



Πανεπιστήμιο
Κύπρου

ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

**ΒΙΩΣΙΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΕΥΕΛΙΚΤΟΥ ΚΙΝΗΤΙΚΟΥ
ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ**

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΟΝΑΤΖΙΗ

2020



**Πανεπιστήμιο
Κύπρου**

ΤΜΗΜΑ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΗΣ

**ΒΙΩΣΙΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΕΥΕΛΙΚΤΟΥ ΚΙΝΗΤΙΚΟΥ
ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ**

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΟΝΑΤΖΙΗ

Μάρτιος, 2020

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΟΝΑΤΖΙΗ

©Παναγιώτα Κονάτζη, 2020

Υποψήφιος Διδάκτορας: Παναγιώτα Κονάτζη

**Τίτλος Διατριβής: ΒΙΩΣΙΜΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΜΕΝΗ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΕΞΑΤΟΜΙΚΕΥΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ
ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΕΥΕΛΙΚΤΟΥ ΚΙΝΗΤΙΚΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ**

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ.Οδυσσέας Κοντοβούρκης, Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Εξεταστική Επιτροπή:

Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς, Καθηγητής

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ.Οδυσσέας Κοντοβούρκης, Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Αιμίλιος Μιχαήλ, Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Ευτύχιος Χριστοφόρου, Επίκουρος Καθηγητής

Τμήμα Μηχανικών Μηχανολογίας και Κατασκευαστικής, Πανεπιστήμιο Κύπρου

Δρ. Θάλεια Κωνσταντίνου, Επίκουρη Καθηγήτρια

Chair Building Product Innovation, Delft University of Technology

ΣΕΛΙΔΑ ΕΓΚΥΡΟΤΗΤΑΣ

Υποψήφιος Διδάκτορας: Παναγιώτα Κονιάτση

Τίτλος Διατριβής: Βιώσιμος σχεδιασμός και αυτοματοποιημένη κατασκευή εξατομικευμένων δομικών στοιχείων μέσω ευέλικτου κινητικού καλουπιού

Η παρούσα Διδακτορική Διατριβή εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών για απόκτηση Διδακτορικού διπλώματος στο Τμήμα Αρχιτεκτονικής και εγκρίθηκε στις 28.4.2020 από τα μέλη της Εξεταστικής Επιτροπής.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Ερευνητικός Σύμβουλος
.....

*Δρ. Οδυσσέας Κοντοβούρκης,
Επίκουρος Καθηγητής*

Μέλος Επιτροπής (Προέδρος)
.....

*Δρ. Μάριος Κ. Φωκάς,
Αναπληρωτής Καθηγητής*

Μέλος Επιτροπής
.....

*Δρ. Αιμίλιος Μιχαήλ,
Επίκουρος Καθηγητής*

Μέλος Επιτροπής
.....

*Δρ. Ευτύχιος Χριστοφόρου,
Επίκουρος Καθηγητής*

Μέλος Επιτροπής
.....

*Δρ. Θάλεια Κωνσταντίνου,
Επίκουρη Καθηγήτρια*

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΥΠΟΨΗΦΙΟΥ ΔΙΔΑΚΤΟΡΑ

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

Παναγιώτα Κονιάζη

Π. Κονιάζη

.....

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θερμές ευχαριστίες σε όλους όσους στάθηκαν δίπλα μου και μου παρείχαν γνωστική και ψυχολογική στήριξη ώστε να διεκπεραιωθεί η διδακτορική μου διατριβή.

Ευχαριστώ εγκάρδια, τον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρ. Οδυσσέα Κοντοβούρκη, Επίκουρο Καθηγητή Τμήματος Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστημίου Κύπρου, για την ερευνητική καθοδήγηση, την άρτια επίβλεψη και συνεχή υποστήριξη του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διδακτορικής διατριβής.

Θερμές ευχαριστίες στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής Δρ. Μάριο Κ. Φωκά, Καθηγητή Τμήματος Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστημίου Κύπρου, Δρ. Αιμίλιο Μιχαήλ, Επίκουρο Καθηγητή Τμήματος Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστημίου Κύπρου, Δρ. Ευτύχιο Χριστοφόρου, Επίκουρο Καθηγητή Τμήματος Μηχανικών Μηχανολογίας και Κατασκευαστικής, Πανεπιστημίου Κύπρου, και Δρ. Θάλεια Κωνσταντίνου, Επίκουρη Καθηγήτρια, έδρας Chair Building Product Innovation, Σχολή Αρχιτεκτονικής, Πανεπιστήμιο Delft, για τη θετική ανταπόκριση τους στην αξιολόγηση της διδακτορικής μου διατριβής.

Ακόμη, ένα μεγάλο ευχαριστώ σε όλους τους συναδέλφους για τη βοήθεια και συμπαράσταση τους, καθώς επίσης στους φίλους και την οικογένεια μου για την υπομονή και την ενθάρρυνση τους ώστε να ολοκληρωθεί αυτή η προσπάθεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μέσα στο πλαίσιο της διαδικασίας κατασκευής σύνθετων εξατομικευμένων δομοστοιχείων από χυτά υλικά αλλά και της εξέτασης της βιωσιμότητάς τους, εμφανίζεται ένας αριθμός από σύγχρονες κατασκευαστικές μεθοδολογίες βασισμένες σε ρομποτικούς μηχανισμούς, οι οποίες επιτυγχάνουν αυτοματοποίηση και προσαρμοστικότητα στη χρήση τους. Επίσης, παρουσιάζουν πλεονεκτήματα που σχετίζονται με τη μείωση των ρύπων κατά τη διαδικασία παραγωγής, την ευελιξία στην επιλογή υλικών προς διερεύνηση και το μειωμένο κόστος κατασκευής των δομών, παρόλο που στις μέρες μας η εφαρμογή τους στον κλάδο των κατασκευών είναι σε πρώιμο στάδιο και εκεί που εφαρμόζεται, γίνεται αποσπασματικά. Επίσης, παρατηρείται έλλειψη πληροφοριών σχετικών με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τον οικονομικό αντίκτυπο τους στον τομέα της μαζικής εξατομικευμένης παραγωγής.

Η προτεινόμενη έρευνα στοχεύει στην ανάπτυξη μιας αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραγωγής εξατομικευμένων μοναδιαίων στοιχείων μέσα από τα κριτήρια της βιωσιμότητας, της πολλαπλής λειτουργικότητας και της κατασκευασιμότητάς τους. Η μελέτη επικεντρώνεται στην κλίμακα του τούβλου για σκοπούς προσαρμοστικότητας και τυποποίησης του σχεδιασμού και της κατασκευής τέτοιων στοιχείων. Συγκεκριμένα, αυτό επιτυγχάνεται μέσω της σχεδιαστικής και φυσικής παραγωγής πολλαπλών σύνθετων μορφολογικά δομοστοιχείων με τη χρήση ενός ευέλικτου κινητικού καλουπιού. Τα εξατομικευμένα δομοστοιχεία παράγονται σύμφωνα με προκαθορισμένες σχεδιαστικές αποφάσεις που αναφέρονται στη χρήση τριών δομικών υλικών: του ωμόπλινθου, του πηλού με τσιμέντο και του σκυροδέματος, αλλά και στην αξιολόγηση των αποτελεσμάτων. Τα ψηφιακά αποτελέσματα και οι φυσικοί πειραματισμοί τροφοδοτούν τη διαδικασία αξιολόγησης αφού συσχετίζονται με την επιλογή και τη σύσταση του δομικού υλικού, την εφαρμογή της ρομποτικής διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο και την παραγωγικότητα της.

Η σύγκριση μεταξύ ψηφιακών και φυσικών αποτελεσμάτων προσφέρει τη δυνατότητα αξιολόγησης της ακρίβειας, της οικολογικής και οικονομικής βιωσιμότητας, που τέτοιες διαδικασίες προσφέρουν σε αντίθεση με συμβατικές μεθόδους κατασκευής αντίστοιχων δομών. Στοχεύοντας στη μελλοντική ανάπτυξη και εξακρίβωση της δυνατότητας υλοποίησης στην κατασκευαστική βιομηχανία, διαπιστώνεται ότι σε βάθος χρόνου η αυτοματοποιημένη διαδικασία είναι οικονομικά πιο συμφέρουσα. Επίσης, παρατηρούνται μικρότερες τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ενέργειας σε σχέση με τη συμβατική διαδικασία. Το ευέλικτο καλούπι επιτρέπει την παραγωγή ενός αριθμού από μη συμβατικές δομές με γρήγορο τρόπο, παρόλο που ο βαθμός αυτοματοποίησης και ακρίβειας του ευέλικτου καλουπιού επιδέχεται μελλοντικές βελτιώσεις.

ABSTRACT

As part of the process of constructing complex customized modules from cast materials and examining their viability, a number of advanced construction methodologies based on robotic mechanisms appear, which achieve automation and adaptability in their use. Also, they have advantages related to the reduction of pollutants during the production process, the flexible selection of materials to be investigated and the reduction of structures' construction cost, although nowadays their application in the construction industry is at an early stage and where applied, this is fragmented. Also, information on the environmental and economic impact of mass customization production is missing from the literature.

The proposed research aims to develop an automated process for the production of customized individual units based on the criteria of their viability, multiple functionality and construction. The study focuses on the scale of the bricks for adaptability purposes, standardization and practicality of their design and construction. In particular, this is achieved through the design and physical production of multiple morphologically complex bricks using an adaptive formwork. The customized bricks are produced according to predetermined design decisions that refer to the use of three different building materials: adobe, clay with cement and concrete, but also to the evaluation of the analysis results. The digital results and the experiments in the physical environment inform the evaluation process as they are related to the selection and composition of the building material, the implementation of the robotic process in real time and its productivity.

The comparison between digital and physical results offers the possibility for evaluating the provided accuracy as well as the ecological and economic viability of the process, in contrast to conventional methods of constructing corresponding structures. Aiming at their future development and implementation in the construction industry, it is found that in the long run the automated process is economically more advantageous. Also, lower carbon dioxide and energy emission values compared to the conventional process are observed. The flexible formwork allows the production of a number of non-conventional structures in less time, although the degree of automation and accuracy of the flexible mold is subject to future improvements.

Περιεχόμενα

Περίληψη

Abstract

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ΕΙΣΑΓΩΓΗ..... | 1 |
| 2 | ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΧΥΤΩΝ ΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 7 |
| 2.1 | Εισαγωγή | 7 |
| 2.2 | Συμβατικοί τρόποι κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων..... | 7 |
| 2.3 | Αυτοματοποιημένοι τρόποι κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων..... | 12 |
| 2.3.1 | Καλούπια μέσω ψηφιακών μηχανών..... | 13 |
| 2.3.2 | Καλούπια pin-beds | 14 |
| 2.3.3 | Καλούπια από μεμβράνη..... | 16 |
| 2.3.4 | Αρθρωτά καλούπια | 18 |
| 2.3.5 | Πνευματικά καλούπια..... | 21 |
| 2.3.6 | Καλούπια μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης..... | 22 |
| 2.4 | Σύνοψη αυτοματοποιημένων μεθόδων χύτευσης δομών και δομοστοιχείων | 24 |
| 2.5 | Αειφόρες ψηφιακές προσεγγίσεις στην ανάλυση τοιχοποιίας | 27 |
| 2.5.1 | Περιβαλλοντική εκτίμηση – Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) και εκτίμηση κόστους | 27 |
| 2.5.2 | Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) και εκτίμηση κόστους αυτοματοποιημένων κατασκευαστικών παραδειγμάτων..... | 29 |
| 2.6 | Συμπεράσματα..... | 35 |
| 3 | ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ | 36 |
| 3.1 | Εισαγωγή | 36 |
| 3.2 | Ανάλυση προτεινόμενης μεθοδολογίας έρευνας | 36 |
| 3.3 | Συμπεράσματα..... | 40 |
| 4 | ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ | 41 |
| 4.1 | Εισαγωγή | 41 |
| 4.2 | Εισαγωγή στη διερεύνηση πιθανών τυπολογιών δομοστοιχείων..... | 41 |
| 4.3 | Παραμετρική διερεύνηση γεωμετρίας δομοστοιχείου..... | 43 |
| 4.4 | Εισαγωγή στη στατική ανάλυση..... | 52 |
| 4.4.1 | Είδη και χαρακτηριστικά τεχνητών δομοστοιχείων | 52 |
| 4.4.2 | Γραμμική ανάλυση δομοστοιχείων..... | 53 |
| 4.4.3 | Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης | 54 |
| 4.5 | Έλεγχος θλιπτικής αντοχής δομοστοιχείων | 56 |
| 4.5.1 | Μη γραμμική ανάλυση δομοστοιχείων | 57 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.2 Αποτελέσματα χαρακτηριστικής αντοχής δομοστοιχείων υπό θλίψη | 59 |
| 4.6 Συμπεράσματα..... | 61 |
| 5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΥΕΛΙΚΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ | 62 |
| 5.1 Εισαγωγή | 62 |
| 5.2 Αυτοματοποιημένη μέθοδος παραγωγής δομοστοιχείων..... | 62 |
| 5.3 Περιγραφή αυτοματοποιημένου συστήματος | 62 |
| 5.4 Ενεργοποίηση καλουπιού | 64 |
| 5.5 Εκδοχή φυσικού μοντέλου ευέλικτου καλουπιού | 69 |
| 5.6 Συμπεράσματα..... | 71 |
| 6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΥ, ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ..... | 73 |
| 6.1 Εισαγωγή | 73 |
| 6.2 Εισαγωγή στην Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (LCA) | 73 |
| 6.3 Μεθοδολογία διερεύνησης Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA) | 74 |
| 6.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά | 74 |
| 6.3.2 Δεδομένα εισαγωγής/Δεδομένα εξαγωγής (Inputs/outputs)..... | 75 |
| 6.3.3 Κατασκευαστικά υλικά (A1-A3)..... | 76 |
| 6.3.4 Μεταφορές (A4)..... | 77 |
| 6.3.5 Στάδιο παραγωγής - Κατασκευαστική διαδικασία (A5) | 77 |
| 6.3.6 Τέλος ζωής- Αποδόμηση (C1-C4)..... | 78 |
| 6.4 Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA) δομοστοιχείων | 78 |
| 6.5 Συνολικά αποτελέσματα LCA προτεινόμενης και συμβατικής διαδικασίας κατασκευής δομοστοιχείων..... | 82 |
| 6.6 Αποτελέσματα LCA τυπολογιών δομοστοιχείων | 83 |
| 6.7 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους | 84 |
| 6.8 Ανάλυση και αποτελέσματα κόστους προτεινόμενης και συμβατικής διαδικασίας κατασκευής..... | 85 |
| 6.9 Υπολογισμός χρόνου προτεινόμενης διαδικασίας κατασκευής..... | 86 |
| 6.10 Συμπεράσματα..... | 87 |
| 7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ | 89 |
| 7.1 Εισαγωγή | 89 |
| 7.2 Αρχές συγκριτικής αξιολόγησης λύσεων | 89 |
| 7.3 Αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης | 89 |
| 7.3.1 Σύγκριση στατικής απόδοσης και όγκου | 89 |
| 7.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων κύκλου ζωής, στατικής απόδοσης και όγκου τυπολογιών | 93 |

| | |
|--|------------|
| 7.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων απόδοσης ευέλικτου και συμβατικού καλουπιού με βάση κριτήρια χρόνου, κόστους και περιβαλλοντικού αντίκτυπου | 96 |
| 7.4 Συμπεράσματα..... | 101 |
| 8 ΦΥΣΙΚΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ | 103 |
| 8.1 Εισαγωγή | 103 |
| 8.2 Εισαγωγή στην πειραματική διερεύνηση | 103 |
| 8.3 Υλικά | 104 |
| 8.4 Αξιολόγηση ρομποτικής διαδικασίας και φυσικών πρωτοτύπων | 105 |
| 8.4.1 Γεωμετρία και διαστάσεις..... | 107 |
| 8.4.2 Ποιοτική αξιολόγηση παραγόμενων πρωτοτύπων | 109 |
| 8.4.3 Χρόνος συνολικής διαδικασίας κατασκευής..... | 110 |
| 8.4.4 Λειτουργία ευέλικτου καλουπιού..... | 111 |
| 8.5 Συμπεράσματα..... | 112 |
| 9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ | 114 |
| 9.1 Ερευνητική συνεισφορά | 114 |
| 9.2 Ερευνητικά αποτελέσματα και μελλοντικοί στόχοι | 115 |

Βιβλιογραφία

Παραρτήματα

Παράρτημα 1: Ανάλυση shading ratio

Παράρτημα 2: Στατική ανάλυση

Παράρτημα 3: Κώδικας ρομποτικής διαδικασίας και ενεργοποιήσεων

Κατάλογος Εικόνων/ Πινάκων/ Εξιιώσεων

| | |
|--|----|
| Εικόνα 1: Διαδικασία παραγωγής πλίνθινων τούβλων επί τόπου [1] | 8 |
| Εικόνα 2: Διαδικασία παραγωγής τμημάτων τοιχοποιίας εκτός εργοταξίου (off site) / Διαδικασία παραγωγής τούβλων εκτός εργοταξίου (off site) [2] | 8 |
| Εικόνα 3: Διάγραμμα σταδίων διαδικασίας παραγωγής τούβλων (Hotza and Goulart de Oliveira Maia, 2014) | 9 |
| Εικόνα 4: Los Manantiales, Philips Pavilion (Kato et al, 1981; Duyster, 1959) | 10 |
| Εικόνα 5: Συμβατικό καλούπι τοιχοποιίας [4] | 11 |
| Εικόνα 6: Ξυλότυπος PERI με τη χρήση της μεθόδου κοπής ξύλων [4] | 13 |
| Εικόνα 7: Καλούπι από σμιλευμένη υψηλής πυκνότητας διογκωμένη πολυστερίνη-Spencer Dock Bridge (Wangler et al, 2016)..... | 14 |
| Εικόνα 8: Καλούπια pin-beds μικρής κλίμακας (Schipper and Grünwald, 2014) | 15 |
| Εικόνα 9: Ευέλικτο καλούπι στο έργο ADAPA [5]..... | 15 |
| Εικόνα 10: Υφασμάτινα καλούπια για την κατασκευή τοιχοποιίας [6]..... | 16 |
| Εικόνα 11: Παραγωγή δομικών στοιχείων με τη χρήση υφασμάτων καλουπιών [7] | 16 |
| Εικόνα 12: Κατασκευή Hilo με τη χρήση καλουπιού από μεμβράνη και προεντεταμένα καλώδια (Veenendaal and Block, 2014)..... | 17 |
| Εικόνα 13: Form Found Founded Design project- μορφολόγηση καλουπιού με μεμβράνη με τη χρήση ρομποτικών βραχιόνων (West and Araya, 2010)..... | 18 |
| Εικόνα 14: Καλούπι δομικού στοιχείου με τη χρήση αρθρωτού μηχανισμού (Kontonourkis et al, 2019) | 19 |
| Εικόνα 15: Digital Mould- καλούπι για μοναδιαία στοιχεία με πολλαπλή μορφολόγηση (Khabazi and Budig, 2016)..... | 19 |
| Εικόνα 16: Μέθοδος slipforming για την παραγωγή γραμμικών κατακόρυφων δομικών στοιχείων [8]..... | 20 |
| Εικόνα 17: Ολίσθηση καλουπιού (Slipforming)- μέθοδος παραγωγής δομικών στοιχείων (Kristensen et al, 2013) | 20 |
| Εικόνα 18: Πνευματικό καλούπι για την παραγωγή επιφανειακών στοιχείων (Huijben, 2016) | 21 |
| Εικόνα 19: Χρήση πνευματικών καλουπιών σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές (Pronk, 2014; Kokawa, 2012)..... | 22 |
| Εικόνα 20: Παραγωγή δομικών στοιχείων με τη χρήση καλουπιών παραγόμενων με τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης [9] | 23 |
| Εικόνα 21: Digital Construction Platform-τρειςδιάστατη εκτύπωση μεγάλης κλίμακας τοιχοποιίας επί τόπου (Keating et al, 2017) | 23 |
| Εικόνα 22: Κατασκευή ενίσχυσης και πλήρωσης τοιχοποιίας με τη χρήση ειδικών εργαλείων τελικής δράσης (Hack et al, 2013) | 24 |
| Εικόνα 23: Διάγραμμα σύγκρισης παραγωγικότητας σε συνάρτηση με την μέθοδο παραγωγής του δομικού στοιχείου (De Soto et al, 2018)..... | 32 |

| | |
|--|----|
| Εικόνα 24: Πίνακας τιμών καταναλούμενης ενέργειας και διοξειδίου του άνθρακα κατά τις διαφορετικές κατασκευαστικές διαδικασίες (Sitnikov, 2019) | 32 |
| Εικόνα 25: Μελέτη TailorCrete όπου αναπτύσσεται ένα ευέλικτο σύστημα pin-bed [16] | 33 |
| Εικόνα 26: Γενικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθοδολογίας έρευνας το οποίο εμπεριέχει τη συμβατική και την αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής..... | 37 |
| Εικόνα 27: Ενσωμάτωση παραμέτρων και κριτηρίων καθώς και συγκριτική διερεύνηση των αποτελεσμάτων στο προτεινόμενο διάγραμμα μεθοδολογίας της έρευνας | 40 |
| Εικόνα 28: a. Πολυκατοικία Ν.Βαλσαμάκη [20], b. Τοιχοποιία Sumart Diseño y Arquitectura SAS [21], c. Gallery of winery Gantenbein [22]..... | 41 |
| Εικόνα 29: Χαρακτηριστικές τυπολογίες τούβλων (T1, T2 και T3) σε τομή, με πτυχώσεις και ανοίγματα..... | 43 |
| Εικόνα 30: Δομοστοιχείο και διαστάσεις γεωμετρικών ορίων | 44 |
| Εικόνα 31: Μέγιστη κλίση επιφάνειας ανοίγματος στην περίπτωση φωτοσκίασης κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο | 47 |
| Εικόνα 32: Διαγράμματα γεωμετρικών ορίων με μέγιστη και ελάχιστη κλίση ανοίγματος για έλεγχο φωτοσκίασης..... | 47 |
| Εικόνα 33: Γραφικές παραστάσεις ποσοστού φωτοσκίασης κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τις περιπτώσεις περιστροφής του ανοίγματος..... | 48 |
| Εικόνα 34: Τομές δομοστοιχείου με πτυχώσεις και δομοστοιχείου χωρίς πτυχώσεις ως προς τη κλίση των ακτινών του ήλιου κατά τις διαφορετικές ώρες της ημέρας σε ανατολικό-δυτικό προσανατολισμό..... | 48 |
| Εικόνα 35: Διαστάσεις μελών ευέλικτου καλουπιού..... | 49 |
| Εικόνα 36: Τυπολογίες δομοστοιχείων σε διαγώνια διάταξη για την ανάπτυξη μη-συμβατικών τοιχοποιιών..... | 51 |
| Εικόνα 37: Γραφικές παραστάσεις Von-Mises τυπολογιών T1, T2, T3 ωμόπλινθου | 55 |
| Εικόνα 38: Γραφικές παραστάσεις Von-Mises τυπολογιών T1, T2, T3 σκυροδέματος..... | 56 |
| Εικόνα 39: Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για τα τρία υλικά..... | 58 |
| Εικόνα 40: Αποτελέσματα μέγιστης και ελάχιστης θλιπτικής αντοχής για σκυρόδεμα, ωμόπλινθο και πηλό | 61 |
| Εικόνα 41: Ψηφιακή μοντελοποίηση εργαλείου τελικής δράσης με τα μέρη που το αποτελούν | 63 |
| Εικόνα 42: Λογικό διάγραμμα λειτουργίας της ρομποτικής διαδικασίας..... | 65 |
| Εικόνα 43: Στάδια ενεργοποίησης του ευέλικτου καλουπιού: (a) Αρχική θέση-πλήρωση καλουπιού, (b) Στάδιο συμπίεσης, (c) Στάδιο ξεκαλουπώματος 1,(d) Στάδιο ξεκαλουπώματος 2, (e) Στάδιο τοποθέτησης..... | 66 |
| Εικόνα 44: a. Επιφάνεια προσαρμογής των επεξεργαστών ενεργοποιητών, b. Επιφάνεια προσαρμογής των βαλβίδων πνευματικών πιστονιών | 67 |
| Εικόνα 45: Τμήμα ευέλικτου καλουπιού. Πνευματικό πιστόνι 20 cm και αισθητήρες πίεσης..... | 68 |
| Εικόνα 46 Φυσικό μοντέλο ευέλικτου εργαλείου και επιφάνεια παραγωγής των δομοστοιχείων ... | 68 |

| | |
|--|-----|
| Εικόνα 47:(a) Κατακόρυφη θέση για πλήρωση υλικού, (b) Περιστροφή 90° για το στάδιο της συμπίεσης, (c) Θέση ξεκαλουπάματος και τοποθέτησης, (d) Επαναφορά αρχικής θέσης και περιστροφή 90° | 69 |
| Εικόνα 48: Εκδοχή φυσικού μοντέλου εργαλείου τελικής δράσης προσαρμοσμένου στον ρομποτικό βραχίονα..... | 70 |
| Εικόνα 49: Στιγμιότυπα της φυσικής διαδικασίας παραγωγής ενός δομοστοιχείου..... | 72 |
| Εικόνα 50: Δομή ανάλυσης LCA σε επίπεδο διαγράμματος που συμπεριλαμβάνει τα στάδια A1-A3, A4, A5 και C1-C4 | 75 |
| Εικόνα 51: Διάγραμμα διερεύνησης κόστους..... | 84 |
| Εικόνα 52: Γραφικές παραστάσεις θλιπτικής αντοχής σε συνάρτηση με τον όγκο των δομοστοιχείων στις περιπτώσεις, a. ωμόπλινθου, b. πηλού με τσιμέντο, και c. σκυρόδεμα..... | 90 |
| Εικόνα 53: Περίπτωση μέγιστης και ελάχιστης θλιπτικής αντοχής για τον ωμόπλινθο..... | 91 |
| Εικόνα 54: Περίπτωση μέγιστης και ελάχιστης θλιπτικής αντοχής για τον πηλό | 92 |
| Εικόνα 55: Μέγιστη και ελάχιστη θλιπτική αντοχή στην περίπτωση του σκυροδέματος | 92 |
| Εικόνα 56: Γραφικές παραστάσεις εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και θλιπτικής αντοχής για όλες τις τυπολογίες τούβλων με βάση τα τρία εξεταζόμενα υλικά..... | 95 |
| Εικόνα 57: Γραφική κόστους των διαδικασιών κατασκευής των καλουπιών καθώς και της αυτοματοποιημένης και της συμβατικής διαδικασίας παραγωγής τούβλων με το ευέλικτο και το συμβατικό καλούπι. | 97 |
| Εικόνα 58: Συγκριτικό γράφημα που δείχνει το κόστος υλικών και μηχανισμών για την κατασκευή του ευέλικτου και του συμβατικού καλουπιού για όλες τις τυπολογίες τούβλων. Στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού, το κόστος υπολογίζεται μια φορά ενώ στην περίπτωση του συμβατικού καλουπιού είναι πολλαπλάσιο του αριθμού των τούβλων προς διερεύνηση..... | 98 |
| Εικόνα 59: Γραφική παράσταση αύξησης του κόστους μαζικής εξατομικευμένης παραγωγής σε σχέση με τον αριθμό των δομοστοιχείων για την προτεινόμενη και τη συμβατική διαδικασία..... | 99 |
| Εικόνα 60: Διάγραμμα τιμών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις τυπολογίες τούβλων στην περίπτωση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας..... | 100 |
| Εικόνα 61: Διάγραμμα τιμών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις τυπολογίες τούβλων στην περίπτωση της συμβατικής διαδικασίας..... | 101 |
| Εικόνα 62: Γραφική παράσταση σύγκρισης καταναλωμένης ενέργειας μεταξύ αυτοματοποιημένης και συμβατικής διαδικασίας για όλες τις τυπολογίες των δομοστοιχείων | 101 |
| Εικόνα 63: Διαστάσεις ψηφιακού μοντέλου..... | 107 |
| Εικόνα 64: Διαστάσεις ανοίγματος στο ψηφιακό μοντέλο-εσωτερική και εξωτερική πλευρά..... | 109 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|--|----|
| Πίνακας 1 :Κατηγοριοποίηση διερευνήσεων μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση | 26 |
| Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση κατασκευαστικών διερευνήσεων (συμβατικών και μη συμβατικών) σχετικών με χρήση μεθόδων χύτευσης ή τρισδιάστατης εκτύπωσης μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση σε σχέση με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο τους..... | 34 |
| Πίνακας 3: Γεωμετρικά όρια τυπολογιών τούβλων που συσχετίζονται με εναλλακτικές ενεργοποιήσεις του ευέλικτου καλουπιού..... | 43 |
| Πίνακας 4: Πίνακας περιπτώσεων με μέγιστη σκίαση σε αντιστοιχία με τις κλίσεις της επιφάνειας του ανοίγματος..... | 45 |
| Πίνακας 5:Αποτελέσματα περιπτώσεων φωτοσκίασης σε αντιστοιχία με τις κλίσεις της επιφάνειας του ανοίγματος..... | 46 |
| Πίνακας 6: Τυπολογίες δομοστοιχείων μέσω παραμετρικής διερεύνησης..... | 51 |
| Πίνακας 7: Παράμετροι για την αριθμητική προσομοίωση τούβλων όσον αφορά τα τρία εξεταζόμενα υλικά | 54 |
| Πίνακας 8: Τιμές χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής των τριών υλικών προς διερεύνηση σε όλες τις τυπολογίες δομοστοιχείων | 60 |
| Πίνακας 9: Δεδομένα εισαγωγής για κάθε κατασκευαστικό υλικό προς διερεύνηση | 79 |
| Πίνακας 10: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης ενός δομοστοιχείου για το κάθε κατασκευαστικό υλικό προς διερεύνηση | 79 |
| Πίνακας 11: Δεδομένα εισαγωγής για το στάδιο των μεταφορών | 79 |
| Πίνακας 12: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης ενός δομοστοιχείου στο στάδιο των μεταφορών | 79 |
| Πίνακας 13: Δεδομένα εισαγωγής στο στάδιο κατασκευής με τη χρήση ευέλικτου καλουπιού | 80 |
| Πίνακας 14: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης ενός δομοστοιχείου στο στάδιο κατασκευής με τη χρήση ευέλικτου καλουπιού..... | 80 |
| Πίνακας 15: Δεδομένα εισαγωγής στο στάδιο κατασκευής με τη χρήση συμβατικού καλουπιού .. | 81 |
| Πίνακας 16: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης στο στάδιο κατασκευής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση συμβατικού καλουπιού..... | 81 |
| Πίνακας 17: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης στο στάδιο τέλους ζωής-αποδόμησης του δομοστοιχείου | 81 |
| Πίνακας 18: Συνολικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης για το στάδιο κατασκευής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση ευέλικτου καλουπιού..... | 82 |
| Πίνακας 19: Συνολικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης για το στάδιο κατασκευής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση συμβατικού καλουπιού..... | 83 |
| Πίνακας 20: Πίνακας αποτελεσμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις τυπολογίες δομοστοιχείων από ωμόπλινθο, πηλό με τσιμέντο και σκυρόδεμα | 84 |

| | |
|--|-----|
| Πίνακας 21: Τιμές κόστους υλικών και εργαλείων για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού και της ρομποτικής διαδικασίας..... | 86 |
| Πίνακας 22: Συνολικό κόστος για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού και της ρομποτικής διαδικασίας..... | 86 |
| Πίνακας 23: Τιμές κόστους υλικών και εργαλείων για την κατασκευή του συμβατικού καλουπιού και της συμβατικής διαδικασίας | 86 |
| Πίνακας 24: Συνολικό κόστος για την κατασκευή του συμβατικού καλουπιού και της συμβατικής διαδικασίας..... | 86 |
| Πίνακας 25: Υπολογισμός χρόνου των σταδίων παραγωγής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση της ρομποτικής διαδικασίας | 87 |
| Πίνακας 26: Πίνακας αποτελεσμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και όγκου για κάθε δομοστοιχείο από ωμόπλινθο, πηλό με τσιμέντο και σκυρόδεμα..... | 93 |
| Πίνακας 27: Τιμές συνολικού κόστους κατασκευής καλουπιού και παραγωγή εξατομικευμένων δομοστοιχείων για την προτεινόμενη ρομποτική και τη συμβατική διαδικασία | 99 |
| Πίνακας 28: Σύσταση μειγμάτων των τριών επιλεγόμενων υλικών | 105 |
| Πίνακας 29: Φυσικά πρωτότυπα των διερευνώμενων τυπολογιών | 106 |
| Πίνακας 30: Ψηφιακά μοντέλα και διαστάσεις..... | 107 |
| Πίνακας 31: Πίνακας καταγραφής φυσικών διαστάσεων των παραγόμενων πρωτοτύπων και υπολογισμός μέσου όρου των φυσικών διαστάσεων | 108 |
| Πίνακας 32: Πίνακας καταγραφής φυσικών διαστάσεων ανοίγματος των παραγόμενων πρωτοτύπων και υπολογισμός μέσου όρου..... | 109 |
| Πίνακας 33: Πίνακας χρόνων που απαιτούν οι διαφορετικές διαδικασίες κατά τη φυσική κατασκευαστική διαδικασία..... | 111 |

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι συμβατικές διαδικασίες κατασκευής χυτών τμημάτων ή μοναδιαίων στοιχείων τοιχοποιίας χαρακτηρίζονται ως χρονοβόρες και μη ακριβείς (Bock, 2008). Από την άλλη, οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής έχουν τη δυνατότητα να βελτιώνουν τις σχεδιαστικές λύσεις, προσφέροντας παράλληλα ευελιξία και ακρίβεια όσον αφορά την παραγωγή πολλαπλών φυσικών πρωτοτύπων (Naboni and Paoletti, 2015; Gramazio et al, 2014). Επίσης, τα προσφερόμενα ψηφιακά εργαλεία περιβαλλοντικής εκτίμησης και κόστους, σε συνδυασμό με την εφαρμογή ευέλικτων κατασκευαστικών μεθόδων, επιτυγχάνουν την βελτιστοποίηση της οικολογικής συμπεριφοράς τέτοιων δομών, καθιστώντας απαραίτητη την ενσωμάτωση αντίστοιχων κριτηρίων στις σύγχρονες σχεδιαστικές και κατασκευαστικές προσεγγίσεις (Lim et al, 2012).

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα που οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής μπορούν να επιφέρουν στην αρχιτεκτονική και οικοδομική βιομηχανία, στις μέρες μας, παρατηρείται αργή ενσωμάτωση τους, περισσότερο λόγω της έλλειψης γνώσης, τεχνογνωσίας αλλά και άγνοιας όσον αφορά τα αποτελέσματα που τέτοιες διαδικασίες μπορούν να επιφέρουν. Ιδιαίτερα, στον κατασκευαστικό τομέα και συγκεκριμένα στην παραγωγή σύνθετων δομών όπου η ανάγκη αυτοματοποίησης και ακρίβειας γίνεται όλο και πιο επιτακτική (Bock, 2008). Έτσι, μέσα από τη βιβλιογραφία, παρουσιάζονται περιπτώσεις δομών και δομοστοιχείων αποτελούμενων από σύνθετες γεωμετρίες, οι οποίες παράγονται με συμβατικούς τρόπους χύτευσης (Bach et al, 1976; Burger et al, 2006; Duyster, 1959). Τέτοιες διαδικασίες εμφανίζουν μειονεκτήματα όσον αφορά την πρακτικότητα εφαρμογής τους, τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο, το χρόνο, το κόστος και την ακρίβεια στην παραγωγή των φυσικών αποτελεσμάτων (Kim et al, 2012; Lee et al, 2014). Για την υπερπήδηση τέτοιων εμποδίων, ο παράγοντας του αυτοματισμού εισάγεται τόσο στο σχεδιασμό όσο και στην κατασκευή, με μελέτες και παραδείγματα να συμπεριλαμβάνουν διαφορετικούς τύπους καλουπιών, όπως αυτά που παράγονται μέσω ψηφιακών μηχανών [1], καλούπια τύπου pin-beds (Hawes, 1952; Eisel, 1979; Schipper, 2015), καλούπια με μεμβράνη (Veenendaal and Block, 2014), αρθρωτά καλούπια (Gramazio et al, 2014), πνευματικά καλούπια (Pronk, 2014) και καλούπια που παράγονται μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (Keating, 2017). Τέτοιες μεθοδολογίες διαφοροποιούνται και συγκρίνονται ανάλογα με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα που η κάθε μια μπορεί να επιφέρει όσον αφορά τη βιωσιμότητα εισαγωγής τους στον κατασκευαστικό τομέα. Η χρήση ψηφιακών μηχανών προσφέρει τη δυνατότητα κατασκευής καλουπιών μεγάλης κλίμακας,

τα οποία όμως στις περισσότερες περιπτώσεις είναι μη επαναχρησιμοποιήσιμα. Αυτό έχει αρνητικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο αφού μεγάλες ποσότητες πρώτης ύλης δεν επαναχρησιμοποιούνται λόγω των ιδιαίτερων γεωμετρικών χαρακτηριστικών των δομών προς κατασκευή. Αντίθετα, στην περίπτωση των καλουπιών τύπου rin-beds, η μικρή τους κλίμακα και οι ευέλικτοι μηχανισμοί τους χρησιμεύουν στην παραγωγή δομικών στοιχείων με καμπυλωμένες επιφάνειες και σε πολλαπλές μορφολογίες χωρίς την ανάγκη σπατάλης μεγάλης ποσότητας υλικού. Τα καλούπια με μεμβράνη, τα οποία έχουν δοκιμαστεί και στην παραγωγή δομικών στοιχείων μεγάλης κλίμακας, έχουν μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο λόγω του υλικού κατασκευής τους σε αντίθεση με τους ξύλινους ή μεταλλικούς σταθερούς ξυλότυπους, και αυτό προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τη χρήση τους. Επίσης, τα αρθρωτά και πνευματικά καλούπια πλεονεκτούν όσον αφορά την ευελιξία και την δυνατότητα επανάχρησής τους και έχουν προοπτικές εφαρμογής σε μεγαλύτερες κλίμακες. Τέλος, η χρήση της τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παραγωγή καλουπιών έχει πλεονεκτήματα όσον αφορά την εξοικονόμηση δομικού υλικού και κόστους της κατασκευαστικής διαδικασίας, παρόλο που εμφανίζεται να είναι περισσότερο χρονοβόρα σε σύγκριση με άλλες αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Τα πλεονεκτήματα που οι αυτοματοποιημένες διαδικασίες μπορούν να επιφέρουν στην οικοδομική βιομηχανία είναι προφανή, παρόλες τις διαφοροποιήσεις και τα μειονεκτήματα της κάθε μιας.

Με σκοπό την εις βάθος ανάλυση και εξέταση της συνεισφοράς αλλά και του ρόλου που τέτοιες διαδικασίες θα μπορούσαν να διαδραματίσουν στον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό αλλά και στον κλάδο των κατασκευών, επιλέγεται μια κατηγορία αυτοματοποιημένων καλουπιών και συγκεκριμένα αυτή των ευέλικτων. Η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου καλουπιού γίνεται λόγω της δυνατότητας του να καλύψει την ανάγκη παραγωγής μοναδιαίων εξατομικευμένων δομοστοιχείων με πολλαπλές δυνατότητες μορφολογίας. Επίσης, η επιλογή του συγκεκριμένου τύπου καλουπιού μπορεί να συνεισφέρει προς την αύξηση της κατασκευαστικής ακρίβειας, τη μείωση του απαιτούμενου υλικού για την παραγωγή του καλουπιού, τη μείωση του χρόνου κατασκευής των δομοστοιχείων αλλά και της απαιτούμενης ενέργειας. Με σκοπό την εις βάθος διερεύνηση του ρόλου που τα ευέλικτα καλούπια μπορούν να διαδραματίσουν στον κλάδο των κατασκευών, η παρούσα έρευνα εξετάζει το ρόλο τους μέσα στο γενικότερο πλαίσιο της αυτοματοποιημένης σχεδιαστικής και κατασκευαστικής διαδικασίας (Hawkins et al, 2016; Galizia et al, 2019; Wang et al, 2011). Συγκεκριμένα εξετάζεται η εφαρμογή τους ως μέσο παραγωγής δομικών στοιχείων τοιχοποιίας με την παράλληλη ενσωμάτωση βιώσιμων κριτηρίων που σχετίζονται με τον περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο τους (Nakao, 2007; Galizia et al, 2019). Οι τρεις

βασικοί άξονες διερεύνησης αναφέρονται, πρώτα στη σχεδιαστική ανάλυση μέσα από την παραμετρική διερεύνηση, τη στατική ανάλυση και τον υπολογισμό του οικολογικού αποτυπώματος όσον αφορά το κύκλο ζωής αλλά και του χρόνου/κόστους κατασκευής. Έπειτα, γίνεται αναφορά στην ανάπτυξη ενός ευέλικτου καλουπιού ως εργαλείου τελικής δράσης στην άκρη ενός ρομποτικού βραχίονα που είναι υπεύθυνο για την παραγωγή δομικών στοιχείων πολλαπλών μορφολογιών. Τέλος, στη φυσική παραγωγή πρωτοτύπων μέσα από την προτεινόμενη αυτοματοποιημένη διαδικασία, όπου εξετάζεται η λειτουργικότητα του ευέλικτου και προσαρμόσιμου καλουπιού και υπολογίζεται ο πραγματικός χρόνος και το κόστος της κατασκευαστικής διαδικασίας.

Η ανάλυση της σχεδιαστικής και στατικής επάρκειας είναι αναγκαίος παράγοντας που επηρεάζει την κατασκευαστική διερεύνηση και συνδέεται άμεσα με τον υπολογισμό του οικολογικού αποτυπώματος, αφού μέσα από τη βέλτιστη στατική απόδοση και αντοχή των στοιχείων με το ελάχιστο δομικό υλικό μπορεί να επιτευχθεί μείωση των ρύπων. Η δυνατότητα σύγκρισης των επιμέρους διερευνήσεων μπορεί να προσφέρει πλεονεκτήματα και να συνεισφέρει προς την ανάπτυξη βέλτιστων παραμετρικών συνδυασμών και επιλογή των καλύτερων λύσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί τόσο στη φάση σχεδιασμού μέσω της επιλογής και μείωσης του υλικού, του υπολογισμού των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, της ενέργειας αλλά και του κόστους κατασκευής (Agusti-Juan and Habert, 2017), όσο και στη φάση κατασκευής μέσω της γρήγορης και με ακρίβεια παραγωγής πολλαπλών στοιχείων, ελαχιστοποιώντας το κόστος κατασκευής τους. Οι παράγοντες της περιβαλλοντικής και οικονομικής βιωσιμότητας των λύσεων χαρακτηρίζονται ως σημαντικοί και θεωρούνται αναγκαίοι για εισαγωγή και εξέταση στην οικοδομική βιομηχανία (Chevalier and Le Teno, 1996). Προς αυτή την κατεύθυνση, ο υπολογισμός του οικολογικού αποτυπώματος μέσα από την επιλογή κατάλληλων δομικών υλικών που είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, αλλά και ο υπολογισμός των εκπομπών και της ενέργειας που καταναλώνεται κατά τη διαδικασία κατεδάφισης στο τέλος ζωής της κατασκευής (Faludi et al, 2019; Sitnikov, 2019), όπως επίσης και η επιλογή της αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής διαδικασίας με χαμηλή κατανάλωση ενέργειας και ρυπογόνων εκπομπών (De Soto et al, 2018) θα μπορούσαν να συνεισφέρουν προς περισσότερο βιώσιμες λύσεις στον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό τομέα.

Η παρούσα έρευνα προτείνει μια ενοποιημένη μέθοδο σχεδιασμού και κατασκευής μη συμβατικών δομοστοιχείων μέσω αυτοματοποίησης αλλά και ενσωμάτωσης κριτηρίων βιωσιμότητας, ένας τομέας που απασχολεί όλο και περισσότερο τον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό κλάδο στις μέρες μας. Τα δομοστοιχεία υπό διερεύνηση εμπίπτουν στην

κλίμακα του τούβλου και έχουν μη συμβατική μορφολόγηση η οποία προκύπτει από πολλαπλές παραμέτρους σχεδιασμού και εξυπηρετεί διαφορετικά κριτήρια. Η διαδικασία κατασκευής τέτοιων δομοστοιχείων απαιτεί αυτοματοποίηση ώστε να επιτυγχάνεται κατασκευαστική ακρίβεια και τυποποίηση αλλά και αποφυγή μεγάλων εκπομπών ρύπων, σπατάλης υλικού, χρόνου και κόστους συγκριτικά με συμβατικές χειρωνακτικές μεθόδους. Μέσα από την παράλληλη παραμετρική και συγκριτική αποτίμηση πολλαπλών σχεδιαστικών λύσεων, εξετάζεται ένας αριθμός από δομές όσον αφορά τα γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά και την στατική τους συμπεριφορά. Επίσης, εξετάζεται η βιωσιμότητα των λύσεων μέσα από την περιβαλλοντική ανάλυση, κατά την οποία εξάγονται αποτελέσματα που σχετίζονται με εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και καταναλώσιμης ενέργειας κατά τη διαδικασία κατασκευής του ευέλικτου καλουπιού και των δομοστοιχείων. Στόχος είναι η βέλτιστη περιβαλλοντική συμπεριφορά ενός λειτουργικού και στατικά επαρκούς τελικού προϊόντος. Επιπρόσθετα, μέσα από την ανάλυση του κόστους και του απαιτούμενου χρόνου κατασκευής σε κάθε περίπτωση, εξετάζεται ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της μεθόδου σε σύγκριση με συμβατικές κατασκευαστικές διαδικασίες. Για την επιβεβαίωση της λειτουργίας αλλά και των δυνατοτήτων του ευέλικτου καλουπιού ακολουθείται πειραματικός έλεγχος της διαδικασίας παραγωγής και αναπτύσσονται φυσικά πρωτότυπα τα οποία αξιολογούνται. Η παραμετρική διερεύνηση και αξιολόγηση των λύσεων αλλά και η πειραματική διαδικασία αυτοματοποίησης ενσωματώνονται μέσα σε ένα ενιαίο πλαίσιο, προσφέροντας δυνατότητες εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας και σε άλλες περιπτώσεις μαζικής παραγωγής εξατομικευμένων στοιχείων. Πρόκειται για ένα παράδειγμα καταγραφής και αποτίμησης των πληροφοριών σε σχέση με αντίκτυπο και κόστος προτεινόμενων αυτοματοποιημένων διαδικασιών παραγωγής εξειδικευμένων δομικών στοιχείων ώστε να εξακριβωθεί η δυνατότητα υλοποίησης τους (proof of concept).

Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση του υφιστάμενου ερευνητικού πεδίου που αφορά τις μεθόδους κατασκευής χυτών δομών ή δομοστοιχείων και των αειφόρων προσεγγίσεων που ενδεχομένως να εφαρμόζονται. Οι μέθοδοι κατασκευής κατηγοριοποιούνται σε συμβατικές και αυτοματοποιημένες. Σε κάθε μια από αυτές εμπεριέχονται υποκατηγορίες με ανάλογους τύπους καλουπιών, τα οποία σχολιάζονται και αξιολογούνται ως προς την ευελιξία τους, τη δυνατότητα επανάχρησής τους, την κλίμακα εφαρμογής τους εντός ή εκτός εργοταξίου και το δομικό υλικό που χρησιμοποιούν. Στην συνέχεια εξετάζονται αειφόρες ψηφιακές προσεγγίσεις και διερευνώνται μέθοδοι ανάλυσης του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και του κόστους κατασκευαστικών διαδικασιών. Επίσης,

παρουσιάζονται παραδείγματα χρήσης ευέλικτων καλουπιών ως προς τη βιωσιμότητα εφαρμογής τους στον κατασκευαστικό τομέα.

Στη συνέχεια, στο **Κεφάλαιο 3** περιγράφεται η προτεινόμενη μεθοδολογία έρευνας και επεξηγούνται οι επιμέρους διερευνήσεις. Επίσης, ορίζονται διαγραμματικές σχέσεις μεταξύ των σχεδιαστικών, των περιβαλλοντικών, των οικονομικών και των κατασκευαστικών παραμέτρων και κριτηρίων αλλά και των αποτελεσμάτων της ανάλυσης με στόχο την εξαγωγή συγκριτικών αποτελεσμάτων. Η γενική μεθοδολογία στοχεύει στην συγκριτική αποτίμηση των αποτελεσμάτων των διαφόρων ψηφιακών διερευνήσεων που συμπεριλαμβάνουν τον παραμετρικό σχεδιασμό, τη στατική και την περιβαλλοντική ανάλυση αλλά και τη διερεύνηση των φυσικών αποτελεσμάτων που παράγονται μέσω του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού. Μέσα από τη συγκριτική ανάλυση αξιολογούνται τα αποτελέσματα αλλά και η προτεινόμενη αυτοματοποιημένη κατασκευαστική μέθοδος στο σύνολο της.

Στο **Κεφάλαιο 4** γίνεται αναλυτική παρουσίαση της διαδικασίας παραμετρικού σχεδιασμού των δομοστοιχείων για την ανάπτυξη πιθανών τυπολογιών, οι οποίες εξετάζονται όσον αφορά των εμβαδό σκίασης τους αλλά και την στατική τους επάρκεια μέσα από τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής τους. Πιο συγκεκριμένα, το εμβαδό σκίασης υπολογίζεται ως το ποσοστό ηλιασμού ή σκίασης των ανοιγμάτων σε κάθε τυπολογία ανάλογα με την ημερήσια ώρα και τον προσανατολισμό. Αντίστοιχα, υπολογίζεται η μέγιστη και ελάχιστη θλιπτική αντοχή για κάθε τυπολογία με βάση τρία διαφορετικά υλικά, τον ωμόπλινθο, τον πηλό με τσιμέντο και το σκυρόδεμα.

Για τη φυσική παραγωγή μέσω αυτοματοποίησης προτείνεται ένα ευέλικτο καλούπι, η ανάπτυξη του οποίου περιγράφεται στο **Κεφάλαιο 5**. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή των βημάτων κατασκευής και προγραμματισμού του που σχετίζονται με τη λειτουργία του σε ψηφιακό και φυσικό περιβάλλον. Στο ψηφιακό περιβάλλον σχεδιάζεται λεπτομερώς η κατασκευαστική δομή του ευέλικτου καλουπιού και ο μηχανισμός που τον ενεργοποιεί. Επίσης, προσομοιώνονται ψηφιακά με τη χρήση κώδικα προγραμματισμού τα βήματα της κατασκευαστικής διαδικασίας. Επιπλέον, γίνονται φυσικοί πειραματισμοί για την ανάπτυξη του εργαλείου τελικής δράσης και δοκιμών της λειτουργίας του μέσα από φυσικά πειράματα, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 8.

Στο **Κεφάλαιο 6** γίνεται περιβαλλοντική εκτίμηση και ανάλυση του κόστους και του χρόνου κατασκευής δομών με τη χρήση του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού. Πιο συγκεκριμένα, υπολογίζονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η ενέργεια που

καταναλώνεται, εξάγοντας αποτελέσματα για κάθε τυπολογία βάσει του κύκλου ζωής του στοιχείου, του δομικού υλικού αλλά και της προτεινόμενης κατασκευαστικής διαδικασίας. Επίσης, εξάγονται ποσοτικά αποτελέσματα για τα τρία υπό διερεύνηση δομικά υλικά. Επιπλέον, υπολογίζεται το κόστος και ο χρόνος της προτεινόμενης διαδικασίας και το κόστος του ίδιου του δομοστοιχείου. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων με βάση συμβατικές μεθόδους παραγωγής των ίδιων τυπολογιών.

Στο **Κεφάλαιο 7** συνοψίζονται όλα τα αποτελέσματα της ψηφιακής διερεύνησης και γίνεται συγκριτική αποτίμηση τους. Συγκεκριμένα, συγκρίνονται τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα σε σχέση με τον όγκο των διαφορετικών κατηγοριών τούβλων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του υλικού. Επιπλέον γίνεται αξιολόγηση των τριών διαφορετικών υλικών, της ενέργειας, του κόστους, του χρόνου κατασκευής τους και της μορφής του τελικού προϊόντος. Στόχος είναι η επιλογή των κατάλληλων λύσεων που να ικανοποιούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα κριτήρια που αναφέρονται πιο πάνω, ώστε να προχωρήσει η διαδικασία στο επόμενο στάδιο που είναι η αυτοματοποιημένη παραγωγή τους με το προτεινόμενο ευέλικτο καλούπι. Η μεθοδολογία στο σύνολο της αποσκοπεί σε μια πιο βιώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική προσέγγιση τόσο στη φάση σχεδιασμού όσο και στη φάση κατασκευής.

Στο **Κεφάλαιο 8**, περιγράφεται η φυσική διαδικασία κατασκευής των επιλεγμένων τυπολογιών σε πραγματική κλίμακα μέσω του ευέλικτου καλουπιού, το οποίο προσαρμόζεται σε ρομποτικό βραχίονα. Για τη φυσική ανάπτυξη των πρωτοτύπων χρησιμοποιούνται τα τρία προαναφερόμενα υλικά, δηλαδή ο ωμόπλινθος, ο πηλός με τσιμέντο και το σκυρόδεμαμπετόν. Στη συνέχεια γίνεται ανάλυση και αξιολόγηση των φυσικών αποτελεσμάτων σε σχέση με τις διαστάσεις, τη συμπεριφορά του κάθε υλικού, το χρόνο κατασκευής αλλά και τη λειτουργικότητα του εργαλείου τελικής δράσης.

