al., 2003; Williams et al., 2005), είναι η συσχέτιση του αποτελέσματός της με την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Αυτός είναι και ο λόγος που οι Rogers et al. (2003) συστήνουν τη δοκιμή Micro-Deval για την αξιολόγηση της υγρής μηχανικής αντοχής και της αντίστασης σε τριβή, τόσο για χονδρόκοκκα, όσο και για λεπτόκοκκα αδρανή.

Σε περίπτωση που η αντικατάσταση της δοκιμής αποσάθρωσης με τη δοκιμή Micro-Deval είναι ανέφικτη, ο Mabie (2000) προτείνει όπως η δοκιμή Micro-Deval πραγματοποιείται αρχικά για έλεγχο των “κακής” ποιότητας αδρανών, και εφόσον, με βάση τα αποτελέσματα, τα αδρανή βρίσκονται είτε οριακά εντός, είτε εκτός των ανώτατων επιτρεπτών ορίων, τότε να πραγματοποιείται επιπρόσθετα η δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, ώστε να καθορίζεται τελεσίδικα εάν τα αδρανή είναι αποδεκτά για χρήση. Ο Cunningham (2011) αναφέρει πως, όταν είναι απαραίτητο να πραγματοποιείται η δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό νάτριο, τότε θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την αποδοχή αδρανών, αλλά όχι για την απόρριψή τους. Για αυτό, ο πιο πάνω ερευνητής συστήνει την αντικατάσταση της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό νάτριο από τη δοκιμή Micro-Deval.

Από τις πιο πάνω παρατηρήσεις, είναι εμφανές ότι η δοκιμή Micro-Deval αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και με καλή επαναληψιμότητα ή/και αναπαραγωγιμότητα δοκιμή, που

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

συσχετίζεται επαρκώς με το τελικό προϊόν. Επομένως, αφού παρουσιάζει και καλή συσχέτιση με τη δοκιμή αποσάθρωσης, θα μπορούσε δυνητικά να την αντικαταστήσει, ή/και να περιορίσει την εκτέλεσή της σε περιπτώσεις οριακών αδρανών.

### **6.5 Συμπεράσματα**

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών αποσάθρωσης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσης διατριβής, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η δοκιμή με την χρήση θειικού μαγνησίου οδηγεί σε πολύ ψηλά ποσοστά απώλειας μάζας στα λεπτά αδρανή. Περισσότερα από τα 2/3 των δειγμάτων που εξετάστηκαν ξεπερνούν την ανώτατη επιτρεπόμενη κατηγορία (35%) που θα μπορούσε να θεσπιστεί με βάση το EN 12620. Τα δεδομένα αυτά καθιστούν τη δοκιμή αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο ακατάλληλη για τα λεπτόκοκκα αδρανή υλικά.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της απορροφητικότητας σε νερό, επίσης προκύπτουν σχετικά ψηλές τιμές σχεδόν σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν. Ωστόσο, οι τιμές αυτές δεν υπερβαίνουν το καθορισμένο από την Κ.Δ.Π. 164/2011 ανώτατο όριο (4%) για αδρανή που χρησιμοποιούνται σε σκυρόδεμα και κονιάματα. Σημειώνεται ότι η Κ.Δ.Π. 164/2011 δεν διαχωρίζει το όριο WA για λεπτά/χονδρά αδρανή. Το υφιστάμενο όριο (4%) κρίνεται υπερβολικά ψηλό για λεπτόκοκκα αδρανή και άρα συστήνεται η αναθεώρησή του προς τα κάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου το 2/3 των δειγμάτων παρουσιάζουν  $WA < 2,5\%$  και θα μπορούσαν να κριθούν κατάλληλα για χρήση, ακόμη και εάν το καθορισμένο (ανώτατο) όριο ήταν 2,5%. Αυτό θα εξασφάλιζε καλύτερης ποιότητας αδρανή υλικά για χρήση στην κατασκευαστική βιομηχανία, χωρίς να παρεμποδίζει την αειφόρο λειτουργία της αγοράς σε ανταγωνιστικά πλαίσια.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενισχύεται το γεγονός ότι η απορροφητικότητα και η πυκνότητα των αδρανών επηρεάζεται από την ορυκτολογία και γενικά τη μικροδομή τους. Ειδικότερα, φαίνεται ότι στα εξαλλοιωμένα διαβασικά αδρανή η παρουσία ζεολίθων συμβάλει σε αύξηση της απορροφητικότητας και μείωση της πυκνότητας. Ωστόσο, τα διαβασικά αδρανή, παρά το γεγονός ότι περιέχουν αρκετά δευτερογενή ορυκτά, λόγω του ότι είναι λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα, εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με τα άλλα δύο είδη αδρανών που εξετάστηκαν. Όσον αφορά τα ασβεστολιθικά αδρανή, φαίνεται ότι η απορροφητικότητα επηρεάζεται κυρίως από το πορώδες των υλικών αυτών.

## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Με σκοπό τη διερεύνηση πιθανών συσχετίσεων μεταξύ των ιδιοτήτων των αδρανών υλικών, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης. Από τα αποτελέσματα, προέκυψε ότι οι μόνες αξιόλογες συσχετίσεις είναι η ισχυρή αρνητική συσχέτιση που παρατηρήθηκε μεταξύ των δοκιμών ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου, και η ισχυρή θετική συσχέτιση μεταξύ των δοκιμών αποσάθρωσης και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής.

Η δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θεικού μαγνησίου είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και τα αποτελέσματά της επηρεάζονται από μικρές διαφοροποιήσεις στη μεθοδολογία εκπόνησής της. Με βάση τα δεδομένα αυτά, και λόγω του ότι θεωρείται ακατάλληλη για λεπτόκοκκα αδρανή, θα μπορούσε δυνητικά να αντικατασταθεί από τη δοκιμή Micro-Deval, ή/και να περιοριστεί η εκτέλεσή της σε περιπτώσεις οριακών αδρανών. Η δοκιμή Micro-Deval αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και με καλή επαναληψιμότητα ή/και αναπαραγωγιμότητα δοκιμή, η οποία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία σχετίζεται επαρκώς με την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Παρόλο που θεωρείται δοκιμή ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων, εντούτοις το γεγονός ότι εκτελείται σε υγρές συνθήκες, όπως και η δοκιμή αποσάθρωσης, την καθιστά πιθανή εναλλακτική επιλογή για την αξιολόγηση της ποιότητας των αδρανών.

Οι δοκιμές ισοδύναμου άμμου και μπλε του μεθυλενίου θεωρούνται συμπληρωματικές και δεν μπορούν να αντικαταστήσουν η μία την άλλη, ιδιαίτερα όταν ο στόχος είναι ο προσδιορισμός της ποιότητας των αδρανών και της πιθανής επίδρασης των ενεργών αργιλικών ορυκτών που εμπεριέχονται σε αυτά. Σε συνδυασμό, όμως, μπορούν να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα για την περιεκτικότητα επιβλαβών ή πλαστικών λεπτών στην άμμο σκυροδέματος και ασφαλοσκυροδέματος. Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, συστήνεται η μείωση των υφιστάμενων ορίων που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011 για τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, που για τα κονιάματα είναι 10 g/kg και τα σκυροδέματα 3 g/kg. Σημειώνεται ότι το πιο σοβαρό πρόβλημα εντοπίζεται στα διαβασικά αδρανή, τα οποία περιέχουν επιβλαβή ενεργά αργιλικά ορυκτά (σμεκτίτες), ζεόλιθους και φυλλοπυριτικά (χλωρίτη). Θέσπιση ορίου  $MB \leq 2,5$  θα απέρριπτε μόλις το 1/3 των διαβασικών δειγμάτων που ελέγχθηκαν στα πλαίσια της παρούσης έρευνας, και άρα δεν θα δημιουργούσε πρόβλημα στην αγορά.

Προκειμένου να συσχετιστεί η ορυκτολογική σύσταση των αδρανών που εξετάστηκαν με τις ιδιότητές τους, πραγματοποιήθηκε και πάλι ανάλυση παλινδρόμησης. Από τα αποτελέσματα των συσχετίσεων, φαίνεται ότι το ισοδύναμο άμμου των αδρανών επηρεάζεται από την παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών (χλωρίτη, μοντμοριλλονίτη, μοσχοβίτη), ζεολιθών (π.χ. λωμοντίτη), αλλά και μαλακότερων ορυκτών (π.χ. ασβεστίτη).



## Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Τα ορυκτά αυτά συμβάλουν στην αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού, μειώνοντας έτσι το συντελεστή ισοδύναμου άμμου. Αντίθετα, η παρουσία σκληρότερων ορυκτών, όπως ο χαλαζίας, συμβάλουν σε αύξηση του συντελεστή ισοδύναμου άμμου. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τις συσχετίσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των λόγων μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_0/H$ ) και δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών ( $S_0/P$ ) με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου, όπου φαίνεται ότι αύξηση του ποσοστού των μαλακών έναντι των σκληρών ορυκτών, και των δευτερογενών έναντι των πρωτογενών ορυκτών, αυξάνει το ποσοστό λεπτού υλικού στο δείγμα.

Η παρουσία ζεολίθων και φυλλοπυριτικών ορυκτών στα διαβασικά αδρανή επηρεάζει τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο. Όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα στα πιο πάνω ορυκτά, τόσο πιο επιδεκτικό είναι στην αποσάθρωση το δείγμα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις συσχετίσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_0/H$ ) και των αποτελεσμάτων της δοκιμής αποσάθρωσης, όπου φαίνεται ότι με αύξηση του ποσοστού των μαλακών έναντι των σκληρών ορυκτών, αυξάνεται η απώλεια μάζας στη δοκιμή αποσάθρωσης.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης στα ασβεστολιθικά αδρανή επηρεάζονται αρνητικά από την παρουσία δολομίτη. Στα ασβεσταρενιτικά αδρανή, η παρουσία ασβεστίτη αυξάνει το ποσοστό απώλειας μάζας και η παρουσία χαλαζία το μειώνει.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Micro-Deval με την ορυκτολογική σύσταση των αδρανών, δεν προκύπτουν ιδιαίτερες συσχετίσεις, όπως σημειώνεται και από αρκετούς άλλους ερευνητές. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση της αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία λωμοντίτη, και η αύξηση του ποσοστού των μαλακών έναντι των σκληρών ορυκτών, επηρεάζουν σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα, αφού αυξάνεται το ποσοστό απώλειας μάζας. Αυτό υποδηλώνει ότι η αντίσταση σε τριβή των (διαβασικών) αδρανών μειώνεται με την παρουσία των πιο πάνω ορυκτών.

Όπως παρατηρείται από τις πιο πάνω συσχετίσεις, προκύπτει διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων στις πλείστες δοκιμές, ανάλογα με τη γεωλογική προέλευση και ορυκτολογική σύσταση των αδρανών. Αυτό ενδεχομένως θα πρέπει μελλοντικά να οδηγήσει την Εθνική Τεχνική Επιτροπή Αμμοχαλίκων του Κυπριακού Οργανισμού Τυποποίησης (CYS TE 02) στο διαχωρισμό των αδρανών, και τον καθορισμό ανεξάρτητων ορίων, ανάλογα με το λιθότυπο.

### Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα Δοκιμών Αδρανών Υλικών και Συζήτηση

Καταληκτικά, είναι εμφανές ότι επιβάλλεται ο ενδεδειγμένος έλεγχος (ακόμα και η πετρογραφική μελέτη) πριν την χρήση των αδρανών τα Κύπρου στις διάφορες κατασκευές. Ωστόσο, όπως έχει παρατηρηθεί, παρουσιάζεται ανομοιογένεια στις ιδιότητες των τοπικών αδρανών υλικών. Για αυτό, η ποιότητά τους δεν μπορεί να καθοριστεί από μια μόνο δοκιμή, ή από πολλές δοκιμές ανεξάρτητα όπως συμβαίνει τώρα. Στην απουσία πληθώρας αξιόπιστων αποτελεσμάτων και ιστορικού της χρήσης των αδρανών σε κατασκευές στην Κύπρο, συστήνεται όπως λαμβάνεται υπόψη αριθμός, ή ακόμη και το σύνολο των ιδιοτήτων που εξετάζονται, πριν κριθεί κατάλληλο ή ακατάλληλο για χρήση ένα αδρανές. Με αυτά τα δεδομένα, είναι σημαντικό οι δοκιμές που θα πραγματοποιούνται για τον ποιοτικό έλεγχο των αδρανών να εκτελούνται σε σύντομο χρονικό διάστημα και να παρέχουν ασφαλή συμπεράσματα για την ποιότητα των υλικών, χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματά τους από τυχόν μικρό-μεταβολές των περιβαλλουσών συνθηκών.

## 7 Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στα σκυροδέματα και κονιάματα που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Επιχειρείται επίσης συσχέτιση των ιδιοτήτων αλλά και της ορυκτολογίας των αδρανών με τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Τέλος, παρατίθενται οι παρατηρήσεις που προέκυψαν από την εξέταση επιλεγμένων κονιαμάτων στο πολωτικό μικροσκόπιο και στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

### 7.1 Σκυροδέματα

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 5.4 του 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, πραγματοποιήθηκαν 14 σκυροδετήσεις (C1 – C14), με διαφοροποίηση του ενός από τα δύο λεπτόκοκκα αδρανή που συμμετείχαν στο κάθε μίγμα. Οι κωδικοί των δειγμάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των σκυροδεμάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.2 του 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου.

Τα σκυροδέματα C2, C3, C6, C7, C8, C9 και C10 παρασκευάστηκαν με τα ίδια χονδρόκοκκα (>4 mm) διαβασικά αδρανή (ΕΠ40) και την ίδια ασβεσταρενιτική άμμο (ΕΠ39), με την προσθήκη μιας δεύτερης διαβασικής άμμου, όπως φαίνεται στον Πίνακα Δ.0.6 του Παραρτήματος Δ. Το σκυροδέμα C1, το οποίο αποτελεί μίγμα αναφοράς, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα σκυροδέματα, παρασκευάστηκε με διαβασικά χονδρόκοκκα αδρανή (>4 mm) από το διαβασικό δείγμα αναφοράς ΕΠ38. Τα σκυροδέματα C4, C5, C11, C12, C13 και C14 παρασκευάστηκαν με τα ίδια χονδρόκοκκα (>4 mm) ασβεστολιθικά αδρανή (ΕΠ41) και την ίδια ασβεσταρενιτική άμμο (ΕΠ39), με την προσθήκη μιας δεύτερης ασβεστολιθικής άμμου, όπως φαίνεται στον Πίνακα Δ.0.7 του Παραρτήματος Δ. Σε αυτόν τον πίνακα, όπως και στον Πίνακα Δ.0.6, φαίνονται επίσης τα αποτελέσματα των συντελεστών αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (MS) και απορροφητικότητας σε νερό (WA) των αδρανών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στις σκυροδετήσεις.

Τα λεπτόκοκκα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στις σκυροδετήσεις επιλέχθηκαν ανάλογα με τα αποτελέσματα των δοκιμών που παρατίθενται στον Πίνακα 6.2 του 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Πιο συγκεκριμένα, το δείγμα ΕΠ7 επιλέχθηκε γιατί παρουσιάζει τη χαμηλότερη τιμή μπλε του μεθυλενίου από όλα τα διαβασικά δείγματα που ελέγχθηκαν. Τα δείγματα ΕΠ12,

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

ΕΠ23 και ΕΠ27 επιλέχθηκαν λόγω των χαμηλών συντελεστών αποσάθρωσης (MS), αλλά και Micro-Deval (MD), που παρουσίασαν. Σημειώνεται ότι τα δείγματα ΕΠ12 και ΕΠ23 παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα σε όλες τις δοκιμές, πλην αυτής του ισοδύναμου άμμου, όπου παρατηρείται διπλάσια τιμή στο δείγμα ΕΠ23. Το δείγμα ΕΠ27, πέρα από τους σχετικά χαμηλούς συντελεστές αποσάθρωσης (MS) και Micro-Deval (MD), παρουσιάζει επίσης την ψηλότερη τιμή μπλε του μεθυλενίου (MB), και ταυτόχρονα χαμηλή απορροφητικότητα (WA), σε σχέση με τα υπόλοιπα διαβασικά δείγματα που ελέγχθηκαν. Αντίστοιχες τιμές μπλε το μεθυλενίου (MB) και απορροφητικότητας (WA) παρουσιάζει και το δείγμα ΕΠ28 (που επίσης επιλέχθηκε). Ωστόσο, το συγκεκριμένο δείγμα παρουσιάζει ψηλότερους συντελεστές αποσάθρωσης (MS) και Micro-Deval (MD), από ότι το δείγμα ΕΠ27. Το δείγμα ΕΠ13 επιλέχθηκε λόγω του ότι παρουσιάζει υψηλές τιμές απορροφητικότητας (WA), αποσάθρωσης, μπλε του μεθυλενίου (MB) και Micro-Deval MD, σε σχέση με τα υπόλοιπα διαβασικά δείγματα. Για αντίστοιχους λόγους επιλέχθηκε και το δείγμα ΕΠ37, το οποίο παρουσιάζει τους ψηλότερους συντελεστές αποσάθρωσης (MS) και Micro-Deval (MD).

Όσον αφορά τα ασβεστολιθικά αδρανή, το δείγμα ΕΠ4 επιλέχθηκε λόγω της υψηλής απορροφητικότητάς του σε νερό (WA) και των ψηλών συντελεστών αποσάθρωσης (MS) και Micro-Deval (MD) που παρουσίασε (βλ. Πίνακα 6.2). Το δείγμα ΕΠ26 επιλέχθηκε επειδή παρουσιάζει παρόμοια αποτελέσματα με το δείγμα ΕΠ4 σε όλες τις δοκιμές, πλην της απορροφητικότητας (WA), η οποία είναι αισθητά χαμηλότερη στο δείγμα ΕΠ26. Το δείγμα ΕΠ5 επιλέχθηκε γιατί παρουσίασε τους ψηλότερους συντελεστές αποσάθρωσης (MS) και Micro-Deval (MD). Αντίθετα, το δείγμα ΕΠ14 επιλέχθηκε γιατί παρουσίασε τους χαμηλότερους συντελεστές (MS) και Micro-Deval (MD). Τέλος, τα δείγματα ΕΠ34 και ΕΠ35 επιλέχθηκαν κυρίως λόγω της πολύ χαμηλής απορροφητικότητάς τους (WA). Σημειώνεται ότι το δείγμα ΕΠ34 παρουσιάζει αισθητά ψηλότερη τιμή μπλε το μεθυλενίου (MB), σε σχέση με το δείγμα ΕΠ35, το οποίο όμως παρουσιάζει ψηλότερο συντελεστή αποσάθρωσης (MS).

### **7.1.1 Αποτελέσματα μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων σκυροδεμάτων**

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους πειραματικούς ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν στα σκληρυμένα σκυροδέματα παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.1-7.3.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 7.1: Μηχανικές ιδιότητες σκυροδεμάτων ( $f_c$  = αντοχή σε θλίψη,  $f_{cf}$  = αντοχή σε κάμψη,  $f_{ct}$  = αντοχή σε εφελκυσμό,  $E_{mod}$  = στατικό μέτρο ελαστικότητας, Μ.Ο. = μέσος όρος, τ.α. = τυπική απόκλιση, n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή).

		$f_c$ (MPa)			$f_{cf}$ (MPa)			$f_{ct}$ (MPa)			$E_{mod}$ (GPa)		
		28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D
C1- ΕΠ38	M.O.	21,7	23,4	24,0	3,8	4,4	4,0	1,59	1,44	1,51	15,0	18,3	19,1
	τ.α.	0,86	1,26	0,47									
C2- ΕΠ12	M.O.	29,8	34,2	37,3	5,9	5,6	6,3	2,25	2,36	2,89	21,2	25,5	24,5
	τ.α.	0,43	0,39	0,60									
C3- ΕΠ13	M.O.	28,0	31,2	32,9	4,7	5,3	5,1	2,01	2,24	2,51	21,4	18,9	23,1
	τ.α.	0,57	0,59	0,27									
C4- ΕΠ14	M.O.	26,9	30,1	31,1	5,9	n/a	6,0	1,95	1,76	2,70	20,5	n/a	25,0
	τ.α.	1,13	1,32	1,01									
C5- ΕΠ4	M.O.	26,4	28,7	30,2	5,3	5,8	5,5	n/a	2,72	n/a	19,0	19,1	19,3
	τ.α.	0,47	0,23	0,41									
C6- ΕΠ7	M.O.	18,9	20,6	23,6	4,2	4,4	5,4	2,04	2,09	1,65	18,8	21,1	19,6
	τ.α.	0,29	0,47	0,44									
C7- ΕΠ23	M.O.	28,4	29,5	28,7 <sup>4</sup>	4,7	4,8	5,4	2,14	2,25	2,66	22,1	20,4	24,7
	τ.α.	0,59	0,89	1,86									
C8- ΕΠ27	M.O.	26,9	28,1	28,6	4,1	4,9	5,4	1,87	2,36	n/a	19,1	20,5	22,7
	τ.α.	1,56	1,06	2,34									
C9- ΕΠ28	M.O.	28,8	30,0 <sup>1</sup>	30,9	4,4	5,0	5,0	1,59	1,67	1,81	19,7	19,5	20,3
	τ.α.	0,72	0,29	0,43									
C10- ΕΠ37	M.O.	25,0	26,4	27,7	4,9	5,0	5,1	1,47	2,35	1,92	18,8	19,3	20,9
	τ.α.	1,73	0,63	0,29									
C11- ΕΠ5	M.O.	26,1	26,2	21,7	4,4	4,7	5,8	1,88	1,73	2,32	18,0	19,5	23,0
	τ.α.	0,61	1,40	1,08									
C12- ΕΠ26	M.O.	27,3	27,6	29,4	5,5	5,1	6,0	1,66	2,09	1,97	19,8	19,5	35,4
	τ.α.	1,78	1,03	0,27									
C13- ΕΠ34	M.O.	25,3	26,6	27,5	5,5	6,1	6,0	1,95	1,91	1,96	18,4	19,5	20,3
	τ.α.	0,56	1,15	1,75									
C14- ΕΠ35	M.O.	27,0	27,1	28,4	5,3	5,8	5,9	2,26	2,50	2,97	22,2	21,1	24,3
	τ.α.	0,45	1,88	0,40									

<sup>4</sup> μέσος όρος από 2 κύβους.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 7.2: Φυσικές ιδιότητες σκυροδεμάτων (S = τριχοειδής απορροφητικότητα,  $f_o$  = πορώδες,  $\rho_b$  = φαινόμενη πυκνότητα, K = διαπερατότητα). Τα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορροφητικότητας είναι κανονικοποιημένα στους 20°C.

	S (mm/min <sup>1/2</sup> )			$f_o$ (%)			$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )			K (mm/min) (x 10 <sup>-7</sup> )		
	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D
C1-ΕΠ38	0,29	0,26	0,26	21,8	22,7	20,5	2040	2047	2057	2,50	1,28	0,91
C2-ΕΠ12	0,27	0,23	0,22	19,8	17,9	18,3	2111	2121	2115	1,88	2,85	1,01
C3-ΕΠ13	0,26	0,23	0,12	19,4	17,0	18,1	2103	2115	2107	2,01	0,86	0,60
C4-ΕΠ14	0,26	0,26	0,26	21,0	18,6	19,7	2029	2031	2022	1,56	1,20	1,87
C5-ΕΠ4	0,27	0,28	0,27	22,5	20,9	20,4	1978	1973	1973	1,10	0,73	0,58
C6-ΕΠ7	0,36	0,36	0,47	22,5	21,7	23,2	2086	2081	2075	9,02	6,26	5,77
C7-ΕΠ23	0,30	0,28	0,29	21,4	19,9	22,4	2098	2103	2092	1,66	1,27	1,05
C8-ΕΠ27	0,28	0,25	0,27	21,2	20,1	20,8	2104	2108	2102	1,99	1,74	1,62
C9-ΕΠ28	0,27	0,28	0,26	20,8	20,1	20,6	2111	2109	2111	2,01	1,62	1,24
C10-ΕΠ37	0,33	0,36	0,40	21,9	21,6	21,4	2081	2078	2078	1,93	2,19	0,93
C11-ΕΠ5	0,29	0,29	0,27	23,4	22,7	21,8	1969	1968	1971	0,65	2,02	1,22
C12-ΕΠ26	0,31	0,27	0,25	24,1	22,0	21,5	1975	1977	1980	1,04	7,33	4,28
C13-ΕΠ34	0,32	0,30	0,25	22,7	21,3	21,3	1986	1988	1990	2,23	3,08	2,44
C14-ΕΠ35	0,30	0,25	0,25	22,1	20,8	20,7	2011	2012	2016	1,48	1,10	0,54

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

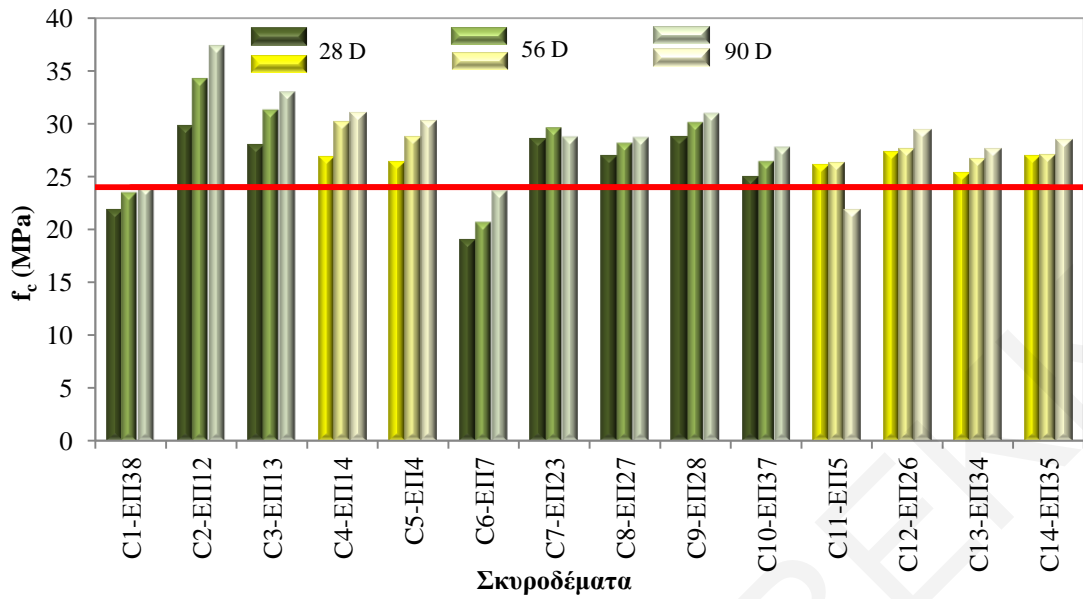
**Πίνακας 7.3: Δοκιμή διείσδυσης χλωριόντων σε σκυροδέματα (n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, N/A (very high) = πολύ ψηλή τιμή, εκτός ορίων), C= Coulombs.**

	Rapid Chloride Permeability Class		
	28D	56D	90D
<b>C1-ΕΠ38</b>	n/a	N/A (very high)	High (5705 C)
<b>C2-ΕΠ12</b>	High (4896 C)	High/Moderate (3920 C)	Moderate (2777 C)
<b>C3-ΕΠ13</b>	n/a	High (6759 C)	High/Moderate (4664 C)
<b>C4-ΕΠ14</b>	High (7955 C)	High/Moderate (4395 C)	High/Moderate (4455 C)
<b>C5-ΕΠ4</b>	High-N/A (very high) (6543 C)	High-N/A(very high) (5458 C)	High (5695 C)
<b>C6-ΕΠ7</b>	High (6848 C)	High (6043 C)	High (5645 C)
<b>C7-ΕΠ23</b>	High (7436 C)	High (6610 C)	High (5754 C)
<b>C8- ΕΠ27</b>	High-N/A (very high) (7045 C)	High (7717 C)	High (5956 C)
<b>C9- ΕΠ28</b>	High-N/A (very high) (7711 C)	High (7254 C)	High (6647 C)
<b>C10- ΕΠ37</b>	High (6972 C)	High (6520 C)	High (5379 C)
<b>C11- ΕΠ5</b>	High (6823 C)	High (4814 C)	High/Moderate (3809 C)
<b>C12- ΕΠ26</b>	High (5931 C)	High (4641 C)	Moderate (3742 C)
<b>C13- ΕΠ34</b>	High (5947 C)	High/Moderate (4726 C)	High (4229 C)
<b>C14- ΕΠ35</b>	High (4730 C)	High/Moderate (4013 C)	Moderate (3530 C)

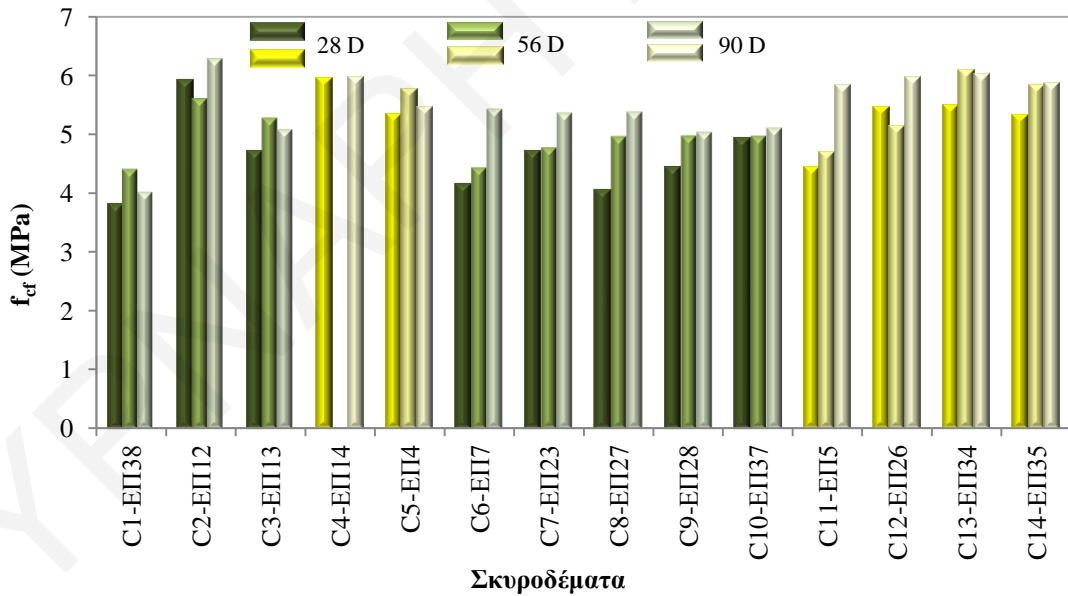
Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 7.1 και τα Διαγράμματα 7.1-7.4, οι μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων γενικά βελτιώνονται με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης, όπως ήταν αναμενόμενο (Sinha, 2002). Αυτό συμβαίνει επειδή ολοκληρώνεται η διαδικασία της ενυδάτωσης, με αποτέλεσμα τη μείωση του νερού των πόρων και την αύξηση της αντοχής του τσιμεντοπολτού (Τριανταφύλλου, 2013).

Παρατηρείται επίσης ότι τα δείγματα που παρασκευάστηκαν με αδρανή “κακής” ποιότητας, όπως π.χ. ΕΠ38 και ΕΠ37, παρουσιάζουν μικρότερες βελτιώσεις στις ιδιότητές τους ή σε μερικές περιπτώσεις ακόμη και υποβάθμιση των ιδιοτήτων τους (π.χ. της αντοχής σε κάμψη, βλ. Διάγραμμα 7.2) με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης, σε αντίθεση με σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με αδρανή “καλής” ποιότητας (π.χ. ΕΠ12) που παρουσιάζουν σημαντικές βελτιώσεις, ειδικά όσον αφορά τη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή (βλ. Διάγραμμα 7.1 και Διάγραμμα 7.3).

*Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση*



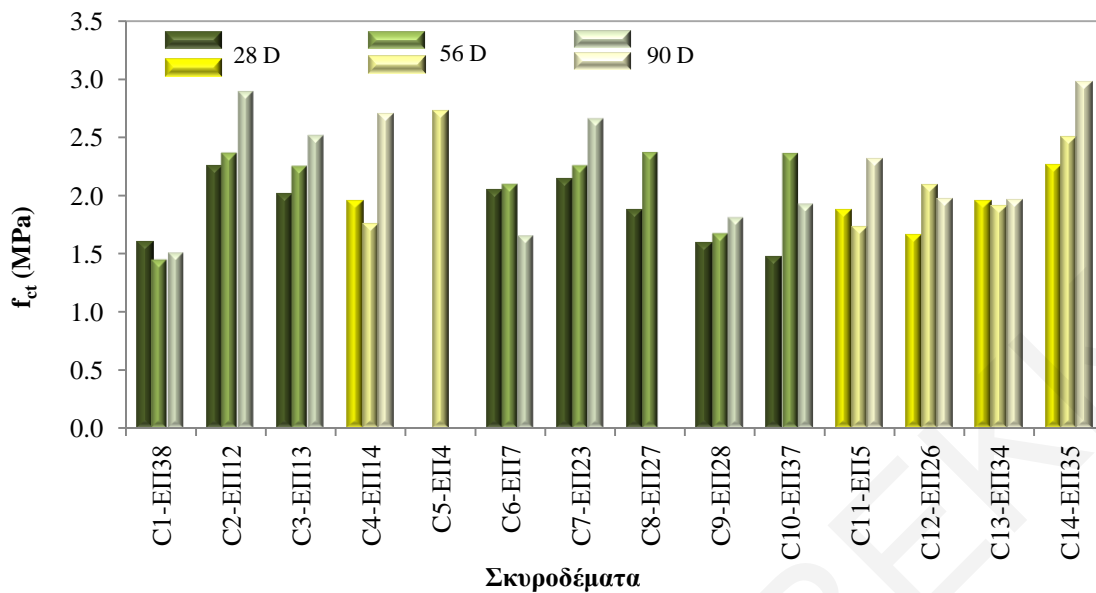
**Διάγραμμα 7.1:** Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή. Η κόκκινη γραμμή καθορίζει την ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή με βάση το σχεδιασμό μίγματος.



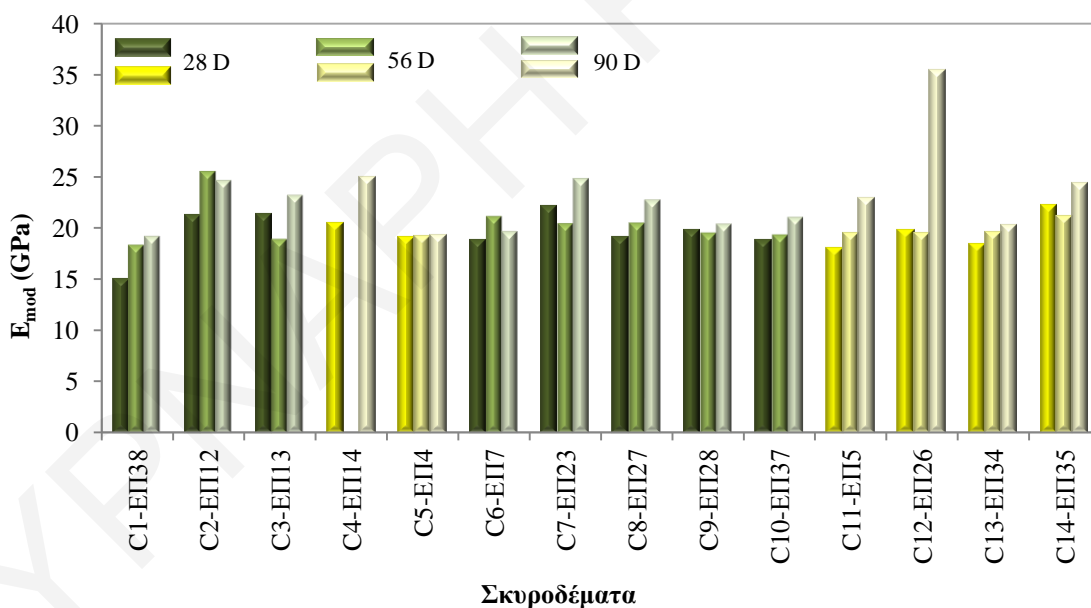
**Διάγραμμα 7.2:** Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη ( $f_{cf}$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.



Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση



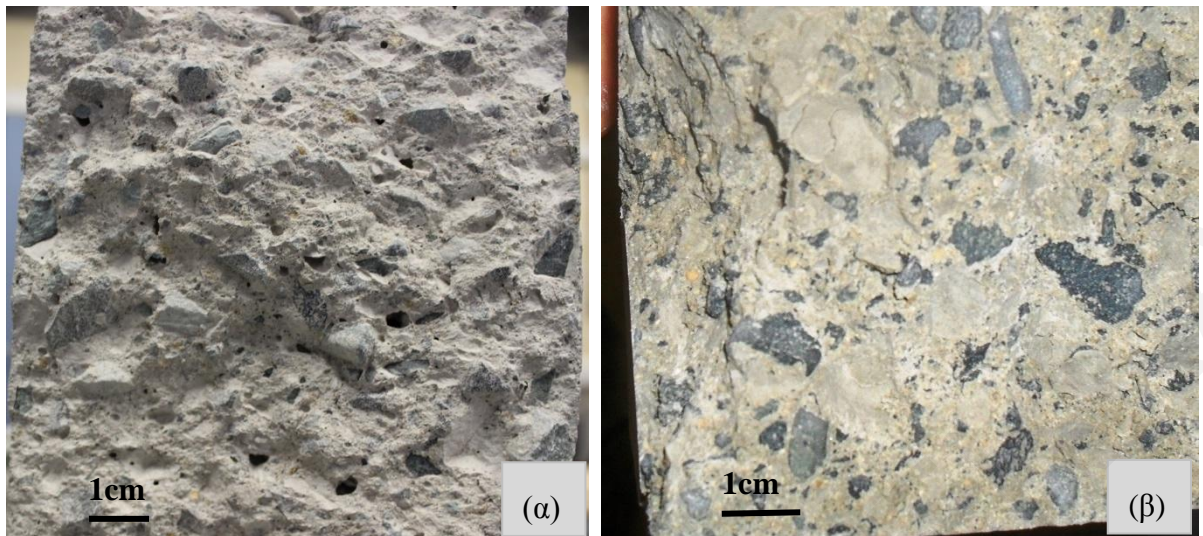
Διάγραμμα 7.3: Αποτελέσματα αντοχής σε εφελκυσμό ( $f_{ct}$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.



Διάγραμμα 7.4: Αποτελέσματα στατικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{mod}$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Όσον αφορά τη δοκιμή αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ) συγκεκριμένα (Διάγραμμα 7.1), φαίνεται ότι το σκυρόδεμα C1 που παρασκευάστηκε με το "κακής" ποιότητας αδρανές υλικό ΕΠ38 παρουσιάζει αρκετά χαμηλότερες θλιπτικές αντοχές σε σχέση με τα υπόλοιπα σκυροδέματα που εξετάστηκαν. Εξαιρέση αποτελεί το σκυρόδεμα C6, το οποίο αν και παρασκευάστηκε με αδρανή των οποίων οι ιδιότητες βρίσκονται εντός των ορίων που καθορίζονται από την Κ.Δ.Π. 164/2011, παρουσιάζει την χαμηλότερη τιμή αντοχής σε θλίψη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η μέση αντοχή των τριών κύβων του συγκεκριμένου σκυροδέματος στις 28 ημέρες,  $\bar{x}_3$ , είναι μικρότερη από την προδιαγραφόμενη τιμή  $f_{ck,cube} = 20$  MPa. Όπως αναφέρεται στο EN 206, η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος πρέπει να είναι ίση ή μεγαλύτερη από την ελάχιστη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή, με βάση τις καθορισμένες κατηγορίες σκυροδέματος. Το συγκεκριμένο σκυρόδεμα υπάγεται στην κατηγορία C16/20. Σύμφωνα με το κριτήριο συμμόρφωσης Ε' (που αφορά ποσότητα σκυροδέματος  $< 20$  m<sup>3</sup>) (Τριανταφύλλου, 2013),  $\bar{x}_3 \geq f_{ck,cube} + 3,7$ . Με βάση τα αποτελέσματα που προέκυψαν (Πίνακας 7.1), το πιο πάνω φαίνεται ότι δεν ισχύει, αφού ο μέσος όρος της θλιπτικής αντοχής των τριών κύβων του συγκεκριμένου σκυροδέματος (18,9 MPa) είναι μικρότερος από την ελάχιστη χαρακτηριστική αντοχή (20+3,7 MPa) (βλ. Διάγραμμα 7.1). Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο γεγονός ότι το σκυρόδεμα C6 παρασκευάστηκε σε διαφορετική χρονική περίοδο από τα υπόλοιπα σκυροδέματα, και άρα πιθανώς να επηρεάστηκε από τις υψηλότερες θερμοκρασίες (+ 2,2 °C) που επικρατούσαν κατά το διάστημα παρασκευής του. Όπως είναι γνωστό (Ortiz et al., 2005; Neville, 2011), η αυξημένη περιβαλλοντική θερμοκρασία συμβάλλει σε επιτάχυνση της ενυδάτωσης και της πήξης του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του σε βάθος χρόνου. Επιπλέον, όπως αναφέρουν οι Lothenbach et al. (2007) και ο Almusallam (2001), η αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος συμβάλλει σε μεγαλύτερο πορώδες. Μεγάλο πορώδες, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής του σκυροδέματος (Chandigarh, 2001; Mehta & Monteiro, 2013), προκύπτει και λόγω κακής συμπύκνωσης (Kumara & Bhattacharjee, 2003). Σε μακροσκοπική εξέταση του σκυροδέματος C6, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.1 (α), εντοπίστηκαν μακροπόροι (~0,5 cm), οι οποίοι δεν ήταν εμφανείς σε άλλα σκυροδέματα (π.χ. C1, Εικόνα 7.1 (β)). Τέτοιοι πόροι είναι ενδεικτικοί κακής σκυροδέτησης, και συγκεκριμένα φτωχής συμπύκνωσης.



Εικόνα 7.1: (α) Σκυρόδεμα C6, (β) σκυρόδεμα C1.

Στον Πίνακα 7.4 παρατίθενται τα μέτρα λεπτότητας (FM) και τα ποσοστά λεπτών (f) των άμμων που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή σκυροδεμάτων στην παρούσα διατριβή. Ο Neville (2011) αναφέρει ότι η καταλληλότερη άμμος για χρήση στις κατασκευές είναι η καλά διαβαθμισμένη, η οποία έχει μέτρο λεπτότητας μεταξύ 2,9-3,1. Ανάλογα όρια συστήνει και το ASTM C33/C33M. Όπως παρατηρείται στον Πίνακα 7.4, σχεδόν όλα τα διαβασικά και ασβεστολιθικά δείγματα αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν έχουν ιδιαίτερα ψηλά (>3) ποσοστά λεπτών. Όσον αφορά το μέτρο λεπτότητας, όλες οι άμμοι θεωρούνται χονδρόκοκκες με βάση το EN 12620 (coarse graded: 4,0-2,4). Παρόλα αυτά, δεν παρατηρήθηκαν συσχετίσεις μεταξύ του μέτρου λεπτότητας ( $r = -0,11$ ,  $p = 0,710$ ) ή του ποσοστού λεπτών ( $r = 0,23$ ,  $p = 0,423$ ) και της θλιπτικής αντοχής των σκυροδεμάτων, όπως φαίνεται από τις γραμμικές συναρτήσεις (7.1) και (7.2) πιο κάτω.

$$f_c = -0,76(FM) + 28,69 \quad (7.1)$$

$$f_c = 0,14(f) + 24,79 \quad (7.2)$$

Επομένως, προκύπτει ότι η ποιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών, όπως αυτή καθορίζεται από τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες, διαδραματίζει πιο σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη μηχανικών ιδιοτήτων του σκληρυμένου σκυροδέματος, παρά η διαβάθμισή τους. Αυτό στην παρούσα διατριβή είναι πιο εμφανές στα διαβασικά αδρανή.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 7.4: Μέτρο λεπτότητας (FM) και ποσοστό λεπτών (f) αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδετήσεις.

Δείγμα		Κωδικός σκυροδέματος	Κωδικός κονιάματος	Μέτρο Λεπτότητας FM	Ποσοστό Λεπτών f (%)
Διαβάσης	ΕΠ 38	C1	CM1	4,2	2,9
	ΕΠ 12	C2	CM2	3,4	10,3
	ΕΠ 13	C3	CM3	3,5	5,6
	ΕΠ7	C6	CM7	3,2	7,2
	ΕΠ23	C7	CM8	3,9	3,2
	ΕΠ27	C8	CM9	3,1	15,5
	ΕΠ28	C9	CM10	3,4	12,9
	ΕΠ37	C10	CM11	3,0	14,9
Ασβεστόλιθος	ΕΠ 14	C4	CM4	3,3	3,5
	ΕΠ 4	C5	CM5	3,3	9,3
	ΕΠ5	C11	CM12	2,7	13,3
	ΕΠ26	C12	CM13	2,7	16,1
	ΕΠ34	C13	CM14	3,5	8,7
	ΕΠ35	C14	CM15	3,1	12,6
Ασβεσταρενίτης	ΕΠ 2	-	CM6	2,3	4,2
	ΕΠ32	-	CM16	2,1	7,6

Ενδεικτικά αναφέρονται τα δείγματα αδρανών ΕΠ23 και ΕΠ38, τα οποία παρουσιάζουν παρόμοια ποσοστά λεπτών και μέτρα λεπτότητας, αλλά έχουν οδηγήσει σε σκυροδέματα (C7 και C1 αντίστοιχα) με πολύ διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες (βλ Πίνακα 7.1 και Διάγραμμα 7.1). Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.2 του 6<sup>ου</sup> Κεφαλαίου, το δείγμα ΕΠ23 παρουσιάζει πολύ καλύτερες ιδιότητες, σε σχέση με το ΕΠ38. Το ίδιο ισχύει για το ζεύγος αδρανών ΕΠ12 και ΕΠ28 (που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των σκυροδεμάτων C2 και C9 αντίστοιχα), τα οποία παρουσιάζουν παρόμοιες τιμές μέτρου λεπτότητας και ποσοστού λεπτών, αλλά οδήγησαν σε σκυροδέματα με διαφορετικές αντοχές και μέτρο ελαστικότητας (βλ. Διάγραμμα 7.4). Τα δυο αυτά δείγματα αδρανών παρουσιάζουν κάποιες διαφορές στις ιδιότητές τους (βλ. Πίνακα 6.2), παρόλο που γενικά θα μπορούσαν να θεωρηθούν "καλής" ποιότητας υλικά με βάση τα όρια που καθορίζονται από την Κ.Δ.Π. 164/2011. Αυτές οι διαφορές (π.χ. στις ιδιότητες MB, MS και MD) θα μπορούσαν να εξηγήσουν τις μειωμένες αντοχές και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος C9. Οι πιο πάνω παρατηρήσεις συμφωνούν με το συμπέρασμα των Zhou et al. (1995) που

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

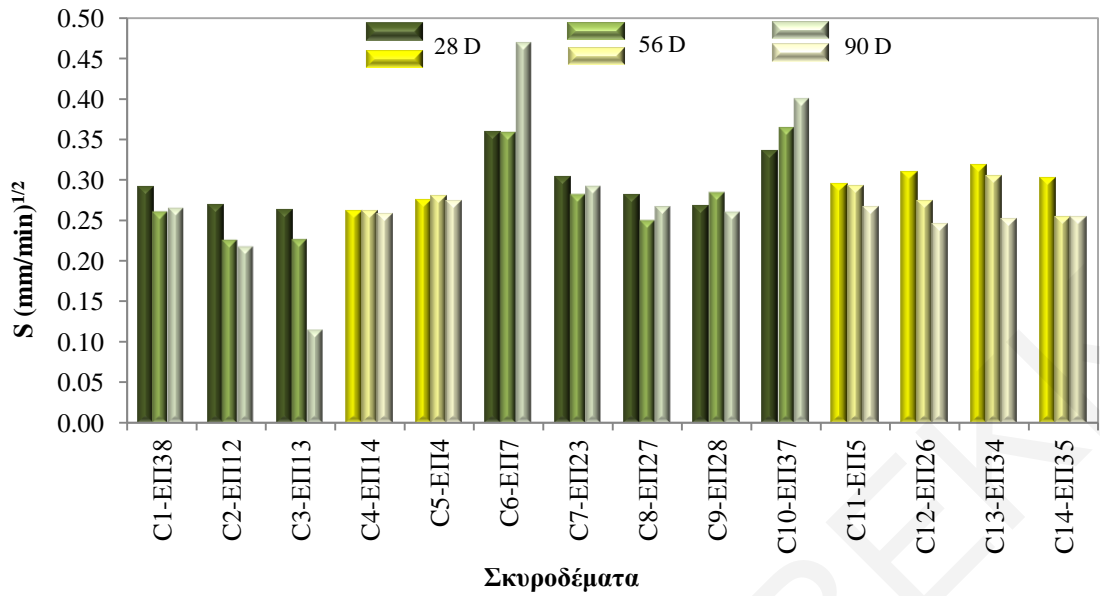
αναφέρουν ότι οι μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων επηρεάζονται από τις ιδιότητες των αδρανών.

Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων (Πίνακας 7.2), όπως φαίνεται από τα Διαγράμματα 7.5-7.8, αυτές γενικά παρουσιάζουν φθίνουσες τιμές με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης. Αυτό οφείλεται στην ενυδάτωση του σκυροδέματος, που οδηγεί στη μείωση του τριχοειδούς πορώδους και διακόπτει τη συνοχή των πόρων (Τριανταφύλλου, 2013).