Τέλος στο **Κεφάλαιο 9**, εξάγονται συμπεράσματα ως προς την προτεινόμενη μεθοδολογία, η οποία συμπεριλαμβάνει τον ψηφιακό παραμετρικό σχεδιασμό, τα ποσοτικά συγκριτικά αποτελέσματα, το αυτοσχέδιο εργαλείο τελικής δράσης και την αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής στο σύνολο της, έχοντας ως αναφορά τις παραμέτρους και τα κριτήρια που τίθενται στην έρευνα.

2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΧΥΤΩΝ ΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύονται μέθοδοι κατασκευής τοιχοποιίας, ξεκινώντας από παραδείγματα συμβατικών μεθόδων παραγωγής χυτών τμημάτων τοιχοποιίας ή μοναδιαίων δομοστοιχείων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται παραδείγματα αυτοματοποιημένων μεθόδων παραγωγής των πιο πάνω κατηγοριών. Σημαντικά κριτήρια διερεύνησης είναι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα και το κόστος κατασκευής, τα οποία στις μέρες μας αρχίζουν να λαμβάνονται υπόψη, τόσο σε συμβατικές όσο και σε σύγχρονες διερευνήσεις, λόγω της επιτακτικής ανάγκης μείωσης των ρύπων και του κόστους στην κατασκευαστική βιομηχανία. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να συζητήσει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μετάβασης από συμβατικές σε αυτοματοποιημένες κατασκευαστικές μεθόδους με χαρακτηριστικά μαζικής εξατομίκευσης (mass customization) και να εντοπίσει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και το κόστος των διερευνώμενων παραδειγμάτων.

2.2 Συμβατικοί τρόποι κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων

Η ανάπτυξη μεθόδων κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων, ειδικότερα σε περιπτώσεις τοιχοποιίας, άρχισε πριν από πολλά χρόνια με στόχο τη βελτίωση και απλοποίηση ολόκληρης της διαδικασίας. Με την πάροδο των χρόνων, για την αύξηση της παραγωγικότητας, διερευνώνται εναλλακτικές διαδικασίες όπως επίσης και δυνατότητες αυτοματισμού (Vähä et al, 2013). Σε πολλά έργα δοκιμάζονται διαφορετικές τεχνικές κατασκευής, για παράδειγμα τοιχοποιιών που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου που απαιτείται με τη χρήση ρομποτικών μηχανισμών (Bock, 2015).

Έτσι, σήμερα οι διαδικασίες κατασκευής που εκτελούνται εξολοκλήρου στο περιβάλλον του εργοταξίου (on site) μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε χειρωνακτικές και σε αυτοματοποιημένες. Οι χειρωνακτικές προηγούνται χρονικά των κατασκευαστικών διαδικασιών με χαρακτηριστικά αυτοματισμού. Μια τέτοια διαδικασία είναι η παραγωγή πλίνθινων τούβλων (adobe bricks) (Minke, 2006) [εικ.1] με τη χρήση ξύλινων καλουπιών στο εργοτάξιο, η οποία προϋποθέτει την παραγωγή του μείγματος, το καλούπωμα και την ωρίμανση του. Επιπλέον, μη αυτοματοποιημένη διαδικασία θεωρείται και η κατασκευή τοιχοποιιών με την τεχνική του στοιβάγματος και της συμπίεσης χώματος (rammed earth) (Minke, 2006).



Εικόνα 1: Διαδικασία παραγωγής πλίνθινων τούβλων επί τόπου [1]

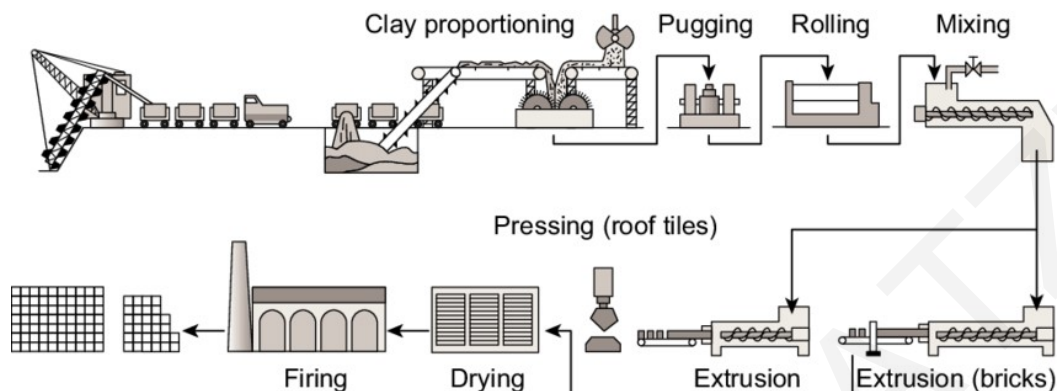
Σε επίπεδο κατασκευής μοναδιαίων στοιχείων μπορούν να εντοπιστούν παραδείγματα μαζικής παραγωγής και εκτός εργοταξίου [2] (off site). Η περίπτωση της παραγωγής συμβατικών τούβλων ωμόπλινθου δεν χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα των κατασκευών λόγω της χρονοβόρας χειρωνακτικής κατασκευής τους, όμως χαρακτηρίζεται ως περιβαλλοντικά φιλικότερη κυρίως λόγω του τρόπου ωρίμανσης τους. Κυρίως αναφερόμαστε στο εργοστασιακό περιβάλλον παραγωγής δομοστοιχείων σε μαζική κλίμακα, κάτι το οποίο επιτυγχάνει εξοικονόμηση χρόνου με τη χρήση αυτοματοποιημένων συστημάτων, για παράδειγμα καλουπιών, αλλά και άλλων εξειδικευμένων σε κάθε στάδιο παραγωγής μηχανισμών [εικ.2].



Εικόνα 2: Διαδικασία παραγωγής τμημάτων τοιχοποιίας εκτός εργοταξίου (off site) / Διαδικασία παραγωγής τούβλων εκτός εργοταξίου (off site) [2]

Σε μετέπειτα στάδιο, εκτός από την παραγωγή, ενσωματώνονται και διαδικασίες συναρμολόγησης των δομοστοιχείων. Ακολουθώντας τη λογική προκατασκευής [εικ.3], επιτυγχάνεται εξοικονόμηση χρόνου, σε αντίθεση με τη χειρωνακτική εργασία, η οποία αναπτύσσεται στο εργοτάξιο. Για την υλοποίηση τέτοιων μεθόδων εισάγονται ρομποτικοί βραχίονες, που ενσωματώνονται στη γραμμή παραγωγής, ειδικά στο στάδιο της συναρμολόγησης. Αφού τελειώσει το στάδιο της συναρμολόγησης και της ωρίμανσης,

τιμήματα όπως τοιχοποιίες, μεταφέρονται στο εργοτάξιο για την επί τόπου συναρμολόγηση τους [3].



Εικόνα 3: Διάγραμμα σταδίων διαδικασίας παραγωγής τούβλων (Hotza and Goulart de Oliveira Maia, 2014)

Τα καλούπια, συμβατικά και αυτοματοποιημένα, αποτελούν τον κεντρικό στοιχείο, το οποίο επηρεάζει την κατασκευή χυτών δομών και δομοστοιχείων εντός αλλά και εκτός εργοταξίου. Στην περίπτωση των συμβατικών καλούπιων, αυτά χρησιμοποιούνται ευρέως στην οικοδομική βιομηχανία μέχρι σήμερα, παρά την χρονοβόρα και πολύπλοκη εφαρμογή τους, ακόμα και για την παραγωγή σύνθετων δομών. Ιστορικά, τέτοια παραδείγματα εντοπίζονται στην δεκαετία του '70 και '80 στα αρχιτεκτονικά έργα των Felix Candela, Pier Luigi Nervi και Frei Otto, όπου σύνθετες μορφολογίες αναπτύσσονταν με συμβατικά καλούπια αλλά με καινοτόμο τρόπο (Bach et al, 1976). Πιο συγκεκριμένα, στο έργο του Felix Candela, η κατασκευή διπλής καμπύλης κελυφών γινόταν με ξυλότυπο εξ ολοκλήρου αποτελούμενο από επίπεδα κομμάτια ξύλινων σανίδων που τοποθετούνταν με συμβατικό τρόπο, όπως επίσης και η τοποθέτηση του οπλισμού και η χύτευση του σκυροδέματος (Burger et al, 2006). Με παρόμοιο τρόπο, στα έργα του μηχανικού Pier Luigi Nervi στη δεκαετία του 1950, αναπτύχθηκαν δομές πλακών και κελυφών με συγκεκριμένη τεχνική ραβδώσεων. Συγκεκριμένα, προκατασκευασμένα τμήματα σιδηρούχου τσιμέντου τοποθετούνταν σε επαναχρησιμοποιούμενες σκαλωσιές, οι οποίες λειτουργούσαν ως μόνιμοι ξυλότυποι [εικ.4] πάνω στους οποίους χυνόταν σκυρόδεμα για το σχηματισμό των ραβδωτών πλακών και των κελυφών (Kato et al, 1981). Τέλος, στο Philips Pavilion [εικ.4], το οποίο σχεδιάστηκε από τους Le Corbusier και Yannis Xenakis για την Παγκόσμια Έκθεση του 1958 στις Βρυξέλλες, οι καμπύλες των υπερβολικών παραβολοειδών επιφανειών του κατασκευάστηκαν με χειροποίητα καλούπια άμμου για την προετοιμασία περίπου 2000 πλαισίων σκυροδέματος, τα οποία αποτελούσαν τις 9 επιφάνειες σκυροδέματος του περιπτέρου (Duyster, 1959).



Εικόνα 4: Los Manantiales, Philips Pavilion (Kato et al, 1981; Duyster, 1959)

Τα πιο πάνω παραδείγματα, υποδεικνύουν ότι στο δεύτερο μισό του 19ου αιώνα, κατασκευάστηκαν αρκετές καμπύλες δομές γεωμετρικά αυξανόμενης καμπυλότητας, κυρίως με αναλογικές και εμπειρικές διαδικασίες σχεδιασμού και κατασκευής, οι οποίες όχι μόνο ήταν περίπλοκες και δαπανηρές, αλλά επίσης είχαν να επιλύσουν σημαντικούς σχεδιαστικούς περιορισμούς και θέματα βιωσιμότητας, ιδιαίτερα στην παραγωγή των απαραίτητων κριωμάτων και ξυλοτύπων για την υλοποίησή τους.

Στις μέρες μας, η κατασκευή χυτών δομών ή δομών από μοναδιαία στοιχεία, ειδικά σε περιπτώσεις τοιχοποιών, για να είναι ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες κατασκευαστικές μεθόδους, βασίζεται στην λογική της προκατασκευής. Η προκατασκευή έχει οικονομικά πλεονεκτήματα όπως την φθηνή εργοστασιακή παραγωγή, τον προγραμματισμό του χρόνου κατασκευής με ακρίβεια στο εργοτάξιο, χρειάζεται λιγότερες υποβοηθητικές εγκαταστάσεις, έχει λιγότερες περιόδους οχληρίας και παράγει λιγότερες ακαθαρσίες στους χώρους του εργοταξίου. Επίσης, η κατασκευή δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες και εγγυάται τη σταθερή τιμή και την υψηλή ποιότητα των προϊόντων, έτοιμων για εγκατάσταση στο εργοτάξιο. Από την άλλη πλευρά, τα μειονεκτήματα της προκατασκευής είναι η χρήση βαριού εξοπλισμού για την ανύψωση και ανέγερση ή προβλήματα που έχουν να κάνουν με σύνθετες σχεδιαστικές μορφές, οι οποίες απαιτούν νέες μεθοδολογίες κατασκευής για την υλοποίησή τους με ακρίβεια.

Στις σύγχρονες διαδικασίες, διάφορα σενάρια διερευνούν τη δυνατότητα τυποποίησης των άλλοτε χειρωνακτικών μεθόδων κατασκευής. Ειδικά στις τεχνικές ξυλοτύπων, πολλές εταιρείες και ερευνητικά έργα έχουν αναπτύξει καινοτόμες μεθόδους που συνδυάζουν την ψηφιακή τεχνολογία με τα παραδοσιακά συστήματα ξυλοτύπων, όπως αυτά που αναπτύχθηκαν από την γερμανική εταιρία παραγωγής κριωμάτων PERI. Η PERI

[4] έχει προχωρήσει σε ένα σύστημα καλουπιού για σκυρόδεμα, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εύκαμπτος μονόκλινος ξυλότυπος αλλά και ως συνηθισμένη διπλή σκαλωσιά. Τέτοιοι ξυλότυποι χρησιμοποιούνται σε διαφορετικές κλίμακες κατασκευών, συνήθως με συμβατική μορφολόγηση [εικ.5], λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη μορφοποίηση του τελικού αποτελέσματος όσο και την κατασκευή του ξυλότυπου με στόχο τη χρήση ελάχιστου υλικού. Παρόλα αυτά πρόκειται για μια χρονοβόρα διαδικασία που συνήθως εκτελείται από μη ειδικευμένο προσωπικό.



Εικόνα 5: Συμβατικό καλούπι τοιχοποιίας [4]

Με την εξέλιξη των ψηφιακών τεχνολογιών στους τομείς της βιομηχανίας και του σχεδιασμού, έχουν αναπτυχθεί εργαλεία για τη βελτιστοποίηση και την τυποποίηση των διαδικασιών παραγωγής προϊόντων συμπεριλαμβανομένων διαδικασιών χύτευσης. Σημαντικά κριτήρια είναι η πλήρης τυποποίηση, η χρήση ελάχιστου υλικού, η μείωση του κόστους κατασκευής, η ακρίβεια, η ευελιξία, η πρακτικότητα, ο χρόνος παραγωγής και συναρμολόγησης. Σταδιακά, έχουν ενσωματωθεί στην διαδικασία κατασκευής αυτοματισμοί με στόχο την επίτευξη των πιο πάνω κριτηρίων. Ο βαθμός αυτοματοποίησης επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλων μεθόδων, όπου μηχανές δεδομένων και ευέλικτα αυτοματοποιημένα εργαλεία αναλαμβάνουν να υπολογίσουν τη βέλτιστη λύση και να την κατασκευάσουν αντίστοιχα. Επί του παρόντος, η εφαρμογή σύγχρονων μεθόδων στο σχεδιασμό των κατασκευαστικών δομών, όπως η τυποποίηση και ο σχεδιασμός για κατασκευή (modularity and design for manufacturing), η στρατηγική με τον υπολογισμό του ακριβούς χρόνου και των σταδίων (just in time, just in sequence, and pulling production), και η τροφοδότηση της πληροφορίας μέσα από τον ψηφιακό σχεδιασμό και την κατασκευή με τη χρήση υπολογιστή ή η ψηφιακά κατευθυνόμενη κατασκευή (computer-aided design/manufacturing or computer-integrated manufacturing), είναι σε πρώιμα στάδια λόγω έλλειψης ολοκληρωμένης αυτοματοποιημένης τεχνολογίας στον κατασκευαστικό τομέα (Bock, 2008).

Παρ' όλα αυτά, στις μέρες μας η εισαγωγή τέτοιων αρχών στον κλάδο των κατασκευών άρχισε να εφαρμόζεται σιγά-σιγά, συμπεριλαμβανόμενων των περιπτώσεων κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων. Έτσι, σήμερα εμφανίζονται ευέλικτες και αναδιαμορφώσιμες διεργασίες χύτευσης, όπως τα μεταβαλλόμενα καλούπια, τα οποία παρουσιάζονται ως μια υποσχόμενη επιλογή για την επίτευξη περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμων κατασκευών. Αυτά, θα μπορούσαν να καταστούν ένας αποτελεσματικός τρόπος εξοικονόμησης πόρων μέσα από τη μείωση του κόστους εργασίας και εγκατάστασης (Galizia et al, 2019). Στις μέρες μας τέτοιες διαδικασίες εφαρμόζονται σπασμωδικά και ερμηνεύονται με διαφορετικούς τρόπους. Επίσης, εμφανίζονται διαφορετικές έρευνες που αφορούν την ταξινόμηση του τρόπου διερεύνησης και εφαρμογής ευέλικτων καλουπιών σε σχέση με την κλίμακα του κατασκευαστικού στοιχείου και είναι υπεύθυνα για την κατασκευή πατωμάτων, οροφών, δοκαριών, υποστυλωμάτων και τμημάτων τοιχοποιιών (Hawkins et al, 2016). Ωστόσο, μέσα από τέτοιες διερευνήσεις διακρίνονται κοινά στοιχεία, τα οποία αναφέρονται σε περισσότερο ή λιγότερο πολύπλοκες μεθόδους παραγωγής. Αυτές μπορεί να διακρίνονται με βάση το είδος της κατασκευής (π.χ. συμβατικής ή μη), τον τύπο των υπό κατασκευή χυτών δομικών στοιχείων, δομοστοιχείων ή ακόμα και τμημάτων κατασκευής όπως τμηματικές ή ολοκληρωμένες τοιχοποιίες (π.χ. την παραγωγή απλών τούβλων ή τμημάτων από σκυρόδεμα).

2.3 Αυτοματοποιημένοι τρόποι κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων

Με την εισαγωγή της τεχνολογίας σε επίπεδο κατασκευής, προωθείται η αυτοματοποίηση για την επίλυση τεχνικών ζητημάτων που προκύπτουν τόσο στη φάση παραγωγής των χυτών δομών και δομοστοιχείων όσο και στη φάση συναρμολόγησης τους. Οι ψηφιακές διαδικασίες επιτρέπουν διερευνήσεις σε σύνθετες μορφές, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι βελτιστοποιημένες ως προς την ποσότητα του απαιτούμενου δομικού υλικού και την ποιότητα του τελικού αποτελέσματος. Μέσα από τη διερεύνηση, διακρίνονται μια σειρά από κατηγορίες καλουπιών, που μεταξύ άλλων συμπεριλαμβάνουν καλούπια παραγόμενα μέσω ψηφιακών μηχανών, καλούπια pin-beds, καλούπια από μεμβράνη, αρθρωτά καλούπια, πνευματικά καλούπια και τα καλούπια μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης (3D printing). Παρακάτω περιγράφονται οι προαναφερόμενες κατηγορίες.

2.3.1 Καλούπια μέσω ψηφιακών μηχανών

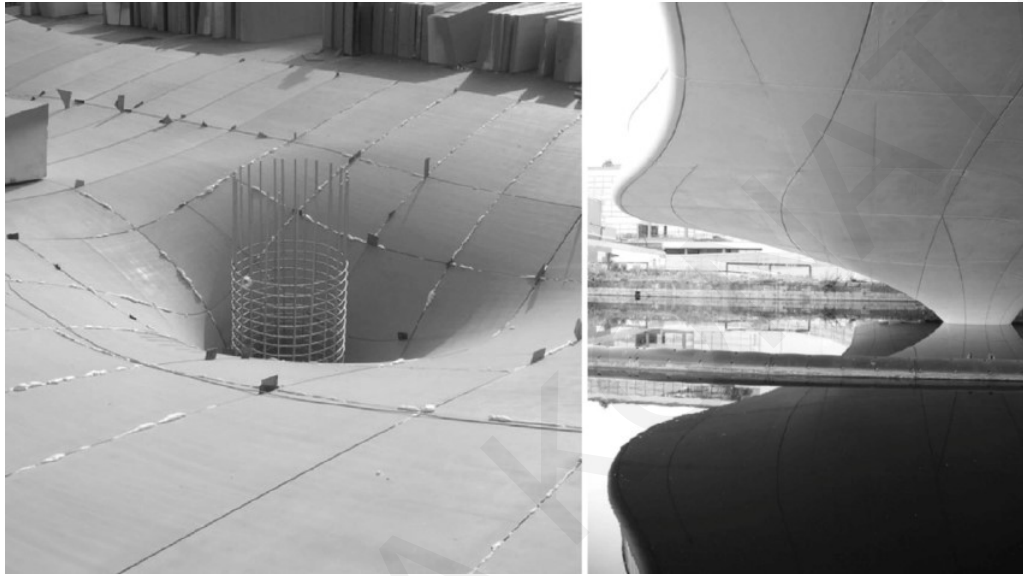
Για την κατασκευή καλουπιών μέσω ψηφιακών μηχανών χρησιμοποιούνται εργαλεία και τεχνικές υπολογιστικά ελεγχόμενες όπως laser cutting, water-jet cutting και CNC routing. Στο έργο του Dunn (2012), αναφέρονται τέσσερις κύριες κατηγορίες τεχνικών ψηφιακής κατασκευής: κοπή (cutting), αφαίρεση (subtraction), πρόσθεση (addition) και μορφοποίηση (formation). Αυτές είναι ανάλογες με τις παραδοσιακές διαδικασίες ψηφιακής μοντελοποίησης πρωτοτύπων κλίμακας 1:1, όπου ο χειρισμός των υλικών γίνεται με χειρωνακτικό τρόπο και συμβατικά εργαλεία για την επίτευξη του επιθυμητού αποτελέσματος. Τέτοιες ψηφιακές τεχνικές, λόγω της δυνατότητας τους να μεταφέρουν δεδομένα με ακρίβεια στη φάση κατασκευής, προσφέρουν τεράστια σχεδιαστική και κατασκευαστική ελευθερία, ειδικά σε περιπτώσεις σύνθετων και μη-συμβατικών δομών. Στη διεθνή βιβλιογραφία εμφανίζονται περιπτώσεις παραδειγμάτων όπου οι προαναφερόμενες ψηφιακές τεχνικές χρησιμοποιούνται για την κατασκευών καλουπιών.

Στην κατηγορία κοπής (cutting), εμφανίζονται μια σειρά από τεχνικές που επιτρέπουν την παραγωγή επίπεδων τμημάτων και επιφανειών συγκεκριμένου πάχους που συνήθως χρησιμοποιούνται για την κατασκευή σύνθετων καλουπιών. Στα παραδείγματα της κατηγορίας καλουπιών PERI [4], για μεγάλης κλίμακας κατασκευές φτιάχνονται κυψελωτού τύπου καλούπια με την χρήση ξύλινων επιφανειακών στοιχείων. Τα επιφανειακά στοιχεία κόβονται με τη βοήθεια ψηφιακών μηχανών και στη συνέχεια συναρμολογούνται [εικ.6].



Εικόνα 6: Ξυλότυπος PERI με τη χρήση της μεθόδου κοπής ξύλων [4]

Η αφαιρετική (subtractive) (Dunn, 2012) μέθοδος κατασκευής στοχεύει στην αφαίρεση υλικού από ένα στερεό όγκο μέσω διαδικασίας σμίλευσης (milling ή routing), δημιουργώντας την επιθυμητή γεωμετρία. Για παράδειγμα, η γέφυρα του Spencer Dock έχει κατασκευαστεί από έναν καινοτόμο συνδυασμό προεντεταμένου οπλισμένου σκυροδέματος, με τη χρήση σμιλευμένου καλουπιού από υψηλής πυκνότητας διογκωμένη πολυστερίνη [εικ.7] (Wangler et al, 2016).



Εικόνα 7: Καλούπι από σμιλευμένη υψηλής πυκνότητας διογκωμένη πολυστερίνη-Spencer Dock Bridge (Wangler et al, 2016)

Εκτός από τη χρήση των ψηφιακών μηχανών για την παραγωγή των καλουπιών, άλλες σύγχρονες και προηγμένες μέθοδοι έχουν αναπτυχθεί για την ελαχιστοποίηση του χρόνου και την αυτοματοποίηση των βημάτων κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων, οι οποίες βασίζονται στην χρήση ρομποτικών μηχανισμών, επιδιώκοντας μέσα από ευέλικτους και κινητικούς μηχανισμούς, την εξοικονόμηση χρόνου και κόστους στη διαδικασία κατασκευής.

2.3.2 Καλούπια pin-beds

Μια μεγάλη κατηγορία ευέλικτων καλουπιών για τη χύτευση σκυροδέματος είναι αυτή των pin-beds, παραδείγματα των οποίων έχουν διερευνηθεί και αναπτυχθεί σε αρκετές περιπτώσεις (Hawes, 1952; Eisel, 1979; Kosche, 1998; Schipper, 2015). Μέσα από τη χρήση ενός τέτοιου εύκαμπτου ξυλότυπου, επιτυγχάνεται η κατασκευή πολύ λεπτών αλλά δομικά επαρκών κατασκευαστικών στοιχείων, τα οποία θα μπορούσαν να ενισχύονται από ίνες ή υφάσματα [εικ.8]. Πλεονεκτήματα αυτού του είδους καλουπιών, είναι η μείωση της χρήσης υλικών αλλά και η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησή τους, κάτι το οποίο περιορίζει

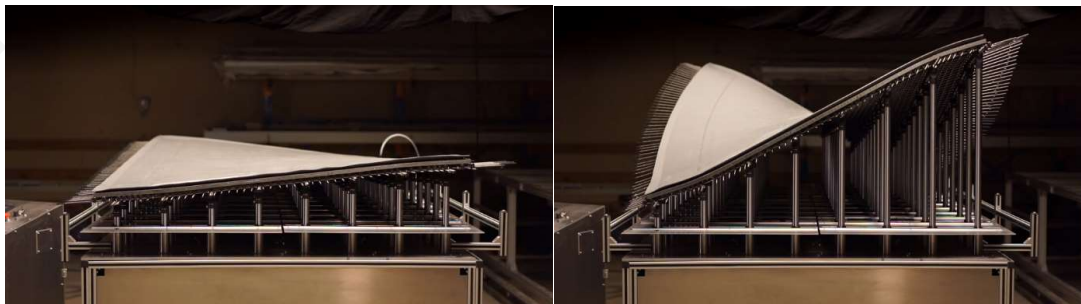
σημαντικά το απόβλητο υλικό που προκύπτει μέσα από άλλες διαδικασίες κατασκευής ξυλότυπων, για παράδειγμα μέσω milling (Schipper and Grünewald, 2014).



Εικόνα 8: Καλούπια pin-beds μικρής κλίμακας (Schipper and Grünewald, 2014)

Ένα παράδειγμα χρήσης καλουπιού pin-beds είναι αυτό της μελέτης των (Koc and Thangaswamy, 2011), όπου το προτεινόμενο καλούπι περιλαμβάνει ένα σύνολο από στενά διατεταγμένους πείρους που σχηματίζουν μια κοιλότητα στην οποία γίνεται η χύτευση υλικού για την παραγωγή οποιουδήποτε αντικειμένου ελεύθερης μορφής. Η μεταβολή των πείρων με ένα και μόνο εργαλείο ενεργοποίησης επιτυγχάνει την παραγωγή πολλών διαφορετικών μελών σε πολύ μικρότερο χρόνο αλλά και με μειωμένο κόστος κατασκευής (Koc and Thangaswamy, 2011).

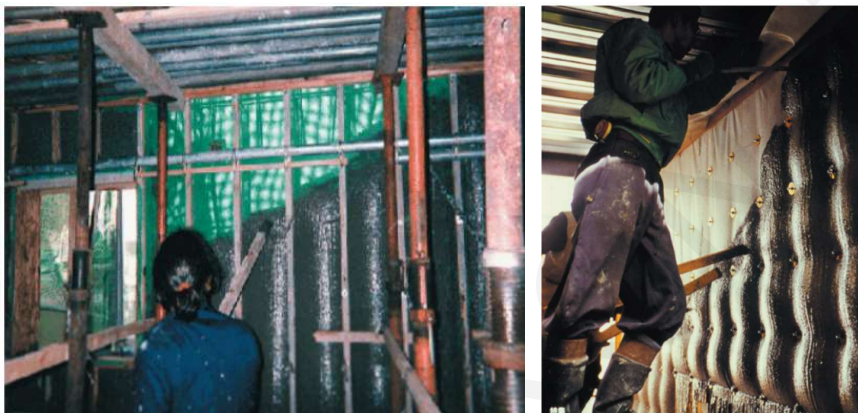
Επιπρόσθετα, παραδείγματα όπως η μελέτη ADAPA [5] [εικ.9] ακολουθεί την ίδια λογική, όπου η κινητική συμπεριφορά του καλουπιού επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενεργοποιητών. Αυτό το είδος καλουπιού μπορεί να αναπροσαρμόζεται και να επαναχρησιμοποιείται για την παραγωγή επιφανειών διπλής καμπυλότητας από γυψοσανίδα ενισχυμένη με ίνες γυαλιού (glass fiber reinforced gypsum), χρησιμοποιώντας μια ‘μη πορώδη εύκαμπτη μεμβράνη’, η οποία προσαρμόζεται σε διαφορετικές θέσεις (Raun and Kirkegaard, 2012). Σε αυτή την περίπτωση η ίδια η μεμβράνη χρησιμοποιείται ως καλούπι για την παραγωγή τμημάτων (panels) σκυροδέματος διπλής καμπυλότητας μέσα σε μια διαδικασία αναδιαμόρφωσης και επαναχρησιμοποίησης [5]. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα καλούπια γεμίζονται και συναρμολογούνται με τη συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα.



Εικόνα 9: Ευέλικτο καλούπι στο έργο ADAPA [5]

2.3.3 Καλούπια από μεμβράνη

Άλλη μια περίπτωση αρκετά διαδεδομένης μεθόδου χύτευσης είναι μέσω της χρήσης καλουπιών από μεμβράνες [εικ.10]. Στο παράδειγμα Kenzo Uno [6] προτείνεται μια μέθοδος χύτευσης τοίχων με υφασμάτινα καλούπια στοχεύοντας σε μηδενικά απορρίμματα (zero-waste), όπου η χρήση υφασμάτων για την κατασκευή υποστηλωμάτων και δοκαριών έχει αποδείξει σημαντικές εξοικονομήσεις τόσο σε υλικά όσο και σε εργατικό κόστος.



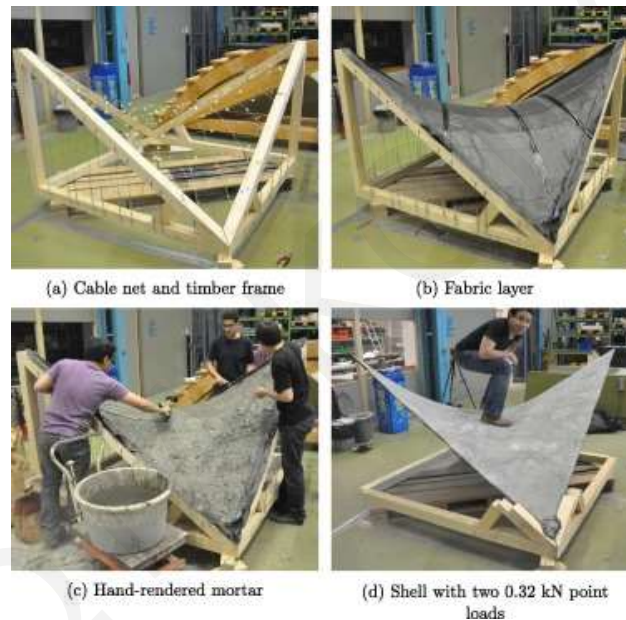
Εικόνα 10: Υφασμάτινα καλούπια για την κατασκευή τοιχοποιίας [6]

Παρομοίως, οι αρχιτεκτονικές δυνατότητες του υφασμάτινου ξυλότυπου για δοκούς [εικ.11] έχουν εξεταστεί στην ερευνητική δουλειά του Center for Architectural and Structural Technology (C.A.S.T.) [7] μέσα από τη χρήση τους για την κατασκευή κελυφών, υποστηλωμάτων και τοίχων (C.A.S.T.).



Εικόνα 11: Παραγωγή δομικών στοιχείων με τη χρήση υφασμάτινων καλουπιών [7]

Στο έργο HiLo roof (Block Research Group) έχει αναπτυχθεί ένα επαναρησιμοποιούμενο και ελαφρύ σύστημα καλωδίων και υφάσματος για την κατασκευή μιας λεπτής οροφής κελύφους χωρίς εσωτερικές επενδύσεις [εικ.12]. Επίσης, στη δουλειά των (Van Mele and Block, 2011) παρουσιάζεται μια μέθοδος για την εξεύρεση της κατανομής των δυνάμεων που απαιτούνται σε ένα τέτοιο δίκτυο αποτελούμενο από καλώδια ή σε ένα καλούπι από μεμβράνη για να αποκτήσει ένα συγκεκριμένο σχήμα, αφού έχει φορτωθεί με σκυρόδεμα. Αυτός ο έλεγχος επιτρέπει τη σχεδίαση και κατασκευή μιας σειράς προκαθορισμένων, αντικλαστικών (anticlastic) σχημάτων, προσφέροντας έτσι δυνατότητες βελτιστοποίησης του σχήματος τους (Veenendaal and Block, 2014).



Εικόνα 12: Κατασκευή HiLo με τη χρήση καλουπιού από μεμβράνη και προεντεταμένα καλώδια (Veenendaal and Block, 2014)

Στην ίδια κατηγορία καλουπιών από πλαστικά δομικά υλικά, είναι και αυτά που ελέγχονται μέσα από ρομποτικά συστήματα. Αυτό θα μπορούσε να ενισχύσει τις ιδιότητες κινητικότητας και μεταβλητότητας που είναι χαρακτηριστικές των σύγχρονων συστημάτων μορφοποίησης με βάση τη μεμβράνη. Η προκύπτουσα μηχανή καλουπιού με τη χρήση της μεμβράνης θα μπορούσε ενδεχομένως να μειώσει το κόστος τοποθέτησης, ρύθμισης και κατανομής και να αντιμετωπίσει σημαντικά ζητήματα που άπτονται της ασφάλειας των εργαζομένων και προκύπτουν σε περιπτώσεις κατασκευών με παραδοσιακά συστήματα καλουπιού. Ο ρομποτικός ξυλότυπος θα μπορούσε ταυτόχρονα να ενισχύσει την ικανότητα της τεχνολογίας να ανταποκρίνεται στις απαιτήσεις της αρχιτεκτονικής μορφής μέσα από τις αυξημένες δυνατότητες του για προσαρμογή και μεταβλητότητα.

Στο έργο Form Found Founded Design έχουν αναπτυχθεί ρομποτικές τεχνικές για τη χύτευση κατασκευαστικών στοιχείων σύνθετων μορφολογιών από σκυρόδεμα [εικ.13]. Σε αυτή την περίπτωση, η μεγάλη ποσότητα απόβλητου υλικού που προκύπτει από ένα άκαμπτο ξυλότυπο μειώνεται αισθητά, ενώ σε σύγκριση με άλλες μέθοδους χύτευσης με υφασμάτινα καλούπια, επιτυγχάνει να περιορίσει το ύφασμα σε συγκεκριμένα σχήματα ή να προσαρμόσει το ύφασμα ανάλογα με τη μορφολογία του τελικού προϊόντος (West and Araya, 2010). Η περίπτωση παραδοσιακής χρήσης ξυλότυπου από ύφασμα είναι χρονοβόρα και επιρρεπής σε σφάλματα διαδικασίας αφού προϋποθέτει την ψηφιακή διαμόρφωση του επιθυμητού σχήματος, την δημιουργία της αρνητικής μορφής και υποδιαίρεσης του έτσι ώστε να παραχθεί με τη χρήση CNC milling σε πέντε άξονες και την συγκράτηση του με ξύλο ή άλλο στατικό υλικό. Σε αντίθεση με αυτή την περίπτωση, όπου απαιτείται μόνο τρισδιάστατη μοντελοποίηση του επιθυμητού σχήματος και μετέπειτα ραφή του και τοποθέτηση της φόρμας στο ρομπότ που ακολουθείται από την χύτευση του υλικού. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα αυτοματοποιημένο επαναλαμβανόμενο σύστημα, το οποίο μπορεί να παράγει πολλά διαφορετικά σχήματα από μία ενιαία μορφή υφάσματος.



Εικόνα 13: Form Found Founded Design project- μορφολόγηση καλουπιού με μεμβράνη με τη χρήση ρομποτικών βραχιόνων (West and Araya, 2010)

2.3.4 Αρθρωτά καλούπια

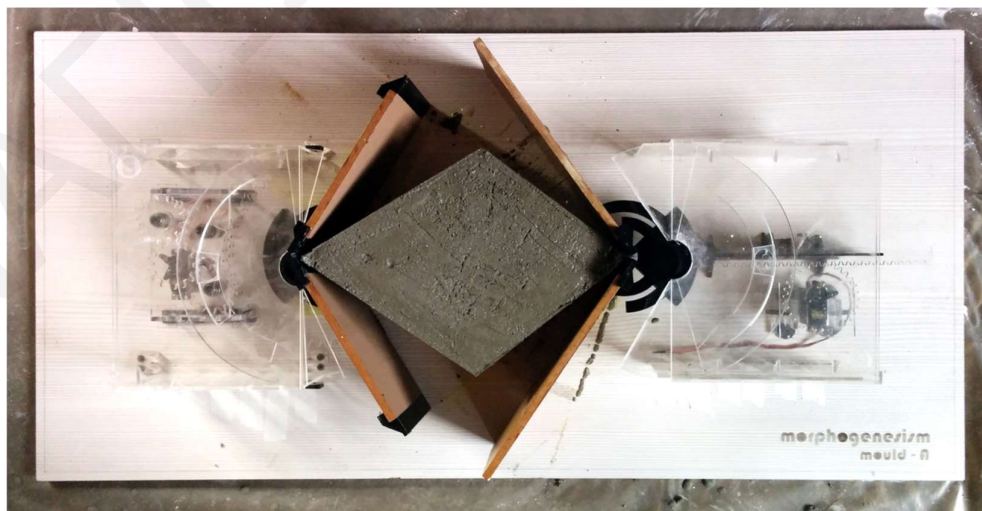
Στην κατηγορία των αρθρωτών καλουπιών, η λογική παραγωγής χυτών δομικών στοιχείων ή ολόκληρων δομών με τη χρήση ευέλικτων μηχανισμών έχει κεντρικό ρόλο στην όλη διερεύνηση. Έτσι, σε αυτή την κατηγορία διακρίνονται παραδείγματα, όπως αυτό

στην δουλειά των (Kontonourkis et al, 2019), όπου η διερεύνηση και ανάπτυξη ενός ευέλικτου αρθρωτού καλούπιού επιτυγχάνει την παραγωγή μιας σειράς από εναλλακτικά σχήματα του ίδιου δομικού στοιχείου, τα οποία συνθέτουν ένα καμπύλο κέλυφος από σκυρόδεμα [εικ.14]. Σε αυτό το πλαίσιο, οι αποφάσεις που πάρθηκαν στο στάδιο της σχεδιαστικής βελτιστοποίησης επηρεάστηκαν από τους περιορισμούς και τις δυνατότητες του προτεινόμενου αρθρωτού καλούπιού, του οποίου η δυνατότητα προσαρμογής επηρέασε τα αποτελέσματα κατασκευής και αντίστροφα.



Εικόνα 14: Καλούπι δομικού στοιχείου με τη χρήση αρθρωτού μηχανισμού (Kontonourkis et al, 2019)

Παρομοίως, ένα αρθρωτό καλούπι που σχεδιάστηκε για το έργο Procrystalline Wall είχε δυνατότητες προσαρμογής των παραγόμενων στοιχείων όσον αφορά το μέγεθος, το σχήμα και την τυπολογία τους [εικ.15]. Κοινό στοιχείο και στις δύο πιο πάνω διερευνήσεις, είναι η δυνατότητα προσαρμογής του μέσα σε κάποια σχεδιαστικά πλαίσια και κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς (Khabazi and Budig, 2016).



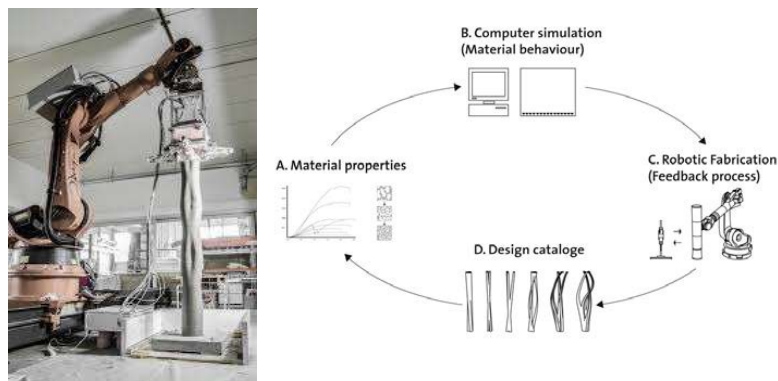
Εικόνα 15: Digital Mould- καλούπι για μοναδιαία στοιχεία με πολλαπλή μορφολογηση (Khabazi and Budig, 2016)

Σε μια άλλη μελέτη με τον τίτλο Smart Dynamic Casting (Scotto et al, 2018) [8], κατασκευάστηκαν λεπτές πτυχωτές δομές σκυροδέματος μη τυποποιημένων γεωμετριών μέσω της ρομποτικής διαδικασίας ολίσθησης αρθρωτού καλουπιού (slipforming) [εικ.16]. Η διερεύνηση επικεντρώθηκε στην μελέτη των καμπύλων ρομποτικών τροχιών και την επίδραση της αναλογίας επιφάνειας προς όγκο για την κατασκευή δομών από χυτό σκυρόδεμα.



Εικόνα 16: Μέθοδος slipforming για την παραγωγή γραμμικών κατακόρυφων δομικών στοιχείων [8]

Παρομοίως, στην δουλειά των (Kristensen et al, 2013) διερευνήθηκε ο σχηματισμός κατακόρυφων φορέων χρησιμοποιώντας ένα εύκαμπτο μεταλλικό σκελετό ως καλούπι που τοποθετείται στο άκρο ρομποτικού βραχίονα παράγοντας πολλαπλές μορφολογίες με την μέθοδο μορφοποίησης (formation). Σε αυτή την περίπτωση προτείνεται ένα καλούπι κατάλληλα μορφοποιημένο, το οποίο πληρώνεται με χυτό υλικό ταχείας πήξης (self-compact mortar) με την ανθρώπινη συμμετοχή. Μέσω διαδικασίας ολίσθησης καλουπιού (slipforming) και υπό την καθοδήγηση ρομποτικού βραχίονα παράγεται ένας ενιαίος φορέας από σκυρόδεμα [εικ.17].

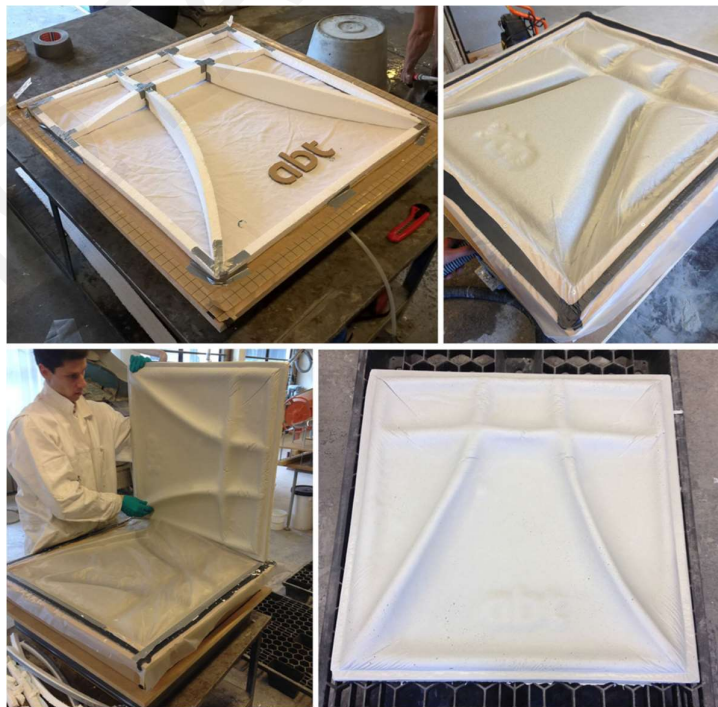


Εικόνα 17: Ολίσθηση καλουπιού (Slipforming)- μέθοδος παραγωγής δομικών στοιχείων (Kristensen et al, 2013)

Η χρήση κάποιου κινητικού μηχανισμού ή η ενσωμάτωση ρομποτικού βραχίονα στη διαδικασία παρέχουν τη δυνατότητα παραγωγής ενός εύρους διαφορετικών μορφολογιών, ενισχύοντας έτσι την διαδικασία παραγωγής μη συμβατικών δομών μέσα από αυτοματοποιημένες μεθόδους κατασκευής που θα μπορούσαν να προσαρμόζονται στις εκάστοτε σχεδιαστικές ανάγκες. Επίσης, απελευθερώνονται οι διαδικασίες από τους περιορισμούς που μπορεί να υφίστανται κατά τη διαδικασία παραγωγής χυτών τοιχοδομών με συμβατική μορφολόγηση και τέλος απαλλάσσεται το εργατικό δυναμικό από χρονοβόρες διαδικασίες συναρμολόγησης και αποσυναρμολόγησης καλουπιών από πολλαπλά στοιχεία.

2.3.5 Πνευματικά καλούπια

Οι πνευματικές δομές, έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη καλουπιών. Στην περίπτωση της μελέτης με το όνομα Vacuumatics (Huijben, 2016), αναπτύχθηκε ένα καλούπι με εύκαμπτο περίβλημα μεμβράνης, όπου το εσωτερικό του πληρώνεται με ινώδες υλικό [εικ.18]. Όταν το εσωτερικό εκκενωθεί εν μέρει από τον αέρα, λόγω της αδυναμίας του κενού πυρήνα να αντισταθεί στην πίεση της ατμόσφαιρας, προκαλείται χύτευση και αποτελεσματική σύνδεση των αρχικά μη συνδεδεμένων μελών μεταξύ τους. Καθώς η εσωτερική πίεση αέρα μειώνεται ακόμη περισσότερο, ο γεμισμένος πυρήνας γίνεται όλο και πιο άκαμπτος, επιτυγχάνοντας οποιοδήποτε σχήμα χύτευσης.



Εικόνα 18: Πνευματικό καλούπι για την παραγωγή επιφανειακών στοιχείων (Huijben, 2016)

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, παραδείγματα κατασκευής δομών από πάγο υλοποιήθηκαν με τη χρήση πνευματικών καλουπιών (Pronk, 2014) αλλά και διογκωμένης μεμβράνης με πρόσθετα σχοινιά ως ξυλότυπο (Kokawa, 2012). Στην δεύτερη περίπτωση, το νερό αντικαταστάθηκε από ενισχυμένο πάγο, μείγμα νερού και πριονιδιού με την ονομασία Pykcrete και ψεκάστηκε στον πνευματικό ξυλότυπο χρησιμοποιώντας μια φυγοκεντρική αντλία [εικ.19].



Εικόνα 19: Χρήση πνευματικών καλουπιών σε μεγάλης κλίμακας κατασκευές (Pronk, 2014; Kokawa, 2012)

2.3.6 Καλούπια μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης

Οι διεργασίες κατασκευής που βασίζονται στην τεχνική πρόσθεσης (additive manufacturing) (Dunn, 2012) αναφέρονται στην σταδιακή προσθήκη υλικού σε στρώσεις για τη δημιουργία πρωτοτύπων (rapid prototyping ή 3D printing). Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) στοιχείων από σκυρόδεμα σε μεγάλη κλίμακα έχουν αναδείξει μια σειρά από πλεονεκτήματα αυτής την τεχνικής όπως είναι η ελαχιστοποίηση της ποσότητας του υλικού που χρησιμοποιείται, του χρόνου και των αποβλήτων λόγω της μη ανάγκης εφαρμογής ξυλότυπων, κάτι το οποίο δε θα ήταν εφικτό με συμβατικές μεθόδους κατασκευής (Lim et al, 2012). Μελέτες όπως αυτές του Hack (2013) παρουσίασαν αποτελεσματικές ρομποτικές κατασκευαστικές μεθόδους για την ανάπτυξη σύνθετων δομών σκυροδέματος μέσω τρισδιάστατης εκτύπωσης.

Στο έργο Smart Concrete Wall γίνεται παραγωγή μεγάλης κλίμακας τρισδιάστατου-τυπωμένου ξυλότυπου (Immensa Technology Labs) [9]. Το έργο περιλαμβάνει την παραγωγή μεγάλης κλίμακας τρισδιάστατου τυπωμένου καλουπιού [εικ.20]. Η χρήση παραμετρικών εργαλείων σχεδίασης σε συνδυασμό με μεγάλης κλίμακας τρισδιάστατη εκτύπωση καθιστά δυνατή την κατασκευή μιας μη συμβατικής μορφολογίας τοίχου από τσιμέντο.



Εικόνα 20: Παραγωγή δομικών στοιχείων με τη χρήση καλουπιών παραγόμενων με τη μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης [9]

Επίσης, στο έργο Digital Construction Platform (DCP) (Keating et al, 2017), ένα αυτοματοποιημένο σύστημα τρισδιάστατης εκτύπωσης (3d printing) αποτελούμενο από ένα υδραυλικό σύστημα και ένα ρομποτικό βραχίονα που μεταφέρεται σε κινητή πλατφόρμα χρησιμοποιήθηκε για την επιτόπου κατασκευή ενός μονωμένου καλουπιού με δυνατότητες κλίσης σε διαφορετικές μοίρες [εικ.21]. Ως περίπτωση μελέτης (case study) κατασκευάστηκε επιτόπου δομή με διάμετρο 14.6 m και ύψους 3.7 m σε χρόνο λιγότερο από 13.5 ώρες. Το σύστημα DCP αξιολογήθηκε όσον αφορά την ασφάλεια, την ποιότητα, την προσαρμογή, την ταχύτητα, το κόστος και τη λειτουργικότητα του και διαπιστώθηκαν τα πολλά οφέλη του σε σύγκριση με άλλες παραδοσιακές τεχνικές και υπάρχουσες ερευνητικές μελέτες ψηφιακής κατασκευής μεγάλης κλίμακας (Keating et al, 2017).



Εικόνα 21: Digital Construction Platform-τρειςδιάστατη εκτύπωση μεγάλης κλίμακας τοιχοποιίας επί τόπου (Keating et al, 2017)

Σε ένα άλλο παράδειγμα ρομποτικής κατασκευής τοίχων, ένα εξειδικευμένο εργαλείο τελικής δράσης χρησιμοποιήθηκε για την τρισδιάστατη εκτύπωση (3D printing) ράβδων από πλαστικό για τη στατική ενίσχυση τοίχου πριν από την προσθήκη του σκυροδέματος. Η ενίσχυση αυτή ενσωματώθηκε στην ίδια την κατασκευή και αυτό τη διαφοροποιεί από άλλα παραδείγματα τρισδιάστατης εκτύπωσης. Αυτή η τεχνική, αξιολογήθηκε όσον αφορά τη δυνατότητα της να εφαρμόζεται για την ελαχιστοποίηση του πάχους και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης ενός συμβατικού τοίχου (Hack et al, 2013), μέσα από την κατασκευή της στατικής ενίσχυσης του με τρισδιάστατη εκτύπωση (3d printing) [εικ.22] και την μετέπειτα πλήρωση του με σκυρόδεμα με τη μέθοδο ψεκασμού (spraying). Με αυτόν τον τρόπο, εκτός από την ελαχιστοποίηση της χρήσης υλικού στην μορφολογία της τοιχοποιίας, επιτυγχάνεται και μείωση στη χρήση υλικού για το δομικό σκελετό. Αυτή η μέθοδος αποδείχτηκε να πλεονεκτεί συγκριτικά με μια συμβατική μεθοδολογία κατασκευής τοιχοποιίας με μεταλλικό σκελετό ενίσχυσης όσον αφορά την περιβαλλοντική της προσέγγιση.



Εικόνα 22: Κατασκευή ενίσχυσης και πλήρωσης τοιχοποιίας με τη χρήση ειδικών εργαλείων τελικής δράσης (Hack et al, 2013)

2.4 Σύνοψη αυτοματοποιημένων μεθόδων χύτευσης δομών και δομοστοιχείων

Συνοπτικά, μέσα από τα προαναφερόμενα παραδείγματα διαπιστώνεται ότι με την εξέλιξη της τεχνολογίας στην κατασκευή εξατομικευμένων τοιχοποιιών και δομικών στοιχείων αναζητούνται μέθοδοι οι οποίοι θα μπορούσαν να επιτύχουν μικρή κατανάλωση ενέργειας, μικρότερες εκπομπές ρύπων και να χρησιμοποιούν υλικά φιλικότερα προς το περιβάλλον. Οι ρομποτικές μηχανές διερευνώνται ως προς τη δυνατότητα τους να εφαρμόζονται σε διαφορετικές περιπτώσεις δόμησης (εντός εργοταξίου και εκτός εργοταξίου), ως προς την λειτουργία τους καθώς επίσης ως προς την ικανότητα τους να εκπληρώνουν τις σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις του σχεδιαστή. Είναι

αποδεκτό ότι η χρήση ψηφιακών μέσων για το σχεδιασμό και την κατασκευή αυξάνει την ακρίβεια του τελικού αποτελέσματος. Κατ' επέκταση, η ανάπτυξη εργαλείων για εξειδικευμένες εργασίες βοηθά σε μεγάλο βαθμό στην μείωση των κατασκευαστικών λαθών και στη διατήρηση της τυποποίησης στο επίπεδο της διαδικασίας κατασκευής.

Ειδικότερα, όσο περισσότερος είναι ο βαθμός αυτοματοποίησης και τυποποίησης, τόσο αυξάνεται η παραγωγικότητα και μειώνεται ο χρόνος αποπεράτωσης τέτοιων δομών. Επίσης, με την προσθήκη των αυτοματισμών ελέγχεται σε μεγαλύτερο βαθμό το τελικό αποτέλεσμα, η ποσότητα του δομικού υλικού και παράλληλα δίνεται η δυνατότητα διερεύνησης πολλαπλών γεωμετρικών αποτελεσμάτων με τη χρήση εξειδικευμένων εργαλείων τελικής δράσης. Διαπιστώνεται ότι είναι προτιμότερη η προκατασκευή και συναρμολόγηση στον εργαστηριακό χώρο και στη συνέχεια η μεταφορά στο εργοτάξιο λόγω των μικρότερων ρύπων που προκαλούνται μέσω αυτής της διαδικασίας. Πολλές μη συμβατικές διαδικασίες εκτελούνται εκτός εργοταξίου, όπως φαίνεται από τον συνοπτικό πίνακα [πιν.1], και αυτό έχει να κάνει με την οικονομική, χρονική και πρακτική προσέγγιση των κατασκευαστικών διαδικασιών. Παρατηρείται δηλαδή τάση προς την προκατασκευή σε σύγκριση με την επιτόπου χύτευση και συναρμολόγηση δομικών στοιχείων.