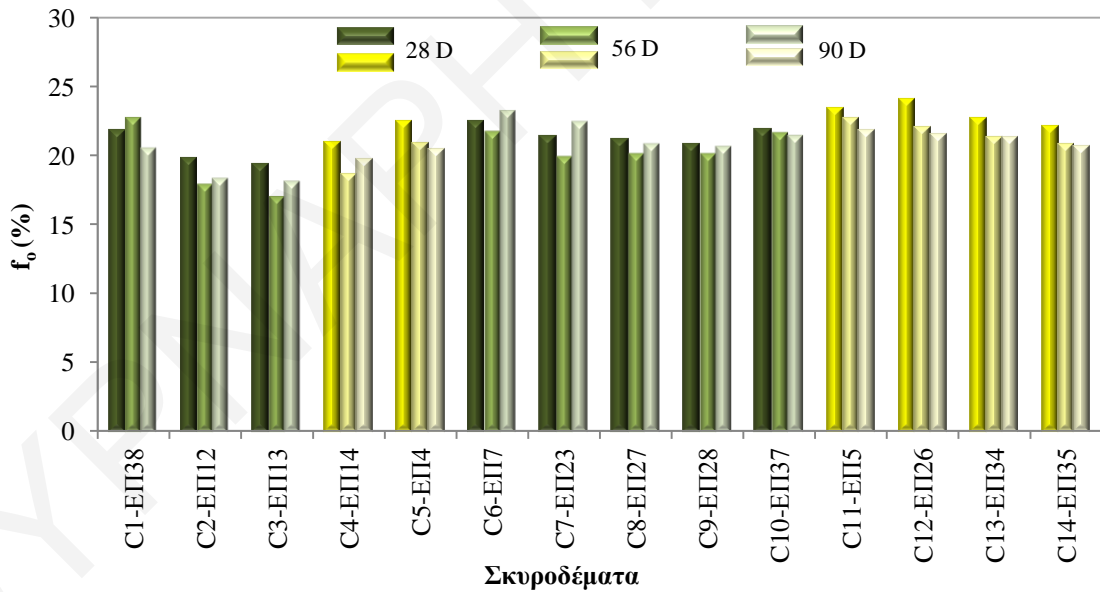
Το σκυρόδεμα C6 παρουσιάζει τις ψηλότερες τιμές πορώδους, τριχοειδούς απορροφητικότητας και διαπερατότητας, σε σχέση με τα υπόλοιπα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή. Αυτό επιβεβαιώνει τις προηγούμενες παρατηρήσεις σε σχέση με τη μικροδομή του συγκεκριμένου σκυροδέματος (βλ. Εικόνα 7.1 (α)).

Από το Διάγραμμα 7.5, φαίνεται ότι η τριχοειδής απορροφητικότητα δεν επηρεάζεται ιδιαίτερα από τις ιδιότητες των αδρανών, παρόλο που στα σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή τη μικρότερη τιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας, για τις πρώτες 28 ημέρες, παρουσιάζει το σκυρόδεμα C4, το οποίο παρασκευάστηκε με τα αδρανή ΕΠ14 που θεωρούνται πολύ "καλής" ποιότητας υλικά. Στα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή, τη μεγαλύτερη τιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας παρουσιάζει το σκυρόδεμα C10 που περιέχει αδρανή (ΕΠ37) που δεν θεωρούνται "καλής" ποιότητας. Αντίθετα, τη μικρότερη τιμή τριχοειδούς απορροφητικότητας παρουσιάζει το σκυρόδεμα C3, το οποίο παρασκευάστηκε με αδρανή (ΕΠ13) με αρκετά ψηλό ποσοστό απορροφητικότητας σε νερό ( $WA= 3,3\%$ ). Σημειώνεται ότι η τριχοειδής απορροφητικότητα, σε αντίθεση με το πορώδες, είναι μια ιδιότητα που επηρεάζεται από τη συνοχή των πόρων του υλικού κυρίως στην επιφάνεια, παρά από το συνολικό όγκο τους. Ως εκ τούτου, οι ιδιότητες των αδρανών υλικών δεν την επηρεάζουν σημαντικά. Αντίθετα, η τριχοειδής απορροφητικότητα μπορεί να επηρεαστεί από τις συνθήκες σκυροδέτησης (π.χ. κακή συμπίκνωση, κακή συντήρηση - ρηγματώσεις λόγω συρρίκνωσης, και εξίδρωση).

*Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση*

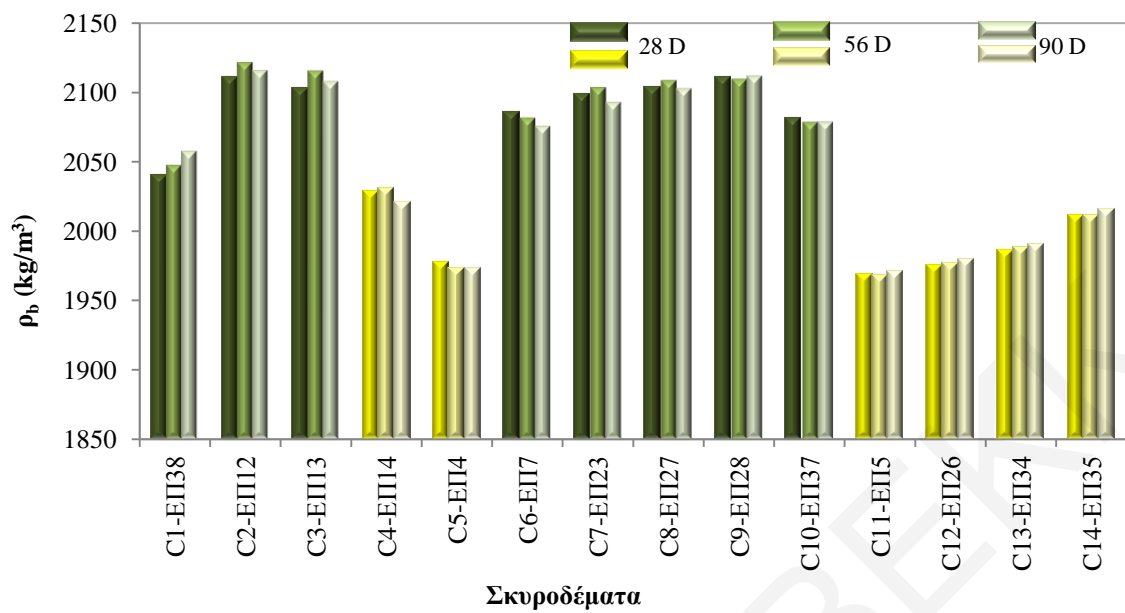


**Διάγραμμα 7.5:** Αποτελέσματα τριχοειδούς απορροφητικότητας (S) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.

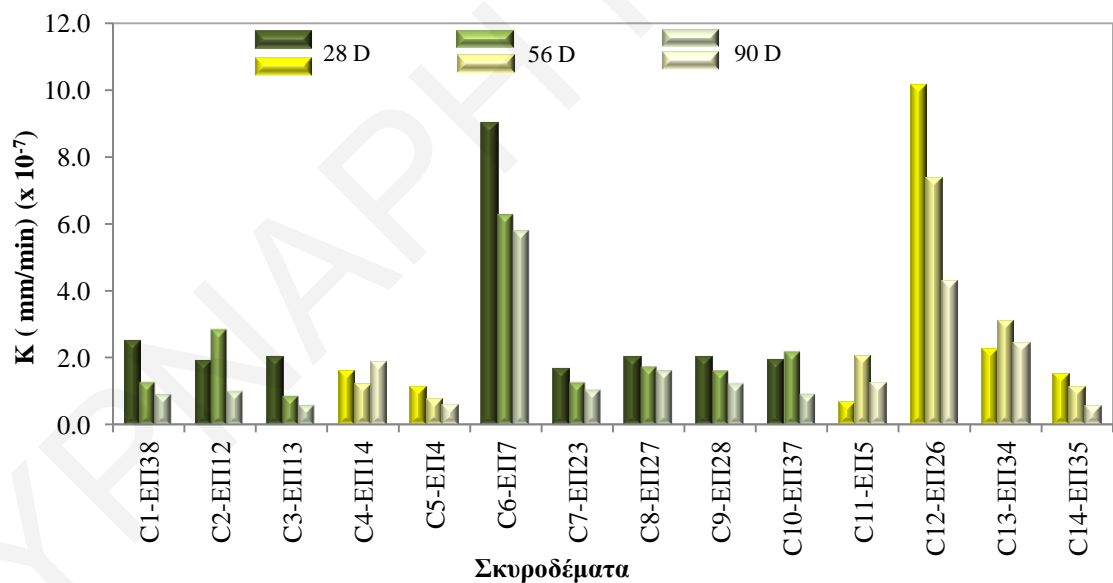


**Διάγραμμα 7.6:** Αποτελέσματα πορώδους (f<sub>0</sub>) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση



**Διάγραμμα 7.7:** Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.



**Διάγραμμα 7.8:** Αποτελέσματα διαπερατότητας (K) σκυροδεμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή και με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή.

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Τα σκυροδέματα C11 και C12, που παρασκευάστηκαν με τα ασβεστολιθικά αδρανή ΕΠ5 και ΕΠ26 αντίστοιχα, τα οποία παρουσίασαν πολύ ψηλούς συντελεστές αποσάθρωσης με θεϊκό μαγνήσιο και Micro-Deval (βλ. Πίνακα 6.2), εμφανίζουν μεγαλύτερο πορώδες και αντίστοιχα χαμηλότερη πυκνότητα, σε σχέση με τα υπόλοιπα σκυροδέματα (Διάγραμμα 7.6 και Διάγραμμα 7.7). Η διαφορά αυτή είναι πιο εμφανής στα αρχικά στάδια ωρίμανσης των συγκεκριμένων σκυροδεμάτων, περίοδος κατά την οποία το σκυρόδεμα είναι πιο ευάλωτο σε διάβρωση. Μεγαλύτερο είναι και το πορώδες (και αντίστοιχα χαμηλότερη η πυκνότητα) για τα σκυροδέματα C1 και C10, που παρασκευάστηκαν με τα διαβασικά αδρανή “κακής” ποιότητας ΕΠ38 και ΕΠ37 αντίστοιχα. Ιδιαίτερα όσον αφορά το σκυρόδεμα C1, που παρασκευάστηκε με τα (χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα) αδρανή “κακής” ποιότητας ΕΠ38, αυτό εμφανίζει την χαμηλότερη πυκνότητα ανάμεσα σε όλα τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στην παρουσία μεγάλης ποσότητας φυλλοπυριτικών ορυκτών στη σύσταση των αδρανών ΕΠ38 (βλ. Πίνακα 6.3), τα οποία οδήγησαν και στον ψηλότερο συντελεστή μπλε του μεθυλενίου. Η παρουσία δευτερογενών ορυκτών στα αδρανή μειώνει την πυκνότητά τους.

Από το Διάγραμμα 7.7, φαίνεται ότι τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερη φαινόμενη πυκνότητα ( $\rho_b$ ), σε σχέση με τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή. Τα διαβασικά αδρανή, λόγω των ορυκτολογικών και ιστολογικών τους χαρακτηριστικών, παρουσιάζουν επίσης μεγαλύτερη πυκνότητα στερεών, σε σχέση με τις άλλες δύο κατηγορίες αδρανών που εξετάστηκαν στην παρούσα διατριβή. Συγκεκριμένα, τα διαβασικά αδρανή περιέχουν μεγάλη ποικιλία ορυκτών με διαφορετικά και συνήθως μεγαλύτερα ειδικά βάρη (λόγω παρουσίας μεταλλικών ορυκτών π.χ. πυρίτη, μαγνητίτη κ.α.), σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή. Υπολογίζοντας την πυκνότητα των ορυκτών ( $\rho_{cm}$ = composite mineral density) (Hall & Hamilton, 2016) των διαβασικών αδρανών από την ορυκτολογική τους σύσταση (βλ. Πίνακα 6.3), όπως φαίνεται στον Πίνακα Δ.0.5 του Παραρτήματος Δ, όντως παρατηρούνται μεγαλύτερες τιμές, καθώς και μεγαλύτερη διακύμανση, σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή. Τα ασβεστολιθικά αδρανή που εξετάστηκαν αποτελούνται κυρίως από ασβεστίτη ή/και δολομίτη, και σε μικρότερες ποσότητες από άλλα ορυκτά (π.χ. χαλαζία, μαγνησίτη κ.α.). Γι’ αυτό, η πυκνότητά τους είναι χαμηλότερη και δεν παρουσιάζει ιδιαίτερες διακυμάνσεις.

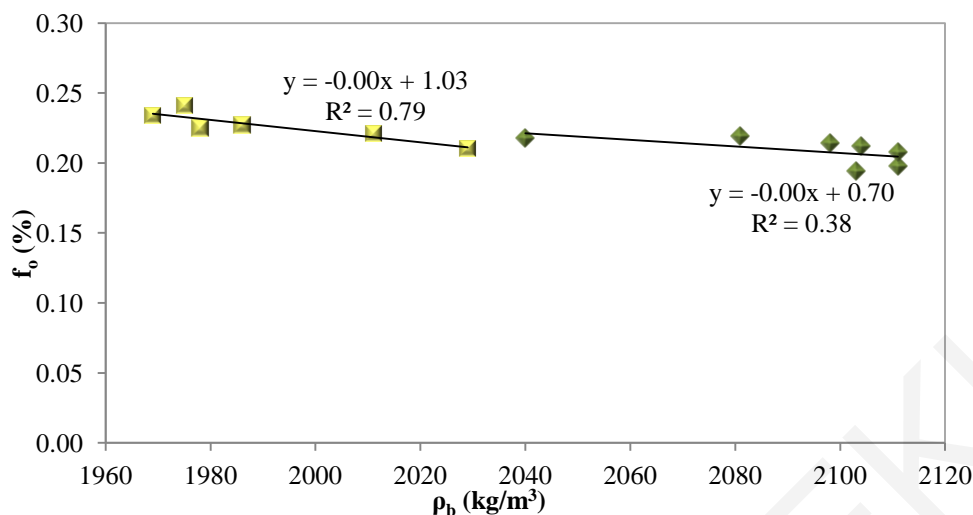


### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Όσον αφορά τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή, είναι εμφανές ότι αυτό (C4) που παρασκευάστηκε με τα καλύτερης ποιότητας αδρανή (ΕΠ14) εμφανίζει την ψηλότερη φαινόμενη πυκνότητα (βλ. Διάγραμμα 7.7). Το συγκεκριμένο δείγμα αδρανών περιέχει 95% ασβεστίτη και ίχνη χαλαζία, δολομίτη και νοντρονίτη, σε αντίθεση με άλλα δείγματα ασβεστολιθικών αδρανών (π.χ. ΕΠ4, ΕΠ5, ΕΠ26) που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδετήσεις, και τα οποία περιέχουν σημαντικά ποσοστά δολομίτη στη σύστασή τους (βλ. Πίνακα 6.3). Αυτά τα αδρανή οδήγησαν σε σκυροδέματα (C5, C11, C12) με χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα. Επειδή το ειδικό βάρος του δολομίτη (2,84-2,86) δεν είναι χαμηλότερο από αυτό του ασβεστίτη (2,71), μπορεί να ειπωθεί ότι η χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα των πιο πάνω σκυροδεμάτων είναι απόρροια των φτωχών ιδιοτήτων (MS, SS και MD) των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή τους (βλ. Πίνακα 6.2).

Σημειώνεται ότι αύξηση του πορώδους ενός υλικού συνεπάγεται και μείωση της πυκνότητάς του (Hall & Hoff, 2012). Συσχετίζοντας αυτές τις δύο παραμέτρους, παρατηρείται πολύ ισχυρή αρνητική συσχέτιση ( $r = -0,89$ ,  $p = 0,019$ ) για τα σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή στις 28 ημέρες. Αντίθετα, όσον αφορά τα σκυροδέματα με διαβασικά αδρανή, η συσχέτιση που παρατηρήθηκε δεν είναι στατιστικά σημαντική ( $p = 0,141 > 0,05$ ) (Διάγραμμα 7.9).

Από το Διάγραμμα 7.9, μπορεί να υπολογιστεί επίσης η πυκνότητα των στερεών συστατικών,  $\rho_s$ , των σκυροδεμάτων ( $f_0 = 1 - (\rho_b / \rho_s)$ ). Από τον υπολογισμό αυτό, επιβεβαιώνεται ότι η πυκνότητα των στερεών συστατικών των σκυροδεμάτων με διαβασικά αδρανή είναι μεγαλύτερη, σε σχέση με την αντίστοιχη πυκνότητα των σκυροδεμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή.



Διάγραμμα 7.9: Συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) και πορώδους ( $f_o$ ) σκυροδεμάτων (28 ημέρες), (πράσινο: διαβασικά αδρανή και κίτρινο: ασβεστολιθικά αδρανή).

Η πυκνότητα στερεών (Πίνακας Δ.0.5, Παράρτημα Δ), όπως αναφέρουν οι Hall & Hamilton (2016), σπάνια υπολογίζεται. Ωστόσο, δίνει σημαντικές πληροφορίες όσον αφορά την ορυκτολογία των πρώτων υλών, και μπορεί να βοηθήσει επίσης στον έλεγχο της ακρίβειας των μετρήσεων της φαινόμενης πυκνότητας και του πορώδους. Οι αποκλίσεις στα αποτελέσματα της πυκνότητας και του πορώδους που αναφέρθηκαν πιο πάνω στην περίπτωση των σκυροδεμάτων με διαβασικά αδρανή, οι οποίες δεν μπορούν να αποδοθούν στην ορυκτολογική σύσταση των αδρανών των δειγμάτων, προκύπτουν από πειραματικά σφάλματα: ατελή ξήρανση ή/και κορεσμό ή απομάκρυνση υπερβολικής ποσότητας νερού από την επιφάνεια του κορεσμένου δείγματος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου παρουσιάζεται μειωμένο το πορώδες, ενδεχομένως το δείγμα να μην κορέστηκε πλήρως, ή/και να απομακρύνθηκε επιπλέον νερό από την επιφάνειά του κατά τη διαδικασία μέτρησης της κορεσμένης μάζας του (Hall & Hamilton, 2016). Αυτό εξηγεί και την απουσία συσχέτισης μεταξύ πορώδους και πυκνότητας στα σκυροδέματα με διαβασικά αδρανή.

Όσον αφορά τη διαπερατότητα (K), η οποία είναι μια ιδιότητα που δύσκολα μπορεί να μετρηθεί με ακρίβεια στο εργαστήριο, η σύγκριση των αποτελεσμάτων συνηθίζεται να γίνεται σε επίπεδα τάξης μεγέθους π.χ.  $10^{-n}$  (Mehta & Monteiro, 2013). Παρόλα αυτά, όπως παρατηρείται στο Διάγραμμα 7.8, τα σκυροδέματα με διαβασικά αδρανή (με εξαίρεση το σκυροδέμα C6 που παρουσιάζει ιδιαίτερα πορώδη μικροδομή και άρα πολύ ψηλή διαπερατότητα) παρουσιάζουν διαπερατότητες οι οποίες φαίνεται να επηρεάζονται από τις ιδιότητες των αδρανών στις πρώτες 28 μέρες ωρίμανσης. Για παράδειγμα, το

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

σκυρόδεμα C1 που έχει τη ψηλότερη διαπερατότητα ανάμεσα στα υπόλοιπα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή, αποτελείται από τα αδρανή “κακής” ποιότητας ΕΠ38. Αντίθετα, το σκυρόδεμα C7 με τα αδρανή ΕΠ23 που παρουσιάζουν καλύτερες ιδιότητες, έχει τη χαμηλότερη διαπερατότητα.

Η διαπερατότητα των σκυροδεμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή φαίνεται ότι δεν επηρεάζεται από τις ιδιότητες των αδρανών (Διάγραμμα 7.8). Εξάιρεση αποτελεί το σκυρόδεμα C12 που παρασκευάστηκε με αδρανή (ΕΠ26) που παρουσιάζουν ψηλούς συντελεστές MS, SS και MD. Αντίστοιχα ψηλούς συντελεστές, ωστόσο, παρουσιάζουν και τα ασβεστολιθικά αδρανή ΕΠ4, τα οποία έχουν επίσης  $WA=3,0\%$ . Παρόλα αυτά, η διαπερατότητα του σκυροδέματος C5 δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τις ιδιότητες των αδρανών ΕΠ4. Σημειώνεται ότι όλες οι διαπερατότητες που καταγράφονται στην παρούσα διατριβή είναι τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους ψηλότερες από διαπερατότητες σκυροδεμάτων που καταγράφονται στη βιβλιογραφία (Hall & Hoff, 2012).

Από τον Πίνακα 7.3, φαίνεται ότι όλα τα σκυροδέματα που ελέγχθηκαν αρχικά παρουσιάζουν ψηλή διαπερατότητα στη διείσδυση χλωριόντων. Παρόλο που σε μερικές περιπτώσεις (π.χ. C2 και C14) αυτή η διαπερατότητα μειώνεται, όπως αναμενόταν, με την πάροδο του χρόνου, εντούτοις δεν μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα σε ότι αφορά τη συσχέτιση της συγκεκριμένης ιδιότητας των σκυροδεμάτων με τις ιδιότητες των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρασκευή τους. Συγκεκριμένα, το δείγμα αδρανών ΕΠ12 που χρησιμοποιήθηκε για την παρασκευή του σκυροδέματος C2, παρουσιάζει σχετικά χαμηλούς συντελεστές MS, SS και MD, αλλά δεν έχει την πιο χαμηλή απορροφητικότητα ανάμεσα στα δείγματα διαβασικών αδρανών που ελέγχθηκαν. Αντίθετα, το δείγμα αδρανών ΕΠ27, με χαμηλή απορροφητικότητα και συντελεστές MS, SS και MD, οδήγησε σε σκυρόδεμα (C8) με αυξημένη διαπερατότητα στη διείσδυση χλωριόντων. Η μόνη παράμετρος που μπορεί να δικαιολογήσει αυτό το αποτέλεσμα είναι η τιμή MB του συγκεκριμένου αδρανούς. Δείγματα διαβασικών αδρανών (ΕΠ13, ΕΠ28 και ΕΠ38) με αντίστοιχα ψηλές τιμές MB (2,7-3,7 g/kg), επίσης οδήγησαν σε σκυροδέματα με ψηλή διαπερατότητα στη διείσδυση χλωριόντων (C1, C3 και C9).

Όσον αφορά τα σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή, φαίνεται ότι το C5 που παρασκευάστηκε με το δείγμα ΕΠ4, εμφανίζει την ψηλότερη διαπερατότητα στη διείσδυση χλωριόντων. Το συγκεκριμένο δείγμα αδρανών παρουσιάζει εξαιρετικά ψηλή απορροφητικότητα και ψηλούς συντελεστές MS και MD. Αντίθετα, σκυροδέματα (π.χ. C4

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

και C14) που παρασκευάστηκαν με αδρανή (ΕΠ14 και ΕΠ35) χαμηλής απορροφητικότητας ( $WA < 1\%$ ) παρουσίασαν χαμηλότερη διαπερατότητα στη διείσδυση χλωριόντων σε βάθος χρόνου. Σύμφωνα με τον Lamichhane (2005), το πορώδες των αδρανών, και κατ' επέκταση του σκυροδέματος, επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την είσοδο και διασπορά των χλωριόντων στο σκυρόδεμα. Αδρανή υλικά τα οποία παρουσιάζουν ψηλό πορώδες συντείνουν στην παραγωγή σκυροδεμάτων τα οποία είναι πιο ευάλωτα στη διάβρωση που προκαλούν τα χλωριόντα.

### **7.2 Κονιάματα**

Όσον αφορά τα κονιάματα, σχεδιάστηκαν 16 μίγματα (CM1-CM16) με διαφορετικό είδος λεπτόκοκκου αδρανούς στο καθένα από αυτά. Στον Πίνακα 5.2 του 5<sup>ου</sup> Κεφαλαίου καταγράφονται τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν, όπως επίσης και οι κωδικοί των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν. Για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια 8 διαβασικά και 6 ασβεστολιθικά δείγματα αδρανών που επιλέχθηκαν και για την παρασκευή των σκυροδεμάτων. Πέραν των δειγμάτων αυτών, χρησιμοποιήθηκαν επιπλέον τα ασβεσταρενιτικά αδρανή ΕΠ2 και ΕΠ32.

Το δείγμα ΕΠ32 επιλέχθηκε γιατί παρουσιάζει την χειρότερη απόδοση όσον αφορά τις φυσικομηχανικές ιδιότητες από όλα τα ασβεσταρενιτικά αδρανή που εξετάστηκαν (βλ. Πίνακα 6.2, Κεφάλαιο 6). Το δείγμα ΕΠ2 παρουσιάζει παρόμοιο συντελεστή αποσάθρωσης (MS) με το δείγμα ΕΠ32, αλλά χαμηλότερες τιμές μπλε του μεθυλενίου (MB), αποσάθρωσης με θειικό νάτριο (SS), Micro-Deval (MD) και απορροφητικότητας (WA).

#### **7.2.1 Αποτελέσματα μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων κονιαμάτων**

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους πειραματικούς ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν στα κονιάματα με στόχο τον προσδιορισμό των μηχανικών και φυσικών τους ιδιοτήτων παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.5 και 7.6 αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 7.5: Μηχανικές ιδιότητες κονιαμάτων ( $f_c$  = αντοχή σε θλίψη,  $f_{cf}$  = αντοχή σε κάμψη,  $E_{mod}$  = στατικό μέτρο ελαστικότητας,  $E_{dyn}$  = δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, Μ.Ο. = μέσος όρος, τ.α. = τυπική απόκλιση, n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή).

		$f_c$ (MPa)			$f_{cf}$ (MPa)			$E_{mod}$ (GPa)			$E_{dyn}$ (GPa)		
		28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D
CM1-ΕΠ38	Μ.Ο.	16,5	17,5	17,5	3,6	3,8	3,8	12,5	n/a	9,9	17,4	n/a	18,7
	τ.α.	0,93	0,39	0,81	0,24	0,18	0,33						
CM2-ΕΠ12	Μ.Ο.	34,6	39,4	42,7	6,8	7,3	7,3	24,9	25,6	16,7	26,6	28,9	28,7
	τ.α.	0,25	0,66	0,33	0,34	0,42	0,10						
CM3-ΕΠ13	Μ.Ο.	19,9	22,5	24,7	4,2	4,7	5,2	10,3	12,2	9,9	20,8	20,8	20,7
	τ.α.	0,19	0,12	0,36	0,12	0,16	0,27						
CM4-ΕΠ14	Μ.Ο.	42,9	44,5	47,3	7,4	7,9	8,1	24,9	n/a	25,5	n/a	35,5	34,3
	τ.α.	1,14	3,21	1,93	0,47	0,29	3,81						
CM5-ΕΠ4	Μ.Ο.	33,0	33,7	38,1	6,5	6,9	7,1	21,6	18,7	n/a	26,3	27,8	28,1
	τ.α.	0,71	1,15	0,61	0,44	0,19	0,32						
CM6-ΕΠ2	Μ.Ο.	28,4	29,5	32,9	5,8	6,0	7,1	17,2	n/a	n/a	25,2	25,8	25,4
	τ.α.	0,68	1,39	1,08	0,05	0,15	0,08						
CM7-ΕΠ7	Μ.Ο.	32,2	35,1	37,4	5,5	6,3	6,5	n/a	17,6	17,3	25,6	24,4	22,6
	τ.α.	1,23	1,30	0,78	0,16	0,25	0,35						
CM8-ΕΠ23	Μ.Ο.	37,2	40,1	39,6	5,9	6,3	7,5	19,3	19,4	20,6	27,6	28,0	27,6
	τ.α.	0,55	2,53	1,90	0,13	0,17	0,28						
CM9-ΕΠ27	Μ.Ο.	24,1	26,1	26,1	5,0	5,2	5,4	14,2	11,7	13,4	20,2	20,3	18,4
	τ.α.	0,44	0,61	0,11	0,08	0,12	0,31						
CM10-ΕΠ28	Μ.Ο.	27,5	31,8	28,9	5,4	5,5	6,0	17,8	16,9	17,4	22,9	23,6	25,0
	τ.α.	1,33	1,65	0,91	0,44	0,23	0,15						
CM11-ΕΠ37	Μ.Ο.	26,8	28,7	31,8	5,3	5,5	5,5	13,7	15,1	14,7	21,1	21,6	22,4
	τ.α.	0,60	1,33	0,46	0,19	0,60	0,15						
CM12-ΕΠ5	Μ.Ο.	33,0	34,3	34,8	5,9	6,8	6,8	19,0	20,0	19,6	25,6	25,9	26,2
	τ.α.	0,61	2,09	1,12	0,23	0,28	0,09						
CM13-ΕΠ26	Μ.Ο.	30,8	37,0	40,4	7,0	6,9	7,2	21,1	21,6	22,3	27,1	27,3	29,7
	τ.α.	5,70	2,25	0,93	0,36	0,22	0,25						
CM14-ΕΠ34	Μ.Ο.	35,4	37,1	40,1	6,8	7,3	7,1	20,5	21,6	23,6	30,4	29,5	31,4
	τ.α.	1,75	1,69	3,35	0,26	0,11	0,33						
CM15-ΕΠ35	Μ.Ο.	40,7	42,7	43,8	6,9	7,7	7,5	23,6	23,9	25,5	28,9	30,0	29,1
	τ.α.	1,40	1,06	1,00	0,30	0,74	0,81						
CM16-ΕΠ32	Μ.Ο.	21,5	25,5	26,2	4,2	5,3	5,5	13,6	14,2	15,3	19,4	19,8	19,8
	τ.α.	0,84	0,89	0,65	0,08	0,20	0,14						

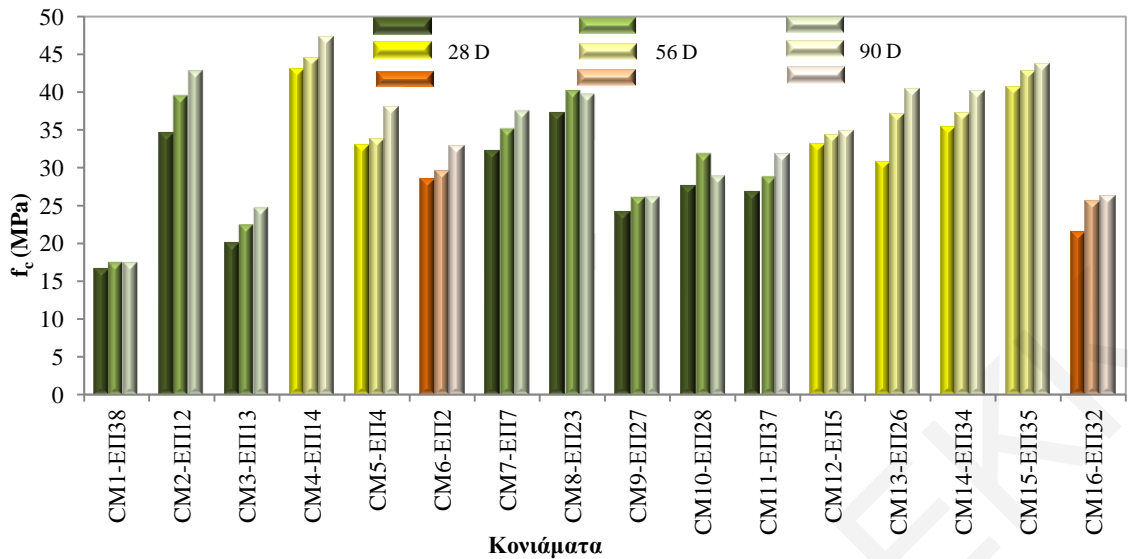
*Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση*

Πίνακας 7.6: Φυσικές ιδιότητες κονιαμάτων (S = τριχοειδής απορροφητικότητα,  $f_o$  = πορώδες,  $\rho_b$  = φαινόμενη πυκνότητα, K = διαπερατότητα, n/a = δεν πραγματοποιήθηκε η δοκιμή, f>s = πίεση ροής ψηλότερη από μέγιστη δυνατή περιβάλλουσα πίεση). Τα αποτελέσματα της τριχοειδούς απορροφητικότητας είναι κανονικοποιημένα στους 20°C.

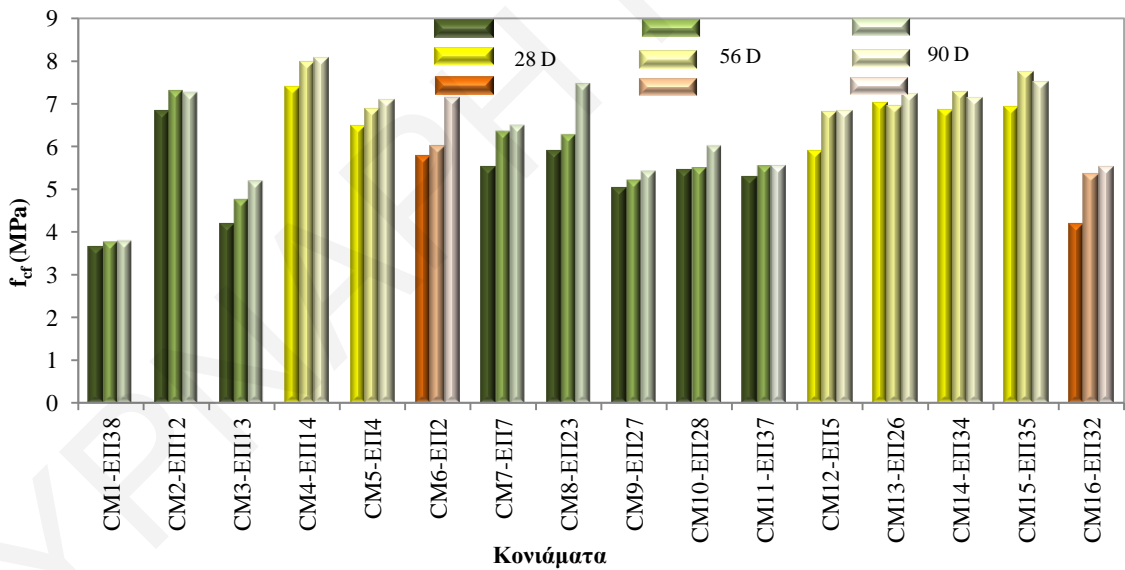
	S (mm/min <sup>1/2</sup> )			$f_o$ (%)			$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )			K (mm/min) (x 10 <sup>-7</sup> )		
	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D
CM1-ΕΠ38	0,58	0,50	0,29	35,3	32,2	31,8	1759	1767	1792	n/a	n/a	n/a
CM2-ΕΠ12	0,24	0,17	0,11	26,3	25,4	24,8	1944	1946	1966	f>s	n/a	n/a
CM3-ΕΠ13	0,36	0,30	0,09	29,3	29,8	29,4	1846	1841	1844	4,50	4,21	2,80
CM4-ΕΠ14	0,21	0,17	0,16	19,8	18,2	19,1	2051	2054	2046	0,83	f>s	f>s
CM5-ΕΠ4	0,21	0,20	0,28	25,1	20,7	22,3	1885	1895	1885	0,60	0,94	f>s
CM6-ΕΠ2	0,34	0,08	0,09	23,5	23,1	22,7	1927	1929	1933	0,68	f>s	f>s
CM7-ΕΠ7	0,35	0,19	0,23	25,4	24,4	23,7	2010	2006	2017	1,09	1,03	0,66
CM8-ΕΠ23	0,32	0,19	0,16	25,9	25,2	24,3	1957	1948	1958	0,95	0,62	f>s
CM9-ΕΠ27	0,50	0,29	0,18	31,5	29,6	29,6	1882	1893	1878	3,53	1,96	2,58
CM10-ΕΠ28	0,39	0,28	0,17	28,4	27,5	26,7	1959	1967	1972	3,05	1,78	2,09
CM11-ΕΠ37	0,49	0,15	0,08	28,4	29,6	29,0	1956	1876	1878	3,64	1,89	1,23
CM12-ΕΠ5	0,35	0,08	0,06	28,4	24,4	24,7	1840	1848	1849	0,83	1,11	0,95
CM13-ΕΠ26	0,24	0,16	0,08	27,2	23,9	23,9	1884	1891	1895	0,61	0,53	13,40 <sup>5</sup>
CM14-ΕΠ34	0,31	0,13	0,08	24,5	22,6	23,2	1971	1983	1971	0,64	f>s	f>s
CM15-ΕΠ35	0,24	0,18	0,10	24,4	21,8	22,0	1918	1964	1965	0,69	0,64	f>s
CM16-ΕΠ32	0,38	0,18	0,14	29,7	27,4	28,6	1761	1775	1772	0,83	0,56	f>s

<sup>5</sup> Δημιουργήθηκε ρωγή στο δοκίμιο κατά τη διάρκεια της δοκιμής.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

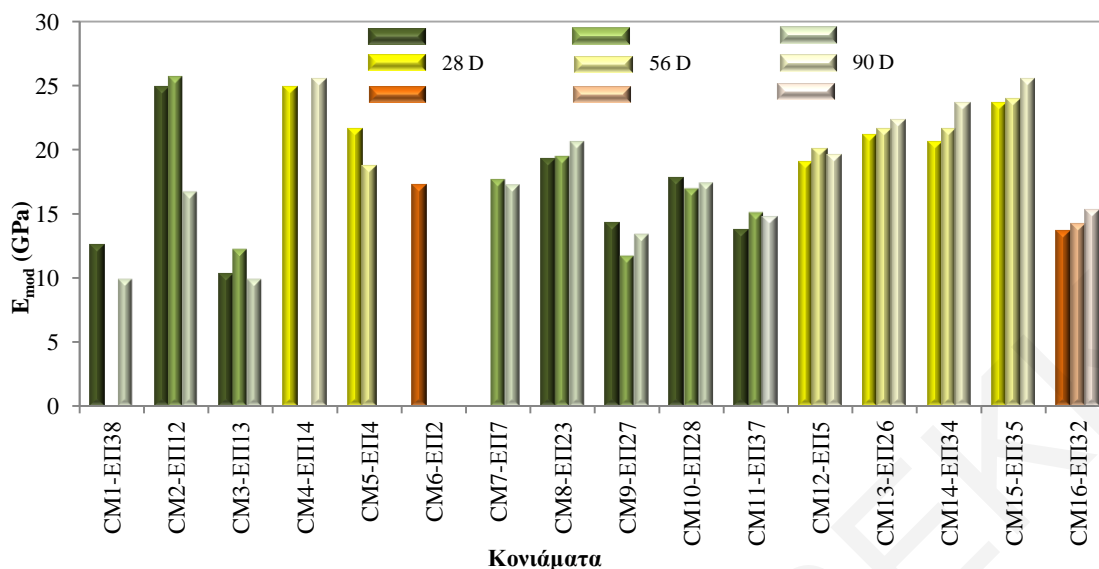


**Διάγραμμα 7.10:** Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.

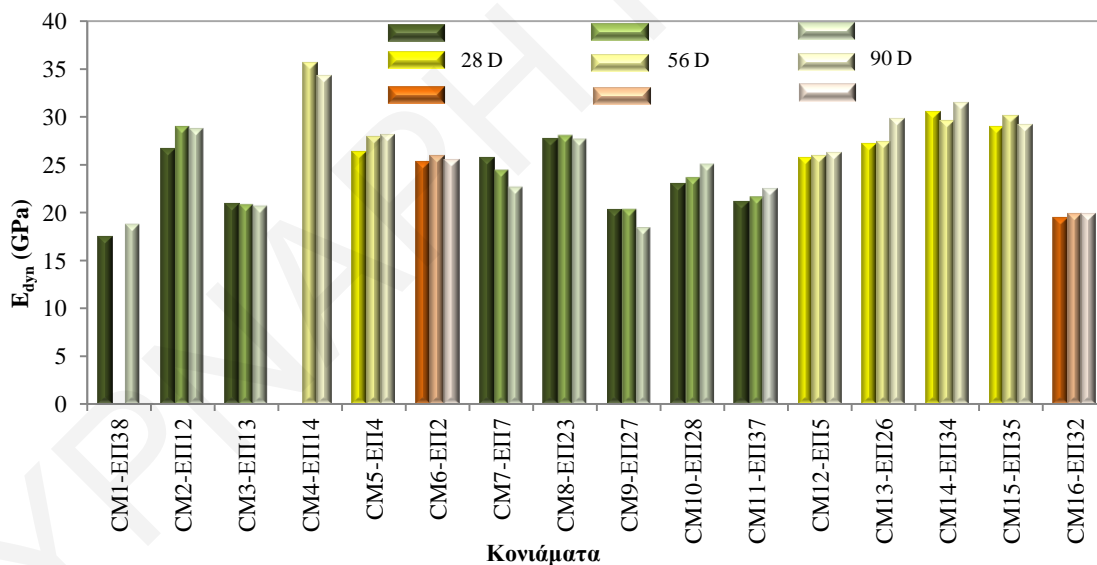


**Διάγραμμα 7.11:** Αποτελέσματα αντοχής σε κάμψη ( $f_{cr}$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση



**Διάγραμμα 7.12:** Αποτελέσματα στατικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{mod}$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.



**Διάγραμμα 7.13:** Αποτελέσματα δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{dyn}$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.

Όπως παρατηρείται από τον Πίνακα 7.5 και τα Διαγράμματα 7.10-7.13, οι μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων γενικά βελτιώνονται με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης, όπως αναμενόταν. Η επίδραση της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών στις ιδιότητες



### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

του τελικού προϊόντος είναι πιο εμφανής στην περίπτωση των κονιαμάτων, παρά σε αυτή των σκυροδεμάτων. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί με την παρουσία χονδρόκοκκων αδρανών και 2<sup>ης</sup> άμμου στα σκυροδέματα, υλικά τα οποία δυνητικά επηρεάζουν με τη σειρά τους το τελικό προϊόν. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι περιπτώσεις των δειγμάτων C4/CM4 και C5/CM5, τα οποία παρασκευάστηκαν με τα ασβεστολιθικά αδρανή ΕΠ14 και ΕΠ4 αντίστοιχα. Παρόλο που σε αυτά τα δείγματα τα αδρανή "χειρότερης" ποιότητας (ΕΠ4) επηρέασαν αρνητικά τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος (C5 και CM5), οι διαφορές είναι πιο αισθητές στα κονιάματα. Άλλα δείγματα τα οποία ενισχύουν το επιχείρημα ότι οι ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν την ποιότητα του σκληρυμένου κονιάματος, είναι τα κονιάματα CM7/CM8 (παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή (ΕΠ7 και ΕΠ23 αντίστοιχα) "καλύτερης" ποιότητας), CM3 (παρασκευάστηκε με διαβασικά αδρανή (ΕΠ13) "κακής" ποιότητας) και CM16 (παρασκευάστηκε με ασβεσταρενιτικά αδρανή (ΕΠ32) "κακής" ποιότητας). Σε όλες τις πιο πάνω περιπτώσεις, οι ιδιότητες του σκληρυμένου κονιάματος μεταβάλλονται ανάλογα με την ποιότητα του αδρανούς.

Σε αντίθεση με το σκυρόδεμα C6, το οποίο παρασκευάστηκε με τα "καλής" ποιότητας διαβασικά αδρανή ΕΠ7, και παρουσίασε χαμηλές τιμές στις μηχανικές ιδιότητες και υψηλότερες τιμές στις φυσικές ιδιότητες, το κονίαμα CM7, το οποίο παρασκευάστηκε με τα ίδια διαβασικά αδρανή, εμφανίζει πολύ καλές μηχανικές (και φυσικές) ιδιότητες. Αυτό επιβεβαιώνει το συμπέρασμα ότι στο σκυρόδεμα C6 μάλλον επέδρασαν άλλοι παράγοντες, όπως η φτωχή συμπίκνωση, που συνέβαλαν στην κακή του απόδοση.

Σύμφωνα με το Διάγραμμα 7.10, τα κονιάματα CM8, CM2 και CM7, τα οποία παρασκευάστηκαν με τα "καλής" ποιότητας διαβασικά αδρανή ΕΠ23, ΕΠ12 και ΕΠ7 αντίστοιχα, παρουσιάζουν τις υψηλότερες αντοχές σε θλίψη. Όσον αφορά τα αδρανή ΕΠ23 και ΕΠ12, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, παρουσιάζουν παρόμοια αποτελέσματα σε όλες τις ιδιότητες που εξετάστηκαν, πλην αυτής του ισοδύναμου άμμου, όπου παρατηρείται διπλάσια τιμή στο δείγμα ΕΠ23. Τα κονιάματα CM1 και CM3, που παρασκευάστηκαν με τα αδρανή ΕΠ38 και ΕΠ13, τα οποία δεν παρουσιάζουν πολύ καλές ιδιότητες (βλ. Πίνακα 6.2), εμφανίζουν τις χαμηλότερες αντοχές σε θλίψη. Το ίδιο ισχύει και για τα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή. Ενδεικτικά, αναφέρεται το κονίαμα CM4 που παρασκευάστηκε με τα αδρανή ΕΠ14, τα οποία θεωρήθηκαν "καλής" ποιότητας. Το συγκεκριμένο κονίαμα παρουσιάζει την υψηλότερη αντοχή. Αντίθετα, τα κονιάματα CM5 και CM12 που παρασκευάστηκαν με τα αδρανή ΕΠ4 και ΕΠ5 που θεωρούνται "κακής" ποιότητας, παρουσιάζουν τις χαμηλότερες αντοχές

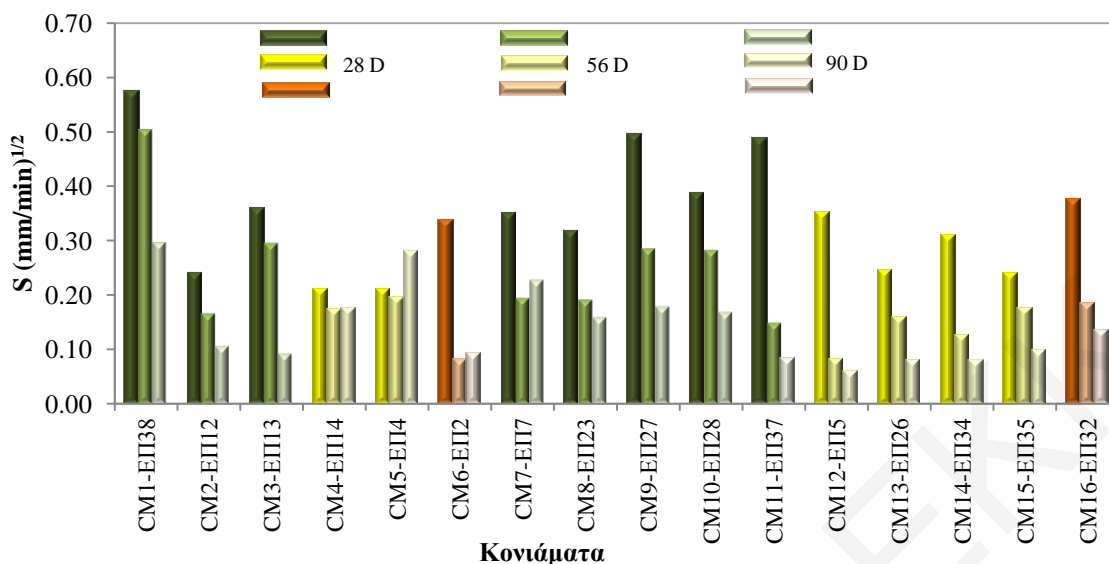
### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

σε θλίψη. Ανάλογα αποτελέσματα παρουσιάζουν και τα κονιάματα CM6 και CM16 που παρασκευάστηκαν με τα ασβεσταρενιτικά αδρανή ΕΠ2 και ΕΠ32 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 7.10, το κονίαμα CM6 που παρασκευάστηκε με τα αδρανή καλύτερης ποιότητας, παρουσιάζει ψηλότερες αντοχές σε θλίψη σε σχέση με το κονίαμα CM16.

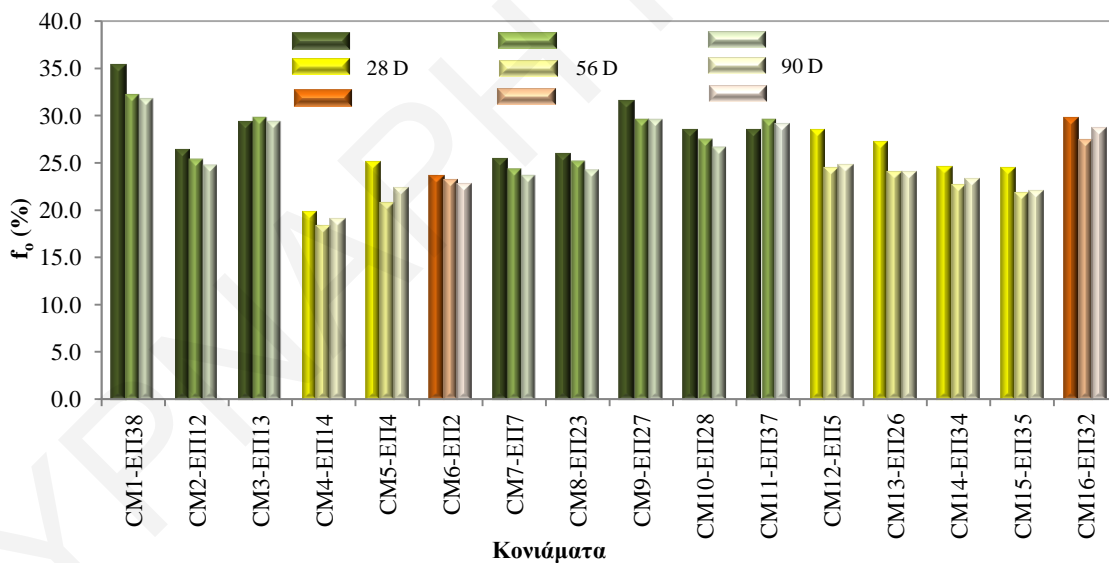
Η επίδραση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των αδρανών στο τελικό προϊόν φαίνεται και στα αποτελέσματα των υπόλοιπων μηχανικών ιδιοτήτων που εξετάστηκαν, ειδικά στα κονιάματα με τα διαβασικά και ασβεσταρενιτικά αδρανή. Όπως παρατηρείται στα Διαγράμματα 7.11-7.13, τα κονιάματα CM2 και CM8 που παρασκευάστηκαν με καλύτερης ποιότητας αδρανή (ΕΠ12 και ΕΠ23 αντίστοιχα), παρουσιάζουν ψηλότερες τιμές αντοχής σε κάμψη, στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, σε σχέση με τα κονιάματα CM1 και CM3 που παρασκευάστηκαν με χειρότερης ποιότητας αδρανή (ΕΠ38 και ΕΠ13 αντίστοιχα).

Οι φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων (Πίνακας 7.6), όπως φαίνεται και από τα Διαγράμματα 7.14-7.17, παρουσιάζουν φθίνουσες τιμές με την πάροδο του χρόνου ωρίμανσης. Από το Διάγραμμα 7.14, όσον αφορά τα κονιάματα με διαβασικά αδρανή (ειδικά στις 28 ημέρες ωρίμανσης), φαίνεται ότι επικρατεί η τάση όπου τα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με "κακής" ποιότητας αδρανή (π.χ. CM1, CM11) παρουσιάζουν μεγάλο συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας. Εξαιρέση αποτελεί το κονίαμα CM9 που παρασκευάστηκε με τα αδρανή ΕΠ27, τα οποία αν και παρουσιάζουν χαμηλούς συντελεστές αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο και Micro – Deval, ωστόσο παρουσιάζουν ψηλό συντελεστή μπλε του μεθυλενίου. Επίσης, τα κονιάματα CM2, CM7 και CM8 που παρασκευάστηκαν με "καλής" ποιότητας διαβασικά αδρανή (ΕΠ12, ΕΠ7 και ΕΠ23 αντίστοιχα), παρουσιάζουν χαμηλό συντελεστή τριχοειδούς απορροφητικότητας.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

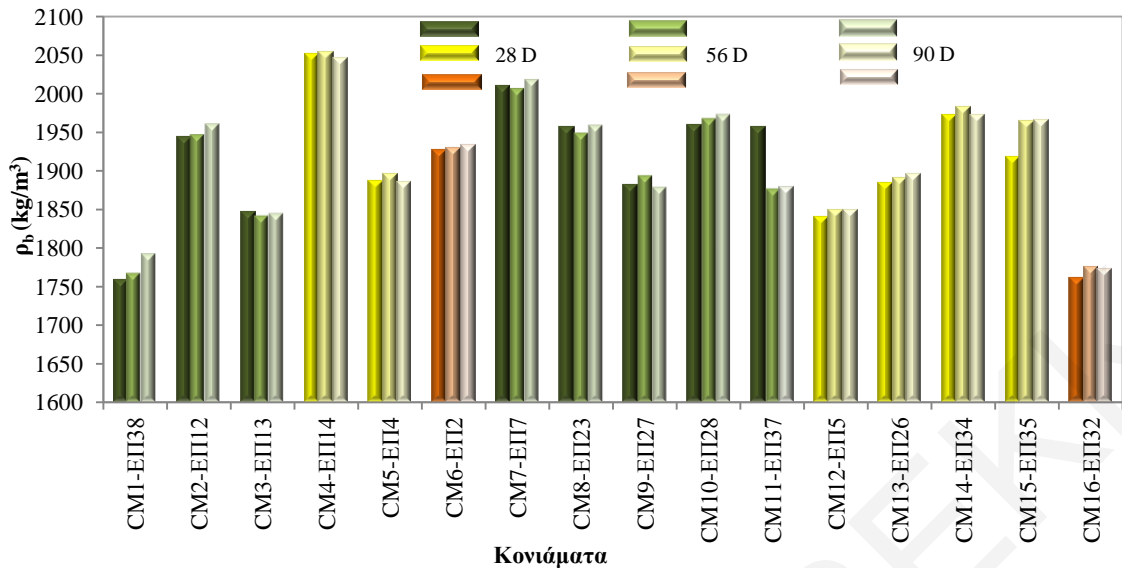


Διάγραμμα 7.14: Αποτελέσματα τριχοειδούς απορροφητικότητας (S) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.

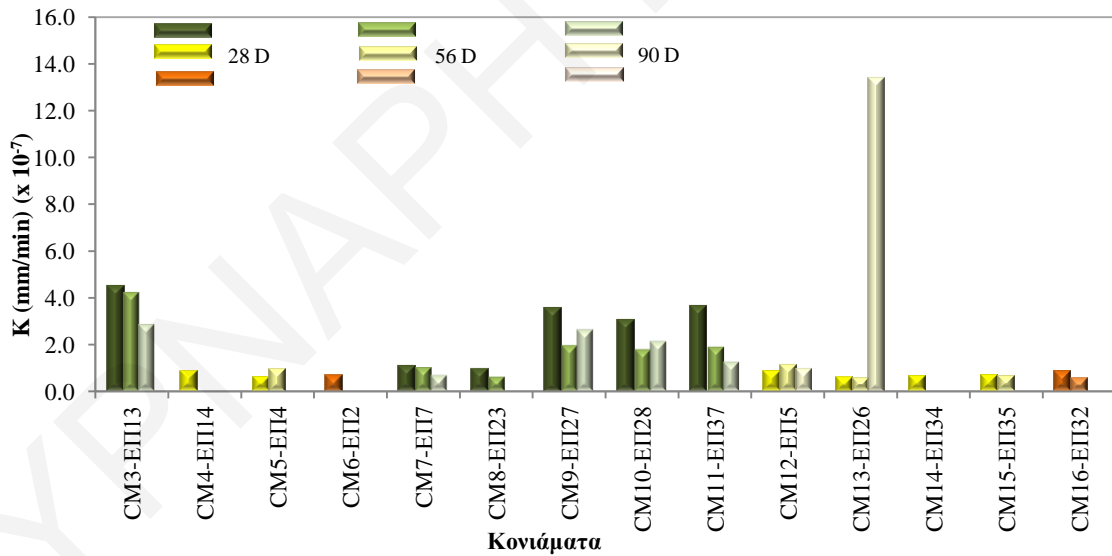


Διάγραμμα 7.15: Αποτελέσματα πορώδους (f<sub>0</sub>) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά αδρανή και με πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά αδρανή.

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση



**Διάγραμμα 7.16:** Αποτελέσματα φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά και πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

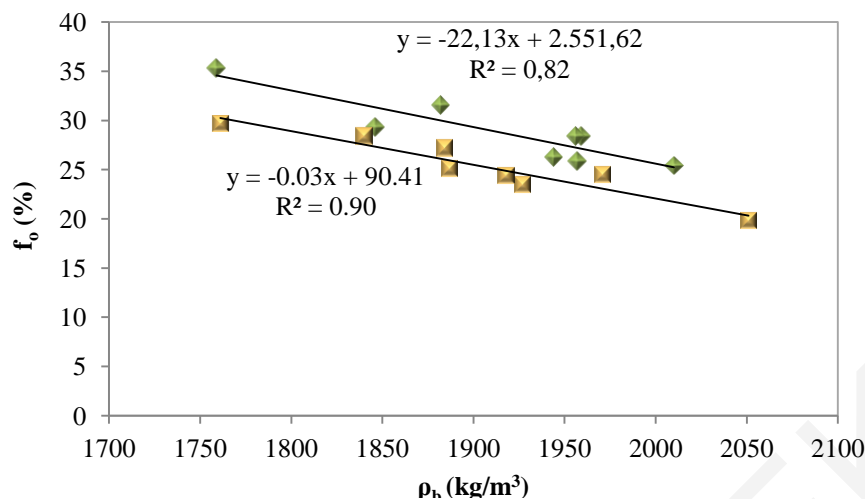


**Διάγραμμα 7.17:** Αποτελέσματα διαπερατότητας ( $K$ ) κονιαμάτων (28, 56 και 90 ημέρες). Οι στήλες με πράσινο χρώμα αφορούν διαβασικά αδρανή, με κίτρινο ασβεστολιθικά και πορτοκαλί ασβεσταρενιτικά.

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Ανάλογα αποτελέσματα προκύπτουν και όσον αφορά το πορώδες. Όπως φαίνεται στα Διαγράμματα 7.15-7.16, τα κονιάματα (π.χ. CM1, CM3) που παρασκευάστηκαν με "κακής" ποιότητας διαβασικά αδρανή παρουσιάζουν ψηλό πορώδες και αντίστοιχα χαμηλή πυκνότητα. Εξαιρέση αποτελεί και πάλι το κονίαμα CM9 που παρασκευάστηκε με τα αδρανή ΕΠ27, τα οποία ωστόσο παρουσιάζουν ψηλό συντελεστή μπλε του μεθυλενίου. Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 6.4, τα αδρανή τα οποία περιέχονται στα πιο πάνω σκυροδέματα, παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ποσοστό σε δευτερογενή ορυκτά. Αυξημένο ποσοστό πορώδους και αντίστοιχα χαμηλή πυκνότητα, παρουσιάζουν επίσης τα κονιάματα CM16 και CM12 που παρασκευάστηκαν με τα "κακής" ποιότητας ασβεσταρενιτικά και ασβεστολιθικά αδρανή ΕΠ32 και ΕΠ5 αντίστοιχα. Αντίθετα, τα κονιάματα CM2 και CM7 που παρασκευάστηκαν με τα "καλύτερης" ποιότητας διαβασικά αδρανή ΕΠ12 και ΕΠ7, παρουσιάζουν χαμηλότερο πορώδες και ψηλότερη πυκνότητα. Σημειώνεται ότι τα πορώδη που μετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής (20-35%) είναι συστηματικά ψηλότερα από πορώδη αντίστοιχων κονιαμάτων που καταγράφονται στη βιβλιογραφία (Hall & Hoff, 2012). Επιπλέον, σε αντίθεση με τη βιβλιογραφία (Ρανία & Toomey, 2008), τα πιο στρογγυλεμένα αδρανή (στην προκειμένη περίπτωση τα ανθρακικά) δεν συνέβαλαν σε αύξηση του πορώδους των κονιαμάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας και πορώδους στα κονιάματα που εξετάστηκαν παρουσιάζεται πολύ ισχυρή (βλ. Διάγραμμα 7.18). Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται από τα Διαγράμματα 7.16 και 7.18, το γεγονός ότι κάποια δείγματα κονιαμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή (π.χ. CM4, CM6 και CM14) παρουσιάζουν πολύ πιο μεγάλες τιμές πυκνότητας, σε σχέση με κάποια δείγματα κονιαμάτων με διαβασικά αδρανή, ενδεχομένως να οφείλεται σε πειραματικό λάθος. Όπως φαίνεται από την πυκνότητα στερεών και την πυκνότητα ορυκτών (βλ. Πίνακα Δ.0.5, Παράρτημα Δ), τα ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές. Ο λόγος που η φαινόμενη πυκνότητα παρουσιάζεται αυξημένη στα πιο πάνω κονιάματα είναι η ατελής ξήρανση των δοκιμίων πριν τη μέτρηση τους πορώδους τους (Hall & Hamilton, 2016).

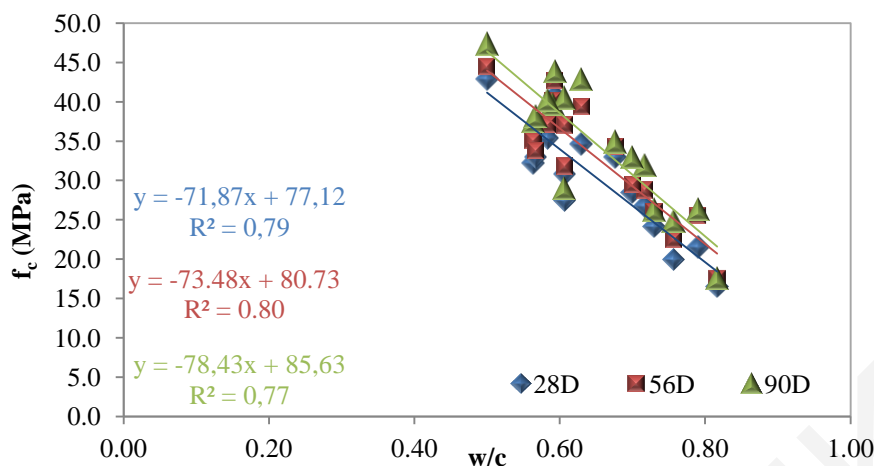


**Διάγραμμα 7.18:** Συσχέτιση φαινόμενης πυκνότητας ( $\rho_b$ ) και πορώδους ( $f_o$ ) κονιαμάτων στις 28 ημέρες (πράσινο: διαβασικά δείγματα, πορτοκαλί: ανθρακικά δείγματα).

Όσον αφορά τη διαπερατότητα, από το Διάγραμμα 7.17 προκύπτει ότι κονιάματα (π.χ. CM3, CM11) που παρασκευάστηκαν με "κακής" ποιότητας διαβασικά αδρανή εμφανίζουν μεγαλύτερες τιμές, σε σχέση με κονιάματα που παρασκευάστηκαν με "καλύτερης" ποιότητας διαβασικά αδρανή (π.χ. CM7, CM8). Η απότομη αύξηση της τιμής της διαπερατότητας που παρατηρείται στο κονίαμα CM13 στις 90 ημέρες οφείλεται σε ρωγμή που προέκυψε στο δείγμα κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Οι Hall & Yau (1987) επιβεβαιώνουν ότι αυξημένες τιμές διαπερατότητας μπορεί να προκύψουν είτε από κακή συμπύκνωση, είτε από ύπαρξη ρωγμών σε ένα σύνθετο υλικό.

#### 7.2.1.1 Επίδραση λόγου w/c στις φυσικο-μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων

Ο σχεδιασμός των κονιαμάτων έγινε στη βάση σταθερής εργασιμότητας, όπως συστήνουν διάφορα πρότυπα (π.χ. EN1015-2). Ως εκ τούτου, ο λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c) ήταν διαφορετικός για το κάθε μίγμα (βλ. Πίνακες 5.10-5.11). Κονιάματα (π.χ. CM1, CM3, CM9 και CM16) που παρασκευάστηκαν με αδρανή με ψηλές απορροφητικότητες ( $WA > 3\%$ ), ή/και ψηλή περιεκτικότητα σε ενεργά αργιλικά ( $MB \geq 3$  g/kg), χρειάστηκαν λόγους w/c > 0,72 προκειμένου να επιτύχουν την απαιτούμενη εργασιμότητα. Οι ψηλότεροι λόγοι w/c επηρέασαν δυσμενώς τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των πιο πάνω κονιαμάτων (βλ. Πίνακα 7.5 και 7.6). Ο Bechar (2005) επιβεβαιώνει ότι η αντοχή σύνθετων δομικών υλικών επηρεάζεται από το λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c). Όσο αυξάνεται ο λόγος w/c, μειώνεται η αντοχή των σύνθετων υλικών. Αυτό είναι εμφανές στο Διάγραμμα 7.19, όπου αύξηση του λόγου w/c συμβάλει σε μείωση της θλιπτικής αντοχής των κονιαμάτων.



Διάγραμμα 7.19: Συσχέτιση μεταξύ λόγου w/c και θλιπτικής αντοχής (f<sub>c</sub>) κονιαμάτων.

Διάφοροι ερευνητές (Nehdi, 2014) θεωρούν ότι τα αργιλικά ορυκτά, ακόμα και σε μικρό ποσοστό, επηρεάζουν τις ιδιότητες, τόσο του νωπού όσο και του σκληρυμένου σκυροδέματος/κονιάματος. Χαμηλά ποσοστά αργιλικών υλικών στην άμμο μπορεί να επηρεάσουν την εργασιμότητα, την πυκνότητα και την αντοχή ενός σύνθετου υλικού (Quiroga & Fowler, 2004). Ο Hanna (2003), οι Fernandes et al. (2007) και οι Norvell et al. (2007) επιβεβαιώνουν ότι τα αργιλικά ορυκτά και τα ορυκτά μεγέθους αργίλου μειώνουν την εργασιμότητα νωπών σύνθετων δομικών υλικών, λόγω της μεγάλης ειδικής επιφάνειάς τους, με αποτέλεσμα να απαιτείται περισσότερο νερό κατά την ανάμιξη του μίγματος. Αυτό επηρεάζει αρνητικά την αντοχή και την ανθεκτικότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος/κονιάματος. Στα ίδια συμπεράσματα κατέληξαν και οι Ρανία & Toomey (2008) μέσα από πειραματικές δοκιμές σε κονιάματα με ψηλό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών, ιλύως και αργίλου. Ο Λυκούδης (2009) αναφέρει ότι η παρουσία αργίλου σε άμμο που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την παρασκευή σκυροδέματος/κονιάματος έχει σοβαρές αρνητικές συνέπειες στο τελικό προϊόν. Συγκεκριμένα, σε πειραματικές δοκιμές που πραγματοποίησε ο πιο πάνω ερευνητής, διαπίστωσε ότι η προσθήκη αργίλου σε ποσοστό 18% κατά βάρος της άμμου μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της τελικής αντοχής του σκληρυμένου υλικού έως και 50%. Οι Yilmaz & Tugrul (2012), μέσα από πειραματικά αποτελέσματα σε σκυροδέματα με ψαμμιτικά αδρανή, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η θλιπτική και εφελκυστική αντοχή αυξάνονται κατά 40-50% με μείωση των αργιλικών ορυκτών. Σύμφωνα με τους Winnefeld & Bottger (2006), η θλιπτική και καμπτική αντοχή, όπως επίσης και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ασβεστοκονιαμάτων στα οποία περιέχονται αργιλικά ορυκτά, μπορεί να επηρεαστούν δυσμενώς σε βαθμό μέχρι και 50%. Οι Newman & Choo (2003) και Tugrul & Yilmaz (2012) σημειώνουν ότι επιβλαβή

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

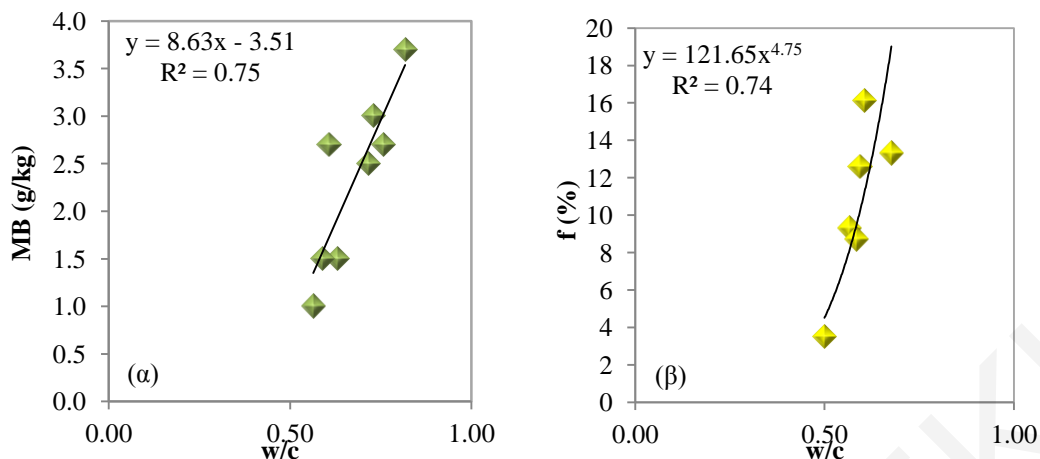
ορυκτά, όπως για παράδειγμα η άργιλος και η ιλύς, μπορεί να προκαλέσουν συστολο-διαστολές στο τελικό προϊόν σε συνθήκες ξήρανσης-ύγρανσης, με αποτέλεσμα ο δεσμός μεταξύ των αδρανών και της κονιάς να διασπαστεί.

Ο Ρηγόπουλος (2009) αναφέρει ότι ο χλωρίτης και γενικά τα φυλλοφυριτικά ορυκτά πρέπει να χρησιμοποιούνται με προσοχή στα κονιάματα και τα σκυροδέματα, αφού οι συγκεκριμένες ορυκτές φάσεις, οι οποίες όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω έχουν μεγάλη ειδική επιφάνεια, συμβάλουν στην αύξηση του νερού που απαιτείται να προστεθεί στο μίγμα, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αντοχή του τελικού προϊόντος. Στο ίδιο συμπέρασμα καταλήγουν και οι Leemann & Holzer (2001), που σημειώνουν την επίδραση που έχουν ο χλωρίτης και ο μοσχοβίτης στην εργασιμότητα των κονιαμάτων. Από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, επιβεβαιώνεται ότι η παρουσία φυλλοφυριτικών ορυκτών στα αδρανή σε ποσοστά >20% οδηγεί σε αύξηση του λόγου w/c στα κονιάματα (π.χ. CM1, CM3, CM9, CM11).

Οι Liu et al. (2014) σημειώνουν ότι η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου είναι πολύ σημαντική για τον ποιοτικό έλεγχο κονιαμάτων. Όσο αυξάνεται ο συντελεστής μπλε του μεθυλενίου, αυξάνονται και οι ανάγκες σε νερό του νωπού μίγματος, και άρα μειώνεται η θλιπτική αντοχή του τελικού προϊόντος. Στο ίδιο συμπέρασμα κατέληξαν και οι Stewart et al. (2007), που παρατήρησαν συσχέτιση μεταξύ της δοκιμής μπλε του μεθυλενίου και της εργασιμότητας. Στα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, παρατηρείται πολύ ισχυρή θετική γραμμική συσχέτιση ( $r = 0,86$ ,  $p = 0,006$ ) μεταξύ του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) των διαβασικών αδρανών και του λόγου w/c των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με αυτά τα αδρανή (βλ. Διάγραμμα 7.20 (α) και εξίσωση (7.3)).

$$MB = 8,63 (w/c) - 3,51 \quad (7.3)$$





Διάγραμμα 7.20: Συσχέτιση μεταξύ λόγου w/c και (α) συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) διαβαστικών αδρανών και (β) ποσοστού λεπτών (f) ασβεστολιθικών αδρανών.

Επίσης, παρατηρείται υψηλή συσχέτιση μεταξύ του λόγου w/c των κονιαμάτων και του ποσοστού λεπτών (f) των ασβεστολιθικών αδρανών ( $r = 0,80$ ,  $p = 0,050$ ). Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 7.20 (β) και στην εξίσωση (7.4), ο λόγος w/c στα κονιάματα αυξάνεται με αύξηση του ποσοστού των λεπτών (f) στα ασβεστολιθικά αδρανή. Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, τα πολύ μικρά τεμάχια στα αδρανή αυξάνουν την απαίτηση των κονιαμάτων σε νερό (Galloway, 1994), λόγω της πολύ μεγαλύτερης επιφάνειας των σωματιδίων τους.

$$f = 121,65(w/c)^{4,75} \quad (7.4)$$

Όσον αφορά τα κονιάματα (CM6 και CM16) που παρασκευάστηκαν με τα ιδιαίτερα λεπτόκοκκα ασβεσταρενιτικά αδρανή (βλ. FM – Πίνακα 7.4), αυτά εμφανίζουν το μεγαλύτερο λόγο w/c, σε σχέση με τα υπόλοιπα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με ανθρακικής σύστασης αδρανή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πρόκειται για αρκετά πιο λεπτόκοκκα αδρανή, σε σχέση με τα υπόλοιπα ασβεστολιθικά αδρανή, όπως φαίνεται και από τις κοκκομετρικές καμπύλες που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα Δ.0.1 (β) του Παραρτήματος Δ. Τα λεπτόκοκκα αδρανή αυξάνουν την απαίτηση σε νερό των κονιαμάτων.

Αντίθετα με τις συσχετίσεις λόγου w/c, ποσοστού λεπτών και συντελεστή μπλε του μεθυλενίου, δεν παρατηρήθηκε κάποια συσχέτιση του λόγου w/c με το συντελεστή ισοδύναμου άμμου. Αυτό συμφωνεί με το συμπέρασμα των Westerholm et al. (2008), οι οποίοι δεν παρατήρησαν ιδιαίτερες συσχετίσεις μεταξύ του συντελεστή ισοδύναμου άμμου και των ρεολογικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων που εξέτασαν.

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Με σκοπό να διερευνηθεί περαιτέρω η επίδραση του λόγου w/c στα κονιάματα, παρασκευάστηκε ένα επιπλέον μίγμα (CM17) με τα αδρανή ΕΠ13. Στο συγκεκριμένο κονίαμα, διατηρήθηκαν σταθεροί οι λόγοι κονιάς προς αδρανή (1:3) και w/c (0,63), όπως και στο κονίαμα CM2, το οποίο όμως είχε παρασκευαστεί με καλύτερης ποιότητας αδρανή. Η διατήρηση του λόγου w/c = 0,63 επιτεύχθηκε με την χρήση υπερρευστοποιητή. Ακολούθως, τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε νερό σε θερμοκρασία 20±2 °C μέχρι την εκτέλεση των δοκιμών αντοχής σε θλίψη, αντοχής σε κάμψη, πορώδους και τριχοειδούς απορροφητικότητας, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν 28, 56 και 90 ημέρες από την ημερομηνία παρασκευής των κονιαμάτων. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 7.7, όπου παρατίθενται επίσης για σκοπούς σύγκρισης τα αντίστοιχα αποτελέσματα από τα κονιάματα CM2 και CM3.

**Πίνακας 7.7: Σύγκριση ιδιοτήτων κονιαμάτων CM2, CM3 και CM17 ( $f_c$  = αντοχή σε θλίψη,  $f_{cf}$  = αντοχή σε κάμψη, S = τριχοειδής απορροφητικότητα,  $f_o$  = πορώδες,  $\rho_b$  = φαινόμενη πυκνότητα, τ.α. = τυπική απόκλιση).**

		$f_c$ (MPa)			$f_{cf}$ (MPa)			$f_o$ (%)			S (mm/min <sup>1/2</sup> )			$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )		
		28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D	28D	56D	90D
CM17	M.O.	35,9	38,7	38,9	5,8	5,8	5,9	25,3	23,7	25,2	0,29	0,27	0,22	1937	1948	1939
	τ.α.	1,26	0,62	1,40	0,38	0,28	0,31									
CM2	M.O.	34,6	39,4	42,7	6,8	7,3	7,3	26,3	25,4	24,8	0,24	0,17	0,11	1944	1946	1966
	τ.α.	0,25	0,66	0,33	0,34	0,42	0,10									
CM3	M.O.	19,9	22,5	24,7	4,2	4,7	5,2	29,3	29,8	29,4	0,36	0,30	0,09	1846	1841	1844
	τ.α.	0,19	0,12	0,36	0,12	0,16	0,27									

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 7.7, το κονίαμα CM17 παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές από ότι το κονίαμα CM3, το οποίο επίσης είχε παρασκευαστεί με τα ίδια αδρανή (ΕΠ13). Παράλληλα, έχει παρόμοιες (ή ελαφρά χαμηλότερες) θλιπτικές αντοχές, σε σχέση με το κονίαμα CM2, το οποίο παρασκευάστηκε με τον ίδιο λόγο w/c. Όσον αφορά τις καμπτικές αντοχές, το κονίαμα CM17 και πάλι υπερτερεί του κονιαμάτος CM3. Σε σχέση όμως με το κονίαμα CM2, το κονίαμα CM17 εμφανίζει αρκετά χαμηλότερες καμπτικές αντοχές, παρά τον ίδιο λόγο w/c.

Σύμφωνα με τους Han et al. (2013), οι υπερρευστοποιητές συμβάλλουν στην καλύτερη διασπορά των κόκκων του τσιμέντου, με θετική επίδραση στις αντοχές των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Η καλή διασπορά των κόκκων τσιμέντου επιφέρει επιτάχυνση της ενυδάτωσης, με αποτέλεσμα την ταχεία πήξη και σκλήρυνση του

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

σκυροδέματος/κονιάματος. Ο Τριανταφύλλου (2013) συμφωνεί ότι η ομοιόμορφη διασπορά των κόκκων τσιμέντου συμβάλει στην αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος/κονιάματος, με αποτέλεσμα σύνθετα υλικά με υπερρυστοποιητικά πρόσμικτα να εμφανίζουν μεγαλύτερες αντοχές από αντίστοιχα υλικά χωρίς πρόσμικτα, με τον ίδιο λόγο w/c. Οι Alonso et al. (2002) παρατήρησαν αυξημένες μηχανικές αντοχές στα σκυροδέματα στα οποία πρόσθεσαν υπερρυστοποιητή, αφού μειώθηκε η αναλογία του λόγου w/c κατά 10% χωρίς να επηρεαστεί η εργασιμότητα. Οι Norvell et al. (2007) παρασκεύασαν κονιάματα με σταθερό λόγο w/c και μεταβαλλόμενες τιμές ρυστοποιητή. Από τα αποτελέσματά τους, προκύπτει ότι χρειάζεται αρκετή ποσότητα ρυστοποιητή προκειμένου να γίνει εργάσιμο μίγμα κονιάματος που παρασκευάζεται με αδρανή πλούσια σε μοντμοριλλονίτη και άλλα αργιλικά ορυκτά (ή ορυκτά μεγέθους αργίλου). Η Parayianni (1997) αναφέρει ότι η μείωση του νερού κατά  $(20\pm 5)\%$  σε μίγματα κονιαμάτων που προστίθεται υπερρυστοποιητής, συμβάλει σε αύξηση της αντοχής τους κατά 20% έως και 50%.

Στην παρούσα διατριβή, αν και επιβεβαιώνεται ότι η προσθήκη (υπερ)ρυστοποιητή συμβάλει στην αύξηση των αντοχών των κονιαμάτων (βλ. κονιάματα CM3 και CM17), εν τούτοις από τα αποτελέσματα προκύπτει επίσης ότι, στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με φτωχής ποιότητας αδρανή υλικά (π.χ. ΕΠ13), ο αυξημένος λόγος w/c (που είναι ούτως ή άλλως επακόλουθο των χαρακτηριστικών των αδρανών και δει της παρουσίας φυλλοπυριτικών ορυκτών) δεν είναι η μόνη αιτία για τις μειωμένες αντοχές που παρατηρήθηκαν. Απόδειξη αποτελεί το γεγονός ότι το κονίαμα CM17, που παρασκευάστηκε με φτωχής ποιότητας αδρανή, παρουσιάζει μειωμένες (καμπτικές) αντοχές, σε σχέση με το κονίαμα CM2, που παρασκευάστηκε με τον ίδιο λόγο w/c, αλλά καλύτερης ποιότητας αδρανή υλικά (ΕΠ12).

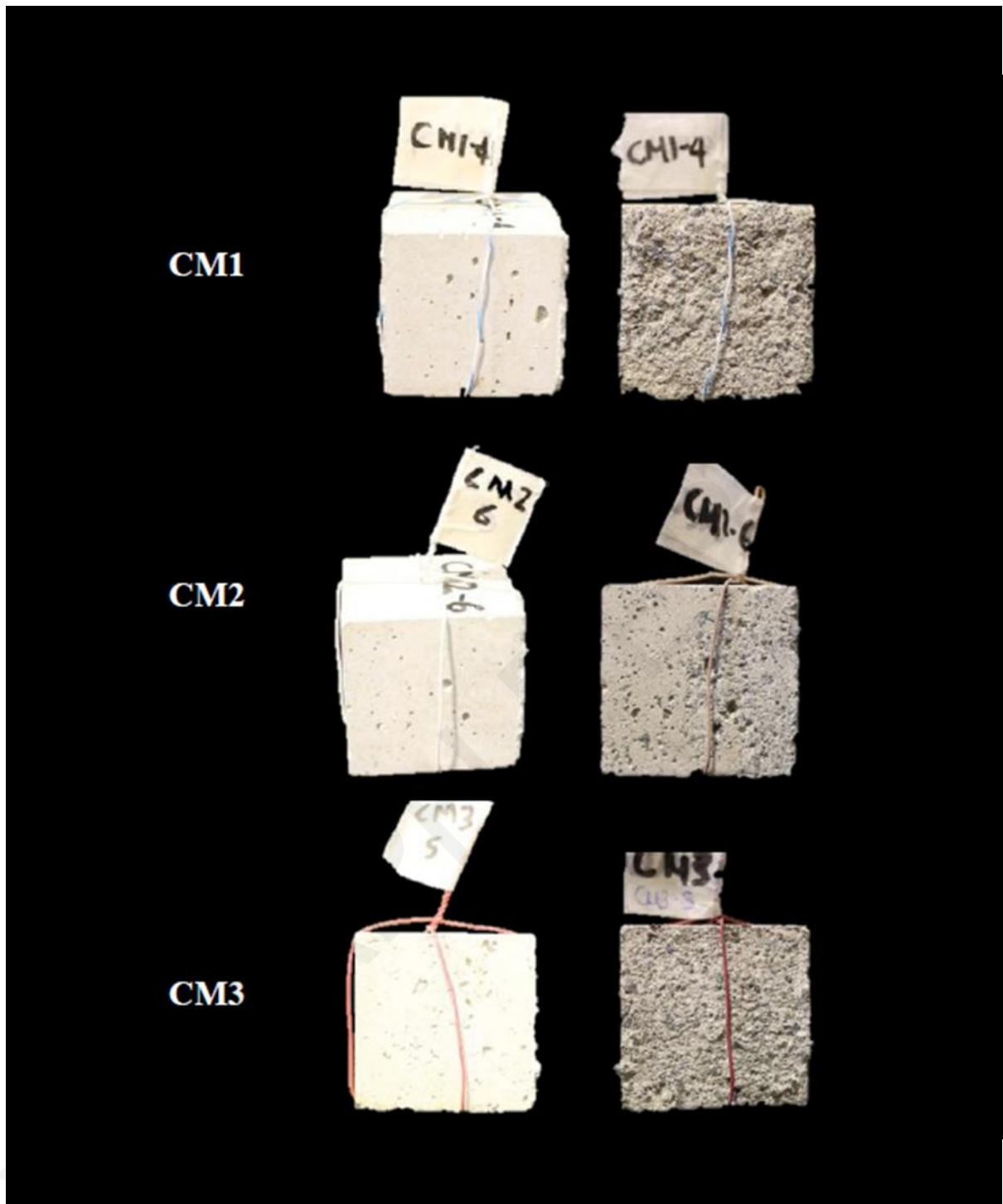
Ο Τριανταφύλλου (2013) σημειώνει ότι πρόσμικτα όπως οι (υπερ)ρυστοποιητές έχουν θετική επίδραση στο βαθμό ενυδάτωσης και στην ανάπτυξη αντοχής στα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης ενός σύνθετου υλικού. Επηρεάζουν δηλαδή σημαντικά τις αρχικές, αλλά όχι τις τελικές αντοχές των σκυροδεμάτων/κονιαμάτων. Αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, αφού στο κονίαμα CM17 που παρασκευάστηκε με προσθήκη υπερρυστοποιητή, οι αντοχές παραμένουν σχετικά σταθερές μετά τις πρώτες 28 ημέρες.

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

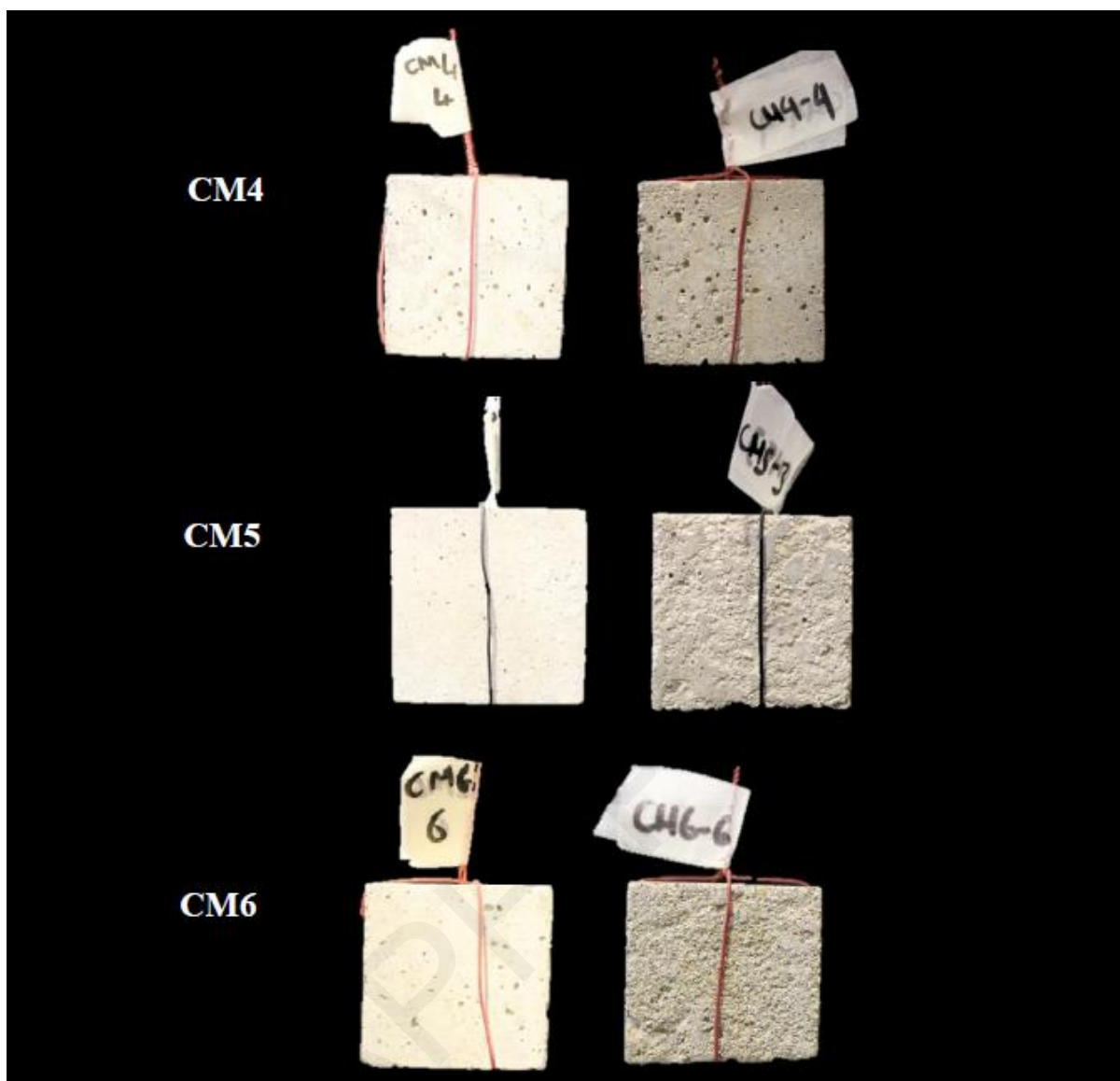
Όσον αφορά τις φυσικές ιδιότητες, το κονίαμα CM17 εμφανίζει χαμηλότερο πορώδες και ψηλότερη φαινόμενη πυκνότητα σε σχέση με το κονίαμα CM3, και περίπου ίδιο πορώδες/πυκνότητα με το κονίαμα CM2. Επιπλέον, παρουσιάζει ψηλότερες τιμές τριχοειδούς απορροφητικότητας σε σχέση με το κονίαμα CM2 (παρά τον ίδιο λόγο w/c), και χαμηλότερη απορροφητικότητα (τουλάχιστον για τις πρώτες 56 ημέρες) σε σχέση με το κονίαμα CM3. Το γεγονός ότι το κονίαμα CM17 παρουσιάζει χαμηλότερο πορώδες και τριχοειδή απορροφητικότητα, και ψηλότερη πυκνότητα, από το κονίαμα CM3, οφείλεται στο ότι με την προσθήκη του υπερρρευστοποιητή έγινε πιο εργάσιμο, οπότε μπόρεσε να συμπυκνωθεί καλύτερα και πιο εύκολα, ώστε να μην παραμείνουν αρκετοί πόροι στη μάζα του. Αυτό επηρέασε τόσο τον συνολικό όγκο των πόρων (και άρα το πορώδες και την πυκνότητα), όσο και τη συνοχή τους (και άρα την τριχοειδή απορροφητικότητα). Παράλληλα, όπως και στην περίπτωση των μηχανικών ιδιοτήτων, η μείωση του λόγου w/c στα ίδια επίπεδα με το κονίαμα CM2, δεν οδήγησε κατ' ανάγκη όλες τις φυσικές ιδιότητες στα ίδια επίπεδα με το συγκεκριμένο κονίαμα. Συγκεκριμένα, η τριχοειδής απορροφητικότητα εξακολουθεί να είναι ψηλότερη από αυτή που καταγράφηκε για το κονίαμα CM2, παρά το γεγονός ότι και τα δύο κονιάματα παρασκευάστηκαν με τον ίδιο λόγο w/c. Αυτό επιβεβαιώνει την επίδραση του συνόλου των ιδιοτήτων των λεπτόκοκκων αδρανών στις ιδιότητες των κονιαμάτων.

#### **7.2.1.2 Αποτελέσματα δοκιμών αντίστασης στην κρυστάλλωση αλάτων**

Στις Εικόνες 7.2 και 7.3 παρουσιάζονται ενδεικτικά δοκίμια κονιαμάτων που υποβλήθηκαν στη δοκιμή αντίστασης στην κρυστάλλωση αλάτων, πριν την έναρξη της δοκιμής (αριστερά) και μετά τους 15 κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης στην παρουσία διαλύματος άλατος (δεξιά). Από την Εικόνα 7.2, είναι εμφανές ότι τα κονιάματα CM1 και CM3 που παρασκευάστηκαν με "κακής" ποιότητας αδρανή (ΕΠ38 και ΕΠ13 αντίστοιχα) επηρεάστηκαν περισσότερο από την κρυστάλλωση άλατος στους πόρους τους, σε σχέση με το κονίαμα CM2 που παρασκευάστηκε με "καλύτερης" ποιότητας αδρανή (ΕΠ12). Το ίδιο παρατηρείται και στην Εικόνα 7.3, όπου το κονίαμα CM4 που παρασκευάστηκε με "καλύτερης" ποιότητας αδρανή (ΕΠ14) δεν φαίνεται να επηρεάστηκε από την κρυστάλλωση αλάτων. Αντίθετα, το κονίαμα CM5, που παρασκευάστηκε με "κακής" ποιότητας αδρανή (ΕΠ4) παρουσιάζει εμφανή σημάδια της επίδρασης της κρυστάλλωσης αλάτων στους πόρους του. Το CM6 που παρασκευάστηκε με τα ασβεσταρενιτικά αδρανή, επίσης φαίνεται να επηρεάστηκε από την κρυστάλλωση αλάτων στους πόρους του.



Εικόνα 7.2: Κυβικά δοκίμια κονιαμάτων CM1-CM3. Η στήλη αριστερή υποδεικνύει το δοκίμιο πριν ξεκινήσει η δοκιμή κρυστάλλωσης, και δεξιά το δοκίμιο μετά από 15 κύκλους ύγρανσης-ξήρανσης.



Εικόνα 7.3: Κυβικά δοκίμια κονιαμάτων CM4-CM6. Η στήλη αριστερή υποδεικνύει το δοκίμιο πριν ξεκινήσει η δοκιμή κρυστάλλωσης, και δεξιά στήλη μετά από 15 κύκλους υγρανσης-ξηρανσης.

### 7.3 Συσχέτιση ιδιοτήτων αδρανών με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων / κονιαμάτων

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 3, αρκετοί ερευνητές (Hanna, 2003; Reichel et al., 2005; Brandes & Robinson, 2006) προσπάθησαν να συσχετίσουν τις ιδιότητες των αδρανών με τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Στην παρούσα ενότητα, επιχειρείται συσχέτιση των ιδιοτήτων των αδρανών που εξετάστηκαν στα πλαίσια αυτής της διατριβής (Πίνακας 6.2), με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων (Πίνακες 7.1-7.3) και των κονιαμάτων

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

(Πίνακες 7.5-7.6) που παρασκευάστηκαν, με ανάλυση παλινδρόμησης (*regression analysis*).

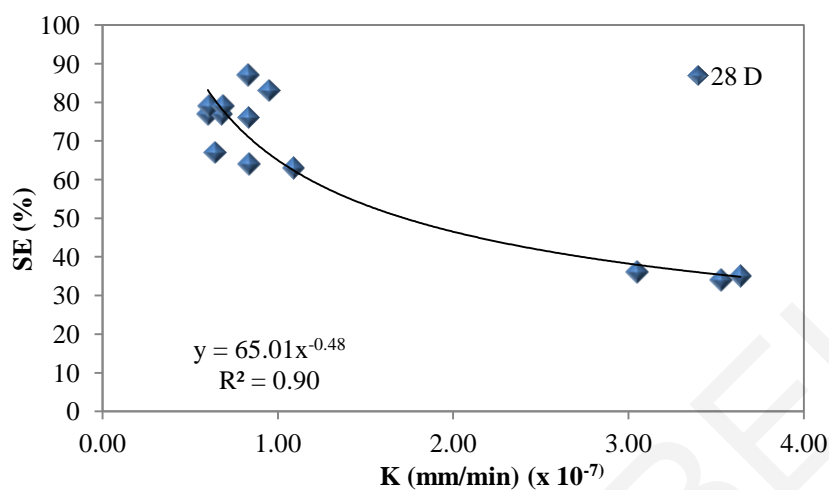
#### 7.3.1 Συσχέτιση με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου

Οι Brandes & Robinson (2006) παρατήρησαν μέση γραμμική συσχέτιση της δοκιμής ισοδύναμου άμμου ( $r = 0,63$ ) με την απόδοση του τελικού προϊόντος. Από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, όσον αφορά τα σκυροδέματα, δεν παρατηρούνται ιδιαίτερες συσχετίσεις μεταξύ της δοκιμής ισοδύναμου άμμου και των ιδιοτήτων του τελικού προϊόντος. Η μόνη αξιοσημείωτη συσχέτιση που παρατηρήθηκε είναι με τη θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες ( $r = 0,81$ ,  $p = 0,049$ ) και την τριχοειδή απορροφητικότητα των σκυροδεμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή ( $r = -0,82$ ,  $p = 0,046$ ) στις 56 ημέρες.

Όσον αφορά τα κονιάματα, φαίνεται ότι προκύπτει ισχυρή συσχέτιση στις 90 ημέρες ( $r = 0,73$ ,  $p = 0,039$ ) με την αντοχή σε θλίψη, ειδικά των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με ανθρακικά αδρανή. Ισχυρή είναι και η συσχέτιση που προκύπτει με την αντοχή σε κάμψη στις 90 ημέρες ( $r = 0,84$ ,  $p = 0,009$ ), το στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 28 ημέρες ( $r = 0,76$ ,  $p = 0,027$ ) και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας στις 56 ημέρες ( $r = 0,75$ ,  $p = 0,033$ ) των ίδιων κονιαμάτων.

Στις φυσικές ιδιότητες, προκύπτει ισχυρή συσχέτιση με το πορώδες των κονιαμάτων με ανθρακικά αδρανή ( $r = -0,77$ ,  $p = 0,026$  και  $r = -0,82$ ,  $p = 0,012$  στις 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα) και την τριχοειδή τους απορροφητικότητα ( $r = -0,72$ ,  $p = 0,044$  στις 28 ημέρες). Η πιο σημαντική (πολύ ισχυρή) όμως συσχέτιση που φαίνεται να προκύπτει, είναι αυτή του ισοδύναμου άμμου των αδρανών υλικών με τη διαπερατότητα των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με ανθρακικά αδρανή ( $r = -0,86$ ,  $p = 0,000$ ). Σημειώνεται ότι η διαπερατότητα είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα σε ότι αφορά την εκτίμηση της ανθεκτικότητας σύνθετων δομικών υλικών, επειδή υποδεικνύει τη συνοχή των πόρων, και άρα την ευκολία ή τη δυσκολία στη μεταφορά διαβρωτικών ουσιών. Το Διάγραμμα 7.21 καταδεικνύει ότι όσο μειώνεται το ισοδύναμο άμμου στα αδρανή (δηλαδή όσο αυξάνεται το ποσοστό των λεπτόκοκκων), αυξάνεται η διαπερατότητα των κονιαμάτων. Τα λεπτόκοκκα, τα οποία είναι στην πλειοψηφία τους αργιλικής μορφής, παράλληλα με την αύξηση του λόγου w/c, ενισχύουν επίσης τη συνοχή των πόρων, αυξάνοντας τη διαπερατότητα του κονιάματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της διογκωσιμότητας των ενεργών αργιλικών ορυκτών και των τάσεων που ασκούν στα τοιχώματα των πόρων του κονιάματος. Οι τάσεις αυτές οδηγούν σε μικρο-ρηγματώσεις στο εσωτερικό των

κονιαμάτων, και επομένως επιδρούν αρνητικά στη μακροχρόνια ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος.



**Διάγραμμα 7.21:** Συσχέτιση συντελεστή ισοδύναμου άμμου ανθρακικών αδρανών (SE) και διαπερατότητας (K) κονιαμάτων.

### 7.3.2 Συσχέτιση με τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου και την ορυκτολογική σύσταση των αδρανών

Αρκετοί ερευνητές (Gullerud & Cramer, 2003; Torcu & Demir, 2008; Tugrul & Yilmaz, 2012) θεωρούν ότι η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου συσχετίζεται με τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Οι Stewart et al. (2007) συμπέραναν ότι με αύξηση του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου, μειώνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, ενώ οι Li et al. (2011) σημείωσαν ότι επηρεάζεται επιπρόσθετα και η καμπτική αντοχή. Οι ίδιοι οι συγγραφείς (Li et al., 2011) σημειώνουν ότι η κρίσιμη τιμή της δοκιμής μπλε του μεθυλενίου θεωρείται το 1,4 g/kg. Κάτω από αυτή την τιμή, δεν παρατηρείται μείωση της απόδοσης του σκυροδέματος. Αυτή η παρατήρηση συμφωνεί και με τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, αφού η συσχέτιση που παρατηρήθηκε ήταν με σκυροδέματα τα οποία παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή, τα οποία παρουσιάζουν συστηματικά ψηλές τιμές μπλε του μεθυλενίου.

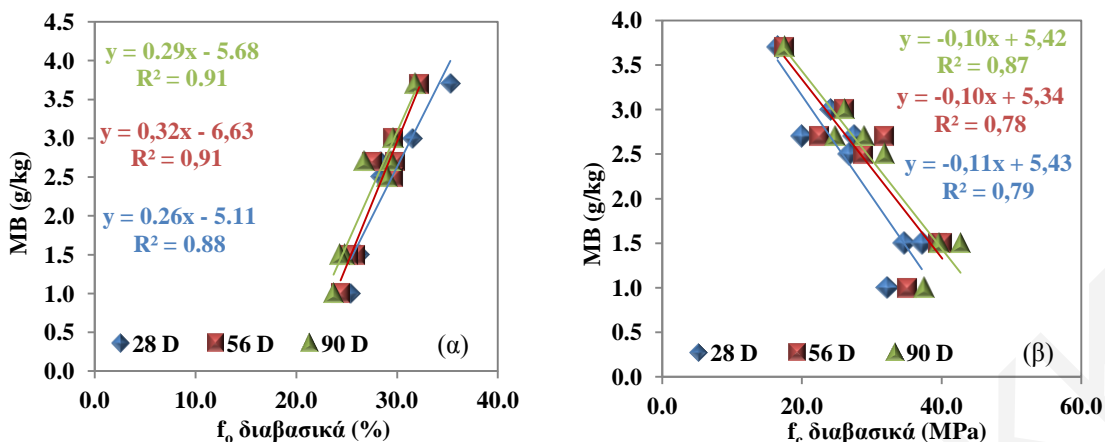
Συγκεκριμένα, προέκυψε ισχυρή συσχέτιση στις 28 ημέρες ( $r = -0,76$ ,  $p = 0,045$ ) του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου και της θλιπτικής αντοχής των σκυροδεμάτων με διαβασικά αδρανή. Σαφώς ισχυρότερη ήταν η συσχέτιση που προέκυψε με τις υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες, και πιο συγκεκριμένα με: (i) την αντοχή σε κάμψη ( $r = -0,82$ ,  $p = 0,024$  και  $r = -0,83$ ,  $p = 0,022$  στις 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα), (ii) την έμμεση εφελκυστική αντοχή από διάρρηξη ( $r = -0,87$ ,  $p = 0,024$  στις 90 ημέρες) και (iii) το



### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

στατικό μέτρο ελαστικότητας ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,018$  και  $r = -0,84$ ,  $p = 0,019$  στις 28 και στις 90 ημέρες αντίστοιχα).