Η χρήση ρομποτικών μηχανών σε συνδυασμό με ευέλικτους μηχανισμούς καλουπιών επιτυγχάνει τον αυτοματισμό στο επίπεδο της παραγωγής και της τοποθέτησης των εξατομικευμένων στοιχείων ή πλήρωσης τοιχοποιιών. Ο περισσότερες περιπτώσεις εφαρμογής εργαλείων τελικής δράσης στο άκρο ρομποτικού βραχίονα πρόκειται για βελτιωμένους μηχανισμούς κατασκευής δομών που δίνουν ελευθερία στον κατασκευαστή να ελέγχει τις παραμέτρους σχεδιασμού και της διαδικασίας κατασκευής, οδηγώντας σε πιο σύνθετα αποτελέσματα. Συνήθως, τέτοιες διαδικασίες στοχεύουν στην μείωση των προβλημάτων ακρίβειας και πρακτικότητας στην κατασκευή εξατομικευμένων στοιχείων πραγματικής κλίμακας αλλά και συντόμευσης χρονοβόρων διαδικασιών στο περιβάλλον του εργοταξίου.

Σε γενικό επίπεδο, οι μηχανισμοί που αναφέρθηκαν πιο πάνω, σε συνδυασμό με τη χρήση εργαλείων ψηφιακού σχεδιασμού θα μπορούσαν, πέρα από την ελευθερία που προσφέρουν σε κατασκευαστικό επίπεδο, να μειώσουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο και την οικονομία των διαδικασιών, στοχεύοντας προς νέες αιεφόρες σχεδιαστικές και κατασκευαστικές λύσεις. Όσον αφορά την επιλογή των κατασκευαστικών υλικών και της περιβαλλοντικής απόδοσης τους, οι περισσότερες διερευνήσεις αναφέρονται στη χρήση συμβατικού σκυροδέματος. Το σκυρόδεμα κρίνεται ως ένα δομικό υλικό το οποίο δεν είναι τόσο φιλικό

προς το περιβάλλον, και ως εκ τούτου στις μέρες μας διερευνώνται εναλλακτικές λύσεις υλικών σε συνδυασμό που να είναι περιβαλλοντικά φιλικότερες.

| Project | Design | Fabrication | | | Usage |
|--------------------------------|-------------------------|---|------------------|----------------------|------------------------------------|
| | Conventional/Parametric | Conventional/Automated | On site/off site | Material | Reusable formwork/One use formwork |
| Minke, 2006 | Conventional | Casting | on site | adobe | reusable |
| Bock | Conventional | Adaptive casting | on site | concrete | reusable |
| Cleia builds, 2014 | Conventional | Casting | on site | adobe | reusable |
| Felix Candela | Conventional | Casting | on site | concrete | one use |
| Frei Otto | Conventional | Casting | on site | concrete | one use |
| Pier Luigi Nervi | Conventional | Casting | on site | concrete | one use |
| PERI, 2012 | Conventional | Adaptive casting | on site | concrete | reusable |
| Dunn, 2012 | Parametric | Digital technologies | off site | concrete | one use |
| Hawes, 1952 | Conventional | Adaptive casting-pin beds | off site | concrete | reusable |
| Eisel, 1979 | Conventional | Adaptive casting-pin beds | off site | concrete | reusable |
| Schipper and S.Grunewald, 2014 | Parametric | Adaptive casting – pin beds | off site | concrete | reusable |
| Koc and Thngaswany, 2011 | Parametric | Adaptive casting – pin beds | off site | concrete | reusable |
| Michel, 2014 | Parametric | Adaptive casting-pin beds | off site | concrete | reusable |
| Khabazi and Budig, 2016 | Parametric | Adaptive casting-pin beds | off site | concrete | one use |
| Kontovourkis et al, 2019 | Parametric | Adaptive casting-articulated | off site | concrete | reusable |
| Chen et al, 2015 | Parametric | Robotic 3d printing | N/A | concrete | N/A |
| Hack et al, 2013 | Parametric | Robotic 3d printing | on site | concrete | N/A |
| De Schutter, 2018 | Parametric | 3d printing | N/A | concrete | N/A |
| Faludi et al., 2019 | Parametric | 3d printing | N/A | 3d printed materials | N/A |
| Scotto et al, 2018 | Parametric | Adaptive casting-articulated | off site | concrete | reusable |
| Keating et al, 2017 | Parametric | Robotic 3d printing | on site | concrete | N/A |
| West and Araya, 2010 | Parametric | Adaptive casting | off site | concrete | reusable |
| Kristensen et al., 2013 | Parametric | Adaptive casting | off site | concrete | reusable |
| Sitnikov, 2019 | Parametric | Adaptive casting | off site | concrete | reusable |
| Agusti-Juan and Habert, 2017 | Parametric | Conventional masonry /Robotic 3d printing | N/A | N/A | N/A |
| Gramazio et al, 2014 | Parametric | Conventional masonry /Robotic 3d printing | N/A | N/A | N/A |
| De Soto et al, 2018 | Parametric | Conventional masonry /Robotic procedure | N/A | N/A | N/A |

Πίνακας 1 :Κατηγοριοποίηση διερευνήσεων μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση

Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην παρούσα έρευνα επιλέγεται η διερεύνηση μιας αυτοματοποιημένης μεθόδου παραγωγής προκατασκευασμένων εξατομικευμένων δομικών στοιχείων τοιχοποιίας, η οποία αξιολογείται ως προς την δυνατότητα παραγωγής στοιχείων με βάση πολλαπλές σχεδιαστικές και κατασκευαστικές απαιτήσεις και τη χρήση

εναλλακτικών δομικών υλικών που είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον. Κατ' επέκταση, γίνεται η επιλογή ευέλικτων μηχανισμών, οι οποίοι έχουν τη δυνατότητα να ελέγχουν την ποσότητα των απαιτούμενων δομικών υλικών, να παράγουν παραλλαγές μορφολογιών και να επιτρέπουν πειραματισμούς όσον αφορά τις διαστάσεις των δομικών στοιχείων και των τοιχοποιιών, των ανοιγμάτων και του πάχους τους. Επίσης, η επαναχρησιμοποίηση των ευέλικτων καλουπιών προσφέρει πλεονεκτήματα όσον αφορά τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο τέτοιων διαδικασιών, αφού μειώνεται η χρήση πρώτων υλών (π.χ ξύλου, μετάλλου) για την κατασκευή συμβατικών ξυλότυπων.

2.5 Αειφόρες ψηφιακές προσεγγίσεις στην ανάλυση τοιχοποιίας

Με την αυτοματοποίηση διαδικασιών κατασκευής τοιχοποιιών και την παράλληλη ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων αναζητούνται μέθοδοι αμφίδρομης συνεισφοράς τους στον αρχιτεκτονικό και κατασκευαστικό τομέα. Σε αυτό το τμήμα γίνεται αναφορά στα κριτήρια περιβαλλοντικής προσέγγισης, τα οποία θα μπορούσαν να λαμβάνονται υπόψη σε περιπτώσεις αυτοματοποιημένων διαδικασιών παραγωγής χυτών τοιχοποιιών ή τοιχοποιιών από μοναδιαία στοιχεία. Τέτοια κριτήρια, τα οποία είναι σημαντικά στην παρούσα διερεύνηση, περιλαμβάνουν: το είδος του υλικού, την περιβαλλοντική εκτίμηση του κύκλου ζωής μιας κατασκευής-τοιχοποιίας και τη χρήση συγκεκριμένης κατασκευαστικής μεθόδου με τη βοήθεια ψηφιακών μηχανών. Ένας αριθμός από παραδείγματα διερευνώνται ως προς το υλικό κατασκευής τους και την φιλικότητα τους προς το περιβάλλον, τη ψηφιακή μέθοδο κατασκευής, τη στατική συμπεριφορά τους και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με την μέθοδο Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Analysis – LCA). Συνολικά, αξιολογούνται περιβαλλοντικά κριτήρια και κριτήρια κόστους, που ενσωματώνονται στο σχεδιασμό και την κατασκευή και περιγράφονται οι προοπτικές εφαρμογής τους σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής.

2.5.1 Περιβαλλοντική εκτίμηση – Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) και εκτίμηση κόστους

Ο κτιριακός τομέας είναι σημαντικός στην ανθρώπινη δραστηριότητα αφού επηρεάζει την κατανάλωση ενέργειας και την εξάντληση των πόρων. Σύμφωνα με τον Horvath (2004), η κατανάλωση των δύο πέμπτων των παγκόσμιων υλικών και ενεργειακών ροών αποδίδεται στον τομέα των κατασκευών που έχουν να κάνουν με τη στέγαση. Αυτό γίνεται πιο σημαντικό λόγω του γεγονότος ότι η κατασκευή δομικών υλικών αντιπροσωπεύει το 5-10% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ (Habert et al, 2012). Μέσα από εργαλεία ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής και ειδικά μέσα από την περιβαλλοντική

εκτίμηση των κατασκευών, στόχος είναι η χρήση υλικών σε μειωμένες ποσότητες (Agustí-Juan and Habert, 2017; Agustí -Juan et al, 2017) και με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Μέσα σε αυτά τα πλαίσια, η ανάλυση του κύκλου ζωής είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση και τη βελτίωση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των προϊόντων στον τομέα των δομικών κατασκευών (Chevalier and Le Teno, 1996).

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Πλατφόρμα Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (European Platform of Life Cycle Assessment) [10], η διαδικασία Life Cycle Assessment (LCA) είναι μια διεθνώς τυποποιημένη μεθοδολογία (ISO 14040) [11], η οποία επιτρέπει την ολοκληρωμένη καταγραφή, ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν ή μια διαδικασία σε καθορισμένα πλαίσια. Μια ολοκληρωμένη επισκόπηση της περιλαμβάνει όλα τα στάδια που προηγούνται και ακολουθούν μια διαδικασία που εμπλέκεται στην παραγωγή, χρήση και διαχείριση αποβλήτων ενός προϊόντος (Baumann and Tillman, 2004). Συγκεκριμένα, μέσω αυτής την ανάλυσης αξιολογούνται τα περιβαλλοντικά φορτία, οι διεργασίες και τα προϊόντα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (Sonnemann, 2004). Η αξιολόγηση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος και συγκεκριμένα την εξόρυξη και την επεξεργασία των πρώτων υλών, την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή, τη χρήση, την επαναχρησιμοποίηση, τη συντήρηση, την ανακύκλωση και τέλος τη διάθεση (Consoli et al, 1993).

Όπως έχει αναφερθεί, πολλές πρόσφατες μελέτες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη μεθόδων και εργαλείων για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε κτίρια κατά τα πρώτα στάδια σχεδιασμού (Soust-Verdaguer et al, 2017). Μεταξύ άλλων, ένα τέτοιο εργαλείο είναι το One Click LCA software [12], στο οποίο η ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών βασίζεται σε ευρωπαϊκές βάσεις δεδομένων (EPD) [13] κατασκευαστών ή κατηγοριών προϊόντων, που συλλέγονται από 26 και περισσότερες διαφορετικές βάσεις δεδομένων, καθώς και πληροφορίες κατασκευαστών οικοδομικών υλικών. Επιπλέον, ενσωματώνονται ορισμένες γενικές βάσεις δεδομένων για οικοδομικά υλικά, όπως το OekoBau.dat [14] και το IMPACT [15], οι οποίες καλύπτουν πάνω από 10,000 διαφορετικά είδη δομικών υλικών. Όλες οι πληροφορίες στην βάση δεδομένων ταξινομούνται, δομούνται και προσφέρονται στους τελικούς χρήστες χρησιμοποιώντας ένα δυναμικό αλγόριθμο, ο οποίος εξασφαλίζει ότι οι χρήστες θα μπορούν να επιλέγουν μόνο δεδομένα σύμφωνα με ανάλογες απαιτήσεις ποιότητας και πιστοποίησης, όπως για παράδειγμα LEED, BREEAM ή Energie Carbone. Τα δεδομένα στη βάση δεδομένων

περνούν από έλεγχο ποιότητας σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040/44 [11] ή σύμφωνα με το πρότυπο EN 15804 για βάσεις δεδομένων (EPD) που εκδίδονται στην Ευρώπη.

2.5.2 Ανάλυση Κύκλου Ζωής (LCA) και εκτίμηση κόστους αυτοματοποιημένων κατασκευαστικών παραδειγμάτων

Στις μέρες μας, για την ανέγερση εξατομικευμένων ή σύνθετων κατασκευών χρησιμοποιούνται στις περισσότερες των περιπτώσεων συμβατικά καλούπια ή άλλα καλούπια που τυγχάνουν επεξεργασίας είτε μέσω χειροκίνητων διαδικασιών ή μέσω μηχανών CNC, όπως τα παραδείγματα της χρήσης ξύλινων καλουπιών PERI. Αυτές οι λύσεις προκαλούν αύξηση της παραγωγής δομικών αποβλήτων ξύλου για ξυλότυπους κατά περίπου 70%, αφού τέτοιου είδους καλούπια απορρίπτονται μετά από μία χρήση, (Jaillon et al, 2008). Από την άλλη, η χρήση μεταλλικών ξυλοτύπων αντί των ξύλινων, παρόλο που βοηθά στην μεγιστοποίηση των δυνατοτήτων επαναχρησιμοποίησης τους (Jaillon et al, 2008; Wang et al, 2014), δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια βιώσιμη διαδικασία όσον αφορά τον αντίκτυπο που μπορεί να έχει στο περιβάλλον. Επιπρόσθετα, οι σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή δομικών στοιχείων όπως τούβλα (Buchanan and Honey, 1994; Koomey et al, 1998), ιδιαίτερα λόγω της χρήση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλο ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) να διοχετεύεται στην ατμόσφαιρα (Koroneos and Dompros, 2007), επιτείνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών λύσεων στον κλάδο των κατασκευών. Για την βελτίωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τις διαδικασίες κατασκευής κτηρίων όπως αυτών που αναφέρθηκαν πιο πάνω, αλλά και μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον ελάχιστο δυνατό βαθμό, είναι σημαντική η εισαγωγή τεχνικών αξιολόγησης των κατασκευαστικών λύσεων, όπως για παράδειγμα αυτή του Κύκλου Ζωής (LCA). Ιδιαίτερα, η ανάλυση LCA είναι καλό να εφαρμόζεται κατά τα πρώτα στάδια του σχεδιασμού, όταν οι αποφάσεις έχουν μεγάλη επίδραση στο έργο και οι αλλαγές μπορούν να πραγματοποιηθούν με ελάχιστο επιπλέον κόστος (Paulson Jr, 1976). Επίσης, είναι σημαντικό αυτή η ανάλυση να αποτελεί μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού ως εργαλείο υποστήριξης λήψης αποφάσεων, το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιείται από τους σχεδιαστές παράλληλα με άλλες πτυχές, όπως το κόστος και οι λειτουργικές απαιτήσεις. Η ισορροπία μεταξύ αυτών των κριτηρίων σχεδιασμού επιτρέπει στον αρχιτέκτονα/σχεδιαστή να διερευνήσει τη βέλτιστη απόδοση του κτιρίου που σχεδιάζει (Ingrao et al, 2016) και να συμβάλλει στη λήψη αποφάσεων για ελαχιστοποίηση των

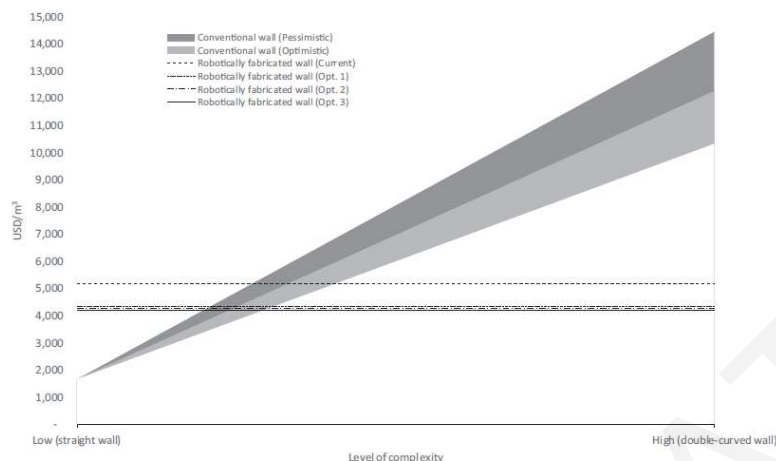
περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε διαφορετικές φάσεις, για παράδειγμα στο σχεδιασμό, στην ανακαίνιση, κλπ. (Malmqvist et al, 2011; Zabalza et al, 2009).

Παρόλο που η ενσωμάτωση κριτηρίων αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε πλαίσιο ψηφιακού σχεδιασμού και αυτοματοποιημένης κατασκευής κτηρίων έχει αυξητική τάση, οι περισσότερες μελέτες που σχετίζονται με πτυχές βιωσιμότητας των διαδικασιών ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής επικεντρώνονται σε μικρής κλίμακας παραδείγματα (Kohtala and Hyysalo, 2015). Για παράδειγμα, μελέτες από τους (Kreiger and Pearce, 2013; Faludi et al, 2015) επικεντρώθηκαν στην συγκριτική αξιολόγηση του κύκλου ζωής συμβατικών και μικρής κλίμακας κατασκευών με την προσθετική μέθοδο τρισδιάστατης εκτύπωσης (additive manufacturing and 3D printing). Και στις δύο περιπτώσεις διαφάνηκε ότι η προσθετική μέθοδος κατασκευής έχει λιγότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχέση με τη συμβατική κατασκευή και οδηγεί σε μείωση των αποβλήτων, προσφέροντας παράλληλα δυνατότητες ανακύκλωσης των υλικών. Επίσης, στη δουλειά των (Gebler et al, 2014; Chen et al, 2015) έγινε αξιολόγηση της τρισδιάστατης εκτύπωσης από την πλευρά της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας της διαδικασίας και φάνηκε ότι αυτή σχετίζεται με σημαντική μείωση του κόστους και της χρήσης ενέργειας αλλά και της μείωσης των απαιτούμενων πόρων και των περιβαλλοντικών εκπομπών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Μέσα από διερευνήσεις, στην περίπτωση τρισδιάστατης εκτύπωσης σύνθετων μορφών από σκυρόδεμα λαμβάνεται πάλι υπόψη η οικονομική ανάλυση της κατασκευαστικής διαδικασίας σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική ανάλυση (De Schutter, 2018). Επίσης, εξετάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της τρισδιάστατης εκτύπωσης με σκυρόδεμα σε σχέση με την πολυπλοκότητα της δομής. Η εφαρμογή βελτιστοποίησης καθώς και η λειτουργικότητα ως στρατηγικές σχεδίασης, επιτρέπουν τη χρήση του απαραίτητου υλικού όταν χρειάζεται δομικά ή λειτουργικά.

Επιπλέον, όσον αφορά την εκτίμηση κόστους τέτοιων διαδικασιών, παραδείγματα μελετών όπως αυτή του Thayer (2017), έχουν αποδείξει ότι υπάρχει τάση μείωσης στην τιμή των βιομηχανικών ρομποτικών βραχιόνων κατά 20 % περίπου μέχρι το 2025, κάτι το οποίο συνεπάγεται πιο συμφέρουσες οικονομικά κατασκευαστικές λύσεις συγκριτικά με συμβατικές. Ως αποτέλεσμα, η εφαρμογή ρομποτικών διαδικασιών θα μπορούσε να οδηγήσει σε υψηλότερη παραγωγικότητα σε σύγκριση με τις συμβατικές κατασκευαστικές διαδικασίες, χωρίς πρόσθετο κόστος στην περίπτωση αύξησης της πολυπλοκότητας των δομών.

Τέτοιες μελέτες, όπως στο έργο των Agustí-Juan και Habert (2017), εξετάζονται παραδείγματα ψηφιακής κατασκευής, σε αυτή την περίπτωση ένα ρομποτικά κατασκευασμένο σύστημα τοιχοποιίας που αποτελείται από συναρμολογούμενα τούβλα (Andreani and Bechthold, 2014), ένα πάτωμα από οπλισμένο σκυρόδεμα (López et al, 2014) και μια ρομποτική ξύλινη οροφή (Willmann et al, 2016) και συγκρίνονται με συμβατικές κατασκευαστικές διεργασίες. Επίσης, αξιολογούνται παράλληλα με τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο LCA. Τέλος, γίνεται αξιολόγηση των ρομποτικών κατασκευαστικών διαδικασιών ως προς τις μεθόδους και τα υλικά που χρησιμοποιούν με στόχο την επιβεβαίωση των πλεονεκτημάτων τους σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής δομών. Τα αποτελέσματα δείχνουν την ουσιαστική επίδραση της διαδικασίας μείωσης της ποσότητας υλικού στην αυτοματοποιημένη παραγωγή και κατ' επέκταση στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ένας στόχος που θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω στατικής βελτιστοποίησης. Σε παρόμοια κατεύθυνση, στο έργο των Agustí-Juan et al (2017), το παράδειγμα της ρομποτικής μεθόδου χύτευση σκυροδέματος με την ονομασία Mesh Mold (Hack et al, 2013), το οποίο παρουσιάστηκε πιο πάνω (βλέπε υπο-κεφάλαιο 2.3.6), αξιολογήθηκε με βάση τη μέθοδο LCA. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η αύξηση της πολυπλοκότητας του μη συμβατικού σχήματος δεν επηρέασε αναλογικά το κόστος της ρομποτικής διαδικασίας αλλά ούτε και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του.

Μέσα από τέτοιες περιβαλλοντικές αναλύσεις ψηφιακά ελεγχόμενων διαδικασιών παραγωγής στον τομέα της μαζικής εξατομίκευσης, αξιολογούνται και ποσοτικοποιούνται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η καταναλώσιμη ενέργεια που εμπερικλείεται στις διάφορες διεργασίες, οι οποίες μεσολαβούν μέχρι να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα, όπως επίσης εξετάζεται το κόστος των υλικών και των διαδικασιών που απαιτούνται (Chen et al, 2015). Επίσης, σε άλλες περιπτώσεις αξιολογείται η παραγωγικότητα της ρομποτικής διαδικασίας σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους για την κατασκευή τοιχοποιιών και εξάγονται συμπεράσματα όσον αφορά το κόστος και το χρόνο που απαιτείται και κατ' επέκταση της παραγωγικότητας σε συνάρτηση της τιμής [εικ.23] (De Soto et al, 2018). Στο παράδειγμα των De Soto et al (2018) διαπιστώνεται ότι καθώς το επίπεδο της πολυπλοκότητας αυξάνεται, η χρήση της ρομποτικής μεθόδου παρέχει σημαντική εξοικονόμηση χρόνου, με διαφορετικές επιλογές ρομποτικών διαδικασιών να επιφέρουν μείωση, η οποία κυμαίνεται από 20% έως 50%.



Productivity (USD/m³) for different levels of complexity for a concrete wall using conventional construction and robotic fabrication.

Εικόνα 23: Διάγραμμα σύγκρισης παραγωγικότητας σε συνάρτηση με την μέθοδο παραγωγής του δομικού στοιχείου (De Soto et al, 2018)

Πιο συγκεκριμένα, στην κατηγορία αυτοματοποιημένων διαδικασιών χύτευσης, σε παραδείγματα όπως αυτό του Ice formwork (Sitnikov, 2019), γίνεται ποσοτική σύγκριση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από την προκατασκευή στοιχείων από σκυρόδεμα μέσω της διαμόρφωσης καλουπιού από πάγο με την διαδικασία άλεσης (CNC milling) με παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιώντας άλλα υλικά όπως ο αφρός και το κερί [εικ.24] (Sitnikov, 2019). Αποτέλεσμα της διαδικασίας είναι η παραγωγή μηδενικών ρύπων (kg CO₂/m³), κάτι το οποίο θα μπορούσε να παρέχει μια εναλλακτική λύση για προκατασκευή στοιχείων από σκυρόδεμα.

| | <i>Ice Formwork</i> | <i>Water</i> | <i>Refrigeration*</i> | EPS | Wax |
|-----------------------------------|---------------------|--------------|-----------------------|------|-------|
| MJ/kg | 0.32 | (0.2) | (0.12) | 88.6 | 52 |
| MJ/m ³ | 288 | (180) | (108) | 1772 | 41600 |
| kgCO ₂ /m ³ | – | – | – | 50 | 4280 |

Εικόνα 24: Πίνακας τιμών καταναλούμενης ενέργειας και διοξειδίου του άνθρακα κατά τις διαφορετικές κατασκευαστικές διαδικασίες (Sitnikov, 2019)

Σε ένα άλλο παράδειγμα με την ονομασία TailorCrete [16], προτάθηκε μια διαφορετική προσέγγιση στην οποία αναπτύχθηκε ένα ψηφιακά ελεγχόμενο εύκαμπτο σύστημα καλουπιού pin-bed για την κατασκευή πολύπλοκων δομών από σκυρόδεμα. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ένα ευέλικτο σύστημα καλουπιών στο εργαστήριο για την κατασκευή τμημάτων τοιχοποιίας με ανακυκλώσιμα καλούπια από κερί, τα οποία στη συνέχεια μεταφέρθηκαν στο εργοτάξιο και εισήχθησαν σε ένα τυποποιημένο σύστημα καλουπιού για την παραγωγή των τμημάτων [εικ.25]. Σε αυτό το καινοτόμο παράδειγμα

καλουπιού, συνδυάζονται τα πλεονεκτήματα της χρήσης τεχνολογίας αρθρωτού καλουπιού και επαναχρησιμοποιήσιμου κεριού ως υλικό για την κατασκευή δομικών στοιχείων σκυροδέματος διπλής καμπυλότητας (Oesterle et al, 2012). Σε αυτή την περίπτωση η ανακύκλωση του υλικού του καλουπιού επιτρέπει την άμεση κατασκευή εναλλακτικών μορφών πάνελ, καθώς επίσης μειώνει την αλόγιστη χρήση υλικών για καλούπια, επιφέρονταν σημαντική μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε σύγκριση με μια συμβατική διαδικασία.



Εικόνα 25: Μελέτη TailorCrete όπου αναπτύσσεται ένα ευέλικτο σύστημα pin-bed [16]

Επιπλέον γίνεται σύγκριση και μεταξύ των διαφορετικών κατασκευαστικών υλικών ως προς τους ρύπους που προκαλούνται κατά τη χρήση τους. Πιο συγκεκριμένα, ένα άλλο παράδειγμα ασχολείται με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο κατά τη διαδικασία 3D printing καινούριων εναλλακτικών υλικών ώστε να εξεταστεί ο περιβαλλοντικός αντίκτυπο, η αντοχή του υλικού, η κατασκευασσιμότητα του και το κόστος του (Faludi et al, 2019). Η ενέργεια, οι ρύποι, το κόστος και το υλικό, είναι σημαντικοί μετρήσιμοι παράγοντες που μπορούν να βοηθήσουν στην επιλογή κατάλληλων κατασκευαστικών διαδικασιών, είτε μέσω συμβατικών τρόπων δόμησης με καλούπια ή μέσω της χρήσης ευέλικτων καλουπιών.

Συνοπτικά, μέσα από τα πιο πάνω παραδείγματα, παρατηρείται η δυνατότητα των υπαρχόντων μεθόδων ψηφιακού σχεδιασμού και ρομποτικής κατασκευής να παρέχουν αποτελεσματικούς τρόπους παραγωγής σύνθετων δομών, παρόλο που η συμβολή τους στη βελτίωση της βιωσιμότητας των κατασκευών δεν αποτελεί το επίκεντρο των διερευνήσεων. Επιπρόσθετα, ολοκληρωμένες μελέτες περιβαλλοντικής ανάλυσης (LCA) και εκτίμησης κόστους διαδικασιών ψηφιακού σχεδιασμού και κατασκευής σε μεγάλη κλίμακα, όπου αυτές να καθορίζουν και να υποβοηθούν αποφάσεις στο στάδιο του σχεδιασμού, δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος αλλά ούτε εντοπίζονται σε μεγάλη έκταση στη βιβλιογραφία. Ο Πίνακας 2 συνοψίζει τέτοια παραδείγματα κατασκευαστικών διερευνήσεων, τόσο αναφορικά με συμβατικές όσο και με ψηφιακές διαδικασίες χρήσης καλουπιών και

τριδιάστατης εκτύπωσης σε σχέση με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο τους, το κόστος, το υλικό και την δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης των υλικών τους.

| Project | Fabrication | Environmental and economic impact analysis | | Material | Usage |
|--------------------------------|---|--|---------------|----------------------|----------|
| | Conventional/Automated | LCA analysis | Cost analysis | | |
| Minke, 2006 | Casting | N/A | N/A | adobe | reusable |
| Bock | Adaptive casting | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Cleia builds, 2014 | Casting | N/A | N/A | adobe | reusable |
| Felix Candela | Casting | N/A | N/A | concrete | one use |
| Frei Otto | Casting | N/A | N/A | concrete | one use |
| Pier Luigi Nervi | Casting | N/A | N/A | concrete | one use |
| PERI, 2012 | Adaptive casting | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Dunn, 2012 | Digital technologies | N/A | N/A | concrete | one use |
| Hawes, 1952 | Adaptive casting | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Eisel, 1979 | Adaptive casting – pin beds | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Schipper and S.Grunewald, 2014 | Adaptive casting – pin beds | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Koc and Thngaswany, 2011 | Adaptive casting – pin beds | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Michel, 2014 | Adaptive casting – pin beds | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Khabazi and Budig, 2016 | Adaptive casting – pin beds | N/A | N/A | concrete | one use |
| Kontovourkis et al, 2019 | Adaptive casting-articulated | N/A | A | concrete | reusable |
| Chen et al, 2015 | Robotic 3d printing | N/A | N/A | concrete | N/A |
| Hack et al, 2013 | Robotic 3d printing | N/A | N/A | concrete | N/A |
| De Schutter, 2018 | 3d printing | A | A | concrete | N/A |
| Faludi et al., 2019 | 3d printing | A | A | 3d printed materials | N/A |
| Scotto et al, 2018 | Adaptive casting-articulated | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Oesterle, 2012 | Adaptive casting | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Keating et al, 2017 | Robotic 3d printing | N/A | N/A | concrete | N/A |
| West and Araya, 2010 | Adaptive casting | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Kristensen et al., 2013 | Adaptive casting | N/A | N/A | concrete | reusable |
| Sitnikov, 2019 | Adaptive casting | A | A | concrete | reusable |
| Agusti-Juan and Habert, 2017 | Conventional masonry /Robotic 3d printing | A | N/A | N/A | N/A |
| Gramazio et al, 2014 | Conventional masonry /Robotic 3d printing | A | N/A | N/A | N/A |
| De Soto et al, 2018 | Conventional masonry /Robotic procedure | A | N/A | N/A | N/A |

Πίνακας 2: Κατηγοριοποίηση κατασκευαστικών διερευνήσεων (συμβατικών και μη συμβατικών) σχετικών με χρήση μεθόδων χύτευσης ή τριδιάστατης εκτύπωσης μέσα από την βιβλιογραφική ανασκόπηση σε σχέση με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο τους

2.6 Συμπεράσματα

Παρόλο που τα παραδείγματα αυτοματοποίησης και ρομποτικής στον τομέα των κατασκευών έχουν αυξηθεί σε αριθμό, βιώσιμοι δείκτες και κατευθυντήριες γραμμές για τη διερεύνηση των επιπτώσεων τους όσον αφορά την περιβαλλοντική και την οικονομική πτυχή τους είναι περιορισμένοι και δεν έχουν διερευνηθεί διεξοδικά (Pan et al, 2018). Επίσης, λίγα δημοσιευμένα παραδείγματα που επιχειρούν να εκτιμήσουν την περιβαλλοντική ή οικονομική επίπτωση τέτοιων τεχνικών μπορούν να βρεθούν. Αυτά φαίνονται να είναι κατακερματισμένα, αφού είτε επικεντρώνονται στην περιβαλλοντική εκτίμηση ή στον χρόνο κατασκευής και στην αξιολόγηση του κόστους. Το ίδιο ισχύει και στις περιπτώσεις όπου εισάγονται μη συμβατικές, προσαρμοστικές ή αναδιαμορφώσιμες τεχνικές χύτευσης με τη χρήση αυτοματοποιημένων καλουπιών. Ο μικρός αριθμός περιπτώσιολογικών μελετών, όπου γίνεται αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και του κόστους τέτοιων κατασκευών, απαιτεί την περαιτέρω ανάπτυξη και εξέταση τους καθώς και τη συσχέτιση των αποτελεσμάτων που εμπεριέχονται σε αυτές τις διαδικασίες.

Αυτή η έρευνα επιχειρεί να συμβάλει στη γεφύρωση του χάσματος που υπάρχει στη βιβλιογραφία σε αυτόν τον τομέα. Στόχος της μελέτης είναι η εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου και του κόστους παραγωγής εξατομικευμένων μοναδιαίων στοιχείων τοιχοποιίας αλλά και της διαδικασίας στο σύνολο της, η οποία καθοδηγείται από ένα ευέλικτο μηχανισμό καλουπιού για τη χύτευση επιλεγμένων υλικών. Τα υλικά που επιλέγονται σε συνδυασμό με τα δομοστοιχεία αξιολογούνται ως προς τη περιβαλλοντική συμπεριφορά, τη στατική επάρκεια, τη λειτουργικότητα και την παραγωγή τους. Μέσω αυτής της μελέτης επιδιώκεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων με αντίστοιχες συμβατικής προσέγγισης κατασκευής των ίδιων δομών, η εισαγωγή παραμέτρων, κριτηρίων και περιορισμών, τα οποία επηρεάζουν τον σχεδιασμό, με στόχο τον εντοπισμό κατευθυντήριων γραμμών διερεύνησης. Τα αποτελέσματα, ενδέχεται να επηρεάσουν μελλοντικές έρευνες προς πιο βιώσιμες στρατηγικές κατασκευής χυτών δομών και δομοστοιχείων αφού τώρα δεν εντοπίζονται στη βιβλιογραφία.

3 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο επεξηγούνται τα βασικά κριτήρια σχεδιασμού και κατασκευής, τα οποία εμπεριέχονται στα διαφορετικά τμήματα της παρούσας διερεύνησης. Η έρευνα εξετάζει τον περιβαλλοντικό και οικονομικό αντίκτυπο του σχεδιασμού και της παραγωγής εξατομικευμένων (customized) δομοστοιχείων χρησιμοποιώντας μια προτεινόμενη ρομποτική κατασκευαστική διαδικασία. Ειδικότερα, εφαρμόζεται ένα ευέλικτο εργαλείο τελικής δράσης σε ρομποτικό βραχίονα για την κατασκευή μη συμβατικών τούβλων από τρία διαφορετικά υλικά, και διαφορετικές τυπολογίες σύμφωνα με προκαθορισμένα κριτήρια, που ελέγχονται προκαταρκτικά μέσα από τη σχεδιαστική, τη λειτουργική, και τη στατική ανάλυση τους. Στη συνέχεια, αξιολογούνται με βάση την περιβαλλοντική απόδοση τους, όπως επίσης το κόστος και τον χρόνο που απαιτείται όσον αφορά τις διεργασίες κατασκευής τους. Στόχος είναι η αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων σε σχέση με την καταλληλότητα των υλικών προς διερεύνηση αλλά και την ελαχιστοποίηση τους με στόχο την μείωση των εκπομπών CO₂ και της ενέργειας που καταναλώνεται, καθώς και την ελαχιστοποίηση του κόστους και του χρόνου κατασκευής τους. Η αξιολόγηση επεκτείνεται μέσα από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης διαδικασίας με τα αντίστοιχα αποτελέσματα μιας συμβατικής διαδικασίας παραγωγής εξατομικευμένων δομοστοιχείων.

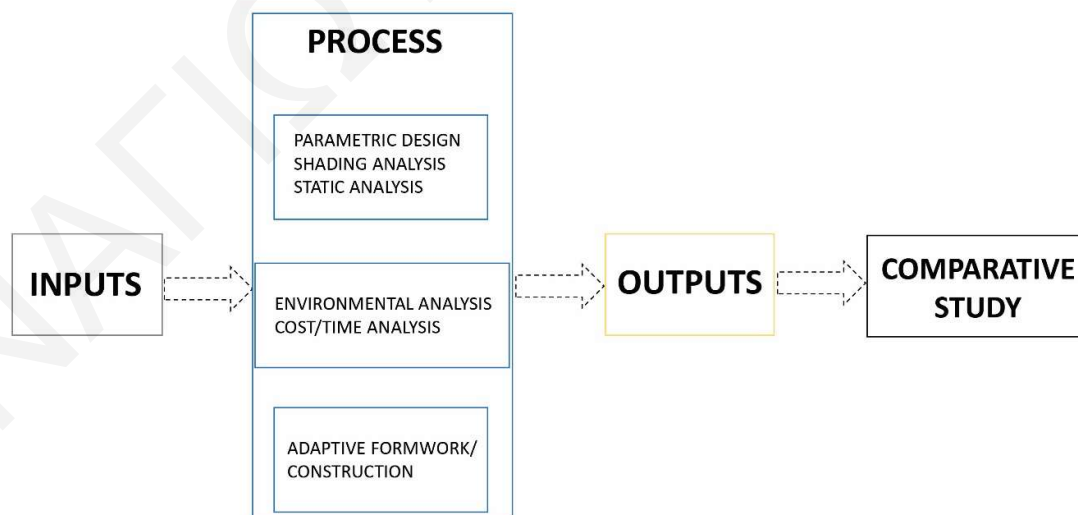
3.2 Ανάλυση προτεινόμενης μεθοδολογίας έρευνας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, αναπτύσσεται με βάση τη λογική σύζευξης των επιμέρους τμημάτων της έρευνας, όπου παράμετροι και κριτήρια σχεδιασμού συσχετίζονται με κριτήρια περιβαλλοντικής απόδοσης σε μια αλληλένδετη σχέση με βάση την αυτοματοποιημένη μέθοδο παραγωγής των δομοστοιχείων. Συγκεκριμένα, η μελέτη βασίζεται σε σχεδιαστική, περιβαλλοντική και κατασκευαστική διερεύνηση (Kontonourkis and Konatzii, 2016; 2018; 2020). Σε πρώτο επίπεδο, οι διερευνήσεις εξετάζονται ξεχωριστά και σε δεύτερο επίπεδο, τα αποτελέσματά τους αξιολογούνται συνολικά και συγκρίνονται αφού εντοπίζονται κοινές παράμετροι και κριτήρια αξιολόγησης.

Όπως φαίνεται στο γενικό διάγραμμα της προτεινόμενης μεθοδολογίας έρευνας [εικ.26], οι σχεδιαστικοί παράμετροι και τα κριτήρια εισαγωγής έχουν άμεση σχέση με τη σχεδιαστική ανάπτυξη, την περιβαλλοντική ανάλυση του σταδίου κατασκευής και τέλος την παραγωγή φυσικών αποτελεσμάτων. Η ανάπτυξη της αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής μεθόδου και πιο συγκεκριμένα της προτεινόμενης ρομποτικής διαδικασίας μέσα από την

χρήση του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού ως εργαλείου τελικής δράσης, εμπεριέχει κατασκευαστικές παραμέτρους και κριτήρια υλοποίησης των φυσικών αποτελεσμάτων τα οποία εξετάζονται σε σχεδιαστικό επίπεδο. Στόχος είναι όλα τα τμήματα της έρευνας να διερευνούνται ξεχωριστά, εξάγοντας ποσοτικά αποτελέσματα τα οποία επιτρέπουν την συνολική αξιολόγηση των επιλεγμένων σχεδιαστικών λύσεων, τη συγκριτική αποτίμηση τους αλλά και τη δυνατότητα κατασκευής αντίστοιχων φυσικών πρωτοτύπων.

Συγκεκριμένα, τα ψηφιακά αποτελέσματα σχεδιασμού και περιβαλλοντικής ανάλυσης διερευνώνται ανεξάρτητα και συνολικά επιλέγονται οι κατάλληλες δομές για κατασκευή. Επιπλέον, λόγω της αλληλένδετης σχέσης των ψηφιακών αποτελεσμάτων με τις παραμέτρους και τις δυνατότητες του εργαλείου τελικής δράσης, οι παραγόμενες δομές αξιολογούνται και συγκρίνονται με βάση συγκεκριμένες σχεδιαστικές αποφάσεις. Τέλος, μέσα από την παραγωγή των φυσικών πρωτοτύπων, στόχος είναι η συνολική αξιολόγηση της μεθοδολογίας αλλά και των επιμέρους αποτελεσμάτων όπως είναι η ακρίβεια στην κατασκευή των φυσικών πρωτοτύπων, το κόστος αλλά και ο χρόνος που χρειάζεται για την κατασκευή τους. Σημαντική είναι και η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με αυτά που προκύπτουν από μια συμβατική διαδικασία παραγωγής εξατομικευμένων δομοστοιχείων ώστε να υπάρξει σύγκριση τους και εξαγωγή γενικών συμπερασμάτων. Μέσα από αυτή τη διαδικασία επιδιώκεται η εξακρίβωση της δυνατότητας υλοποίησης της προτεινόμενης ιδέας (proof of concept), για παραγωγή εξατομικευμένων μοναδιαίων στοιχείων με τη χρήση του συγκεκριμένου ευέλικτου καλουπιού.



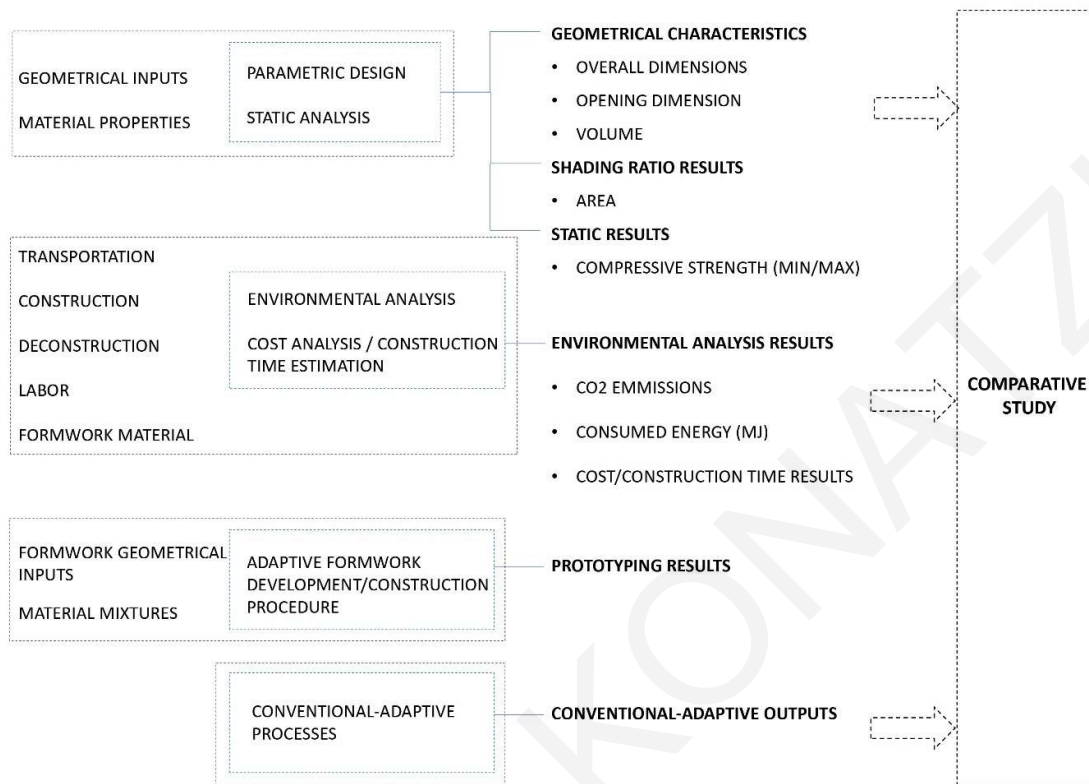
Εικόνα 26: Γενικό διάγραμμα προτεινόμενης μεθοδολογίας έρευνας το οποίο εμπεριέχει τη συμβατική και την αυτοματοποιημένη διαδικασία κατασκευής

Στο διάγραμμα που ακολουθεί [εικ.27] παρουσιάζονται αναλυτικά τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας έρευνας με συνοπτική παρουσίαση των παραμέτρων και κριτηρίων τα οποία εμπεριέχονται στις εκάστοτε διερευνήσεις. Στη φάση του παραμετρικού σχεδιασμού, εισάγονται σχεδιαστικές παράμετροι, όπως το είδος και το μέγεθος των ανοιγμάτων των δομοστοιχείων. Επιπρόσθετα, ελέγχεται η απόδοση σκίασης τους μέσα από την μέθοδο υπολογισμού του εμβαδού φωτοσκίασης (shading ratio) που προκύπτει από το άνοιγμα του κάθε δομοστοιχείου. Ακόμα, στο ίδιο τμήμα της σχεδιαστικής διαδικασίας ελέγχεται η στατική επάρκεια των δομοστοιχείων, μέσω της στατικής ανάλυσης (θλιπτικής αντοχής) των λύσεων με τη χρήση του προγράμματος ABAQUS [17]. Ακολουθεί το στάδιο αξιολόγησης της περιβαλλοντικής απόδοσης των τελικών προϊόντων μέσω της ανάλυσης του κύκλου ζωής LCA (οικολογικό αποτύπωμα) τους με τη χρήση του προγράμματος One Click LCA [12] και της ανάλυσης του κόστους και του χρόνου κατασκευής τους. Όλες οι επιμέρους διερευνήσεις εφαρμόζονται για τρία διαφορετικά υλικά, τον ωμόπλινθο, τον πηλό με τσιμέντο και το σκυρόδεμα, ώστε να υπάρχει σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την επιλογή του υλικού, το οποίο είναι φιλικότερο προς το περιβάλλον αλλά και των πλεονεκτημάτων ή μειονεκτημάτων που αυτή η επιλογή μπορεί να προσφέρει.

Στην παρούσα μελέτη, η αυτοματοποίηση παίζει σημαντικό ρόλο τόσο στη διαδικασία σχεδιασμού όσο και στη διαδικασία παραγωγής των δομοστοιχείων. Στόχος είναι η παραγωγή φυσικών πρωτοτύπων με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο διερευνάται σε πειραματικό επίπεδο η αυτοματοποιημένη διαδικασία παραγωγής, οι οποία εμπεριέχει την ανάπτυξη του αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης πάνω σε ρομποτικό βραχίονα. Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός αυτοσχέδιου ευέλικτου κινητικού καλουπιού, το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται στις εκάστοτε μορφολογίες των προτεινόμενων δομοστοιχείων με βάση προκαθορισμένες σχεδιαστικές αποφάσεις, για την επιτυχή παραγωγή των προτεινόμενων δομών. Επιλέγεται η μέθοδος του ευέλικτου καλουπιού σε κλίμακα παραγωγής τούβλου λόγω της δυνατότητας τυποποίησης, πρακτικότητας στην παραγωγή και κατασκευής σε ελάχιστο χρόνο και με το ελάχιστο κόστος. Επίσης, λόγω της ευελιξίας στην παραγωγή πολλαπλών εξατομικευμένων δομοστοιχείων που ικανοποιούν πολλά σχεδιαστικά σενάρια. Ο προγραμματισμός του κινητικού μηχανισμού και η προσαρμογή του στο ρομποτικό βραχίονα απαιτεί τη σύνδεση του με πλατφόρμες ελέγχου όπως το λογισμικό Firefly (plug-in for Grasshopper) [18] καθώς και προγραμματισμό της ρομποτικής διαδικασίας ελέγχου μέσω ψηφιακής προσομοίωσης στο λογισμικό TACO ABB (plug-in for Grasshopper) [19].

Σε επίπεδο φυσικής πειραματικής διερεύνησης, η προτεινόμενη μεθοδολογία προτείνει την μορφοποίηση των επιλεγμένων σχεδιαστικών λύσεων με τη χρήση των τριών δομικών υλικών που αναφέρθηκαν πιο πάνω. Αυτό προϋποθέτει διερεύνηση των ιδιοτήτων του κάθε υλικού ώστε να επιλεγεί η καταλληλότερη σύσταση με χαρακτηριστικά ταχείας πήξης, σύζευξης αλλά και οικολογικής συμπεριφοράς. Επίσης, εξετάζονται οι δυνατότητες ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης τους. Η ανάπτυξη πολλαπλών μορφολογιών βασίζεται στη δυνατότητα του κινητικού καλουπιού να μετασχηματίζεται με βάση προκαθορισμένες γεωμετρίες, βελτιστοποιώντας και μειώνοντας το κόστος χρήσης υλικών για την κατασκευή καλουπιών σε διαφορετικές μορφές. Επιπλέον, διερευνάται ο χρόνος που χρειάζεται η διαδικασία για την παραγωγή των δομοστοιχείων, ο χρόνος ωρίμανσης του δομικού υλικού αλλά και ο χρόνος αφαίρεσης του καλουπιού.

Στο τελικό στάδιο γίνεται ταυτόχρονη σύγκριση των ψηφιακών παραμετρικών αποτελεσμάτων, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την περιβαλλοντική ανάλυση, την ανάλυση κόστους και χρόνου παραγωγής μαζί με τα αποτελέσματα που προκύπτουν κατά τη διαδικασία φυσικής παραγωγής τους σε πραγματικό περιβάλλον, και συγκρίνονται με δεδομένα που προκύπτουν μέσα από εξέταση της αντίστοιχης συμβατικής διαδικασίας παραγωγής τους. Τα ποσοτικά σχεδιαστικά αποτελέσματα συσχετίζονται και αξιολογούνται ώστε να ικανοποιούν τα κριτήρια της μέγιστης θλιπτικής αντοχής, της ελάχιστης χρήσης υλικού, του ελάχιστου οικολογικού αποτυπώματος στον κύκλο ζωής τους και της μείωσης του κόστους κατασκευής τους. Τέλος, τα ψηφιακά σχεδιαστικά αποτελέσματα συγκρίνονται και αξιολογούνται με τα φυσικά παραγόμενα πρωτότυπα, περισσότερο όσον αφορά τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους. Αυτό προσφέρει τη δυνατότητα εξαγωγής συμπερασμάτων όσον αφορά την ακρίβεια του προτεινόμενου μηχανισμού να εφαρμόζεται στη φυσική παραγωγή αντίστοιχων δομών και κατ' επέκταση να χρησιμοποιείται για την κατασκευή οποιουδήποτε χυτού δομοστοιχείου με παρόμοια γεωμετρικά χαρακτηριστικά [εικ.27].



Εικόνα 27: Ενσωμάτωση παραμέτρων και κριτηρίων καθώς και συγκριτική διερεύνηση των αποτελεσμάτων στο προτεινόμενο διάγραμμα μεθοδολογίας της έρευνας

3.3 Συμπεράσματα

Μέσα από τις επιμέρους διερευνήσεις, η προτεινόμενη μεθοδολογία έρευνας στοχεύει στην εξαγωγή αποτελεσμάτων και συσχέτιση αλλά και σύγκριση τους, τόσο σε ψηφιακό όσο και σε φυσικό περιβάλλον ώστε να αξιολογηθούν και να επιλεγούν περιπτώσεις δομοστοιχείων που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν στο σχεδιασμό τοιχοποιιών με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Τα ποσοτικά αποτελέσματα αναλύονται, αξιολογούνται και τροφοδοτούν τη ρομποτική διαδικασία ώστε να είναι εφικτή η παραγωγή πολλαπλών φυσικών πρωτοτύπων με βάση τη λειτουργική και στατική επάρκεια, τη βελτιστοποίηση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς, του κόστους και του χρόνου παραγωγής τους. Επιπλέον, η μεθοδολογία έχει τη δυνατότητα εφαρμογής της σε παραδείγματα όπου γίνεται χρήση άλλων υλικών ή τυπολογιών στην κλίμακα του τούβλου. Συνολικά, αξιολογείται η προτεινόμενη διαδικασία μέσα από τα αποτελέσματα των επιμέρους αναλύσεων και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα ως προς τη λειτουργικότητα και τη βιωσιμότητα της.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

4.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο διερευνώνται οι πιθανές σχεδιαστικές τυπολογίες δομοστοιχείων μέσα από τον καθορισμό σχεδιαστικών και κατασκευαστικών παραμέτρων και με βάση τη χρήση ενός προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού για τη φυσική υλοποίησή τους. Επίσης, εξετάζεται η δυνατότητα σύνθεσης τους για τη δημιουργία τοιχοποιιών. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται σε σχεδιαστικό επίπεδο ελέγχονται μέσα από την ανάλυση του εμβαδού φωτοσκίασης και στατικής συμπεριφοράς (θλιπτική αντοχή) των τυπολογιών των δομοστοιχείων προς διερεύνηση.

4.2 Εισαγωγή στη διερεύνηση πιθανών τυπολογιών δομοστοιχείων

Η διερεύνηση επικεντρώνεται σε μοναδιαία στοιχεία, τα οποία θα μπορούσαν να χρησιμοποιούνται για την κατασκευή τοιχοποιιών σε ημι-υπαίθριους χώρους με σκοπό να τους προστατεύουν και να λειτουργούν ως φίλτρα για την σκίαση-φωτισμό αλλά και το φυσικό αερισμό τους. Τέτοια παραδείγματα εμφανίζονται σε κτίρια που κτίστηκαν κατά την περίοδο του μοντερνισμού. Είχαν χρησιμοποιηθεί ως ελαφρά διάτρητα διαφράγματα, που κατασκευάζονταν στο εργοτάξιο και τοποθετούνταν στα κτίρια για την προστασία τους από την ηλιακή ακτινοβολία, κυρίως σε νότιους εξώστες. Αυτού του είδους φίλτρα είχαν τη δυνατότητα να περιορίζουν τη θεα στο εσωτερικό των κτιρίων και ταυτόχρονα αποτελούσαν το χαρακτηριστικό μορφολογικό στοιχείο της κατασκευής, όπως για παράδειγμα στην πολυκατοικία του Ν. Βαλσαμάκη στη Λεωφόρο Κηφισίας [20] [εικ.28a]. Επίσης, διάτρητες τοιχοποιίες παρατηρούνται σε σύγχρονα κτίρια. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνεται προσπάθεια επαναπροσδιορισμού της γεωμετρίας του τούβλου με τρόπο που να εξυπηρετούνται οι ανάγκες του κτιρίου σε αερισμό ή σε ηλιασμό (Sumart Diseño y Arquitectura SAS) [21] [εικ.28b] ή να δημιουργούν νέες διατάξεις ανοιγμάτων με τη χρήση συμβατικών τούβλων μέσα από τη λογική κατασκευής προκατασκευασμένων τμημάτων τοιχοποιίας εκτός εργοταξίου (Gallery of winery Gantenbein) [22] [εικ.28c].



Εικόνα 28: a. Πολυκατοικία Ν.Βαλσαμάκη [20], b. Τοιχοποιία Sumart Diseño y Arquitectura SAS [21], c. Gallery of winery Gantenbein [22]

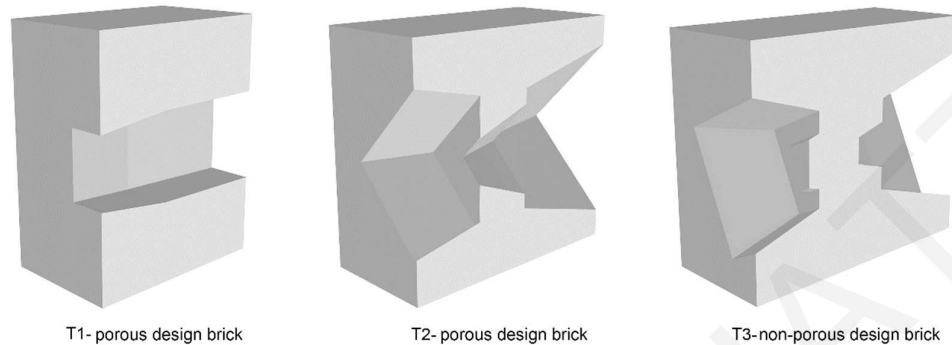
Μέσα από τη βιβλιογραφία φαίνεται το εύρος χρήσης συμβατικών μοναδιαίων στοιχείων (κλίμακα τούβλου) λόγω της πρακτικότητας και της μη χρονοβόρας δόμησης τους. Κατασκευαστικά όμως, συνδέονται με μεθόδους παραγωγής με μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Έτσι, επιλέγονται προς διερεύνηση τυπολογίες εξατομικευμένων μοναδιαίων στοιχείων, αφού προσφέρεται η δυνατότητα τυποποίησης αλλά και αυτοματοποίησης της κατασκευής τους και μπορούν να συνθέτουν τμήματα μικρής ή μεγάλης κλίμακας αρχιτεκτονημάτων.

Η αναζήτηση μιας αυτοματοποιημένης μεθόδου παραγωγής και αξιολόγησης με κριτήρια πρακτικότητας, τυποποίησης, εξατομικεύσεως, περιβαλλοντικού αντίκτυπου χρόνου και κόστους, μπορούν να τροφοδοτήσουν την έρευνα προς την ανάπτυξη εξατομικευμένων δομοστοιχείων με ελάχιστο υλικό και υλικά φιλικότερα προς το περιβάλλον. Η διαδικασία παραγωγής στην κλίμακα του τούβλου θα αναδείξει τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της διαδικασίας σε σύγκριση με συμβατικές μεθόδους παραγωγής εξατομικευμένων τούβλων. Σε μετέπειτα στάδιο θα μπορούσε να ελεγχθεί η πιθανή εφαρμογή της για την παραγωγή εξατομικευμένων δομικών στοιχείων σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Η παρούσα διερεύνηση εξετάζει περιπτώσεις τυπολογιών δομοστοιχείων με βασική γεωμετρία τον κύβο, είτε με πτυχώσεις ή με άνοιγμα στο κέντρο του ή συνδυασμό των δύο [εικ.29]. Οι πτυχώσεις και το άνοιγμα, εκτός από τη συνεισφορά τους σε ζητήματα φωτισμού και αερισμού, βοηθούν στην καλύτερη μορφοποίηση του τούβλου με στόχο την ελαχιστοποίηση του υλικού και την παραγωγή του μέσα από αυτοματοποιημένες διαδικασίες. Έτσι, ο σχεδιασμός τους λαμβάνει υπόψη παραμέτρους και περιορισμούς της προτεινόμενης διαδικασίας κατασκευής και συγκεκριμένα των δυνατοτήτων χρήσης του ευέλικτου καλουπιού, το οποίο μπορεί να παράγει πολλαπλές μορφολογίες με διαφοροποιήσεις ως προς το μέγεθος των πτυχώσεων ή των ανοιγμάτων.

Συγκεκριμένα, διερευνώνται τρεις κατηγορίες τυπολογιών τούβλων, των οποίων τα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον πίνακα 3. Στην πρώτη κατηγορία τούβλων με ανοίγματα υπάρχει η μεγαλύτερη αφαίρεση υλικού, στη δεύτερη κατηγορία τούβλων με ανοίγματα υπάρχει μικρή αφαίρεση υλικού και στην τρίτη κατηγορία τυπολογιών τούβλων χωρίς ανοίγματα υπάρχει αφαίρεση υλικού με τη δημιουργία πτυχώσεων. Με σκοπό τον έλεγχο του βαθμού φωτοσκίασης και της στατικής συμπεριφοράς τους ορίζεται ελάχιστο και μέγιστο μέγεθος πτυχώσεων ή ανοιγμάτων. Επίσης, καθορίζεται γωνία περιστροφής των πτυχώσεων ή του ανοίγματος σε κάθε μονάδα τούβλου. Στον πίνακα [πιν.3] φαίνονται οι κατηγορίες τυπολογιών τούβλων και τα όρια της εναλλαγής τους. Η περιστροφή των

πτυχώσεων και των ανοιγμάτων ορίζεται σε συγκεκριμένες κλίσεις 0° , 15° , 25° , 45° κάθετα στο επίπεδο του δομοστοιχείου. Μέσω ψηφιακού παραμετρικού σχεδιασμού διερευνάται ένας αριθμός από τυπολογίες για την κάθε κατηγορία [πιν.3].



Εικόνα 29: Χαρακτηριστικές τυπολογίες τούβλων (T1, T2 και T3) σε τομή, με πτυχώσεις και ανοίγματα

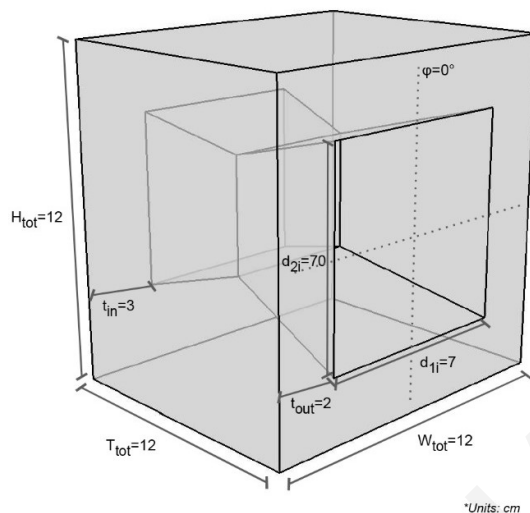
| Κατηγορία τυπολογιών T1 και T2 | Κατηγορία τυπολογιών T3 |
|--|--|
| Μεγάλο άνοιγμα/μικρό άνοιγμα (max /min) | Μέγιστος όγκος/ελάχιστος όγκος (max /min) |
| Πορώδες (επιμήκυνση 0cm-3cm) | Μη πορώδες (επιμήκυνση 0cm-2cm) |
| Περιστροφή $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$ | Περιστροφή $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$ |

Πίνακας 3: Γεωμετρικά όρια τυπολογιών τούβλων που συσχετίζονται με εναλλακτικές ενεργοποιήσεις του ευέλικτου καλουπιού

4.3 Παραμετρική διερεύνηση γεωμετρίας δομοστοιχείου

Τα γεωμετρικά όρια των δομοστοιχείων διερευνώνται σε ψηφιακό παραμετρικό περιβάλλον, λαμβάνοντας υπόψη τα κριτήρια που διέπουν οπές με βάση τον Ευροκώδικα 6 (EN:1996-1-1, 2005) [23], τον προσανατολισμό της τοιχοποιίας και το σχεδιασμό του εργαλείου τελικής δράσης και πιο συγκεκριμένα τους περιορισμούς και τις δυνατότητες του ευέλικτου καλουπιού.

Σύμφωνα με τις γεωμετρικές απαιτήσεις λιθοσωμάτων στον Ευροκώδικα 6 (EN:1996-1-1, 2005) [23], για λιθοσώματα με οριζόντιες οπές ο συνολικός όγκος όλων των κενών πρέπει να είναι 25-50 %. Επίσης, ο όγκος ενός μεμονωμένου κενού πρέπει να είναι μικρότερος από το 25% του όγκου του τοιχοσώματος. Τέλος, το ελάχιστο πάχος μέσα και γύρω από τις οπές πρέπει να είναι $t_{in}=0.6$ cm στο τοίχωμα και 0.8 cm στο κέλυφος. Σύμφωνα με τον αντισεισμικό κανονισμό (Ευροκώδικα 8 [24]), το ενεργό πάχος της τοιχοποιίας, και συνεπώς του λιθοσώματος, πρέπει να είναι ≥ 24 cm. Επιπλέον, ο λόγος μεταξύ του συνολικού ενεργού ύψους της τοιχοποιίας (H_{tot}) και του ενεργού πάχους (t_{tot}) της τοιχοποιίας πρέπει να είναι $H_{tot} / t_{tot} \leq 12$. Σύμφωνα με όλα τα πιο πάνω αποφασίζεται ότι η προτεινόμενη γεωμετρία θα έχει μέγιστες εξωτερικές διαστάσεις $12 \times 12 \times 12$ cm³ και μέγιστη διάσταση ορθογώνιου ανοίγματος 7×7 cm² [εικ.30].



Εικόνα 30: Δομοστοιχείο και διαστάσεις γεωμετρικών ορίων

Για τον έλεγχο της γεωμετρίας και τη διερεύνηση των δυνατοτήτων του δομοστοιχείου, προτείνεται προσομοίωση σε ψηφιακό περιβάλλον για τον υπολογισμό του ηλιασμού και της σκίασης του. Έχοντας υπόψη το σχεδιαστικό σενάριο δημιουργίας μιας τοιχοποιίας που να εφαρμόζεται σε ημι-υπαίθριο χώρο, λαμβάνεται υπόψη ο προσανατολισμός Ανατολή-Δύση και Νότος για την διερεύνηση περιπτώσεων ηλιασμού και σκίασης του χώρου με τη χρήση κατάλληλων τυπολογιών. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται η τυπολογία δομοστοιχείου T1 για την εκτίμηση της δυνατότητας σκίασης του σε σχέση με τις γεωμετρικές παραμέτρους που έχουν εισαχθεί σε αυτή την περίπτωση. Στην περίπτωση της τυπολογίας T1 τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά ανοίγματος είναι διαστάσεων $7 \times 7 \text{ cm}^2$ και περιστροφής 0° , 15° , 25° και 45° . Για τον έλεγχο της σκίασης ορίζονται οι παράμετροι του προσανατολισμού, των εποχών του χειμώνα, του καλοκαιριού, του φθινοπώρου και της άνοιξης, και των ωρών της ημέρας 7.00 το πρωί μέχρι 18.00 το απόγευμα. Τα δομοστοιχεία εξετάζονται με βάση τις πιο κάτω παραμέτρους διερεύνησης (αναλυτικά αποτελέσματα βρίσκονται στο Παράρτημα 1):

- α) Ανατολή-Δύση, Καλοκαίρι (21/6), μοίρες περιστροφής $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$, ώρες ημέρας 7.00-18.00
- β) Ανατολή-Δύση, Χειμώνας (21/12), μοίρες περιστροφής $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$, ώρες ημέρας 7.00-18.00
- γ) Ανατολή-Δύση, Φθινόπωρο (20/9), μοίρες περιστροφής $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$, ώρες ημέρας 7.00-18.00
- δ) Ανατολή-Δύση, Άνοιξη (20/3), μοίρες περιστροφής $0^\circ, 15^\circ, 25^\circ, 45^\circ$, ώρες ημέρας 7.00-18.00

- ε) Νότος, Καλοκαίρι (21/6), μοίρες περιστροφής 0°,15°,25°,45°, ώρες ημέρας 7.00-18.00
 ζ) Νότος, Χειμώνας (21/12), μοίρες περιστροφής 0°,15°,25°,45°, ώρες ημέρας 7.00-18.00
 η) Νότος, Φθινόπωρο (20/9), μοίρες περιστροφής 0°,15°,25°,45°, ώρες ημέρας 7.00-18.00
 θ) Νότος, Άνοιξη (20/3), μοίρες περιστροφής 0°,15°,25°,45°, ώρες ημέρας 7.00-18.00

Έτσι, μέσα από τον έλεγχο των ποσοστών ηλιασμού και σκίασης σε κάθε δομοστοιχείο, εξάγονται σχεδιαστικά συμπεράσματα που αφορούν τη γεωμετρία αλλά και τη λειτουργία των τούβλων ως στοιχεία ηλιοπροστασίας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται έλεγχος των τιμών ηλιασμού που προκύπτουν σε κάθε μοντέλο δομοστοιχείου σε τρεις διαφορετικές ώρες της μέρας και σε περιπτώσεις πλήρους σκίασης. Ακόμα, εντοπίζονται οι μέγιστες τιμές ηλιασμού και σκίασης και γίνονται συγκρίσεις μεταξύ των περιπτώσεων περιστροφής του ανοίγματος για την ίδια ώρα της ημέρας [πιν.4 και 5].

Σε επίπεδο γεωμετρικής διερεύνησης ελέγχεται η πρόσπτωση του ήλιου στην επιφάνεια του τοίχου σε διαφορετικές περιόδους ώστε να ελεγχθεί αν η τυπολογία μπορεί να αποκόπτει ή να επιτρέπει τον άμεσο ηλιασμό. Με αυτό τον τρόπο μειώνεται η ανάγκη χρήσης επιπλέον μηχανισμών ηλιοπροστασίας. Τα ανοίγματα διαμορφώνονται από κεκλιμένα επίπεδα των οποίων η κλίση ρυθμίζεται με βάση τη κλίση των ακτινών του ήλιου στις τέσσερις εποχές του χρόνου ώστε να αποκόπτει ή να επιτρέπει τον ηλιασμό. Μέσα από τα ποσοτικά αποτελέσματα του ηλιασμού-σκίασης, η κλίση των κεκλιμένων επιφανειών του ανοίγματος ορίστηκε ικανοποιητική στις 12.77°.

| Προσανατολισμός | Φωτοσκίαση Μέγιστες τιμές | Ωρα | Περιστροφή ανοίγματος | Κλίση γωνίας ηλίου |
|-----------------------------|------------------------------|---------------|--------------------------|---------------------------------|
| Νότος (χειμώνας) | Μέγιστη έκθεση | 12.00 | 45° | 17.58° |
| Ανατολή-Δύση (καλοκαίρι) | Μέγιστη έκθεση | 18.00 | 0° | 12.77° |
| Ανατολή-Δύση (χειμώνας) | Μέγιστη έκθεση | 7.00 | 45° | 17.58° |
| Ανατολή-Δύση (άνοιξη) | Μέγιστη έκθεση | 7.00 17.00 | 25° 0°,15°,25° | 14.69° 12.77°,15.07°, 14.69° |
| Ανατολή-Δύση (φθινόπωρο) | Μέγιστη έκθεση | 17.00 | 0°,15°,25°,45° | 12.77°,15.07°, 14.69°,17.58° |

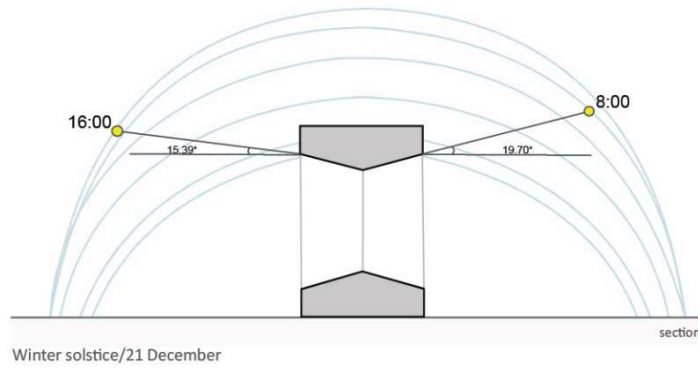
Πίνακας 4: Πίνακας περιπτώσεων με μέγιστη σκίαση σε αντιστοιχία με τις κλίσεις της επιφάνειας του ανοίγματος

| Προσανατολισμός | Φωτοσκίαση | Περιστροφή ανοίγματος | Κλίση γωνίας πτύχωσης ανοίγματος |
|--------------------------|----------------|-----------------------|----------------------------------|
| Νότος (χειμώνας) | Έκθεση | 9.00-15.00 | 15.39°-31.32° |
| Νότος (καλοκαίρι) | Μέγιστη έκθεση | 9.00-18.00 | |
| Νότος (άνοιξη) | Μέγιστη έκθεση | 9.00-18.00 | |
| Νότος (φθινόπωρο) | Μέγιστη έκθεση | 9.00-18.00 | |
| Ανατολή-Δύση (χειμώνας) | Έκθεση | 7.00-8.00/16.00 | <19.70°/<15.39° |
| Ανατολή-Δύση (καλοκαίρι) | Έκθεση | 7.00/8.00/16.00-18.00 | <51.80°/<47.06° |
| Ανατολή-Δύση (άνοιξη) | Έκθεση | 7.00-9.00/15.00-17.00 | <=36.59°/<34.53° |
| Ανατολή-Δύση (φθινόπωρο) | Έκθεση | 7.00-8.00/15.00-17.00 | <39.40°/<31.97° |

Πίνακας 5: Αποτελέσματα περιπτώσεων φωτοσκίασης σε αντιστοιχία με τις κλίσεις της επιφάνειας του ανοίγματος

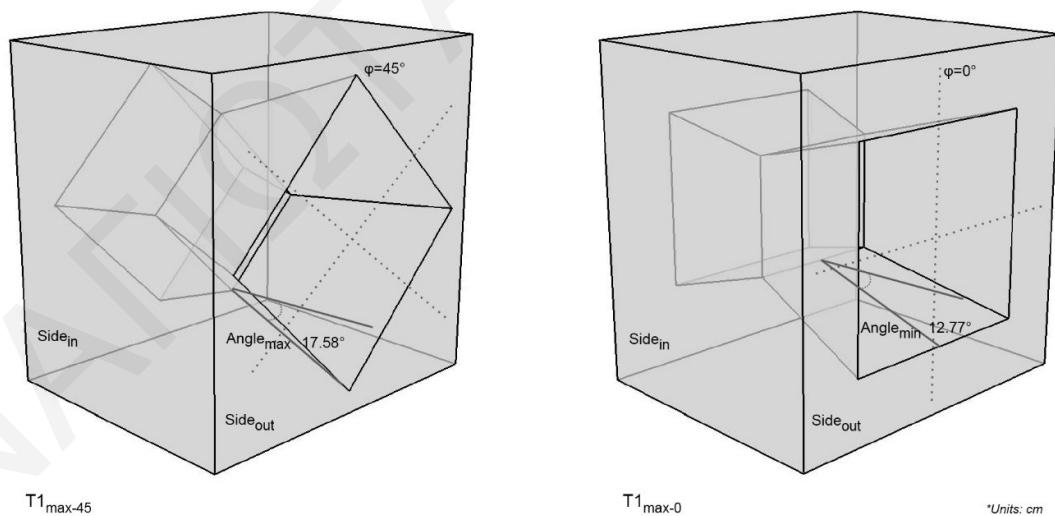
Πιο αναλυτικά, υπολογίζονται οι ποσοστιαίες τιμές του εμβαδού της φωτισμένης επιφάνειας που προκύπτει από το εξεταζόμενο άνοιγμα με βάση την αναλογία σκίασης (shading ratio) σύμφωνα με τους Cheng et al (2013). Αυτό, ορίζεται ως το ποσοστό της σκιασμένης περιοχής που επηρεάζεται από το προσπίπτον φως του ήλιου σε ανοιχτή ζώνη έως την περιοχή ανοίγματος για συγκεκριμένη ώρα. Στην παρούσα διερεύνηση ο υπολογισμός γίνεται μέσω των προγραμμάτων παραμετρικού σχεδιασμού Grasshopper [25], Ladybag [26] και Heliotrope [27], τα οποία προσφέρουν τη δυνατότητα αναπαράστασης της κίνησης του ήλιου με βάση τις κλιματολογικές συνθήκες της Κύπρου (αρχείο .erp μέσω του plug in EnergyPlus [28]). Με αυτό τον τρόπο, γίνεται η παραμετρική μοντελοποίηση του δομοστοιχείου σε μορφή πλέγματος (mesh) και προβάλλεται κάθετο επίπεδο παράλληλο με το άνοιγμα ώστε να υπολογίζεται η προκύπτουσα περιοχή σκίασης και ηλιασμού.

Σε λειτουργικό επίπεδο, το δομοστοιχείο της τυπολογίας T1 θα μπορούσε να ανταποκριθεί με τρόπο που να εξυπηρετεί την στρατηγική θέρμανσης και ψύξης των χώρων, λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά σκίασης και ηλιασμού. Επομένως, θα μπορούσε να λειτουργήσει με μεγάλα ανοίγματα σε νότιο προσανατολισμό και με μικρά ανοίγματα σε ανατολικό και δυτικό. Η περιστροφή του ανοίγματος στις περιπτώσεις ηλιασμού, αυξάνει ή μειώνει την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας στις διαφορετικές τυπολογίες τούβλων. Για τον ηλιασμό, σε όλες τις περιπτώσεις το εύρος κλίσης του ήλιου είναι από 15.39° μέχρι 51.80° [εικ.31].

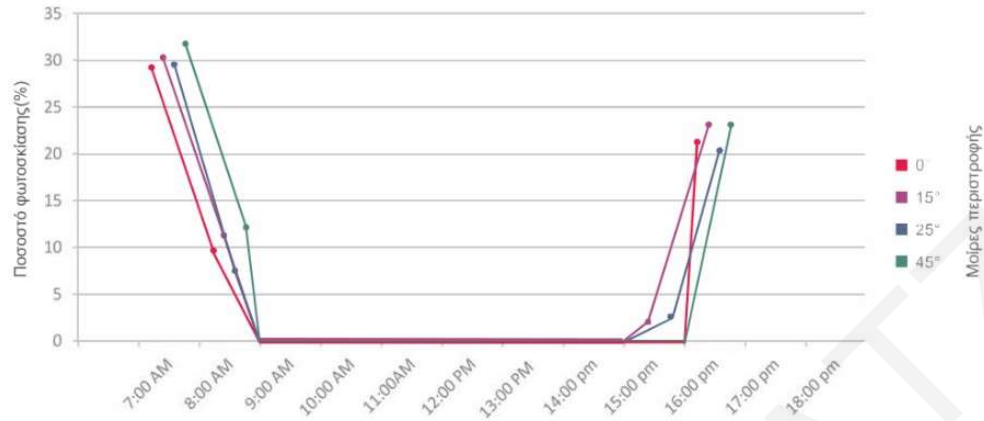


Εικόνα 31: Μέγιστη κλίση επιφάνειας ανοίγματος στην περίπτωση φωτοσκίασης κατά το χειμερινό ηλιοστάσιο

Η σύγκριση των πιο πάνω αποτελεσμάτων με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από δομοστοιχείο με ορθογωνικό άνοιγμα αποδεικνύει ότι, στην πρώτη περίπτωση, βάσει των ποσοτικών αποτελεσμάτων, επιτρέπεται ή αποτρέπεται ο ηλιασμός σε επιθυμητά επίπεδα τόσο το καλοκαίρι όσο και τον χειμώνα, ενώ στην δεύτερη περίπτωση του ορθογωνικού ανοίγματος παρουσιάζονται περιπτώσεις όπου το άνοιγμα αποτρέπει τον ηλιασμό κατά τη διάρκεια της χειμερινής περιόδου σε συγκεκριμένες ώρες. Για όλες τις περιπτώσεις ηλιασμού και με τις ίδιες παραμέτρους μεταβολής της γεωμετρίας τους, το ορθογωνικό άνοιγμα εμφανίζει τιμές εμβαδού ηλιασμού μεγαλύτερες κατά 5-10 % [εικ.32, 33 και 34] (Βλέπε Παράρτημα 1).

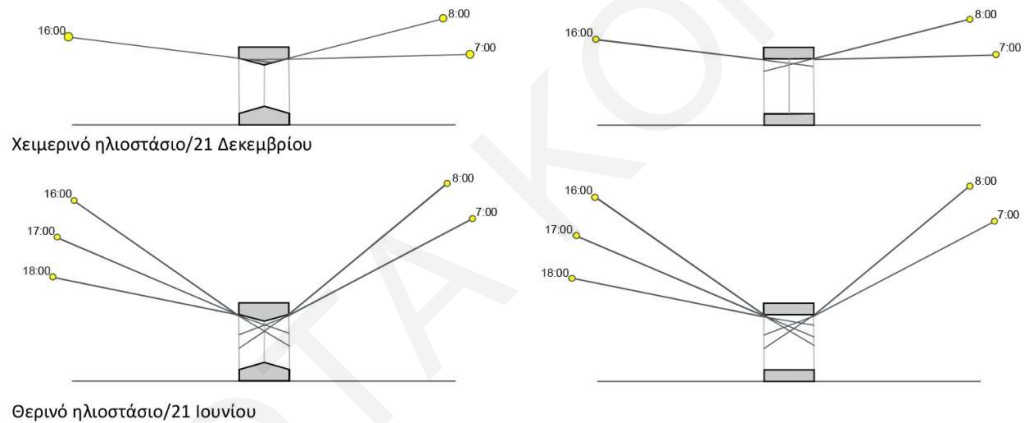


Εικόνα 32: Διαγράμματα γεωμετρικών ορίων με μέγιστη και ελάχιστη κλίση ανοίγματος για έλεγχο φωτοσκίασης



Εικόνα 33: Γραφικές παραστάσεις ποσοστού φωτοσύνθεσης κατά τη διάρκεια της ημέρας σε σχέση με τις περιπτώσεις περιστροφής του ανοίγματος

TOMH

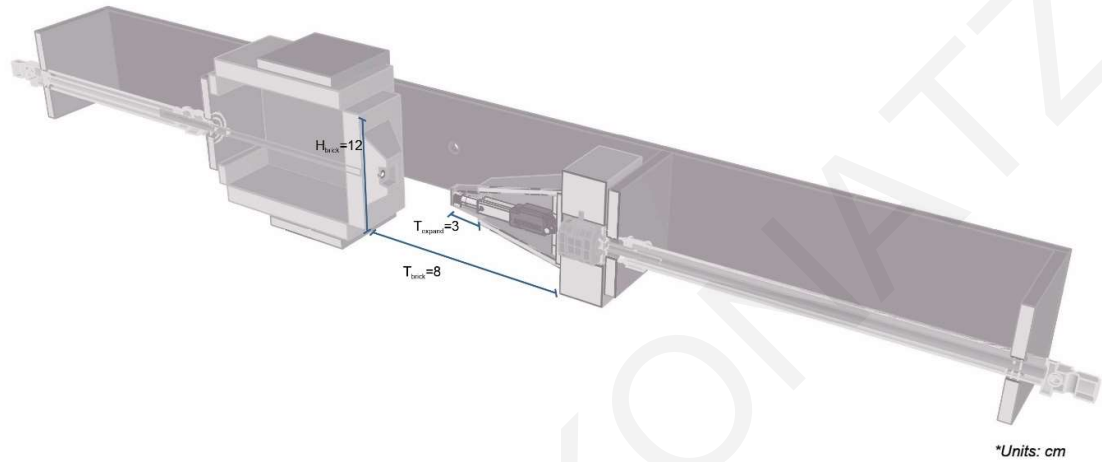


Εικόνα 34: Τομές δομοστοιχείου με πτυχώσεις και δομοστοιχείου χωρίς πτυχώσεις ως προς τη κλίση των ακτίνων του ήλιου κατά τις διαφορετικές ώρες της ημέρας σε ανατολικό-δυτικό προσανατολισμό

Επιπρόσθετα, ο καθορισμός της γεωμετρίας των δομοστοιχείων επηρεάζεται από τους περιορισμούς και τις δυνατότητες του ευέλικτου καλουπιού. Συγκεκριμένα, επηρεάζονται οι διαστάσεις του συνολικού πάχους του τούβλου αλλά και του μεγέθους της συμπίεσμένης επιφάνειας του υλικού ή του μεγέθους της οπής. Ο μηχανισμός μπορεί να ενεργοποιηθεί σε συγκεκριμένες τιμές δύναμης, όπως επίσης και ο γραμμικός ενεργοποιητής, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο του πάχους του τοιχοσώματος, και έχει μέγιστη επιμήκυνση $T_{\text{expand}}=3$ cm. Με βάση το σχεδιασμό του ευέλικτου καλουπιού, το πάχος του δομοστοιχείου κυμαίνεται από $T_{\text{max}}=5-8$ cm [εικ.35].

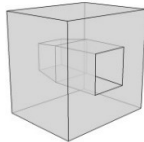
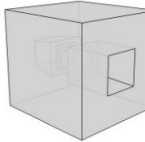
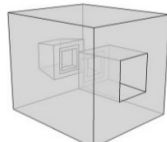
Επίσης, οι διαφοροποιήσεις της μορφής των τούβλων επηρεάζονται από τις δυνατότητες του ενσωματωμένου γραμμικού ενεργοποιητή και σχετίζονται με τη διαφοροποίηση του πάχους του στις επιμέρους περιπτώσεις, όπως επίσης και τις διαφορετικές διαστάσεις των πτυχώσεων ή των ανοιγμάτων [εικ.35]. Επιπλέον, η

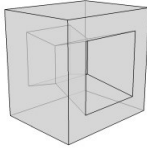
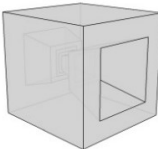
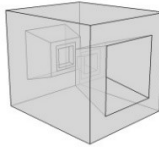
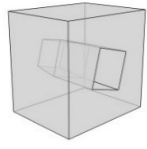
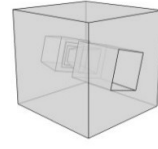
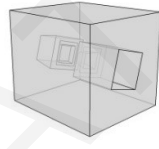
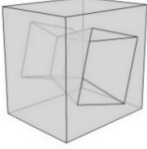
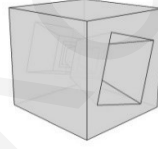
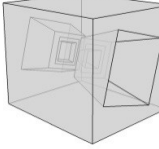
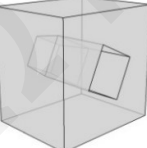
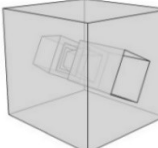
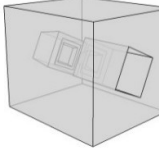
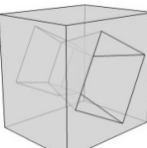
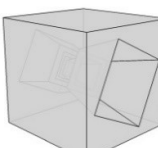
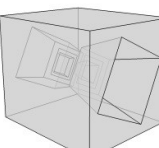
διαφορετικές κλίσεις των πτυχώσεων και του ανοίγματος ως προς τον κάθετο άξονα του δομοστοιχείου καθορίζονται μέσω του ενσωματωμένου περιστροφικού κινητήρα, ο οποίος ελέγχει την κλίση των τμημάτων του ευέλικτου καλουπιού. Στο Κεφάλαιο 5, όπου περιγράφεται η ανάπτυξη του εργαλείου τελικής δράσης, αναφέρονται πιο συγκεκριμένα οι πιθανές ενεργοποιήσεις και τα αποτελέσματα κατασκευής του κάθε δομοστοιχείου.

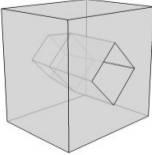
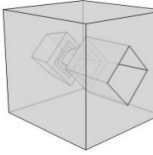
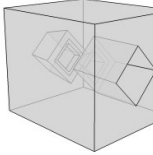
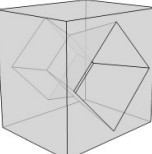
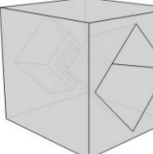
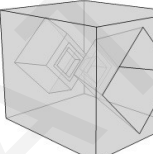


Εικόνα 35: Διαστάσεις μελών ευέλικτου καλουπιού

Έχοντας υπόψη τις πιο πάνω δυνατότητες και περιορισμούς διαμορφώνονται οι πιθανές τυπολογίες δομοστοιχείων, οι οποίες μπορούν να κατασκευαστούν. Οι μεταβλητές παράμετροι, οι οποίοι έχουν ενσωματωθεί στην διερεύνηση και στα μετέπειτα στάδια ανάπτυξης, είναι το πάχος του δομοστοιχείου, τα διαφορετικά μεγέθη ανοιγμάτων, το βάθος της πτύχωσης και η περιστροφή του ανοίγματος ή των πτυχώσεων. Μέσα από τον παραμετρικό αλγόριθμο ελέγχονται οι μεταβλητές και μελετώνται οι πιθανές τυπολογίες [πιν.6].

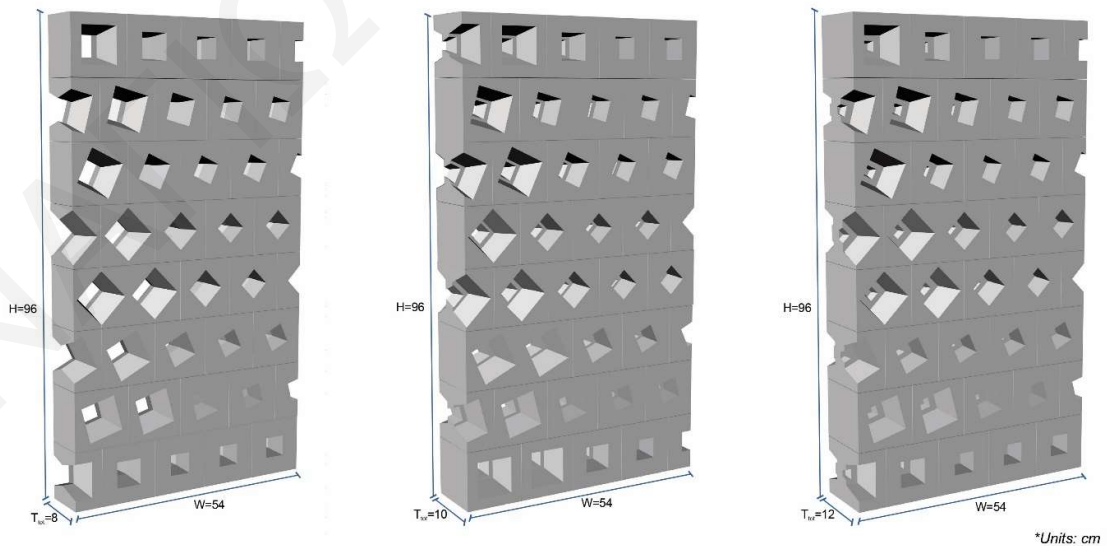
| TYOLOGIES | TYPOLOGY 1 (T1) | TYPOLOGY 2 (T2) | TYPOLOGY 3 (T3) |
|--|--|---|--|
| Type of opening | Porous | Porous | Non-porous |
| Minimum opening |  T1 _{min-0} |  T2 _{min-0} |  T3 _{min-0} |
| In / out dimensions (cm ²) | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 |
| Rotation angle (degrees) | 0 ⁰ | 0 ⁰ | 0 ⁰ |
| Volume (m ³) | 0.0012 | 0.0016 | 0.0018 |

| | | | |
|---|---|--|---|
| Maximum opening |  |  |  |
| | T1 _{max-0} | T2 _{max-0} | T3 _{max-0} |
| In / out dimensions(cm²) | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 |
| Rotation angle (degrees) | 0 ⁰ | 0 ⁰ | 0 ⁰ |
| Volume (m³) | 0.001 | 0.0014 | 0.0014 |
| Minimum opening |  |  |  |
| | T1 _{min-15} | T2 _{min-15} | T3 _{min-15} |
| In / out dimensions (cm²) | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 |
| Rotation angle (degrees) | 15 ⁰ | 15 ⁰ | 15 ⁰ |
| Volume (m³) | 0.0012 | 0.0016 | 0.0018 |
| Maximum opening |  |  |  |
| | T1 _{max-15} | T2 _{max-15} | T3 _{max-15} |
| In / out dimensions(cm²) | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 |
| Rotation angle (degrees) | 15 ⁰ | 15 ⁰ | 15 ⁰ |
| Volume (m³) | 0.001 | 0.0014 | 0.0014 |
| Minimum opening |  |  |  |
| | T1 _{min-25} | T2 _{min-25} | T3 _{min-25} |
| In / out dimensions (cm²) | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 |
| Rotation angle (degrees) | 25 ⁰ | 25 ⁰ | 25 ⁰ |
| Volume (m³) | 0.0012 | 0.0016 | 0.0018 |
| Maximum opening |  |  |  |
| | T1 _{max-25} | T2 _{max-25} | T3 _{max-25} |
| In / out dimensions(cm²) | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 |
| Rotation angle (degrees) | 25 ⁰ | 25 ⁰ | 25 ⁰ |
| Volume (m³) | 0.001 | 0.0014 | 0.0014 |

| | | | |
|--|---|--|---|
| Minimum opening |  T1 _{min-45} |  T2 _{min-45} |  T3 _{min-45} |
| In / out dimensions(cm²) | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 | 3 x 3 / 2 x 2 |
| Rotation angle (degrees) | 25° | 25° | 25° |
| Volume (m³) | 0.0012 | 0.0016 | 0.0018 |
| Maximum opening |  T1 _{max-45} |  T2 _{max-45} |  T3 _{max-45} |
| In / out dimensions(cm²) | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 | 4 x 4 / 7 x 7 |
| Rotation angle (degrees) | 45° | 45° | 45° |
| Volume (m³) | 0.001 | 0.0014 | 0.0014 |

Πίνακας 6: Τυπολογίες δομοστοιχείων μέσω παραμετρικής διερεύνησης

Έχοντας ως τελικό στόχο την κατασκευή μη συμβατικών τοιχοποιιών, τα παραγόμενα δομοστοιχεία μπορούν να τοποθετηθούν σε διαφορετικές διατάξεις ώστε να επιτυγχάνεται δόμηση των τοιχοσωμάτων με στατικά επαρκή τρόπο. Ένας πιθανός τρόπος δόμησης με βάση τη βέλτιστη θλιπτική συμπεριφορά αποτελεί η διαγώνια διάταξη, όπου τα τούβλα τοποθετούνται κατά σειρές και οι κάθετοι αρμοί διασταυρώνονται με τους οριζόντιους αρμούς [εικ.36].



Εικόνα 36: Τυπολογίες δομοστοιχείων σε διαγώνια διάταξη για την ανάπτυξη μη-συμβατικών τοιχοποιιών

4.4 Εισαγωγή στη στατική ανάλυση

Όπως προαναφέρθηκε, το δομικό στοιχείο διακρίνεται σε τρεις τύπους, με μεγάλο, με μικρό και χωρίς άνοιγμα. Το ευέλικτο καλούπι έχει τη δυνατότητα να παράγει δομικά στοιχεία των τριών πιο πάνω περιπτώσεων. Στην περίπτωση τετραγωνικού ανοίγματος, αυτό κυμαίνεται σε μέγεθος από $2 \times 2 \text{ cm}^2$ μέχρι $7 \times 7 \text{ cm}^2$. Στην περίπτωση απλής αφαίρεσης υλικού, αυτό γίνεται στις τρεις διαστάσεις του τούβλου με τη βοήθεια του ευέλικτου καλουπιού. Σε όλα τα παραγόμενα αποτελέσματα τα ανοίγματα έχουν τη δυνατότητα περιστροφής. Σε αυτό το τμήμα, γίνεται σε πρώτο στάδιο ο έλεγχος της στατικής συμπεριφοράς των τυπολογιών υπό την άσκηση ενός νεκρού κάθετου φορτίου. Έτσι, επιλέγονται περιπτώσεις τούβλων με ελάχιστο και με μέγιστο άνοιγμα και με περιστροφή των ανοιγμάτων σε 0° , 15° , 25° και 45° . Επίσης, χρησιμοποιούνται τρία διαφορετικά υλικά, ο ωμόπλινθος, ο πηλός με τσιμέντο και το σκυρόδεμα. Στη συνέχεια, υπολογίζεται η αντοχή των δομικών στοιχείων στην περίπτωση άσκησης επιπλέον φορτίων από δοκάρια και πλάκες, δηλαδή όταν αποτελούν τμήματα φέρουσας τοιχοποιίας. Οι στατικές αναλύσεις πραγματοποιούνται σε ψηφιακό περιβάλλον (Konatzii, 2019).

4.4.1 Είδη και χαρακτηριστικά τεχνητών δομοστοιχείων

Τεχνητά δομοστοιχεία είναι οι ωμόπλινθοι (χωματόπλιθες), οι οπτόπλινθοι (τούβλα) και οι τσιμεντόπλινθοι (τσιμεντόλιθοι). Έχοντας υπόψη τα ευρωπαϊκά πρότυπα σχετικά με τη χρήση και τις ιδιότητες τους, στην παρούσα διερεύνηση οι υλικές ιδιότητες των προτεινόμενων δομοστοιχείων συμπίπτουν με τις ιδιότητες των παραδειγμάτων από ωμόπλινθο και τσιμεντόλιθο.

Στην Κύπρο οι ωμόπλινθοι χρησιμοποιούνται σε ένα μικρό ποσοστό για λόγους πλήρωσης, αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις ως φέρουσα τοιχοποιία. Σε περιπτώσεις συμβατικής μεθόδου χρήσης τους, η κατασκευή τους γίνεται συνήθως στον τόπο του έργου. Το βασικό υλικό τους είναι άργιλος σε ποσοστό 30-40 % και κοινό χώμα, με πέτρες διαστάσεων μέχρι 30 mm σε ποσοστό 70-60 % αλλά και νερό. Για τη συνοχή του υλικού προστίθεται άχυρο μήκους 100-200 mm σε ποσότητα 7-10 kg/m^3 . Το μείγμα διαστρώνεται σε καλούπια χωρίς πυθμένα, διαστάσεων κενού περίπου $15 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$ και παραμένει στο περιβάλλον μέχρι να σταθεροποιηθεί. Η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή τους δεν υπερβαίνει το 1 MPa ενώ η χρήση τσιμέντου, γύψου ή άλλων σταθεροποιητικών μπορεί να την αυξήσουν μέχρι 5 MPa. Οι συνήθεις διαστάσεις των τούβλων χωρίς οπές είναι πλάτους 8-12 cm, μήκους 17-25 cm και πάχους 4-6 cm.

Στην παρούσα διερεύνηση υπολογίζεται η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή των δομοστοιχείων με υλικά το σκυρόδεμα, τον ωμόπλινθο και τον πηλό με τσιμέντο ώστε να επιβεβαιωθεί η στατική επάρκεια και συμπεριφορά τους. Συνήθως, τα τρία υλικά χρησιμοποιούνται για την παραγωγή συμβατικής μορφολόγησης τούβλων. Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ευρέως στο τομέα των κατασκευών λόγω της μεγάλης κατασκευαστικής του αντοχής, ενώ ο ωμόπλινθος και ο πηλός με την προσθήκη τσιμέντου διερευνώνται ως προς την στατική τους επάρκεια ώστε να τύχουν μεγαλύτερης χρήσης στις κατασκευές. Στην παρούσα έρευνα τα τρία υλικά με τις αντίστοιχες τυπολογίες εξατομικευμένων δομοστοιχείων εξετάζονται ως προς την στατική συμπεριφορά τους σε περιπτώσεις με ή χωρίς ανοίγματα και σε διαφορετικούς όγκους δομικού υλικού. Σε πρώτο στάδιο, ακολουθείται η μέθοδος υπολογισμού της θεωρητικής θλιπτικής αντοχής των παραγόμενων τούβλων σε συνδυασμό με την προσομοίωση της στατικής συμπεριφοράς τους στο λογισμικό ABAQUS CAE [17]. Αρχικά γίνεται γραμμική ανάλυση για κάθε τυπολογία τούβλου και στη συνέχεια μη γραμμική ανάλυση. Η διερεύνηση εξετάζει την αντοχή της διαφορετικής υλικότητας και τα όρια της γεωμετρίας του τούβλου σύμφωνα με το μέγεθος των ανοιγμάτων.

4.4.2 Γραμμική ανάλυση δομοστοιχείων

Στο πρώτο στάδιο διερεύνησης που αφορά τη γραμμική ανάλυση, το ασκούμενο φορτίο υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης $P=F/A$ [εξ.1], όπου P είναι το ιδιοφορτίο (N) των δομικών στοιχείων που ασκούν δύναμη F στα δομικά στοιχεία που βρίσκονται στην έδραση τυπικής τοιχοποιίας ύψους 3 μέτρων και A είναι το εμβαδό της επιφάνειας των ασκούμενων φορτίων. Το υπολογιζόμενο φορτίο πίεσης για τοιχοποιία από τούβλα ωμόπλινθου είναι 42,241.13 Pa, για τοιχοποιία από τούβλα από σκυρόδεμα 84.482.7 Pa και για τοιχοποιία από τούβλα πηλού με προσθήκη τσιμέντου 63,361.695 Pa. Βάσει των πειραμάτων που έχουν γίνει στο εργαστήριο, το σκυρόδεμα έχει το μεγαλύτερο βάρος από τα τρία υλικά διερεύνησης και για αυτό το λόγο στην περίπτωση του ασκείται και η μεγαλύτερη πίεση βάσει της εξίσωσης.

$$P(1 \text{ τούβλο}) = \frac{F}{A} = \frac{m \times g}{A} = \frac{1.5 \text{ kg} \times 9.8 \text{ m/s}^2}{0.0087 \text{ m}^2} = \frac{14.7 \text{ N}}{0.0087 \text{ m}^2} \quad (1)$$

$$P(25 \text{ τούβλα}) = \frac{14.7 \text{ N} \times 25}{0.0087 \text{ m}^2} = \frac{367.5 \text{ N}}{0.0087 \text{ m}^2} = 42241.37 \text{ Pa}$$

Για την ανάλυση έχει χρησιμοποιηθεί ένα τούβλο ως μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FE) που έχει τρία στοιχεία (C3D8) και 8 κόμβους. Το πλέγμα FE αποτελείται

από 5093 στοιχεία και λαμβάνεται υπόψη ως ένα απλό ισοτροπικό μοντέλο ελαστικού συστατικού υλικού. Αυτό βασίζεται στην θεωρία της πλαστικότητας των μεταλλικών στοιχείων και χρησιμοποιεί την τυπική επιφάνεια απόδοσης Mises.

- *Αριθμητική προσομοίωση τούβλων από ωμόπλινθο*

Για την προσομοίωση του τούβλου λαμβάνονται υπόψη οι παράμετροι που ορίζονται στο μοντέλο FE σύμφωνα με τα αποτελέσματα των Ilampas et al (2018). Συγκεκριμένα θεωρείται, πυκνότητα μάζας ($\rho = 1400 \text{ kg / m}^3$), αναλογία Poisson ($\nu = 0.3$) και συντελεστής Young ($300e^6$).

- *Αριθμητική προσομοίωση τούβλων από σκυρόδεμα*

Για την προσομοίωση τσιμεντόλιθου από σκυρόδεμα οι παράμετροι που ορίζονται στο μοντέλο FE είναι σύμφωνα με τον Eurocode 6 για σκυρόδεμα (EN:1996-1-1, 2005). Συγκεκριμένα, πυκνότητα μάζας ($\rho_a = 2565 \text{ kg / m}^3$) και αναλογία Poisson ($\nu = 0.175$). Επίσης, συντελεστής Young ($208e^8$), για εφελκυστική τάση $30e6$ και μέγιστη τιμή ανελαστικής περιοχής 0.0035. Για μέγιστη θλιπτική τάση $2 e^6$ και σημείο θραύσης 0.0001.

- *Αριθμητική προσομοίωση τούβλων από πηλό με τσιμέντο*

Για την προσομοίωση τούβλου από πηλό με τσιμέντο οι παράμετροι που ορίζονται στο μοντέλο FE έχουν αντληθεί από ερευνητικές εργασίες (Lorenzo and Bergado, 2006) και συγκεκριμένα η πυκνότητα μάζας ορίζεται σε $\rho_a = 1520 \text{ kg / m}^3$, η αναλογία Poisson = 0.4 και ο συντελεστής Young = $122e^6$.

| Υλικό | Mass Density(ρ) | Poisson ratio | Young's modulus | Yield stress | Inelastic strain | Yield stress | Cracking strain |
|-----------------------------|------------------------|---------------|-----------------|--------------|------------------|--------------|-----------------|
| Ωμόπλινθος | 1400 | 0.3 | $300e^6$ | $20 e^6$ | 0.04 | $2 e^6$ | 0.01 |
| Σκυρόδεμα χωρίς ενισχύσεις | 2565 | 0.175 | $208e^8$ | $30 e^6$ | 0.0035 | $2 e^6$ | 0.0001 |
| Πηλός με προσθήκη τσιμέντου | 1520 | 0.4 | $122e^6$ | $20 e^6$ | 0.04 | $2 e^6$ | 0.01 |

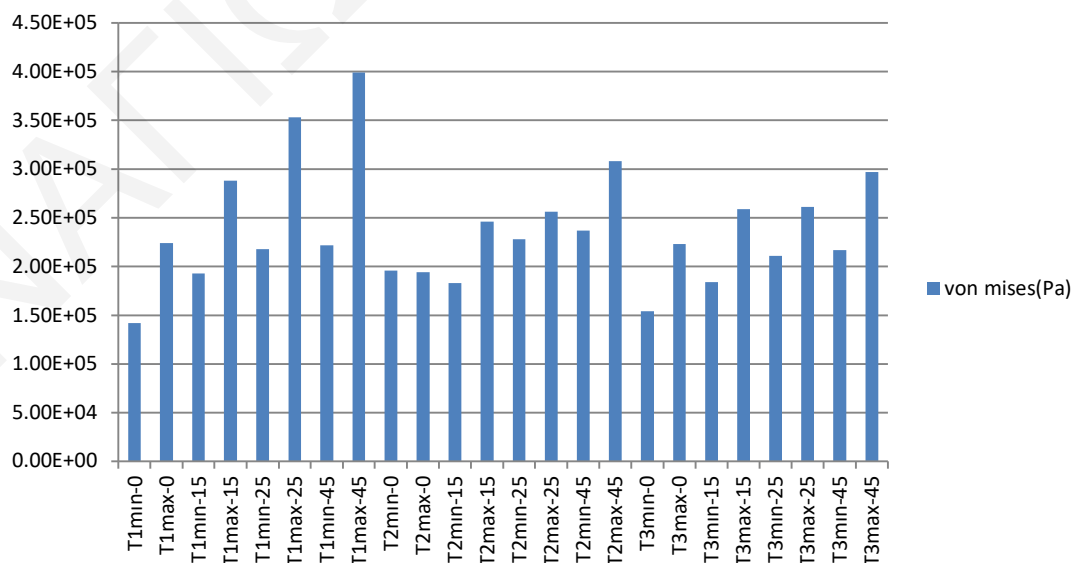
Πίνακας 7: Παράμετροι για την αριθμητική προσομοίωση τούβλων όσον αφορά τα τρία εξεταζόμενα υλικά

4.4.3 Αποτελέσματα γραμμικής ανάλυσης

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης επικεντρώνονται στις μέγιστες τιμές Von Mises, U22 και S22. Πιο αναλυτικά, το κριτήριο απόδοσης Von Mises υποδηλώνει ότι η απόδοση ενός όλκιμου υλικού αρχίζει όταν η δεύτερη αναλλοίωτη τάση φτάσει σε μια κρίσιμη τιμή. Είναι μέρος της θεωρίας πλαστικότητας που εφαρμόζεται καλύτερα σε όλκιμα υλικά. U22

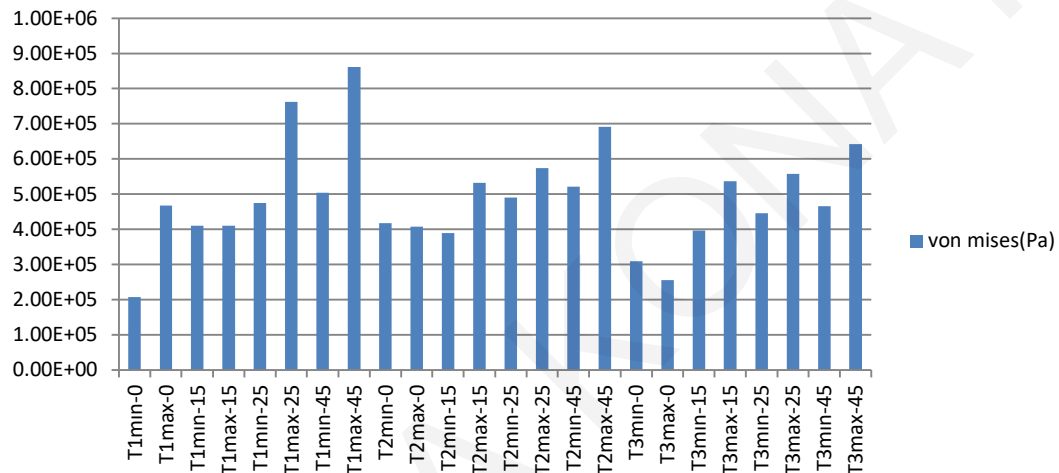
είναι η τιμή της μετατόπισης που προκαλείται στον άξονα z, κάθετα στο άνοιγμα του τούβλου, μετά από την άσκηση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου στο εμβαδό της πάνω επιφάνειας του τούβλου. Μετριέται σε χιλιοστά και ορίζεται μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή σύμφωνα με την υλικότητα του τούβλου. S22 είναι η τάση θλίψης που προκαλείται στον άξονα z, κάθετα στο άνοιγμα του τούβλου, μετά από την άσκηση ομοιόμορφα κατανεμημένου φορτίου στο εμβαδό της πάνω επιφάνειας του τούβλου. Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή μετρείται σε Pa και διαφοροποιείται με βάση την υλικότητα αλλά και το είδος και το ποσοστό των ανοιγμάτων του τούβλου. Η μετατόπιση και η τάση στον άξονα z κρίνονται ως οι πιο κρίσιμες τιμές επειδή δρουν παράλληλα στο φορτίο πίεσης και ορίζουν τα όρια ελαστικότητας-τάσης της γεωμετρίας τούβλων.