Όσον αφορά τα κονιάματα, μέση έως πολύ ισχυρή συσχέτιση εντοπίζεται μεταξύ των τιμών μπλε του μεθυλενίου των αδρανών και (i) του πορώδους ( $r = 0,73$ ,  $p = 0,001$ ,  $r = 0,87$ ,  $p = 0,000$  και  $r = 0,86$ ,  $p = 0,000$  στις 28, 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα), (ii) της αντοχής σε κάμψη ( $r = -0,74$ ,  $p = 0,001$  στις 28 ημέρες και  $r = -0,83$ ,  $p = 0,000$  στις 56 και 90 ημέρες), (iii) του στατικού μέτρου ελαστικότητας ( $r = -0,74$ ,  $p = 0,002$ ,  $r = -0,65$ ,  $p = 0,017$  και  $r = -0,80$ ,  $p = 0,000$  στις 28, 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα), (iv) της τριχοειδούς απορροφητικότητας ( $r = 0,83$ ,  $p = 0,000$  και  $r = 0,71$ ,  $p = 0,002$  στις 28 και 56 ημέρες αντίστοιχα) και (v) της διαπερατότητας ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,000$  στις 28 ημέρες). Επίσης, ισχυρή συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ των τιμών μπλε του μεθυλενίου των αδρανών και της θλιπτικής αντοχής ( $r = -0,75$ ,  $p = 0,001$ ,  $r = -0,74$ ,  $p = 0,001$  και  $r = -0,79$ ,  $p = 0,000$ ) και για τις τρεις χρονικές περιόδους που δοκιμάστηκαν δείγματα. Επιπλέον, μέση έως ισχυρή συσχέτιση καταγράφηκε και με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( $r = -0,72$ ,  $p = 0,002$ ,  $r = -0,68$ ,  $p = 0,005$  και  $r = -0,66$ ,  $p = 0,007$  στις 28, 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα). Σημειώνεται ότι όλες οι πιο πάνω συσχετίσεις βελτιώνονται αν απομονωθούν τα αποτελέσματα των διαβασικών αδρανών. Αυτό ισχύει ειδικά όσον αφορά το πορώδες ( $r = 0,94$ ,  $p = 0,001$  για τις 28 και  $r = 0,95$ ,  $p = 0,000$  για τις 56 και 90 ημέρες) (Διάγραμμα 7.22 (α)), την αντοχή σε θλίψη ( $r = -0,89$ ,  $p = 0,003$  για τις 28 και 56 ημέρες και  $r = -0,93$ ,  $p = 0,001$  για τις 90 ημέρες) (Διάγραμμα 7.22 (β)), την αντοχή σε κάμψη ( $r = -0,78$ ,  $p = 0,024$ ,  $r = -0,89$ ,  $p = 0,003$  και  $r = -0,88$ ,  $p = 0,004$  για τις 28, 56 και 90 ημέρες), το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( $r = -0,93$ ,  $p = 0,001$ ,  $r = -0,77$ ,  $p = 0,04$  και  $r = -0,71$ ,  $p = 0,05$  για τις 28, 56 και 90 ημέρες) και τη διαπερατότητα ( $r = 0,89$ ,  $p = 0,016$  για τις 28 ημέρες).



Διάγραμμα 7.22: Συσχέτιση συντελεστή μπλε του μεθυλενίου (MB) και (α) πορώδους ( $f_0$ ) και (β) θλιπτικής αντοχής ( $f_c$ ) κονιαμάτων με διαβαστικά αδρανή.

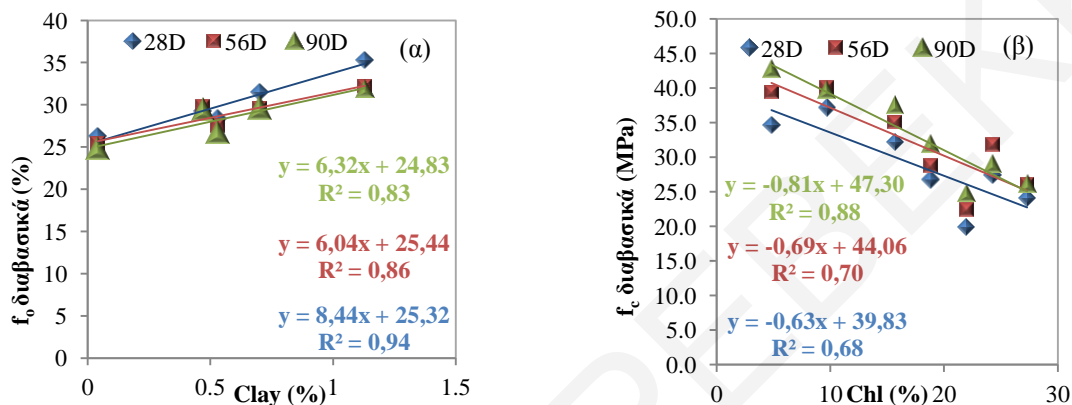
Από τα πιο πάνω αποτελέσματα φαίνεται ότι η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου συσχετίζεται πολύ καλά με τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος, ειδικά όταν σε αυτό περιέχονται διαβαστικά αδρανή. Η πολύ καλή συσχέτιση τα δοκιμής μπλε του μεθυλενίου με τις ιδιότητες κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβαστικά αδρανή οφείλεται στα ορυκτά που περιέχουν στη σύστασή τους τα συγκεκριμένα αδρανή.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 3.2.5, αρκετοί ερευνητές (Alexander, 1989; Beshr et al., 2003; Alexander, 1996; Thomas & Forriald, 2007) θεωρούν ότι οι χημικές και ορυκτολογικές ιδιότητες των αδρανών μπορούν να επηρεάσουν σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του τελικού προϊόντος. Οι Hasdemir et al. (2016) αναφέρουν ότι η παρουσία αργιλικών ορυκτών στην άμμο μειώνει τις αντοχές υψηλής επιτελεστικότητας σκυροδέματος κατά περίπου 10 MPa. Γι' αυτό συστήνεται να ελέγχονται τα αδρανή ως προς την ποσότητα και το είδος των αργιλικών ορυκτών που πιθανόν να περιέχουν, πριν χρησιμοποιηθούν σε μίγμα.

Στην παρούσα διατριβή, παρατηρήθηκαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των αργιλικών ορυκτών και του χλωρίτη με τις ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβαστικά αδρανή. Πιο συγκεκριμένα, προέκυψε συσχέτιση μεταξύ των αργιλικών ορυκτών με (i) τη θλιπτική αντοχή ( $r = -0,88$ ,  $p = 0,050$  και  $r = -0,93$ ,  $p = 0,020$  στις 56 και 90 ημέρες), (ii) την καμπτική αντοχή ( $r = -0,92$ ,  $p = 0,025$  και  $r = -0,95$ ,  $p = 0,014$  στις 56 και 90 ημέρες) και (iii) το πορώδες ( $r = 0,97$ ,  $p = 0,006$ ,  $r = 0,93$ ,  $p = 0,023$  και  $r = 0,91$ ,  $p = 0,031$  στις 28, 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα) (Διάγραμμα 7.23 (α)). Το περιεχόμενο των αδρανών σε χλωρίτη παρουσίασε πολύ ισχυρές συσχετίσεις με (i) τη θλιπτική αντοχή ( $r = -0,83$ ,  $p = 0,022$ ,  $r = -0,84$ ,  $p = 0,019$  και  $r = -0,94$ ,  $p = 0,002$  στις 28, 56 και 90 ημέρες

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

αντίστοιχα) (Διάγραμμα 7.23 (β)), (ii) την καμπτική αντοχή ( $r = -0,80$ ,  $p = 0,032$ ,  $r = -0,89$ ,  $p = 0,008$  και  $r = -0,87$ ,  $p = 0,010$ , στις 28, 56 και 90 ημέρες), (iii) το στατικό μέτρο ελαστικότητας ( $r = -0,90$ ,  $p = 0,006$  στις 56 ημέρες), (iv) το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( $r = -0,90$ ,  $p = 0,006$  στις 56 ημέρες) και (v) το πορώδες ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,023$  στις 28 ημέρες). Πολύ ισχυρή ήταν και η συσχέτιση μεταξύ της περιεκτικότητας των διαβασικών αδρανών σε αργιλικά, ζεολίθους και χλωρίτη με το πορώδες των κονιαμάτων ( $r = 0,85$ ,  $p = 0,016$  και  $r = 0,84$ ,  $p = 0,018$  στις 56 και 90 ημέρες).



Διάγραμμα 7.23: Συσχέτιση (α) πορώδους ( $f_0$ ) και περιεκτικότητας σε αργιλικά (Clay) και (β) θλιπτικής αντοχής ( $f_c$ ) και περιεκτικότητας σε χλωρίτη (Chl), στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή.

### 7.3.3 Συσχέτιση με τη δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό

Οι Yilmaz & Tugrul (2012) παρατήρησαν μείωση της θλιπτικής αντοχής σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με ψαμμιτικά αδρανή υψηλής απορροφητικότητας. Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση της απορροφητικότητας ασβεστολιθικών αδρανών με την καμπτική αντοχή ( $r = -0,94$ ,  $p = 0,006$ ) και την τριχοειδή απορροφητικότητα ( $r = 0,82$ ,  $p = 0,048$ ) σκυροδεμάτων στις 90 ημέρες.

Όσον αφορά τις συσχετίσεις στα κονιάματα, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση της απορροφητικότητας των αδρανών με τη θλιπτική αντοχή για όλες τις χρονικές περιόδους ( $r = -0,74$ ,  $p = 0,002$ ,  $r = -0,73$ ,  $p = 0,002$  και  $r = -0,71$ ,  $p = 0,003$ ). Η πιο πάνω συσχέτιση ενισχύεται στις 28 και 56 ημέρες ( $r = -0,80$ ,  $p = 0,032$  και  $r = -0,82$ ,  $p = 0,002$ ) όταν απομονωθούν τα κονιάματα με διαβασικά αδρανή. Ισχυρή έως μέση είναι και η συσχέτιση της απορροφητικότητας των αδρανών με την καμπτική αντοχή των κονιαμάτων ( $r = -0,72$ ,  $p = 0,002$ ,  $r = -0,68$ ,  $p = 0,004$  και  $r = -0,65$ ,  $p = 0,006$  στις 28, 56 και 90 ημέρες). Αντίστοιχα, πολύ ισχυρή είναι η συσχέτιση με το στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 90

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

ημέρες ( $r = -0,82$ ,  $p = 0,000$ ), ενώ αν απομονωθούν τα κονιάματα με τα ανθρακικά αδρανή η πιο πάνω συσχέτιση γίνεται πολύ ισχυρή στις 56 και 90 ημέρες ( $r = -0,87$ ,  $p = 0,025$  και  $r = -0,90$ ,  $p = 0,016$ ). Μέση συσχέτιση παρατηρείται με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας για όλες τις χρονικές περιόδους ( $r = -0,69$ ,  $p = 0,005$ ,  $r = -0,55$ ,  $p = 0,032$  και  $r = -0,62$ ,  $p = 0,010$ ), ενώ ισχυρότερες γίνονται οι συσχετίσεις αν απομονωθούν τα κονιάματα με τα ανθρακικά αδρανή ( $r = -0,83$ ,  $p = 0,021$  και  $r = -0,72$ ,  $p = 0,042$ , στις 28 και 90 ημέρες).

Στις φυσικές ιδιότητες, φαίνεται ότι η απορροφητικότητα των αδρανών επηρεάζει περισσότερο το πορώδες ( $r = 0,69$ ,  $p = 0,004$ ,  $r = 0,71$ ,  $p = 0,003$  και  $r = 0,75$ ,  $p = 0,001$  στις 28, 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα). Αυτό είναι πιο έντονο στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή ( $r = 0,83$ ,  $p = 0,022$  στις 28 ημέρες και  $r = 0,85$ ,  $p = 0,016$  για τις 56 και 90 ημέρες). Από τα αποτελέσματα, προκύπτει ότι τα κονιάματα (π.χ. CM1, CM3, CM16) που περιείχαν αδρανή με απορροφητικότητες  $WA > 3\%$ , παρουσίασαν χαμηλότερες αντοχές και ψηλότερο πορώδες, σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που εξετάστηκαν.

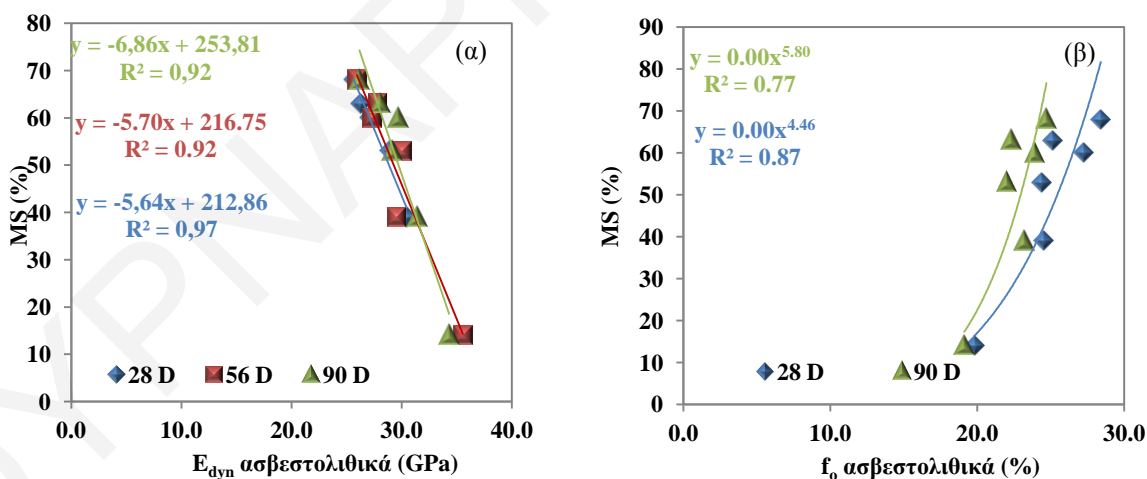
#### 7.3.4 Συσχέτιση με τη δοκιμή αποσάθρωσης

Οι Yilmaz & Tugul (2012) παρατήρησαν καλή (αντιστρόφως ανάλογη) γραμμική συσχέτιση του συντελεστή αποσάθρωσης με θεϊκό μαγνήσιο των αδρανών με τη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με ψαμμιτικά αδρανή. Οι Brandes & Robinson (2006) σημειώνουν ότι την καλύτερη συσχέτιση με το τελικό προϊόν παρουσιάζουν οι δοκιμές αποσάθρωσης με θεϊκό μαγνήσιο και θεϊκό νάτριο.

Από τα αποτελέσματα της παρούσης διατριβής φαίνεται ότι με τη δοκιμή αποσάθρωσης των αδρανών συσχετίζονται καλύτερα οι ιδιότητες σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή. Συγκεκριμένα, πολύ ισχυρή έως ισχυρή προκύπτει η συσχέτιση με την θλιπτική αντοχή στις 28 και 56 ημέρες ( $r = -0,90$ ,  $p = 0,005$  και  $r = -0,78$ ,  $p = 0,038$ ), την εφελκυστική αντοχή στις 90 ημέρες ( $r = -0,81$ ,  $p = 0,050$ ), το στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 28 και 90 ημέρες ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,018$  και  $r = -0,82$ ,  $p = 0,024$ ), και την πυκνότητα και για τις τρεις χρονικές περιόδους κατά τις οποίες έγιναν δοκιμές ( $r = -0,87$ ,  $p = 0,011$ ,  $r = -0,84$ ,  $p = 0,009$  και  $r = -0,75$ ,  $p = 0,033$ ). Ισχυρή είναι και η συσχέτιση με την καμπτική αντοχή στις 90 ημέρες ( $r = -0,78$ ,  $p = 0,037$ ). Στα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή, παρατηρείται πολύ ισχυρή συσχέτιση με το πορώδες στις 56 ημέρες ( $r = 0,87$ ,  $p = 0,025$ ) και την πυκνότητα στις 28 και 56 ημέρες ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,039$  και  $r = -0,85$ ,  $p = 0,031$ ).

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Όσον αφορά τα κονιάματα, παρατηρήθηκε πολύ ισχυρή συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή αποσάθρωσης των αδρανών με: (i) το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας ( $r = -0,98$ ,  $p = 0,002$ ,  $r = -0,96$ ,  $p = 0,003$  και  $r = -0,96$ ,  $p = 0,002$  στις 28, 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα) (Διάγραμμα 7.24 (α)) και (ii) το πορώδες ( $r = 0,92$ ,  $p = 0,009$  και  $r = 0,84$ ,  $p = 0,038$  στις 28 και 90 ημέρες αντίστοιχα) των κονιαμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή (Διάγραμμα 7.24 (β)). Η μετάδοση του κύματος των υπερήχων στα κονιάματα, και κατ' επέκταση ο υπολογισμός του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, επηρεάζεται από την παρουσία πόρων στη μικροδομή τους. Αυξημένος συντελεστής αποσάθρωσης αδρανών υλικών υποδηλώνει πιο εξαλλοιωμένο δείγμα με περισσότερα κενά. Επίσης, οδηγεί σε υποβάθμιση των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων του κονιαματος. Άρα, η ταχύτητα των υπερήχων που μετρείται κατά τη δοκιμή προσδιορισμού του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας μειώνεται σε κονιάματα με εξαλλοιωμένα αδρανή. Πέρα από τις πιο πάνω ιδιότητες, πολύ ισχυρή συσχέτιση του συντελεστή αποσάθρωσης των αδρανών παρουσιάζεται και με την αντοχή σε θλίψη ( $r = -0,83$ ,  $p = 0,040$  στις 90 ημέρες) και κάμψη ( $r = -0,82$ ,  $p = 0,044$  και  $r = -0,86$ ,  $p = 0,029$  στις 56 και 90 ημέρες αντίστοιχα) των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή. Παρατηρείται επίσης συσχέτιση με την καμπτική αντοχή στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή ( $r = -0,71$ ,  $p = 0,049$ ,  $r = -0,71$ ,  $p = 0,046$  και  $r = -0,83$ ,  $p = 0,01$  στις 28, 56 και 90 ημέρες).



Διάγραμμα 7.24: Συσχέτιση συντελεστή αποσάθρωσης (MS) και (α) δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{dyn}$ ) και (β) πορώδους ( $f_o$ ) κονιαμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με τη χρήση θεικού νατρίου, αυτά δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερες συσχετίσεις με τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων ή των κονιαμάτων. Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα αρκετών

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

ερευνητών (π.χ. Cunningham, 2011; Gandhi & Lytton, 1984). Αξιόλογες μπορούν να θεωρηθούν μόνο οι συσχετίσεις με τις ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή και συγκεκριμένα με την αντοχή σε θλίψη για όλες τις χρονικές περιόδους που εξετάστηκαν ( $r = -0,79$ ,  $p = 0,036$ ,  $r = -0,77$ ,  $p = 0,045$  και  $r = -0,81$ ,  $p = 0,028$ ), την αντοχή σε κάμψη στις 28 και 56 ημέρες ( $r = -0,79$ ,  $p = 0,034$  και  $r = -0,84$ ,  $p = 0,018$ ), και το πορώδες στις 56 και 90 ημέρες ( $r = 0,79$ ,  $p = 0,034$  και  $r = 0,76$ ,  $p = 0,048$ ).

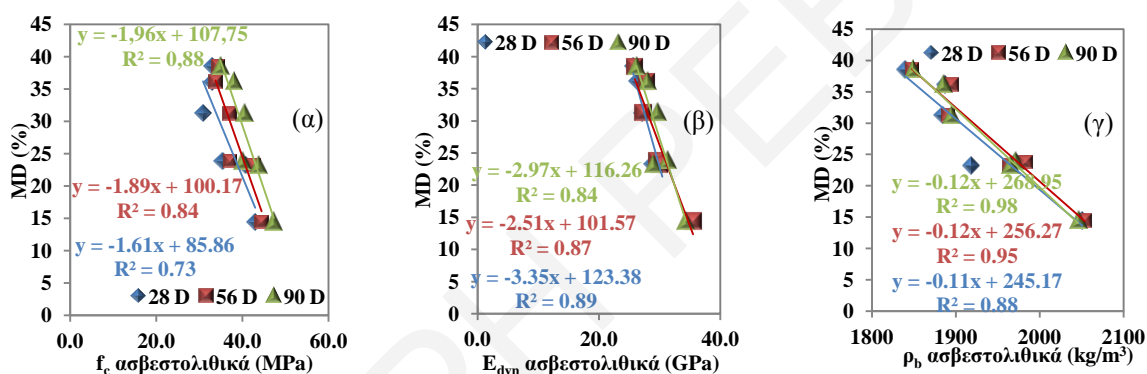
#### 7.3.5 Συσχέτιση με τη δοκιμή αντίστασης σε τριβή (Micro-Deval)

Όπως αναφέρθηκε και στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, αρκετοί ερευνητές (Wu et al., 1998; Rogers et al., 2003; Williams et al., 2005; Cuelho et al., 2007) θεωρούν ότι η δοκιμή Micro-Deval συσχετίζεται άμεσα με την απόδοση του τελικού προϊόντος. Στην παρούσα διατριβή, παρατηρείται πολύ ισχυρή συσχέτιση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Micro-Deval με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή και πιο συγκεκριμένα: (i) την αντοχή σε θλίψη στις 28 ημέρες ( $r = -0,84$ ,  $p = 0,019$ ), (ii) την αντοχή σε κάμψη στις 90 ημέρες ( $r = -0,85$ ,  $p = 0,016$ ), και (iii) το στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 28 ημέρες ( $r = -0,76$ ,  $p = 0,046$ ). Όσον αφορά τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση με το πορώδες στις 56 ημέρες ( $r = 0,83$ ,  $p = 0,041$ ). Με την πυκνότητα παρατηρούνται ισχυρές συσχετίσεις σε όλα τα σκυροδέματα και για τις τρεις χρονικές περιόδους που έγιναν δοκιμές ( $r = -0,80$ ,  $p = 0,001$ ,  $r = -0,80$ ,  $p = 0,001$  και  $r = -0,77$ ,  $p = 0,001$ ). Οι συσχετίσεις γίνονται ακόμα ισχυρότερες αν απομονωθούν τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή ( $r = -0,92$ ,  $p = 0,010$ ,  $r = -0,94$ ,  $p = 0,005$  και  $r = -0,93$ ,  $p = 0,008$ ).

Ισχυρές έως πολύ ισχυρές είναι και οι συσχετίσεις των αποτελεσμάτων της δοκιμής Micro-Deval με τις ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή, και πιο συγκεκριμένα με: (i) την αντοχή σε θλίψη και για τις τρεις χρονικές περιόδους ( $r = -0,80$ ,  $p = 0,017$ ,  $r = -0,81$ ,  $p = 0,014$  και  $r = -0,77$ ,  $p = 0,026$ ), (ii) την αντοχή σε κάμψη και για τις τρεις χρονικές περιόδους ( $r = -0,83$ ,  $p = 0,010$ ,  $r = -0,82$ ,  $p = 0,013$  και  $r = -0,85$ ,  $p = 0,008$ ), (iii) το στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 90 ημέρες ( $r = -0,76$ ,  $p = 0,030$ ), (iv) το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας στις 28 ημέρες ( $r = -0,75$ ,  $p = 0,032$ ), (v) το πορώδες και για τις τρεις χρονικές περιόδους ( $r = 0,75$ ,  $p = 0,031$ ,  $r = 0,76$ ,  $p = 0,029$  και  $r = 0,73$ ,  $p = 0,038$ ), (vi) την τριχοειδή απορροφητικότητα στις 56 ημέρες ( $r = 0,79$ ,  $p = 0,020$ ) και (vii) την πυκνότητα στις 28 και 56 ημέρες ( $r = -0,79$ ,  $p = 0,020$  και  $r = -0,84$ ,  $p = 0,009$ ).

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Ακόμη ισχυρότερες είναι οι συσχετίσεις που καταγράφηκαν μεταξύ του συντελεστή MD και των ιδιοτήτων των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή. Πιο συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν οι πιο κάτω συσχετίσεις: (i) με την αντοχή σε θλίψη στις 28, 56 και 90 ημέρες ( $r = -0,86$ ,  $p = 0,030$ ,  $r = -0,92$ ,  $p = 0,010$  και  $r = -0,94$ ,  $p = 0,005$  αντίστοιχα) (Διάγραμμα 7.25 (α)), (ii) με την αντοχή σε κάμψη στις 28, 56 και 90 ημέρες ( $r = -0,87$ ,  $p = 0,026$ ,  $r = -0,94$ ,  $p = 0,005$  και  $r = -0,90$ ,  $p = 0,013$ ), (iii) με το στατικό μέτρο ελαστικότητας στις 90 ημέρες ( $r = -0,93$ ,  $p = 0,020$ ), (iv) με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας στις 28, 56 και 90 ημέρες ( $r = -0,94$ ,  $p = 0,016$ ,  $r = -0,93$ ,  $p = 0,006$  και  $r = -0,92$ ,  $p = 0,010$ ) (Διάγραμμα 7.25 (β)), (v) με το πορώδες στις 28 ημέρες ( $r = 0,89$ ,  $p = 0,019$ ) και (vi) με την πυκνότητα στις 28, 56 και 90 ημέρες ( $r = -0,94$ ,  $p = 0,006$ ,  $r = -0,98$ ,  $p = 0,001$  και  $r = -0,99$ ,  $p = 0,000$ ) (Διάγραμμα 7.25 (γ)).



**Διάγραμμα 7.25:** Συσχέτιση του συντελεστή Micro-Deval (MD) και (α) της αντοχής σε θλίψη ( $f_c$ ), (β) του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας ( $E_{dyn}$ ) και (γ) της πυκνότητας ( $\rho_b$ ) των κονιαμάτων με ασβεστολιθικά αδρανή.

Από τα αποτελέσματα, φαίνεται ότι η δοκιμή Micro-Deval στα αδρανή, συσχετίζεται καλύτερα, σε σχέση με τη δοκιμή αποσάθρωσης, με τις ιδιότητες των κονιαμάτων. Αυτό συμφωνεί με τα συμπεράσματα των Hossain et al. (2007) που σημειώνουν ότι η δοκιμή Micro-Deval μπορεί να προβλέψει την απόδοση του τελικού προϊόντος καλύτερα από ότι η δοκιμή αποσάθρωσης.

Σημειώνεται ότι αρκετοί ερευνητές προσπάθησαν να καθορίσουν ανώτατα όρια για τη δοκιμή Micro-Deval. Για παράδειγμα, οι Rogers et al. (2003) καθόρισαν ως ανώτατο επιτρεπόμενο ποσοστό απώλειας μάζας για λεπτόκοκκο υλικό που προορίζεται για χρήση σε μίγματα σκυροδέματος για δομικές κατασκευές το 20%. Όσον αφορά το ασφαλτοσκυρόδεμα, το όριο διαφοροποιείται ανάλογα με τη στρώση: στη βάση (*base course*) ορίστηκε στο 25%, ενώ στην πρωτεύουσα στρώση κύλισης (*premium wearing*

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

course) στο 15%, και στη δευτερεύουσα (*secondary wearing course*) στο 25 % (για θραυστά αδρανή). Οι White et al. (2006) συνιστούν το 15% ως ανώτατο όριο για αδρανή που προορίζονται για χρήση σε ασφαλτοσκυρόδεμα, για όλες τις στρώσεις. Όλα τα πιο πάνω όρια προτείνονται στο Αμερικάνικο Πρότυπο ASTM D7428.

Οι Kandhal & Parker (1998) συνιστούν ως όριο διαχωρισμού των “κακής” ποιότητας αδρανών από τα “καλής” ποιότητας το 18%, ενώ οι Rangaraju et al. (2005) αναφέρουν ότι το 17% είναι ικανοποιητικό όριο. Οι Tarefder et al. (2003) παρατήρησαν σε δοκιμές σε ασβεστολιθικά και ψαμμιτικά αδρανή ότι απώλειες <10% χαρακτηρίζουν εξαιρετικής ποιότητας αδρανή. Απώλειες μεταξύ 10% και 18% αφορούν καλής ποιότητας αδρανή, ενώ απώλειες μεταξύ 18% και 25% παραπέμπουν σε μέτριας ποιότητας αδρανή. Τέλος, απώλειες >25% χαρακτηρίζουν τα κακής ποιότητας αδρανή. Για το λόγο αυτό, οι πιο πάνω συγγραφείς συνιστούν το 25% ως το μέγιστο όριο απώλειας μάζας στη δοκιμή Micro-Deval.

Ωστόσο, υπάρχουν και ερευνητές (Cooley et al., 2002; Prowell et al., 2005) οι οποίοι θεωρούν ότι τα όρια πρέπει να εξαρτώνται από την ορυκτολογική σύσταση του υλικού. Οι Lane et al. (2000) συμφωνούν ότι πρέπει να υπάρχουν διαφορετικά όρια που να βασίζονται στα γεωλογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των πετρωμάτων. Όσον αφορά την χρήση των αδρανών σε ασφαλτοσκυρόδεμα, οι πιο πάνω ερευνητές παραθέτουν διαφορετικά όρια αναλόγως εφαρμογής: π.χ. για *base course* το όριο ορίστηκε στο 21%, και για *secondary wearing course* στο 17%.

Δεδομένου του γεγονότος ότι τα αποτελέσματα της δοκιμής Micro-Deval φαίνεται να διαφοροποιούνται ανάλογα με το λιθότυπο των αδρανών (βλ. Πίνακα 6.2), είναι λογικό η οποιαδήποτε εισήγηση για καθορισμό ορίων, σε περίπτωση υιοθέτησης της δοκιμής αυτής, να διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος του υλικού. Για παράδειγμα, τα διαβασικά αδρανή παρουσιάζουν συστηματικά χαμηλότερες τιμές συντελεστή Micro-Deval, σε σχέση με τα ασβεστολιθικά αδρανή. Αυτό επιδρά ανάλογα και στις ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάζονται με διαβασικά/ασβεστολιθικά αδρανή (βλ. Πίνακες 7.1-7.6). Οπότε, ενδεικτικά θα μπορούσε να θεσπιστεί ως ανώτατο όριο για τα διαβασικά αδρανή το 20%, αφού μεγαλύτερες απώλειες μάζας αδρανών στη δοκιμή Micro-Deval οδηγούν σε κονιάματα με αρκετά χαμηλές αντοχές. Αντίστοιχα, για τα ασβεστολιθικά αδρανή θα μπορούσε να θεσπιστεί ως ανώτατο όριο το 35% και για τα ασβεσταρενιτικά το 25%. Παρόλα αυτά, για την εξαγωγή ασφαλών συμπερασμάτων χρειάζεται να γίνουν



## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

περαιτέρω δοκιμές σε δείγματα αδρανών, ώστε να συγκεντρωθεί μεγαλύτερος όγκος αποτελεσμάτων.

### 7.3.6 Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης

Με σκοπό τη στατιστική επεξεργασία του συνόλου των δεδομένων της διατριβής, υιοθετήθηκε η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης (*multiple regression*), που λαμβάνει υπόψη δύο ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Πιο συγκεκριμένα, ακολουθήθηκε η μέθοδος της διαδοχικής αφαίρεσης ή απαλοιφής (*backward elimination*). Κατά τη μέθοδο αυτή, ενσωματώνονται αρχικά στο μοντέλο όλες οι διαθέσιμες μεταβλητές, και αφαιρείται από το μοντέλο η μεταβλητή που συμβάλλει λιγότερο σε αυτό. Το μοντέλο αναπροσαρμόζεται χωρίς τη μεταβλητή που αφαιρέθηκε, και επανεξετάζεται μέχρι να βρεθεί η επόμενη μεταβλητή που συμβάλλει λιγότερο. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι η αφαίρεση οποιασδήποτε μεταβλητής να είναι στατιστικά σημαντική (Yan & Su, 2009).

Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στους Πίνακες 7.8-7.11, επιβεβαιώνεται ότι οι συσχετίσεις μεταξύ των ιδιοτήτων των αδρανών και των κονιαμάτων είναι ισχυρότερες, σε σχέση με τις αντίστοιχες συσχετίσεις των σκυροδεμάτων. Στον Πίνακα 7.8 παρουσιάζονται δύο μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Για κάθε μια από τις δύο περιπτώσεις, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι μια από τις βασικές μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων ( $f_{cf}$  και  $E_{mod}$ ) στις 28 ημέρες. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν αρχικά χρησιμοποιηθεί είναι οι έξι ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD).

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 7.8: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων στις 28 ημέρες ( $f_{cf}$  = αντοχή σε κάμψη και  $E_{mod}$  = στατικό μέτρο ελαστικότητας). Όπου: F: σημαντικότητα, p-value: τιμή σημαντικότητας, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης,  $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού.

	$f_{cf}$ (MPa)		$E_{mod}$ (GPa)	
	b	p	b	p
SE (%)				
MB (g/kg)	-0,452	0,002	-1,072	0,009
WA (%)				
MS (%)	-0,026	0,015		
SS (%)				
MD (%)			-0,182	0,007
F	7,495		7,691	
p-value	0,008		0,009	
$R^2$	0,714		0,606	

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.8, προκύπτει ότι οι μεταβλητές MB (g/kg) ( $b = -0,452$ ,  $p = 0,002 < 0,01$ ) και MS (%) ( $b = -0,026$ ,  $p = 0,015 < 0,05$ ) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή καμπτική αντοχή  $f_{cf}$  στις 28 ημέρες. Και οι δύο αυτές ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται αρνητικά με την  $f_{cf}$  στις 28 ημέρες. Το 71,4% της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής  $f_{cf}$  μπορεί να εξηγηθεί από το συγκεκριμένο μοντέλο.

Οι μεταβλητές MD (%) ( $b = -0,182$ ,  $p = 0,007 < 0,01$ ) και MB (g/kg) ( $b = -1,072$ ,  $p = 0,009 < 0,01$ ) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή στατικό μέτρο ελαστικότητας  $E_{mod}$  στις 28 ημέρες. Οι δύο αυτές ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται αρνητικά με το  $E_{mod}$  στις 28 ημέρες και μπορούν να εξηγήσουν το 60,6% της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής  $E_{mod}$  στις 28 ημέρες.

Οι εξαρτημένες μεταβλητές αντοχή σε θλίψη  $f_c$  και αντοχή σε εφελκυσμό  $f_{ct}$  των σκυροδεμάτων δεν μπορούν να εξηγηθούν και να προβλεφθούν από καμιά ανεξάρτητη μεταβλητή στις 28 ημέρες.

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Στον Πίνακα 7.9 παρουσιάζονται άλλα δύο μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Για κάθε μια από αυτές τις περιπτώσεις, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι μια από τις φυσικές ιδιότητες ( $f_0$  και  $S$ ) των σκυροδεμάτων που εξετάστηκαν στις 28 ημέρες. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν αρχικά χρησιμοποιηθεί είναι και πάλι οι έξι ιδιότητες των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν ( $SE$ ,  $MB$ ,  $WA$ ,  $MS$ ,  $SS$  και  $MD$ ).

**Πίνακας 7.9: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών ( $SE$ ,  $MB$ ,  $WA$ ,  $MS$ ,  $SS$  και  $MD$ ), για κάθε μια από τις φυσικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων στις 28 ημέρες ( $f_0$  = πορώδες και  $S$  = τριχοειδής απορροφητικότητα). Όπου:  $F$ : σημαντικότητα,  $b$ : μερικός συντελεστής παλινδρόμησης,  $p$ -value: τιμή σημαντικότητας,  $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού.**

	$f_0$ (%)		$S$ (mm/min <sup>1/2</sup> )	
	$b$	$p$	$b$	$p$
<b>SE (%)</b>				
<b>MB (g/kg)</b>				
<b>WA (%)</b>	-0,589	0,018		
<b>MS (%)</b>				
<b>SS (%)</b>			0,003	0,001
<b>MD (%)</b>	0,126	0,001		
<b>F</b>	13,550		11,339	
<b>p-value</b>	0,001		0,006	
<b>R<sup>2</sup></b>	0,730		0,508	

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.9, φαίνεται ότι οι μεταβλητές  $MD$  (%) ( $b = 0,126$ ,  $p = 0,001 < 0,01$ ) και  $WA$  (%) ( $b = -0,589$ ,  $p = 0,018 < 0,05$ ) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή πορώδες ( $f_0$ ) στις 28 ημέρες. Παρόλα αυτά, παρατηρείται αρνητική συσχέτιση της απορροφητικότητας των αδρανών με το πορώδες του σκυροδέματος. Αυτό είναι παράδοξο και μάλλον παραπέμπει σε εσφαλμένες πειραματικές μετρήσεις πορώδους σκυροδέματος, όπως προαναφέρθηκε. Επίσης, μπορεί να οφείλεται στο μικρό δείγμα αποτελεσμάτων που εξετάζεται.

Η μεταβλητή  $SS$  (%) ( $b = 0,003$ ,  $p = 0,001 < 0,01$ ) είναι στατιστικά σημαντική στο να εξηγήσει και να προβλέψει την εξαρτημένη μεταβλητή τριχοειδής απορροφητικότητα ( $S$ ) στις 28 ημέρες. Η συγκεκριμένη ιδιότητα των αδρανών σχετίζεται θετικά με την  $S$  στις 28

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

ημέρες, και μπορεί να εξηγήσει το 50,8% της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής S στις 28 ημέρες.

Η εξαρτημένη μεταβλητή διαπερατότητα K στις 28 ημέρες δεν μπορεί να εξηγηθεί και να προβλεφθεί από καμιά ανεξάρτητη μεταβλητή, παρά το γεγονός ότι στην ενότητα 7.1.1 αναφέρθηκαν ενδείξεις της επίδρασης της ποιότητας των αδρανών στη συγκεκριμένη ιδιότητα των σκυροδεμάτων. Το ίδιο ισχύει και για την εξαρτημένη μεταβλητή πυκνότητα  $\rho_b$ .

Στον Πίνακα 7.10 παρουσιάζονται τέσσερα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Για κάθε μια από τις τέσσερις περιπτώσεις που εξετάζονται, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι μια από τις μηχανικές ιδιότητες ( $f_c$ ,  $f_{cf}$ ,  $E_{mod}$  και  $E_{dyn}$ ) των κονιαμάτων που εξετάστηκαν στις 28 ημέρες. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν αρχικά χρησιμοποιηθεί είναι και πάλι οι έξι ιδιότητες των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν (SE, MB, WA, MS, SS και MD).

**Πίνακας 7.10: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις μηχανικές ιδιότητες των κονιαμάτων στις 28 ημέρες ( $f_c$  = αντοχή σε θλίψη,  $f_{cf}$  = αντοχή σε κάμψη,  $E_{mod}$  = στατικό μέτρο ελαστικότητας,  $E_{dyn}$  = δυναμικό μέτρο ελαστικότητας). Όπου: F: σημαντικότητα, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης, p-value: τιμή σημαντικότητας,  $R^2$ : συντελεστής προσδιορισμού.**

	$f_c$ (MPa)		$f_{cf}$ (MPa)		$E_{mod}$ (GPa)		$E_{dyn}$ (GPa)	
	b	p	b	p	b	p	b	p
SE (%)								
MB (g/kg)	-4,085	0,001	-0,507	0,005	-2,874	0,002	-1,737	0,010
WA (%)			-0,546	0,008			-1,846	0,016
MS (%)	-0,147	0,037						
SS (%)								
MD (%)								
F	11,255		19,115		15,924		14,189	
p-value	0,001		0,000		0,002		0,001	
$R^2$	0,634		0,746		0,551		0,703	

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.10, προκύπτει ότι οι μεταβλητές MB (%) (b = -4,085, p = 0,001<0,01) και MS (%) (b = -0,147, p = 0,037<0,05) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή θλιπτική

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

αντοχή ( $f_c$ ) στις 28 ημέρες. Και οι δύο αυτές ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται αρνητικά με την  $f_c$  στις 28 ημέρες. Επιπλέον, το 63,4% της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής  $f_c$  μπορεί να εξηγηθεί από τις δύο συγκεκριμένες μεταβλητές.

Οι μεταβλητές MB (g/kg) ( $b = -0,507$ ,  $p = 0,005 < 0,01$ ) και WA (%) ( $b = -0,546$ ,  $p = 0,008 < 0,01$ ) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή καμπτική αντοχή  $f_{cf}$  στις 28 ημέρες. Και οι δύο αυτές ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται αρνητικά με την  $f_{cf}$  στις 28 ημέρες. Το 74,6% της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής  $f_{cf}$  μπορεί να εξηγηθεί από το συγκεκριμένο μοντέλο.

Η μεταβλητή MB (g/kg) ( $b = -2,874$ ,  $p = 0,002 < 0,01$ ) είναι στατιστικά σημαντική στο να εξηγήσει και να προβλέψει την εξαρτημένη μεταβλητή στατικό μέτρο ελαστικότητας  $E_{mod}$  στις 28 ημέρες. Η ιδιότητα αυτή των αδρανών υλικών σχετίζεται αρνητικά με το  $E_{mod}$  στις 28 ημέρες και μπορεί να εξηγήσει το 55,1% της συνολικής διακύμανσης του.

Τέλος, οι μεταβλητές MB (g/kg) ( $b = -1,737$ ,  $p = 0,010 < 0,05$ ) και WA (%) ( $r = -1,846$   $p = 0,016 < 0,05$ ) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή δυναμικό μέτρο ελαστικότητας  $E_{dyn}$  στις 28 ημέρες. Οι δύο αυτές ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται αρνητικά με το  $E_{dyn}$  στις 28 ημέρες και μπορούν να εξηγήσουν το 70,3% της συνολικής διακύμανσής του.

Στα επόμενα τέσσερα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.11, η εξαρτημένη μεταβλητή είναι μια από τις φυσικές ιδιότητες ( $f_o$ , S,  $\rho_b$  και K) των κονιαμάτων που εξετάστηκαν στις 28 ημέρες. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές που έχουν αρχικά χρησιμοποιηθεί παραμένουν οι έξι ιδιότητες των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν (SE, MB, WA, MS, SS και MD).

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Πίνακας 7.11: Μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης (μέθοδος Backward Elimination), με ανεξάρτητες μεταβλητές τις ιδιότητες των αδρανών υλικών (SE, MB, WA, MS, SS και MD), για κάθε μια από τις φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων στις 28 ημέρες ( $f_0$  = πορώδες, S = τριχοειδής απορροφητικότητα,  $\rho_b$  = φαινόμενη πυκνότητα, K = διαπερατότητα). Όπου: F: σημαντικότητα, b: μερικός συντελεστής παλινδρόμησης, p-value: τιμή σημαντικότητας, R<sup>2</sup>: συντελεστής προσδιορισμού.

	$f_0$ (%)		S (mm/min <sup>1/2</sup> )		$\rho_b$ (kg/m <sup>3</sup> )		K (mm/min)	
	b	p	b	p	b	p	b	p
SE (%)							-6,44E-09	0,000
MB (g/kg)	2,548	0,000	0,081	0,000	-40,645	0,007		
WA (%)								
MS (%)	0,107	0,002	0,002	0,042				
SS (%)								
MD (%)					-8,526	0,001		
F	22,763		23,091		10,332		3,51E+01	
p-value	0,000		0,000		0,002		0,00	
R <sup>2</sup>	0,778		0,780		0,614		0,745	

Με βάση τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.11, προκύπτει ότι οι μεταβλητές MB (g/kg) (b = 2,548, p = 0,000<0,01) και MS (%) (b = 0,107, p = 0,002<0,01) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την εξαρτημένη μεταβλητή πορώδες ( $f_0$ ) στις 28 ημέρες. Και οι δύο αυτές ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται θετικά με το  $f_0$  στις 28 ημέρες, και μπορούν να εξηγήσουν το 77,8% της συνολικής διακύμανσης της συγκεκριμένης μεταβλητής.

Οι μεταβλητές MB (g/kg) (b = 0,081, p = 0,000<0,01) και MS (%) (b = 0,002, p = 0,042<0,05) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την μεταβλητή τριχοειδής απορροφητικότητα S στις 28 ημέρες. Οι δύο συγκεκριμένες ιδιότητες των αδρανών υλικών σχετίζονται θετικά με την S στις 28 ημέρες, και μπορούν να εξηγήσουν το 78% της συνολικής διακύμανσης της άνωθεν μεταβλητής S.

Οι μεταβλητές MB (g/kg) (b = -40,645, p = 0,007<0,01) και MD (%) (b = -8,526, p = 0,001<0,01) είναι στατιστικά σημαντικές στο να εξηγήσουν και να προβλέψουν την πυκνότητα  $\rho_b$  στις 28 ημέρες. Οι δύο αυτές ιδιότητες σχετίζονται αρνητικά με την  $\rho_b$  στις 28 ημέρες, και μπορούν να εξηγήσουν το 61,4% της συνολικής διακύμανσης της πιο πάνω μεταβλητής.

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Τέλος, η μεταβλητή SE (%) ( $b = -6,44E-09$ ,  $p = 0,000 < 0,01$ ) είναι στατιστικά σημαντική στο να εξηγήσει και να προβλέψει την εξαρτημένη μεταβλητή διαπερατότητα K στις 28 ημέρες. Για την ακρίβεια, η συγκεκριμένη ιδιότητα των αδρανών υλικών μπορεί να εξηγήσει το 74,5 % της συνολικής διακύμανσης της μεταβλητής K στις 28 ημέρες. Το πιο πάνω συμπέρασμα ταυτίζεται απόλυτα με τις επισημάνσεις που έγιναν στην ενότητα 7.3.1.

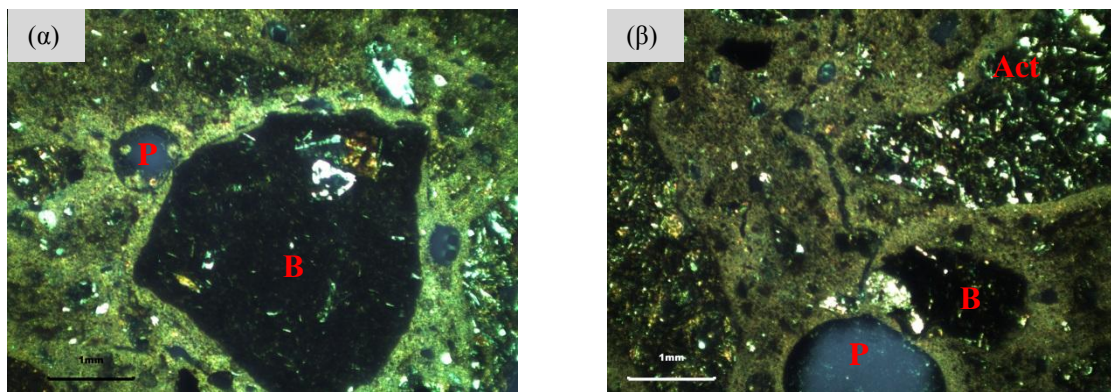
### **7.4 Χρήση αναλυτικών τεχνικών για τον χαρακτηρισμό κονιαμάτων**

Όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5 (παράγραφο 5.4.2.13), πραγματοποιήθηκαν πετρογραφικές αναλύσεις με την χρήση πολωτικού μικροσκοπίου και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης σε συγκεκριμένα δείγματα κονιαμάτων, τα οποία επιλέχθηκαν κυρίως με βάση την θλιπτική τους αντοχή. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων.

#### **7.4.1 Πολωτικό μικροσκόπιο**

Για την εξέταση στο πολωτικό μικροσκόπιο ετοιμάστηκαν 7 λεπτές τομές από κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή, 4 λεπτές τομές από κονιάματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή και 1 λεπτή τομή από κονίαμα που παρασκευάστηκε με ασβεσταρενιτικά αδρανή.

Μέσα από την παρατήρηση αυτών των λεπτών τομών στο πετρογραφικό μικροσκόπιο, επεξηγούνται κάποια από τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά τους ελέγχους τόσο των αδρανών, όσο και των κονιαμάτων. Για παράδειγμα, παρατηρώντας τη λεπτή τομή του κονιάματος CM1 (Εικόνα 7.4), το οποίο παρασκευάστηκε με το διαβασικό αδρανές ΕΠ38, εντοπίζονται αρκετά βασαλτικά τεμάχια.



**Εικόνα 7.4: Κονίαμα CM1: (α) βασαλτικά τεμάχια, (β) έντονα εξαλλοιωμένα αδρανή (B: βασάλτης, P: πόροι, Act: ακτινόλιθος). Κάθετα nicols.**

Κατά γενική ομολογία, οι βασάλτες, αναλόγως της γεωλογικής προέλευσης και του βαθμού αποσάθρωσης, μπορεί να εμφανίζονται με διαφορετικές δομές, από εξαιρετικά πορώδεις έως αδιαπέρατοι (Szymoniak, 1986; Brandes & Robinson, 2006). Η ορυκτολογία και η δομή αυτών των ηφαιστειακών πετρωμάτων ποικίλει αναλόγως της ψύξης και της χημικής τους σύνθεσης. Επομένως, οι φυσικές και οι μηχανικές τους ιδιότητες επίσης ποικίλουν. Σε αρκετές περιπτώσεις, οι βασάλτες έχουν ψηλό πορώδες, και κατά συνέπεια είναι επιδεκτικοί σε αποσάθρωση. Η αντοχή, η ανθεκτικότητα και οι υπόλοιπες ιδιότητες των βασαλτών υποβαθμίζονται σημαντικά με την πρόοδο της αποσάθρωσής τους (Haraldsson, 1984).

Όπως αναφέρουν οι Asi et al. (2009), υπάρχουν ερευνητές (Wu et al., 1998) που υποστηρίζουν ότι οι βασάλτες ως αδρανή έχουν πολύ περιορισμένη απόδοση. Αντίθετα, άλλοι ερευνητές (Al-Shweily, 2002) υποστηρίζουν ότι οι βασάλτες παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση στο τελικό προϊόν, σε σχέση με άλλους τύπους αδρανών. Είναι επομένως εμφανές ότι οι όποιες διαφορές στην ορυκτολογία και στη δομή των βασαλτών επηρεάζουν τις φυσικο-μηχανικές τους ιδιότητες, και κατά συνέπεια την απόδοση του τελικού προϊόντος (Korkanc & Tugrul, 2004).

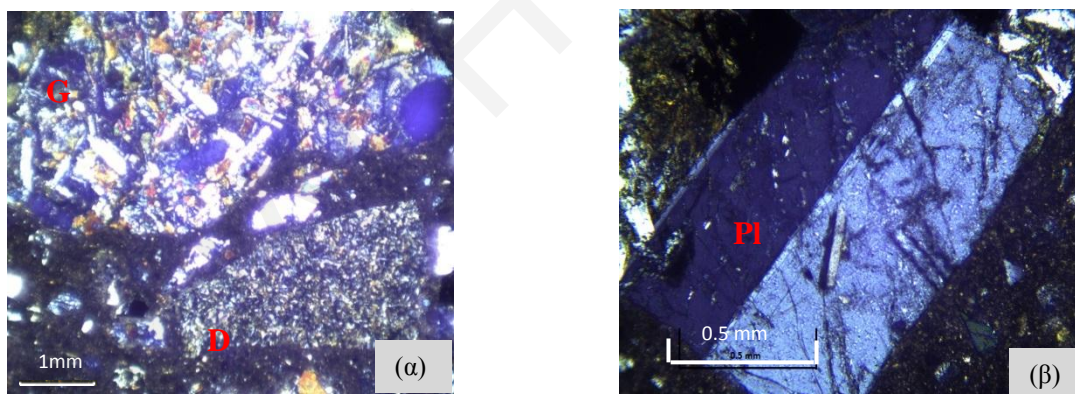
Στη συγκεκριμένη περίπτωση που εξετάζεται (κονίαμα CM1), οι βασάλτες που παρουσιάζονται σε αφθονία στο αδρανές ΕΠ38, φαίνεται να επηρεάζουν σημαντικά τις φυσικο-μηχανικές ιδιότητές του. Όπως σημειώνεται στον Πίνακα 6.2, το δείγμα ΕΠ38 παρουσιάζει τη χειρότερη απόδοση σε σχέση με τα υπόλοιπα διαβαστικά δείγματα αδρανών που ελέγχθηκαν. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να επηρεάζεται και το τελικό προϊόν, δηλαδή το κονίαμα CM1. Επίσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.4 (β), τα διαβαστικά τεμάχια που εντοπίζονται στο κονίαμα είναι έντονα εξαλλοιωμένα, αφού οι περισσότεροι πυρόξενοι



### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

έχουν εξαλλοιωθεί σε ακτινόλιθο. Από τη λεπτή τομή, παρατηρείται επίσης μεγάλη ιστολογική ανομοιογένεια μεταξύ του μεγέθους των κόκκων των ορυκτών. Συγκεκριμένα, εντοπίζονται τόσο χονδρόκοκκα, όσο και λεπτόκοκκα ορυκτά. Όλοι οι πιο πάνω λόγοι συμβάλουν στην κακή απόδοση του αδρανούς, και κατά συνέπεια του κονιάματος.

Παρατηρώντας τη λεπτή τομή από το κονίαμα CM2 (Εικόνα 7.5), το οποίο ετοιμάστηκε με το διαβασικό αδρανές ΕΠ12, προκύπτει ότι τα αδρανή είναι πολύ λιγότερο εξαλλοιωμένα (σε σχέση με το κονίαμα CM1). Γι' αυτό, το συγκεκριμένο κονίαμα παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με το κονίαμα CM1. Τα ορυκτά στη συγκεκριμένη λεπτή τομή εμφανίζονται πιο υγιή, όπως για παράδειγμα το πλαγιόκλαστο (ανορθίτης) που παρατηρείται στην Εικόνα 7.5 (β). Επιπλέον, δεν παρατηρούνται βασαλτικά τεμάχια, αλλά γαββρικά και διαβασικά, που είναι μεσόκοκκα και λεπτόκοκκα υλικά αντίστοιχα (Εικόνα 7.5 (α)). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην παρατηρείται ανομοιογένεια στην κατανομή των κόκκων των ορυκτών, όπως στην περίπτωση του κονιάματος CM1 όπου παρατηρήθηκαν και χονδρόκοκκα βασαλτικά τεμάχια. Έτσι, το υλικό παρουσιάζεται ιστολογικά πιο ομοιόμορφο. Ως εκ τούτου, παρατηρούνται καλύτερες ιδιότητες στο αδρανές, και κατά συνέπεια στο κονίαμα.

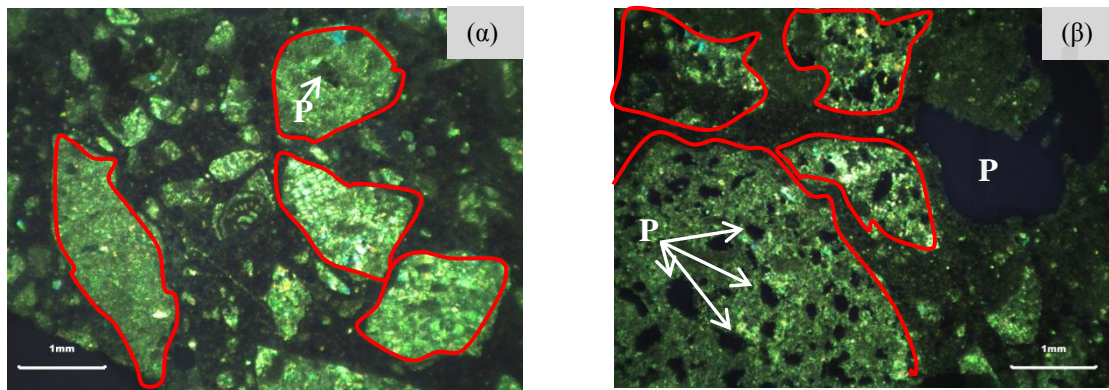


**Εικόνα 7.5: Κονίαμα CM2: (α) γαββρικά και διαβασικά τεμάχια, (β) υγιές πλαγιόκλαστο (G: γάββρος, D: διαβάσης, Pl: πλαγιόκλαστο). Κάθετα nicols.**

Στην Εικόνα 7.6 παρουσιάζονται οι λεπτές τομές από τα κονιάματα CM4 και CM5, που παρασκευάστηκαν με τα ασβεστολιθικά αδρανή ΕΠ14 και ΕΠ4 αντίστοιχα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.6 (β), οι κόκκοι του αδρανούς ΕΠ4 παρουσιάζουν πολύ μεγαλύτερο πορώδες, σε σχέση με τους κόκκους του αδρανούς ΕΠ14 (Εικόνα 7.6 (α)). Αυτό τεκμηριώνει τα αποτελέσματα της απορροφητικότητας σε νερό που παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.2. Το αδρανές ΕΠ4 παρουσίασε απορροφητικότητα 3%, ενώ το αδρανές ΕΠ14 1%. Επιπλέον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.6 (α), η κατανομή των κόκκων του αδρανούς

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

ΕΠ14 είναι πιο ομοιόμορφη, σε σχέση με τους κόκκους του αδρανούς ΕΠ4 (Εικόνα 7.6 (β)). Τα πιο πάνω επηρεάζουν τις ιδιότητες των κονιαμάτων. Γι' αυτό, το κονίαμα CM4 εμφανίζει καλύτερες φυσικο-μηχανικές ιδιότητες από ότι το κονίαμα CM5 (Πίνακας 7.5 και Πίνακας 7.6).



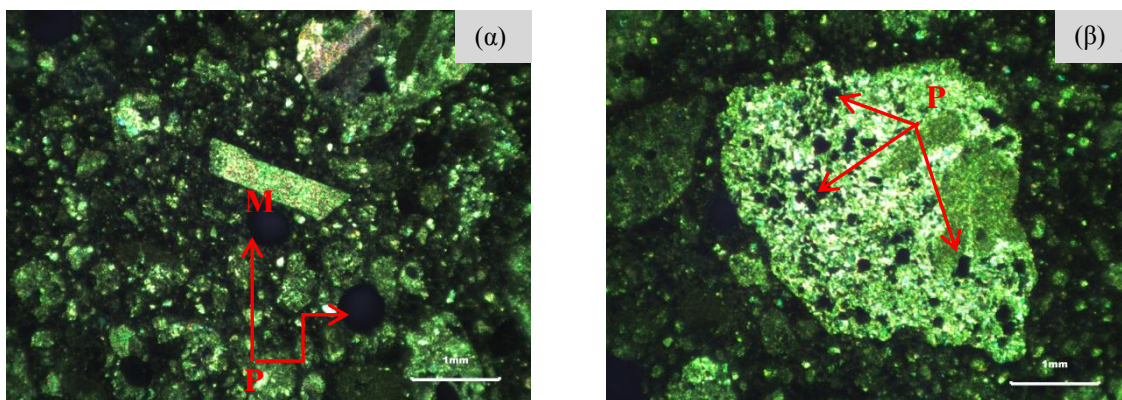
**Εικόνα 7.6: (α) Κονίαμα CM4, (β) Κονίαμα CM5 (P: πόροι, το κόκκινο περίγραμμα παρουσιάζει τα όρια των κόκκων του αδρανούς). Κάθετα nicols.**

Αρκετά ψηλό πορώδες παρουσιάζεται και σε κάποιους κόκκους του αδρανούς ΕΠ5 (Εικόνα 7.7 (β)), το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή του κονιαματος CM12. Ωστόσο, αυτό που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο αδρανές είναι η διάσπαρτη παρουσία μοσχοβίτη (Εικόνα 7.7 (α)), που έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη επιδεκτικότητα του αδρανούς σε αποσάθρωση. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από το ψηλό ποσοστό απώλειας υλικού στη δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο (68%) που παρουσίασε το αδρανές ΕΠ5, σε σχέση με τα υπόλοιπα αδρανή που εξετάστηκαν. Όπως αναφέρθηκε και στο 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο, οι μαρμαρυγίες (η ομάδα στην οποία κατατάσσεται ο μοσχοβίτης) παρουσιάζουν αρνητική επίδραση στην ποιότητα των κονιαμάτων, αφού αυξάνουν τις απαιτήσεις σε νερό, με επακόλουθο τη μείωση της θλιπτικής αντοχής του τελικού προϊόντος (Dewar, 1963; Leemann & Holzer, 2001).

Οι Tugrul et al. (2015), σε κονιάματα που παρασκεύασαν με την προσθήκη άμμου πλούσιας σε μαρμαρυγίες (σε ποσοστό 20%), παρατήρησαν χαμηλές αντοχές. Αυτό, όπως αναφέρουν, οφείλεται στο σχήμα των μαρμαρυγιών, καθώς και στην ελαττωματική δομή της διεπιφάνειας μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των μαρμαρυγιών. Η διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη που περιβάλλει τον μοσχοβίτη που εμφανίζεται στην Εικόνα 7.7 (α) επιβεβαιώνει την πιο πάνω παρατήρηση, αφού είναι ιδιαίτερα πορώδης. Σημειώνεται ότι οι μαρμαρυγίες ανήκουν στα φυλλοφυριτικά ορυκτά και στην ουσία αποτελούνται από πολυεπίπεδα εξαγωνικά φύλλα με μεγάλη ειδική επιφάνεια. Το διάφορα επίπεδα των

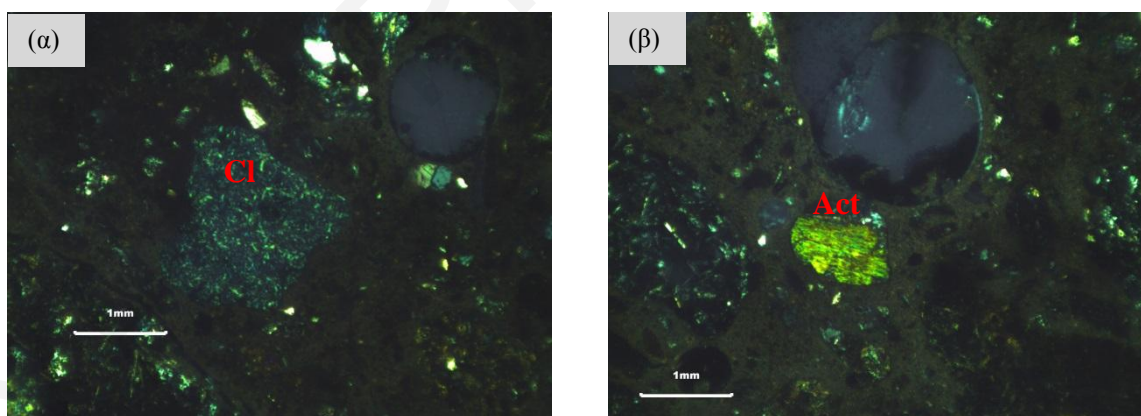
### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

μαρμαρυγιών, με απορρόφηση νερού μπορεί να διασταλούν, καθώς το νερό γεμίζει τα κενά των παράλληλων στρωμάτων, προκαλώντας διόγκωση. Αυτή η διόγκωση επηρεάζει τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος (Kondelchuk & Miskovsky, 2009).



**Εικόνα 7.7: Κονίαμα CM12: (α) παρουσία μοσχοβίτη, (β) πορώδεις αδρανές (M: μοσχοβίτης, P: πόροι). Κάθετα nicols.**

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.8, το διαβασικό αδρανές ΕΠ13 που χρησιμοποιήθηκε στο κονίαμα CM3 είναι μέτρια εξαλλοιωμένο, σε σχέση με το αδρανές ΕΠ38, επίσης, στο συγκεκριμένο αδρανές δεν φαίνεται να υπάρχουν βασαλτικά τεμάχια. Αυτοί είναι πιθανότατα οι λόγοι για τους οποίους το κονίαμα CM3 παρουσιάζει καλύτερες ιδιότητες σε σχέση με το κονίαμα CM1.



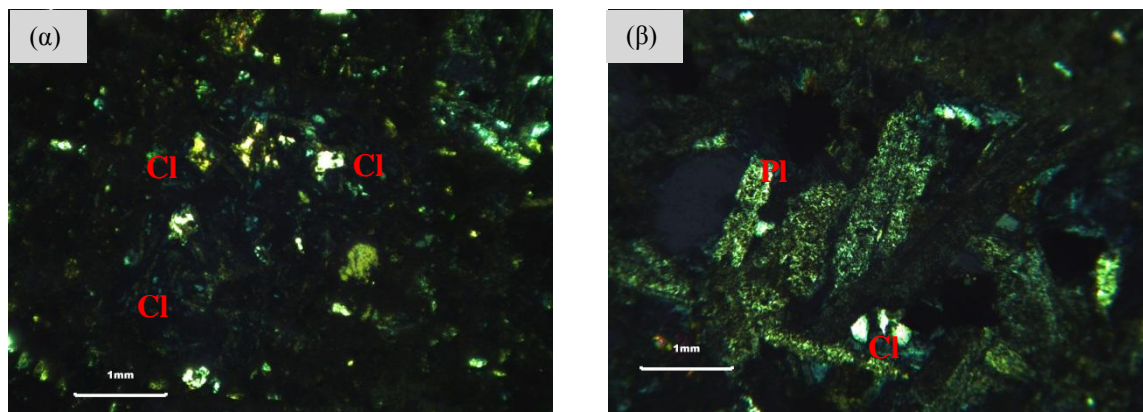
**Εικόνα 7.8: Κονίαμα CM3: (α) παρουσία χλωρίτη, (β) παρουσία ακτινόλιθου (Cl: χλωρίτης, Act: ακτινόλιθος). Κάθετα nicols.**

Στην Εικόνα 7.9 (α) φαίνεται ότι το διαβασικό αδρανές ΕΠ7 έχει υψηλή περιεκτικότητα σε χλωρίτη. Παρόλα αυτά, ο χλωρίτης στο συγκεκριμένο αδρανές είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος. Όταν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένες οι ορυκτές φάσεις στο χώρο, συμβάλουν στην αύξηση της αντοχής των πετρωμάτων (Ρηγόπουλος, 2009). Γι' αυτό το



## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

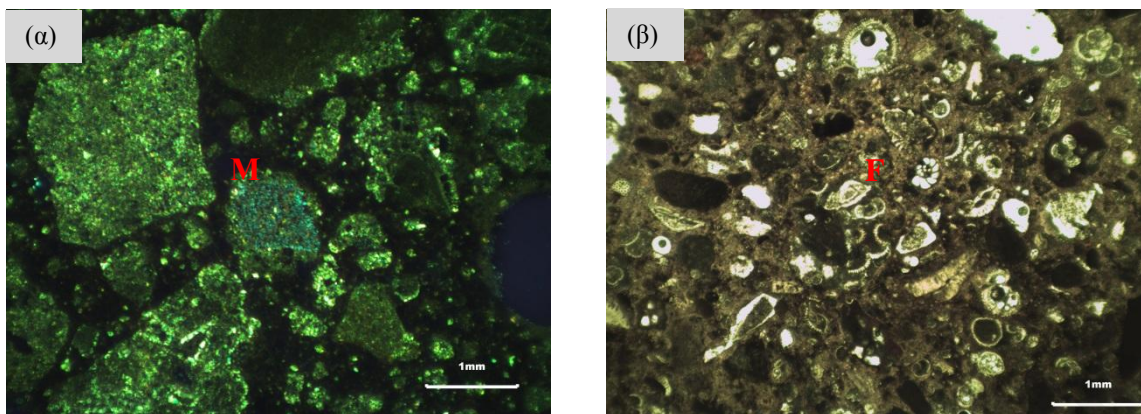
λόγο ενδεχομένως ο συντελεστής Micro-Deval του αδρανούς ΕΠ7 είναι σχετικά χαμηλός (MD=17,6%).



Εικόνα 7.9: (α) Κονίαμα CM7: (β) Κονίαμα CM9 (Cl: χλωρίτης, Pl: πλαγιόκλαστο). Κάθετα nicols.

Από τις λεπτές τομές του κονιάματος CM9 (Εικόνα 7.9 (β)), επίσης προκύπτει περίσσεια χλωρίτη στο δείγμα αδρανούς ΕΠ27, κάτι που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα των ορυκτολογικών αναλύσεων (Πίνακας 6.3). Όπως φαίνεται στην Εικόνα 7.9 (β), τα πλαγιόκλαστα στο αδρανές έχουν εξαλλοιωθεί και αντικατασταθεί κυρίως από χλωρίτη. Ο πολύ χαμηλός συντελεστής ισοδύναμου άμμου (βλ. Πίνακα 6.2) στο αδρανές ΕΠ27 επιβεβαιώνει την παρουσία χλωρίτη στο δείγμα. Οι πιο πάνω λόγοι επηρεάζουν και τις φυσικομηχανικές ιδιότητες του κονιάματος CM9.

Στην Εικόνα 7.10 (α), όπου παρουσιάζεται το κονίαμα CM15 που παρασκευάστηκε με το ασβεστολιθικό αδρανές ΕΠ35, φαίνεται η παρουσία σερικιτιωμένου μοσχοβίτη. Επίσης, φαίνεται ότι στα συγκεκριμένα αδρανή δεν παρουσιάζεται ιδιαίτερο πορώδες, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της δοκιμής απορροφητικότητας σε νερό του δείγματος ΕΠ35 (βλ. Πίνακα 6.2).



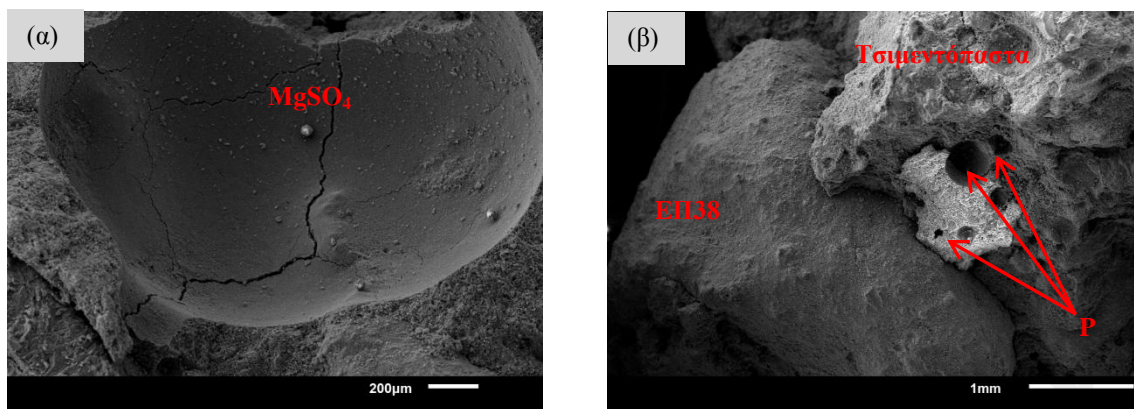
**Εικόνα 7.10:** (α) Κονίαμα CM15, κάθετα nicols, (β) Κονίαμα CM16, παράλληλα nicols (M: μοσχοβίτης, F: απολίθωμα (τρηματοφόρα)).

Όσον αφορά στο κονίαμα CM16 (Εικόνα 7.10 (β)), φαίνεται ότι το αδρανές ΕΠ32 περιέχει πολύ μεγάλη ποσότητα απολιθωμάτων (τρηματοφόρα) με πολύ λιγότερο συνδετικό υλικό. Η διαγένεση του συγκεκριμένου αδρανούς, δηλαδή η συνοχή του μητρικού πετρώματος, φαίνεται ότι είναι στα αρχικά της στάδια. Αυτό επηρεάζει τη συνεκτικότητά του αδρανούς και κατ' επέκταση την αντοχή του (Pettijohn et al., 1987).

Από τα πιο πάνω, είναι εμφανές ότι τα ορυκτολογικά και ιστολογικά χαρακτηριστικά των αδρανών είναι βασικές παράμετροι για την κατανόηση της απόδοσης σύνθετων δομικών υλικών, όπως στην προκειμένη περίπτωση τα κονιάματα. Παρόλα αυτά, αν και η πετρογραφική ανάλυση είναι εξαιρετικό εργαλείο για την ερμηνεία της απόδοσης των αδρανών υλικών, εντούτοις θα πρέπει να χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με τις άλλες δοκιμές χαρακτηρισμού των αδρανών (Williams et al., 2005).

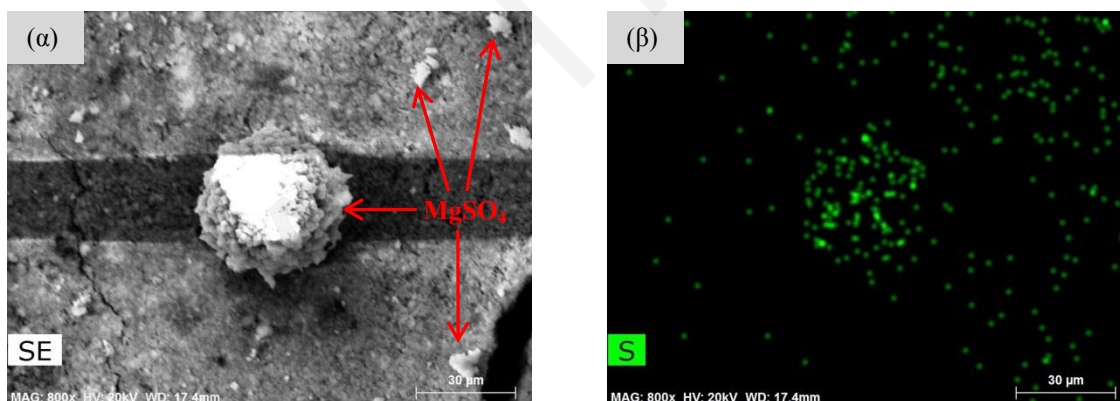
#### 7.4.2 Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Όσον αφορά την εξέταση στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ετοιμάστηκαν 3 δείγματα από κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή και 3 δείγματα από κονιάματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή και 1 δείγμα που παρασκευάστηκε με ασβεσταρενιτικά αδρανή. Όλα τα κονιάματα που εξετάστηκαν (εκτός από το CM12) υποβλήθηκαν αρχικά σε δοκιμή κρυστάλλωσης αλάτων.



Εικόνα 7.11: Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI), όπου φαίνεται το κονίαμα CM1. (α) παρουσία θεικών αλάτων ( $MgSO_4$ ) και ρωγμών και (β) διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών (ΕΠ38) και τσιμεντόπαστας (P: πόροι).

Στην Εικόνα 7.11 παρουσιάζεται το κονίαμα CM1 που παρασκευάστηκε με το διαβασικό αδρανές ΕΠ38. Στην Εικόνα 7.11 (α) φαίνεται κοιλότητα στην οποία προϋπήρχε κόκκος αδρανούς, όπου ταυτοποιήθηκε με φασματομέτρο διασποράς ενέργειας ακτινών-X (EDX) η παρουσία θεικών αλάτων (Εικόνα 7.12), που παρέμειναν στη μάζα του κονιάματος παρά το γεγονός ότι αυτό πλύθηκε αρκετά καλά μετά την ολοκλήρωση της δοκιμής.



Εικόνα 7.12: Εικόνα δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI) όπου φαίνεται το κονίαμα CM1. (α) παρουσία θεικών αλάτων ( $MgSO_4$ ) και (β) εικόνα EDX με ανίχνευση θείου (S).

Αυτό εξηγεί την αύξηση στη μάζα συγκεκριμένων κονιαμάτων (π.χ. CM1, CM3 και CM5) που παρατηρήθηκε μετά το πέρας της δοκιμής κρυστάλλωσης αλάτων (Πίνακας 7.12), παρά το γεγονός ότι τα συγκεκριμένα κονιάματα παρουσίασαν ταυτόχρονα και εμφανή σημάδια διάβρωσης (βλ. Εικόνα 7.2-7.3). Η κατακράτηση ποσότητας άλατος στους πόρους ενός κονιάματος, οφείλεται στη μεγαλύτερη ποσότητας διαλύματος άλατος που απορροφήθηκε σε αυτό κατά τη διάρκεια της δοκιμής κρυστάλλωσης αλάτων, λόγω και του πολύ υψηλού πορώδους του (>30%). Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα αναδεικνύει μια

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

από τις αδυναμίες της δοκιμής κρυστάλλωσης αλάτων με πλήρη εμβάπτιση. Η εν λόγω δοκιμή αμφισβητείται από πολλούς ερευνητές (Theodoridou et al., 2016) και αναμένεται σύντομα να τροποποιηθεί μέσα από τις διεργασίες διεθνών επιτροπών στις οποίες εκπροσωπείται το Εργαστήριο Δομικών Υλικών του Πανεπιστημίου Κύπρου (π.χ. Rilem TC-ASC).

**Πίνακας 7.12: Αποτελέσματα δοκιμής αντίστασης σε κρυστάλλωση αλάτων. Οι αρνητικές τιμές υποδεικνύουν αύξηση μάζας.**

Κωδικός Δειγμάτων	Απώλεια Μάζας (%) ανά δοκίμιο						Μέσος Όρος	Τυπική Απόκλιση
	1	2	3	4	5	6		
<b>CM1</b>	-2,03	-1,94	-1,86	-2,14	-1,47	-1,86	<b>-1,88</b>	0,23
<b>CM2</b>	0,05	0,16	0,09	0,17	0,02	0,32	<b>0,13</b>	0,11
<b>CM3</b>	-0,85	-0,87	-0,85	-0,70	-1,02	-0,87	<b>-0,86</b>	0,10
<b>CM4</b>	0,28	0,10	0,23	0,15	0,12	0,22	<b>0,18</b>	0,07
<b>CM5</b>	-1,34	-0,31	-0,30	-0,41	-0,36	-0,34	<b>-0,51</b>	0,41
<b>CM6</b>	0,33	0,18	0,21	0,24	0,14	0,54	<b>0,27</b>	0,15

Οι Ruedrich & Siegesmund (2007), σε δοκιμή κρυστάλλωσης σε ψαμμιτικά πετρώματα, επίσης παρατήρησαν αύξηση της μάζας. Όπως αναφέρουν, η ορυκτολογική σύσταση και η δομή του πετρώματος είναι οι κύριες αιτίες που επηρεάζουν τα αποτελέσματα της κρυστάλλωσης των αλάτων, και κατά συνέπεια της κατακράτησης άλατος μέσα στους πόρους. Αυτή η ποσότητα άλατος που συσσωρεύεται στους πόρους των κονιαμάτων, δυνητικά μπορεί να προκαλέσει ουσιαστική απώλεια μάζας σε βάθος χρόνου, όταν οι πόροι θα πληρωθούν και οι τάσεις που θα αναπτυχθούν θα ξεπεράσουν τις εφελκυστικές αντοχές των δειγμάτων.

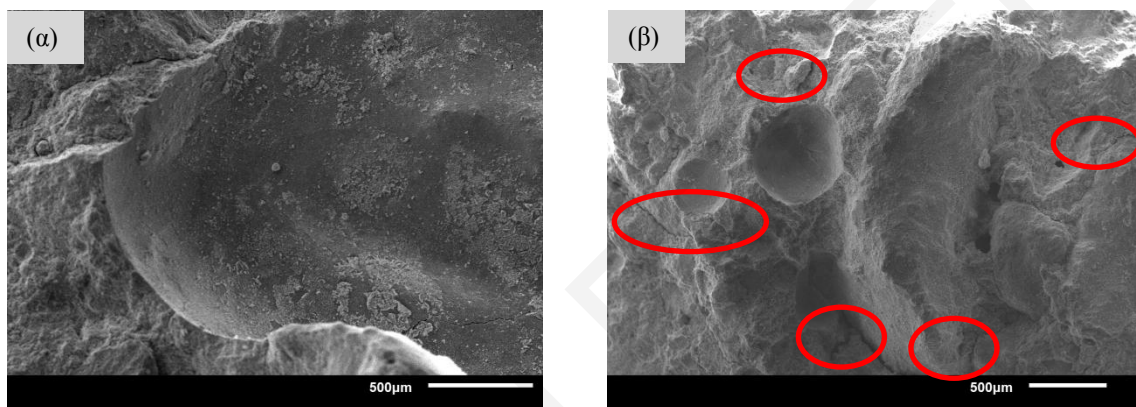
Το γεγονός ότι τα άλατα που εντοπίστηκαν στη μικροδομή του κονιάματος CM1 βρίσκονται στη μεταβατική ζώνη μεταξύ του αδρανούς και της τσιμεντόπαστας (βλ. Εικόνα 7.11 (β)), ενδεχομένως να συνέβαλε στην αποκόλληση του αδρανούς από το κονίαμα, αφού είναι γνωστό (βλ. Κεφάλαιο 2) ότι με την κρυστάλλωσή τους τα άλατα ασκούν πίεση με αποτέλεσμα να επηρεάζεται η ασθενέστερη συνιστώσα των κονιαμάτων που είναι η μεταβατική ζώνη. Αυτό διαπιστώνεται από την έντονη ρηγμάτωση (βλ. Εικόνα 7.11 (α)) που παρατηρήθηκε στη ζώνη αυτή. Στην Εικόνα 7.11 (β), όπου φαίνεται η διεπιφάνεια μεταξύ αδρανούς και τσιμεντόπαστας, είναι εμφανές ότι δεν παρουσιάζεται καλή συγκόλληση. Οι Yilmaz & Tugrul (2012) σημειώνουν ότι οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ ανθρακικών αδρανών και τσιμεντόπαστας βελτιώνουν τη μηχανική σύνδεση των



### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

δύο αυτών συνιστωσών των κονιαμάτων, ενώ τα αδρανή που περιέχουν αργιλικό υλικό (όπως στην προκειμένη περίπτωση το δείγμα ΕΠ38) συνήθως σχηματίζουν ασθενέστερους δεσμούς μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας.

Επιπλέον, στην Εικόνα 7.11 (β) φαίνεται έντονα η παρουσία πόρων στην τσιμεντόπαστα του κονιάματος CM1, γεγονός που επιβεβαιώνει το αρκετά υψηλό πορώδες του συγκεκριμένου κονιάματος (βλ. Πίνακα 7.6). Οι Harutyunyan et al. (2000) αναφέρουν ότι, η μεταβατική ζώνη που χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερο πορώδες σε σχέση με την τσιμεντόπαστα, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ορυκτολογία και την υφή των αδρανών.



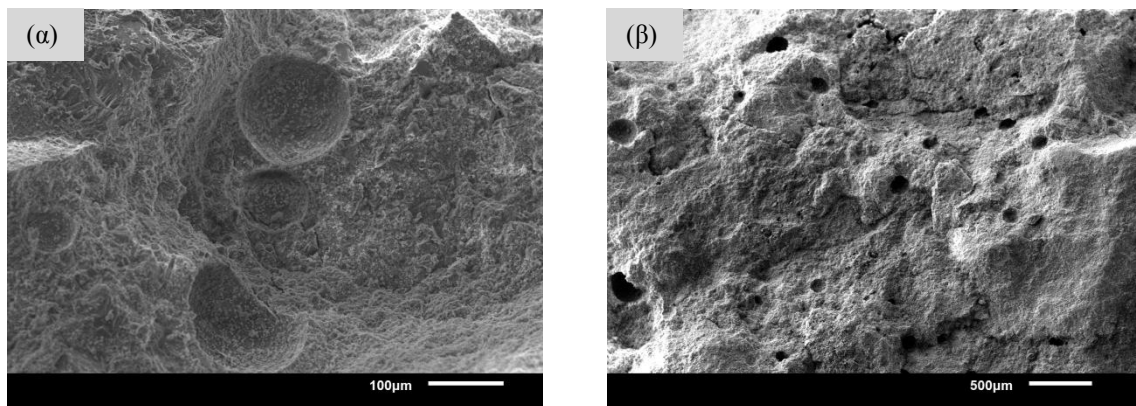
**Εικόνα 7.13:** Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI): (α) κονίαμα CM2 και (β) κονίαμα CM3 (σε κύκλο η παρουσία μικρορωγμών).

Στην Εικόνα 7.13 (α), όπου φαίνεται το κονίαμα CM2 που παρασκευάστηκε με το διαβασικό αδρανές ΕΠ12, είναι εμφανές ότι δεν παρουσιάζεται ουσιαστική ρηγμάτωση στην κοιλότητα που προϋπήρχε αδρανές, όπως παρατηρήθηκε στο κονίαμα CM1. Επίσης, δεν φαίνεται να υπάρχουν πολλοί και μεγάλοι πόροι στην τσιμεντόπαστα, όπως στην περίπτωση του κονιάματος CM1. Αντίθετα, φαίνεται ότι η μικροδομή του κονιάματος CM2 είναι αρκετά ομοιογενής. Στην Εικόνα 7.13 (β), παρατηρείται η παρουσία τριχοειδών ρωγμών στο κονίαμα CM3, ειδικά στις κοιλότητες στις οποίες προϋπήρχαν αδρανή, όπως επίσης και στη διεπιφάνεια μεταξύ της τσιμεντόπαστας και των αδρανών. Επιπλέον, φαίνεται ότι το κονίαμα CM3 είναι περισσότερο πορώδες από ότι το κονίαμα CM2. Ωστόσο, το πορώδες του είναι σημαντικά μικρότερο σε σχέση με το κονίαμα CM1. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί και με τα αποτελέσματα του πορώδους των κονιαμάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.6.



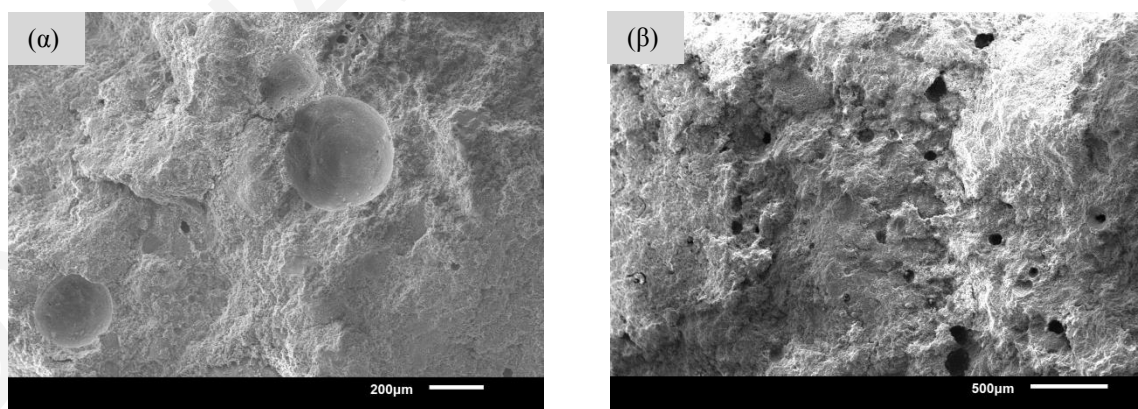
### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Οι Sengul et al. (2002) παρατήρησαν ψηλότερες αντοχές σε σκυροδέματα τα οποία είχαν ισχυρότερη μεταβατική ζώνη μεταξύ αδρανών και τσιμεντόπαστας. Αυτό εξηγεί τις αυξημένες αντοχές κονιαμάτων όπως το δείγμα CM2 στην παρούσα διατριβή.



**Εικόνα 7.14:** Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI): (α) κονίαμα CM4 και (β) κονίαμα CM5.

Όπως φαίνεται από την Εικόνα 7.14 (α), στο κονίαμα CM4 δεν παρατηρούνται ρωγμές ή πόροι στην τσιμεντόπαστα. Για αυτό, το συγκεκριμένο κονίαμα παρουσιάζει μειωμένο πορώδες (Πίνακας 7.6). Γενικά, στο κονίαμα αυτό δεν παρατηρούνται ούτε πολλά σημεία στα οποία να έχει αποκολληθεί το αδρανές από την τσιμεντόπαστα. Σε αντίθεση, στο κονίαμα CM5 (Εικόνα 7.14 (β)) παρατηρούνται ασυνέχειες μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας και αυξημένο πορώδες, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα του Πίνακα 7.6.



**Εικόνα 7.15:** Εικόνες δευτερογενούς εκπομπής ηλεκτρονίων (SEI): (α) κονίαμα CM6 και (β) κονίαμα CM12.

Από την Εικόνα 7.15 (α), φαίνεται ότι το κονίαμα CM6 περιέχει πολύ μικρότερο αριθμό πόρων, σε σχέση με το κονίαμα CM12 (Εικόνα 7.15 (β)). Αυτό επιβεβαιώνεται από τα

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

αποτελέσματα του πορώδους των δύο κονιαμάτων (Πίνακας 7.6). Επιπλέον, στο κονίαμα CM12 εντοπίζονται ασυνέχειες μεταξύ των αδρανών και της τσιμεντόπαστας, όπως και στο κονίαμα CM5 (Εικόνα 7.14 (β)), το οποίο καταγράφει τις ίδιες περίπου αντοχές (Πίνακας 7.5). Σημειώνεται ότι το κονίαμα CM6 που παρασκευάστηκε με το ασβεσταρενιτικό αδρανές ΕΠ32, εμφανίζει χαμηλότερες αντοχές από το κονίαμα CM12 (βλ. Πίνακα 7.5), παρά την απουσία έντονων ασυνεχειών στη μικροδομή του. Αυτό κατά πάσα πιθανότητα οφείλεται στην παρουσία μεγάλης ποσότητας απολιθωμάτων, με χαλαρό συνδετικό υλικό, στο αδρανές ΕΠ32 (βλ. παράγραφο 7.4.1), γεγονός που επηρεάζει τη συνεκτικότητα και κατά συνέπεια την αντοχή του κονιάματος.

Καταληκτικά, αναφέρεται ότι και οι δύο τεχνικές μικροσκοπίου με τις οποίες εξετάστηκαν τα δείγματα κονιαμάτων, αποτελούν εξαιρετικά εργαλεία για την ερμηνεία της απόδοσης των αδρανών υλικών, και κατά συνέπεια της επίδρασης των χαρακτηριστικών τους στα χαρακτηριστικά του κονιάματος. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά με άλλες δοκιμές χαρακτηρισμού αδρανών, για να εξάγονται ασφαλή συμπεράσματα για την ποιότητα των υλικών αυτών.

### **7.5 Συμπεράσματα**

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα σκυροδέματα και στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, προκύπτει ότι η ποιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών, όπως αυτή καθορίζεται από τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες και τα πετρογραφικά τους χαρακτηριστικά, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των ιδιοτήτων του σκληρυμένου τελικού προϊόντος. Ωστόσο, η επίδραση της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών, είναι πιο εμφανής στην περίπτωση των κονιαμάτων, παρά σε αυτή των σκυροδεμάτων, λόγω της παρουσίας χονδρόκοκκων αδρανών και 2<sup>ης</sup> άμμου στα σκυροδέματα, υλικά τα οποία δυνητικά επηρεάζουν με τη σειρά τους το τελικό προϊόν.

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα, τα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με “καλής” ποιότητας αδρανή, παρουσίασαν υψηλότερες τιμές στις μηχανικές ιδιότητες και χαμηλότερες στις φυσικές (με εξαίρεση την πυκνότητα). Αντίθετα, κονιάματα που παρασκευάστηκαν με αδρανή “κακής” ποιότητας, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και υψηλότερες φυσικών (με εξαίρεση και πάλι την πυκνότητα).

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

Το γεγονός ότι τα κονιάματα που εμφανίζουν τις χαμηλότερες αντοχές και το ψηλότερο πορώδες παρασκευάστηκαν με ψηλότερο λόγο νερού/τσιμέντο, γεγονός που αδιαμφισβήτητα επηρέασε τις ιδιότητές τους, οφείλεται στην παρουσία μεγάλης ποσότητας λεπτού υλικού (φυλλοπυριτικών, ζεολίθων, ιλύος) στα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό του μίγματος. Αδρανή με αυξημένα ποσοστά λεπτών απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ζήτηση νερού προκειμένου να επιτευχθεί συγκεκριμένη εργασιμότητα. Η ισχυρή θετική συσχέτιση του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου στα διαβασικά αδρανή, και του ποσοστού των λεπτών στα ασβεστολιθικά αδρανή, με το λόγο νερού/τσιμέντο, επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ο λόγος νερού/τσιμέντο επηρεάζεται από την παρουσία λεπτού υλικού.

Προκειμένου να συσχετιστούν οι ιδιότητες των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν, με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων και κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, οι περισσότερες συσχετίσεις που προέκυψαν αφορούσαν τις δοκιμές μπλε του μεθυλενίου και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (Micro-Deval).

Πιο συγκεκριμένα, η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου συσχετίστηκε με τις μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων με διαβασικά αδρανή. Πολύ ισχυρές συσχετίσεις της εν λόγω δοκιμής παρατηρήθηκαν επίσης και με τις ιδιότητες των κονιαμάτων (μηχανικές και φυσικές), οι οποίες βελτιώθηκαν κατά πολύ όταν οι συσχετίσεις περιορίστηκαν στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή. Σημειώνεται ότι τα διαβασικά αδρανή που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσίασαν πολύ ψηλές τιμές μπλε του μεθυλενίου, οι οποίες όμως γενικά δεν ξεπερνούν το όριο που καταγράφεται στην Κ.Δ.Π. 164/2011. Η θέσπιση χαμηλότερου ορίου (π.χ.  $MB \leq 2,5$ ) θα συνέβαλε στην παρασκευή καλύτερης ποιότητας σκυροδεμάτων/κονιαμάτων.

Όσον αφορά τη δοκιμή Micro-Deval, παρατηρήθηκαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις με την πυκνότητα όλων των σκυροδεμάτων, ενώ ακόμα ισχυρότερη ήταν η συσχέτιση που παρατηρήθηκε με τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή. Στα κονιάματα, παρατηρήθηκαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις του συντελεστή Micro-Deval των αδρανών με τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβασικά/ασβεστολιθικά αδρανή. Από τα αποτελέσματα αυτά, επιβεβαιώνεται το γεγονός ότι η δοκιμή Micro-Deval μπορεί να συσχετιστεί με τις ιδιότητες σύνθετων υλικών, και ενισχύεται η άποψη ότι η δοκιμή αυτή μπορεί να αντικαταστήσει τη δοκιμή

### Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο. Σε περίπτωση υιοθέτησης της δοκιμής Micro-Deval, θα μπορούσε να θεσπιστεί ως ανώτατο όριο για τα διαβασικά αδρανή το 20 %, για τα ασβεστολιθικά το 35% και τα ασβεσταρενικά το 25%.

Επίσης, όσον αφορά τη δοκιμή απορροφητικότητας σε νερό, παρατηρήθηκαν μέσες έως ισχυρές συσχετίσεις με τις μηχανικές ιδιότητες και το πορώδες των κονιαμάτων. Με βάση αυτό, και με δεδομένο ότι τα κονιάματα που περιείχαν αδρανή με απορροφητικότητες  $WA > 3\%$  παρουσίασαν χαμηλότερες αντοχές και ψηλότερο πορώδες, σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που εξετάστηκαν, κρίνεται απαραίτητο να θεσπιστεί χαμηλότερο όριο WA από το υφιστάμενο 4%.

Από τα μοντέλα πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης, προκύπτει ότι η καμπτική αντοχή μπορεί να προβλεφθεί με σχετική ακρίβεια από το μπλε του μεθυλενίου και την αποσάθρωση με θειικό μαγνήσιο, ενώ το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να προβλεφθεί από τις δοκιμές Micro-Deval και μπλε του μεθυλενίου. Το πορώδες των σκυροδεμάτων της παρούσας διατριβής στις 28 ημέρες μπορεί να προβλεφθεί από τις δοκιμές Micro-Deval και απορροφητικότητας σε νερό. Ενώ η τριχοειδής απορροφητικότητα μπορεί να προβλεφθεί από την αποσάθρωση με θειικό νάτριο.

Όσον αφορά τα κονιάματα, η θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες μπορεί να προβλεφθεί από το μπλε του μεθυλενίου και την αποσάθρωση με θειικό μαγνήσιο των αδρανών υλικών. Η καμπτική αντοχή και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας μπορεί να προβλεφθούν από το μπλε του μεθυλενίου και την απορροφητικότητα των αδρανών υλικών, ενώ το στατικό μέτρο ελαστικότητας μπορεί να προβλεφθεί από το μπλε του μεθυλενίου. Αντίστοιχα, το πορώδες και η τριχοειδής απορροφητικότητα μπορούν να προβλεφθούν από τις δοκιμές μπλε του μεθυλενίου και αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, και η πυκνότητα από τις δοκιμές μπλε του μεθυλενίου και Micro-Deval. Τέλος, η διαπερατότητα των κονιαμάτων στις 28 ημέρες μπορεί να προβλεφθεί από το ισοδύναμο άμμου των αδρανών.

Πραγματοποιήθηκε επίσης συσχέτιση μεταξύ της ορυκτολογικής σύστασης των αδρανών, με τις διάφορες ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν. Στα κονιάματα με διαβασικά αδρανή, προέκυψαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ του περιεχομένου των αδρανών σε αργιλικά ορυκτά με τη θλιπτική, καμπτική αντοχή και το πορώδες των κονιαμάτων. Επίσης, πολύ ισχυρές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ του χλωρίτη και των μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων. Πολύ ισχυρή ήταν και η συσχέτιση που

## Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

καταγράφηκε μεταξύ της περιεκτικότητας των αδρανών σε αργιλικά, ζεολίθους και χλωρίτη, με το πορώδες των κονιαμάτων.

Πέρα από τις συνήθεις δοκιμές που πραγματοποιούνται στα αδρανή με σκοπό να προσδιοριστεί η ποιότητά τους, μέσα από την παρούσα έρευνα διαπιστώνεται και ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει η πετρογραφική εξέταση. Από την εξέταση κονιαμάτων με πολωτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, εξηγήθηκαν αρκετά από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους ελέγχους τόσο των αδρανών, όσο και των κονιαμάτων. Αυτό επιβεβαιώνει ότι τα δύο αυτά μικροσκόπια αποτελούν ένα πολύ καλό εργαλείο για την καλύτερη επεξήγηση της επίδρασης της ποιότητας των αδρανών στο τελικό προϊόν. Για παράδειγμα, φάνηκε ότι τα διαβασικά αδρανή, τα οποία παρουσίασαν πολύ κακές ιδιότητες, ήταν εμφανώς εξαλλοιωμένα, παρουσίασαν μεγάλη ιστολογική ανομοιογένεια μεταξύ του μεγέθους κόκκων των ορυκτών, και περιείχαν μεγάλη ποσότητα βασαλτικών τεμαχίων. Φάνηκε επίσης ότι η ομοιόμορφη κατανομή των ορυκτών φάσεων στον χώρο επηρεάζει τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Όσον αφορά τα ασβεστολιθικά αδρανή, φάνηκε ότι τα κακής ποιότητας αδρανή περιέχουν αρκετά μεγάλο αριθμό πόρων, και εμφανίζουν ανομοιομορφία στο μέγεθος των κόκκων των ορυκτών τους. Επίσης, φάνηκε η παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών που επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητες των αδρανών. Στα ασβεσταρενιτικά αδρανή που παρουσίασαν ψηλές τιμές στις διάφορες ιδιότητες, εντοπίστηκε πολύ μεγάλη ποσότητα απολιθωμάτων με πολύ λιγότερο συνδετικό υλικό.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, παρατηρήθηκε ότι τα κονιάματα τα οποία παρουσίασαν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες και ψηλότερες τιμές στις φυσικές τους ιδιότητες, ήταν αυτά που εμφάνισαν έντονες ρηγματώσεις στην μεταβατική ζώνη, και τα οποία δεν είχαν καλή συγκόλληση μεταξύ αδρανούς και τσιμεντόπαστας. Στα ίδια κονιάματα παρατηρήθηκε ιδιαίτερα έντονο πορώδες.

Σε γενικές γραμμές, φαίνεται ότι το τελικό προϊόν επηρεάζεται από τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των αδρανών, όπως επίσης και από την ορυκτολογική τους σύσταση. Παρόλα αυτά, αν τηρούνται με ευλάβεια όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την παρασκευή ενός σύνθετου υλικού, όπως π.χ. οι αναλογίες των συστατικών, η σωστή ανάμιξη, συμπύκνωση και συντήρηση και ο σωστός τρόπος διεξαγωγής των ελέγχων χαρακτηρισμού του νωπού/σκληρυμένου προϊόντος, τότε είναι δυνατό να προκύψουν προϊόντα με αποδεκτές

Κεφάλαιο 7: Αποτελέσματα Δοκιμών Σύνθετων Δομικών Υλικών και Συζήτηση

ιδιότητες για συγκεκριμένες χρήσεις. Στην απουσία αυστηρών ελέγχων στα εργοτάξια και στις μονάδες παραγωγής σύνθετων υλικών (π.χ. σκυροδέματος), κρίνεται επιτακτική η επιλογή καλής ποιότητας αδρανών, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα και η ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος.

ΦΟΥΡΝΑΡΗ ΡΕΒΕΚΚΑ

## 8 Συμπεράσματα

Η κατασκευαστική βιομηχανία στην Κύπρο αποτελεί μια από τις σημαντικότερες οικονομικές δραστηριότητες, με διαχρονική συνεισφορά στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (Α.Ε.Π.) πέραν του 7 - 8%, ενώ απασχολεί επίσης και ένα μεγάλο ποσοστό του εργατικού δυναμικού. Η πρόσφατη εξέλιξη του αρχιτεκτονικού σκηνικού στο νησί, με την κατασκευή πολυώροφων κτηρίων και άλλων έργων μεγάλης κλίμακας, επιβάλλουν υψηλού επιπέδου ποιότητας κατασκευές.

Τα αδρανή υλικά αποτελούν τη μεγαλύτερη σε αναλογία πρώτη ύλη για την παρασκευή σκυροδέματος και κονιαμάτων. Γι' αυτό και η ποιότητά τους ενδέχεται να επηρεάζει σημαντικά την ποιότητα και ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος. Οποιαδήποτε έρευνα σχετίζεται με την ποιότητα των αδρανών υλικών είναι ζωτικής σημασίας, αφού συνεισφέρει στην ορθολογιστική διαχείριση των πρώτων υλών, στην βελτίωση της ποιότητας των κατασκευών και κατ' επέκταση στην οικονομία της χώρας.

Η έρευνα αυτή, μέρος της οποίας χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εσωτερικών, μέσω της Εθνικής Τεχνικής Επιτροπής Αμμοχαλίκων του Κυπριακού Οργανισμού Τυποποίησης (CYS TE 02), είχε ως κύριο στόχο τον επανέλεγχο τοπικών, λεπτόκοκκων ( $d/D=0/4$  mm) αδρανών υλικών, προκειμένου να γίνουν εισηγήσεις ως προς τη διατήρηση ή/και επανακαθορισμό των ορίων των εργαστηριακών ελέγχων που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011. Στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, έγινε επίσης προσπάθεια συσχέτισης της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών που εξετάστηκαν με την ποιότητα του τελικού προϊόντος (σκυροδέματος και κονιαμάτων).