Για το υλικό του ωμόπλινθου και του σκυροδέματος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της γραμμικής στατικής ανάλυσης σε μορφή γραφικών παραστάσεων [Παράρτημα 2]. Σε αυτές δίνονται οι τιμές των Von Mises, της μετατόπισης και της τάσης σε σχέση με το μέγεθος του ανοίγματος και τις μοίρες περιστροφής του. Στην περίπτωση του ωμόπλινθου, μέσα από την γραφική παράσταση των Von Mises (Pa) σε συνάρτηση με τις τυπολογίες, παρατηρείται διαφορά μεγέθους των τιμών για τούβλα με μικρό άνοιγμα σε σχέση με τα τούβλα με μεγάλο άνοιγμα. Στην τυπολογία T1 η διαφορά των τιμών είναι περίπου διπλάσια, στην τυπολογία T3 είναι μικρότερη και για την τυπολογία T2 μικραίνει περισσότερο. Για τα τούβλα με μικρό άνοιγμα αλλά και για τα τούβλα με μεγάλο άνοιγμα, καθώς αυξάνονται οι μοίρες περιστροφής τους, αυξάνεται και η τιμή των Von Mises [εικ.37].



Εικόνα 37: Γραφικές παραστάσεις Von-Mises τυπολογιών T1, T2, T3 ωμόπλινθου

Σύμφωνα με την ανάλυση των αποτελεσμάτων, μεταξύ των υλικών του ωμόπλινθου και του σκυροδέματος προκύπτουν μεγαλύτερες τιμές στο σκυρόδεμα λόγω του μεγαλύτερου μέτρου ελαστικότητας του. Και στις δύο περιπτώσεις παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές για τάσεις στον άξονα z και για περιστροφή 15°. Επιπλέον, οι γεωμετρίες με το ελάχιστο άνοιγμα έχουν χαμηλότερες τιμές μετατόπισης. Επίσης, ψηλότερες τιμές μετατόπισης έχουν οι γεωμετρίες με την μεγαλύτερη τιμή περιστροφής. Σχετικά με τα αποτελέσματα της τάσης, στις περισσότερες περιπτώσεις των σεναρίων η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περιστροφή 15° του ανοίγματος [εικ.38].



Εικόνα 38: Γραφικές παραστάσεις Von-Mises τυπολογιών T1, T2, T3 σκυροδέματος

Συγκεκριμένα, μέσα από την ανάλυση τούβλων στην πρώτη φάση διερεύνησης, παρουσιάζονται τιμές τάσης και μετατόπισης κάτω από τις επιτρεπόμενες. Μεταξύ των μικρών και των μεγάλων ανοιγμάτων, η τιμή πίεσης (pressure) είναι περίπου δύο φορές μεγαλύτερη όσο και οι τιμές που προκύπτουν στους άξονες z.

Σε όλους τους τύπους που εξετάστηκαν παρατηρήθηκε ότι οι τάσεις Von Mises και οι τιμές μετατόπισης ήταν αυξημένες ανάλογα με το βαθμό περιστροφής του ανοίγματος. Επιπλέον, για τα τούβλα ωμόπλινθου στην τυπολογία T1 και T2, οι τιμές τάσης αυξάνονται στις 15° περιστροφής και στη συνέχεια μειώνονται σε 25° και 45° περιστροφής. Στο τυπολογία T3, η μέγιστη τιμή τάσης παρατηρείται στις 25° περιστροφής. Επίσης, στα μέγιστα ανοίγματα με 25° περιστροφή η τιμή τάσης των αξόνων z αυξάνεται έντονα.

4.5 Έλεγχος θλιπτικής αντοχής δομοστοιχείων

Γενικά, ο προσδιορισμός των μηχανικών ιδιοτήτων της τοιχοποιίας παρουσιάζει ασάφειες, λόγω του μη ομοιογενούς και ισότροπου υλικού και λόγω του ότι δεν είναι βιομηχανικό προϊόν με ελεγχόμενη και σταθερή ποιότητα. Οι κατασκευές τοιχοποιίας υπό τα συνήθη

φορτία (δηλαδή απουσία φορτίων λόγω σεισμού), κυρίως υπόκεινται σε θλίψη και για αυτό είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής της τοιχοποιίας, ως συνάρτηση της αντοχής των τοιχοσωμάτων και του είδους και της αντοχής του κονιάματος, δηλαδή των δύο συστατικών που την αποτελούν.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή είναι οι πιο κάτω:

- Τα χαρακτηριστικά των τοιχοσωμάτων, δηλαδή η αντοχή, ο τύπος και η γεωμετρία τους (συμπαγή ή διάτρητα, είδος και ποσοστό οπών, σχετικό ύψος) και η υδατο-απορροφητικότητα τους
- Τα χαρακτηριστικά του κονιάματος
- Οι συνθήκες που επικρατούν στην ίδια την τοιχοποιία, δηλαδή ο τρόπος εμπλοκής των τοιχοσωμάτων, η διεύθυνση φόρτισης, οι τοπικές αυξήσεις των τάσεων, ο τρόπος επιβολής του φορτίου (Καραντώνη, 2012)

Επίσης, τα αποτελέσματα των πειραμάτων για τον προσδιορισμό της επίδρασης των οπών στη θλιπτική αντοχή των τούβλων απόδειξαν ότι, για οπές με ποσοστό 20% της επιφάνειας και σε κυκλικό σχήμα, αυτές επηρεάζουν ελάχιστα τη θλιπτική αντοχή των τούβλων, σε αντίθεση με τις οπές ορθογωνικού σχήματος, οι οποίες την μειώνουν (West, 1970). Η μείωση αυτή είναι πιθανόν να οφείλεται στη συγκέντρωση τάσεων στις γωνίες των οπών, όχι μόνο στο στάδιο λειτουργίας, αλλά και στο στάδιο της παραγωγής των τούβλων. Παρόλα αυτά, η συγκέντρωση τάσεων παραμένει σε αποδεκτά όρια σε ορθογωνικές οπές με καλά στρογγυλεμένες γωνίες. Για ποσοστό οπών μεγαλύτερο από το επιτρεπτό, η αντοχή επηρεάζεται ανεξαρτήτως του είδους των οπών. Στη συνέχεια γίνεται έλεγχος της θλιπτικής συμπεριφοράς των μοντέλων μέσω μη γραμμικής ανάλυσης δομοστοιχείων, ώστε να διερευνηθεί η αντοχή τους υπό την άσκηση κατακόρυφων φορτίων.

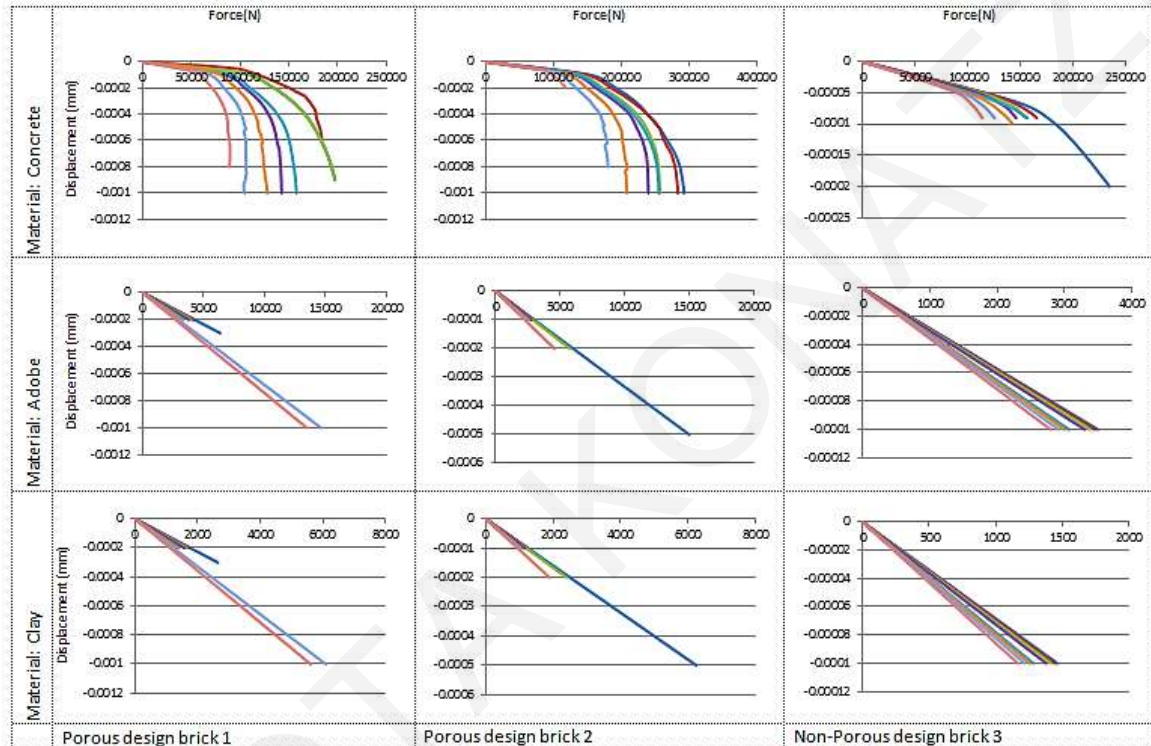
4.5.1 Μη γραμμική ανάλυση δομοστοιχείων

Για τη διερεύνηση της αντοχής του τούβλου ασκείται δύναμη μετατόπισης ομοιόμορφα κατανεμημένη στην πάνω επιφάνεια του. Με αυτό τον τρόπο εξάγονται τιμές μέγιστης δύναμης που μπορεί να ασκηθεί σε κάθε τούβλο μέχρι να ρηγματωθεί και συνθλιβεί. Έχοντας το φυσικό μοντέλο ενός δομοστοιχείου, σε μια εργαστηριακή πειραματική διαδικασία, μπορεί να ελεγχθεί η αντοχή του υποβάλλοντας το σε θλίψη μέσω της χρήσης των κατάλληλων οργάνων εργαστηρίου.

Αντίστοιχα, κατά τη ψηφιακή διαδικασία, το μοντέλο φορτίζεται σταδιακά με $50,000 \text{ N/m}^2$ σε όλες τις περιπτώσεις, ώστε να προκαλείται $0.001\text{-}0.0009 \text{ mm}$ μέγιστη μετατόπιση στο συνολικό ύψος του μοντέλου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε

γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης, από την οποία εξάγεται η μέγιστη δυνατή δύναμη που μπορεί να ασκείται σε κάθε τυπολογία. Η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή είναι το πηλίκο της μέγιστης δύναμης και του εμβαδού επιφάνειας άσκησης της δύναμης [εξ.2].

$$F_{bc} = \frac{F_{max}(N)}{A_{sum}(m^2)} \quad (2)$$



Εικόνα 39: Διαγράμματα Δύναμης-Μετατόπισης για τα τρία υλικά

Τα διαγράμματα δύναμης-μετατόπισης [εικ.39] προκύπτουν από το άθροισμα των σημειακών φορτίων που ασκούνται ομοιόμορφα στους κόμβους του πλέγματος της γεωμετρίας στο εμβαδό της πάνω επιφάνειας του τούβλου δια της μετατόπισης που προκύπτει σε ένα κεντρικό κόμβο στην ίδια επιφάνεια [εξ.3]. Έχοντας τις τιμές αυτές, από την ανάλυση των μοντέλων παράγονται τα διαγράμματα όπως φαίνονται στο πίνακα [εικ.39]. Σε κάθε διάγραμμα φαίνεται για κάθε σενάριο η γραφική παράσταση δύναμης-μετατόπισης για όλες τις περιπτώσεις, με μικρά και μεγάλα ανοίγματα και με περιστροφή 0°, 15°, 25°, 45°.

$$\frac{F}{U} = \frac{SumF(N)}{U_{centre}(m)} = \frac{F_1+F_2+F_3+F_n}{U_C} \quad (3)$$

Από κάθε γραφική παράσταση εξάγεται η μέγιστη δύναμη υπό θλίψη που δύναται να ασκηθεί στο μοντέλο. Διαιρώντας με το εμβαδό της επιφάνειας στην οποία ασκείται η

δύναμη, υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή του τούβλου. Θεωρητικά, στο σημείο άσκησης της μέγιστης δύναμης, το τούβλο συνθλίβεται και παύει η πλαστική του συμπεριφορά.

Για το σκυρόδεμα παρατηρείται καμπύλη γραφική παράσταση από το κέντρο των αξόνων ενώ για τον ωμόπλινθο και τον πηλό η μορφή των γραφικών είναι ευθεία από το κέντρο των αξόνων. Συμπεραίνεται ότι υπάρχει διαφορετική στατική συμπεριφορά για κάθε υλικό, με το σκυρόδεμα να έχει μεγαλύτερη αντοχή σε θλίψη και επομένως πλαστική συμπεριφορά, σε σύγκριση με τα άλλα δύο υλικά.

4.5.2 Αποτελέσματα χαρακτηριστικής αντοχής δομοστοιχείων υπό θλίψη

Για το σκυρόδεμα, η χαρακτηριστική μικρότερη τιμή θλιπτικής αντοχής του τούβλου είναι 10.241 MPa και η μέγιστη 34.537 MPa. Οι τιμές μέχρι 30 MPa βρίσκονται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια, επομένως όσα μοντέλα ξεπερνούν αυτά τα όρια είναι υπό διερεύνηση, ως προς τη μορφολογία τους και το συνολικό τους όγκο. Η μέγιστη τιμή καταγράφηκε στην περίπτωση T3_{min-15} (χωρίς άνοιγμα, 15° περιστροφή ανοίγματος). Σε όλες τις περιπτώσεις όπου τα ανοίγματα είναι μικρά, η τιμή της αντοχής τους είναι μεγαλύτερη σε σύγκριση με τις περιπτώσεις τούβλων με μεγάλα ανοίγματα. Επιπλέον, παρατηρείται σταδιακή μείωση των τιμών στα μοντέλα με μεγάλα ανοίγματα και με αυξημένες μοίρες περιστροφής του ανοίγματος τους [πιν.3 και 4].

Για την περίπτωση του ωμόπλινθου, η χαρακτηριστική ελάχιστη τιμή θλιπτικής αντοχής είναι 0.14 MPa και η μέγιστη τιμή 0.4 MPa. Βάσει του Ευροκώδικα 6 [23], όσες περιπτώσεις ξεπερνούν το 1 MPa δεν βρίσκονται σε επιτρεπτά όρια. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περίπτωση T3_{min-0} (μικρό άνοιγμα, 0° περιστροφή ανοίγματος). Η ελάχιστη τιμή παρατηρείται στην περίπτωση T1_{max-45} (μεγάλο άνοιγμα, 45° περιστροφή ανοίγματος). Επίσης, παρατηρούνται μικρότερες τιμές σε περιπτώσεις της τυπολογίας T1 από 0° μέχρι 45° περιστροφής των ανοιγμάτων, είτε αυτά είναι μικρά ή μεγάλα. Στην τυπολογία T2 παρατηρείται μείωση στις τιμές εκτός από τις μικρότερες τιμές αντοχής στα μεγάλα ανοίγματα σε σύγκριση με τα μικρά ανοίγματα. Στη τυπολογία T3 οι τιμές της θλιπτικής αντοχής μειώνονται σταδιακά, δηλαδή από τα μικρά ανοίγματα με αυξημένη περιστροφή στα μεγάλα ανοίγματα [πιν.8].

Στην περίπτωση διερεύνησης του πηλού με προσθήκη τσιμέντου, το εύρος των τιμών θλιπτικής αντοχής είναι από 0.11 MPa μέχρι 0.30 MPa. Ο κανόνας του Ευροκώδικα 6 [23] για ωμόπλινθο ισχύει και σε αυτή την περίπτωση, όπου επιτρέπεται τιμή της θλιπτικής αντοχής μέχρι 1 MPa. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην περίπτωση ανάλυσης της τυπολογίας T3_{min-0} (μικρή πτύχωση, χωρίς περιστροφή ανοίγματος) και η ελάχιστη τιμή

στην τυπολογία T1_{max-45} (μεγάλο άνοιγμα, 45° περιστροφή ανοίγματος) [εικ.40]. Στην περίπτωση της τυπολογίας T1 και ειδικά στις περιπτώσεις των μικρών ανοιγμάτων με σταδιακή περιστροφή παρατηρείται σταδιακή μείωση της τιμής της θλιπτικής αντοχής. Για την τυπολογία T2 δεν παρατηρείται κάποια σταθερή συμπεριφορά των μοντέλων υπό θλίψη βάσει των παραμέτρων του μεγέθους των ανοιγμάτων και της περιστροφής του. Για την τυπολογία T3 παρατηρείται μείωση στις τιμές καθώς αυξάνεται η περιστροφή των μικρών και των μεγάλων ανοιγμάτων [πιν.8].

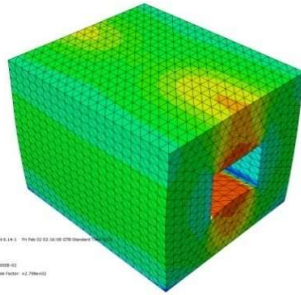
| Typology | T1_{min-0} | T1_{min-15} | T1_{min-25} | T1_{min-45} | T1_{max-0} | T1_{max-15} | T1_{max-25} | T1_{max-45} |
|----------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Volume | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.001 |
| Fbc(MPa) adobe | 0.221145 | 0.214687 | 0.206562 | 0.196345 | 0.175486 | 0.165208 | 0.152251 | 0.140023 |
| Fbc(MPa) clay | 0.183731 | 0.196927 | 0.189645 | 0.180355 | 0.142619 | 0.131585 | 0.126984 | 0.116928 |
| Fbc(MPa) concrete | 22.67835 | 21.12014 | 22.67835 | 16.38183 | 18.13673 | 14.69469 | 12.05922 | 10.24148 |
| Typology | T2_{min-0} | T2_{min-15} | T2_{min-25} | T2_{min-45} | T2_{max-0} | T2_{max-15} | T2_{max-25} | T2_{max-45} |
| Volume | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0016 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 |
| Fbc(MPa) adobe | 0.311979 | 0.338096 | 0.298958 | 0.319543 | 0.29438 | 0.285611 | 0.274389 | 0.235937 |
| Fbc(MPa) clay | 0.260349 | 0.255585 | 0.249375 | 0.241666 | 0.222205 | 0.215755 | 0.207411 | 0.194019 |
| Fbc(MPa) concrete | 33.63774 | 32.59106 | 29.55561 | 27.61348 | 29.3588 | 23.90717 | 20.72138 | 13.53386 |
| Typology | T3_{min-0} | T3_{min-15} | T3_{min-25} | T3_{min-45} | T3_{max-0} | T3_{max-15} | T3_{max-25} | T3_{max-45} |
| Volume | 0.0018 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 | 0.0014 |
| Fbc(MPa) adobe | 0.401764 | 0.396171 | 0.388932 | 0.379266 | 0.352348 | 0.344533 | 0.334373 | 0.321152 |
| Fbc(MPa) clay | 0.30419 | 0.299802 | 0.294163 | 0.28668 | 0.266634 | 0.260622 | 0.252818 | 0.242694 |
| Fbc(MPa) concrete | 24.48159 | 34.5376 | 32.46788 | 30.40821 | 16.3296 | 16.45944 | 14.43382 | 13.10095 |

Πίνακας 8: Τιμές χαρακτηριστικής θλιπτικής αντοχής των τριών υλικών προς διερεύνηση σε όλες τις τυπολογίες δομοστοιχείων

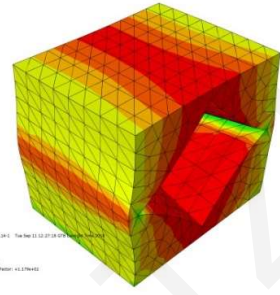
4.6 Συμπεράσματα

Τα παραμετρικά χαρακτηριστικά των δομοστοιχείων προς διερεύνηση ελέγχονται μέσα από την εξέταση των γεωμετρικών ορίων τους σε σχέση με τη δυνατότητα τους να προσφέρουν ηλιασμό και σκίαση, να παράγονται φυσικά μέσω των δυνατοτήτων και των περιορισμών του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού αλλά και τη στατική επάρκεια και τη θλιπτική αντοχή τους. Ο σχεδιαστικός παραμετρικός έλεγχος και τα ποσοτικά αποτελέσματα που προκύπτουν τροφοδοτούν τη διερεύνηση σε σχεδιαστικό επίπεδο προτού αυτή προχωρήσει σε επίπεδο φυσικής υλοποίησης και κατασκευής των δομοστοιχείων. Η γεωμετρική μορφολόγηση, μέσα από τις πτυχώσεις και τα ανοίγματα σε συγκεκριμένες κλίσεις και γωνίες περιστροφής αντίστοιχα, επιτρέπουν τη βελτίωση της απόδοσης των δομοστοιχείων όσον αφορά την λειτουργία τους ως μέσο σκίασης και ηλιασμού αλλά και όσον αφορά τη στατική τους επάρκεια και την παράλληλη ενσωμάτωση ανοιγμάτων στο εσωτερικό της δομής τους.

Concrete
S-S₂₂
diagram

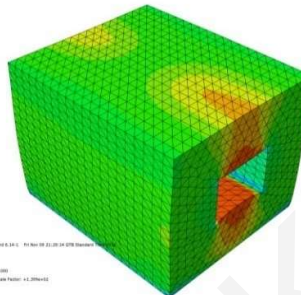


Maximum value compressive strength: T3_{min-15}

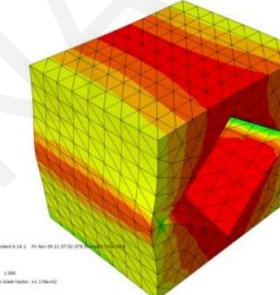


Minimum value compressive strength: T1_{max-45}

Adobe
S-S₂₂
diagram

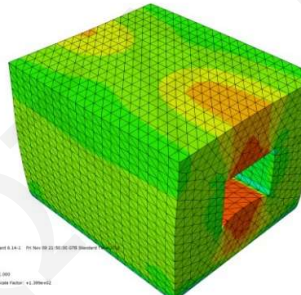


Maximum value compressive strength: T3_{min-0}

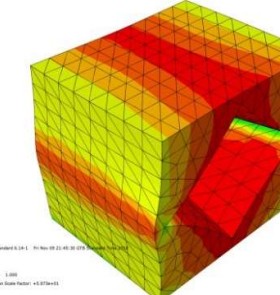


Minimum value compressive strength: T1_{max-45}

Clay
S-S₂₂
diagram



Maximum value compressive strength: T3_{min-0}



Minimum value compressive strength: T1_{max-45}

Εικόνα 40: Αποτελέσματα μέγιστης και ελάχιστης θλιπτικής αντοχής για σκυρόδεμα, ωμόπλιθο και πηλό

5 ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΥΕΛΙΚΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΙΟΥ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η λογική ανάπτυξης του ευέλικτου καλουπιού, το οποίο ενσωματώνεται στον ρομποτικό βραχίονα ως ειδικό εργαλείο τελικής δράσης και χρησιμοποιείται για την κατασκευή των δομοστοιχείων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο αναπτύσσεται το προτεινόμενο μοντέλο καλουπιού σε ψηφιακό περιβάλλον και παράγεται μια εκδοχή του σε φυσικό περιβάλλον για την κατασκευή πρωτοτύπων. Βάσει λογικού διαγράμματος καθορίζονται τα στάδια της κατασκευαστικής διαδικασίας και προσομοιώνεται η κινητική συμπεριφορά του ρομποτικού βραχίονα.

5.2 Αυτοματοποιημένη μέθοδος παραγωγής δομοστοιχείων

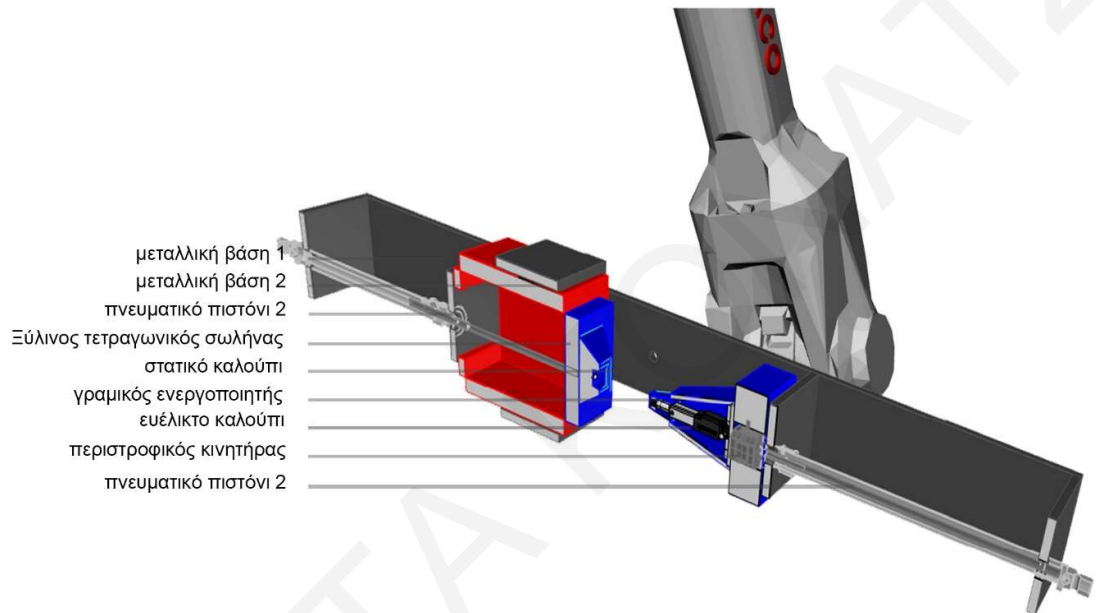
Το προτεινόμενο σενάριο αυτοματοποιημένης παραγωγής δομοστοιχείων αναφέρεται σε ένα ευέλικτο καλούπι, το οποίο προσαρμόζεται ως εργαλείο τελικής δράσης στο άκρο ρομποτικού βραχίονα. Επισημαίνεται ότι η συνεισφορά του ρομποτικού βραχίονα στη διαδικασία είναι καθαρά υποστηρικτική αφού το ευέλικτο καλούπι θα μπορούσε να λειτουργεί αυτόνομα με την προσθήκη επιπλέον αυτοματισμών. Ο μηχανισμός του ευέλικτου καλουπιού αποτελείται από ένα σύστημα πίεσης και ένα καλούπι, το οποίο έχει τη δυνατότητα να προσαρμόζεται σε πολλαπλές μορφολογήσεις δομοστοιχείων, παράγοντας κάθε φορά το επιθυμητό σχήμα, το οποίο καθορίζεται σχεδιαστικά. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η παραγωγή διαφορετικών τοιχοποιιών, κλειστές, πορώδεις ή σε συνδυασμό, με βάση συγκεκριμένα σχεδιαστικά σενάρια.

Η συνολική διαδικασία αυτοματοποιημένης παραγωγής των δομοστοιχείων αποτελείται από τρία στάδια: στάδιο συμπίεσης του υλικού, στάδιο ξεκαλουπώματος και στάδιο τοποθέτησης. Η διαδικασία, εκτός από το χώρο του εργαστηρίου, μπορεί να εκτελείται και στο χώρο του εργοταξίου, παράγοντας επί τόπου τα τούβλα. Κατά την παραγωγή των δομοστοιχείων γίνεται τοποθέτηση τους σε επίπεδη επιφάνεια, όπου παραμένουν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ώστε να σταθεροποιηθεί το υλικό και μετά μεταφέρονται σε ειδικό χώρο για το στάδιο της ωρίμανσης τους.

5.3 Περιγραφή αυτοματοποιημένου συστήματος

Το ευέλικτο σύστημα καλουπιού αποτελείται από δύο αυτοματοποιημένους μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός αναφέρεται στο στάδιο συμπίεσης του υλικού, το οποίο διεκπεραιώνεται με τη βοήθεια δύο πνευματικών πιστονιών, πιστόνι 1 και πιστόνι 2 με μήκος 20 cm και 30 cm αντίστοιχα. Στα άκρα των πιστονιών προσαρμόζονται εκατέρωθεν

τα δύο μέλη που απαρτίζουν το καλούπι [εικ.41]. Στο πιστόνι μήκους 20 cm εφαρμόζεται το στατικό καλούπι και στο πιστόνι μήκους 30 cm προσαρμόζεται το ευέλικτο καλούπι, το οποίο χρειάζεται μεγαλύτερο άνοιγμα κατά το στάδιο του ξεκαλουπώματος. Και τα δύο καλούπια προσαρμόζονται μεταξύ τους στην τελική τους θέση ώστε να παράγουν τούβλα με οπές διαφορετικού μεγέθους και πάχους. Το κινητικό μέλος του καλουπιού αποτελείται από δύο πτυσσόμενα κομμάτια. Συνολικά, μπορεί να αναπτύσσεται και να περιστρέφεται ώστε να παράγει διαφορετικά αποτελέσματα.



Εικόνα 41: Ψηφιακή μοντελοποίηση εργαλείου τελικής δράσης με τα μέρη που το αποτελούν

Η κινητική συμπεριφορά του πτυσσόμενου μηχανισμού επιτυγχάνεται με την προσαρμογή γραμμικού ενεργοποιητή στο εσωτερικό του καλουπιού. Ο γραμμικός ενεργοποιητής μπορεί να επιτυγχάνει μέχρι και 3 cm επιμήκυνση, καθιστώντας παράλληλα δυνατή κάθε υπολογιζόμενη επιμήκυνση μεταξύ των 3 cm. Η περιστροφή του καλουπιού επιτυγχάνεται με τη χρήση περιστρεφόμενου κινητήρα (stepper motor) διαστάσεων 3x3x5 cm³, ο οποίος έχει τη κατάλληλη δύναμη να περιστρέφει ολόκληρο το καλούπι στο άκρο του πιστονιού. Ο κινητήρας έχει τη δυνατότητα να σταματάει σε οποιαδήποτε επιθυμητή θέση με βάση τα σχεδιαστικά σενάρια.

Συνολικά, το σύστημα του ευέλικτου καλουπιού έχει διαστάσεις 130x15x25 cm³ και οι διαστάσεις του κυβικού σωλήνα 15 cm μήκος x 12 cm πλάτος x 12 cm ύψος. Η κατασκευή της βάσης του αποτελείται από τμήματα, τα οποία υποβαστάζουν τα πιστόνια και είναι φτιαγμένα από αλουμίνιο, ενώ ο κυβικός σωλήνας είναι φτιαγμένος από ξύλο ειδικό για

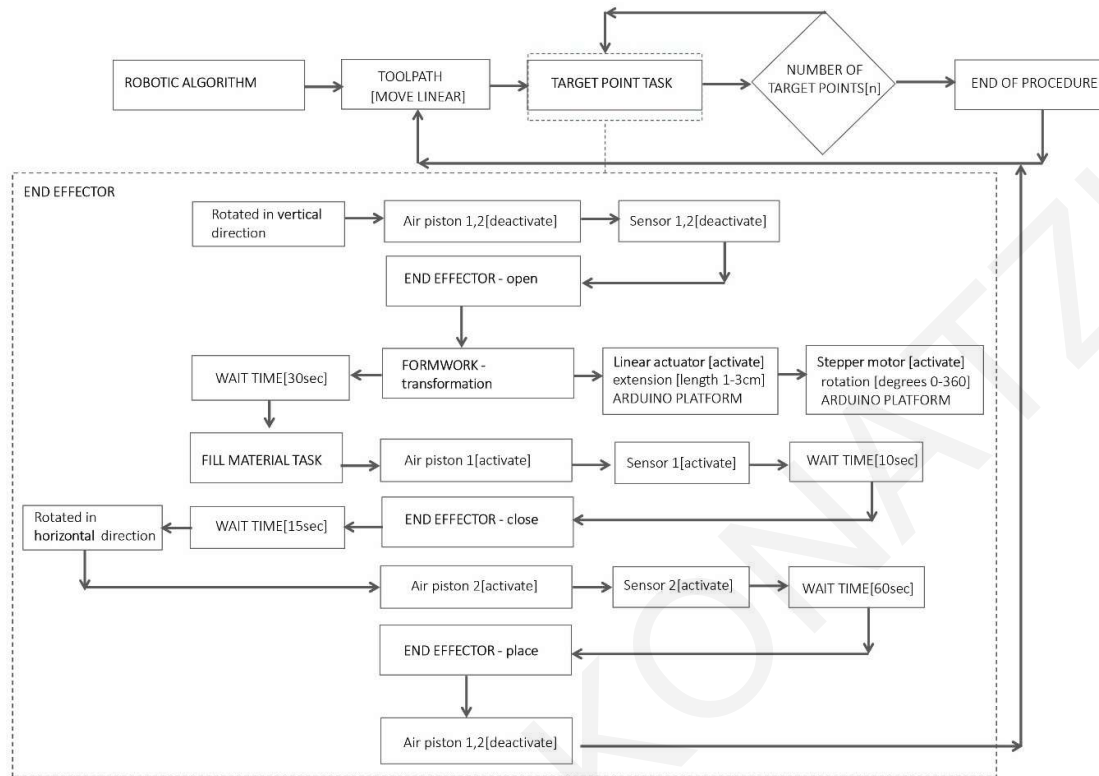
καλούπια. Τα τμήματα του ευέλικτου καλουπιού είναι από υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης (PLA πλαστικό), και οι λάμες στις οποίες στηρίζονται τα καλούπια είναι μεταλλικές.

Το πάχος, το άνοιγμα και η περιστροφή των οπών καθορίζονται μέσα από τη σχεδιαστική διερεύνηση που προηγείται του σταδίου κατασκευής και επηρεάζεται από το εμβαδό σκίασης, τον προσανατολισμό της τοιχοποιίας και τη χρήση του ελάχιστου κατασκευαστικού υλικού σε κάθε σενάριο. Οι διαστάσεις του τελικού παραγόμενου δομοστοιχείου είναι 12 cm πλάτος, 12 cm ύψος και 5-8 cm μεταβαλλόμενο πάχος. Ο μέγιστος όγκος του δομοστοιχείου είναι 0.0018 m³. Οι τυπολογίες των παραγόμενων δομικών στοιχείων ορίζονται ως πορώδεις και μη πορώδεις. Τα τελικά αποτελέσματα πορωδών δομικών στοιχείων διαφοροποιούνται στο πάχος τους, στη διάσταση και στην περιστροφή του ανοίγματος. Τα τελικά αποτελέσματα μη πορωδών δομικών στοιχείων διαφοροποιούνται μόνο στη διάσταση του πάχους τους.

5.4 Ενεργοποίηση καλουπιού

Ο αυτοματοποιημένος έλεγχος του ευέλικτου καλουπιού καθορίζεται μέσα από κώδικα προγραμματισμού, ο οποίος είναι υπεύθυνος για την ενεργοποίηση των πνευματικών πιστονιών, του γραμμικού ενεργοποιητή αλλά και του περιστροφικού κινητήρα. Μέσα από μια σειρά εντολών καθορίζεται η λειτουργία του, η οποία περιγράφεται όπως πιο κάτω [εικ.42]:

- Ρομποτικός βραχίονας σε καθορισμένη θέση για εναπόθεση υλικού στο εσωτερικό του τετράγωνου σωλήνα
- Ενεργοποίηση γραμμικού ενεργοποιητή στο επιθυμητό μήκος και περιστροφικού κινητήρα στην επιθυμητή στροφή
- Ενεργοποίηση πνευματικού πιστονιού προσαρμοσμένου πάνω στο ευέλικτο μέρος του καλουπιού
- Ενεργοποίηση πνευματικού πιστονιού προσαρμοσμένου στο στατικό μέρος του καλουπιού και έναρξη σταδίου συμπίεσης
- Κίνηση ρομποτικού βραχίονα προς το σημείο εναπόθεσης
- Αναμονή σταθεροποίησης σύμφωνα με το δομικό υλικό
- Απενεργοποίηση πνευματικών πιστονιών για το στάδιο του ξεκαλουπώματος

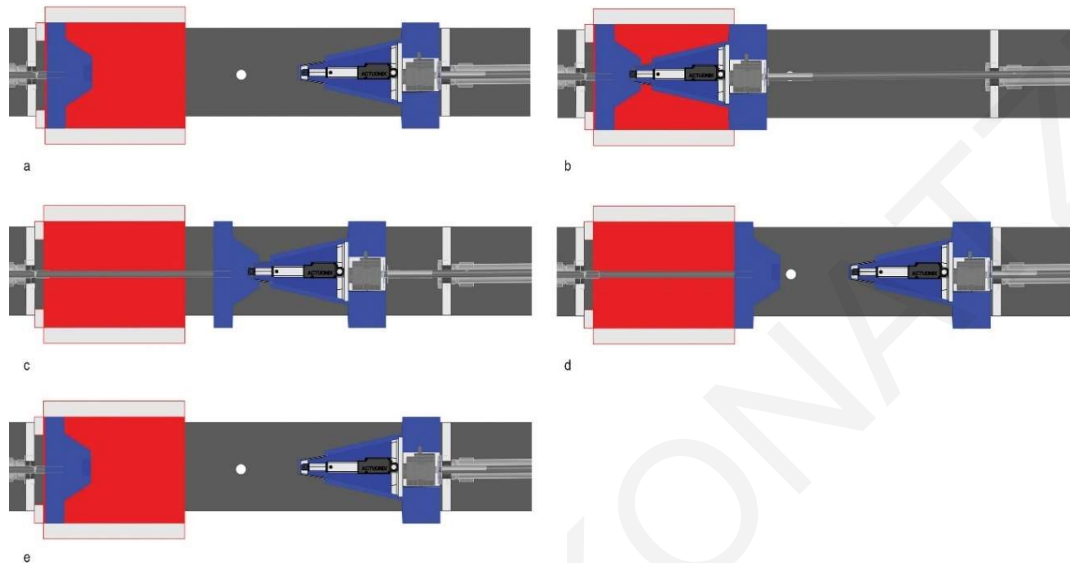


Εικόνα 42: Λογικό διάγραμμα λειτουργίας της ρομποτικής διαδικασίας

Αναλυτικά, τα πνευματικά πιστόνια που είναι προσαρμοσμένα πάνω το στατικό μέρος του καλουπιού μέσα από την ενεργοποίησή τους στοχεύουν στην συμπίεση του υλικού και επιτυγχάνουν την μορφοποίησή του, όπως καθορίζεται μέσα από το σχεδιασμό. Ο χρόνος πίεσης του υλικού από τα δύο πνευματικά πιστόνια ορίζεται από το χρόνο που χρειάζεται ο βραχίονας για να πάρει τη θέση του για το ξεκαλούπωμα και το χρόνο αναμονής για τη σταθεροποίηση του υλικού. Στη συνέχεια, το πνευματικό πιστόνι 1 απενεργοποιείται με ομαλή ταχύτητα ώστε να μεταφερθεί το παραγόμενο δομικό στοιχείο έξω από το σωλήνα. Τέλος, στη φάση ξεκαλουπώματος, απενεργοποιείται το πνευματικό πιστόνι 2.

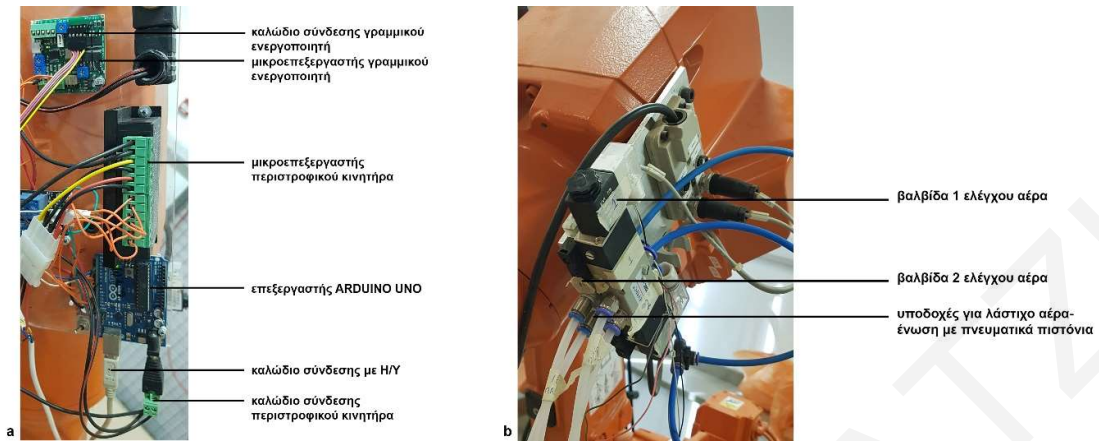
Τα πνευματικά πιστόνια, ο γραμμικός ενεργοποιητής και ο περιστροφικός κινητήρας ελέγχονται μέσω κώδικα προγραμματισμού, ο οποίος αναπτύσσεται στο λογισμικό Robot Studio 6.0 [29] σε συνδυασμό με τη ψηφιακή πλατφόρμα Arduino [30] για τον αναλογικό έλεγχο. Μέσω των δύο (2) βαλβίδων αέρα ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται τα δύο πνευματικά πιστόνια και ελέγχονται από αισθητήρες πίεσης του αέρα ως προς τα επιθυμητά μήκη τους και τα ανάλογα μεταξύ τους ανοίγματα, που αναφέρονται σε διαφορετικά στάδια της διαδικασίας. Δύο ηλεκτρονικοί αισθητήρες στα δυο άκρα του κάθε πνευματικού πιστονιού δίνουν πληροφορία στον κώδικα ώστε να προχωρήσει η διαδικασία όπως έχει

προκαθοριστεί. Ο αισθητήρας λειτουργεί δυαδικά αφού στο δεξί του άκρο πληροφορεί για τυχόν ενεργοποίηση του πιστονιού και συνάμα του καλουπιού και αντίστοιχα στο αριστερό άκρο σηματοδοτεί τυχόν απενεργοποίηση του καλουπιού-πιστονιού [εικ.43].



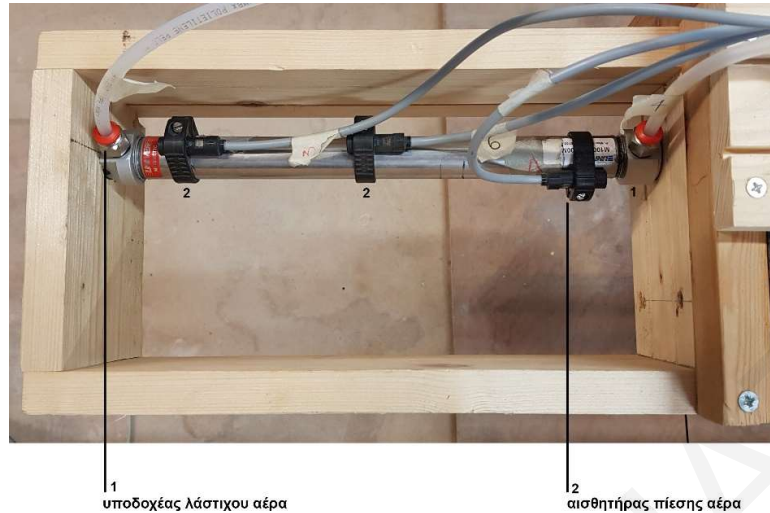
Εικόνα 43: Στάδια ενεργοποίησης του ευέλικτου καλουπιού: (a) Αρχική θέση-πλήρωση καλουπιού, (b) Στάδιο συμπίεσης, (c) Στάδιο ξεκαλουπώματος 1, (d) Στάδιο ξεκαλουπώματος 2, (e) Στάδιο τοποθέτησης

Για τη λειτουργία του γραμμικού ενεργοποιητή χρειάζεται τροφοδότηση με συνεχές ρεύμα καθώς και προγραμματισμός για τον έλεγχο του μεγέθους της μετατόπισης του άκρου. Το μέγιστο άνοιγμα του άκρου είναι 3 cm. Με τις ίδιες προϋποθέσεις λειτουργεί και ο κινητήρας περιστροφής για την στροφή του με βάση τις απαιτούμενες μοίρες. Η στροφή του κινητήρα επιτρέπει υπολογισμό οποιασδήποτε επιθυμητής γωνίας ως προς το επίπεδο που ορίζει τις 0° . Μέσω του Arduino επιτυγχάνεται ο έλεγχος των τιμών επιμήκυνσης του γραμμικού ενεργοποιητή και της στροφής του περιστροφικού κινητήρα. Η σύνδεση της πλατφόρμας Arduino στον υπολογιστή με τον μικροεπεξεργαστή του UNO Arduino γίνεται μέσω USB καλωδίου [εικ.44]. Και στις δύο περιπτώσεις μεσολαβούν μικροεπεξεργαστές που ενεργοποιούν και ρυθμίζουν την ταχύτητα των ενεργοποιητών.

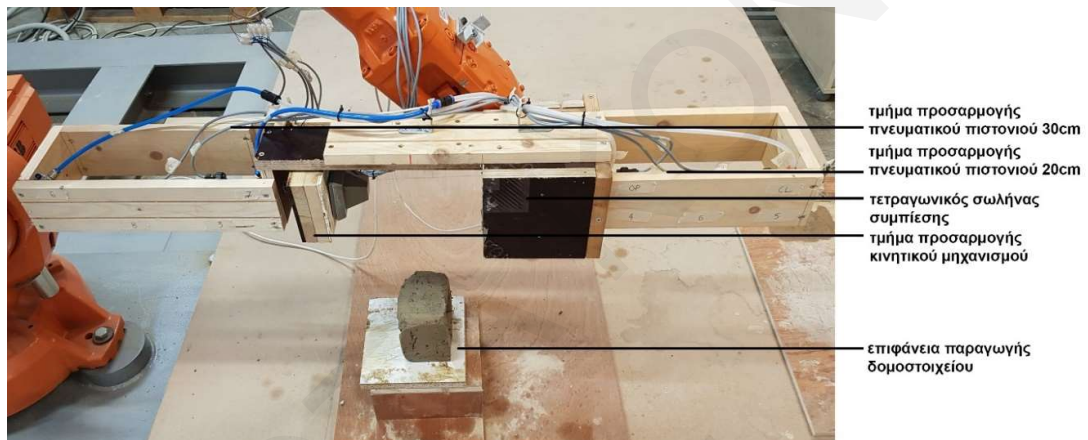


Εικόνα 44: α. Επιφάνεια προσαρμογής των επεξεργαστών ενεργοποιητών, β. Επιφάνεια προσαρμογής των βαλβίδων πνευματικών πιστονιών

Ο βασικός κώδικας προγραμματισμού της ρομποτικής διαδικασίας διαμορφώνεται από τις εντολές MoveL, SetDO και WaitDI. Οι εντολές MoveL είναι υπεύθυνες για τις κινήσεις του ρομποτικού βραχίονα σε συγκεκριμένα σημεία στόχου (target points). Οι εντολές SetDO ελέγχουν την ενεργοποίηση και απενεργοποίηση ψηφιακών εξόδων, που σε αυτή την περίπτωση αναφέρονται στα πνευματικά πιστόνια. Οι εντολές WaitDI χρησιμοποιούνται για την εισαγωγή χρόνου αναμονής και ενεργοποίησης του digital input κατά τη διάρκεια των βημάτων της διαδικασίας. Οι αισθητήρες είναι ενεργοποιημένοι σε ψηφιακές εισόδους και δίνουν την εντολή για τη συνέχεια της διαδικασίας στο επόμενο βήμα. Ξεκινώντας με την εντολή MoveL, ο ρομποτικός βραχίονας ρυθμίζεται ώστε να κινείται σύμφωνα με την καθορισμένη τροχιά προσομοίωσης. Στο επόμενο βήμα, η ψηφιακή έξοδος έχει την τιμή 0, που σημαίνει ότι τα πνευματικά πιστόνια απενεργοποιούνται. Εάν ενεργοποιηθεί η ψηφιακή έξοδος που είναι ρυθμισμένη ως 1, τότε ενεργοποιούνται τα πνευματικά έμβολα έτσι ώστε να ξεκινήσει η βαθμιδωτή πίεση που έχει ρυθμιστεί στο πρώτο πνευματικό πιστόνι 1 και έπειτα στο πνευματικό πιστόνι 2. Όταν οι τέσσερις αισθητήρες [εικ.45] ενεργοποιηθούν βάσει του κώδικα, τότε προχωρά η διαδικασία στο επόμενο βήμα και ενεργοποιείται η επαλήθευση ότι οι εντολές έχουν εκτελεστεί σωστά. Οι εντολές που ακολουθούν περιλαμβάνουν την περιστροφή του εργαλείου και την κίνηση στο σημείο της αρχικής του θέσης. Για το στάδιο του ξεκαλουπώματος, το πνευματικό πιστόνι 2 ανοίγει, ρυθμίζεται ως 1 (digital input 1) και το πνευματικό πιστόνι 1 κλείνει με χαμηλή ταχύτητα, ρυθμίζεται ως 0 (digital input 0) προκειμένου το παραγόμενο τούβλο να ολισθήσει έξω από τον τετραγωνικό σωλήνα. Τέλος, το πνευματικό πιστόνι 2 κλείνει και ρυθμίζεται σε 0 (digital input 0) για να αφαιρεθεί το καλούπι και να τοποθετηθεί στην περιοχή εργασίας [εικ.46].

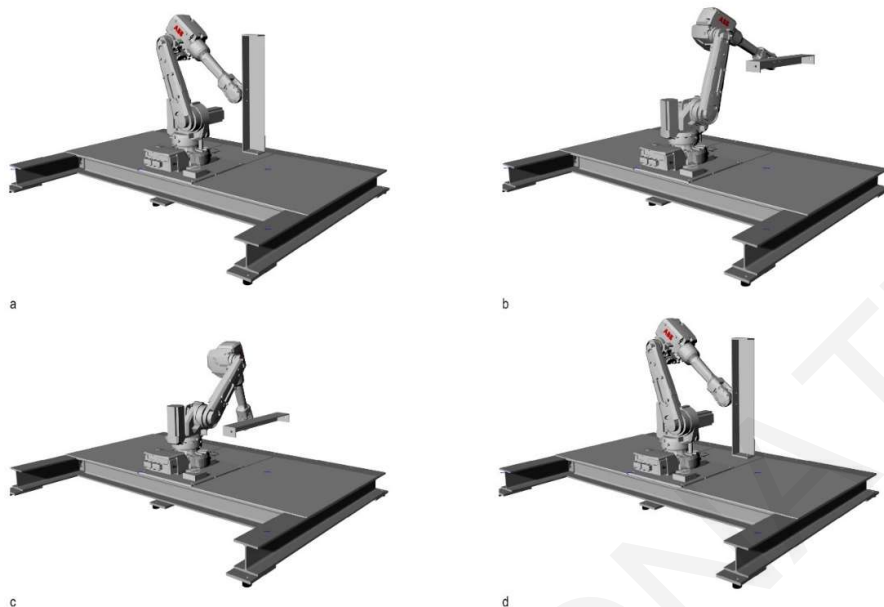


Εικόνα 45: Τμήμα ευέλικτου καλουπιού. Πνευματικό πιστόνι 20 cm και αισθητήρες πίεσης



Εικόνα 46: Φυσικό μοντέλο ευέλικτου εργαλείου και επιφάνεια παραγωγής των δομοστοιχείων

Εκτός από τον προγραμματισμό του ευέλικτου καλουπιού στον ρομποτικό βραχίονα, προγραμματίζεται η κίνηση του ρομποτικού βραχίονα και οι τελικές θέσεις του για την ολοκληρωμένη εκτέλεση της διαδικασίας παραγωγής του κάθε δομοστοιχείου. Όπως έχει αναφερθεί, το ευέλικτο καλούπι παράγει τούβλα σε προκαθορισμένη επιφάνεια για τη σταθεροποίησή τους και μετέπειτα τη μεταφορά τους σε χώρο ωρίμανσης. Για αυτό το σκοπό, σε επίπεδο πειραμάτων στο φυσικό περιβάλλον του εργαστηρίου, ορίζεται μια περιοχή εργασίας όπου ο ρομποτικός βραχίονας είναι ικανός να κινείται. Αφού οριστεί σε ψηφιακό σχεδιαστικό επίπεδο το σημείο όπου θα γίνει η τοποθέτηση των τούβλων, γίνεται ψηφιακή προσομοίωση της κίνησης του με σκοπό να επιβεβαιωθεί η δυνατότητα κίνησης των αρθρώσεων του βραχίονα με βάση τα σημεία τροχιάς του στο χώρο εργασίας [εικ.47].



Εικόνα 47: (a) Κατακόρυφη θέση για πλήρωση υλικού, (b) Περιστροφή 90° για το στάδιο της συμπίεσης, (c) Θέση ξεκαλονπώματος και τοποθέτησης, (d) Επαναφορά αρχικής θέσης και περιστροφή 90°

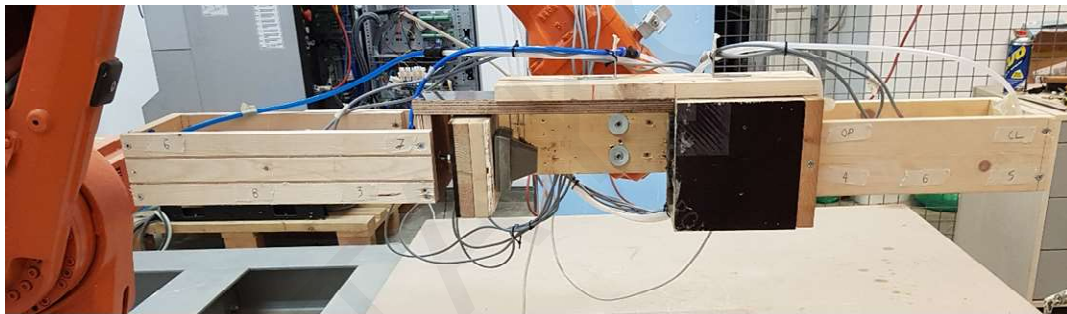
Ο προγραμματισμός κίνησης του ρομποτικού βραχίονα επιτυγχάνεται μέσω του λογισμικού TACO ABB (plug-in για Grasshopper) [19] ως μια διαδικασία επανάληψης όπου επιλέγεται γραμμική τροχιά κινήσεων με τέσσερις άξονες περιστροφές 90° για την καθοδήγηση του εργαλείου τελικής δράσης σε οριζόντια και κατακόρυφη θέση. Για το στάδιο της πλήρωσης του καλουπιού, το εργαλείο προσομοιώνεται σε κατακόρυφη θέση, ενώ για το στάδιο της συμπίεσης και της τοποθέτησης, σε οριζόντια θέση. Κατά τη διαδικασία κατασκευής, η σειρά με την οποία εκτελείται η προσομοίωση είναι αρχικά στην κατακόρυφη θέση, μετά το εργαλείο περιστρέφεται 90° και καταλήγει σε οριζόντια θέση όπου εκτελείται το στάδιο συμπίεσης και τοποθέτησης. Τέλος, με περιστροφή 90° επιστρέφει στην αρχική του κατακόρυφη θέση για το στάδιο της πλήρωσης [εικ.47].

5.5 Εκδοχή φυσικού μοντέλου ευέλικτου καλουπιού

Σε αντίθεση με το ψηφιακό καλούπι, του οποίου η βάση προτείνεται να κατασκευαστεί από αλουμίνιο, η εκδοχή του φυσικού μοντέλου που παρουσιάζεται στην διατριβή, αποτελείται από ξύλινη βάση, πάνω στην οποία στηρίζονται τα πνευματικά πιστόνια στη δεξιά και αριστερή πλευρά της. Οι ενεργοποιητές υποβαστάζονται από ξύλινες επιφάνειες στηριζόμενες σε μεταλλικές λάμες με σπές ίσες με τη διάμετρο τους. Επιπλέον, σε απόσταση 60 cm από το αριστερό άκρο της βάσης προσαρμόζεται ένας ξύλινος τετραγωνικός σωλήνας για την πραγματοποίηση του σταδίου της συμπίεσης. Ο σωλήνας είναι φτιαγμένος από ξύλινο καλούπι για την κατασκευή face-face σκυροδέματος ώστε να

μειώνονται όσον το δυνατόν οι τριβές με τις επιφάνειες στο στάδιο συμπίεσης του υλικού και στο στάδιο ολίσθησης του τούβλου προς τα έξω για το ξεκαλούπωμα του. Παράλληλα, με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η λειτουργία των πνευματικών πιστονιών κατά τη συμπίεση και την αφαίρεση του καλουπιού. Στα άκρα των πιστονιών είναι προσαρμοσμένα τα δύο κύρια μέρη του καλουπιού. Στη δεξιά πλευρά είναι το στατικό και στην αριστερή πλευρά το κινητικό τμήμα [εικ.48].

Τα τμήματα του καλουπιού είναι κατασκευασμένα από πλαστικά PLA (Polylactic acid) με τη χρήση τρισδιάστατου εκτυπωτή (3D printer). Τα ευέλικτο μέρος αποτελείται από δύο κομμάτια τα οποία συναρμολογούνται μεταξύ τους. Στο κενό χώρο που προκύπτει στο πίσω μέρος του καλουπιού ενσωματώνεται ο γραμμικός ενεργοποιητής, όπως επίσης και ο κινητήρας ο οποίος είναι υπεύθυνος για την περιστροφή του. Και τα δύο μέλη του καλουπιού υποστηρίζονται από μεταλλικές λάμες για τη σταθερή σύνδεση τους με τα άκρα των πιστονιών.



Εικόνα 48: Εκδοχή φυσικού μοντέλου εργαλείου τελικής δράσης προσαρμοσμένου στον ρομποτικό βραχίονα

Η διαδικασία ξεκινά με την παρασκευή του δομικού υλικού. Στη συνέχεια, αφού το ευέλικτο καλούπι φτάσει στην αρχική κατακόρυφη θέση του και τα ευέλικτα μέρη του επιμηκυνθούν, ο χρήστης τοποθετεί το υλικό μέσα στο τετραγωνικό σωλήνα για τη συμπίεση του. Παράλληλα με τη συμπίεση του υλικού, το καλούπι μέσω της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα, οδηγείται στην επιφάνεια για το ξεκαλούπωμα του παραγόμενου δομοστοιχείου. Πριν το ξεκαλούπωμα, προγραμματίζεται χρόνος αναμονής με βάση το κάθε υλικό, για την όσον το δυνατόν καλύτερη σταθεροποίηση του υλικού στην προκαθορισμένη μορφολογία. Με το πέρας του χρόνου αναμονής, γίνεται το ξεκαλούπωμα και η τοποθέτηση του τούβλου στη βάση για κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι την πλήρη σταθεροποίηση του [εικ.49]. Τέλος, το τελικό προϊόν μεταφέρεται σε δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία για την ωρίμανση του. Στο Κεφάλαιο 8 περιγράφεται η διαδικασία παραγωγής ενός αριθμού επιλεγμένων πρωτοτύπων με βάση την εκδοχή του φυσικού μοντέλου ευέλικτου καλουπιού που παρουσιάζεται σε αυτό το κεφάλαιο.

5.6 Συμπεράσματα

Για την υλοποίηση του ευέλικτου καλουπιού λαμβάνονται υπόψη παράμετροι που σχετίζονται με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δομοστοιχείων προς διερεύνηση, των υλικών που χρησιμοποιούνται αλλά και των δυνατοτήτων της ρομποτικής διαδικασίας και των μηχανισμών στο σύνολο τους. Πέρα από το ψηφιακό σχεδιασμό του μοντέλου, ο προγραμματισμός για την ενεργοποίηση του εργαλείου αλλά και του ρομποτικού βραχίονα είναι σημαντικοί παράγοντες για τη φυσική υλοποίηση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας παραγωγής. Σε φυσικό επίπεδο υλοποίησης του ευέλικτου καλουπιού, μια σειρά από άλλα στοιχεία είναι καλό να λαμβάνονται υπόψη. Αυτά σχετίζονται με τις δυνατότητες ενεργοποίησης των πιστονιών και αισθητήρων, τα υλικά που χρησιμοποιούνται αλλά και την κίνηση του ρομποτικού βραχίονα. Επίσης, ο πειραματισμός και οι δοκιμές σε φυσικό επίπεδο βοηθούν στη βελτίωση της ρομποτικής διαδικασίας στο σύνολο της, στοχεύοντας στην παραγωγή δομοστοιχείων με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια και μεγαλύτερο βαθμό αυτοματοποίησης. Σε μετέπειτα στάδιο εξέλιξης του ευέλικτου καλουπιού, όσον αφορά τη βιομηχανική μαζική παραγωγή εξατομικευμένων δομοστοιχείων θα ήταν δυνατή η μελέτη και εγκατάσταση αυτοματοποιημένου συστήματος εναπόθεσης του δομικού υλικού στο καλούπι αλλά και λίπανσης του. Με αυτό το τρόπο αυτονομείται η διαδικασία παραγωγής και δεν χρειάζεται η παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα.



Εικόνα 49: Στιγμιότυπα της φυσικής διαδικασίας παραγωγής ενός δομοστοιχείου

6 ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΟΥ ΑΝΤΙΚΤΥΠΟΥ, ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΥ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

6.1 Εισαγωγή

Ένας από τους βασικούς στόχους της παρούσας διατριβής είναι η ανάλυση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος της ρομποτικής κατασκευαστικής διαδικασίας αλλά και των ιδίων των δομοστοιχείων σύμφωνα με την χρήση των τριών δομικών υλικών που έχουν προαναφερθεί, τον ωμόπλινθο, το σκυρόδεμα και τον πηλό από χώμα και τσιμέντο. Το καθ' ένα από αυτά έχει διαφορετική σύσταση και συνεπώς οικολογικό αποτύπωμα. Επίσης, η διατριβή στοχεύει στην κοστολόγηση της ρομποτικής διαδικασίας κατασκευής και των παραγόμενων δομοστοιχείων για το κάθε υλικό. Τέλος, τα αποτελέσματα που προκύπτουν συγκρίνονται και αξιολογούνται σε σχέση με τα αποτελέσματα της ανάλυσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, της ενέργειας και του κόστους. Επιπρόσθετα, υπολογίζεται ποιοτικά και ο χρόνος της προτεινόμενης διαδικασίας παραγωγής των ιδίων δομοστοιχείων και υλικών, ώστε σε μετέπειτα στάδιο (Βλέπε Κεφάλαιο 8) να συγκριθεί με το χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας σε φυσικό περιβάλλον.

6.2 Εισαγωγή στην Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (LCA)

Η ευρωπαϊκή πλατφόρμα Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) (ISO 14040 ff) [11] είναι μια διεθνώς κατοχυρωμένη μεθοδολογία η οποία επιτρέπει την ολοκληρωμένη καταγραφή, ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με ένα προϊόν ή μια διαδικασία σε καθορισμένα πλαίσια. Η ολοκληρωμένη επισκόπηση περιλαμβάνει όλα τα στάδια που προηγούνται και ακολουθούν μια διαδικασία.

Μέρος της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA) ορίζεται ως η αξιολόγηση του αντίκτυπου του κύκλου ζωής ενός προϊόντος με βάση δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων που έχουν να κάνουν με την αλλαγή του κλίματος, το νέφος, την εξάντληση των πόρων, την οξίνιση, τις επιπτώσεις στην υγεία του ανθρώπου, κλπ. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην αξιολόγηση LCA πρέπει να είναι συνεπή και ποιοτικά διασφαλισμένα και να αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές αλυσίδες βιομηχανικών διεργασιών (ISO 14040 ff).

Με βάση τα στάδια της ανάλυσης, αρχικά ορίζεται ο σκοπός και τα όρια της διαδικασίας και στη συνέχεια αναλύεται η απογραφή των διαδικασιών που μεσολαβούν σε όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος. Για την απογραφή χρειάζεται να καταγραφούν τα

στάδια διεργασίας σε σχέση με μία συγκεκριμένη ποσότητα υλικού. Τέλος, γίνεται η εκτίμηση των επιπτώσεων, που αφορά την ταυτοποίηση, την άθροιση και ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών συνεπειών στον άνθρωπο και το περιβάλλον του με βάση συγκεκριμένες επιλογές υλικών. Στον τομέα των κατασκευών εφαρμόζεται η μέθοδος ανάλυσης LCA σε πολλές περιπτώσεις για την ανάλυση διαφορετικής κλίμακας δομών και την εξακρίβωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου σε υλικά και μεθόδους κατασκευής (Christoforou et al, 2016; Petrovic et al, 2019; Androsevic et al, 2019; Kontovourkis et al, 2019).

Η πλήρης ζωή των προϊόντων σημαίνει ότι καταγράφονται οι περιβαλλοντικές συνέπειες από τον σχεδιασμό στην παραγωγή, όπως επίσης και η πλήρης βιομηχανοποίηση του προϊόντος από τη βιομηχανική εκμετάλλευση των ακατέργαστων πρώτων υλών του υλικού που συμπεριλαμβάνουν τη διανομή, τη χρήση, την κατανάλωση και την αποκομιδή. Με τη βοήθεια της ολοκληρωμένης ανάλυσης, οι διαδικασίες και τα προϊόντα μπορούν να βελτιστοποιηθούν. Οι κατηγορίες επιπτώσεων μιας ανάλυσης LCA έχουν να κάνουν με την παγκόσμια υπερθέρμανση (kg CO₂e), τη στρατοσφαιρική υπερθέρμανση, τη στρατοσφαιρική καταστροφή του όζοντος (kg CFC₁₁e), την τροποσφαιρική φωτοχημική δημιουργία όζοντος (kg Ethenee), την οξίνιση (kg SO₂e), τον ευτροφισμό (kg PO₄e), την τοξικότητα στον άνθρωπο, την οικοτοξικότητα και τη χρήση γης.

6.3 Μεθοδολογία διερεύνησης Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA)

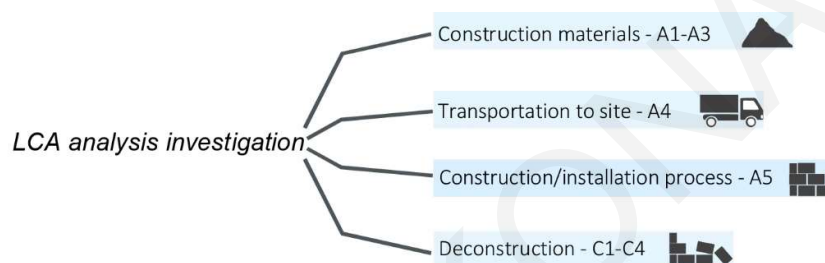
Στο σενάριο υπό διερεύνηση, τα στάδια κύκλου ζωής των δομοστοιχείων που αναλύονται είναι αυτά της εξαγωγής του κατασκευαστικού υλικού, της μεταφοράς του στο εργαστήριο, της διαδικασίας κατασκευής και της κατεδάφισης στο τέλος της ζωής τους.

6.3.1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά

Στην περίπτωση υπό εξέταση αναλύονται οι προαναφερόμενες είκοσι τέσσερις (24) περιπτώσεις τυπολογιών (Υποκεφάλαιο 4.3 - Πίνακας 6) με διαφορετική μορφολογία και όγκο. Όπως προαναφέρθηκε, χωρίζονται σε τρεις (3) κατηγορίες μορφολογίας, όπου στην κάθε κατηγορία διακρίνονται τυπολογίες τούβλων με μέγιστο και ελάχιστο όγκο. Το κριτήριο του όγκου παίζει σημαντικό ρόλο στην περιβαλλοντική ανάλυση γιατί όσο αυξάνεται η μάζα των δομικών υλικών τόσο αυξάνεται και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος τους.

6.3.2 Δεδομένα εισαγωγής/Δεδομένα εξαγωγής (Inputs/outputs)

Για την εισαγωγή των δεδομένων και εξαγωγή των αποτελεσμάτων της ανάλυσης LCA χρησιμοποιείται το λογισμικό One click LCA [12], το οποίο περιέχει ευρεία βάση δεδομένων EPD (Building life-cycle assessment according to the European Standard EN 15978) [13, 31]. Με βάση το συγκεκριμένο λογισμικό υπολογίζονται τα στάδια κύκλου ζωής για το κάθε υλικό από την παραγωγή μέχρι το τέλος ζωής του με ξεχωριστή αναφορά στο στάδιο της διαδικασίας κατασκευής του υλικού (A1-A3), στο στάδιο των μεταφορών (A4), στην ενέργεια κατασκευής (A5) και στο τέλος της ζωής του προϊόντος (C1-C4) [εικ.50].



Εικόνα 50: Δομή ανάλυσης LCA σε επίπεδο διαγράμματος που συμπεριλαμβάνει τα στάδια A1-A3, A4, A5 και C1-C4

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξαρτώνται κυρίως από την επιλογή του κατασκευαστικού υλικού των δομοστοιχείων και το είδος της διαδικασίας παραγωγής της δομής τους. Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα ορίζονται τα μεγέθη του όγκου τους, τα οποία επηρεάζουν άμεσα το στάδιο εξόρυξης του υλικού τους και τη μέθοδο κατασκευής τους. Επιπλέον, υπολογίζεται και εισάγεται ως δεδομένο η ενέργεια που καταναλώνεται ανά ώρα κατά την εκτέλεση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Επίσης, υπολογίζονται τα δρομολόγια για την μεταφορά των υλικών αλλά και της κατασκευής. Στο λογισμικό εισάγονται κλιματικά δεδομένα της χώρας όπου διεξάγεται η κατασκευαστική διαδικασία, η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται αλλά και η ενέργεια που καταναλώνεται για τη μεταφορά των δομοστοιχείων στο εργοτάξιο με όχημα-φορτηγό.

Στην παρούσα ανάλυση λαμβάνονται αποτελέσματα για το κάθε στάδιο ξεχωριστά με έμφαση στις τιμές εκπομπών της παγκόσμιας υπερθέρμανσης (global warming) (kg CO₂e) και της καταναλώσιμης ενέργειας (primary energy) (MJ). Πέρα από τις τιμές που εξάγονται και αφορούν τη διαδικασία παραγωγής των δομοστοιχείων και τη συνολική διαδικασία μέχρι το τέλος ζωής τους, λαμβάνονται τιμές που αναφέρονται στο χρόνο παραγωγής του κατασκευαστικού υλικού, στο χρόνο παραγωγής του δομοστοιχείου, στο κόστος του κατασκευαστικού υλικού, στο κόστος της απαιτούμενης ενέργειας, στο κόστος εργατικών και στην ενέργεια που απαιτείται. Οι τιμές λαμβάνονται τόσο για την

προτεινόμενη αυτοματοποιημένη μέθοδο κατασκευής όσο και για την συμβατική με σκοπό την σύγκριση των δυο διαδικασιών.

6.3.3 Κατασκευαστικά υλικά (A1-A3)

Η διαδικασία εξαγωγής του κατασκευαστικού υλικού αναφέρεται στις πρώτες ύλες και στις διεργασίες εξόρυξης που απαιτούνται για το κάθε μείγμα. Αυτό ορίζεται από τυποποιημένες διαδικασίες, όπως την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών και τις επιπτώσεις τους στο περιβάλλον. Για το κάθε δομικό υλικό (ωμόπλινθος, σκυρόδεμα και πηλός με τσιμέντο) υπολογίζονται οι φιλικότερες προς το περιβάλλον διαδικασίες παραγωγής και χρήσης των πρώτων υλών. Για το σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται καταχωρημένα εγκεκριμένα δεδομένα από τη βάση δεδομένων EPD [13]. Για τον ωμόπλινθο και το μείγμα πηλού, λόγω της μη ύπαρξης τους στη βάση δεδομένων ως εργοστασιακά κατασκευαστικά υλικά, χρησιμοποιούνται ειδικά (custom) δείγματα, τα οποία κατασκευάζονται στο εργαστήριο με αφορμή αυτή τη μελέτη και έχουν πρώτες ύλες παραγωγής τους το χώμα και το τσιμέντο.

Συγκεκριμένα, για τη σύσταση των δειγμάτων ωμόπλινθου χρησιμοποιείται χώμα από άγονο άργιλο και άμμο ασβεστίου που αναμειγνύονται σε αναλογία 1:1 w/w προκειμένου να επιτευχθεί κατανομή μεγέθους σωματιδίων που ικανοποιεί τις συστάσεις των Houben and Guillard (1994). Το κοκκώδες μείγμα που προκύπτει έχει ως σύσταση 13% άργιλο ($d < 0.002$ mm), 42% λεπτή άμμο (0.002 mm $< d < 0.075$ mm) και 41% άμμο ($0.075 < d < 2.36$ mm). Επίσης, έχει 4% περιεκτικότητα σε άχυρο και 29% περιεκτικότητα σε νερό.

Στην περίπτωση του σκυροδέματος χρησιμοποιείται Ready mix concrete εργοστασιακό έτοιμο σκυρόδεμα C20/25. Αυτό αποτελείται από 10% ανακυκλωμένα συνδετικά μέσα σε τσιμέντο (300 kg / m^3). Όλα τα δεδομένα προέρχονται από τη βάση δεδομένων Ecoinvent [32]. Η σύνθεση υλικών αυτού του τύπου σκυροδέματος ορίζεται σύμφωνα με τον αγγλικό οδηγό για σκυρόδεμα BS 8500-1: 2006, όπου αναφέρεται ως αναλογία νερού/τσιμέντου = $0.6/300$ kg / m^3 και γίνεται χρήση τσιμέντου Portland και συνδετικών υλικών.

Στην περίπτωση του πηλού, η σύσταση του αποτελείται από χώμα εδάφους, νερό και σταθεροποιητή εδάφους. Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιείται ένα μείγμα αργίλου που συνδυάζεται με ποσοστό τσιμέντου 8% σύμφωνα με τον Minke (2006). Γενικά, πρόκειται για ένα υβριδικό μείγμα που εμπεριέχει τσιμέντο και πηλό.

6.3.4 Μεταφορές (A4)

Μεταξύ των προαναφερόμενων φάσεων, μεσολαβούν διαδικασίες που έχουν να κάνουν με τη μεταφορά των υλικών ή των τελικών προϊόντων στο εργαστήριο ή στο εργοτάξιο. Λόγω της χρήσης οχημάτων για τη μεταφορά τους απαιτείται κατανάλωση καυσίμων που έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ρύπων.

6.3.5 Στάδιο παραγωγής - Κατασκευαστική διαδικασία (A5)

Στην παρούσα μελέτη, το στάδιο της παραγωγής χαρακτηρίζεται ως σημαντικό, αφού αυτό έχει να κάνει με τον τρόπο κατασκευής των δομοστοιχείων. Έτσι, σε αυτό το στάδιο εξετάζεται η προτεινόμενη ρομποτική διαδικασία κατασκευής και συγκεκριμένα ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της σε ολόκληρο το κύκλο ζωής των δομοστοιχείων μέσα από τη χρήση των τριών διαφορετικών υλικών. Επίσης, σε αυτό το στάδιο λαμβάνεται υπόψη η καταναλώσιμη ενέργεια κατά τα διερευνώμενα στάδια του κύκλου ζωής του δομοστοιχείου. Επιπλέον, υπολογίζεται η ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού αλλά και της ρομποτικής διαδικασία παραγωγής των δομοστοιχείων στο σύνολο τους.

Η εξίσωση 4 περιγράφει την απαιτούμενη ενέργεια για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού και η εξίσωση 5 την απαιτούμενη ενέργεια στο σύνολο της ρομποτικής διαδικασίας.

$$EP_{E-et} = E_{3D\ pr.machine} \quad (4)$$

Όπου EP_{E-et} είναι η ενέργεια για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού, η οποία είναι ίση με την ενέργεια που απαιτείται για την 3D εκτύπωση των τμημάτων ($E_{3D\ pr.machine}$)

$$EP_{rp} = E_{lin.actuator+step.motor} + E_{laptop} + E_{rob.arm} \quad (5)$$

Όπου EP_{rp} είναι η ενέργεια που απαιτείται για το σύνολο της ρομποτικής διαδικασίας και εμπεριέχει την ενέργεια που απαιτούν οι ενεργοποιητές ($E_{lin.actuator+step.motor}$), ο ηλεκτρονικός υπολογιστής (E_{laptop}) και ο ρομποτικός βραχίονας ($E_{rob.arm}$).

Παράλληλα, γίνεται σύγκριση με τις τιμές ενέργειας που απαιτείται για τη παραγωγή ενός συμβατικού μεταλλικού καλουπιού και για τη συνολική παραγωγή των συμβατικών τούβλων. Η εξίσωση 6 περιγράφει την απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή ενός συμβατικού καλουπιού και η εξίσωση 7 περιγράφει την απαιτούμενη ενέργεια για τη συμβατική διαδικασία παραγωγής στο σύνολο της.

$$EP_{cf} = E_{Cutting\ machine} + E_{Welding\ machi} \quad (6)$$

$$EP_{cp} = E_{molding\ step} + E_{demolding\ step} \quad (7)$$

Όπου EP_{cf} είναι η ενέργεια που απαιτείται για τη παραγωγή του συμβατικού καλουπιού και εμπεριέχει την ενέργεια που απαιτεί η κοπή της επιφάνειας του καλουπιού ($E_{Cutting\ machine}$) και την ενέργεια της μηχανής για την μορφοποίηση της επιφάνειας ($E_{Weldi\ machine}$). Επίσης, όσον αφορά την ενέργεια για την παραγωγή των δομοστοιχείων με τη χρήση συμβατικού καλουπιού (EP_{cp}), αυτή συμπεριλαμβάνει την ενέργεια που απαιτείται για την τοποθέτηση του δομικού υλικού στο καλούπι ($E_{molding\ step}$) και την ενέργεια που απαιτείται για το στάδιο του ξεκαλουπώματος ($E_{demolding\ step}$).

6.3.6 Τέλος ζωής- Αποδόμηση (C1-C4)

Όλες οι επιλογές που γίνονται στα προαναφερόμενα στάδια επηρεάζουν το τελευταίο στάδιο, το οποίο αναφέρεται στο τέλος ζωής της κατασκευής. Στην κατασκευαστική βιομηχανία, αυτό το στάδιο αναφέρεται σε διαδικασίες δαπανηρές και μη φιλικές προς το περιβάλλον λόγω της χρήσης υλικών για την παραγωγή προϊόντων που δύσκολα μπορούν να επανέλθουν στην πρότερη τους κατάσταση για να επαναχρησιμοποιηθούν. Επίσης, αυτό οφείλεται στη χρήση εργαλείων παραγωγής που απαιτούν μεγάλη κατανάλωση καυσίμων και ως αποτέλεσμα μεγάλη κατανάλωση ενέργειας. Για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων τους, λαμβάνονται τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και καταναλώσιμης ενέργειας κατά το στάδιο κατεδάφισης και αποδόμησης του κατασκευαστικού υλικού.

6.4 Εκτίμηση Κύκλου Ζωής (LCA) δομοστοιχείων

Σε αυτό το στάδιο εισάγονται δεδομένα στο λογισμικό που αφορούν τη σύσταση των μειγμάτων, τις αποστάσεις μετακίνησης των υλικών, τα αποτελέσματα της Εκτίμησης Κύκλου Ζωής (LCA) για το κάθε υλικό που εμπεριέχεται στη σύσταση τους, την ποσότητα υλικού που χρειάζεται κάθε δομοστοιχείο καθώς και την ποσότητα υλικού, το οποίο μεταφέρεται από το σημείο εξόρυξης στο εργαστήριο [πιν.9].. Κάθε υλικό έχει διαφορετική τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, όπως επίσης και απαιτούμενη ενέργεια για τη διεκπεραίωση αυτού του σταδίου [πιν.10].

| Material | Inputs | | | | |
|------------------|-------------------------------------|----------------|---|--------------------------|----------------------|
| | Material quantity (m ³) | Transport (Km) | Environment Data Source | Transported mass (tonne) | Transportation |
| Adobe | 0.001- 0.0018 | 30 | LCA inventory for clay pit operation, Ecoinvent 2014, LCA inventory for sand quarry operation, Ecoinvent 2016 | 1 | Small truck |
| Clay with cement | 0.001- 0.0018 | 20 | LCA inventory for clay pit operation, Ecoinvent 2014, Oekobau.dat 2016-I | 1 | Small truck |
| Concrete C20/25 | 0.001- 0.0018 | 20 | One Click LCA | 1 | Concrete mixer track |

Πίνακας 9: Δεδομένα εισαγωγής για κάθε κατασκευαστικό υλικό προς διερεύνηση

| Sector on investigation (robotic procedure) | Global warming (kg CO2e) | | | Primary energy (MJ) | | |
|---|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) |
| A1- Construction | 3.78E-3 | 4.96E-1 | 1.6E-1 | 9.24E-2 | 2.46E0 | 5.14E-1 |
| A3 Materials | | | | | | |

Πίνακας 10: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης ενός δομοστοιχείου για το κάθε κατασκευαστικό υλικό προς διερεύνηση

Σε αυτή την ανάλυση λαμβάνονται υπόψη κριτήρια όπως το μέγεθος του οχήματος και οι αποστάσεις διακίνησης σε χιλιόμετρα [πιν.9]. Λαμβάνονται υπόψη τα δρομολόγια για τη μεταφορά των υλικών από το εργοστάσιο παραγωγής προς το εργαστήριο κατασκευής της δομής και από το εργαστήριο στο εργοτάξιο για τη συναρμολόγησή τους [πιν.11 και 12]. Για τα ειδικά δείγματα του ωμόπλινθου (άμμος, λεπτή άμμος και χώμα) και του πηλού με προσθήκη τσιμέντου (χώμα και τσιμέντο), εισάγονται δεδομένα απόστασης της μεταφοράς ξεχωριστά για το κάθε υλικό σύστασης τους [πιν.9] και αυτό αυξάνει τους ρύπους. Για το σκυρόδεμα υπολογίζεται μόνο η μεταφορά του έτοιμου μείγματος (concrete mix). Επιπλέον, το μέγεθος του μεταφορικού μέσου παίζει ρόλο στην τιμή του περιβαλλοντικού αντίκτυπου.

| Material | Inputs | | |
|------------------|------------------------------------|-------------------------|----------------------|
| | Material quantity(m ³) | Transported mass(tonne) | Transportation |
| Adobe | 0.001- 0.0018 | 1 | Small truck |
| Clay with cement | 0.001- 0.0018 | 1 | Small truck |
| Concrete | 0.001- 0.0018 | 1 | Concrete mixer track |

Πίνακας 11: Δεδομένα εισαγωγής για το στάδιο των μεταφορών

| Sector on investigation (robotic procedure) | Global warming (kg CO2e) | | | Primary energy (MJ) | | |
|---|--------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) |
| A4 Transportation to site | 1.78E-2 | 2.56E-2 | 2.01E-2 | 2.58E-1 | 3.77E-1 | 2.92E-1 |

Πίνακας 12: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης ενός δομοστοιχείου στο στάδιο των μεταφορών

Η ρομποτική διαδικασία διερευνάται μόνο ως προς την ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή δομοστοιχείων, αφού δεν είναι αναγκαία οποιαδήποτε άλλη ενέργεια για την ωρίμανση του υλικού. Για τον υπολογισμό της καταναλωμένης ενέργειας κατά το στάδιο παραγωγής του δομοστοιχείου χρησιμοποιείται ο τύπος: $P=V \cdot I/1000$ (Kwh), όπου P είναι η καταναλωμένη ηλεκτρική ενέργεια, V (Volt) είναι η τάση της διερευνώμενης συσκευής και I (Ampere) είναι η ένταση της (Πρωτονοτάριος και Θεολόγου, 1999). Ως καταναλωμένη ενέργεια υπολογίζεται αυτή των μηχανισμών του ευέλικτου καλουπιού που συμμετέχουν στην διαδικασία κατασκευής της δομής.

Όσον αφορά την ρομποτική κατασκευαστική διαδικασία, στο λογισμικό εισάγεται η υπολογιζόμενη ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη διαδικασία κατασκευής των διερευνώμενων δομοστοιχείων για μία ώρα εργασίας του ρομποτικού βραχίονα. Αθροίζεται η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από το ρομποτικό βραχίονα, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που συμμετέχει στη διαδικασία και τους μηχανισμούς που είναι ενσωματωμένοι στο ευέλικτο καλούπι, συμπεριλαμβανομένων των πνευματικών πιστονιών, του γραμμικού ενεργοποιητή και του περιστροφικού κινητήρα.

Όσον αφορά την ενέργεια που καταναλώνεται για την παραγωγή του ευέλικτου καλουπιού, αυτή είναι ίση με την ενέργεια που καταναλώνει ο τρισδιάστατος εκτυπωτής για την παραγωγή των τμημάτων του καλουπιού. Η ενέργεια που καταναλώνεται από οποιαδήποτε άλλη συσκευή για την κατασκευή του εργαλείου τελικής δράσης θεωρείται αμελητέα. Η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του δομοστοιχείου είναι 0.2 kWh. Το αποτέλεσμα της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για κατασκευή του ευέλικτου μηχανισμού και της παραγωγής ενός δομοστοιχείου είναι 2.59 kWh [πιν.13]. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε αυτό το στάδιο υπολογίζονται σε 4.62E0 kg CO_{2e} και για τα τρία υλικά προς διερεύνηση. Η καταναλώσιμη ενέργεια είναι 7.93E1 MJ [πιν.14].

| Material | Inputs |
|------------------|--------------------------|
| | Electricity, Cyprus(kWh) |
| Adobe | 2.59 |
| Clay with cement | 2.59 |
| Concrete | 2.59 |

Πίνακας 13: Δεδομένα εισαγωγής στο στάδιο κατασκευής με τη χρήση ευέλικτου καλουπιού

| Sector on investigation (robotic procedure) | Global warming (kg CO _{2e}) | | | Primary energy (MJ) | | |
|---|---------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) |
| A5 Construction/installation process | 4.62E0 | 4.62E0 | 4.62E0 | 7.93E1 | 7.93E1 | 7.93E1 |

Πίνακας 14: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης ενός δομοστοιχείου στο στάδιο κατασκευής με τη χρήση ευέλικτου καλουπιού

Για την παραγωγή ενός δομοστοιχείου με την συμβατική μέθοδο χρειάζεται η παραγωγή ενός μεταλλικού καλουπιού, δηλαδή υπολογίζεται η ενέργεια που καταναλώνουν οι μηχανές κοπής και συγκόλλησης των φύλλων μετάλλου. Συνολικά, η ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή του καλουπιού είναι 11.3 kWh [πιν.15]. Για τη συμβατική κατασκευαστική διαδικασία οι εκπομπές είναι 1.28E1 kg CO_{2e} και η ενέργεια που καταναλώνεται 2.06E2 MJ [πιν.16].

| Material | Inputs |
|------------------|---------------------------|
| | Electricity, Cyprus (kWh) |
| Adobe | 11.3 |
| Clay with cement | 11.3 |
| Concrete | 11.3 |

Πίνακας 15: Δεδομένα εισαγωγής στο στάδιο κατασκευής με τη χρήση συμβατικού καλουπιού

| Sector on investigation (conventional procedure) | Global warming (kgCO _{2e}) | | | Primary energy (MJ) | | |
|---|---|----------|----------------|------------------------|----------|----------------|
| | Adobe | Concrete | Clay | Adobe | Concrete | Clay |
| | | C20/25 | (soil, cement) | | C20/25 | (soil, cement) |
| A5 Construction/installation process | 1.28E1 | 1.28E1 | 1.28E1 | 2.06E2 | 2.06E2 | 2.06E2 |

Πίνακας 16: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης στο στάδιο κατασκευής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση συμβατικού καλουπιού

Όλες οι επιλογές που γίνονται στα προαναφερόμενα στάδια επηρεάζουν και το τελικό στάδιο, δηλαδή το τέλος ζωής της κατασκευής. Έχοντας ως προϋπόθεση την επαναχρησιμοποίηση των υλικών, σε αυτό το στάδιο τα υλικά αναλύονται όσον αφορά την δυνατότητα επεξεργασίας των μάζων τους, το κόστος τους και τη φιλική προς το περιβάλλον πτυχή τους. Όπως και τα άλλα στάδια που αναφέρθηκαν πιο πάνω, έτσι και σε αυτό το στάδιο τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τη σύσταση των υλικών προς διερεύνηση. Σε αυτό το στάδιο, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα για τον ωμόπλιθο είναι 1.24E-2 kg CO_{2e}, για το σκυρόδεμα 3.9E-2 kg CO_{2e} και για τον πηλό 1.67E-2 kg CO_{2e} [πιν.17]. Η ενέργεια που απαιτείται για τον ωμόπλιθο είναι 3.7E-1 MJ, για το σκυρόδεμα 9.56E-1 MJ και για τον πηλό 4.94E-1 MJ [πιν.17].

| Sector on investigation (robotic procedure) | Global warming (kg CO _{2e}) | | | Primary energy (MJ) | | |
|---|--|----------|----------------|------------------------|----------|----------------|
| | Adobe | Concrete | Clay | Adobe | Concrete | Clay |
| | | C20/25 | (soil, cement) | | C20/25 | (soil, cement) |
| C1-C4 Deconstruction | 1.24E-2 | 3.9E-2 | 1.67E-2 | 3.7E-1 | 9.56E-1 | 4.94E-1 |

Πίνακας 17: Αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης στο στάδιο τέλους ζωής-αποδόμησης του δομοστοιχείου

6.5 Συνολικά αποτελέσματα LCA προτεινόμενης και συμβατικής διαδικασίας κατασκευής δομοστοιχείων

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης εξαρτώνται κυρίως από την επιλογή του κατασκευαστικού υλικού και το είδος της διαδικασίας παραγωγής των δομοστοιχείων. Κατά την εισαγωγή των δεδομένων στο πρόγραμμα ορίζεται το μέγεθος του όγκου του δομοστοιχείου, το οποίο επηρεάζει άμεσα τα στάδια εξόρυξης του υλικού και τη μέθοδο κατασκευής του. Επιπλέον, υπολογίζεται και εισάγεται ως δεδομένο η ενέργεια που καταναλώνεται ανά ώρα κατά την εκτέλεση της κατασκευαστικής διαδικασίας. Τέλος, υπολογίζονται τα δρομολόγια για την μεταφορά των υλικών αλλά και της κατασκευής.

Όσον αφορά την ρομποτική κατασκευαστική διαδικασία, στο λογισμικό εισάγεται η υπολογιζόμενη ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για τη διαδικασία κατασκευής του διερευνώμενου δομοστοιχείου για μία ώρα εργασίας του ρομποτικού βραχίονα. Αυτή αθροίζεται με την ενέργεια που καταναλώνεται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή που συμμετέχει στη διαδικασία και τους μηχανισμούς που είναι ενσωματωμένοι στο ευέλικτο καλούπι, συμπεριλαμβανομένων των πνευματικών πιστονιών, του γραμμικού ενεργοποιητή και του περιστροφικού κινητήρα. Το αποτέλεσμα της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται είναι 2.39 kWh. Επίσης, στο λογισμικό εισάγονται τα κλιματικά δεδομένα της Κύπρου, όπου διεξάγεται η κατασκευαστική διαδικασία, η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται αλλά και η ενέργεια που καταναλώνεται για τη μεταφορά των δομοστοιχείων στο εργοτάξιο με όχημα-φορτηγό.

Μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα kg CO₂e παρατηρούνται στην περίπτωση του σκυροδέματος, λόγω των αυξημένων εκπομπών που προκαλούνται από τα υλικά σύστασης του αλλά και λόγω της αυξημένης ενέργειας που απαιτείται στο τέλος ζωής των δομοστοιχείων από σκυρόδεμα, δηλαδή στο στάδιο κατεδάφισης και επαναχρησιμοποίησης τους [πιν.18].

| Sector on investigation (robotic procedure) | Global warming (kg CO ₂ e) | | | Primary energy (MJ) | | |
|---|--|--------------------|---------------------------|------------------------|--------------------|---------------------------|
| | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) |
| Total | 4.65E0 | 5.18E0 | 4.82E0 | 8.29E1 | 8.28E1 | 8.52E1 |

Πίνακας 18: Συνολικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης για το στάδιο κατασκευής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση ευέλικτου καλουπιού

Η ίδια ανάλυση επαναλαμβάνεται για την παραγωγή δομοστοιχείων με τη συμβατική μέθοδο [πιν.19]. Σε αυτή την περίπτωση, οι τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα kg CO₂e και κατανάλωσης ενέργειας για τα τρία υλικά εμφανίζονται αυξημένες σε σχέση με την ρομποτική διαδικασία. Η διαφοροποίηση των τιμών μεταξύ της προτεινόμενης και συμβατικής διαδικασίας οφείλεται κατά κύριο λόγο στη διαφοροποίηση της τιμής της απαιτούμενης ενέργειας μεταξύ των δυο διαδικασιών (αναλυτική συζήτηση γίνεται στο Κεφάλαιο 7).

| Sector on investigation (conventional procedure) | Global warming (kg CO ₂ e) | | | Primary energy (MJ) | | |
|--|---------------------------------------|-----------------|---------------------|---------------------|-----------------|---------------------|
| | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) | Adobe | Concrete C20/25 | Clay (soil, cement) |
| Total | 1.28E1 | 1.34E1 | 1.3E1 | 2.07E2 | 2.1E2 | 2.07E2 |

Πίνακας 19: Συνολικά αποτελέσματα περιβαλλοντικής ανάλυσης για το στάδιο κατασκευής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση συμβατικού καλουπιού

6.6 Αποτελέσματα LCA τυπολογιών δομοστοιχείων

Ο Πίνακας 20 παρουσιάζει τις τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ενέργειας για όλες τις τυπολογίες δομοστοιχείων που αναπτύχθηκαν. Στην περίπτωση του ωμόπλινθου οι τιμές των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα κυμαίνονται από 4.65-4.67 kg CO₂, στην περίπτωση του πηλού από 4.73- 4.98 kg CO₂ και στην περίπτωση του σκυροδέματος από 5.02-5.26 kg CO₂. Σε σχέση με την σταδιακή αύξηση του όγκου με βάση τα δείγματα ανάλυσης, μικρότερες διακυμάνσεις παρουσιάζονται στην περίπτωση του ωμόπλινθου, κάτι το οποίο υποδεικνύει τη φιλική περιβαλλοντική του συμπεριφορά. Στην περίπτωση του πηλού και του σκυροδέματος παρατηρούνται μεγαλύτερες διακυμάνσεις τιμών των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα [πιν.20]. Όσον αφορά τις τυπολογίες των δομοστοιχείων, οι τυπολογίες T1 με το μικρότερο όγκο έχουν και τη μικρότερη τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, ακολουθούν οι τυπολογίες T2, και τέλος οι τυπολογίες T3 με το μεγαλύτερο όγκο έχουν τις μεγαλύτερες εκπομπές.

| Typologies | LCA (kgCO2) adobe | LCA (kgCO2) concrete | LCA (kgCO2) clay |
|----------------------|-------------------------|----------------------------|------------------------|
| T1 _{max-0} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| T1 _{max-15} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| T1 _{max-25} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| T1 _{max-45} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| T1 _{min-0} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| T1 _{min-15} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| T1 _{min-25} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| T1 _{min-45} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| T2 _{max-0} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T2 _{max-15} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T2 _{max-25} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T2 _{max-45} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T2 _{min-0} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| T2 _{min-15} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| T2 _{min-25} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| T2 _{min-45} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| T3 _{max-0} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T3 _{max-15} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T3 _{max-25} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T3 _{max-45} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| T3 _{min-0} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |
| T3 _{min-15} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |
| T3 _{min-25} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |
| T3 _{min-45} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |

Πίνακας 20: Πίνακας αποτελεσμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις τυπολογίες δομοστοιχείων από ομόπλινθο, πηλό με τσιμέντο και σκυρόδεμα

6.7 Μεθοδολογία ανάλυσης κόστους

Για την ανάλυση κόστους λαμβάνονται υπόψη το κόστος του ευέλικτου καλουπιού, το κόστος των υλικών, της ενέργειας που απαιτείται για την κατασκευή του εργαλείου και για την παραγωγή των δομοστοιχείων και το εργατικό κόστος [εικ.51]. Ο υπολογισμός γίνεται για την προτεινόμενη αλλά και για τη συμβατική διαδικασία.



Εικόνα 51: Διάγραμμα διερεύνησης κόστους

Το κόστος του ευέλικτου καλουπιού και της ρομποτικής διαδικασίας στο σύνολο της υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{E-et} = E_{cost(E-e)} + M_{cost(E-et)} + L_{cost(E-et)} \quad (8)$$

$$C_{rp} = E_{cost(rp)} + CM_{cost(rp)} + L_{cost(rp)} \quad (9)$$

Όπου C_{E-et} and C_{rp} είναι το κόστος κατασκευής του ευέλικτου καλουπιού και της ρομποτικής διαδικασίας αντίστοιχα.

Όπου E_{cost} είναι το κόστος ενέργειας, L_{cost} είναι το κόστος εργατικών, M_{cost} είναι το κόστος των μηχανισμών και των εργαλείων (γραμμικός ενεργοποιητής (1) + περιστροφικός κινητήρας (1) + υλικό τρισδιάστατης εκτύπωσης + φύλλο αλουμινίου + πνευματικά πιστόνια (2) + αισθητήρες (2) + ξύλο καλουπιού), και CM_{cost} είναι το κόστος κατασκευαστικού υλικού.

Το κόστος κατασκευής του συμβατικού καλουπιού και της συμβατικής διαδικασίας υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{cf} = E_{costCNCmachine} + CM_{cost} + L_{cost} \quad (10)$$

$$C_{cp} = E_{cost} + CM_{cost} + L_{cost} \quad (11)$$

Όπου C_{cf} και C_{cp} είναι το κόστος της κατασκευής του συμβατικού καλουπιού και της συμβατικής διαδικασίας αντίστοιχα.

Όπου E_{cost} είναι το κόστος ενέργειας, L_{cost} το κόστος εργατικών, and CM_{cost} το κόστος του κατασκευαστικού υλικού.

6.8 Ανάλυση και αποτελέσματα κόστους προτεινόμενης και συμβατικής διαδικασίας κατασκευής

Για την κοστολόγηση της διαδικασίας κατασκευής του ευέλικτου καλουπιού λαμβάνονται τιμές για το κόστος των υλικών και των μηχανισμών που χρειάζονται, για τον χρόνο που απαιτείται για την κατασκευή του εργαλείου, την ενέργεια που καταναλώνουν οι μηχανές για την κατασκευή του καλουπιού, το κόστος της καταναλωμένης ενέργειας αλλά και το κόστος των εργατικών [πιν.21]. Το κόστος του ρομποτικού βραχίονα δεν λαμβάνεται υπόψη στην κοστολόγηση της προτεινόμενης διαδικασίας αφού η συμμετοχή του είναι υποστηρικτική και στοχεύει στη συγκράτηση του ευέλικτου καλουπιού σε συγκεκριμένες θέσεις κατά τη διάρκεια παραγωγής των δομοστοιχείων, κάτι το οποίο θα μπορούσε να γίνεται χειροκίνητα και χωρίς επιπλέον κόστος. Το κόστος της ενέργειας υπολογίζεται με βάση τη μονάδα κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο. Αυτές οι τιμές μελετώνται και για τις δύο περιπτώσεις, μη συμβατικής και συμβατικής διαδικασίας κατασκευής. Στο

κόστος των υλικών και των μηχανισμών υπολογίζεται το κόστος αγοράς του γραμμικού ενεργοποιητή, του περιστροφικού κινητήρα, του υλικού για την τρισδιάστατη εκτύπωση, του φύλλου αλουμινίου για το βασικό σκελετό του εργαλείου, των δυο πνευματικών πιστονιών, των τεσσάρων αισθητήρων και του ξύλου για το καλούπι. Για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού χρειάζονται 24 ώρες εργασίας και τα εργατικά ανέρχονται στα 211 € περίπου [πιν.22].

Input

| | | | | | |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|
| $E_{cost(E-et)}$ 2.32 cent/ kWh | $L_{cost(E-et)}$ 211.47€ | $M_{cost(E-et)}$ 472.69€ | $E_{cost(rp)}$ 4.58 cent/ kWh | $CM_{cost(rp)}$ 0.225 cent | $L_{cost(rp)}$ 2.20€ |
|------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------|

Πίνακας 21: Τιμές κόστους υλικών και εργαλείων για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού και της ρομποτικής διαδικασίας

Results

| | | |
|--------------|------------------------|---------------------|
| Total | C_{E-et} 689.392€ | C_{rp} 7.005 € |
|--------------|------------------------|---------------------|

Πίνακας 22: Συνολικό κόστος για την κατασκευή του ευέλικτου καλουπιού και της ρομποτικής διαδικασίας

Για την κατασκευή του συμβατικού καλουπιού υπολογίζεται το κόστος του φύλλου μετάλλου και το κόστος που συμπεριλαμβάνει την ενέργεια που καταναλώνουν οι μηχανές κοπής και συγκόλλησης των φύλλων μετάλλου. Το κόστος της ενέργειας υπολογίζεται με βάση τη μονάδα κόστους ηλεκτρικής ενέργειας στην Κύπρο. Σ' αυτή την αξιολόγηση συμπεριλαμβάνονται τα εργατικά ανά καλούπι τα οποία κοστολογούνται σε 35 € περίπου και απαιτούνται 4 ώρες εργασίας [πιν.23].

Input

| | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| $E_{cost(cf)}$ 21.696 cent/kWh | $CM_{cost(cf)}$ 40 € | $L_{cost(cf)}$ 35.24 € | $E_{cost(cp)}$ 0 cent/kWh | $CM_{cost(cp)}$ 0.225 cent | $L_{cost(cp)}$ 2.93 € |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------|

Πίνακας 23: Τιμές κόστους υλικών και εργαλείων για την κατασκευή του συμβατικού καλουπιού και της συμβατικής διαδικασίας

Results

| | | |
|--------------|---------------------|---------------------|
| Total | C_{cf} 41.65 € | C_{cp} 3.155 € |
|--------------|---------------------|---------------------|

Πίνακας 24: Συνολικό κόστος για την κατασκευή του συμβατικού καλουπιού και της συμβατικής διαδικασίας

Συμπερασματικά, το συνολικό κόστος κατασκευής του ευέλικτου καλουπιού υπολογίζεται στα 689.39 € [πιν.22]. Το κόστος κατασκευής του καλουπιού για τη συμβατική διαδικασία υπολογίζεται στα 41.65 € [πιν.24]. Παρατηρείται μεγάλη διαφορά στο κόστος της ρομποτικής από τη συμβατική διαδικασία λόγω των ενσωματωμένων αυτοματισμών.

6.9 Υπολογισμός χρόνου προτεινόμενης διαδικασίας κατασκευής

Αντίστοιχα, σε αυτό το τμήμα υπολογίζεται η χρονική διάρκεια της προτεινόμενης ρομποτικής διαδικασίας κατασκευής. Στον υπολογισμό λαμβάνεται υπόψη η διαδικασία

παρασκευής του μείγματος και η διαδικασία καλουπώματος-ξεκαλουπώματος. Ο χρόνος προετοιμασίας του δομικού υλικού εκτιμάται στα 10 min, ο χρόνος τοποθέτησης υλικού και κίνησης του ρομποτικού βραχίονα στα 4 min και ο χρόνος ξεκαλουπώματος στα 2 min, εκτός από την περίπτωση του σκυροδέματος που απαιτείται διπλάσιος χρόνος [πιν.25]. Στο Κεφάλαιο 8 -Φυσικά πρωτότυπα και αποτελέσματα, γίνεται σύγκριση των υπολογιζόμενων χρόνων μέσω ψηφιακής διερεύνησης με τους χρόνους που καταγράφονται κατά τη φυσική εκτέλεση της διαδικασίας κατασκευής.

| Υλικό | Χρόνος προετοιμασίας υλικού (min) | Χρόνος τοποθέτησης υλικού και κίνησης ρομποτικού βραχίονα (min) | Χρόνος ξεκαλουπώματος (min) | Υπολογιζόμενος συνολικός χρόνος ψηφιακής ρομποτικής διαδικασίας (min) |
|-------------------|-----------------------------------|---|-----------------------------|---|
| Ωμόπλινθος | 10 | 4 | 2 | 16 |
| Πηλός με τσιμέντο | 10 | 4 | 2 | 16 |
| Σκυρόδεμα | 10 | 4 | 4 | 18 |

Πίνακας 25: Υπολογισμός χρόνου των σταδίων παραγωγής ενός δομοστοιχείου με τη χρήση της ρομποτικής διαδικασίας

6.10 Συμπεράσματα

Η ανάλυση περιβαλλοντικού αντίκτυπου της προτεινόμενης ρομποτικής διαδικασίας αναφέρεται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των δομοστοιχείων και για τα τρία εξεταζόμενα υλικά. Μέσα από τα ποσοτικά αποτελέσματα διαφαίνεται ότι ο ωμόπλινθος είναι η πιο φιλική επιλογή προς το περιβάλλον, τόσο όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα όσο και της απαιτούμενης ενέργειας. Μετά ακολουθεί ο πηλός με τσιμέντο και τέλος το σκυρόδεμα, έχοντας τις μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από τα άλλα δύο υλικά. Ως προς την κατασκευαστική διαδικασία και στις τρεις περιπτώσεις υλικών, όλα τα δομοστοιχεία παράγονται μέσω του ευέλικτου καλουπιού εντός του εργαστηρίου και μεταφέρονται στο εργοτάξιο για τοποθέτηση. Η καταναλώσιμη ενέργεια και στις τρεις περιπτώσεις είναι σχεδόν ίδια με ελαφριά μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στη περίπτωση του ωμόπλινθου, που οφείλεται κυρίως στον τρόπο ωρίμανσης των δομοστοιχείων με τη μέθοδο του φυσικού τρόπου ξήρανσης. Επιπλέον, με την προτεινόμενη μέθοδο κατασκευής, τα απόβλητα είναι μηδενικά αφού υπολογίζεται με ακρίβεια η απαιτούμενη ποσότητα μείγματος για την παραγωγή των τούβλων. Τα αποτελέσματα των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για κάθε δομοστοιχείο αξιολογούνται στο Κεφάλαιο 7 Συγκριτικής αξιολόγησης ψηφιακών σχεδιαστικών λύσεων σε σχέση με τον όγκο και τη θλιπτική αντοχή των τυπολογιών.