Για την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, χρησιμοποιήθηκαν λεπτόκοκκα, φυσικής προέλευσης, θραυστά αδρανή υλικά τριών διαφορετικών λιθότυπων: διαβασικά, ασβεστολιθικά και ασβεσταρενιτικά. Τα αδρανή αυτά υποβλήθηκαν στις εξής δοκιμές: ισοδύναμου άμμου, μπλε του μεθυλενίου, απορροφητικότητας σε νερό και πυκνότητας, αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο και νάτριο, και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (Micro-Deval). Στα αδρανή πραγματοποιήθηκαν επίσης ορυκτολογικές και χημικές αναλύσεις. Ακολούθως, με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση των αδρανών υλικών στο τελικό προϊόν, παρασκευάστηκαν σκυροδέματα και κονιάματα, τα οποία ελέγχθηκαν ως προς τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες.

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν στα σκυροδέματα και στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, η ποιότητα των λεπτόκοκκων αδρανών, όπως αυτή καθορίζεται από τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες και τα πετρογραφικά τους χαρακτηριστικά, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη των ιδιοτήτων του σκληρυμένου τελικού προϊόντος. Ωστόσο, η επίδραση της ποιότητας των λεπτόκοκκων αδρανών είναι πιο εμφανής στην περίπτωση των κονιαμάτων, παρά σε αυτή των σκυροδεμάτων, λόγω της παρουσίας χονδρόκοκκων αδρανών και 2<sup>ης</sup> άμμου στα σκυροδέματα, υλικά τα οποία δυνητικά επηρεάζουν με τη σειρά τους το τελικό προϊόν.

Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με "καλής" ποιότητας αδρανή, παρουσίασαν υψηλότερες τιμές στις μηχανικές ιδιότητες και χαμηλότερες στις φυσικές (με εξαίρεση την πυκνότητα). Αντίθετα, κονιάματα που παρασκευάστηκαν με αδρανή "κακής" ποιότητας, παρουσίασαν χαμηλότερες τιμές μηχανικών ιδιοτήτων και υψηλότερες φυσικών (με εξαίρεση και πάλι την πυκνότητα).

Το γεγονός ότι τα κονιάματα που εμφανίζουν τις χαμηλότερες αντοχές και το υψηλότερο πορώδες παρασκευάστηκαν με υψηλότερο λόγο νερού/τσιμέντο, δεδομένο που αδιαμφισβήτητα επηρέασε τις ιδιοτήτές τους, οφείλεται στην παρουσία μεγάλης ποσότητας λεπτού υλικού (φυλλοπυριτικών, ζεολίθων, ιλύος) στα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό του μίγματος. Αδρανή με αυξημένα ποσοστά λεπτών απορροφούν μεγάλες ποσότητες νερού, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η ζήτηση νερού προκειμένου να επιτευχθεί συγκεκριμένη εργασιμότητα. Η προσθήκη ρευστοποιητών στο μίγμα, προκειμένου να γίνει πιο εργάσιμο, μπορεί να περιορίσει την χρήση νερού. Αυτό όμως συμβάλει σε αύξηση του κόστους. Η ισχυρή θετική συσχέτιση του συντελεστή μπλε του μεθυλενίου στα διαβασικά αδρανή, και του ποσοστού των λεπτών στα ασβεστολιθικά αδρανή, με το λόγο νερού/τσιμέντο, επιβεβαιώνει το γεγονός ότι ο λόγος νερού/τσιμέντο επηρεάζεται από την παρουσία λεπτού υλικού.

Προκειμένου να συσχετιστούν οι ιδιότητες των αδρανών υλικών που εξετάστηκαν, με τις ιδιότητες των σκυροδεμάτων και κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης. Από τα αποτελέσματα της ανάλυσης αυτής, οι περισσότερες συσχετίσεις που προέκυψαν αφορούσαν τις δοκιμές μπλε του μεθυλενίου και αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής (Micro-Deval).



## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Πιο συγκεκριμένα, η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου συσχετίστηκε με τις μηχανικές ιδιότητες των σκυροδεμάτων με διαβασικά αδρανή. Πολύ ισχυρές συσχετίσεις της εν λόγω δοκιμής παρατηρήθηκαν επίσης και με τις ιδιότητες των κονιαμάτων (μηχανικές και φυσικές), οι οποίες βελτιώθηκαν κατά πολύ όταν οι συσχετίσεις περιορίστηκαν στα κονιάματα που παρασκευάστηκαν με διαβασικά αδρανή. Να σημειωθεί ότι τα διαβασικά αδρανή που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής παρουσίασαν πολύ ψηλές τιμές μπλε του μεθυλενίου, οι οποίες παρόλα αυτά δεν ξεπερνούν το επίσης ψηλό όριο που καταγράφεται στην Κ.Δ.Π. 164/2011 (10 g/kg για τα κονιάματα και 3 g/kg για τα σκυροδέματα). Αυτό οφείλεται στην παρουσία επιβλαβών ενεργών αργιλικών ορυκτών (σμεκτίτες), καθώς επίσης ζεόλιθων και φυλλοπυριτικών ορυκτών (χλωρίτης). Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα, συστήνεται η μείωση των υφιστάμενων ορίων που περιλαμβάνονται στην Κ.Δ.Π. 164/2011 για τη δοκιμή μπλε του μεθυλενίου στα 2,5 g/kg. Η θέσπιση χαμηλότερου ορίου δεν θα δημιουργούσε πρόβλημα στην αγορά, ενώ θα συνέβαλε στην παρασκευή καλύτερης ποιότητας σκυροδεμάτων/κονιαμάτων.

Από τις συσχετίσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των δοκιμών των αδρανών, φαίνεται ότι η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου παρουσιάζει ισχυρή αρνητική συσχέτιση με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου. Παρόλα αυτά, οι δύο αυτές δοκιμές θεωρούνται συμπληρωματικές και δεν μπορούν να αντικαταστήσουν η μία την άλλη, ιδιαίτερα όταν ο στόχος είναι ο προσδιορισμός της ποιότητας των αδρανών και της πιθανής επίδρασης των ενεργών αργιλικών ορυκτών που εμπεριέχονται σε αυτά. Σε συνδυασμό, όμως, μπορούν να οδηγήσουν σε χρήσιμα συμπεράσματα για την περιεκτικότητα επιβλαβών ή πλαστικών λεπτών στην άμμο σκυροδέματος και ασφαλτοσκυροδέματος. Σημειώνεται ότι η δοκιμή ισοδύναμου άμμου δεν περιλαμβάνεται στις δοκιμές που είναι υποχρεωτικές για αδρανή που προορίζονται για χρήση σε σκυροδέματα ή κονιάματα, σύμφωνα με την Κ.Δ.Π. 164/2011.

Όσον αφορά τη δοκιμή Micro-Deval, παρατηρήθηκαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις με την πυκνότητα όλων των σκυροδεμάτων, ενώ ακόμα ισχυρότερη ήταν η συσχέτιση που παρατηρήθηκε με τα σκυροδέματα που παρασκευάστηκαν με ασβεστολιθικά αδρανή. Στα κονιάματα, παρατηρήθηκαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις του συντελεστή Micro-Deval των αδρανών με τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των κονιαμάτων που παρασκευάστηκαν με διαβασικά/ασβεστολιθικά αδρανή. Από τα αποτελέσματα αυτά, επιβεβαιώνεται η άποψη που καταγράφεται από πολλούς ερευνητές ότι η δοκιμή αυτή σχετίζεται επαρκώς με την ποιότητα του τελικού προϊόντος.

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δοκιμών αποσάθρωσης που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, φαίνεται ξεκάθαρα ότι η δοκιμή με την χρήση θεικού μαγνησίου οδηγεί σε πολύ ψηλά ποσοστά απώλειας μάζας στα λεπτά αδρανή. Περισσότερα από τα 2/3 των δειγμάτων που εξετάστηκαν ξεπερνούν την ανώτατη επιτρεπόμενη κατηγορία (35%) που θα μπορούσε να θεσπιστεί με βάση το EN 12620. Τα δεδομένα αυτά καθιστούν τη δοκιμή αποσάθρωσης με θεικό μαγνήσιο ακατάλληλη για λεπτόκοκκα αδρανή υλικά. Η δοκιμή αποσάθρωσης με την χρήση θεικού μαγνησίου, η οποία σύμφωνα με το EN 1367-2 είναι υποχρεωτική μόνο για το κλάσμα 10-14 mm, είναι επίσης ιδιαίτερα χρονοβόρα και τα αποτελέσματά της επηρεάζονται από μικρές διαφοροποιήσεις στη μεθοδολογία εκπόνησής της. Επιπλέον, συσχετίζοντας τη δοκιμή αποσάθρωσης με τις υπόλοιπες ιδιότητες των αδρανών που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, φαίνεται ότι μόνο με την δοκιμή αντίστασης σε φθορά λόγω τριβής προέκυψε ισχυρή συσχέτιση. Με βάση τα δεδομένα αυτά, και λόγω του ότι θεωρείται ακατάλληλη για λεπτόκοκκα αδρανή, θα μπορούσε δυνητικά να αντικατασταθεί από τη δοκιμή Micro-Deval, ή/και να περιοριστεί η εκτέλεσή της σε περιπτώσεις οριακών αδρανών. Η δοκιμή Micro-Deval αποτελεί μια εύκολη, γρήγορη και με καλή επαναληψιμότητα ή/και αναπαραγωγιμότητα δοκιμή, η οποία σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, και όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, σχετίζεται επαρκώς με την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Παρόλο που θεωρείται δοκιμή ελέγχου μηχανικών ιδιοτήτων, εντούτοις το γεγονός ότι εκτελείται σε υγρές συνθήκες, όπως και η δοκιμή αποσάθρωσης, την καθιστά πιθανή εναλλακτική επιλογή για την αξιολόγηση της ποιότητας των αδρανών. Σε περίπτωση υιοθέτησης της δοκιμής αυτής, θα μπορούσε να θεσπιστεί ως ανώτατο όριο για τα διαβασικά το 20%, για τα ασβεστολιθικά το 35% και για τα ασβεσταρενιτικά το 25%.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα της απορροφητικότητας σε νερό, επίσης προκύπτουν σχετικά ψηλές τιμές, σχεδόν σε όλα τα δείγματα που εξετάστηκαν. Ωστόσο, οι τιμές αυτές δεν υπερβαίνουν το καθορισμένο από την Κ.Δ.Π. 164/2011 ανώτατο όριο (4%) για αδρανή που χρησιμοποιούνται σε σκυρόδεμα και κονιάματα. Σημειώνεται ότι η Κ.Δ.Π. 164/2011 δεν διαχωρίζει το όριο WA για λεπτά/χονδρά αδρανή. Το υφιστάμενο όριο (4%) κρίνεται υπερβολικά ψηλό για λεπτόκοκκα αδρανή και άρα συστήνεται η αναθεώρησή του προς τα κάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι περίπου το 2/3 των δειγμάτων παρουσιάζουν  $WA < 2,5\%$  και θα μπορούσαν να κριθούν κατάλληλα για χρήση, ακόμη και εάν το καθορισμένο (ανώτατο) όριο ήταν 2,5%. Αυτό θα εξασφάλιζε καλύτερης ποιότητας αδρανή υλικά για

### Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

χρήση στην κατασκευαστική βιομηχανία, χωρίς να παρεμποδίζει την αειφόρο λειτουργία της αγοράς σε ανταγωνιστικά πλαίσια. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα των συσχετίσεων της δοκιμής απορροφητικότητας σε νερό με το τελικό προϊόν, παρατηρήθηκαν μέσες έως ισχυρές συσχετίσεις με τις μηχανικές ιδιότητες και το πορώδες των κονιαμάτων. Με βάση αυτό, και με δεδομένο ότι τα κονιάματα που περιείχαν αδρανή με απορροφητικότητες  $WA > 3\%$  παρουσίασαν χαμηλότερες αντοχές και ψηλότερο πορώδες, σε σχέση με τα υπόλοιπα δείγματα που εξετάστηκαν, κρίνεται απαραίτητο να θεσπιστεί χαμηλότερο όριο  $WA$  από το υφιστάμενο  $4\%$ .

Προκειμένου να συσχετιστεί η ορυκτολογική σύσταση των αδρανών που εξετάστηκαν με τις ιδιότητές τους, επίσης πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης. Από τα αποτελέσματα των συσχετίσεων, φαίνεται ότι το ισοδύναμο άμμου των αδρανών επηρεάζεται από την παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών (χλωρίτη, μοντμοριλλονίτη, μοσχοβίτη), ζεολίθων (π.χ. λωμοντίτη), αλλά και μαλακότερων ορυκτών (π.χ. ασβεστίτη). Τα ορυκτά αυτά συμβάλουν στην αύξηση του λεπτόκοκκου υλικού, μειώνοντας έτσι το συντελεστή ισοδύναμου άμμου. Αντίθετα, η παρουσία σκληρότερων ορυκτών, όπως ο χαλαζίας, συμβάλουν σε αύξηση του συντελεστή ισοδύναμου άμμου. Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνονται και από τις συσχετίσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ των λόγων μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_o/H$ ) και δευτερογενών/πρωτογενών ορυκτών ( $S_o/P$ ) με τη δοκιμή ισοδύναμου άμμου, όπου φαίνεται ότι αύξηση του ποσοστού των μαλακών έναντι των σκληρών ορυκτών, και των δευτερογενών έναντι των πρωτογενών ορυκτών, αυξάνει το ποσοστό λεπτού υλικού στο δείγμα.

Η παρουσία ζεολίθων και φυλλοπυριτικών ορυκτών στα διαβασικά αδρανή επηρεάζει επίσης τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο. Όσο μεγαλύτερη η περιεκτικότητα στα πιο πάνω ορυκτά, τόσο πιο επιδεκτικό είναι στην αποσάθρωση το δείγμα. Αυτό επιβεβαιώνεται και από τις συσχετίσεις που πραγματοποιήθηκαν μεταξύ του λόγου μαλακών/σκληρών ορυκτών ( $S_o/H$ ) και των αποτελεσμάτων της δοκιμής αποσάθρωσης, όπου φαίνεται ότι με αύξηση του ποσοστού των μαλακών έναντι των σκληρών ορυκτών, αυξάνεται η απώλεια μάζας στη δοκιμή αποσάθρωσης.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αποσάθρωσης στα ασβεστολιθικά αδρανή επηρεάζονται αρνητικά από την παρουσία δολομίτη. Στα ασβεσταρενιτικά αδρανή, η παρουσία ασβεστίτη αυξάνει το ποσοστό απώλειας μάζας και η παρουσία χαλαζία το μειώνει.

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της δοκιμής Micro-Deval με την ορυκτολογική σύσταση των αδρανών, δεν προκύπτουν ιδιαίτερες συσχετίσεις, όπως σημειώνεται και από αρκετούς άλλους ερευνητές. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση της αποσάθρωσης με θειικό μαγνήσιο, έχει παρατηρηθεί ότι η παρουσία λωμοντίτη, και η αύξηση του ποσοστού των μαλακών έναντι των σκληρών ορυκτών, επηρεάζουν τα αποτελέσματα, αφού οδηγούν σε αύξηση του ποσοστού απώλειας μάζας. Αυτό υποδηλώνει ότι η αντίσταση σε τριβή των (διαβασικών) αδρανών μειώνεται με την παρουσία των πιο πάνω ορυκτών.

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν, ενισχύεται επίσης το γεγονός ότι η απορροφητικότητα και η πυκνότητα των αδρανών επηρεάζεται από την ορυκτολογία και γενικά τη μικροδομή τους. Ειδικότερα, φαίνεται ότι στα εξαλλοιωμένα διαβασικά αδρανή η παρουσία ζεολίθων συμβάλει σε αύξηση της απορροφητικότητας και μείωση της πυκνότητας. Ωστόσο, τα διαβασικά αδρανή, παρά το γεγονός ότι περιέχουν αρκετά δευτερογενή ορυκτά, λόγω του ότι είναι λεπτοκρυσταλλικά πετρώματα, εμφανίζουν μεγαλύτερη πυκνότητα σε σχέση με τα άλλα δύο είδη αδρανών που εξετάστηκαν. Όσον αφορά τα ασβεστολιθικά αδρανή, φαίνεται ότι η απορροφητικότητα επηρεάζεται κυρίως από το πορώδες των υλικών αυτών.

Επιχειρήθηκε επίσης συσχέτιση των αποτελεσμάτων των ορυκτολογικών αναλύσεων των αδρανών με τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι τα κονιάματα με διαβασικά αδρανή παρουσίασαν πολύ ισχυρές συσχετίσεις του περιεχομένου των αδρανών σε αργιλικά ορυκτά με τη θλιπτική/καμπτική αντοχή και το πορώδες τους. Επίσης, πολύ ισχυρές συσχετίσεις παρατηρήθηκαν μεταξύ του χλωρίτη και των μηχανικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων που εξετάστηκαν. Πολύ ισχυρή ήταν και η συσχέτιση που καταγράφηκε μεταξύ της περιεκτικότητας των αδρανών σε αργιλικά, ζεολίθους και χλωρίτη, με το πορώδες των κονιαμάτων.

Πέρα από τις συνήθεις δοκιμές που πραγματοποιούνται στα αδρανή με σκοπό να προσδιοριστεί η ποιότητά τους, μέσα από την παρούσα έρευνα διαπιστώνεται και ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει η πετρογραφική εξέταση. Από την εξέταση κονιαμάτων με πολωτικό και ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, εξηγήθηκαν αρκετά από τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τους ελέγχους τόσο των αδρανών, όσο και των κονιαμάτων. Αυτό επιβεβαιώνει ότι τα δύο αυτά μικροσκόπια αποτελούν ένα πολύ καλό εργαλείο για την καλύτερη επεξήγηση της επίδρασης της ποιότητας των αδρανών υλικών στο τελικό προϊόν. Για παράδειγμα, φάνηκε ότι τα διαβασικά αδρανή, τα οποία

### Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

παρουσίασαν πολύ κακές ιδιότητες, ήταν εμφανώς εξαλλοιωμένα, παρουσίασαν μεγάλη ιστολογική ανομοιογένεια μεταξύ του μεγέθους κόκκων των ορυκτών, και περιείχαν μεγάλη ποσότητα βασαλτικών τεμαχίων. Φάνηκε επίσης ότι η ομοιόμορφη κατανομή των ορυκτών φάσεων στον χώρο, επηρεάζει θετικά τα αποτελέσματα των ιδιοτήτων των σύνθετων υλικών. Όσον αφορά τα ασβεστολιθικά αδρανή, φάνηκε ότι τα κακής ποιότητας δείγματα περιείχαν αρκετά μεγάλο αριθμό πόρων, και εμφάνισαν ανομοιομορφία στο μέγεθος των κόκκων των ορυκτών τους. Επίσης, σε αυτά τα αδρανή εντοπίστηκε η παρουσία φυλλοπυριτικών ορυκτών, που επηρεάζει αρνητικά τις ιδιότητές τους. Στα ασβεσταρενιτικά αδρανή που παρουσίασαν ψηλές τιμές στις διάφορες ιδιότητες που εξετάστηκαν εντοπίστηκε πολύ μεγάλη ποσότητα απολιθωμάτων, με πολύ λιγότερο συνδετικό υλικό.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, παρατηρήθηκε ότι τα κονιάματα τα οποία παρουσίασαν χαμηλότερες μηχανικές ιδιότητες και ψηλότερες τιμές στις φυσικές τους ιδιότητες, ήταν αυτά που εμφάνισαν έντονες ρηγματώσεις στη μεταβατική ζώνη, και τα οποία δεν είχαν καλή συγκόλληση μεταξύ αδρανούς και τσιμεντόπαστας. Στα ίδια κονιάματα παρατηρήθηκε ιδιαίτερα έντονο πορώδες.

Από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, προκύπτει διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων στις πλείστες δοκιμές, ανάλογα με τη γεωλογική προέλευση και ορυκτολογική σύσταση των αδρανών. Αυτό ενδεχομένως θα πρέπει μελλοντικά να οδηγήσει την Εθνική Τεχνική Επιτροπή Αμμοχαλίκων του Κυπριακού Οργανισμού Τυποποίησης (CYS TE 02) στο διαχωρισμό των αδρανών, και στον καθορισμό ανεξάρτητων ορίων, ανάλογα με το λιθότυπο. Επιπλέον, το γεγονός ότι αρκετά από τα τοπικά αδρανή παρουσιάζουν φτωχή ποιότητα, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι χρειάζεται να θεσπιστούν κατηγορίες χρήσης αδρανών ανάλογα με τις απαιτήσεις του τελικού προϊόντος. Για παράδειγμα, αδρανή τα οποία δεν παρουσιάζουν καλές ιδιότητες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές όπου το τελικό προϊόν θα είναι προστατευμένο από το περιβάλλον π.χ. επιχρίσματα εσωτερικού χώρου.

Καταληκτικά, είναι εμφανές ότι επιβάλλεται ο ενδεδειγμένος έλεγχος (ακόμα και η πετρογραφική μελέτη) πριν την χρήση των αδρανών στις διάφορες κατασκευές. Ωστόσο, όπως έχει παρατηρηθεί, παρουσιάζεται ανομοιογένεια στις ιδιότητες των τοπικών αδρανών υλικών. Γι' αυτό, η ποιότητά τους δεν μπορεί να καθοριστεί από μια μόνο δοκιμή, ή από

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

πολλές δοκιμές ανεξάρτητα, όπως συμβαίνει τώρα. Στην απουσία πληθώρας αξιόπιστων αποτελεσμάτων και ιστορικού της χρήσης των αδρανών σε κατασκευές στην Κύπρο, συστήνεται όπως λαμβάνεται υπόψη αριθμός, ή ακόμη και το σύνολο των ιδιοτήτων που εξετάζονται, πριν κριθεί κατάλληλο ή ακατάλληλο για χρήση ένα αδρανές. Με αυτά τα δεδομένα, είναι σημαντικό οι δοκιμές που θα πραγματοποιούνται για τον ποιοτικό έλεγχο των αδρανών να εκτελούνται σε σύντομο χρονικό διάστημα και να παρέχουν ασφαλή συμπεράσματα για την ποιότητα των υλικών, χωρίς να επηρεάζονται τα αποτελέσματά τους από τυχόν μικρό-μεταβολές των περιβαλλουσών συνθηκών.

Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, συστήνεται απαραίτητα η εξέταση των αδρανών τουλάχιστον με τις δοκιμές Micro-Deval, μπλε του μεθυλενίου και απορροφητικότητας σε νερό, με καθορισμό ωστόσο αυστηρότερων ορίων, ώστε να παρέχεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα αδρανών για χρήση. Σημειώνεται ότι, αν τηρούνται με ευλάβεια όλες οι παράμετροι που επηρεάζουν την παρασκευή ενός σύνθετου υλικού, όπως π.χ. οι αναλογίες των συστατικών, η σωστή ανάμιξη, συμπίκνωση και συντήρηση, και ο σωστός τρόπος διεξαγωγής των ελέγχων χαρακτηρισμού του νοπού/σκληρυμένου προϊόντος, τότε είναι δυνατό να προκύψουν προϊόντα με αποδεκτές ιδιότητες για συγκεκριμένες χρήσεις, ακόμη και με αδρανή υποδεέστερης ποιότητας. Στην απουσία όμως αυστηρών ελέγχων στα εργοτάξια και στις μονάδες παραγωγής σύνθετων υλικών (π.χ. σκυροδέματος), κρίνεται επιτακτική η επιλογή καλής ποιότητας αδρανών, προκειμένου να διασφαλιστεί η ποιότητα και η ανθεκτικότητα του τελικού προϊόντος.

### **8.1 Συστάσεις για μελλοντική έρευνα**

Μελλοντικά, είναι σημαντικό να συνεχιστεί η επιστημονικά τεκμηριωμένη προσπάθεια και η συλλογή αξιόπιστων εργαστηριακών δεδομένων, ώστε να καθοριστούν παράμετροι που να βελτιστοποιούν τα κριτήρια επιλογής των αδρανών και κατ' επέκταση την καλύτερη ποιότητα των κατασκευών.

Επιπρόσθετα, θεωρείται πολύ σημαντική η δημιουργία μιας αξιόπιστης βάσης δεδομένων, στην οποία να περιέχονται στοιχεία από τις φυσικομηχανικές, χημικές και ορυκτολογικές ιδιότητες αδρανών που έχουν χρησιμοποιηθεί σε υφιστάμενες κατασκευές και έργα (σε σκυροδέματα, ασφαλτοσκυροδέματα κ.α.) που έχουν εκτεθεί σε μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες στο πέρασμα του χρόνου. Πέρα από τα δεδομένα των αδρανών, στο αρχείο αυτό θα πρέπει να καταχωρούνται περιοδικά και αποτελέσματα από δειγματοληψίες και επί τόπου μη- ή μικρο-καταστρεπτικές δοκιμές που θα

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

πραγματοποιούνται με στόχο την παρακολούθηση της κατάστασης των έργων. Τα δεδομένα αυτά, που μπορεί να αφορούν κυρίως κατασκευές του δημοσίου, αλλά και ιδιωτικά έργα, θα πρέπει να συλλεχθούν από αρχεία του Τμήματος Δημοσίων Έργων, του Τμήματος Γεωλογικής Επισκόπησης, καθώς και μεγάλων εργοληπτικών εταιρειών. Αφού αξιολογηθούν και κριθούν αξιόπιστα, τα πιο πάνω δεδομένα θα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άμεση συσχέτιση της επίδρασης των αδρανών στο τελικό προϊόν σε βάθος χρόνου. Επιπρόσθετα, αντίστοιχη προσπάθεια συλλογής δεδομένων θα πρέπει να γίνει και σε όλα τα νέα έργα του δημοσίου. Στην προσπάθεια αυτή μπορεί να εμπλακεί ενεργά και το Πανεπιστήμιο Κύπρου, στα πλαίσια συμφωνιών και πρωτοκόλλων συνεργασίας που υπάρχουν με τα διάφορα τμήματα του δημοσίου.

Παράλληλα, θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί μια τεχνοοικονομική μελέτη με στόχο να εξεταστεί πόσο αυξάνεται το κόστος για επιλεκτική λατόμευση αδρανών καλύτερης ποιότητας, και κατά πόσο αυτό το κόστος θα μπορούσε να συγκριθεί με το κόστος εισαγωγής αδρανών ανάλογης ποιότητας από χώρες του εξωτερικού (π.χ. Ελλάδα).

Όπως φάνηκε από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, η δοκιμή Micro-Deval αποτελεί έναν εν δυνάμει αντικαταστάτη της δοκιμής αποσάθρωσης, αφού πρόκειται για μια εύκολη και γρήγορη δοκιμή, με επαρκή συσχέτιση με τις ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Παρόλα αυτά, θα ήταν σκόπιμο να πραγματοποιηθούν περισσότεροι έλεγχοι σε δείγματα τυχαίας δειγματοληψίας (τόσο σε χονδρόκοκκα όσο και λεπτόκοκκα), όπως επίσης και σε ανακυκλωμένα αδρανή, και με αυτά τα δείγματα να παρασκευαστούν διαφορετικά προϊόντα, όπως π.χ. σκυροδέματα υψηλών προδιαγραφών, ασφαλτοσκυροδέματα, καθώς και περισσότερα συμβατικά σκυροδέματα και κονιάματα, στα οποία να πραγματοποιηθούν διάφοροι έλεγχοι όσον αφορά τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες. Με αυτό τον τρόπο θα εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα όσον αφορά τα ανώτατα όρια που θα μπορούσαν να καθοριστούν για τη δοκιμή Micro-Deval, αναλόγως του τελικού προϊόντος και του λιθότυπου αδρανών.

Η δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, επίσης αποτελεί μια σημαντική δοκιμή που φαίνεται να συσχετίζεται επαρκώς με το τελικό προϊόν. Όπως αναφέρουν οι Chen et al (2012) υπάρχουν διάφορες παραλλαγές της δοκιμής αυτής. Θα ήταν ενδιαφέρον, λοιπόν, να εξεταστεί μέσα από αρκετούς ελέγχους κατά πόσο θα μπορούσε να προταθεί μια βελτιωμένη μέθοδος υπολογισμού του μπλε του μεθυλενίου, η οποία να οδηγεί σε πιο αξιόπιστα αποτελέσματα. Ένα από τα μειονεκτήματα της δοκιμής στην παρούσα της

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

μορφή, είναι ότι κατά τη διαδικασία της δοκιμής “κηλίδας” μπορεί να υπάρξει σφάλμα από τον τεχνικό που πραγματοποιεί το πείραμα. Ο υπολογισμός του πάχους της γαλάζιας στεφάνης γύρω από την κηλίδα, αναλόγως τεχνικού, είναι υποκειμενικός. Θα ήταν άρα ενδιαφέρον να εξεταστεί η μέθοδος που προτείνουν οι πιο πάνω συγγραφείς (Chen et al., 2012), κατά την οποία χρησιμοποιείται χρωματομετρητής, που είναι μια φορητή συσκευή που μπορεί να μετρήσει την απορρόφηση ενός δεδομένου διαλύματος σε ένα συγκεκριμένο μήκος κύματος φωτός. Το αποτέλεσμα του μπλε του μεθυλενίου συσχετίζεται με το φως που απορροφάται σε συγκεκριμένο μήκος κύματος, και έτσι με αυτόν τον τρόπο απομακρύνεται το ενδεχόμενο ανθρώπινου λάθους.

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος στην οποία πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση είναι η ορυκτολογία των λιθοτύπων της Κύπρου. Όπως επιβεβαιώθηκε μέσα από τα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής, η ορυκτολογική ανάλυση μπορεί να προσδιορίσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των αδρανών υλικών. Άρα, θα μπορούσαν να ποσοτικοποιηθούν τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των αδρανών (π.χ. τα μη υγιή ορυκτά των διαβασικών αδρανών) και να προταθούν διάφοροι μικροπετρογραφικοί δείκτες που να συσχετίζονται με τις δοκιμές των αδρανών (π.χ. μπλε του μεθυλενίου), έτσι ώστε να καθίσταται δυνατή η εκτίμηση ή ακόμη και η πρόβλεψη της μηχανικής συμπεριφοράς των διαφόρων λιθότυπων μέσω της πετρογραφικής εξέτασης.

Θα ήταν ενδιαφέρον επίσης να εξεταστεί η συσχέτιση του μητρικού πετρώματος με τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά και τις φυσικομηχανικές ιδιότητες των αδρανών υλικών. Το μητρικό πέτρωμα θα μπορούσε να συλλεχθεί παράλληλα με δείγματα αδρανών από τα λατομεία, έτσι ώστε να εξεταστεί (ανάμεσα σε άλλα) κατά πόσο η διαδικασία θραύσης επηρεάζει τις ιδιότητες των αδρανών. Τα μητρικά πετρώματα θα μπορούσαν να εξεταστούν ως προς τις φυσικομηχανικές τους ιδιότητες (π.χ. αντοχή σε θλίψη, τριχοειδής απορροφητικότητα, πορώδες, κρυστάλλωση αλάτων κ.α.). Επίσης, θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν ορυκτολογικές και χημικές αναλύσεις, καθώς και εξέταση των μητρικών πετρωμάτων με το πολωτικό και το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, προκειμένου να προσδιοριστεί η ορυκτολογία και η μικροδομή τους. Ο τελικός στόχος θα είναι ο καθορισμός όσο το δυνατό περισσότερων παραμέτρων, με βάση επιστημονικά δεδομένα, και η δημιουργία μιας ψηφιακής πλατφόρμας πληροφοριών για τα πετρώματα, και κατ’ επέκταση τα αδρανή, της Κύπρου. Η πλατφόρμα αυτή θα πρέπει να περιλάβει και δεδομένα πετρωμάτων και αδρανών από τις κατεχόμενες περιοχές του νησιού, και



### Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα

ιδιαίτερα την οροσειρά του Πενταδακτύλου, η οποία αποτελούσε τη βασική πηγή αδρανών υλικών για την κατασκευαστική βιομηχανία πριν από το 1974.

Συστήνεται επιπλέον να εξεταστεί κατά πόσο τα αδρανή και οι διάφορες ιδιότητές τους επηρεάζουν τη μεταβολή του όγκου των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων λόγω συστολής ξήρανσης και ερπυσμού.

Ένας συνδυασμός των προαναφερθεισών ενεργειών, καθώς και εργαστηριακών δεδομένων που πιθανόν να προκύψουν από μια νέα έρευνα, θα μπορούσε να οδηγήσει σε ένα βελτιστοποιημένο μοντέλο ελέγχου της ποιότητας των αδρανών της Κύπρου. Στα πλαίσια μιας μελλοντικής έρευνας, που θα είχε ως βάση τα συμπεράσματα της υφιστάμενης, θα μπορούσε να καθοριστεί μια επιστημονικά τεκμηριωμένη διαδικασία επιλογής αδρανών υλικών, που θα ρύθμιζε τόσο την ποιότητα των τελικών προϊόντων, όσο και το επίπεδο της λατομικής βιομηχανίας του νησιού.

## 9 Βιβλιογραφία

### Ξένη Βιβλιογραφία

Abu Seif, E.S., 2013. Performance of cement mortar made with fine aggregates of dune sand, Kharga Oasis, Western Desert, Egypt: an experimental study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7(3), pp.270-84.

ACI 211.1-91, Reapproved 2009. *Recommended practice for selecting proportions for normal and heavyweight concrete*. Detroit: The Institute American Concrete Institute.

Acton, Q.A., 2013. *Carbamates—Advances in research and application: 2013 Edition*. Georgia: Scholarly Editions.

Aghamelu, O.P. & Okogbue, C.O., 2013. Some geological considerations and durability analysis on the use of crushed pyroclastics from Abakaliki (Southeastern Nigeria) as concrete aggregate. *Geotechnical and Geological Engineering*, 31(2), pp.699–711.

Ahmed, W.U., 1994. Petrographic methods for analysis of cement clinker and concrete microstructure. In S.M. DeHayes, ed. *Petrography of Cementitious Materials ASTM STP 1215*. Philadelphia: ASTM. pp.1-12.

Ahn, N. & Fowler, D.W., 2001. *An experimental study on the guidelines for using higher contents of aggregate microfines in portland cement concrete*. Research Report ICAR 102-1F. Austin: The University of Texas at Austin International Center for Aggregates Research.

Aitcin, P.C. & Mehta, P.K., 1990. Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 87(2), pp.103-07.

Akesson, U., Lindqvist, J.E., Goransson, M. & Stigh, J., 2001. Relationship between texture and mechanical properties of granite, central Sweden, by use of image – analysis techniques. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, pp.277-84.

Akroyd, T.N.W., 1962. *Concrete: properties and manufacture*. 1<sup>st</sup> ed. London: Pergamon Press.

AL-Ameen, S.I. & Waller, M.D., 1994. The influence of rock strength and abrasive mineral content on the Cerchar Abrasive Index. *Engineering Geology*, 36 , pp.293-301.

Alexander, M.G., 1989. Role of aggregates in hardened concrete. In J. Skalny & S. Mindess, eds. *Material Science of Concrete III*. Westerville, Ohio: The American Ceramic Society. pp.119-46.

Alexander, M.G., 1996. Aggregates and the deformation properties of concrete. *ACI Materials Journal*, 93(6), pp.569-77.

### Βιβλιογραφία

Alexander, M.G. & Mindess, S., 2005. *Aggregates in concrete*. London and New York: Taylor & Francis.

Alhozaimy, A., 1998. Correlation between materials finer than No. 200 sieve and sand equivalent tests for natural and crushed stone sands. *Cement, Concrete and Aggregates Journal*, 20(2), pp.221–6.

Alhozaimy, A.M., 2009. Effect of absorption of limestone aggregates on strength and slump loss of concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), pp.470-73.

Allam, L.M. & Ebrahimpour, A., 2014. Comparative analysis of Idaho and Micro-Deval aggregate degradation test methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 26(1), pp.198-201.

Almusallam, A., 2001. Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. *Cement & Concrete Composites*, 23, pp.353-61.

Alonso, E., Martinez, L., Martinez, W. & Villasenor, L., 2002. Mechanical properties of concrete elaborated with igneous aggregates. *Cement and Concrete Research*, 32, pp.317–21.

Al-Oraimi, S.K., Taha, R. & Hassan, H.F., 2006. The effect of the mineralogy of coarse aggregate on the mechanical properties of high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 20, pp.499-503.

Alqarni, A.S., 2013. *Quantifying the characteristics of fine aggregate using direct and indirect test methods*. MSc Thesis. Texas: The University of Texas at Austin.

Al-Shweily, H., 2002. *Effect of bituminous mixtures stripping on creep behavior*. MSc Thesis. Irbid, Jordan: Jordan University for Science and Technology.

Alt, J.C. & Teagle, D.A.H., 2000. Hydrothermal alteration and fluid fluxes in ophiolites and oceanic crust. *Special Paper of the Geological Society of America*, 273-282, p.349.

Amenta, M., Karatasios I., Kalagri A., Maravelaki-Kalaitzaki P. & Kiikolglou V., 2014. Mix design parameters of restoration mortars: the effect of aggregate characteristics. In Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F., eds. *Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation*. Heidelberg: Springer. pp.85-92.

Aquino, C., Inoue M. Miura H., Mizuta, H. & Okamoto, T., 2010. The effects of limestone aggregate on concrete properties. *Construction and Building Materials*, 24, pp.2363–68.

Archdeacon, T.J., 1994. *Correlation and regression analysis: a historian's guide*. Wisconsin: University of Wisconsin Press.

Arum, C. & Olotuah, A.O., 2006. Making of strong and durable concrete. *Emirates Journal for Engineering Research*, 11(1), pp.25-31.

### Βιβλιογραφία

Aschenbrener, T., 1992. *Comparison of Colorado component hot mix asphalt Materials with some European Specifications*. Report No. CDOT-DTD-R-92-14. Denver, Colorado: Colorado Department of Transportation.

Asi, I., Shalabi, F. & Naji, J., 2009. Use of basalt in asphalt concrete mixes. *Construction and Building Materials*, 23, pp.498–506.

ASTM C1202-12, 2012. *Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration*. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM C88-05, 2005. *Test method for soundness of aggregates by use of sodium sulfate or magnesium sulfate*. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM D7428-08, 2008. *Standard test method for resistance of fine aggregate to degradation by abrasion in the Micro-Deval apparatus*. West Conshohocken: ASTM International.

ASTM International, 2017. *ASTM International*. [Online] Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 10 September 2017].

Atkins, P. Overton, T., Rourke, J., Weller, M., Amstrong, F., 2010. *Shriver and Atkins' Inorganic Chemistry*. 5<sup>th</sup> ed. Oxford : Oxford University Press.

Bach, H., 2013. *Evaluation of attrition tests for railway ballast*. PhD Thesis. Graz University of Technology Institute for Railway Engineering and Transport Economy.

Bahabri, A.A., 2016. Textural characteristics of fine aggregate efficiency on concrete strength. *American Journal of Materials Science*, 6(3), pp.73-78.

Balboni, E., Espinosa-Marzal, R.M., Doehne, E. & Scherer, G., 2011. Can drying and re-wetting of magnesium sulfate salts lead to damage of stone? *Environmental Earth Sciences*, 63, pp.1463–73.

Banner, F.T., Lord, A.R. & Boudagher-Fadel, M.K., 1999. The Terra Limestone Member (Miocene) of western Cyprus. *Greifswalder Geowissenschaftliche Beitrage*, 6, pp.503–15.

Basham, K., 2013. *How to minimize and repair popouts*. [Online] Available at: [http://www.concreteconstruction.net/how-to/how-to-minimize-and-repair-popouts\\_o](http://www.concreteconstruction.net/how-to/how-to-minimize-and-repair-popouts_o) [Accessed 23 July 2017].

Basheer, L., Basheer, P.A.M. & Long, A.E., 2005. Influence of coarse aggregate on the permeation, durability and the microstructure characteristics of ordinary Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 19(9), pp.682–90.

Basista, M. & Weglewski, W., 2009. Chemically assisted damage of concrete: A model of expansion under external sulfate attack. *International Journal of Damage Mechanics*, 18, pp.155-75.

### Βιβλιογραφία

- Bechar, R.R., 2005. *Basic civil engineering*. New Delhi: Firewall Media.
- Bell, S., 2008. *Encyclopedia of forensic science*. New York: Infobase Publishing.
- Bell, F.G. & Lindsay, P., 1999. The petrographic and geomechanical properties of sandstones from the Newspaper Member of the Natal Group near Durban, South Africa. *Engineering Geology*, 53, pp.57–81.
- Bérubé, M.A., 2001. The mineralogical and petrographic analysis of concrete aggregates. *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society* , 53(12), pp.45-47.
- Beshr, H., Almusallam, A.A. & Maslehuddin, M., 2003. Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of highstrength concrete. *Construction and Building Materials*, 17, pp.97–103.
- Bhattacharya, B. & Habtzghi, D., 2002. Median of the p-value under the alternative hypothesis. *The American Statistician*, 56(3), pp.202-06.
- Bissell, H.J. & Chilingar, G.V., 1967. Classification of sedimentary carbonate rocks. In G.V. Chilingar, H.J. Bissell & R.W. Fairbridge, eds. *Carbonate rocks, origin, occurrence and classification*. Amsterdam: Elsevier Publishing Company. pp.87-168.
- Bloem, D., 1956. Soundness and deleterious substances. In A.S.T.P.N. 169, ed. *Significance of tests and properties of concrete and concrete aggregates*. Philadelphia: ASTM International. pp.346-54.
- Bonavetti, V.L. & Irassar, E.F., 1994. The effect of stone dust content in sand. *Cement and Concrete Research*, 24(3), pp.580-90.
- Boucher, D.L. & Selig, E.T., 1987. *Application of petrographic analysis to ballast performance evaluation*. 1131. Washington, D.C.: Transportation Research Record.
- Bragin , N.Y. & Krylov, K.A., 1996. Stratigraphy and lithology of the Upper Triassic deposits of Southwestern Cyprus (Vlambouros Formation). *Stratigraphy and Geological Correlation*, 4(2), pp.132-40.
- Brandes, H.G., Robinson, C.E. & Johnson, G.P., 2011. Soil and rock properties in a young volcanic deposit on the island of Hawaii. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 137, pp.597-610.
- Brandes, H.G. & Robinson, C.E., 2006. Correlation of aggregate test parameters to hot mix asphalt pavement performance in Hawaii. *Journal of Transportation Engineering*, 132, pp.86-95.
- Brennan, M.J., Crawley , K., Sheaha, J.N. & Jordan, J., 2003. Ranking the performance of aggregates using CEN test results. *Road Materials and Pavement Design*, 4(4), pp.439-54.

### Βιβλιογραφία

Brittain, H.G., 2006. X-ray diffraction and x-ray fluorescence. In S. Ahuja & N. Jespersen, eds. *Comprehensive Analytical Chemistry 47-Modern Instrumental Analysis*. Amsterdam: Elsevier. pp.177-226.

Bruner, D.W., Choi, J.C. & West, T.R., 1996. *Development of a procedure to identify aggregates for bituminous surfaces in Indiana*. FHWA/IN/JHRO-95/11. Indiana: Indiana Department of Transportation Purdue University.

Bujdák, J., Janek, M., Madejová, J. & Komadel, P., 2001. Methylene blue interactions with reduced-charge smectites. *Clays and Clay Minerals*, 49(3), pp.244-54.

Cann, J.R., 2003. The Troodos ophiolite and the upper ocean crust: a reciprocal traffic in scientific concepts. In Y. Dilek & S. Newcomb, eds. *Special Paper 373:Ophiolite conception and the evolution of geological thought: Geological Society of America Special Publicat.* pp.309-21.

Cardell, C., Benavente, D. & Rodríguez-Gordillo, J., 2008. Weathering of limestone building material by mixed sulfate solutions. Characterization of stone microstructure, reaction products and decay forms. *Materials Characterization*, 59, pp.1371-85.

Ceryan, S., 2017. Weathering indices used in evaluation of the weathering state of rock material. In N. Ceryan, ed. *Handbook of research on trends and digital advances in engineering geology*. Hershey Pennsylvania: IGI Global. pp.132-86.

Cetin, A. & Carrasquillo, R.L., 1998. High-performance concrete: influence of coarse aggregates on mechanical properties. *ACI Materials Journal*, 95(3), pp.252–61.

Chandigarh, T., 2001. *Civil engineering materials*. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.

Chen, Y., Tregger, N., Jeknavorian, & Koehler, E., 2012. Assessing the cleanliness of fine aggregates using the methylene blue test. In *International Concrete Sustainability Conference*. Seattle, USA, 2012.

Clement, J.C., 2013. *Recommendations for coarse aggregate testing requirements for use in portland cement concrete*. PhD Thesis. Austin, Texas: The University of Texas at Austin.

Clement, J., Stutts, Z., Alqarni, A., Fowler, D., Whitney, D., 2014. *Revamping aggregate property requirements for portland cement concrete*. Final Report FHWA/TX-13/0-6617-1. Texas: The University of Texas at Austin.

Clube, T.M.M., Creer, K.M. & Robertson, A.H.F., 1985. The palaeorotation of the Troodos microplate. *Nature*, 317, pp.522- 525.

Cole, W.F. & Sandy, M.J., 1980. Proposed secondary mineral rating for basalt road aggregate durability. *Australian Road Research*, 10(3), pp.227–37.

## Βιβλιογραφία

Cooley, L.A., Huner, M.S. & James, R.S., 2002. *Micro-Deval testing of aggregates in the Southeast*. NCAT Report No. 02-09. Auburn, Alabama: National Center for Asphalt Technology Auburn University.

Cooper, A.J., Villard, D., Ash, J.S. & Ferguson, J.D., 2003. Predicting aggregate performance of the igneous and metamorphic rocks, Northern Ontario. In *International Center for Aggregates Research 11<sup>th</sup> Annual Symposium: Aggregates - Asphalt Concrete, Bases and Fines*. Austin, Texas, 2003.

Cortas, R., Roziere, E., Staquet, S., Hamami, A., Loukili, A., Delpancke-Ogletree, M.P., 2014. Effect of the water saturation of aggregates on the shrinkage induced cracking risk of concrete at early age. *Cement and Concrete Composites*, 50, pp.1–9.

Cramer, S.M., Hall, M. & Parry, J., 1995. *Effect of optimized total aggregate gradation on portland cement concrete for wisconsin pavements*. Transportation Research Record 1478. Washington, DC: Transportation Research Board.

Cuelho, E., Mokwa, R. & Obert, K., 2007. *Comparative Analysis of coarse surfacing aggregate using Micro-Deval, L.A. abrasion and sodium sulfate soundness tests*. Bozeman: Western Transportation Institute Montana State University, Collage of Engineering.

Cunningham, J.B., 2011. *An examination of the relationship between aggregate soundness on laboratory pavement performance*. MSc Thesis in Civil Engineering. University of Arkansas.

Daniel, D.G., 2006. Factors influencing concrete workability. In J.F. Lamond & J.H. Pielert, eds. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials ASTM STP 169D*. Bridgeport, NJ: ASTM International. pp.59-72.

Danielsen, S.W. & Kuznetsova, E., 2016. Resource management and a Best Available Concept for aggregates sustainability. In R. Příkryl, Á. Török, M. Gómez-Heras, K. Miskovsky, M. Theodoridou, eds. *Sustainable Use of Traditional Geomaterials in Construction Practice*. London: Geological Society Special Publications 416. pp.59-70.

Danielsen, S. & Rueslatten, H., 1984. Feldspar and mica. Key minerals for fine aggregate quality. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 30(1), pp.215–19.

Davis, R., 1959. Magnesium resources of the United States. A geological summary and annotated bibliography to 1953. In G.S. Bulletin, ed. *Contributions to bibliography of mineral resources 1955-1959*. 1019<sup>th</sup> ed. Washington, D.C.: U.S. Department of the Interior, Geological Survey. pp.373-516.

de Freitas, M.H., 2009. Geological materials. In D.G. Price, ed. *Engineering Geology: Principles and Practice*. Heidelberg: Springer Science & Business Media. pp.21-63.

## Βιβλιογραφία

De Schutter, G. & Poppe, A.M., 2004. Quantification of the water demand of sand in mortar. *Construction and Building Materials*, 18(7), pp.517-21.

Dean, Y., 1996. *Materials Technology. Mitchell's Building Series*. New York: Routledge.

Delipetrou, P., Makhzoumi, J., Dimopoulos, P. & Georghiou, K., 2008. Cyprus. In I. Vogiatzakis, G. Pungetti & A. Mannion, eds. *Mediterranean island landscapes: natural and cultural approaches*. London: Springer. pp.170-203.

Dewar, J.F., 1963. *Effect of mica in the fine aggregate on the water requirement and strength of concrete*. Technical Report. London: Cement and Concrete Association.

Dewar, J.D. & Anderson, R., 1992. *Manual of Ready-Mixed Concrete*. 2<sup>nd</sup> ed. London: Blackie Academic and Professional.

Dokic, O., Matovic, V., Eric, S. & Saric, K., 2015. Influence of engineering properties on Polished Stone Value (PSV): A case study on basic igneous rocks from Serbia. *Construction and Building Materials*, 101, pp.1088–96.

Dossey, T., McCullough, B.F. & Dumas, A., 1994. *Effects of aggregate blends on the properties of portland cement concrete pavements*. FHWA/TX-94+ 1244-8. Austin: The University of Texas at Austin Center for Transportation Research.

Ducloz, C., 1972. *The geology of the Bellapais-Kythrea area of the central Kyrenia Range*. *Cyprus Geol Surv Bulletin No. 6*. Nicosia, Cyprus: Geological Survey Department.

Eaton, S., 1987. *The sedimentology of Mid to Late Miocene carbonates and evaporites in Southern Cyprus*. PhD Thesi. Edinburgh: University of Edinburgh.

Eckert, M., 2012. Max von Laue and the discovery of X - ray diffraction in 1912. *Ann. Phys.*, 524(5), pp.A83–85.

Elliott, A.C. & Woodward, W.A., 2007. *Statistical analysis quick reference guidebook: with SPSS examples*. California: Sage Publications.

Elsen, J., 2006. Microscopy of historic mortars-a review. *Cement and Concrete Research*, 36, pp.1416-24.

EN 1015-11, 1999. *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 1015-3, 1999. *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*. Brussels: European Committee for Standardization.