Η ανάλυση κόστους αποδεικνύει ότι το κόστος παραγωγής μέσω ρομποτικής διαδικασίας είναι μεγαλύτερο από αυτό της συμβατικής διαδικασίας. Παρόλα αυτά,

αναγνωρίζεται η αποτελεσματικότητα και η βιωσιμότητα της προτεινόμενης διαδικασίας σε σχέση με την συμβατική μέθοδο, αφού αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μαζική παραγωγή πολλαπλών τυπολογιών εξατομικευμένων δομοστοιχείων, σε αντίθεση με τη συμβατική διαδικασία όπου υπάρχει ανάγκη κατασκευής διαφορετικών καλουπιών με διαφορετικές μορφολογίες κάθε φορά. Αυτό αυξάνει το κόστος σε βάθος χρόνου, κάτι το οποίο δε συμβαίνει στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού όπου το κόστος τυγχάνει απόσβεσης. Τέλος, ο υπολογισμός του χρόνου που απαιτείται στα διαφορετικά στάδια της ρομποτικής διαδικασίας προσφέρει μια πρώτη εκτίμηση των δυνατοτήτων της ώστε να επιβεβαιωθούν και αξιολογηθούν τα ευρήματα μέσω της φυσικής εκτέλεσης της διαδικασίας αλλά και της κατασκευής των δομοστοιχείων.

7 ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΣΧΕΔΙΑΣΤΙΚΩΝ ΛΥΣΕΩΝ

7.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τη ψηφιακή διερεύνηση με σκοπό την επιλογή των καλύτερων λύσεων. Επίσης, μέσω της συγκριτικής αξιολόγησης επιλέγονται λύσεις για τη φυσική παραγωγή τους σε επόμενο στάδιο μέσα από τη χρήση του ευέλικτου καλουπιού με βάση τα κριτήρια που έχουν τεθεί στη μεθοδολογία έρευνας (Βλέπε Κεφάλαιο 3). Συγκεκριμένα, γίνεται αξιολόγηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων της θλιπτικής αντοχής των δομοστοιχείων, του όγκου, της υλικότητας και του περιβαλλοντικού αντίκτυπου τους αλλά και του κόστους και του χρόνου κατασκευής τους. Στόχος είναι η επιλογή των κατάλληλων ψηφιακών σχεδιαστικών λύσεων που να ικανοποιούν με τον καλύτερο δυνατό τρόπο τα κριτήρια που έχουν τεθεί. Ακολουθεί η επιλογή χαρακτηριστικών λύσεων για ρομποτική κατασκευή ώστε να εξεταστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού.

7.2 Αρχές συγκριτικής αξιολόγησης λύσεων

Τα κριτήρια συγκριτικής αξιολόγησης των λύσεων αναφέρονται στη μέγιστη στατική συμπεριφορά, στην ελαχιστοποίηση του δομικού υλικού, και στην ελαχιστοποίηση του οικολογικού αποτυπώματος μέσα από την προτεινόμενη διαδικασία κατασκευής των τοιχοσωμάτων. Επομένως, διερευνώνται οι προαναφερόμενοι τύποι των δομοστοιχείων για κάθε εξεταζόμενο δομικό υλικό, οι οποίοι έχουν μέγιστη θλιπτική αντοχή, λιγότερο όγκο υλικού, μικρότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα όπως επίσης ελάχιστο χρόνο και κόστος κατά τη διαδικασία παραγωγής τους. Τα πιο πάνω κριτήρια αξιολογούνται συνδυαστικά και εξάγονται συμπεράσματα για το σύνολο της προτεινόμενης διαδικασίας.

7.3 Αποτελέσματα συγκριτικής αξιολόγησης

7.3.1 Σύγκριση στατικής απόδοσης και όγκου

Στις γραφικές παραστάσεις της εικόνας 52 γίνεται αναπαράσταση των τιμών θλιπτικής αντοχής για τα τρία μείγματα υλικών σε σχέση με τον όγκο των διερευνώμενων τύπων τούβλου. Οι τιμές παρουσιάζονται με βάση τη μεγαλύτερη αντοχή των τούβλων σε θλίψη. Όπως φαίνεται στις γραφικές παραστάσεις, μεγαλύτερη αντοχή εμφανίζουν ως επί το πλείστον οι τυπολογίες με τον μεγαλύτερο όγκο υλικού και στις τρεις περιπτώσεις υλικών (ωμόπλινθος, πηλός με τσιμέντο και σκυρόδεμα). Αντίστοιχα, οι μικρές τιμές αντοχής εμφανίζονται στους τύπους τούβλων με μικρό όγκο υλικού. Επίσης, οι τυπολογίες τούβλων

με περιστροφή των ανοιγμάτων τους παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις αλλά με κάποια ιεραρχία στη σειρά των αποτελεσμάτων της στατικής συμπεριφοράς τους.



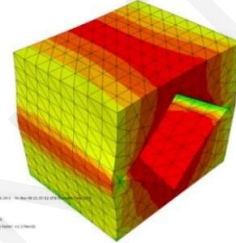
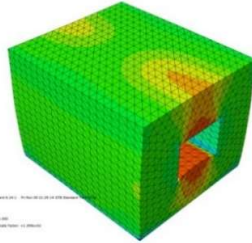
Εικόνα 52: Γραφικές παραστάσεις θλιπτικής αντοχής σε συνάρτηση με τον όγκο των δομοστοιχείων στις περιπτώσεις, α. ωμόπλινθου, β. πηλού με τιμέντο, και γ. σκυροδέμα

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης σε σύγκριση με τον όγκο του κάθε τύπου μονάδας τούβλου, παρατηρούνται μέγιστες τιμές θλιπτικής αντοχής σε όλες τις περιπτώσεις όπου υπάρχει μικρή αφαίρεση υλικού, δηλαδή στις περιπτώσεις τούβλων με μικρές οπές. Οι ελάχιστες τιμές θλιπτικής αντοχής παρατηρούνται στις μονάδες με μεγάλα ανοίγματα. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, η μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής εντοπίζεται στο τούβλο με μικρή μορφοποίηση χωρίς οπή και η ελάχιστη τιμή θλιπτικής αντοχής εντοπίζεται στην περίπτωση μεγάλης οπής. Για τον ωμόπλινθο και τον πηλό, οι μέγιστες τιμές αντοχής παρατηρούνται στις περιπτώσεις τούβλων με μικρή οπή ενώ η ελάχιστη τιμή εντοπίζεται στην περίπτωση μεγάλης οπής. Στις γραφικές παραστάσεις

[εικ.52] φαίνεται η αυξητική τάση της αντοχής καθώς παρατηρείται μη γραμμική αύξηση του όγκου του δομικού υλικού.

Στην περίπτωση του ωμόπλινθου παρατηρείται σε όλους τους τύπους τούβλων με όγκο 0.0018 m^3 μέγιστη θλιπτική αντοχή [εικ.53]. Είναι τύποι τούβλων χωρίς οπή και ελάχιστη αφαίρεση υλικού. Για τους τύπους τούβλων με όγκο υλικού 0.001 m^3 παρατηρείται ελάχιστη θλιπτική αντοχή, αφού είναι τυπολογίες με μεγάλο άνοιγμα σε στροφή.

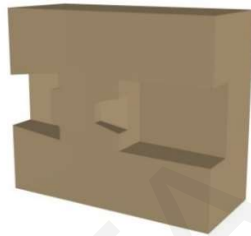
Adobe
S-S₂₂
diagram



Maximum value - compressive strength: T3_{min}-0

Minimum value - compressive strength: T1_{max}-45

Model in
axonomic
section



T3_{min}-0

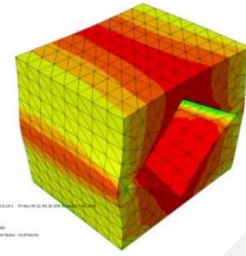
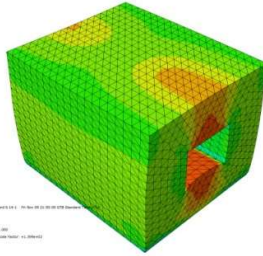


T1_{max}-45

Εικόνα 53: Περίπτωση μέγιστης και ελάχιστης θλιπτικής αντοχής για τον ωμόπλινθο

Στους τύπους τούβλων από πηλό με τσιμέντο, μέγιστη τιμή θλιπτικής αντοχής παρατηρείται κυρίως στα τούβλα με τον μέγιστο δυνατό όγκο, δηλαδή 0.0018 m^3 . Τυπολογίες τούβλων με όγκο 0.001 m^3 εμφανίζουν ελάχιστες τιμές θλιπτικής αντοχής. Στην πρώτη περίπτωση, είναι τύποι τούβλων χωρίς οπή με ελάχιστη αφαίρεση υλικού, ενώ στην δεύτερη περίπτωση είναι τούβλα με μεγάλα και μικρά ανοίγματα σε στροφή [εικ.54].

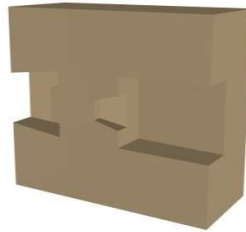
Clay
S-S₂₂
diagram



Maximum value - compressive strength: T3_{min-0}

Minimum value - compressive strength: T1_{max-45}

Model in
axonometric
section



T3_{min-0}

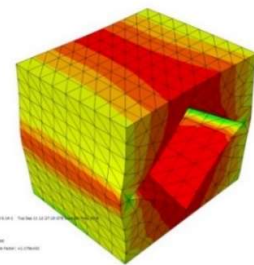
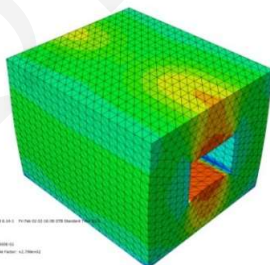


T1_{max-45}

Εικόνα 54: Περίπτωση μέγιστης και ελάχιστης θλιπτικής αντοχής για τον πηλό

Για τους τύπους τούβλων από σκυρόδεμα, μέγιστη θλιπτική αντοχή εμφανίζεται σε αυτούς με όγκο 0.0018 m³ και 0.0016 m³ και ελάχιστη θλιπτική αντοχή στα τούβλα με όγκο υλικού 0.001 m³ και 0.0014 m³. Στην πρώτη περίπτωση τα τούβλα είναι με ελάχιστη οπή χωρίς στροφή και με οπή σε στροφή καθώς και τούβλα χωρίς οπή με ελάχιστη αφαίρεση υλικού. Στην δεύτερη περίπτωση παρατηρούνται τύποι τούβλων με οπή και μεγάλη αφαίρεση υλικού [εικ.55].

Concrete
S-S₂₂
diagram



Maximum value - compressive strength: T3_{min-15}

Minimum value - compressive strength: T1_{max-45}

Model in
axonometric
section



T3_{min-15}



T1_{max-45}

Εικόνα 55: Μέγιστη και ελάχιστη θλιπτική αντοχή στην περίπτωση του σκυροδέματος

7.3.2 Σύγκριση αποτελεσμάτων κύκλου ζωής, στατικής απόδοσης και όγκου τυπολογιών

Ο πίνακας 26 και οι γραφικές παραστάσεις της εικόνας 56 παρουσιάζουν τις διερευνώμενες τυπολογίες σε συνάρτηση με τον όγκο τους, τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής και τις τιμές εκπομπών των τριών υλικών. Οι τιμές θλιπτικής αντοχής, οι τιμές των εκπομπών και ο όγκος όλων των διερευνώμενων δειγμάτων συγκρίνονται ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά την βιωσιμότητα της κάθε περίπτωσης.

| Volume (m ³) | Typologies | LCA (kgCO ₂) adobe | LCA (kgCO ₂) concrete | LCA (kgCO ₂) clay |
|--------------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| 0.001 | T1 _{max-0} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| 0.001 | T1 _{max-15} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| 0.001 | T1 _{max-25} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| 0.001 | T1 _{max-45} | 4.65E+00 | 5.02E+00 | 4.73E+00 |
| 0.0012 | T1 _{min-0} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| 0.0012 | T1 _{min-15} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| 0.0012 | T1 _{min-25} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| 0.0012 | T1 _{min-45} | 4.66E+00 | 5.07E+00 | 4.81E+00 |
| 0.0014 | T2 _{max-0} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0014 | T2 _{max-15} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0014 | T2 _{max-25} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0014 | T2 _{max-45} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0016 | T2 _{min-0} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0016 | T2 _{min-15} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0016 | T2 _{min-25} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0016 | T2 _{min-45} | 4.66E+00 | 5.18E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0014 | T3 _{max-0} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0014 | T3 _{max-15} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0014 | T3 _{max-25} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0014 | T3 _{max-45} | 4.66E+00 | 5.13E+00 | 4.82E+00 |
| 0.0018 | T3 _{min-0} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0018 | T3 _{min-15} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0018 | T3 _{min-25} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |
| 0.0018 | T3 _{min-45} | 4.67E+00 | 5.26E+00 | 4.98E+00 |

Πίνακας 26: Πίνακας αποτελεσμάτων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και όγκου για κάθε δομοστοιχείο από ωμόπλινθο, πηλό με τσιμέντο και σκυρόδεμα

Στις γραφικές παραστάσεις με κόκκινη γραμμή παρατηρείται η διαμόρφωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα από τις μικρότερες προς τις μεγαλύτερες τιμές. Όπως προαναφέρθηκε, με την αύξηση του όγκου του δομοστοιχείου, σταδιακά αυξάνονται οι εκπομπές και στις τρεις περιπτώσεις δομικών υλικών. Οι βέλτιστες λύσεις μπορούν να οριστούν στο μεταξύ διάστημα των μέγιστων και ελάχιστων τιμών της θλιπτικής αντοχής και των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση του ωμόπλινθου στην γραφική α [εικ.56], ενώ η τιμή των εκπομπών δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις,

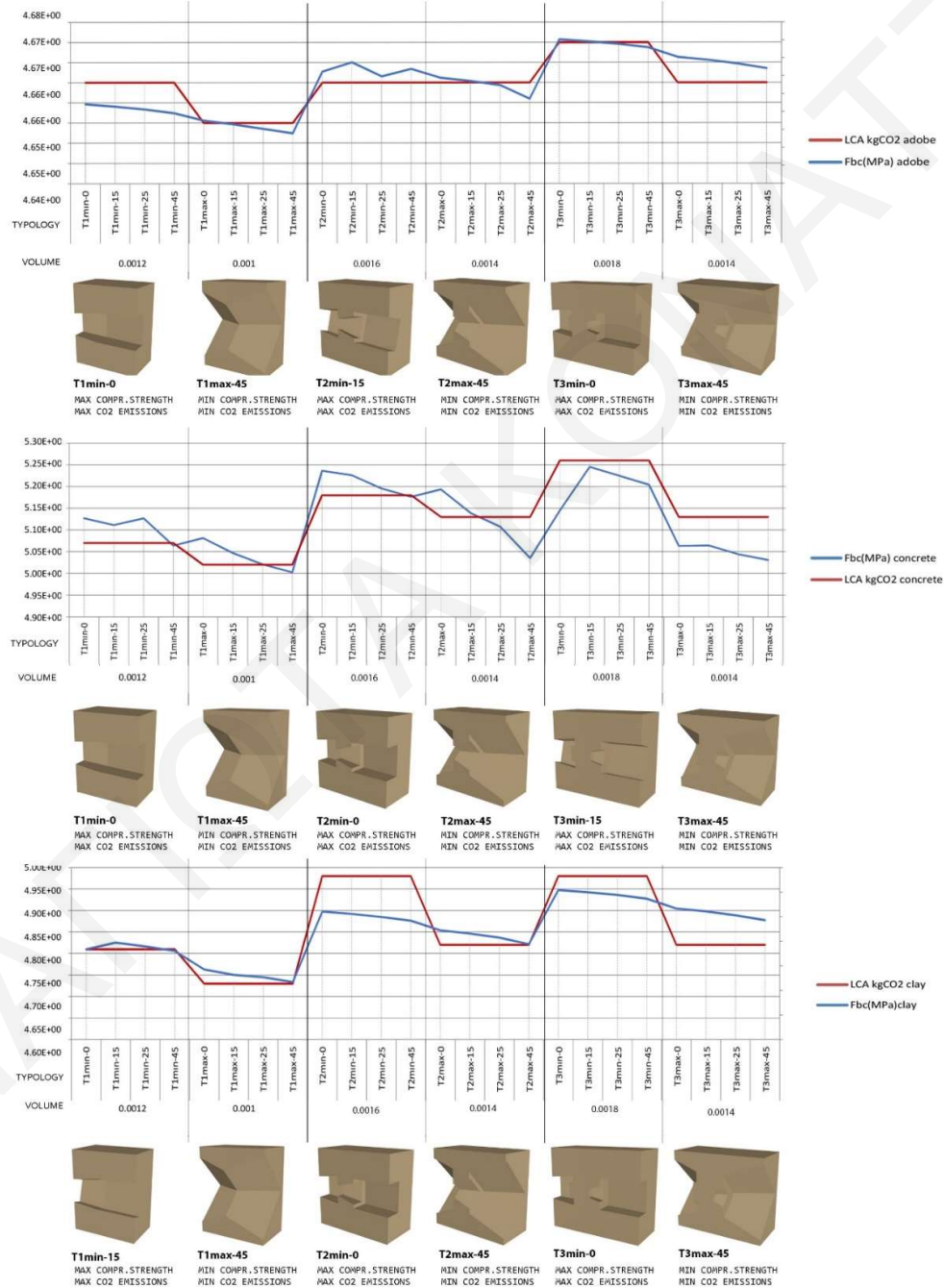
μειώνεται σταδιακά η θλιπτική αντοχή των δομοστοιχείων. Στην γραφική παράσταση b [εικ. 56] όσον αφορά το σκυρόδεμα, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και θλιπτική αντοχή έχουν αυξητική παράλληλη τάση. Η θλιπτική αντοχή παρουσιάζει μέγιστες και ελάχιστες τιμές σε κάποιες περιπτώσεις. Στην γραφική παράσταση c [εικ.56] οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η θλιπτική αντοχή του πηλού παρουσιάζουν ομαλή διακύμανση εκτός από κάποιες περιπτώσεις με μέγιστες και ελάχιστες τιμές θλιπτική αντοχής. Για τον ωμόπλινθο, ως βέλτιστη λύση εντοπίζεται αυτή του τύπου τούβλου $T2_{\min-0}$ με θλιπτική αντοχή 0.31 MPa, η οποία είναι εντός των ορίων του Eurocode 6 για τοιχοσώματα, με 0.0016 m^3 όγκο υλικού και 4.66 kg CO₂ εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Για την ίδια τιμή εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα, μέγιστες τιμές θλιπτικής αντοχής εντοπίζονται και στους τύπους τούβλων $T2_{\min-25}$ (μικρό άνοιγμα, 25° περιστροφή) και $T3_{\max-0}$ (μεγάλο άνοιγμα, 0° περιστροφή), με θλιπτική αντοχή 0.298 MPa και 0.352 MPa, αντίστοιχα.

Για την περίπτωση του πηλού, από τη γραφική παράσταση b [εικ.56] διαφαίνεται ότι η μέγιστη αντοχή του δομοστοιχείου εντοπίζεται στις περιπτώσεις τούβλων $T1_{\max-0}$, $T1_{\max-15}$, $T2_{\max-0}$ και $T3_{\max-0}$. Αντίστοιχα, σ' αυτές τις περιπτώσεις παρατηρείται κλιμακωτή αύξηση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Στην περίπτωση $T1_{\max-0}$ προκύπτει 0.14 MPa θλιπτική αντοχή με 0.001 m^3 όγκο υλικού και ελάχιστο περιβαλλοντικό αποτύπωμα στα 4.73 kg CO₂. Στην περίπτωση $T3_{\max-0}$, η μέγιστη θλιπτική αντοχή είναι 0.266 MPa, ο όγκος υλικού 0.0014 m^3 και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα 4.83 kg CO₂.

Για το σκυρόδεμα, οι τύποι τούβλων για τους οποίους η θλιπτική αντοχή εμπίπτει στα όρια του Eurocode 6 για τοιχοσώματα, είναι το τούβλο $T1_{\min-0}$, το οποίο είναι μικρού ανοίγματος χωρίς περιστροφή με όγκο 0.0014 m^3 και 5.13 kg CO₂ εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, το τούβλο τύπου $T2_{\max-0}$ με μεγάλο άνοιγμα χωρίς περιστροφή, θλιπτική αντοχή 29.35 MPa, 5.14 kg CO₂ εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και 0.0014 m^3 όγκο υλικού.

Μέσα από την πιο πάνω διερεύνηση παρατηρείται ότι οι τυπολογίες $T1_{\min}$, $T2_{\min}$ και $T3_{\min}$ [εικ.56] και για τα τρία υλικά διερεύνησης, σε όλες τις περιπτώσεις μικρών ανοιγμάτων στα τούβλα, παρουσιάζουν μεγαλύτερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Συμπεραίνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις όπου ο όγκος υλικού είναι μεγάλος, υπάρχει αντίστοιχη αύξηση των ρύπων. Όπως προαναφέρθηκε, στην περίπτωση του ωμόπλινθου παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές όσον αφορά τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Επίσης, η αύξηση του όγκου των δομοστοιχείων από ωμόπλινθο, δεν προκαλεί μεγάλες αυξήσεις των εκπομπών αφού αυτές διατηρούνται σε χαμηλές τιμές. Για όλα τα υλικά έχουμε την βέλτιστη οικολογική συμπεριφορά στην κατηγορία τυπολογίας T1 των

δομοστοιχείων, δηλαδή σε περιπτώσεις με τον ελάχιστο όγκο. Όσον αφορά την τιμή θλιπτικής αντοχής, συγκριτικά μεταξύ των τυπολογιών παρατηρούνται μέγιστες τιμές στα μικρά ανοίγματα ενώ στα μεγάλα ανοίγματα παρατηρούνται ελάχιστες τιμές. Επιπλέον, με την αύξηση της περιστροφής, η θλιπτική αντοχή στις πλείστες των περιπτώσεων μειώνεται σταδιακά από τις 0° στις 45° στροφής όπως φαίνεται στις γραφικές [εικ.56].



Εικόνα 56: Γραφικές παραστάσεις εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και θλιπτικής αντοχής για όλες τις τυπολογίες τούβλων με βάση τα τρία εξεταζόμενα υλικά

Όπως προαναφέρθηκε, η επιλογή που μπορεί να χαρακτηριστεί πιο φιλική προς το περιβάλλον είναι αυτή του ωμόπλινθου. Σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων που συσχετίζουν θλιπτική αντοχή με όγκο, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής των περιπτώσεων με τη μεγαλύτερη αντοχή και τον ελάχιστο υλικό. Το σκυρόδεμα και ο πηλός με τσιμέντο είναι δύο υλικά λιγότερο φιλικά προς το περιβάλλον, επομένως οι καλύτερες περιπτώσεις θα ήταν αυτές με ελάχιστο υλικό και μέγιστη θλιπτική αντοχή. Επιπλέον, είναι προφανές από τα αποτελέσματα ότι στις περιπτώσεις μικρών ανοιγμάτων παρουσιάζεται μεγάλη θλιπτική αντοχή των δομοστοιχείων, λόγω και του μεγαλύτερου όγκου υλικού που προκύπτει σε αυτές τις περιπτώσεις. Αντίστοιχα, παρατηρείται μικρότερη αντοχή στα δομοστοιχεία με μεγάλα ανοίγματα και επομένως μεγάλη αφαίρεση όγκου του δομοστοιχείου, κάτι το οποίο συμβαίνει και στις τρεις περιπτώσεις των υλικών που εξετάζονται.

7.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων απόδοσης ευέλικτου και συμβατικού καλουπιού με βάση κριτήρια χρόνου, κόστους και περιβαλλοντικού αντίκτυπου

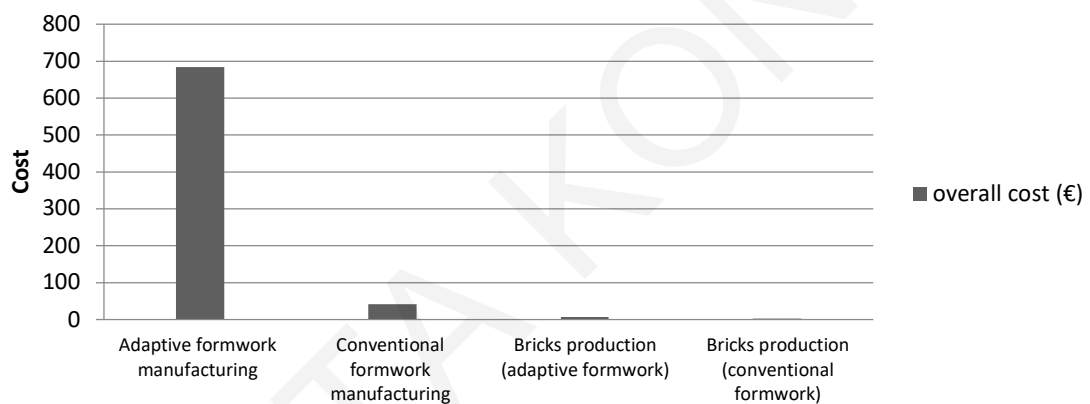
Το προτεινόμενο ευέλικτο καλούπι στην μορφή ενός αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης έχει την δυνατότητα παραγωγής πολλαπλών δομοστοιχείων σύμφωνα με τις εκάστοτε λειτουργικές ανάγκες ηλιασμού-σκίασης των σχεδιαστικών λύσεων προς διερεύνηση. Οι παράμετροι σχεδιασμού και κατασκευής ενσωματώνονται στο προτεινόμενο ερευνητικό πλαίσιο και υποστηρίζουν την διαδικασία διερεύνησης των καλύτερων λύσεων με βάση τους στόχους και τα κριτήρια, τα οποία αναπτύχθηκαν σε προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας διατριβής.

- Χρόνος

Όσον αφορά το χρόνο που απαιτείται σε κάθε περίπτωση, παρατηρείται σημαντική διαφορά μεταξύ του χρόνου της αυτοματοποιημένης και της συμβατικής διαδικασίας. Στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού, ο χρόνος παραγωγής ενός δομοστοιχείου υπολογίζεται σε 3 min ενώ στην περίπτωση του συμβατικού καλουπιού, ο χρόνος διεκπεραίωσης της διαδικασίας από το εργατικό προσωπικό υπολογίζεται σε 20 min για κάθε τούβλο. Συμπερασματικά, η παραγωγή πολλαπλών διαφοροποιημένων δομοστοιχείων με το συμβατικό καλούπι χαρακτηρίζεται ως χρονοβόρα διαδικασία σε σύγκριση με την παραγωγή αντίστοιχων δομοστοιχείων με τη χρήση του ευέλικτου εργαλείου, όπου παράγονται περισσότερα δομοστοιχεία ανά λεπτό.

- Κόστος

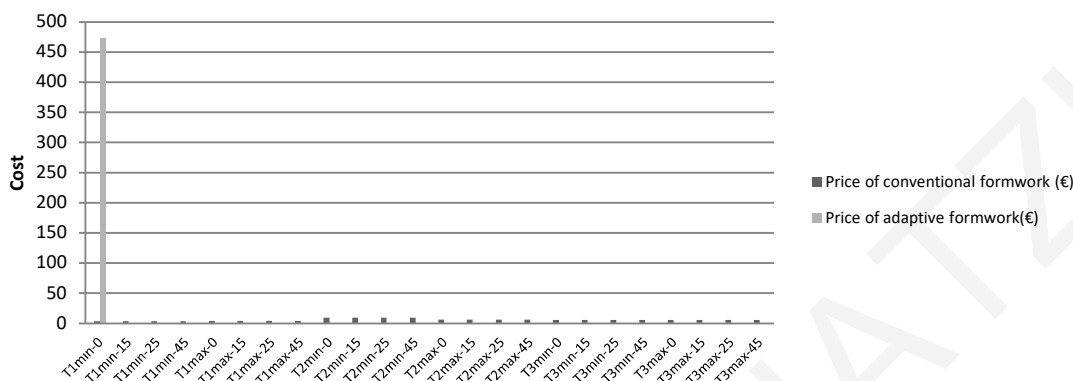
Για τη σύγκριση της προτεινόμενης αυτοματοποιημένης διαδικασίας κατασκευής με μια συμβατική όσον αφορά το κόστος παραγωγής δομοστοιχείων με ίδιες διαφοροποιήσεις της γεωμετρίας τους, διερευνάται τόσο το κόστος κατασκευής των καλουπιών όσο και το κόστος παραγωγής των δομοστοιχείων. Στην περίπτωση του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού, το κόστος κατασκευής του, συμπεριλαμβανομένων των μηχανισμών, της ενέργειας και το κόστος εργατοωρών, υπολογίζεται στα 689.39 Euro αλλά αυτό μετριέται μόνο μια φορά στη συνολική διαδικασία [εικ.57]. Στην περίπτωση συμβατικού καλουπιού, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος υλικού του καλουπιού, την ενέργεια και το κόστος των εργατοωρών, αυτό υπολογίζεται σε 40 Euro αλλά παράγει ένα τύπο γεωμετρίας τούβλου κάθε φορά [εικ.57].



Εικόνα 57: Γραφική κόστους των διαδικασιών κατασκευής των καλουπιών καθώς και της αυτοματοποιημένης και της συμβατικής διαδικασίας παραγωγής τούβλων με το ευέλικτο και το συμβατικό καλούπι.

Με την αύξηση του αριθμού των τούβλων προς παραγωγή, το κόστος της συμβατικής διαδικασίας αλλά και ο απαιτούμενος χρόνος της πολλαπλασιάζονται σε αντίθεση με την περίπτωση χρήσης του ευέλικτου καλουπιού όπου το κόστος του καλουπιού υπολογίζεται μόνο μια φορά. Έτσι, σε κάθε μια από τις κατασκευασμένες δομές υπολογίζεται μόνο το κόστος παραγωγής του τούβλου χωρίς να υπολογίζεται το κόστος του καλουπιού [πιν.27]. Το κόστος παραγωγής του κάθε δομοστοιχείου, στην περίπτωση χρήσης του ευέλικτου καλουπιού είναι 7 Euro/h ενώ στην περίπτωση του συμβατικού καλουπιού είναι 3.15 Euro/h. Στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού, το αυξημένο κόστος παραγωγής των δομοστοιχείων οφείλεται στην ενέργεια που καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της αυτοματοποιημένης διαδικασίας, σε αντίθεση με την ενέργεια που καταναλώνεται στη συμβατική διαδικασία, η οποία είναι μηδενική. Αντίθετα, το κόστος των εργατοωρών για την κατασκευή του συμβατικού καλουπιού, την εναπόθεση του υλικού στο

καλούπι και το ξεκαλούπωμα του τούβλου είναι μεγαλύτερα σε σύγκριση με τη ρομποτική διαδικασία.



Εικόνα 58: Συγκριτικό γράφημα που δείχνει το κόστος υλικών και μηχανισμών για την κατασκευή του ευέλικτου και του συμβατικού καλουπιού για όλες τις τυπολογίες τούβλων. Στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού, το κόστος υπολογίζεται μια φορά ενώ στην περίπτωση του συμβατικού καλουπιού είναι πολλαπλάσιο του αριθμού των τούβλων προς διερεύνηση

Στην εικόνα 58 παρουσιάζεται αναλυτικά το κόστος των υλικών και των μηχανισμών για την κατασκευή τόσο του ευέλικτου καλουπιού όσο και των πολλαπλών συμβατικών. Στην περίπτωση του συμβατικού καλουπιού γίνεται κοστολόγηση για κάθε διαφορετική τυπολογία δομοστοιχείου, η οποία συμπεριλαμβάνει το κόστος του φύλλου του μετάλλου που απαιτείται και έτσι παρατηρούνται ελαφρές αυξομειώσεις του κόστους σε κάθε περίπτωση. Υπολογίζοντας το κόστος των υλικών και των μηχανισμών που απαιτούνται στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού και το κόστος των συμβατικών καλουπιών, όπως φαίνεται στη γραφική [εικ.58], απαιτούνται 472.69 Euros για το ευέλικτο καλούπι και 4-9.5 Euros για το κάθε συμβατικό καλούπι. Στο σενάριο κατασκευής συμβατικών καλουπιών για την μαζική βιομηχανική παραγωγή δομοστοιχείων με πολλαπλές μορφολογίες, το κόστος αυξάνεται για κάθε νέο καλούπι σε αντίθεση με το σενάριο χρήσης του ευέλικτου καλουπιού, όπου το κόστος παραμένει σταθερό για οποιαδήποτε παραγόμενη τυπολογία [πιν.27].

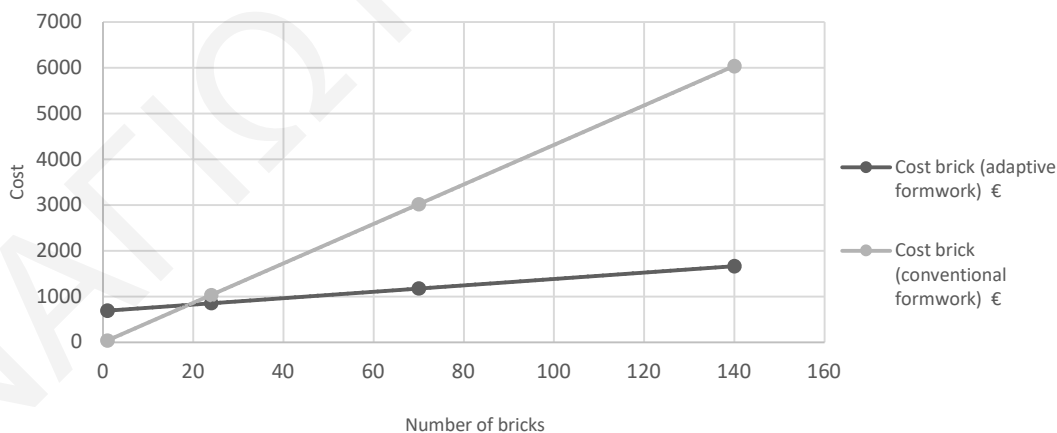
- Μαζική εξατομικευμένη παραγωγή

Στην περίπτωση σεναρίου μαζικής εξατομικευμένης παραγωγής γίνεται υπολογισμός παραγωγής πολλαπλών δομοστοιχείων με τη χρήση του ευέλικτου καλουπιού αλλά και με τη χρήση του συμβατικού καλουπιού ώστε να γίνει αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας και της δυνατότητας απόσβεσης κόστους της προτεινόμενης μεθόδου. Στον πίνακα 27 φαίνεται το τελικό κόστος για διαφορετικούς αριθμούς δομοστοιχείων και για τις δύο περιπτώσεις. Το τελικό κόστος συμπεριλαμβάνει το κόστος κατασκευής του καλουπιού και το κόστος παραγωγής του κάθε δομοστοιχείου.

| Number of bricks | Total cost of bricks (adaptive formwork) € | Total cost of bricks (conventional formwork) € |
|------------------|---|---|
| 1 | 696.39 | 43.15 |
| 24 | 857.39 | 1035.6 |
| 70 | 1179.39 | 3020.5 |
| 140 | 1669.39 | 6041.0 |

Πίνακας 27: Τιμές συνολικού κόστους κατασκευής καλουπιού και παραγωγή εξατομικευμένων δομοστοιχείων για την προτεινόμενη ρομποτική και τη συμβατική διαδικασία

Στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού το κόστος παραγωγής για τις 24 διαφορετικές μορφολογήσεις που προτείνονται είναι περίπου 857.39 €. Στην περίπτωση παραγωγής 140 δομοστοιχείων το κόστος είναι στα 1669.39 € όπως φαίνεται στον πίνακα 27. Αντίστοιχα, το κόστος παραγωγής 140 δομοστοιχείων με τη συμβατική μέθοδο υπολογίζεται στα 6041.0 €, το οποίο συγκριτικά είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με την αυτοματοποιημένη διαδικασία. Σύμφωνα με τη γραφική [εικ.59] το κόστος παραγωγής εξατομικευμένων στοιχείων με την προτεινόμενη μέθοδο τυγχάνει σταδιακής εξισορρόπησης ενώ αυξάνεται ο αριθμός των δομοστοιχείων προς παραγωγή. Αντίθετα, στην περίπτωση του συμβατικού καλουπιού το κόστος είναι σταθερά ανοδικό αφού κάθε φορά είναι πολλαπλάσιο σε σχέση με τον αριθμό των παραγόμενων δομοστοιχείων. Συμπεραίνεται ότι το κόστος της διαδικασίας μέσω του ευέλικτου καλουπιού είναι βιώσιμο και τυγχάνει σύντομης απόσβεσης με την αύξηση των παραγόμενων δομοστοιχείων.



Εικόνα 59: Γραφική παράσταση αύξησης του κόστους μαζικής εξατομικευμένης παραγωγής σε σχέση με τον αριθμό των δομοστοιχείων για την προτεινόμενη και τη συμβατική διαδικασία

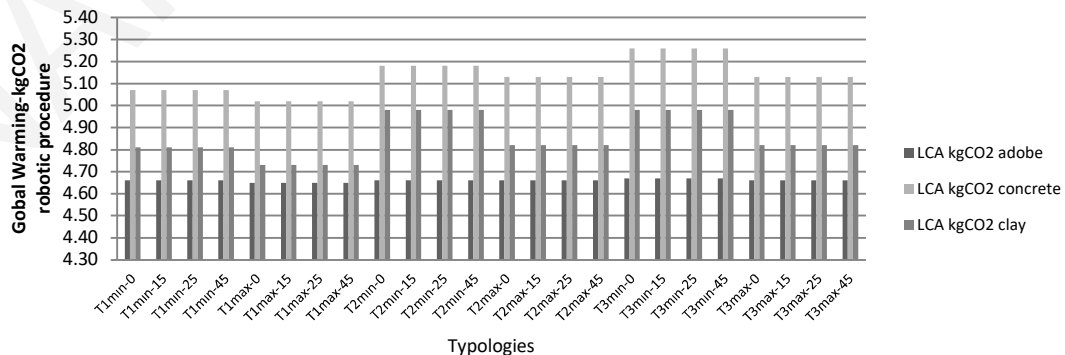
- Περιβαλλοντικός αντίκτυπος

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα, παρατηρείται ότι οι μειωμένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν, για παράδειγμα στην περίπτωση του ωμόπλινθου,

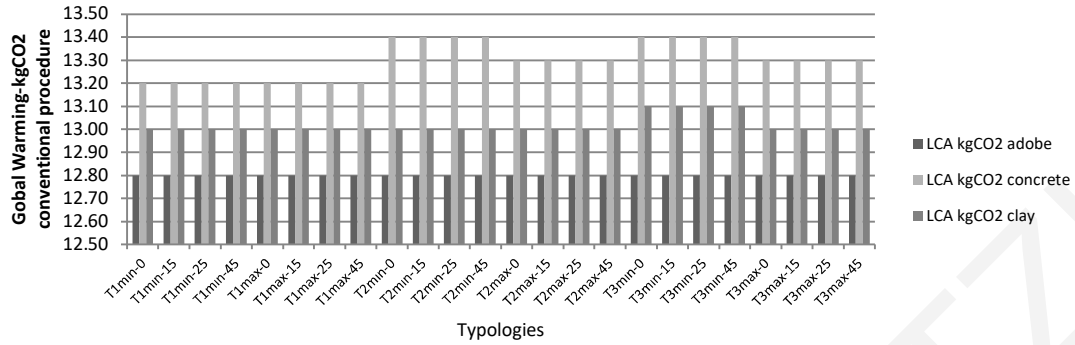
οφείλονται κυρίως στον τρόπο ωρίμανσης των δομοστοιχείων με τη μέθοδο της ξήρανσης και όχι τη χρήση θερμικής εστίας, κάτι το οποίο αποτελεί ένα φυσικό τρόπο ωρίμανσης των υλικών χωρίς την κατανάλωση ενέργειας. Επιπρόσθετα, επιτρέπει αλλά και διευκολύνει τη διαδικασία κατεδάφισης της τοιχοποιίας και επαναχρησιμοποίησης της πρώτης ύλης του τούβλου. Πέρα από τα πιο πάνω, με την προτεινόμενη μέθοδο κατασκευής της τοιχοποιίας τα απόβλητα είναι μηδενικά αφού υπολογίζεται με ακρίβεια η απαιτούμενη ποσότητα μείγματος για την παραγωγή των τούβλων.

Στο στάδιο εξαγωγής των πρώτων υλών, μέγιστες εκπομπές kg CO₂ παρατηρούνται στο σκυροδέμα. Στο στάδιο κατασκευής και προσαρμογής της τοιχοποιίας, επειδή ακολουθείται κοινή κατασκευαστική διαδικασία και για τα τρία υλικά, η καταναλώσιμη ενέργεια είναι σχεδόν ίση καθώς επίσης και οι εκπομπές kg CO₂. Στο τέλος ζωής της τοιχοποιίας, οι διαδικασίες που απαιτούνται για την επιστροφή των υλικών σε μορφή με δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης, χρειάζονται περισσότερη ενέργεια στην περίπτωση του πηλού με τσιμέντο και στη συνέχεια στις περιπτώσεις του σκυροδέματος και του ωμόπλινθου. Το ίδιο παρατηρείται και για τις εκπομπές kg CO₂.

Συγκριτικά, όσον αφορά τα τρία δομικά υλικά, το μεγαλύτερο ποσοστό εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα εμφανίζεται στο στάδιο εξόρυξης και παραγωγής τους. Επιπλέον, στο στάδιο κατασκευής χρησιμοποιείται μεγάλο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας. Συνολικά, στα στάδια A1-A3 και A5 παρατηρούνται τα μέγιστα ποσοστά εκπομπών και κατανάλωσης ενέργειας. Σε σύγκριση με τον ωμόπλινθο και τον πηλό με τσιμέντο, στην περίπτωση του σκυροδέματος παρατηρούνται οι μεγαλύτερες τιμές εκπομπών σε όλα τα τμήματα της διερεύνησης [εικ. 60 και 61]. Αντίστοιχα, συγκρίνοντας και τα τρία υλικά, στην περίπτωση του ωμόπλινθου παρατηρούνται οι μικρότερες τιμές εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και κατανάλωσης ενέργειας.

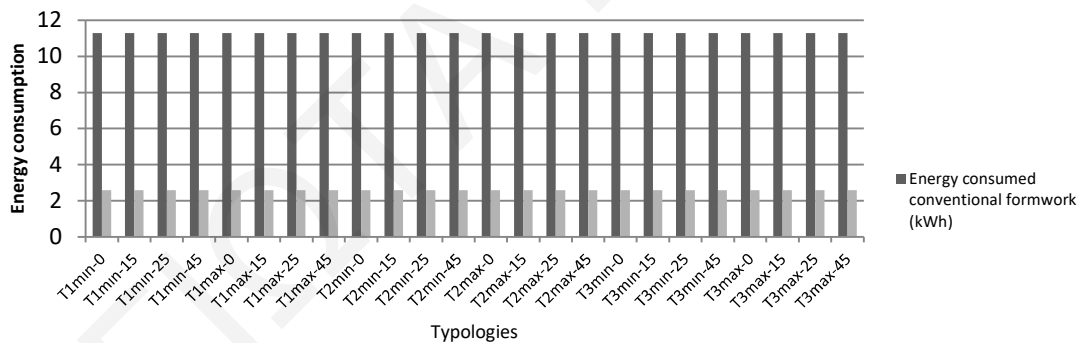


Εικόνα 60: Διάγραμμα τιμών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις τυπολογίες τούβλων στην περίπτωση της αυτοματοποιημένης διαδικασίας



Εικόνα 61: Διάγραμμα τιμών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για όλες τις τυπολογίες τούβλων στην περίπτωση της συμβατικής διαδικασίας

Όσον αφορά την ενέργεια που απαιτείται για την κατασκευή των δομοστοιχείων με το ευέλικτο καλούπι, αυτή είναι μικρότερη σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο [εικ.62]. Στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται εργαλεία και μηχανισμοί με σταθερή χαμηλή κατανάλωση ενέργειας σε αντίθεση με τη συμβατική μέθοδο όπου για την παραγωγή νέων καλουπιών κάθε φορά καταναλώνεται επιπλέον ενέργεια. Παρόλα αυτά, η συμβατική διαδικασία παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά το καλούπωμα-ξεκαλούπωμα, αφού κατά τη συμβατική μέθοδο έχουμε μηδενική κατανάλωση ενέργειας.



Εικόνα 62: Γραφική παράσταση σύγκρισης καταναλωμένης ενέργειας μεταξύ αυτοματοποιημένης και συμβατικής διαδικασίας για όλες τις τυπολογίες των δομοστοιχείων

7.4 Συμπεράσματα

Τα ποσοτικά αποτελέσματα που αναφέρονται στην θλιπτική αντοχή σε συνδυασμό με την περιβαλλοντική απόδοση και τον όγκο των δομοστοιχείων συγκρίνονται μεταξύ τους και αλληλοτροφοδοτούν την διαδικασία εξαγωγής αποτελεσμάτων. Η σύγκριση της θλιπτικής αντοχής με τον όγκο των δομοστοιχείων βοηθά την διαδικασία επιλογής τυπολογιών με μεγάλη θλιπτική αντοχή και ελάχιστη χρήση υλικού. Η σύγκριση της θλιπτικής αντοχής με τον όγκο των δομοστοιχείων και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ενισχύουν την επιλογή για την κατασκευή τοιχοσωμάτων με επαρκή θλιπτική αντοχή, ελάχιστο δομικό υλικό και μειωμένους περιβαλλοντικούς ρύπους. Πολύ σημαντική είναι η

επιλογή του κατάλληλου κατασκευαστικού υλικού, ώστε να επιτυγχάνεται ελαχιστοποίηση των ρύπων και της ενέργειας τόσο των δομικών στοιχείων όσο και της κατασκευαστικής διαδικασίας στο σύνολο της.

Επιπλέον, ένα σημαντικό κριτήριο διερεύνησης έχει να κάνει με την ελαχιστοποίηση του χρόνου παραγωγής αλλά και του κόστους, το οποίο προκύπτει από το προτεινόμενο εργαλείο τελικής δράσης. Επιδίωξη είναι η ανάπτυξη μιας μη δαπανηρής κατασκευαστικής διαδικασίας με τη χρήση του ευέλικτου καλουπιού. Σε σύγκριση με τη συμβατική μέθοδο παραγωγής δομοστοιχείων, η προτεινόμενη μεθοδολογία εμφανίζεται να υπερτερεί όσον αφορά τον απαιτούμενο χρόνο κατασκευής και να επιτυγχάνει μείωση των ρύπων. Όσον αφορά το κόστος της, λόγω του αυξημένου κόστους του ευέλικτου καλουπιού, εμφανίζεται να είναι πιο ακριβή στην περίπτωση παραγωγής ενός δομοστοιχείου αλλά αυτό τυγχάνει σταδιακής απόσβεσης μέσα από τη δυνατότητα του ευέλικτου μηχανισμού να χρησιμοποιείται στην μαζική εξατομικευμένη παραγωγή πολλαπλών μορφολογιών με ελάχιστο επιπλέον κόστος και σε λιγότερο χρόνο. Τέλος, η σύγκριση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου της προτεινόμενης ρομποτικής διαδικασίας με την αντίστοιχη συμβατική εμφανίζει μικρότερες τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και για τις τρεις περιπτώσεις των δομικών υλικών. Αυτό συμβαίνει λόγω του υλικού που χρησιμοποιείται για την κατασκευή κάθε διαφορετικού καλουπιού στην περίπτωση της συμβατικής διαδικασίας, αντίθετα με το ευέλικτο καλούπι όπου δεν χρειάζεται περισσότερη σπατάλη υλικού για διαφορετικές μορφολογίες δομοστοιχείων.

8 ΦΥΣΙΚΑ ΠΡΩΤΟΤΥΠΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

8.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφεται η διαδικασία φυσικής παραγωγής επιλεγμένων δομοστοιχείων που έχουν εξεταστεί σε προηγούμενα κεφάλαια με τη χρήση της προτεινόμενης αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής διαδικασίας. Για το σκοπό αυτό, γίνονται κάποιες προσαρμογές του προτεινόμενου ευέλικτου καλουπιού που λειτουργεί ως εργαλείο τελικής δράσης στο άκρο του ρομποτικού βραχίονα για σκοπούς πειραματισμού στην παραγωγή τούβλων με προκαθορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά. Η διερεύνηση στοχεύει, πέρα από την παραγωγή των δομοστοιχείων, στην αξιολόγηση των φυσικών αποτελεσμάτων αλλά και της διαδικασίας στο σύνολο της. Τα κριτήρια αξιολόγησης αναφέρονται στη λειτουργικότητα του εργαλείου, στη δυνατότητα ακριβούς μορφοποίησης των επιλεγμένων μορφών σε πραγματική κλίμακα καθώς και στον απαιτούμενο χρόνο παραγωγής τους.

8.2 Εισαγωγή στην πειραματική διερεύνηση

Η πειραματική διερεύνηση της αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής διαδικασίας σε πραγματική κλίμακα, βοηθά στον έλεγχο του προτεινόμενου σεναρίου και κατ' επέκταση στην αποτελεσματικότητα του συνόλου της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Παράλληλα εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα όσον αφορά το χρόνο κατασκευής με βάση τον απαιτούμενο χρόνο πήξης του δομικού υλικού μέχρι την αφαίρεση του καλουπιού. Επιπλέον, ελέγχεται η στατική συμπεριφορά των παραγόμενων πρωτοτύπων κατά τη διαδικασία ωρίμανσης τους και η ακρίβεια της ρομποτικής διαδικασίας μέσα από τον γεωμετρικό έλεγχο των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται τρεις φορές, όσες και τα δομικά υλικά προς εξέταση.

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων επιλέγεται μία (1) περίπτωση της τυπολογίας T1 ($T1_{\max-45}$) και δύο (2) περιπτώσεις της τυπολογίας T3 ($T3_{\min-0}$ και $T3_{\max-0}$). Στην περίπτωση της T1, οι γεωμετρίες που επιλέγονται έχουν τη μικρότερη θλιπτική αντοχή με βάση την στατική ανάλυση και στην περίπτωση της T3 επιλέγονται περιπτώσεις με τη μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή. Ο λόγος της επιλογής των πιο πάνω περιπτώσεων έχει να κάνει με τον έλεγχο της μορφοποίησης, της στατικότητας και της κατασκευασιμότητας τους. Στην περίπτωση μοντέλου $T1_{\max-45}$ με την ελάχιστη θλιπτική αντοχή και τη μεγάλη οπή σε περιστροφή 45° , ελέγχεται η μορφοποίηση-κατασκευασιμότητα της μεγάλης οπής του δομοστοιχείου, του πάχους αλλά και της δυνατότητας στροφής του καλουπιού. Οι δύο

περιπτώσεις της τυπολογίας T3 έχουν τη μέγιστη θλιπτική αντοχή και τον μεγαλύτερο όγκο υλικού, σε σύγκριση με την επιλεγόμενη περίπτωση προς κατασκευή της τυπολογίας T1. Παρομοίως, και σε αυτές τις περιπτώσεις ελέγχεται το εργαλείο όσον αφορά τη δυνατότητα του να κατασκευάζει τα δομοστοιχεία με το μεγαλύτερο όγκο, τη μικρή και τη μεγάλη εσοχή αλλά και το διαφορετικό πάχος. Μέσα από τις συγκεκριμένες επιλογές, ελέγχονται πρωτότυπα που έχουν μεγάλες οπές αλλά και μικρές και μεγάλες εσοχές ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα για τη λειτουργία του ευέλικτου καλουπιού καλύπτοντας το εύρος όλων των πιθανών γεωμετριών, τις οποίες μπορεί να παράγει με φυσικό τρόπο.

Η εκτέλεση των φυσικών πειραμάτων προϋποθέτει μια σειρά από προπαρασκευαστικά βήματα που αναφέρονται στην διαμόρφωση σεναρίων ενεργοποίησης του ευέλικτου καλουπιού και του ρομποτικού βραχίονα καθώς και στον προγραμματισμό τους ώστε να επιτυγχάνεται συγχρονισμός στη φάση κατασκευής των τυπολογιών T1 και T3. Για σκοπούς πειραματισμού, γίνεται ενεργοποίηση του μηχανισμού όσον αφορά τη στροφή του εσωτερικού τμήματος ώστε να επιτυγχάνεται αντίστοιχη μορφοποίηση των επιλεγόμενων περιπτώσεων και προγραμματισμός της κίνησης του ρομπότ για τοποθέτηση και ωρίμανση των δομοστοιχείων σε βάση μετά το τέλος της διαδικασίας.

8.3 Υλικά

Το σύνολο της διαδικασίας διεξάγεται στο ρομποτικό εργαστήριο, όπως επίσης η μίξη των υλικών και η παραγωγή των φυσικών αποτελεσμάτων. Η θερμοκρασία δωματίου διατηρείται στους 24°C - 25°C βαθμούς Κελσίου. Η ωρίμανση των φυσικών πρωτοτύπων γίνεται σε δωμάτιο με σταθερή θερμοκρασία 23°C - 24°C. Καταγράφεται επίσης ο χρόνος παραγωγής συμπεριλαμβανομένου του χρόνου για το ξεκαλούπωμα και ο χρόνος ωρίμανσης των φυσικών μοντέλων.