### Βιβλιογραφία

EN 1097-6, 2013. *Tests for the mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 12350 - 2, 2009. *Testing fresh concrete - Part 2: Slump test*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 12390-13, 2013. *Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 12390-3, 2009. *Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 12390-5, 2009. *Testing hardened concrete - Part 5: Flexural strength of test specimens*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 12390-6, 2009. *Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 206, 2013. *Concrete-Specification, performance, production and conformity*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 932-1, 1997. *Test for general properties of aggregates - Part 1: Methods for sampling*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 932-2, 1999. *Test for the general properties of aggregates - Part 2: Methods for reducing laboratory samples*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 932-3, 1997. *Tests for general properties of aggregates - Part 3: Procedure and terminology for simplified petrographic description*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 933-1, 2012. *Tests for the geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 933-8, 2012+A1:2015. *Tests for the geometrical properties of aggregates - Part 8: Assessment of fines - Sand Equivalent test*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN 933-9, 2009+A1:2013. *Tests for the geometrical properties of aggregates - Part 9: Assessment of fines - Methylene blue test*. Brussels: European Committee for Standardization.

EN1015-2, 1999. *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*. Brussels: European Committee for Standardization.

### Βιβλιογραφία

Erlin, B. & Jana, D., 2003. Forces of hydration that can cause havoc to concrete. *Concrete International*, November. pp.51-57.

Eze, E.O., 1997. Geotechnical assessment of some charnockites from Nigeria as construction materials. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 30, pp.231-36.

Fenton, C.L. & Fenton, M.A., 2003. *The Rock Book*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Dover Publication.

Fernandes, V.A., Purnell, P., Still, G.T. & Thomas, T.H., 2007. The effect of clay content in sands used for cementitious materials in developing countries. *Cement and Concrete Research*, 37, pp.751–58.

Flatt, R.J., 2002. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, 242, pp.435–54.

Follows, E.J., 1990. *Sedimentology and tectonic setting of Miocene reef and related sediments in Cyprus*. PhD Thesis. Edinburgh: University of Edinburgh.

Follows, E., 1992. Patterns of reef sedimentation and diagenesis in the Miocene. *Sedimentary Geology*, 79, pp.225-53.

Fookes, P., 1980. An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 13, pp.207-29.

Fookes, P.G. & Walker, M.J., 2011. Natural aggregates in the performance and durability of concrete: physical characteristics. *Geology Today*, 27(4), pp.141-48.

Forster, S., 1994. Soundness, deleterious substances, and coatings. In P. Klieger & J. Lamond, eds. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. STP 169C. Philadelphia: ASTM International. pp.411-20.

Forster, S.W., 2006. Soundness, deleterious substances and coatings. In J.F. Lamond & J.H. Pielert, eds. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials*, ASTM STP 169D. Bridgeport, NJ: ASTM International. pp.355-64.

Fournari, R., Ioannou, I. & Petrou, M.F., 2011. On the soundness of aggregates and its effect on mortar properties. In Ioannou, I. & Theodoridou, M., eds. *SWBSS 2011 Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*. Limassol, Cyprus, 2011.

Fournari, R., Ioannou, I. & Vatyliotis, D., 2015. A study of fine aggregate properties and their effect on the quality of cementitious composite materials.. In Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F., eds. *IAEG XII Congress Engineering Geology for Society and Territory-Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation, 15-19 Sep 2014 Torino, Italy*. Springer: New York and London. pp.33-36.

## Βιβλιογραφία

- Fowler, D.W., Allen, J.J., Lang, A. & Range, P., 2006. *The Prediction of coarse aggregate performance by Micro-Deval and other aggregate test*. Research Report ICAR 507-1F. Texas: Texas: International Center for Aggregates Research.
- Franzini, M., Leoni, L., Lezzerini, M. & Cardelli, R., 2007. Relationships between mineralogical composition, water absorption and hydric dilatation in the "Macigno" sandstones from Lunigiana (Massa, Tuscany). *European Journal of Mineralogy*, 19, pp.113–23.
- Galloway, J.E.J., 1994. Grading, shape, and surface properties. In P. Klieger & J. Lamond, eds. *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials. STP 169C*. Philadelphia: ASTM International. pp.401-10.
- Gambhir, M.L., 2013. *Concrete Technology: Theory and Practice*. 5<sup>th</sup> ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Gandhi, P.M. & Lytton, R.L., 1984. *Evaluation of aggregates for acceptance in asphalt paving mixtures*. 53. Asphalt Paving Technology.
- Garrity, L. & Kriege, H., 1935. Studies of accelerated soundness tests. In Garrity, L., Kriege, H.F., Discusser, P.I., Bauer, E.E., Grant, F.R., Schofield, H.H., eds. *Proceedings of Highway Research Board.*, 1935.
- Garzanti, E. Andò, S. & Scutellà, M., 2000. Actualistic Ophiolite provenance: the Cyprus case. *The Journal of Geology*, 108(2), pp.199-218.
- Gatchalian, D., 2005. *Characterization of Aggregate resistance to degradation in stone matrix asphalt mixtures*. MSc Thesis. Texas: Texas A&M University.
- Gill, R., 2010. *Igneous rocks and processes: a practical guide*. Chichester, West Sussex, UK: Wiley-Blackwell.
- Gillis, K.M., 2002. The rootzone of an ancient hydrothermal system exposed in the Troodos Ophiolite, Cyprus. *The Journal of Geology*, 110, pp.57–74.
- Gillott, J.E., 1980. Properties of aggregates affecting concrete in North America. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 13(4), pp.289-303.
- Glasser, O., 1993. *Wilhelm Conrad Röntgen and the early history of the Roentgen Rays*. Norman Publishing.
- Goldstein, J., Newbury, D.E., Echlin, P., Joy, D.C., Fiori, C., Lifshin, E., 1992. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis: A Text for Biologists, Materials Scientists, and Geologists*. 2<sup>nd</sup> ed. London and New York: Plenum Press.
- Goltermann, P., Johansen, V. & Palba, L., 1997. Packing of aggregates: An alternative tool to determine the optimal aggregate mix. *ACI Materials Journal*, 94(5), pp.435-43.

### Βιβλιογραφία

- Gonçalves, J.P. Tavares, L.M., Toledo Filho, R.D., Fairbairn, E.M.R., Cunha, E.R, 2007. Comparison of natural and manufactured fine aggregates in cement mortars. *Cement and Concrete Research*, 37, pp.924–32.
- Goswami, S.C., 1984. Influence of geological factors on soundness and abrasion resistance of road surface aggregates: a case study. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 30, pp.59-61.
- Grattan-Bellew, P.E., 2000. Petrographic and technological methods for evaluation of concrete aggregates. In V.S. Ramachandran & J.J. Beaudoin, eds. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications*. New Jersey: Noyes Publications. pp.63-104.
- Graves, R.E., 2006. Grading shape and surface texture. In J.F. Lamond & J.H. Pielert, eds. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials ASTM STP 169D*. Bridgeport, NJ: ASTM International. pp.337-45.
- Green, K.M., Hoff, W.D., Carter, M.A. & Wilson, M.A., 1999. A high pressure permeameter for the measurement of liquid conductivity of porous construction materials. *Review of Scientific Instruments*, 70, pp.3397-401.
- Gullerud, K.J. & Cramer, S., 2003. *Effects of aggregates coatings and films on concrete performance*. Wisconsin: University of Wisconsin.
- Gupta, A.S. & Rao, S.K., 2001. Weathering indices and their applicability for crystalline rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 60, pp.201-21.
- Haach, V.G., Vasconcelos, G. & Lourenco, P.B., 2011. Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 25(6), pp.2980–87.
- Hadjipanayiotou, C., 1997. Environmental issues related to quarrying activities in Cyprus. In P.G. Marinos, G.C. Koukis, G.C. Tsiambaos & G.C. Stournaras, eds. *Engineering Geology and the Environment*. Rotterdam Netherlands: A.A. Balkema. pp.2395-400.
- Hall, C. & Hamilton, A., 2015. Porosity–density relations in stone and brick materials. *Materials and Structures*, 48, pp.1265–71.
- Hall, C. & Hamilton, A., 2016. Porosities of building limestones: using the solid density to assess data quality. *Materials and Structures*, 49, pp.3969–79.
- Hall, C. & Hoff, W.D., 2012. *Water transport in brick, stone, concrete*. London: Spon Press.
- Hall, C. & Yau, M.H.R., 1987. Water movement in porous building materials--IX. The water absorption and sorptivity of concrete. *Building and Environment*, 22, pp.77-82.

## Βιβλιογραφία

- Hanna, A.N., 2003. *Aggregate tests for portland cement concrete pavements: review and recommendations*. Number 281. National Cooperative Highway Research Program.
- Han, V., Ros, S. & Shima, H., 2013. Effects of sand content, superplasticizer dosage, and mixing time on compressive strength of mortar. *ACI Materials Journal*, 110(1), pp.23-31.
- Hansson, M., Berg, G. & Isaksson, M., 2009. Determination of Iodine in Vivo and Vitro by X - Ray Fluorescence. Analysis methodology and applications. In V.R. Preedy, G.N. Burrow & R.R. Watson, eds. *Comprehensive Handbook of Iodine: Nutritional, Biochemical, Pathological and Therapeutic Aspects*. USA: Academic Press. pp.29-37.
- Haraldsson, H., 1984. Relations between petrography and the aggregate properties of Icelandic rocks. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 30(1), pp.73-76.
- Harris, J.P. & Chowdhury, A., 2007. *Tests to identify poor quality coarse limestone aggregates and acceptable limits for such aggregates in bituminous mixes*. FHWA/TX-05/0-4523-2. Texas: Texas Transportation Institute.
- Harrison, R.W. Newell, W.L., Batihanli, H., Panayides, I., McGeehin, J.P., Mahan, S.A., Ozgur, A., Tsiolakis, E., Necdet, M., 2004. Tectonic framework and Late Cenozoic tectonic history of the northern part of Cyprus: implications for earthquake hazards and regional tectonics. *Journal of Asian Earth Sciences*, 23, pp.191-210.
- Hartley, A., 1974. A review of the geological factors influencing the mechanical properties of road surface aggregates. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 7, pp.69–100.
- Harutyunyan, V.S. Abovyan, E.S., Monteriro, P.J.M., Mkrtchyan, V.P, Balyan, M.K., 2000. Microstrain distribution in calcium hydroxide present in the interfacial transition zone. *Cement and Concrete Research*, 30(5), pp.709– 713.
- Hasdemir, S., Tugrul, A. & Yilmaz, M., 2016. The effect of natural sand composition on concrete strength. *Construction and Building Materials*, 112, pp.940–48.
- Haskins, D.R. & Bell, F.G., 1995. Drakensberg basalts: their alteration, breakdown and durability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 28, pp.287-302.
- Hayens, H., 2005. ASTM C88 Test on soundness of aggregate using sodium sulfate or magnesium sulfate: a study of the mechanisms of damage. *Journal of ASTM International*, 2(Paper ID JAI12517).
- Haynes, R., 1984. *Optical microscopy of materials*. London: Blackie and Son Limited.
- Herrick, D.H., 1994. Stone, crushed. In D.D. Carr, ed. *Industrial Minerals and Rocks*. 6<sup>th</sup> ed. Ann Arbor, Michigan: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, pp.975-86.

## Βιβλιογραφία

Higgs, N.B., 1986. Preliminary studies of methylene blue adsorption as a method of evaluating degradable smectite-bearing concrete aggregate sands. *Cement and Concrete Research*, 16, pp.525-34.

Hoare, R.A., 2003. *Feasibility of using the Micro-Deval Test Method as an Aggregate Production Quality Control Tool*. MSc. Texas: Texas Tech University, Civil Engineering.

Hossain, M.S., Lane, D.S. & Schmidt, B.N., 2007. *Use of the Micro-Deval test for assessing the durability of Virginia aggregates*. Final Report VTRC 07-R29. Richmond, Virginia: Virginia Transportation Research Council.

Hunkeler, F., 2005. Corrosion in reinforced concrete: processes and mechanisms. In H. Böhni, ed. *Corrosion in concrete structures*. Cambridge, Boca Raton: Woodhead Publishing Ltd and CRC Press. pp.1-46.

Hu, J. & Wang, K., 2007. Effects of size and uncompacted voids of aggregate on mortar flow ability. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 5(1), pp.75-85.

Ioannou, I., Fournari, R. & Petrou, M., 2013. Testing the soundness of aggregates using different methodologies. *Construction and Building Materials*, 40, pp.604–10.

Ioannou, I., Fournari, R., Petrou, M.F. & Vrahimis, S., 2011. On the soundness and other physicomechanical properties of crushed aggregates from Cyprus used in the production of asphalt concrete. In Nikolaides, A.F., ed. *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Bituminous Mixtures and Pavements (Vol. 1)*. Thessaloniki, Greece, 2011.

Ioannou, I. Petrou, M.F., Fournari, R., Andreou, A., Hadjigeorgiou, C., Tsikouras, B., Hatzipanagiotou, K., 2010. Crushed limestone as an aggregate in concrete production: the Cyprus case. *Geological Society Special Publication*, 331, pp.127–35.

Iosif-Stylianou, I. Tassou, S., Christodoulides, P., Panayides, I., Florides, G., 2016. Measurement and analysis of thermal properties of rocks for the compilation of geothermal maps of Cyprus. *Renewable Energy*, 88, pp.418 - 429.

Jana, D., 2007. Concrete scaling – a critical review. In *Proceedings of the Twenty-Ninth Conference on Cement Microscopy Quebec City*. Canada, 2007.

Järvenpää, H., 2001. *Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects on concrete*. 122. Espoo: Helsinki University of Technology Department of Materials Science and Rock Engineering Laboratory of Mechanical Process-and Recycling Technology.

Jayawickrama, P., Hossain, S. & Hoare, A., 2007. *Long-term research on bituminous coarse aggregate: Use of Micro-Deval Test for Project Level Aggregate Quality Control*. FHWA/TX-06/0-1707-9. Texas: Texas Transportation Institute.

Jenkins, R., 2008. X-Ray Fluorescence analysis. In E. Lifshin, ed. *X-ray Characterization of Materials*. John Wiley & Sons. pp.171-208.

## Βιβλιογραφία

- Jha, B. & Singh, D.N., 2016. *Fly Ash Zeolites*. Singapore: Springer Science+Business Media.
- Johansson, E., 2011. *Technological properties of rock aggregates*. Doctoral Thesis. Sweden: Department of Civil Engineering and National Resources Engineering, Division of Mining and Geotechnical Engineering. Lulea University of Technology.
- Kanbar-Agha, F., 1953. *Effect of Aggregate on the Quality of Concrete*. MSc Thesis. Manhattan, Kansas: Kansas State University, Department of Civil Engineering.
- Kandhal, P. & Parker, F., 1998. *Aggregate tests related to asphalt concrete performance in pavements*. NCHRP 405. Washington, D.C.: Transportation Research Board.
- Kandhal, P.S., Parker, F. & Mallick, R.B., 1997. *Aggregate tests for hot mix asphalt: state of the practice*. NCAT Report No. 97-06. Auburn: National Center for Asphalt Technology.
- Kanellopoulos, A., Petrou, M.F. & Ioannou, I., 2012. Durability performance of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 37, pp.320-25.
- Kaplan, M.F., 1959. Flexural and compressive strength of concrete as affected by the properties of coarse aggregates. *American Concrete Institute*, 55, pp.1193-208.
- Kasim, M. & Shakoor, A., 1996. An investigation of the relationship between uniaxial compressive strength and degradation for selected rock types. *Engineering Geology*, 44(1-4), pp.213-27.
- Kazi, A. & Al-Mansour, Z.R., 1980. Influence of geological factors on abrasion and soundness characteristics of aggregate. *Engineering Geology*, 15, pp.195-203.
- Keikha, T. & Keykha, H.A., 2013. Correlation between mineralogical characteristics and engineering properties of granitic rocks. *The Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 18, pp.4055-65.
- Kelsall, P.C., Watters, R.J. & Franzone, J.G., 1986. Engineering characterization of fissured, weathered dolerite and vesicular basalt. In *27<sup>th</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics Rock Mechanics: Key to Energy Production*. Tuscaloosa, USA, 1986.
- Kline, S.W., Phiukhao, W., Griffin, M.L. & Miller, J.W., 2007. Evaluation of the sodium sulfate soundness test for qualifying dolomites of northern Arkansas for construction aggregate. In Shaffer, N.R. & DeChurch, D.A., eds. *Proceedings of the 40<sup>th</sup> Forum on the Geology of Industrial Minerals.*, 2007. Indiana Geological Survey Occasional Paper 67.
- Kondelchuk, D. & Miskovsky, K., 2009. Determination of the test methods sensitive to free mica content in aggregate fine fractions. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18, pp.282-86.

## Βιβλιογραφία

- Korkanc, M. & Tugrul, A., 2004. Evaluation of selected basalts from Nigde, Turkey, as source of concrete aggregate. *Engineering Geology*, 75(3-4), pp.291–307.
- Kosmatka, S.H., 2008. Properties and performance of normal - strength and high - strength concrete. In E.G. Nawy, ed. *Concrete Construction Engineering Handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group. pp.5:1-45.
- Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B. & Panarese, W.C., 2003. *Design and control of concrete mixtures*. 14<sup>th</sup> ed. USA: Portland Cement Association.
- Koukis, G., Sabatakakis, N. & Spyropoulos, A., 2007. Resistance variation of low-quality aggregates. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, pp.457–66.
- Kozaris, I.A. Pavlidou, E., Salzer, R., Capitani, D., Spinella, A., Caponetti, E., 2013. Identification techniques I. Chapter 3. In E.A. Varella, ed. *Conservation Science for the Cultural Heritage: Applications of Instrumental Analysis*. Heidelberg: Springer Science & Business. pp.37-90.
- Kozul, R. & Darwin, D., 1997. *Effects of aggregate type, size, and content on concrete strength and fracture energy*. SM Report No. 43. Lawrence, Kansas: University Of Kansas Center For Research, Inc. Structural Engineering and Engineering Materials.
- Kramar, U., 1999. X-ray Fluorescence spectrometers. In J.C. Lindon, ed. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Oxford: Elsevier. pp.2467-77.
- Krishna, G.V., Dinesh, A. & Srinivasulu, E., 2016. Causes of concrete failure. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 4(4), pp.198-206.
- Krynine, D.P. & Judd, W.R., 1957. *Principles of engineering geology and geotechnics*. New York: McGraw-Hill.
- Kumara, R. & Bhattacharjee, B., 2003. Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, pp.155–64.
- Kwan, A.K.H. & Mora, C.F., 2001. Effects of various, shape parameters on packing of aggregate particles. *Magazine of Concrete Research*, 53(2), pp.91-100.
- La Iglesia, A., Gonzalez, V., Lopez-Acevedo, V. & Viedma, C., 1997. Salt crystallization in porous construction materials I. Estimation of Crystallization Pressure. *Journal of Crystal Growth*, 177, pp.111-18.
- Lamichhane, K., 2005. *The effect of aggregate porosity on the chloride penetrability of high-performance concretes*. PhD Thesis. Milwaukee: University of Wisconsin.
- Lanas, J. & Alvares, J.I., 2003. Masonry repair lime – based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*, 33, pp.1867-76.



## Βιβλιογραφία

Lane, B.C., Rogers, C.A. & Senior, S.A., 2000. The Micro-Deval test for aggregates in asphalt pavement. In *8<sup>th</sup> Annual Symposium of the International Center for Aggregate Research*. Denver, Colorado, 2000.

Langer, W.H., 1993. *Natural aggregates of the conterminous United States*. 2<sup>nd</sup> ed. WASHINGTON: U.S. Geological Survey Bulletin No. 1594.

Langer, W.H., 2006. Crushed stone. In J.C. Kogel, N.C. Trivedi, J.M. Barker & S.T. Krukowski, eds. *Industrial minerals & rocks. Commodities, markets and uses*. 7<sup>th</sup> ed. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. pp.171-80.

Larrard, F. & Belloc, A., 1997. The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete. *ACI Materials Journal*, 94, pp.417-25.

Leemann, A. & Holzer, L., 2001. Influence of mica on the properties of mortar and concrete. In Stamatakis, M., Georgali, B., Fragoulis, D. & Toumbakari, E., eds. *Proceedings of the 8<sup>th</sup> Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials*. Athens, Greece, 2001.

Legg, F.E.J., 1998. Aggregates. In J. Dobrowolski, ed. *Concrete Construction Handbook*. 4th ed. New York: McGraw-Hill.

Lewin, S.Z., 1981. The mechanism of masonry decay through crystallization. In S.M. Barkin, ed. *Conservation of Historic Stone Buildings and Monuments*. Washington DC: National Academy of Sciences. pp.120-44.

Lewis, D.W. & Dolch, W.L., 1955. Porosity and absorption. In L.E. Gregg, ed. *No.169. Significance of test and properties of concrete and concrete aggregates*. Philadelphia: ASTM. pp.303-13.

Lindquist, J.E., Malaga, K., Middendorf, B. & Savukoski, M., 2007. *Frost resistance of natural stone, the importance of micro and nano-porosity*, Geological Survey of Sweden. [Online] Geological Survey of Sweden, External research project report Available at: [http://www.sgu.se/dokument/fou\\_extern/Lindqvist-etal\\_2007.pdf](http://www.sgu.se/dokument/fou_extern/Lindqvist-etal_2007.pdf) [Accessed 2017 August 18].

Little, D. Button, J., Jayawickrama, P., Solaimanian, M., Hudson, B., 2001. *Literature review for long-term research on bituminous coarse aggregate*. Report No : FHWA/TX-01/0-1707-1. Texas: Texas Department of Transportation and the Federal Highway Administration.

Liu, J., Mullin, A. & Rein, J., 2013. *Use of the Micro-Deval test for assessing Alaska aggregates*. FHWA-AK-RD-12-22. Alaska University Transportation Center.

Liu, Z.-a., Zhou, M.-k. & Yao, C.-k., 2014. Relationship between methylene blue value of manufactured sand and mortar properties. *Key Engineering Materials* , 629-630, p.612.

## Βιβλιογραφία

- Li, B., Zhou, M. & Wang, J., 2011. Effect of the methylene blue value of manufactured sand on the performance of concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 9(2), pp.127-32.
- Lopez-Arce, P., Garcia-Guinea, J., Benavente, D., Tormo, L., Doehne, E. 2008. Deterioration of dolostone by magnesium sulfate salt: an example of incompatible building materials at Bonaval Monastery Spain. *Construction and Building Materials*, 23, pp.846–55.
- Lothenbach, B. Winnefeld, F., Alder, C., Wieland, E., Lunk, P., 2007. Effect of temperature on the pore solution, microstructure and hydration products of Portland cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 37, pp.483–91.
- Luce, A.D., 2006. *Analysis of aggregate imaging system (Aims) measurements and their relationship to asphalt pavement skid resistance*. MSc. Texas A&M University.
- Lyman, C.E., Newbury, D.E., Golds, J.I., Goldstein, J.I., Williams, D.B., Romig, A.D.Jr, Armstron, John T.; Echlin, P., Fiori, C.E., Joy, D.C., Lifshin, E., Peters, K.R., 1992. *Scanning electron microscopy, x-ray microanalysis and analytical electron microscopy a laboratory workbook*. New York: Plenum Press.
- Mabie, J.W., 2000. *Statistical analysis of bituminous coarse aggregate data*. MSc Thesis. Texas: Faculty of Texas Tech University.
- Mahmoud, & Masad, E., 2007. Experimental methods for the evaluation of aggregate resistance to polishing, abrasion, and breakage. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(11), pp.977-85.
- Makani, A. & Vidal, T., 2013. Relationships between mineralogical and physico-mechanical properties of granitic aggregates. In *Special Issue for International Congress on Materials & Structural Stability*. Rabat, Morocco. pp.25-31.
- Margaritz, M. & Taylor, H.P., 1974. Oxygen and hydrogen isotope studies of serpentinization in the Troodos ophiolite complex, Cyprus. *Earth and Planetary Science Letters*, 23, pp.8-14.
- Marinos, P., Hoek, E. & Marinos, V., 2006. Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, pp.129–42.
- Masad, E., Rezaei, A., Chowdhury, A. & Harris, P., 2009. *Predicting asphalt mixture skid resistance based on aggregate characteristics*. Report No. FHWA/TX-09/0-5627-1. Austin, Texas: Texas Transportation Institute.

### Βιβλιογραφία

Maslehuddin, M., Sharif, A.M., Shameen, M., Ibrahim, M., Barry, M.S., 2003. Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, 17(2), pp.105-12.

Maza, M., Naceri, A. & Zitouni, S., 2016. Physico-mechanical properties of mortar made with binary natural fine aggregates (dune sand and crushed sand) with and without chemical admixture. *Asian Journal of Civil Engineering (Bhrc)*, 17(5), pp.663-82.

McArthur, H. & Spalding, D., 2004. *Engineering materials science: properties, uses, degradation, remediation*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.

McCallum, J. & Robertson, A., 1995. Late Pliocene-Early Pleistocene Athalassa Formation, north-central Cyprus: carbonates sand bodies in a shallow seaway between two emerging landmasses. *Terra Nova*, 7, pp.265-78.

McFeat Smith, I., 1977. Rock property testing for the assessment of tunnelling machine performance. *Tunnels Tunnelling*, 9, pp.29-31.

McIntosh, J.D., 1970. Specifying the quality of beddings mortars. *Proceedings of the British Ceramic Society*, 17, pp.65-82.

McKay, W.B., 2015. *McKay's building construction*. reprinted ed. New York: Routledge.

McLaughlin, J.P., Woods, K.B., Mielenz, R.C. & Rockwood, N.C., 1960. Distribution, production, and engineering characteristics of aggregates, section 16. In K.B. Woods, D.S. Berry & W.H. Goetz, eds. *Highway engineering handbook: New York*. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc. pp.p. 16-1 to 16-53.

Meddah, M.S., Zitouni, S. & Belâabes, S., 2010. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), pp.505-12.

Mehta, P.K. & Monteiro, P.J.M., 2013. *Concrete. Microstructure, properties, and materials*. 4<sup>th</sup> ed. New York: The McGraw-Hill Companies.

Mielenz, R.C., 1994. Petrographic evaluation of concrete aggregates. In P. Klieger & J. Lamond, eds. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete Making Materials. ASTM Special Publication STP 169C*. Philadelphia: ASTM International. pp.341-64.

Mindess, S., 2008. Concrete constituent materials. In E.G. Nawy, ed. *Concrete construction engineering handbook*. 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group. pp.1-26.

Mindess, S. & Young, J.F., 1981. *Concrete*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

### Βιβλιογραφία

Miskovsky, K., Taborda Duarte, M., Kou, S.Q. & Lindqvist, P.-A., 2004. Influence of the mineralogical composition and textural properties on the quality of coarse aggregates. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13(2), pp.144-50.

Modestou, S., Theodoridou, M., Fournari, R. & Ioannou, I., 2015. Physico-mechanical properties and durability performance of natural building and decorative carbonate stones from Cyprus. *Geological Society London Special Publications 416*, pp.145-62.

Moores, E.M. & Vine, F.J., 1971. The Troodos Massif, Cyprus and other ophiolites as oceanic crust: evaluation and implications. *Philosophical Transactions for the Royal Society of London. Series A*, 268(1192), pp.443-67.

Mpalatsas, I., Rigopoulos, I., Tsikouras, B. & Hatzipanagiotou, K., 2013. Evaluation of Cretaceous limestones from the Aitolokarnania province (Western Greece) for their use as road aggregates in terms of their content in swelling clay. In *13<sup>th</sup> International Congress*. Chania, 2013. Bulletin of the Geological Society of Greece, vol. XLVII.

Muhit, I.B., Haque, S. & Rabiul Alam, M., 2013. Influence of crushed coarse aggregates on properties of concrete. *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 1(5), pp.103-06.

Mukhopadhyay, A., Pitre, B., Russell, A., Arambula, E., Estakhri, C., Deng, Y., 2013. *Treatments for clays in aggregates used to produce cement concrete, bituminous materials, and chip seals*. Technical Report Final Report No. FHWA/TX-13/0-6444-1. Austin: Texas Department of Transportation.

Muñoz, J., Tejedor, M.I., Anderson, M.A. & Cramer, S.M., 2005. *Effects of coarse aggregate clay-coatings on concrete performance*. Report No. 01-G-002-01-4.2. Wisconsin: University of Wisconsin-Madison Innovative Pavement Research Foundation.

Muñoz, J.F., Tejedor, M.I., Anderson, M.A. & M. Cramer, S., 2010. Detection of aggregate clay coatings and impacts. *ACI Materials Journal*, 107(4), pp.387–95.

Murray, H.H., 1991. Overview - clay mineral applications. *Applied Clay Science*, 5, pp.379-95.

Nalsund, R., 2014. *Railway ballast characteristics, selection criteria and performance*. PhD Thesis. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

Nehdi, M., 2014. Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art. *Construction and Building Materials*, 51, pp.372–82.

Neville, A.M., 2011. *Properties of concrete*. 5<sup>th</sup> ed. Essex: Pearson Education Limited.

Neville, A.M. & Brooks, J., 1993. *Concrete technology*. 2<sup>nd</sup> ed. England: Pearson Education Limited.

### Βιβλιογραφία

Newman, J. & Choo, B.S., 2003. *Advanced concrete technology*. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Ng, S. & Plank, J., 2012. Interaction mechanisms between Na montmorillonite clay and MPEG-based polycarboxylate superplasticizers. *Cement and Concrete Research*, 42(6), pp.847–54.

Nichols, G., 2009. *Sedimentology and Stratigraphy*. 2<sup>nd</sup> ed. John Wiley & Sons.

Nikolaides, A., Manthos, E. & Sarafidou, M., 2007. *Sand equivalent and methylene blue value of aggregates for highway engineering*. No. 10. Poznan: Publishing House of Poznan University of Technology Foundations of civil and environmental engineering.

Norvell, J.K., Stewart, J.G., Maria, C.G., Juenger, D.V., Fowler, W., 2007. *Effect of clays and clay-sized particles on concrete*. 15<sup>th</sup> annual symposium research papers. Austin, Texas: International Center for Aggregates Research (ICAR).

Norvell, J.K., Stewart, J.G., Juenger, & Fowler, D.W., 2007. Influence of clays and clay-sized particles on concrete performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19 (12), pp.1053-59.

Ortiz, J., 2016. *A sustainable industry for a sustainable Europe*. Annual Review 2015-2016. Belgium: UEPG European Aggregates Association.

Ortiz, J., Aguado, A., Agulló, & García, T., 2005. Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: simulation of hot and cold weather conditions. *Cement and Concrete Research*, 10, pp.1970-11979.

Paige-Green, P., 2007. Durability testing of basic crystalline rocks and specification for use as road base road base aggregate. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 66, p.431.

Papayianni, I., 1997. Effectiveness of superplasticizers and air-entraining agents on lime-based repair mortars. In *Fifth CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers*. Rome, 1997.

Parka, N. & Hansen, T., 1982. On the correlation of consistency and strength of concrete to the attrition rate of fine aggregate. *Cement, Concrete and Aggregates*, 4(1), pp.24-27.

Pavía, S. & Toomey, B., 2008. Influence of the aggregate quality on the physical properties of natural feebly-hydraulic lime mortars. *Materials and Structures*, 41(3), pp.559-69.

Petkovšek, A., Maček, M., Pavšič, P. & Bohar, F., 2010. Fines characterization through the methylene blue and sand equivalent test: comparison with other experimental techniques and application of criteria to the aggregate quality assessment. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(4), pp.561-74.

Petruk, W., 2000. *Applied mineralogy in the mining industry*. Amsterdam: Elsevier.

## Βιβλιογραφία

Pettijohn, F.J., Potter, & Siever, R., 1987. *Sand and Sandstone*. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer-Verlag.

Phillips, F.W., 2000. *Comparative analysis between the magnesium sulfate soundness and micro – deval tests in the evaluation of bituminous aggregates*. MSc Thesis. Texas: Texas Tech University.

Poitevin, P., 1999. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. *Cement and Concrete Composites*, 21(2), pp.89–97.

Pola, A., Crosta, G.B., Fusi, N. & Castellanza, R., 2014. General characterization of the mechanical behaviour of different volcanic rocks with respect to alteration. *Engineering Geology*, 169, pp.1–13.

Polat, R., Yadollahi, M.M., Sagsoz, E. & Arasan, S., 2013. The correlation between aggregate shape and compressive strength of concrete: digital image processing approach. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 2(3), pp.62-80.

Polivka, M. & Mehta, P.K., 1979. Use of aggregates producing high shrinkage with shrinkage-compensating cements. In C.H. Best, ed. *Living with Marginal Aggregates*. Montreal: ASTM STP 597. pp.36-44.

Pomonis, P., Rigopoulos, I., Tsikouras, B. & Hatzipanagiotou, K., 2007. Relationships between petrographic and physicomechanical properties of basic igneous rocks from the Pindos ophiolitic complex, NW Greece. In *Bulletin of the Geological Society of Greece vol. XXXX, Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Congress*. Athens, 2007.

Ponce, J.M. & Batic, O.R., 2006. Different manifestations of the alkali-silica reaction in concrete according to the reaction kinetics of the reactive aggregate. *Cement and Concrete Research*, 36(6), pp.1148-56.

Poole, A.B., 1992. Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete. In R.N. Swamy, ed. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow and London: Blackie. pp.1-29.

Poole, A.J. & Robertson, A.H.F., 1991. Quaternary uplift and sea-level change at an active plate boundary, Cyprus. *Journal of the Geological Society*, 148(1), pp.909-21.

Popovics, S., 1992. *Concrete materials: properties, specifications and testing*. 2<sup>nd</sup> ed. Park Ridge, New Jersey: Noeys Publications.

Potts, P.J., 2005. X-Ray Fluorescence Theory. In P. Worsfold, A. Townshend & C. Poole, eds. *Encyclopedia of Analytical Science*. Oxford: Elsevier. pp.409-18.

Prowell, B.D., Zhang, J. & Brown, E.R., 2005. *Aggregate properties and the performance of superpave-designed hot mix asphalt*. NCHRP Report 539. Washington, D.C.: Transportation Research Board of the National Cooperative Highway.

## Βιβλιογραφία

- Qin, F. & Hua, Z.J., 2012. Three-dimensional numeric modelling of concrete-like materials subjected to dynamic loadings. In H. Hao & Z.-X. Li, eds. *Advances in Protective Structures Research, IAPS special publication*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group. pp.33-64.
- Quiroga, P.N., 2003. *The effect of the aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete*. PhD Thesis. Austin, Texas: The University of Texas at Austin.
- Quiroga, P.N. & Fowler, D.W., 2004. *The effects of aggregates characteristics on the performance of portland cement concrete*. Research Report ICAR 104-1F. Austin, Texas: International Center for Aggregates Research The University of Texas at Austin.
- Qutaisat, S.A., 2011. Silicon drift detectors for synchrotron energy dispersive X-Ray Fluorescence spectroscopy (SDD for EDXRF). In *The Ninth SESAME users' meeting, Synchrotron-light for Experimental Science and Applications in the Middle East*. Amman, Jordan, 2011.
- Rached, M., Fowler, D.W. & Whitney, D.P., 2012. *Recommendations for achieving adequate surface friction and predicting skid values in class P concrete containing manufactured fine aggregates*. FHWA/TX-11/0-6255-P4. Texas: Texas Department of Transportation.
- Rack, P.D., 2004. *Optical Microscopy*. Lecture. Tennessee: University of Tennessee, Dept. of Materials Science and Engineering.
- Ramana, Y.V., Gogte, B.S. & Sarma, K.V.L.N.S., 1986. Physical properties of Indus ophiolites from Kashmir Himalaya. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 43, p.104—122.
- Rangaraju, P. & Edlinski, J., 2008. Comparative evaluation of Micro-Deval abrasion test with other toughness/ abrasion resistance and soundness tests. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 20, pp.343-51.
- Rangaraju, P.R., Edlinski, J. & Amirhanian, S., 2005. *Evaluation of South Carolina aggregate durability properties*. FHWA-SC-05-01. Columbia, SC: South Carolina Department of Transportation.
- Reichel, A., Hochberg, A. & Köpk, C., 2005. *Plaster, render, paint and coatings: details, products, case studies*. Munich: Springer Science & Business Media.
- Richardson, D.N., 2009. *Quick test for percent of deleterious material*. Report No RI07-052. Missouri: Missouri Department of Transportation Organizational Results.
- Richardson, C., Cann, J., Richards, H. & Cowan, J., 1987. Metal-depleted root zones of the Troodos ore-forming hydrothermal systems, Cyprus. *Earth and Planetary Science Letters*, 84, pp.243-53.

### Βιβλιογραφία

Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P. & Hatzipanagiotou, K., 2010. The influence of alteration on the engineering properties of dolerites: The Examples from the Pindos and Vourinos ophiolites (northern Greece). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 47, pp.69–80.

Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P. & Hatzipanagiotou, K., 2013. Determination of the interrelations between the engineering parameters of construction aggregates from ophiolite complexes of Greece using factor analysis. *Construction and Building Materials*, 49, pp.747–57.

Rigopoulos, I., Tsikouras, B., Pomonis, P. & Hatzipanagiotou, K., 2014. Correlations between petrographic and geometrical properties of ophiolitic aggregates from Greece. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, pp.1–12.

Rismantojo, E., 2002. *Permanent deformation and moisture susceptibility related aggregate tests for use in hot-mix asphalt pavements*. PhD Thesis. West Lafayette: Purdue University.

Robertson, A.H.F., 1977. The Kannaviou Formation, Cyprus: volcanoclastic sedimentation of a probable late Cretaceous volcanic arc. *Journal of the Geological Society*, 134, pp.269-92.

Robertson, A.H.F., Eaton, S., Follows, E.J. & Payne, A.S., 1995. Depositional processes and basin analysis of Messinian evaporites in Cyprus. *Terra Nova*, 7, pp.233-53.

Robertson, A.H.F. & Woodcock, N.H., 1986. The geological evolution of the Kyrenia Range: a critical lineament in the Eastern Mediterranean. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A*, 317(1539), pp.141-71.

Robinson, P.T., Malpas, J. & Xenophontos, C., 2003. The Troodos Massif of Cyprus: Its role in the evolution of the Ophiolite concept. In Y. Dilek & S. Newcomb, eds. *Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought*. Colorado, U.S.A.: The Geological Society of America, Special Paper 373. pp.295-308.

Rodriguez-Navarro, C. & Doehne, E., 1999. Salt weathering: influence of evaporation rate, supersaturation and crystallization pattern. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24, pp.191-209.

Rogers, C., 1998. Canadian experience with the microDeval test for aggregates. In J.-P. Latham, ed. *Advances in Aggregates and Armourstone Evaluation*. London: Geological Society of London. pp.139-48.

Rogers, C.A., Bailey, M.L. & Price, B., 1991. *Micro-Deval test for evaluating the quality of fine aggregate for concrete and asphalt*. 1301 68-76. Transportation Research Record.



## Βιβλιογραφία

- Rogers, C.A., Gorman, B. & Lane, B., 2002. Skid-Resistance aggregate in Ontario. In *Proceedings of the 10<sup>th</sup> Annual Symposium, International Center for Aggregates*. Baltimore, Maryland, 2002.
- Rogers, C.A., Lane, B.C. & Senior, S.A., 2003. The Micro-Deval abrasion test for coarse and fine aggregate in asphalt pavement. In *International Center for Aggregates Research 11<sup>th</sup> Annual Symposium: Aggregates - Asphalt Concrete, Bases and Fines*. Austin, Texas, 2003.
- Römer, H., 2005. *Theoretical Optics: An introduction*. Weinheim, Germany : Wiley-VCH.
- Ruedrich, J. & Siegesmund, S., 2007. Salt and ice crystallisation in porous sandstones. *Environmental Geology*, 52(2), pp.225–49.
- Ruiz-Agudo, E., Mees, F., Jacobs, P. & Rodriguez-Navarro, C., 2007. The role of saline solution properties on porous limestone salt weathering by magnesium and sodium sulfates. *Environmental Geology*, 52, pp.269–81.
- Sabatakakis, N., Koukis , G., Tsiambaos , G. & Papanakli, S., 2008. Index properties and strength variation controlled by microstructure for sedimentary rocks. *Engineering Geology*, 97, pp.80–90.
- Sarkar, S.L., Aimin, X. & Jana, D., 2001. Scanning Electron Microscopy, X-Ray microanalysis of concretes. In V.S. Ramachandran & J.J. Beaudoin, eds. *Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications*. New Jersey: Noyes Publications. pp.231-74.
- Sarkar, S.L. & Samet, B., 1994. The microstructural approach to solving clinker - related problems. In S.M. DeHayes & D. Stark, eds. *Petrography of Cementitious Materials, ASTM STP 1215*. Philadelphia: ASTM. pp.26-50.
- Scherer, G.W., 2004. Stress from crystallization of salt. *Cement and Concrete Research*, 34, pp.1613–24.
- Schiffman, P. & Smith, B.M., 1988. Petrology and oxygen isotope geochemistry of a fossil seawater hydrothermal system within the Solea graben, northern Troodos ophiolite, Cyprus. *Journal of Geophysical Research*, 93, pp.4612-24.
- Scholer, C.F. & Baker, S.D., 1973. *Effect of variations in coarse-aggregate gradation on properties of portland cement concrete*. Project No. : C-36-42J. Indiana: Joint Highway Research Project Engineering Experiment Station Purdue University.
- Schouenborg, B. & Akesson, U., 2004. Aggregate research in support of European Standardization. In R. Hack, R. Azzam & R. Charlier, eds. *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe: A European Perspective*. Heidelberg: Springer Science & Business Media.

### Βιβλιογραφία

- Schumann, W., 2008. *Minerals of the world*. 2<sup>nd</sup> ed. New York / London: Sterling Publishing Company.
- Sengul, Ö., Tasdemir, C. & Tasdemir, M.A., 2002. Influence of aggregate type on mechanical behavior of normal and high-strength concretes. *ACI Materials Journal*, 99(6), pp.528-33.
- Senior, S.A. & Rogers, C.A., 1991. *Laboratory tests for predicting coarse aggregate performance in Ontario*. Canada: Transportation Research Board.
- Shakoor, A. & Bonelli, R.E., 1991. Relationship between petrographic characteristics, engineering index properties, and mechanical properties of selected sandstones. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, XXVIII(1), pp.55-71.
- Sharma, A.K., 2005. *Text book of correlations and regression*. New Delhi: Discovery Publishing House.
- Shilstone, J.M.S., 1990. Concrete mixture optimization. *Concrete International: Design and Construction*, 12(6), pp.33-39.
- Sims, I. & Brown, B., 1988. Concrete aggregates. In P. Hewlett, ed. *Lea's chemistry of cement and concrete*. 4<sup>th</sup> ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. pp.907-1015.
- Sinha, S.N., 2002. *Reinforced concrete design*. 2<sup>nd</sup> ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education.
- Skalny, J.P., Marchand, J. & Odler, I., 2002. *Sulfate attack on concrete*. London : Spon Press.
- Slyter, E.M. & Slyter, H.S., 1992. *Light and Electron Microscopy*. 1<sup>st</sup> ed. Cambridge : Cambridge University Press.
- Smith, P.J., 2012. Materials and chemical analysis of electronic devices. In A. Landzberg, ed. *Microelectronics Manufacturing Diagnostics Handbook*. New York: Springer Science & Business Media. pp.396-424.
- Smith, M.R. & Collis, L., 2001. *Aggregates: sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. London: Geological Society of London, Engineering Geology Special Publications, 17.
- Sousa, L.M.O., Suarez del Rio, L.M., Calleja, L., Ruiz de Argandona, V.G., Rodriguez R.A., 2005. Influence of microfractures and porosity on the physico-mechanical properties and weathering of ornamental granites. *Engineering Geology*, 77, pp.153-68.
- Sredojevic, T., 2012. *Investigation of hydrothermal alteration processes in the Troodos Ophiolite and the Abitibi Greenstone Belt*. MSc Thesis. Ontario, Canada: The University of Western Ontario.

## Βιβλιογραφία

Stapel, E.E. & Verhoef, P.N.W., 1989. The use of the methylene blue adsorption test in assessing the quality of basaltic tuff rock aggregate. *Engineering Geology*, 26, pp.233-46.

Stark, D., 1975. Characteristics and utilization of coarse aggregates associated with D cracking. In ASTM, ed. *ASTM STP 597, Living with Marginal Aggregates*. Philadelphia, 1975.

Stefanidou, M., Papadopoulou, L., Pavlidou, E. & Papayianni, I., 2014. Applying microscopic techniques for the investigation of the behaviour of building materials. In A. Méndez-Vilas, ed. *Microscopy: advances in scientific research and education*. Badajoz, Spain: Formatex Research Center. pp.1064-70.

Stefanidou, M. & Papayianni, I., 2005. The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 27(9–10), pp.914-19.

Steiger, M. & Asmussen, S., 2008. Crystallization of sodium sulfate phases in porous materials: The phase diagram Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>–H<sub>2</sub>O and the generation of stress. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(17), pp.4291–4306.

Stewart, J.G., Norvell, J.K., Juenger, & Fowler, D.W., 2007. Influence of microfine aggregate characteristics on concrete performance. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 19(11), pp.957-64.

Stoiber, R.E. & Morse, S.A., 1994. *Crystal Identification with the Polarizing Microscope*. London: Chapman & Hall.

Streli, C., Wobrauschek, P. & Kregsamer, P., 1999. X-ray Fluorescence Spectroscopy, applications. In J.C. Lindon, ed. *Encyclopedia of Spectroscopy and Spectrometry*. Oxford: Elsevier. pp.2478-87.

Stutzman, P.E., 1994. Applications of scanning electron microscopy in cement and concrete petrography. In S.M. DeHayes, ed. *Petrography of Cementitious Materials ASTM STP 1215*. Philadelphia: ASTM. pp.74-90.

Swamy, R.N., 1992. Testing for alkali-silica reaction. In R.N. Swamy, ed. *The alkali-silica reaction in concrete*. Glasgow and London: Blakie. pp.54-95.

Sweet, H.S., 1948. Physical and Chemical Tests of Mineral Aggregates and their Significance. In ASTM, ed. *Special Technical Publication 83*. Philadelphia: Symposium on Mineral Aggregates. pp.47-73.

Szymoniak, T., 1986. *Development of a standard accelerated weathering test for aggregates using dimethyl sulfoxide (DMSO)*. MSc Thesis. Oregon: Oregon State University.

Tarefder, R.A., Zaman, M. & Hobson, K., 2003. Micro-Deval test for evaluating properties of roadway aggregate. *International Journal of Pavements : maintenance and rehabilitation of pavements and technological control*, 2(2), pp.8-19.

### Βιβλιογραφία

Theodoridou, M., Charalambous, E., Maravelakii-Kalaitzaki, P. & Ioannou, I., 2016. Amelioration of crushed brick - lime composites using nano-additives. *Cement and Concrete Composites*, 68, pp.77-87.

Thomas, M.D.A. & Forriald, K.J., 2007. Concrete aggregates and the durability of concrete. In C.L. Page & M.M. Page, eds. *Durability of concrete and cement composites*. 1<sup>st</sup> ed. Cambridge: CRC. pp.247-81.

Tia, M., Bekoe, P. & Chen, Y., 2012. *Development of tiered aggregate specifications for fdot use*. Project No. BDK75 977-29. Florida: Department of Civil and Coastal Engineering, Engineering School of Sustainable Infrastructure and Environment, Collage of Engineering, University of Florida.

Timur, A., Hemphkins, W.B. & Weinbrandt, R.M., 1971. Scanning electron microscope study of pore systems in rocks. *Journal of Geophysical Research*, 76, pp.4932-48.

Topal, T., 1996. The use of methylene blue adsorption test to assess the clay content of the Cappadocian tuff. In *Proceedings of the eight international congress on the deterioration and conservation of Stone*. Berlin, 1996.

Topçu, İ.B. & Demir, A., 2008. Relationship between methylene blue values of concrete aggregate fines and some concrete properties. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 35(4), pp.379-83.

Toth, J., 2009. Groundwater in Igneous, Metamorphic, and Sedimentary Rocks. In. In L. Silveira & E.J. Usunoff, eds. *Groundwater - Volume I*. Oxford, UK: EOLSS Publications Co Ltd. pp.67-96.

Troxell, G.E. & Davis, H.E., 1956. *Composition and properties of concrete*. New York: McGraw-Hill.

Tugrul, A., 2004. The effect of weathering on pore geometry and compressive strength of selected rock types from Turkey. *Engineering Geology*, 75, pp.215–27.

Tugrul, A., Hasdemir, S. & Yılma, M., 2015. The effect of feldspar, mica and clay minerals on compressive strength of mortar. In Lollino, G., Manconi, A., Guzzetti, F., Culshaw, M., Bobrowsky, P., Luino, F., eds. *Engineering Geology for Society and Territory – Volume 5*. Switzerland: Springer International Publishing. pp.93-96.

Tugrul, A. & Yilmaz, M., 2012. Assessing the quality of sandstones for use as aggregate in concrete. *Magazine of Concrete Research*, 64(12), pp.1067–78.

Tugrul, A. & Zarif, I.H., 1998. The influence of mineralogical textural and chemical characteristics on the durability of selected sandstones in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 57, pp.185-90.

### Βιβλιογραφία

- Ulusay, R., Turelli, K. & Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. *Engineering Geology*, 37, p.135-157.
- Van Atta, R.O. & Ludowise, H., 1976. *Microscopic and X-ray examination of rock for durability testing*. FHWA-RD-77-36. Washington: Portland State University.
- Varga, R.J. & Moores, , 1985. Spreading structure of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Geology*, 13(12), pp.846-50.
- Velde, B., 1992. *Introduction to clay minerals: chemistry, origins, uses and environmental significance*. Chapman & Hall.
- Vibett, N.J., 1993. Chemical alteration trends, fluid inclusion patterns and stable isotope compositions in the plutonic sequence of the Troodos ophiolite, Cyprus. *Journal of African Earth Sciences*, 17(2), pp.193-202.
- Vieira, M., 2015. Concrete. In M.C. Gonçalves & F. Margarido, eds. *Materials for construction and civil engineering: science, processing, and design*. Switzerland: Springer. pp.185-236.
- Wakizaka, Y., Ichikawa, K., Nakamura, Y. & Anan, S., 2001. Deterioration of concrete due to specific minerals. In *Aggregate 2001 Symposium: Environment and Economy*. Helsinki, 2001.
- Wang, D., Wang, H., Bu, Y., Schulze, C., Oeser, M., 2015. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques. *Wear*, 338-339, pp.288–96.
- Warren, J.E. & Root, P.J., 1963. The Behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 3(3), pp.245–55.
- Washa, G.W., 1998. Permeability and absorption, Chapter 8. In J. Dobrowolski, ed. *Concrete Construction Handbook*. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill.
- Weast, R.C. & Astle, M.J., 1978. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Weiler, Y., 1970. Mode of occurrence of pelites in the Kythrea Flysch Basin (Cyprus). *Journal of Sedimentary Research*, 40, pp.1255-61.
- Weimer, C. & Hauptert, F., 2000. Influence of aggregate structure on mode-III interfacial fracture between concrete and CFRP. *Applied Composite Materials*, 7(2), pp.183-93.
- West, D., 2000. Brard's test into the 21<sup>st</sup> Century: sodium sulphate soundness testing of dimension stone. In G. McNally & B. Franklin, eds. *Sandstone City: Sydney's dimension stone and other sandstone geomaterials*. Geological Society of Australia Environmental, Engineering and Hydrology Specialist Group Monograph No. 5. pp.138-48.

## Βιβλιογραφία

Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J. & Forssberg, E., 2008. Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 30, pp.274–82.

Weyers, R.E., Williamson, G.S., Mokarem, D.W., Lane, D.S., Cady, P.D., 2005. *Testing methods to determine long term durability of Wisconsin aggregate resources*. WHRP 06-07. Wisconsin: Wisconsin Department of Transportation.

White, T.D., Haddock, J.E. & Rismantojo, E., 2006. *Aggregate tests for hot-mix asphalt mixtures used in pavements*. NCHRP report No. 557. Washington DC: Transportation Research Board.

Willett, J.C., 2017. *Mineral commodity summaries 2017*. [Online] USGS Available at: <https://doi.org/10.3133/70180197> [Accessed 25 July 2017].

Williams, S. & Cunningham, J., 2012. *Evaluation of aggregate durability performance test procedures*. TRC-0905. Washington: The National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine Transportation Research Board (TRB).

Williams, G.D., Hampel, K., Allen, J.J. & Fowler, D.W., 2005. *The significance and application of the Micro-Deval test*. Research Report ICAR 507. Texas: Texas: International Center for Aggregates Research.

Williamson, G.S., 2005. *Investigation of testing methods to determine long-term durability of Wisconsin aggregate resources including natural materials, industrial by-products, and recycled/reclaimed materials*. MSc. Washington, D.C.: Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Civil and Environmental Engineering, Blacksburg, Virginia. Program, Transportation Research Board.

Willis, M.H.J., 1967. How aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength. *Journal of Materials*, 2(4), pp.843-65.

Wilson, M.J., 1974. Hydrothermal formation and alteration of laumontite in hornblende shists near Huntly, Aberdeenshire. *Mineralogical Magazine*, 39, pp.608-09.

Winnefeld, F. & Bottger, K.G., 2006. How clayey fines in aggregates influence the properties of lime mortars. *Materials and Structures*, 39, pp.433-43.

Wong, G.S., 2006. Petrographic evaluation of concrete aggregates. In J.F. Lamond & J.H. Pielert, eds. *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-making Materials ASTM STP 169D*. Bridgeport, NJ: ASTM International. pp.377-400.

Wriggers, P. & Moftah, S.O., 2006. Mesoscale models for concrete: Homogenisation and damage behaviour. *Finite Elements in Analysis and Design*, 42, pp.623 – 636.

Wu, K., Chen, B. & Yao, W., 2001a. Study of the influence of aggregate size distribution on mechanical properties of concrete by acoustic emission technique. *Cement and Concrete Research*, 31(6), pp.919-23.

### Βιβλιογραφία

Wu, K.-R., Chen, B., Yao, W. & Zhang, D., 2001b. Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(10), pp.1421–25.

Wu, Y., Parker, & Kandhal, K., 1998. *Aggregate toughness/abrasion resistance and durability/soundness tests related to asphalt concrete performance in pavements*. Report No. 98-4. NCAT.

www.moa.gov.cy/mines, 2017. *Υπηρεσία Μεταλλείων*. [Online] Available at: [http://www.moa.gov.cy/moa/mines/minesSrv.nsf/dmlquarries\\_gr/dmlquarries\\_gr?OpenDocument#](http://www.moa.gov.cy/moa/mines/minesSrv.nsf/dmlquarries_gr/dmlquarries_gr?OpenDocument#) [Accessed 3 Αυγούστος 2017].

Wyering, L.D., Villeneuve, M.C., Wallis, I.C., Siratovicha, P.A., Kennedy, B.M., Gravley, D.M., 2015. The development and application of the alteration strength index equation. *Engineering Geology*, 199, pp.48–61.

Xirouchakis, D. & Theodoropoulos, A., 2009. Crushed limestone aggregates for concrete and masonry: Results from tests according to EN 12620, EN 13043, EN13242, and EN 13139 standards. In *16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ*. Πάφος, Κύπρος, 2009.

Yan, X. & Su, X.G., 2009. *Linear regression analysis: theory and computing*. Singapore: World Scientific Publishing co.

Yıldız, A., Kuscı, M., Dumlupına, I., Arıtan, A.E., Bağcı, M., 2010. The determination of the mineralogical alteration index and the investigation of the efficiency of the hydrothermal alteration on physico-mechanical properties in volcanic rocks from Koprulu, Afyonkarahisar, West Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69, pp.51–61.

Yılmaz, M. & Tugrul, A., 2012. The effects of different sandstone aggregates on concrete strength. *Construction and Building Materials*, 35, pp.294–303.

Yool, A.I.G., Lees, T.P. & Fried, A., 1998. Improvements to the methylene blue dye test for harmful clay in aggregates for concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 28(10), pp.1417-28.

Yusof, N.Q.A.M. & Zabidi, H., 2016. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of granitic rock from Hulu Langat, Selangor. *Procedia Chemistry*, 19, pp.975 – 980.

Yzenas Jr, J.J., 2006. Bulk density, relative density (specific gravity), pore structure, absorption and surface moisture. In J. Lamond & J. Pielert, eds. *STP169D. Significance of Tests and Properties of Concrete & Concrete-Making Materials*. Philadelphia: ASTM. pp.346-54.

### Βιβλιογραφία

Zarif, I.H. & Tugrul, A., 2003. Aggregate properties of Devonian limestones for use in concrete in Istanbul, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 62, pp.379–88.

Zhang, W., Zakaria, M. & Hama, Y., 2013. Influence of aggregate materials characteristics on the drying shrinkage properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, 49, pp.500-10.

Zhou, F.P., Lydon, F.D. & Barr, B.I.G., 1995. Effect of coarse aggregate on elastic modulus and compressive strength of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(1), pp.177–86.

Zomeni, Z., 2012. *Quaternary marine terraces on Cyprus: constraints on uplift and pedogenesis, and the geoarchaeology of Palaipafos*. Corvallis: Dissertation.

Zorlu, K., Ulusay, R., Ocakoglu, F., Gokceoglu, C., Sonmez, H., 2004. Predicting intact rock properties of selected sandstones using petrographic thin-section data. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, pp.93-98.

Zou, D., 2016. *Theory and technology of rock excavation for civil engineering*. Hong Kong: Springer.

### **Ελληνική Βιβλιογραφία**

Αντωνίου, Κ., Στεφανή, Α. & Χρίστης, Χ., 2013. *Εργολήπτης*. [Online] (Τεύχος 13) Available at: [http://www.oseok.org.cy/files/FINALNEW\\_ERGOLIPTIS13\\_web.pdf](http://www.oseok.org.cy/files/FINALNEW_ERGOLIPTIS13_web.pdf) [Accessed 15 Ιούνιος 2017].

Γιασεμής, Μ., Κυριακίδης, Π. & Χριστοφόρου, Φ., 2005. *Δοκιμά υλικά*. Λευκωσία: Υπηρεσία Ανάπτυξης Προγραμμάτων Διεύθυνση Τεχνικής Εκπαίδευσης.

Γκοργκόλης, Σ., 2015. *Μελέτη Οπτοηλεκτρονικών ιδιοτήτων λεπτών υμενίων πολυκρυσταλλικού πεντακενίου*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών.

Γραμματικόπουλος, Σ., 2013. *Μελέτη, χαρακτηρισμός και ιδιότητες νέων υλικών*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών και Πληροφορικής.

Έκθεση Γενικού Ελεκτή, 1995. *Ελεγκτική Υπηρεσία της Κυπριακής Δημοκρατίας*. [Online] Available at: [http://www.google.com.cy/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwig5SR0\\_jPAhVC2RoKHHTdBQoQFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.audit.gov.cy%2Faudit%2Faudit.nsf%2FAll%2F49FF5F8CE79B4608C2256D670039A243%2F%24file%2F%25CE%259B%25CE%25B1%25CF%2584%25CE%2](http://www.google.com.cy/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwig5SR0_jPAhVC2RoKHHTdBQoQFggBMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.audit.gov.cy%2Faudit%2Faudit.nsf%2FAll%2F49FF5F8CE79B4608C2256D670039A243%2F%24file%2F%25CE%259B%25CE%25B1%25CF%2584%25CE%2) [Accessed 8 Αύγουστος 2017].



### Βιβλιογραφία

Ζαχαράκη, Δ., 2009. *Συμβολή στη διερεύνηση των μηχανισμών γεωπολυμερισμού μεταλλουργικών αποβλήτων με έμφαση στις σκωρίες ηλεκτροκαμίνων*. Διδακτορική Διατριβή. Χανιά: Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Κ.Δ.Π.164/2011, 2011. [Online] Λευκωσία: Επίσημη εφημερίδα της Δημοκρατίας αρ.4491 Available at: [http://www.cylaw.org/KDP/data/2011\\_1\\_164.pdf](http://www.cylaw.org/KDP/data/2011_1_164.pdf) [Accessed 27 August 2017].

Κ.Δ.Π.177/2005, 2005. [Online] Επίσημη εφημερίδα της Δημοκρατίας αρ.3976 Available at: [http://www.cylaw.org/nomothesia/par\\_3/meros\\_1/2005/1637.pdf](http://www.cylaw.org/nomothesia/par_3/meros_1/2005/1637.pdf) [Accessed 27 August 2017].

Κ.Δ.Π.253/2006, 2006. [Online] Λευκωσία: Επίσημη εφημερίδα της Δημοκρατίας αρ.4112 Available at: [http://www.cylaw.org/nomothesia/par\\_3/meros\\_1/2006/2104.pdf](http://www.cylaw.org/nomothesia/par_3/meros_1/2006/2104.pdf) [Accessed 27 August 2017].

Κ.Δ.Π.253/2006, 2006. *Οι περί των βασικών απαιτήσεων (προϊόντα δομικών κατασκευών) Κανονισμοί 2003*. Λευκωσία: Επίσημη Εφημερίδα της Κυπριακής Δημοκρατίας.

Κ.Δ.Π.284/86, 1986. [Online] Επίσημη Εφημερίδα της Δημοκρατίας αρ.2194 Available at: [http://www.cylaw.org/KDP/data/1986\\_1\\_284.pdf](http://www.cylaw.org/KDP/data/1986_1_284.pdf) [Accessed 27 August 2017].

Κ.Δ.Π.448/2005, 2005. [Online] Επίσημη εφημερίδα της Δημοκρατίας αρ.4033 Available at: [http://www.cylaw.org/KDP/data/2005\\_1\\_448.pdf](http://www.cylaw.org/KDP/data/2005_1_448.pdf) [Accessed 27 August 2017].

Κ.Δ.Π.448/2005, 2005. [Online] Επίσημη Εφημερίδα της Δημοκρατίας αρ.4033 Available at: [http://www.cylaw.org/KDP/data/2005\\_1\\_448.pdf](http://www.cylaw.org/KDP/data/2005_1_448.pdf) [Accessed 27 August 2017].

Κατερινόπουλος, Α. & Μαγκανάς, Α., 1998. *Παραδόσεις μαθήματος συστηματικής ορυκτολογίας*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Ορυκτολογίας και Πετρολογίας.

Κελεπερτζής, Α. & Μητρόπουλος, Π., 1995. *Γεωχημεία. Σημειώσεις μαθήματος*. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Οικονομικής Γεωλογίας- Γεωχημείας.

Κοκκινάκης, Α., 2000. *Μαγματικά πετρώματα*. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Φυσικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβαλλοντος, Τομέας Ορυκτολογίας και Πετρολογίας.

Κορωνάιος, Α., 2016. *Σημειώσεις πετρολογίας πυριγενών πετρωμάτων*. [Online] Available at: [http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo317v/biblio/petrologia\\_pyrogenwn\\_2016.pdf](http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo317v/biblio/petrologia_pyrogenwn_2016.pdf) [Accessed 30 Ιούλιος 2017].

Κούκης, Γ. & Σαμπατακάκης, Ν., 2007. *Γεωλογία τεχνικών έργων*. 2<sup>nd</sup> ed. Α. Παπασωτηρίου & Σια ΟΕ.

## Βιβλιογραφία

Κυριτσάκης, Α.Κ., 2014. *Θεωρία Ηλεκτρονικής μικροσκοπίας εγγύς πεδίου*. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Υπολογιστών & Μηχανικών Υπολογιστών.

Κωνσταντίνου, Γ. & Παναγίδης, Ι., 2013. *Κύπρος και Γεωλογία. Επιστήμη-Περιβάλλον-Πολιτισμός*. Λευκωσία: Πολιτιστικό Ίδρυμα Τραπέζης Κύπρου.

Κωνσταντίνου, Γ., Παναγίδης, Ι., Ξενοφώντος, Κ., Αφροδίσης, Σ., Μιχαηλίδης, Π., 2002. *Η Γεωλογία της Κύπρου. Δελτίο Αρ 10*. Β ed. Λευκωσία: Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης.

Κωστόπουλος, Δ., 2011. *Σημειώσεις μαθήματος πετρολογία μεταμορφωμένων πετρωμάτων*. Αθήνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβαλλοντος, Τομέας Ορυκτολογίας και Πετρολογίας.

Λαμπρόπουλος, Β.Ν., 1992. *Διάβρωση και συντήρηση της πέτρας*. Αθήνα.

Λυκούδης, Σ., 2009. Χρήση του μπλε του μεθυλενίου για τον προσδιορισμό των επιβλαβών λεπτόκοκκων στην άμμο σκυροδέματος. In Δραγκιώτης, Θ. & Κανιτάκη, Ε., eds. *16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος*. Πάφος, Κύπρος., 2009. ΤΕΕ, ΕΤΕΚ.

Μηλιοπούλου, Α., 2009. Σύγκριση μεθόδων εργαστηριακών δοκιμών σε αδρανή υλικά με αμερικανικά (ASTM) και ευρωπαϊκά (EN) πρότυπα δοκιμών. In *Πρακτικά 16<sup>ο</sup> Συνέδριου Σκυροδέματος*, ΤΕΕ. Πάφος, Κύπρος, 2009.

Νικολαΐδης, Α.Φ., Μάνθος, Ε. & Σαραφείδου, Μ., 2005. Ισοδύναμο άμμου και μπλε του μεθυλενίου αδρανών υλικών οδοποιίας. In *2<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Οδοποιίας*. Βόλος, Ελλάδα, 2005.

Οικονομίδης, Κ., 1994. *Εργαστηριακές δοκιμές δομικών υλικών*. Λευκωσία: Υπουργείο Παιδείας και Πολιτισμού Κύπρου.

Οικονόμου, Χ.Μ., 2003. *Τεχνολογία του Σκυροδέματος*. 3<sup>rd</sup> ed. Αθήνα: Εκδόσεις Σέλακ-4Μ.

Παντελή, Φ., Βαττής, Δ., Χατζηγεωργίου, Χ., Πέτρου, Μ., Βραχίμης, Σ., 2009. *Αδρανή υλικά: συνοπτικός οδηγός χρήσης κυπριακών προτύπων CYS EN*. [Online] Λευκωσία Available at: [http://www.etek.org.cy/uploads/files/merged\\_document.pdf](http://www.etek.org.cy/uploads/files/merged_document.pdf) [Accessed 9 Ιουλίου 2016].

Παπαδόπουλος, Γ., 2010. *Εργαστήριο Μαθηματικών & στατιστικής, σημειώσεις μαθήματος*. Αθήνα, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών. [Online] Available at: <http://www.aua.gr/gpapadopoulos/shmeiwiseis.php> [Accessed 1 Νοέμβρης 2017].

Παπατρέχας, Χ.Δ., 2011. *Συσχέτιση φυσικομηχανικών ιδιοτήτων με το κοκκομετρικό μέγεθος και την ορυκτολογική σύσταση των ανθρακικών πετρωμάτων της Ανατολικής Μακεδονίας*. Διδακτορική Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Ορυκτολογίας - Πετρολογίας - Κοιτασματολογίας.

## Βιβλιογραφία

Ρηγόπουλος, Ι., 2009. *Συσχετισμός ορυκτοπετρογραφικών και φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των οφιολιθικών πετρωμάτων Πίνδου και Βούρινου και εκτίμηση της Καταλληλότητας τους ως αδρανών υλικών σε κατασκευαστικές - βιομηχανικές εφαρμογές*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Ορυκτών Πρώτων Υλών, Πανεπιστήμιο Πατρών.

Ρηγόπουλος, Ι., Πομώνης, Π., Τσικούρας, Β., Χατζηπαναγιώτου, Κ., Στουρνάρας, Κ., 2008. Συγκριτική μελέτη των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων ως αδρανών υλικών από το οφιολιθικό σύμπλεγμα της Πίνδου (ΒΔ Ελλάδα). In *1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Δομικών Υλικών και Στοιχείων, ΤΕΕ*. Αθήνα, 2008.

Ρόζος, Δ., 2007. *Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας II*. Αθήνα: Ε.Μ.Π. Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών.

Ρουβέλας, Γ., Ξηντάρας, Κ. & Αλαφούζος, Κ., 2009. Προσδιορισμός περιεκτικότητας σε άργιλο ή πλαστικών λεπτών στα αδρανή μέσω των δοκιμών Ισοδυναμίου άμμου (ASTM D 2419-02 & EN 933 – 8) και Μπλε του μεθυλενίου (EN 933.09) – Σύγκριση αποτελεσμάτων. In *16<sup>ο</sup> Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ*. Πάφος, Κύπρος, 2009.

Ρούτουλας, Α., 1999. *Ανθεκτικότητα σκυροδεμάτων με σύνθετα τσιμέντα*. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Τομέας Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών.

Σαχπαζής, Κ., 1988. *Τεχνικογεωλογική έρευνα για αδρανή υλικά αντιολισθηρών οδοστρωμάτων*. Διδακτορική Διατριβή. Αθήνα: Τμήμα Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Σιανούδης, Ι.Α., Καρύδας, Α.Γ., Ζαρκάδας, Χ. & Δρακάκη, Ε., 2006. Φασματοσκοπία φθορισμού ακτινών Χ (XRF): Μια πρόταση για αξιοποίηση της στην Εκπαιδευτική Διαδικασία. *e-Περιοδικό Επιστήμης & Τεχνολογίας*, pp.86-103.

Σπυρόπουλος, Α., 2005. *Διερεύνηση των τεχνικογεωλογικών συνθηκών στο Νομό Αχαΐας σχετικά με την αναζήτηση νέων υλικών για διάφορες χρήσεις*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Εφαρμοσμένης Γεωλογίας και Γεωφυσικής.

Τρεμοπούλου, Ε., 2007. *Ποιοτικό έλεγχος υλικών στην οδοποιία*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Θεσσαλονίκη: Τμήμα Γεωλογίας Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Τριανταφύλλου, Α., 2013. *Δομικά υλικά*. 13<sup>th</sup> ed. Πάτρα.

Τσιντίδης, Τ., Τσιολάκης, Ε., Βασιλείου, Κ. & Κωνσταντίνου, Κ., 2013. *Οικοτουριστικός οδηγός γεωπάρκου Τροόδους*. Αναπτυξιακή Εταιρεία Τροόδους.

Τσιολάκης, Ε., 2015. *Βιοστρωματογραφία και περιβάλλοντα απόθεσης των πλειοκαινικών και πλειστοκαινικών σχηματισμών της Κύπρου*. Διδακτορική Διατριβή. Πάτρα: Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Πατρών.

### Βιβλιογραφία

Τσιπούρα-Βλάχου, Μ., 2005. *Σημειώσεις πετρολογίας ιζηματογενών πετρωμάτων*. Αθίνα: Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Σχολή Φυσικών Επιστημών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, Τομέας Ορυκτολογίας και Πετρολογίας.

Υπηρεσία Μεταλλείων, 2017. *Υπηρεσία Μεταλλείων*. [Online] Available at: [http://www.moa.gov.cy/moa/mines/minessrv.nsf/All/2983874C3194BDFAC22570D1003E6E88/\\$file/Ετήσια%20Εκθεση%202016%20Υπηρ.%20Μεταλλείων.pdf](http://www.moa.gov.cy/moa/mines/minessrv.nsf/All/2983874C3194BDFAC22570D1003E6E88/$file/Ετήσια%20Εκθεση%202016%20Υπηρ.%20Μεταλλείων.pdf) [Accessed 3 Αύγουστος 2017].

Υπουργείο Εσωτερικών, 2017. *Τομέας δομικών προϊόντων*. [Online] Available at: <http://www.moi.gov.cy/moi/moi.nsf/All/8C73F078E777606FC2257A91004E6EA2> [Accessed 27 August 2017].

Φούρναρη, Ρ., 2009. *Μελέτη των φυσικομηχανικών ιδιοτήτων των πετρωμάτων της Κύπρου που χρησιμοποιούνται ως αδρανή στο σκυρόδεμα*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Λευκωσία: Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α.0.1: Καθορισμός ορίων των διαφόρων ιδιοτήτων για αδρανή σκυροδεμάτων σύμφωνα με την Κ.Α.Π. 164/2011.

CYS EN 12620: Αδρανή για σκυρόδεμα					
Παράγραφος στο Πρότυπο	ΙΔΙΟΤΗΤΑ		ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ ΟΡΙΟ		
	ΕΛΛΗΝΙΚΑ	ΑΓΓΛΙΚΑ	ΧΟΝΔΡΑ ΑΔΡΑΝΗ (Coarse Aggregates)	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΔΡΑΝΩΝ (All-in Aggregates)	ΛΕΠΤΑ ΑΔΡΑΝΗ (Fine Aggregates)
4.4	Σχήμα αδρανών	Particle shape	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία F120.	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία F120. Αφορά το χονδρό μέρος (1).	Δεν υπάρχει απαίτηση.
4.2	Μέγεθος αδρανών	Particle size	Δηλώνεται το d/D του προϊόντος.	Δηλώνεται το d/D του προϊόντος.	Δηλώνεται το d/D του προϊόντος.
5.5	Πυκνότητα αδρανών	Particle density	Η τιμή να μην είναι μικρότερη από 2,00Mg/m <sup>3</sup> ως ξηρή πυκνότητα.	Η τιμή να μην είναι μικρότερη από 2,00Mg/m <sup>3</sup> ως ξηρή πυκνότητα.	Η τιμή να μην είναι μικρότερη από 2,00Mg/m <sup>3</sup> ως ξηρή πυκνότητα.
4.6	Περιεκτικότητα σε παιπάλη	Fines content	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία f1,5.	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία f3.	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία f10. Για τη φυσική άμμο που παράγεται από φυσικά αμμοχάλικα ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία f3.
4.7	Ποιότητα παιπάλης	Fines quality	Δεν υπάρχει απαίτηση.	Όταν η περιεκτικότητα σε παιπάλη στα λεπτά αδρανή του διαβαθμισμένου μίγματος είναι μεγαλύτερη από 3% τότε το MB είναι και δηλώνεται όχι μεγαλύτερο από 3g/Kg.	Όταν η περιεκτικότητα σε παιπάλη είναι μεγαλύτερη από 3% τότε το MB είναι και δηλώνεται όχι μεγαλύτερο από 3g/Kg.
5.2	Αντοχή σε κατακερματισμό	Resistance to fragmentation	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία LA30.	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία LA30. Αφορά το χονδρό αδρανές (1).	Δεν υπάρχει απαίτηση.
5.4.1	Αντοχή σε ολισθηρότητα	Resistance to polishing	Δηλώνεται η κατηγορία PSV για σκυρόδεμα που τοποθετείται ως επιφάνεια κύλισης οχημάτων.	Δηλώνεται η κατηγορία PSV για σκυρόδεμα που τοποθετείται ως επιφάνεια κύλισης οχημάτων. Αφορά το χονδρό αδρανές (1).	Δεν υπάρχει απαίτηση.

Παράρτημα Α

CYS EN 12620: Αδρανή για σκυρόδεμα					
Παράγραφος στο Πρότυπο	ΙΔΙΟΤΗΤΑ		ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ ΟΡΙΟ		
	ΕΛΛΗΝΙΚΑ	ΑΓΓΛΙΚΑ	ΧΟΝΔΡΑ ΑΔΡΑΝΗ (Coarse Aggregates)	ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΜΕΝΟ ΜΕΙΓΜΑ ΑΔΡΑΝΩΝ (All-in Aggregates)	ΛΕΠΤΑ ΑΔΡΑΝΗ (Fine Aggregates)
6.2	Περιεκτικότητα σε χλώριο	Chlorides	Δηλώνεται για αδρανή που προορίζονται για οπλισμένο σκυρόδεμα και η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1%.	Δηλώνεται για αδρανή που προορίζονται για οπλισμένο σκυρόδεμα και η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1%.	Δηλώνεται για αδρανή που προορίζονται για οπλισμένο σκυρόδεμα και η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1%.
6.3.1	Θεϊκά διαλυτά σε οξύ	Acid soluble sulfates	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία AS0,8.	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία AS0,8.	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία AS0,8.
6.3.2	Συνολική περιεκτικότητα θείου	Total sulfur	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1%.	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1%.	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1%.
5.5	Απορροφητικότητα σε νερό	Water absorption	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4%.	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4%.	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4%.
5.7.1	Αντοχή σε ψύξη-απόψυξη	Durability against freeze-thaw	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία MS25 (3).	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία MS25 για το μέρος που αντιπροσωπεύει το χονδρό αδρανές (3). Δεν υπάρχει απαίτηση στα λεπτά αδρανή.	Δεν υπάρχει απαίτηση (4).
5.7.3	Αντοχή σε αλκαλοπυριτικές αντιδράσεις	Durability against alkali-silica reactivity	Δηλώνεται για αδρανή που παράγονται από φυσικά αμμοχάλικα.	Δηλώνεται για αδρανή που παράγονται από φυσικά αμμοχάλικα.	Δηλώνεται για αδρανή που παράγονται από φυσικά αμμοχάλικα.

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ:

- 1) Χονδρό αδρανές στο διαβαθμισμένο μίγμα αδρανών σημαίνει το μέγεθος το μεγαλύτερο από 4mm.
- (2) Τα κόσκινα που θα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του μεγέθους των προϊόντων είναι αυτά της βασικής σειράς μαζί με τη σειρά 2, όπως καθορίζονται στο Πίνακα (Table) 1, της παραγράφου (clause) 4, του προτύπου CYS EN 12620.
- (3) Η ιδιότητα της αντοχής σε ψύξη – απόψυξη για όλα τα χονδρά αδρανή, ελέγχεται με τη δοκιμή θεϊκού μαγνησίου (MS), σύμφωνα με το πρότυπο CYS EN 1367 – 2:2009. Στη δοκιμή συμμετέχουν όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα των χονδρών αδρανών συμπεριλαμβανομένων και των διαβαθμισμένων μιγμάτων, τα οποία έχουν ποσοστό μεγαλύτερο του 5%, στα μεγέθη που καθορίζονται στο Παράρτημα Γ (Annex C) του προτύπου αυτού.
- (4) Το Υπουργείο Εσωτερικών θα προχωρήσει στη διεξαγωγή έρευνας καθορισμού ορίων ή/και μεθόδων όσον αφορά τη δοκιμή Αντοχής σε ψύξη-απόψυξη, σχετικά με τον έλεγχο των Λεπτών Αδρανών.

## Παράρτημα Α

**Πίνακας Α.0.2: Καθορισμός ορίων των διαφόρων ιδιοτήτων για αδρανή κονιαμάτων σύμφωνα με την Κ.Δ.Π. 164/2011.**

CYS EN13139: Αδρανή Κονιαμάτων			
Παράγραφος στο Πρότυπο	ΙΔΙΟΤΗΤΑ		ΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΟ ΟΡΙΟ
	ΕΛΛΗΝΙΚΑ	ΑΓΓΛΙΚΑ	ΛΕΠΤΑ ΑΔΡΑΝΗ (Fine Aggregates)
5.2	Μέγεθος αδρανών	Particle size	Δηλώνεται το d/D του προϊόντος.
6.2.1	Πυκνότητα αδρανών	Particle density	Η τιμή να μην είναι μικρότερη από 2,00Mg/m <sup>3</sup> ως ξηρή πυκνότητα.
5.5.1	Περιεκτικότητα σε παιπάλη	Fines content	Ως ο Πίνακας 4 της παραγράφου 5.5.1. Επιστάται η προσοχή του μελετητή στα παραδείγματα της Σημείωσης 2 της παραγράφου.
5.5.2	Ποιότητα παιπάλης	Fines quality	Όταν η περιεκτικότητα σε παιπάλη είναι μεγαλύτερη από 3% τότε το MB είναι και δηλώνεται όχι μεγαλύτερο των 10g/Kg.
7.2	Περιεκτικότητα σε χλώριο	Chlorides	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,1%.
7.3.1	Θειικά διαλυτά σε οξύ	Acid soluble sulfates	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία AS0,8.
7.3.2	Συνολική περιεκτικότητα θείου	Total sulfur	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1%.
6.2.2	Απορροφητικότητα σε νερό	Water absorption	Η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 4%.
6.2.3	Αντοχή σε ψύξη-απόψυξη	Durability against freeze-thaw	Ανώτατη επιτρεπτή κατηγορία MS25 για το μέρος που αντιπροσωπεύει το χονδρό αδρανές (2). Δεν υπάρχει απαίτηση στα Λεπτά Αδρανή (3).
7.6.1	Αντοχή σε αλκαλοπυριτικές αντιδράσεις	Durability against alkali-silica reactivity	Δηλώνεται για αδρανή που παράγονται από φυσικά αμμοχάλικα.

### ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ:

(1) Χονδρό και λεπτό αδρανές σημαίνει όπως καθορίζεται στις παραγράφους 3.6 και 3.7 του προτύπου CYS EN 13139 αντίστοιχα.

(2) Η ιδιότητα της αντοχής σε ψύξη – απόψυξη για όλα τα χονδρά αδρανή, ελέγχεται με τη δοκιμή θεικού μαγνησίου (MS), σύμφωνα με το πρότυπο CYS EN 1367 – 2:12009. Στη δοκιμή συμμετέχουν όλα τα κοκκομετρικά κλάσματα των χονδρόκοκκων αδρανών συμπεριλαμβανομένων και των διαβαθμισμένων μιγμάτων, τα οποία έχουν ποσοστό μεγαλύτερο του 5%, στα μεγέθη που καθορίζονται στο Παράρτημα Γ (Annex C) του προτύπου αυτού.

(3) Το Υπουργείο Εσωτερικών θα προχωρήσει στη διεξαγωγή έρευνας καθορισμού ορίων ή/και μεθόδων όσον αφορά τη δοκιμή Αντοχής σε ψύξη-απόψυξη, σχετικά με τον έλεγχο των Λεπτών Αδρανών.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

**Πίνακας Β.0.1: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του συστήματος περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ.**

Λυχνία Ακτινών-Χ	Άνοδος Cu (K $\alpha$ )
Τάση ρεύματος	40kV
Ένταση ρεύματος	40 mA
Καταμετρητής ακτινών-Χ	LynxEye system
Εύρος σάρωσης ( $2\theta$ )	2 - 100°
Βήμα σάρωσης ( $2\theta$ )	0,0194526°
Ταχύτητα σάρωσης (sec/step)	0,5
Τύπος σάρωσης	Locked Coupled, Continuous
Λογισμικό αξιολόγησης μετρήσεων	Bruker EVA (v.15.0)
Βάση Δεδομένων ICDD	PDF2 (v.2009)
Λογισμικό ημι-ποσοτικών αναλογιών ορυκτών	Topas (v.4.2)

**Πίνακας Β.0.2: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του συστήματος φθορισμού ακτινών Χ.**

Λυχνία Ακτινών-Χ	Άνοδος Pd
Τάση ρεύματος	50 kV
Ένταση ρεύματος	2 mA
Ανιχνευτής	XFlash@Silicon Drift Detector
Τρόπος Λειτουργίας	Συνθήκες κενού για στερεά. Ατμόσφαιρα ηλίου για υγρά/σκόνη.



Παράρτημα Β

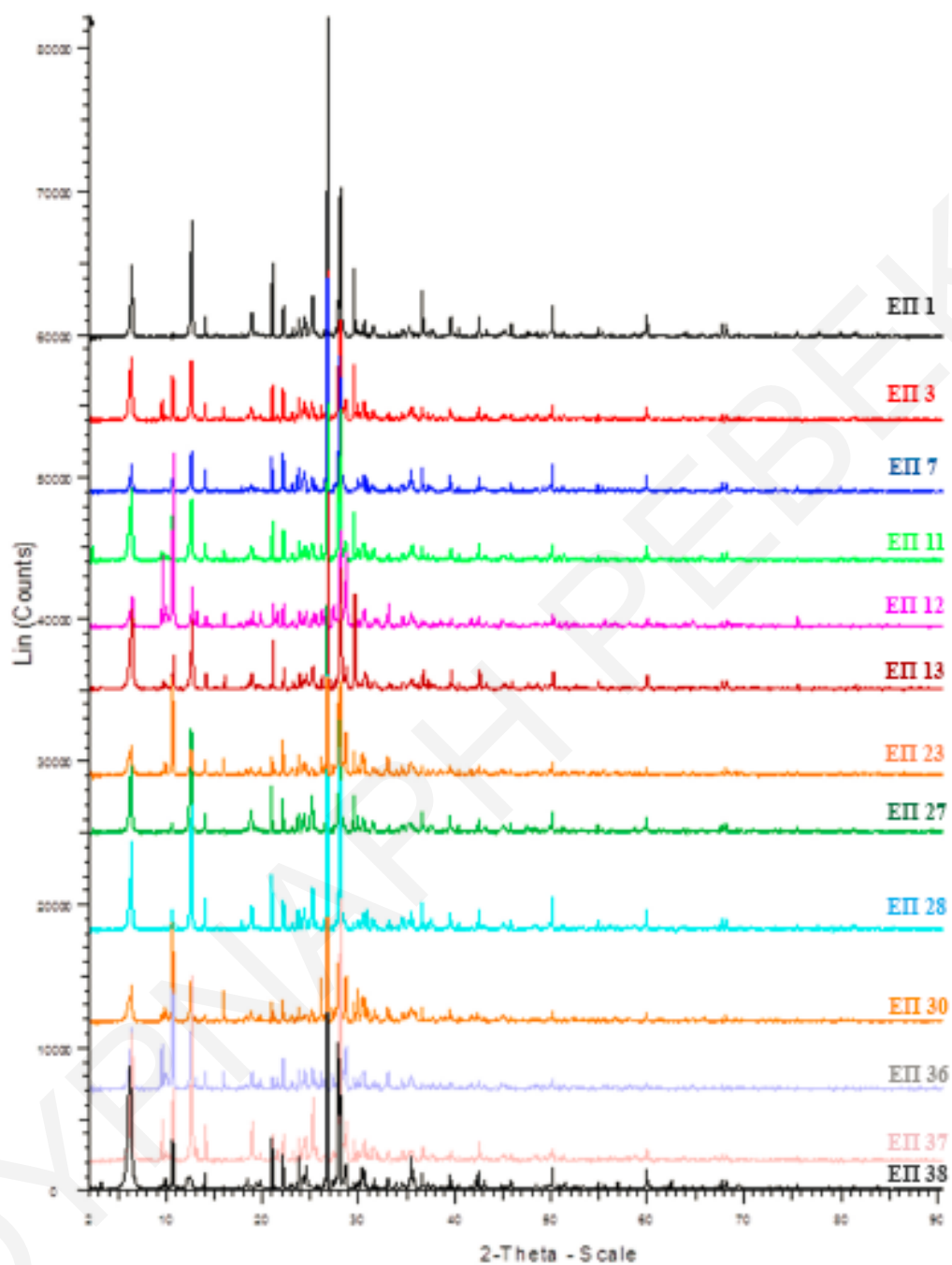
**Πίνακας Β.0.3: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του πολωτικού μικροσκοπίου.**

Παροχή ενέργειας	100-230V 50/60Hz
Φωτισμός	Transmitted 30W Koehler & 30W Vertical Koehler Incident
Αντικειμενικοί φακοί	Strain Free S.Plan 4X, 10X, 40XS
Προσοφθάλμιοι φακοί	KHWF10XCP FN20
Τράπεζα	Περιστρεφόμενη 360° με βερνίερο

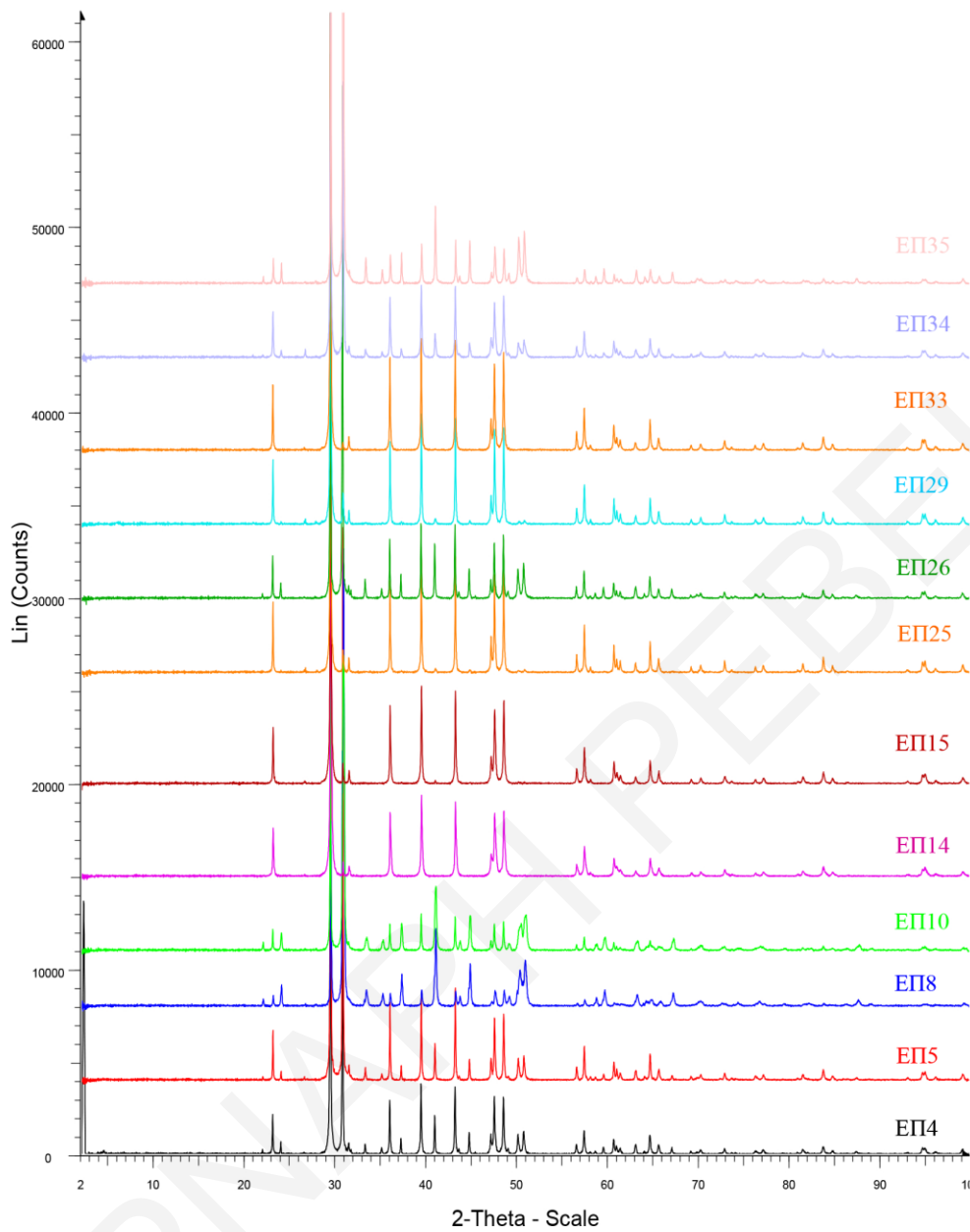
**Πίνακας Β.0.4: Προδιαγραφές και συνθήκες ανάλυσης του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης**

Ανάλυση	3 nm @ 30 kV
Μεγέθυνση	5X to 300,000X
Μέγεθος δείγματος	Μέχρι 300 mm διαμέτρου
Δυναμικό επιτάχυνσης	300 V to 20 kV
Οπτικό πεδίο	Μέχρι 25,4 mm

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

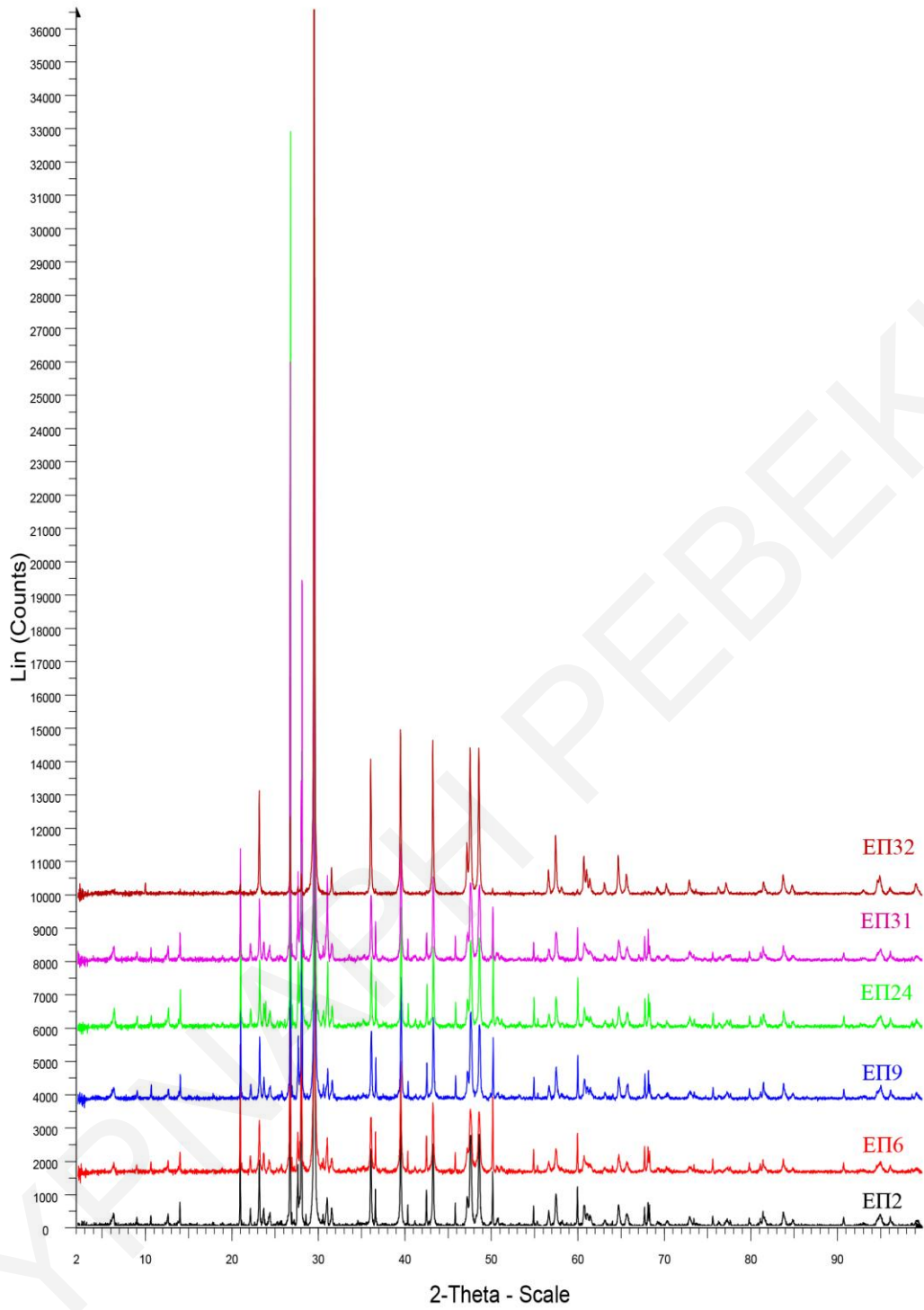


Εικόνα Γ.0.1: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων X διαβασικών αδρανών.



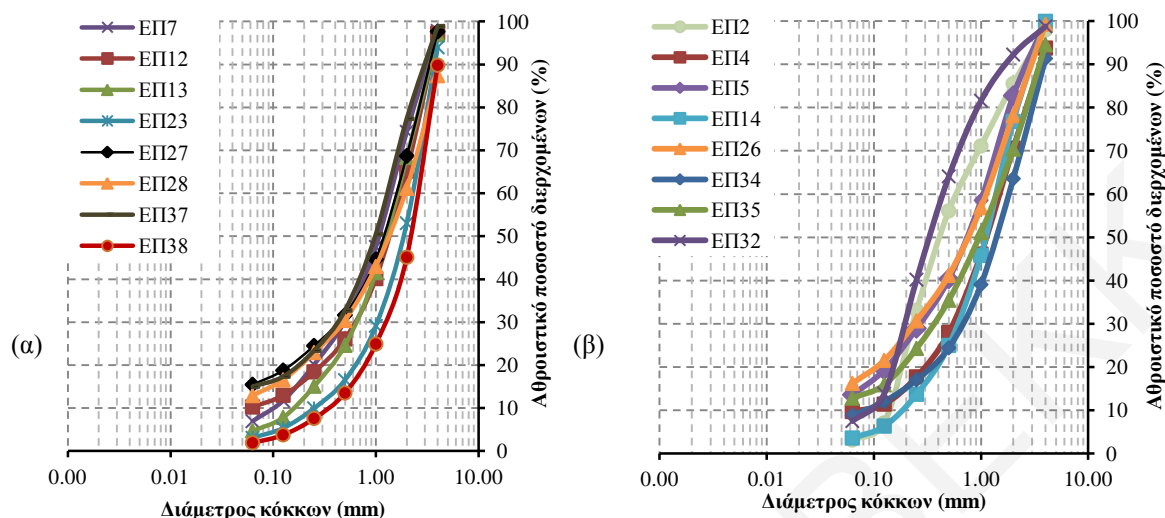
**Εικόνα Γ.0.2: Ακτινογραφήματα περιθλασίμετρίας ακτίνων Χ ασβεστολιθικών αδρανών.**

Παράρτημα Γ



**Εικόνα Γ.0.3: Ακτινογραφήματα περιθλασιμετρίας ακτίνων Χ ασβεσταρενιτικών αδρανών.**

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ



Διάγραμμα Δ.0.1: Κοκκομετρικές καμπύλες αδρανών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή σκυροδεμάτων και κονιαμάτων (α) διαβασικά αδρανή και (β) ανθρακικά αδρανή.

Πίνακας Δ.0.5: Στερεή πυκνότητα σκυροδεμάτων και κονιαμάτων ( $\rho_s$ ) και πυκνότητα ορυκτών των αδρανών ( $\rho_{cm}$ ).

Κωδικός σκυροδέματος – αδρανών	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) σκυροδέματος	Κωδικός κονιαματος – αδρανών	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) κονιαματος	Κωδικός αδρανών	$\rho_{cm}$ (kg/m <sup>3</sup> ) αδρανών
C1-EP38	2609	CM1-EP38	2719	EP38	2844
C2-EP12	2632	CM2-EP12	2638	EP12	2767
C3-EP13	2609	CM3-EP13	2611	EP13	2838
C4-EP14	2568	CM4-EP14	2557	EP14	2729
C5-EP4	2552	CM5-EP4	2519	EP4	2780
C6-EP7	2692	CM6-EP2	2519	EP2	2706
C7-EP23	2669	CM7-EP7	2694	EP7	2834
C8-EP27	2670	CM8-EP23	2641	EP23	2827
C9-EP28	2665	CM9-EP27	2747	EP27	2852
C10-EP37	2665	CM10-EP28	2736	EP28	2866
C11-EP5	2570	CM11-EP37	2732	EP37	2756
C12-EP26	2602	CM12-EP5	2570	EP5	2774
C13-EP34	2569	CM13-EP26	2588	EP26	2820
C14-EP35	2582	CM14-EP34	2611	EP34	2777
		CM15-EP35	2537	EP35	2706
		CM16-EP32	2505	EP32	2714

Παράρτημα Δ

Πίνακας Δ.0.6: Αποσάθρωση κατά EN 1367-2 (MS) και απορροφητικότητα κατά EN 1097-6 (WA) υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδέματα με διαβασικά αδρανή, (D: Διαβασικά, C: Ασβεσταρενιτικά).

Διαβάθμιση Υλικού	C1		C2		C3		C6		C7		C8		C9		C10	
	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)
Σκύρα 20-8 mm	ΕΠ38 <i>D</i> 36   4,4		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5		ΕΠ40 <i>D</i> 32   2,5	
Σκύρα 10-4 mm	ΕΠ38 <i>D</i> 59   4,8		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7		ΕΠ40 <i>D</i> 37   3,7	
Άμμος 1 0-4 mm	ΕΠ38 <i>D</i> 61   3,7		ΕΠ12 <i>D</i> 24   2,5		ΕΠ13 <i>D</i> 36   3,3		ΕΠ7 <i>D</i> 33   2,1		ΕΠ23 <i>D</i> 20   2,4		ΕΠ27 <i>D</i> 26   1,3		ΕΠ28 <i>D</i> 31   2,0		ΕΠ37 <i>D</i> 51   2,7	
Άμμος 2 0-4 mm	ΕΠ39 <i>C</i> 42   0,9		ΕΠ39 <i>C</i> 42   0,9		ΕΠ39 <i>C</i> 42   0,9		ΕΠ39 <i>C</i> 42   1,2		ΕΠ39 <i>C</i> 42   1,2		ΕΠ39 <i>C</i> 42   1,2		ΕΠ39 <i>C</i> 42   1,2		ΕΠ39 <i>C</i> 42   1,2	

Παράρτημα Δ

Πίνακας Δ.0.7: Αποσάθρωση με θεικό μαγνήσιο κατά EN 1367-2 (MS) και απορροφητικότητα κατά EN 1097-6 (WA) υλικών που χρησιμοποιήθηκαν σε σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή, (L: Ασβεστολιθικά, C: Ασβεσταρεντικά).

Διαβάθμιση Υλικού	C4		C5		C11		C12		C13		C14	
	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)	MS (%)	WA (%)
Σκόρα 20-8 mm	ΕΠ41 L 70	9,0	ΕΠ41 L 70	9,0	ΕΠ41 L 70	9,0	ΕΠ41 L 70	9,0	ΕΠ41 L 70	9,0	ΕΠ41 L 70	9,0
Σκόρα 10-4 mm	ΕΠ41 L 39	6,0	ΕΠ41 L 39	6,0	ΕΠ41 L 39	6,0	ΕΠ41 L 39	6,0	ΕΠ41 L 39	6,0	ΕΠ41 L 39	6,0
Άμμος 1 0-4 mm	ΕΠ14 L 14	1,0	ΕΠ4 L 63	3,0	ΕΠ5 L 68	1,5	ΕΠ26 L 60	1,2	ΕΠ34 L 39	0,3	ΕΠ35 L 53	0,8
Άμμος 2 0-4 mm	ΕΠ39 C 42	0,9	ΕΠ39 C 42	0,9	ΕΠ39 C 42	1,2	ΕΠ39 C 42	1,2	ΕΠ39 C 42	1,2	ΕΠ39 C 42	1,2