Για το σχηματισμό του ανοίγματος στο κέντρο του τούβλου απαιτείται η πίεση του καλουπιού σε συνδυασμό με ένα εύπλαστο μείγμα. Ο πίνακας 28 παρουσιάζει τις συστάσεις των μειγμάτων υλικών που έχουν διερευνηθεί σε προηγούμενα κεφάλαια και χρησιμοποιούνται στα φυσικά πειράματα. Λόγω των τριβών που προκαλούνται από την ολίσθηση του τούβλου στον τετράγωνο σωλήνα στο στάδιο του ξεκαλούπωματος, απαιτείται ο ψεκάσμος των επιφανειών του καλουπιού με μηχανικό λάδι, προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο επικόλλησης υλικού. Αυτό συμβαίνει πριν από την τοποθέτηση του μείγματος στο εσωτερικό του καλουπιού.

| Τύποι μείγματος | Χώμα | Νερό | Μάζα τούβλου |
|-------------------|--|--------|--------------|
| Ωμόπλινθος | 2:1 χώμα- άμμο- 3% άχυρο | 600ml | 1,945kg |
| Σκυρόδεμα | 2:(0,5+0,5)Τσιμέντο- άμμος- άμμος-2% τσιμέντο ταχείας πήξης-ίνες | 500 ml | 1,945kg |
| Πηλός με τσιμέντο | 1.450kg- 8% τσιμέντο | 500ml | 1,945kg |

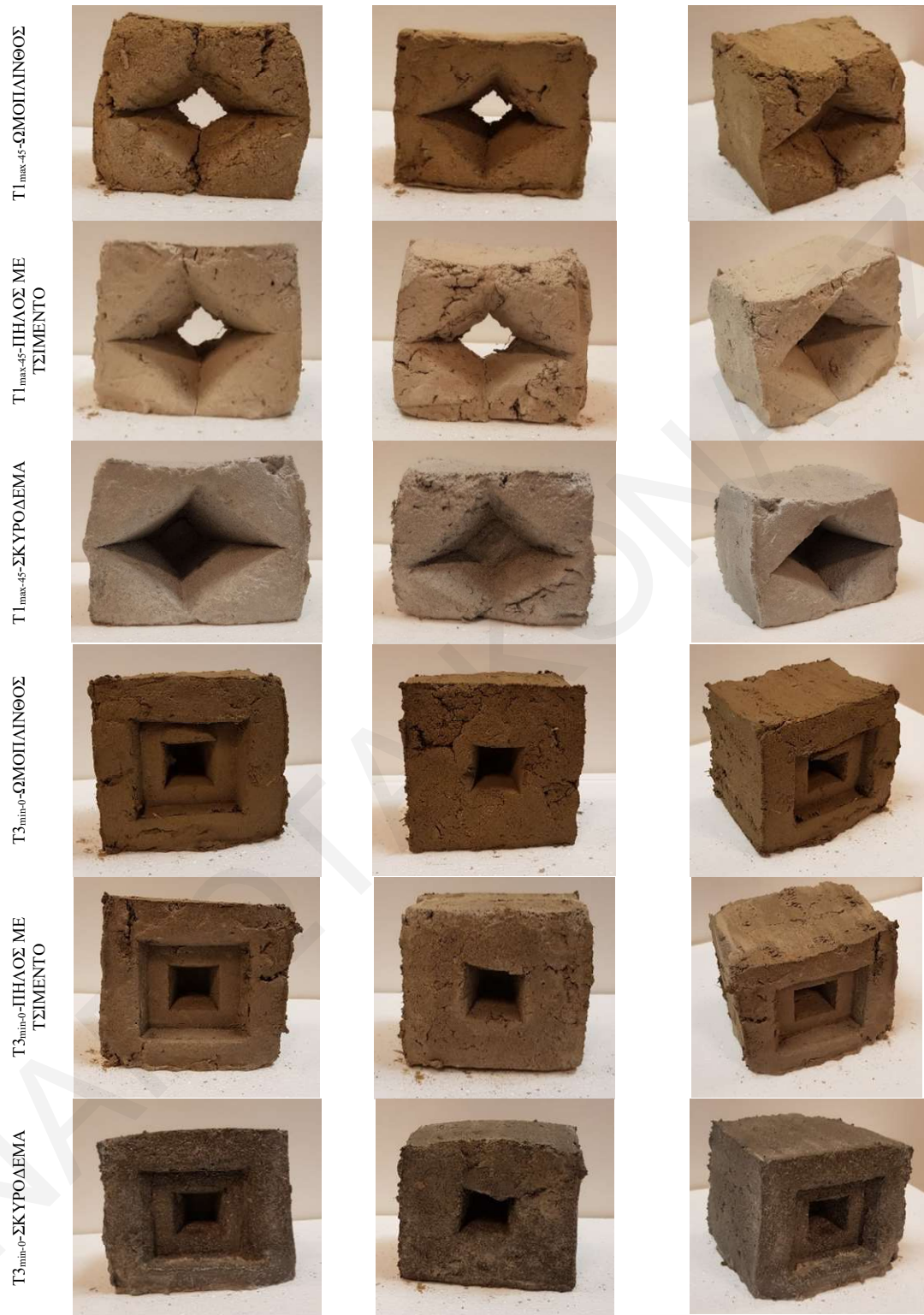
Πίνακας 28: Σύσταση μειγμάτων των τριών επιλεγόμενων υλικών

8.4 Αξιολόγηση ρομποτικής διαδικασίας και φυσικών πρωτοτύπων

Τα φυσικά πρωτότυπα των επιλεγμένων τυπολογιών προς διερεύνηση παρουσιάζονται στον πίνακα 29 και συγκρίνονται με τα αντίστοιχα ψηφιακά αποτελέσματα λαμβάνοντας υπόψη:

1. Γεωμετρία και διαστάσεις
2. Ποιοτική αξιολόγηση παραγόμενων πρωτοτύπων
3. Χρόνος συνολικής διαδικασίας κατασκευής
4. Λειτουργία ευέλικτου καλουπιού

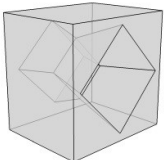
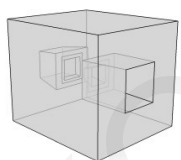
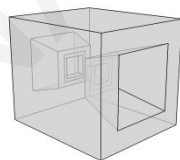




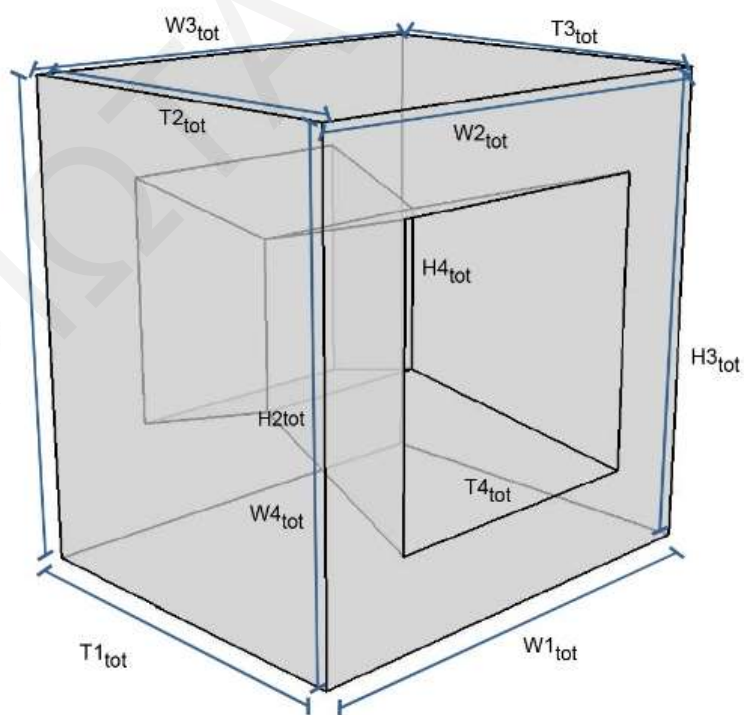
Πίνακας 29: Φυσικά πρωτότυπα των διερευνώμενων τυπολογιών

8.4.1 Γεωμετρία και διαστάσεις

Σε όλα τα πρωτότυπα που παρουσιάζονται στο πίνακα 30 καταγράφονται οι διαστάσεις ύψους, πάχους και πλάτους, οι διαστάσεις των ανοιγμάτων-εσοχών, όπως επίσης και η διάσταση στο μέσο του ύψους και του πάχους τους [εικ.63]. Μέσα από τη καταγραφή παρατηρούνται αποκλίσεις στις διαστάσεις των φυσικών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με αυτές των αντίστοιχων ψηφιακών μοντέλων, στα άκρα και στις γωνίες των τοιχοσωμάτων, όπως επίσης και στο φινίρισμα των επιφανειών. Επίσης, σε κάποια φυσικά μοντέλα παρατηρούνται ρωγμές. Αναλυτικοί πίνακες που καταγράφουν και υπολογίζουν τον μέσο όρο διάστασης σε κάθε περίπτωση παρουσιάζονται πιο κάτω [πιν.30 και 31].

| Digital Inputs | | | |
|--|---|--|---|
| Typology |  |  |  |
| | T1 _{max-45} | T3 _{min-0} | T3 _{max-0} |
| Dimensions (cm ³) | 12 x 12 x 8 | 12 x 12 x 12 | 12 x 12 x 12 |
| In / out dimensions (cm ²) | 4 x 4 / 7 x 7 | 3 x 3 / 2 x 2 | 4 x 4 / 7 x 7 |

Πίνακας 30: Ψηφιακά μοντέλα και διαστάσεις



Εικόνα 63: Διαστάσεις ψηφιακού μοντέλου

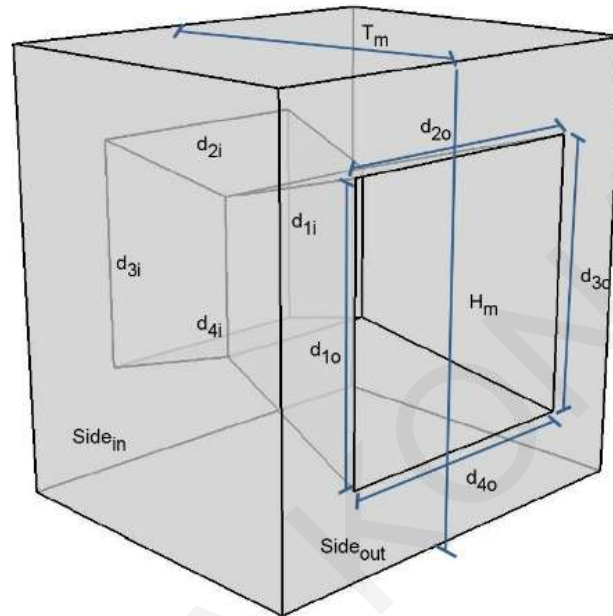
| Adobe | H _{tot} (cm) | | | | T _{tot} (cm) | | | | W _{tot} (cm) | | | | Υπολογισμός Μέσου όρου(cm) | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|-------------------|
| | H1 _{tot} | H2 _{tot} | H3 _{tot} | H4 _{tot} | T1 _{tot} | T2 _{tot} | T3 _{tot} | T4 _{tot} | W1 _{tot} | W2 _{tot} | W3 _{tot} | W4 _{tot} | HM _{tot} | TM _{tot} | WM _{tot} |
| T1 _{max-45} | 10.5 | 10.7 | 10.5 | 10.6 | 8.5 | 8.7 | 8.5 | 8.8 | 11.7 | 11.5 | 11.8 | 11.6 | 10.6 | 8.6 | 9.6 |
| T3 _{min-0} | 10.5 | 10.7 | 10.7 | 11.0 | 9 | 8.9 | 9 | 8.8 | 11.0 | 11.5 | 11.7 | 11.1 | 10.72 | 8.92 | 11.3 |
| T3 _{max-0} | 10.9 | 10.7 | 10.9 | 10.8 | 8.7 | 8.5 | 8.7 | 8.9 | 11.3 | 11.5 | 11.2 | 11.4 | 10.82 | 8.7 | 11.35 |
| Concrete | | | | | | | | | | | | | | | |
| T1 _{max-45} | 10.0 | 9.8 | 10.0 | 10.1 | 9.8 | 10.0 | 10.0 | 10.1 | 13.0 | 12.5 | 12.0 | 12.8 | 9.97 | 9.9 | 12.57 |
| T3 _{min-0} | 10.2 | 10.1 | 10.5 | 10.3 | 10.5 | 10.0 | 9.8 | 10.1 | 12.7 | 12.5 | 12.9 | 12.8 | 10.27 | 10.1 | 12.72 |
| T3 _{max-0} | 10.0 | 10.7 | 10.8 | 10.3 | 8.5 | 8.4 | 8.3 | 8.7 | 13.0 | 12.3 | 12.5 | 12.9 | 10.45 | 8.47 | 12.67 |
| Clay | | | | | | | | | | | | | | | |
| T1 _{max-45} | 10.7 | 10.5 | 10.5 | 10.3 | 8.5 | 8.3 | 7.5 | 7.9 | 12.7 | 11.8 | 12.0 | 12.5 | 10.5 | 8.05 | 12.25 |
| T3 _{min-0} | 11.0 | 10.9 | 10.8 | 11.1 | 9.0 | 9.0 | 9.3 | 9.1 | 12.0 | 11.8 | 12.0 | 12.1 | 10.95 | 9.1 | 11.97 |
| T3 _{max-0} | 11.5 | 11.3 | 11.5 | 11.1 | 8.5 | 8.8 | 8.5 | 8.9 | 12.1 | 11.7 | 11.9 | 12.0 | 11.35 | 8.67 | 11.92 |

Πίνακας 31: Πίνακας καταγραφής φυσικών διαστάσεων των παραγόμενων πρωτοτύπων και υπολογισμός μέσου όρου των φυσικών διαστάσεων

Με βάση την καταγραφή και τον υπολογισμό των αποκλίσεων που προκύπτουν μεταξύ ψηφιακών μοντέλων και φυσικών πρωτοτύπων, εξάγονται τα πιο κάτω αποτελέσματα. Η διάσταση του ύψους (H_{tot}) των φυσικών δομοστοιχείων προσεγγίζει τη ψηφιακή διάσταση με μέσο όρο απόκλισης 2-3 cm. Σε κάθε ένα από τα μοντέλα μετρούνται τα ύψη που βρίσκονται στις τέσσερις (4) γωνίες του δομοστοιχείου (H1_{tot}, H2_{tot}, H3_{tot}, H4_{tot}) [εικ.63]. Σε καμία περίπτωση από τα φυσικά μοντέλα δεν εντοπίζονται ίσα ύψη στις τέσσερις (4) γωνίες. Η διάσταση του πάχους (T_{tot}) των παραγόμενων πρωτοτύπων μετριέται ως προς τις τέσσερις (4) οριζόντιες ακμές στο πάχος του δομοστοιχείου (T1_{tot}, T2_{tot}, T3_{tot}, T4_{tot}). Για κάθε τυπολογία T1_{max-45} και T3_{min-0}, T3_{max-0} διαφοροποιείται το πάχος στο ψηφιακό μοντέλο, συγκεκριμένα 8 cm για την πρώτη τυπολογία και 12 cm για τις δυο τελευταίες. Η μεγαλύτερη απόκλιση των φυσικών πρωτοτύπων παρατηρείται στη διάσταση του πάχους με τιμές από κυμαίνονται από 3-4 cm και για τις τρεις (3) παραγόμενες τυπολογίες. Η διάσταση του πλάτους (W_{tot}) του δομοστοιχείου μετριέται με βάση τις τέσσερις οριζόντιες ακμές του (W1_{tot}, W2_{tot}, W3_{tot}, W4_{tot}). Στο ψηφιακό μοντέλο είναι 12 cm ενώ στα φυσικά πρωτότυπα κυμαίνεται από 11 cm μέχρι 12.8 cm. Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε τις μικρότερες αποκλίσεις. Επίσης, σε καμία περίπτωση δεν εντοπίζεται κάποιο φυσικό πρωτότυπο που να έχει τις ίδιες διαστάσεις με το ψηφιακό μοντέλο. Αντίθετα, καταγράφονται τιμές απόκλισης που σε μέσο όρο είναι μικρότερες κατά 2-3 cm από τις διαστάσεις του ψηφιακού μοντέλου.

Επιπλέον, η αξιολόγηση της γεωμετρίας των ανοιγμάτων λαμβάνει υπόψη τις διαστάσεις των τεσσάρων (4) πλευρών των ανοιγμάτων-εσοχών, είτε από την εσωτερική (d1_o, d2_o, d3_o, d4_o), είτε από την εξωτερική πλευρά (d1_i, d2_i, d3_i, d4_i) του πρωτοτύπου [εικ.64 και πιν.31]. Οι διαστάσεις των ανοιγμάτων-εσοχών στα φυσικά πρωτότυπα έχουν αποκλίσεις της τάξεως των 1-2 cm από τις διαστάσεις του ψηφιακού μοντέλου. Για τον

υπολογισμό της καθίζησης μετρείται η διάσταση του ύψους στο μέσο της πρόσφυσης του φυσικού πρωτότυπου, όπου παρατηρείται διαφοροποίηση κατά 1-2 cm. Επιπλέον, λαμβάνεται υπόψη η διάσταση του πάχους του φυσικού μοντέλου στο μέσο της γεωμετρίας στην πάνω επιφάνεια για μεγαλύτερο έλεγχο των διαστάσεων της μορφολογίας.



Εικόνα 64: Διαστάσεις ανοίγματος στο ψηφιακό μοντέλο-εσωτερική και εξωτερική πλευρά

| | Adobe | | | | Concrete | | | | Clay | | | | Υπολογισμός Μέσου όρου (cm) |
|---|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|-----------------------------|
| Out dimensions_(cm) | d1 _o | d2 _o | d3 _o | d4 _o | d1 _o | d2 _o | d3 _o | d4 _o | d1 _o | d2 _o | d3 _o | d4 _o | |
| T1 _{max-45} | 5.9 | 5.7 | 5.8 | 6.0 | 7.4 | 7.5 | 7.4 | 8.0 | 7.1 | 7.3 | 7.5 | 7.5 | 6.92 |
| T3 _{min-0} | 3.5 | 4.0 | 3.5 | 4.0 | 7.1 | 7.5 | 7.1 | 6.9 | 7.0 | 7.5 | 7.0 | 7.5 | 7.24 |
| T3 _{max-0} | 6.7 | 7.1 | 6.5 | 6.8 | 6.5 | 7.5 | 6.5 | 7.7 | 7.6 | 7.0 | 7.6 | 7.0 | 7.04 |
| In dimensions_(cm) | d1 _i | d2 _i | d3 _i | d4 _i | d1 _i | d2 _i | d3 _i | d4 _i | d1 _i | d2 _i | d3 _i | d4 _i | |
| T1 _{max-45} | 5.1 | 5.3 | 5.0 | 5.5 | 5.3 | 5.5 | 5.5 | 5.3 | 6.5 | 6.3 | 6.3 | 6.5 | 5.67 |
| T3 _{min-0} | 3.5 | 3.6 | 3.5 | 3.6 | 3.5 | 4.0 | 4.0 | 3.5 | 3.4 | 3.9 | 3.4 | 3.9 | 3.65 |
| T3 _{max-0} | 5.4 | 5.5 | 5.4 | 5.4 | 5.5 | 5.5 | 5.5 | 6.0 | 5.8 | 5.8 | 6.0 | 6.1 | 5.65 |
| Ύψος H _m / Πάχος T _m (μέσο) | | | | | | | | | | | | | |
| | H _m (cm) | | T _m (cm) | | H _m (cm) | | T _m (cm) | | H _m (cm) | | T _m (cm) | | |
| T1 _{max-45} | 10.3 | | 8.5 | | 9.8 | | 12.0 | | 10.5 | | 8.3 | | H _m = 10.65 |
| T3 _{min-0} | 11.0 | | 11.7 | | 10.0 | | 10.5 | | 10.5 | | 9.3 | | |
| T3 _{max-0} | 11.3 | | 8.5 | | 11.1 | | 8.9 | | 11.4 | | 8.8 | | |

Πίνακας 32: Πίνακας καταγραφής φυσικών διαστάσεων ανοίγματος των παραγόμενων πρωτοτύπων και υπολογισμός μέσου όρου

8.4.2 Ποιοτική αξιολόγηση παραγόμενων πρωτοτύπων

Επιπρόσθετα, γίνεται ποιοτική αξιολόγηση των παραγόμενων πρωτοτύπων. Ένα από τα μοντέλα που επιλέχθηκαν για φυσική παραγωγή μέσω της προτεινόμενης διαδικασίας ώστε να γίνει έλεγχος της δυνατότητας κατασκευής του είναι η περίπτωση T1_{max-45}, η οποία

έχει μεγάλο άνοιγμα με στροφή 45° και την μικρότερη θλιπτική αντοχή. Έχουν γίνει δοκιμές φυσικής παραγωγής του και με τα τρία υλικά και έχει επιτευχθεί μορφοποίηση της οπής του, εκτός από την περίπτωση χρήσης του σκυροδέματος όπου δεν έγινε εφικτή η σχηματοποίηση της. Επίσης, οι τρεις περιπτώσεις τυπολογιών που υλοποιήθηκαν φυσικά παρουσίασαν καθίζηση μέχρι 1 cm της πάνω παριάς τους, κάτι το οποίο ήταν πιο εμφανές και σε μεγαλύτερο βαθμό στην περίπτωση του σκυροδέματος. Στα φυσικά πρωτότυπα από ωμόπλινθο και πηλό με τσιμέντο παρατηρούνται ρωγμές στην πάνω και κάτω γωνία του ανοίγματος. Πιο έντονες ρωγμές εμφανίζονται στην περίπτωση του ωμόπλινθου.

Από την κατηγορία T3_{min-0} επιλέχθηκε το μοντέλο χωρίς άνοιγμα, με 0° στροφή και με μικρότερη εσοχή. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται η μορφολογία για τα τρία υλικά χωρίς να παρατηρούνται κάποιες ρωγμές.

Η μορφολογία T3_{max-0} αναφέρεται σε δομοστοιχείο χωρίς άνοιγμα με 0° στροφή. Σε αυτή την περίπτωση επιτυγχάνεται σε αρκετά καλό βαθμό η μορφοποίηση του πρωτότυπου και στις τρεις περιπτώσεις υλικών παρόλες τις μικρές διαφοροποιήσεις όσον αφορά την ποιότητα των αποτελεσμάτων. Αυτό γίνεται αντιληπτό στον πίνακα 29 όπου η όψη 1 είναι καλύτερα μορφοποιημένη από την όψη 2. Ρωγμές παρατηρούνται στην όψη 2 γύρω από την περιοχή της προκύπτουσας εσοχής.

Τέλος, ελέγχονται τα υλικά και τα αποτελέσματα που προκύπτουν μέσα από τους πειραματισμούς όσον αφορά τη ρευστότητα τους ώστε να μορφοποιούνται και να ξεκαλουπώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα. Στα δοκίμια από ωμόπλινθο και πηλό με τσιμέντο εντοπίζονται οι περισσότερες ρωγμές και πιθανές ανομοιομορφίες στην τελική μορφολογία τους. Στα μοντέλα από σκυρόδεμα απαιτείται περισσότερος χρόνος ως προς την ωρίμανση, άρα και περισσότερος χρόνος στο στάδιο του ξεκαλουπώματος τους. Ποιοτικά και ποσοτικά παρατηρείται καλύτερη μορφολογία του πηλού με την προσθήκη τσιμέντου, αφού οι διαστάσεις των φυσικών μοντέλων προσεγγίζουν τις ψηφιακές διαστάσεις.

8.4.3 Χρόνος συνολικής διαδικασίας κατασκευής

Σχετικά με το χρόνο της συνολικής διαδικασίας, αυτός δεν ξεπερνά τα 12 min όσον αφορά την παραγωγή του δομοστοιχείου με τη χρήση του σκυροδέματος. Για την παραγωγή τοιχοσωμάτων από ωμόπλινθο και από πηλό με τσιμέντο, ο απαιτούμενος χρόνος είναι 10 min. Η διαφορά που παρατηρείται μεταξύ του συνολικού χρόνου που έχει υπολογιστεί μέσω της φυσικής διαδικασίας παραγωγής των πρωτοτύπων από σκυρόδεμα και του ψηφιακού υπολογισμού έχει να κάνει με την εισαγωγή επιπροσθέτου χρόνου στην πρώτη περίπτωση

και αναφέρεται στο χρόνο προετοιμασίας του υλικού και το χρόνο ωρίμανσης των πρωτοτύπων, δύο στάδια τα οποία δεν έχουν υπολογιστεί σε ψηφιακό επίπεδο. Έτσι, για σκοπούς σύγκρισης μεταξύ φυσικής και ψηφιακής διαδικασίας, στην πρώτη περίπτωση λαμβάνεται υπόψη μόνο ο χρόνος τοποθέτησης υλικού, κίνησης του ρομποτικού βραχίονα και ξεκαλουπώματος, ο οποίος στο σύνολο του εμφανίζεται να είναι στη φυσική διαδικασία 3 min ενώ στη ψηφιακή υπολογίζεται σε 5 min. Επιπλέον, ο χρόνος ετοιμασίας του υλικού υπολογίζεται στα 9 min ενώ σε πραγματικό περιβάλλον χρειάστηκαν 7 min. Συνολικά, η απόκλιση της υπολογιζόμενης χρονικής διάρκειας της ρομποτικής διαδικασίας σε σχέση με τη φυσική διαδικασία είναι περίπου 6 min. Η ρομποτική διαδικασία σε φυσικό περιβάλλον αποδείχθηκε συντομότερη σε σχέση με τη ψηφιακά υπολογιζόμενη και η διαφορά εντοπίζεται στον απαιτούμενο χρόνο του σταδίου προετοιμασίας του υλικού, της τοποθέτησης του υλικού και της κίνησης του ρομποτικού βραχίονα [πιν.33].

| Υλικό | Χρόνοι φυσικής παραγωγής με ρομποτική διαδικασία (min) | | | | | |
|-------------------|--|---|-----------------------------|--|-------------------------|---|
| | Χρόνος προετοιμασίας υλικού (min) | Χρόνος τοποθέτησης υλικού και κίνησης ρομποτικού βραχίονα (min) | Χρόνος ξεκαλουπώματος (min) | Συνολικός χρόνος φυσικής παραγωγής (min) | Χρόνος ωρίμανσης (hour) | Υπολογιζόμενος συνολικός χρόνος ψηφιακής ρομποτικής διαδικασίας (min) |
| Ωμόπλινθος | 7 | 2 | 1 | 10 | 48 | 16 |
| Πηλός με τσιμέντο | 7 | 2 | 1 | 10 | 24 | 16 |
| Σκυρόδεμα | 7 | 2 | 3 | 12 | 24 | 18 |

Πίνακας 33: Πίνακας χρόνων που απαιτούν οι διαφορετικές διαδικασίες κατά τη φυσική κατασκευαστική διαδικασία

8.4.4 Λειτουργία ευέλικτου καλουπιού

Με την ανάπτυξη και τη χρήση του εργαλείου σε φυσικό περιβάλλον ελέγχεται η λειτουργικότητα του και η δυνατότητα του να μορφοποιεί διαφορετικούς τύπους δομοστοιχείων. Η αξιολόγηση των φυσικών αποτελεσμάτων οδηγεί σε συμπεράσματα με σκοπό την βελτίωση της λειτουργίας του και της δομής του ευέλικτου καλουπιού.

Οι μεγαλύτερες αποκλίσεις εντοπίζονται στις διαστάσεις του πάχους των φυσικών πρωτοτύπων σε σχέση με τη ψηφιακή διάστασή τους και αυτό πιθανώς να οφείλεται στη δύναμη που ασκείται από το πνευματικό πιστόνι προς το υλικό κατά το στάδιο της συμπίεσης. Κατά τη διάρκεια ανάπτυξης της φυσικής εκδοχής του ευέλικτου καλουπιού χρειάστηκε να αλλάξουν οι διαστάσεις του μήκους του λόγω της αντικατάστασης του πνευματικού πιστονιού 20 cm με πνευματικό πιστόνι 30 cm στην αριστερή πλευρά για την επιτυχή διεκπεραίωση του σταδίου του ξεκαλουπώματος. Παρόλο που κατά τη φάση συμπίεσης το πάχος του παραγόμενου τούβλου διατηρήθηκε στις ίδιες διαστάσεις, η αλλαγή

αυτή ενδεχομένως να έχει επηρεάσει τις διαστάσεις των παραγόμενων αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η γραμμική κίνηση του πιστονιού επηρεάζεται από το βάρος του ευέλικτου μηχανισμού και σε κάποιες περιπτώσεις ενεργοποίησης του αυτό δεν τοποθετείται ακριβώς στο κέντρο του σωλήνα συμπίεσης. Η βελτίωση των διαστασιολογικών αποκλίσεων, η αποφυγή ρωγμών και η καλύτερη μορφολόγηση των επιφανειών των δοκιμών θα μπορούσε να επιτευχθεί με την αλλαγή των πνευματικών πιστονιών σε πιστόνια που έχουν τη δυνατότητα να ασκούν μεγαλύτερη δύναμη στο δομικό υλικό (π.χ υδραυλικά πιστόνια), ή την άσκηση δόνησης κατά το στάδιο της συμπίεσης για καλύτερη κατανομή του υλικού στο καλούπι.

Τέλος, η χρήση πιο ελαφριών υλικών όπως αλουμίνιο αντί ξύλου, θα μείωνε το συνολικό βάρος της κατασκευής. Για το τετραγωνικό σωλήνα, η χρήση του ξύλου που είναι ειδικό για καλούπια, υποβοηθά την διαδικασία ώστε να αποκολλάται εύκολα το δομικό υλικό από τα τοιχώματα του καλουπιού και να διευκολύνεται η γραμμική κίνηση του πνευματικού πιστονιού. Το πλαστικό PLA που χρησιμοποιείται για την κατασκευή των τμημάτων της μορφολογίας του καλουπιού θα μπορούσε να αντικατασταθεί με ένα πιο ανθεκτικό υλικό από πλαστικό, ώστε να επιτυγχάνεται περισσότερη αντοχή στην άσκηση δύναμης-πίεσης.

8.5 Συμπεράσματα

Μέσα από τις πειραματικές προσπάθειες συμπεραίνονται οι δυνατότητες του ευέλικτου καλουπιού αλλά και οι αποκλείσεις, οι οποίες προκύπτουν κατά τη φάση φυσικής παραγωγής πρωτοτύπων. Παρατηρείται ότι η συνολική κατασκευαστική διαδικασία μπορεί να εφαρμοστεί σε διαφορετικά δομικά υλικά για την παραγωγή πρωτοτύπων με διαφορετικές μορφολογίες. Επίσης, ο χρόνος της αυτοματοποιημένης κατασκευαστικής διαδικασίας εμφανίζει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με το χρόνο που απαιτείται για μια συμβατική διαδικασία. Παράλληλα, παρατηρούνται αποκλίσεις της γεωμετρίας των τοιχωμάτων και των διαστάσεων τους. Αυτό οφείλεται στις πιθανές αστοχίες του ευέλικτου καλουπιού σε φυσικό επίπεδο λόγω των υλικών και των μηχανισμών που έχουν χρησιμοποιηθεί αλλά και των φυσικών ιδιοτήτων τους.

Η ρομποτική διαδικασία στο σύνολο της επιδέχεται βελτιώσεις ως προς την ποιότητα των παραγόμενων πρωτοτύπων αλλά και του βαθμού αυτοματοποίησης της, παρόλο που ο χρόνος της διαδικασίας που καταγράφεται πλησιάζει το χρόνο που έχει υπολογιστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6). Με κάποιες περαιτέρω βελτιώσεις των αυτοματισμών, θα μπορούσε να μειωθεί ακόμη περισσότερο. Για παράδειγμα, θα μπορούσε

με αυτοματοποιημένο τρόπο να γίνεται η χύτευση του υλικού στον τετραγωνικό σωλήνα και ο ψεκασμός του εσωτερικού του καλουπιού ώστε να μην υφίσταται επικόλληση του δομικού υλικού στα τοιχώματα του καλουπιού. Στο παρόν στάδιο, ο καθορισμός της ποσότητας του υλικού και της τοποθέτησης του στο καλούπι γίνονται από τον άνθρωπο, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο της συνολικής διαδικασίας.

9 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

9.1 Ερευνητική συνεισφορά

Η παρούσα διερεύνηση αναφέρεται στον ψηφιακό παραμετρικό σχεδιασμό και την φυσική υλοποίηση χυτών εξατομικευμένων δομοστοιχείων μέσω μιας προτεινόμενης ρομποτικής κατασκευαστικής διαδικασίας, η οποία εξετάζει σε ταυτόχρονο επίπεδο πολλαπλές παραμέτρους και αξιολογεί ένα σύνολο αποτελεσμάτων με βάση πολλαπλά κριτήρια. Ο σχεδιασμός και η ρομποτική κατασκευαστική διαδικασία εξετάζονται με στόχο τη διερεύνηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με βάση τα βιώσιμα κριτήρια που έχουν τεθεί. Τα αριθμητικά αποτελέσματα συσχετίζονται και καθορίζουν την βιωσιμότητα και την κατασκευασσιμότητα των δομών προς διερεύνηση. Τα αποτελέσματα εξετάζονται στη φάση φυσικού πειραματισμού και κατασκευής τους μέσω ενός προτεινόμενου ευέλικτου και κινητικού καλουπιού που έχει τη μορφή αυτοσχέδιου εργαλείου τελικής δράσης στην άκρη ρομποτικού βραχίονα. Μέσα από την ενοποιημένη διερεύνηση επιτυγχάνεται η αξιολόγηση τόσο των ψηφιακών αποτελεσμάτων όσο και της λειτουργίας του μηχανισμού για την φυσική παραγωγή σύνθετων δομοστοιχείων. Έτσι, τα ποσοτικά αποτελέσματα σε σχέση με την κατασκευή του εργαλείου και τον πειραματισμό σε φυσικό επίπεδο και σε πραγματικό χρόνο, τροφοδοτούν και επικυρώνουν τη δυνατότητα υλοποίησης της προτεινόμενης ιδέας (proof of concept), η οποία στοχεύει σε περισσότερο βιώσιμες κατασκευαστικές προσεγγίσεις στην οικοδομική βιομηχανία.

Συγκεκριμένα, μέσω παραμετρικού σχεδιασμού (parametric design) ορίζονται οι σχεδιαστικές δυνατότητες του μοναδιαίου μη συμβατικού δομοστοιχείου προς διερεύνηση. Παράλληλα, εξετάζονται τυπολογίες μέσα από κριτήρια φωτισμού-σκίασης (shading ratio analysis) και στατικότητας (FEA analysis), εξάγοντας αντίστοιχα αποτελέσματα για το καθένα από αυτά που σχετίζονται με το ποσοστό φωτισμού-σκίασης των επιφανειών των ανοιγμάτων τους και της θλιπτικής αντοχής τους. Επίσης, γίνεται εκτίμηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου (LCA analysis) των σχεδιαστικών λύσεων αλλά και του κόστους κατασκευής και εξάγονται ποσοτικά αποτελέσματα, τα οποία συγκρίνονται με αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν από τη συμβατική διαδικασία παραγωγής αντίστοιχων μη συμβατικών δομοστοιχείων. Τα αριθμητικά αποτελέσματα που προκύπτουν από τα διαφορετικά δομοστοιχεία συγκρίνονται μεταξύ τους και αξιολογούνται ως προς τον ελάχιστο όγκο, τη μέγιστη θλιπτική αντοχή, τις ελάχιστες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, την ελάχιστη καταναλωμένη ενέργεια και το ελάχιστο κόστος κατασκευής. Μέσω ψηφιακής προσομοίωσης (robotic simulation) προγραμματίζεται η κίνηση, τόσο του ευέλικτου

καλουπιού, όσο και του ρομποτικού βραχίονα και γίνεται φυσικός πειραματισμός για την παραγωγή πρωτοτύπων, τα οποία αξιολογούνται γεωμετρικά αλλά και όσον αφορά την ακρίβεια κατασκευής τους, συμπεριλαμβανομένης της αξιολόγησης που αναφέρεται στην λειτουργία του ευέλικτου καλουπιού στο σύνολο του.

Τα πλεονεκτήματα τα οποία προκύπτουν μέσα από τις επιμέρους διερευνήσεις και την αξιολόγηση των σχεδιαστικών λύσεων με κριτήρια μείωσης υλικού και εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα αλλά και ενέργειας στο πρώιμο στάδιο και πριν από τη φάση κατασκευής, σχετίζονται με τη βιωσιμότητα του τελικού προϊόντος αλλά και της ρομποτικής κατασκευαστικής διαδικασίας στο σύνολο της.

Σε επίπεδο βιωσιμότητας του τελικού προϊόντος, από την έρευνα προκύπτει ότι ζητήματα σχετικά με την επιλογή υλικών και του περιβαλλοντικού αντίκτυπου τους σε όλο τον κύκλο ζωής των κατασκευών στις οποίες εφαρμόζονται είναι καλό να προβλέπονται από την αρχή με τρόπο που να ενσωματώνονται στην σχεδιαστική φάση μέσω αξιόπιστων και με ακρίβεια διαδικασιών. Επίσης, μέσα από τις παραμέτρους και τα κριτήρια τυποποίησης, κατασκευαστικής και περιβαλλοντικής συμπεριφοράς, εμπλουτίζεται η διαδικασία και αποφεύγονται τυχόν αστοχίες, σπατάλη υλικού και χρονοβόρες διαδικασίες παραγωγής κατά το στάδιο της φυσικής ανάπτυξης των δομοστοιχείων. Όλα τα πιο πάνω, είναι καλό να λαμβάνονται υπόψη και να διερευνώνται σε σχεδιαστικό επίπεδο με στόχο τη βιωσιμότητα των λύσεων, οι οποίες θα προχωρούν στο στάδιο της κατασκευής. Σε επίπεδο ρομποτικής διαδικασίας, η δυνατότητα του ευέλικτου κινητικού καλουπιού να προσαρμόζεται στις εκάστοτε αλλαγές της γεωμετρίας, επιτρέπει την παραγωγή ενός αριθμού εξατομικευμένων δομών με μειωμένο κόστος και με γρήγορο τρόπο, όπως αποδεικνύεται και από τη πειραματική ρομποτική διαδικασία που ακολουθείται. Τα μετρήσιμα στοιχεία και οι δείκτες περιβαλλοντικού αντίκτυπου και κόστους τα οποία εξάγονται από την έρευνα θα μπορούσαν να συνεισφέρουν στη μαζική παραγωγή εξατομικευμένων στοιχείων και στην εισαγωγή αυτοματοποιημένων μηχανισμών στην κατασκευαστική βιομηχανία.

9.2 Ερευνητικά αποτελέσματα και μελλοντικοί στόχοι

Συμπερασματικά, μέσα από τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παρούσα έρευνα και τη συγκριτική αξιολόγηση τους αλλά και του φυσικού πειραματισμού για την παραγωγή συγκεκριμένων δομοστοιχείων, διαπιστώνονται μια σειρά από πλεονεκτήματα αλλά και περιορισμοί οι οποίοι περιγράφονται πιο κάτω. Η προτεινόμενη γεωμετρία αλλά και οι παραμετρικές διαφοροποιήσεις της επιτυγχάνουν το σχεδιασμό πορωδών και μη πορωδών δομοστοιχείων, με διαφορετικά πάχη και με τη δυνατότητα περιστροφής του

ανοίγματος τους. Εξάγονται ποσοτικά αποτελέσματα για τη λειτουργικότητα των τυπολογιών ως προς το εμβαδό σκίασης τους αλλά και τη θλιπτική αντοχή τους ώστε να προχωρήσουν στο στάδιο της παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, ο σχεδιασμός του δομοστοιχείου τυπολογίας T1 θα μπορούσε να εξυπηρετήσει τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης χώρων, λαμβάνοντας υπόψη τα ποσοστά σκίασης και ηλιασμού. Η συγκεκριμένη μορφολογία έχει τη δυνατότητα εφαρμογής σε μεγάλα ανοίγματα με νότιο προσανατολισμό και σε μικρά ανοίγματα με ανατολικό και δυτικό. Η περιστροφή του ανοίγματος στις περιπτώσεις ηλιασμού, αυξάνει ή μειώνει την πρόσπτωση ηλιακής ακτινοβολίας. Η διαμόρφωση των ανοιγμάτων σχετίζεται άμεσα με τη μέγιστη και την ελάχιστη θλιπτική αντοχή, κάτι το οποίο είναι επίσης συσχετισμένο με τον όγκο των δομοστοιχείων και τις τιμές των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν σε κάθε περίπτωση. Δομοστοιχεία από σκυρόδεμα με μικρά ανοίγματα ή μεγαλύτερο όγκο, όπως αυτό της τυπολογίας T3_{min-15}, έχουν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή, ενώ δομοστοιχεία όπως το T1_{max-45} από πηλό (με προσθήκη τσιμέντου) με μεγάλα ανοίγματα ή μικρότερο όγκο έχουν μικρότερη θλιπτική αντοχή. Προτιμώνται δομοστοιχεία με μεγάλη θλιπτική αντοχή και μικρό όγκο με στόχο τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα λόγω του μειωμένου υλικού. Η μεγαλύτερη τιμή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα παρατηρείται στην περίπτωση του σκυροδέματος, αφού τα υλικά κατασκευής όπως επίσης και το τέλος ζωής του δομοστοιχείου που συμπεριλαμβάνει την κατεδάφιση και επαναχρησιμοποίηση του, έχουν τις περισσότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Οι τιμές που αναφέρονται στον ωμόπλινθο και τον πηλό με τσιμέντο είναι μικρότερες σε σύγκριση με το σκυρόδεμα και συνεπώς είναι επιλογές φιλικότερες προς το περιβάλλον. Οι μειωμένες εκπομπές των δύο αυτών υλικών οφείλονται κυρίως στον τρόπο ωρίμανσης των δομοστοιχείων με τη μέθοδο της ξήρανσης και όχι με τη χρήση θερμικής εστίας. Η μέθοδος της ξήρανσης αποτελεί φυσικό τρόπο ωρίμανσης των υλικών, επιτρέπει και διευκολύνει τη διαδικασία κατεδάφισης της τοιχοποιίας αλλά και επαναχρησιμοποίησης της πρώτης ύλης του τούβλου. Επιπλέον, με την προτεινόμενη μέθοδο κατασκευής της τοιχοποιίας, τα απόβλητα είναι μηδενικά αφού υπολογίζεται με ακρίβεια η απαιτούμενη ποσότητα μείγματος για την παραγωγή των τούβλων.

Για την επιβεβαίωση της βιωσιμότητας της προτεινόμενης μεθοδολογίας γίνεται σύγκριση με συμβατική μέθοδο παραγωγής των αντίστοιχων δομοστοιχείων και διαπιστώνεται ότι οι τιμές των ρύπων και της ενέργειας που καταναλώνεται είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τη ρομποτική μέθοδο. Αντίθετα, όσον αφορά το κόστος του καλουπιού, αυτό είναι οκτώ φορές μεγαλύτερο στη ρομποτική κατασκευή σε σύγκριση με

την κατασκευή ενός συμβατικού καλουπιού. Αυτό εξισορροπείται λόγω της συνεχούς ανάγκης κατασκευής καλουπιών για την κάθε περίπτωση μορφολογίας στην περίπτωση της συμβατικής διαδικασίας, κάτι το οποίο δεν υφίσταται στην περίπτωση του ευέλικτου καλουπιού, αφού αυτό μπορεί να χρησιμοποιείται για την κατασκευή πολλαπλών μορφολογιών. Κατά συνέπεια, στη δεύτερη περίπτωση, οι συνεχείς επαναλήψεις της κατασκευής μέσω του ίδιου μηχανισμού δεν αυξάνουν το κόστος στο σύνολο της διαδικασίας αλλά ούτε και τους ρύπους και την ενέργεια που καταναλώνεται. Διαπιστώνεται ότι η προτεινόμενη μέθοδος θα μπορούσε να προσφέρει ένα βελτιωμένο σενάριο παραγωγής πολλαπλών εξατομικευμένων μοναδιαίων στοιχείων, η οποία παράλληλα βελτιώνει σε μερικό βαθμό τα κριτήρια που έχουν τεθεί ως προς τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της. Στο σενάριο εφαρμογής της μεθόδου σε μαζική εξατομικευμένη παραγωγή, τα αποτελέσματα αποδεικνύουν εξισορρόπηση της τιμής κόστους του ευέλικτου καλουπιού μετά από ένα αριθμό παραγόμενων δομοστοιχείων, ενώ στην αντίστοιχη περίπτωση του συμβατικού καλουπιού η τιμή κόστους είναι σταθερά ανοδική.

Σχετικά με την κατασκευαστική υλοποίηση των δομοστοιχείων και του ευέλικτου εργαλείου τελικής δράσης, μέσα από τα φυσικά αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι η διαδικασία και οι στόχοι της φυσικής μορφοποίησης των ψηφιακών αποτελεσμάτων επιτυγχάνονται σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Περαιτέρω βελτιώσεις ως προς τη λειτουργία του εργαλείου και την ακρίβεια στην παραγωγή φυσικών αποτελεσμάτων είναι δυνατές. Οι ενεργοποιήσεις των πνευματικών πιστονιών που εφαρμόζονται θα μπορούσαν να είναι πιο αποτελεσματικές ώστε να επιτυγχάνεται περισσότερη ακρίβεια στο πάχος του δομοστοιχείου αλλά και καλύτερη μορφοποίηση των εσοχών και ανοιγμάτων. Είναι μια διαδικασία που θα μπορούσε να επιδέχεται βελτιώσεις και περαιτέρω αυτοματοποίηση στο σύνολο της.

Αντίθετα με τη μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα έρευνα, συνήθως ακολουθείται μια γραμμική διαδικασία όπου μετά τη φάση σχεδιασμού μιας αρχιτεκτονικής ιδέας ακολουθεί η φάση υλοποίησης της μέσω συμβατικών διαδικασιών χωρίς τη δυνατότητα αναθεώρησης και προσαρμογής των σχεδιαστικών παραμέτρων. Αυτό, οδηγεί σε μια σειρά από προβλήματα σε κατασκευαστικό επίπεδο, τα οποία θα μπορούσαν να αποφευχθούν αν παράμετροι και περιορισμοί της κατασκευαστικής διαδικασίας λαμβάνονται υπόψη εξ αρχής και ενσωματώνονται από τα πρώτα στάδια σχεδιασμού. Γι' αυτό και θα μπορούσε να ήταν χρήσιμος ο ορισμός κατάλληλων διαδικασιών και εργαλείων που θα μπορούσαν να παρέχουν βιωσιμότητα και αυτοματισμό κατά τη φάση σχεδιασμού και παραγωγής των προκατασκευασμένων δομοστοιχείων. Αυτό ενισχύεται από το γεγονός

ότι στο στάδιο κατασκευής υπάρχει ανάγκη μείωσης των κινδύνων ως προς την ασφάλεια του προσωπικού, μείωσης των λαθών και της ακρίβειας στην κατασκευή λόγω της μη εξειδίκευσης, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κατασκευής σύνθετων δομών και σε επικίνδυνα περιβάλλοντα (ψηλά κτίρια, γέφυρες). Όλα αυτά αυξάνουν το βαθμό δυσκολίας στην εκτέλεση των εργασιών και συνεπώς οδηγούν σε πιθανές αλλοιώσεις του επιθυμητού τελικού αποτελέσματος.

Οι μελλοντικοί ερευνητικοί στόχοι όσον αφορά τη ψηφιακή προσέγγιση θα επικεντρωθούν στην ανάπτυξη μεθόδων βελτιστοποίησης των λύσεων, όπως για παράδειγμα μέσα από την εισαγωγή αλγόριθμων βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα Γενετικών Αλγόριθμων (Genetic Algorithms). Τα αντικειμενικά κριτήρια βελτιστοποίησης θα μπορούσαν να αναφέρονται στο ελάχιστο δομικό υλικό, στο ποσοστό σκίασης-ηλιασμού, στη μέγιστη θλιπτική αντοχή, στις ελάχιστες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, στο ελάχιστο κόστος και στον ελάχιστο χρόνο. Αυτό γίνεται πιο επιτακτικό στην περίπτωση αύξησης των σχεδιαστικών τυπολογιών και των δομικών υλικών προς χρήση, των οποίων ο έλεγχος, η αξιολόγηση και η ανάδειξη των βέλτιστων λύσεων θα ήταν δύσκολο να επιτευχθεί με συγκριτικό τρόπο. Σε κατασκευαστικό επίπεδο, το προτεινόμενο ευέλικτο καλούπι θα μπορούσε να τύχει περαιτέρω ανάπτυξης και βελτίωσης ως προς τη λειτουργία του ώστε να επιτευχθεί βελτίωση της ακρίβειας των παραγόμενων δομοστοιχείων. Η προσθήκη αυτοματισμών που θα αναφέρονται στην τοποθέτηση και τη συμπίεση του υλικού στο σωλήνα αλλά και ο αυτόματος ψεκασμός των επιφανειών του καλουπιού με λιπαντική ουσία, θα ελαχιστοποιούσε την ανθρώπινη παρέμβαση στη ρομποτική διαδικασία και θα αύξανε το βαθμό αυτοματοποίησης της. Ο μεγαλύτερος βαθμός αυτοματοποίησης θα εξυπηρετούσε την μεταφορά της διαδικασίας στην κλίμακα της βιομηχανικής μαζικής παραγωγής εξατομικευμένων δομοστοιχείων, όπου για παράδειγμα το ευέλικτο καλούπι ή ένας αριθμός από ευέλικτα καλούπια, θα μπορούσαν να παράγουν δομοστοιχεία και θα μεταφέρονταν μέσω περιστρεφόμενου ιμάντα σε χώρους για το στάδιο της ωρίμανσής τους.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία, παρόλο που σε αυτή τη φάση αναφέρεται σε συγκεκριμένες γεωμετρίες και υλικά, θα μπορούσε να προσαρμοστεί και σε άλλων ειδών κατασκευές από δομοστοιχεία με τη χρήση ψηφιακών εργαλείων και ρομποτικής. Θα μπορούσε να γίνει μεταφορά της μεθοδολογίας και στη μαζική παραγωγή μεγαλύτερης κλίμακας δομικών στοιχείων. Η ενσωμάτωση τέτοιων μεθόδων στη φάση σχεδιασμού και κατασκευής θα μπορούσαν να μειώσουν την ποσότητα του υλικού που απαιτείται καθώς επίσης και την καταναλώσιμη ενέργεια και τις εκπομπές του άνθρακα στο χώρο του

εργοταξίου. Μέσω της παραγωγής προκατασκευασμένων τμημάτων τοιχοποιίας στο εργοστάσιο επιτυγχάνονται στόχοι όπως η εξοικονόμηση ενέργειας, καυσίμων και χρόνου.

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΟΝΑΤΖΙΗ

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Agustí-Juan, I. and Habert, G., 2017. 'Environmental design guidelines for digital fabrication', *Journal of Cleaner Production*, 142(4), pp.2780-2791, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.190>

Agustí-Juan, I., Müller, F., Hack, N., Wangler, T. and Habert, G., 2017. 'Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall', *Journal of Cleaner Production*, 154, pp.330-304.

Andreani, S. and M. Bechthold, M., 2014. '[R]EVOLVING BRICK: geometry and performance innovation in ceramic building systems through design robotics', F. Gramazio, M. Kohler, S. Langenberg (Eds.), *Fabricate: Negotiating Design & Making*, gta Verlag, ETH Zurich, Zurich, Switzerland, pp.182-191.

Androsevic, R., Brocato, M., Bijedic, D. and Rustempasic, N., 2019. 'Life Cycle Assessment as a Tool for Low Waste Building Systems, Case Study Building External Wall', *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 603(4), pp.1-7, <https://doi.org/10.1088/1757-899X/603/4/042067>.

Bach, K., Bereiter-Hahn, J., Gutmann, W.F., Helmcke, J.-G., Nachtigall, W., Otto, F., Raccanello, R., Schaur, E. and Schill, R., 1976. *IL9 Pneu - Pneus in Nature and Technics*. Institut für leichte Flächentragwerke (IL), Stuttgart

Baumann, H. and Tillman, A.M., 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA: An Orientation in Life Cycle Assessment Methodology and Application*. Student Litteratur Publisher, Lund, Sweden

Bock, T. and Linner T., 2015. *Robotic Industrialization*, Cambridge University Press

Bock, T., 2008. *Construction Automation and Robotics, Robotics and Automation in Construction*, Carlos Balaguer and Mohamed Abderrahim (Ed.), ISBN: 978-953-7619-13-8

Buchanan, AH. and Honey, BG., 1994. 'Energy and carbon dioxide implications of building construction', *Energy and Buildings*, 20, pp.205-17.

Burger, N. and Billington, D.P., 2006. 'Felix Candela, Elegance and Endurance: an examination of the Xochmilco Shell.', *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures: IASS*. 27 (3), December n. 152, pp.271-278.

Chen, D., Heyer, S., Ibbotson, S., Salonitis, K., Steingrímsson, J. and Thiede, S., 2015. 'Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications', *Journal of Cleaner production*, 107, pp.615-625, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.009>

Cheng, C., Liao, L. and Chou, C., 2013. 'A study of summarized correlation with shading performance for horizontal shading devices in Taiwan', *Solar Energy*, 90, pp.1-16, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.007>.

Chevalier, J.L. and Le Teno, J.F., 1996. 'Requirements for an LCA based model for the evaluation of the environmental quality of building products', *Building and Environment* 1996, 31(5), pp.487–91.

Christoforou, E., Kylili, A. Paris A. Fokaide, P.A. and Ioannou, I., 2016. 'Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of adobe bricks', *Journal of Cleaner Production*, 112, pp.443-452.

Consoli, F., Allen, D., Boustead, I., Fava, J., Franklin, W., Jensen, A., Oude, N., Parrish, R., Perriman, R., Postlethwaite, D., Quay, B., Seguin, J. and Vigon, B., 1993. *Guide Lines for Life-Cycle Assessment: A 'Code of Practice'*, Society of Environmental Toxicology and Chemistry SETAC: Pensacola, FL, USA

De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V.N., Habert, G. and Agustí-Juan, I., 2018. 'Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials', *Cement and Concrete Research*, 112, pp.25-36, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.

De Soto, B.G., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G. and Adey, B.T., 2018. 'Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall', *Automation in Construction*, 92, pp.297-311, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>

Dunn, N., 2012. *Digital fabrication in architecture*, Laurence King, ISBN 9781856698917

Duyster, H.C., 1959. 'Construction of the Pavilion in Prestressed Concrete', *Philips Technical Review*, 20, pp.27-36.

Eisel, U., Patent. DD137423 (A1), 1979

Faludi, J., Bayley, C., Bhogal, S. and Iribarne, M., 2015. 'Comparing Environmental Impacts of Additive Manufacturing vs. Traditional Machining via Life-Cycle Assessment', *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), pp.14-33.

Faludi, J., Van Sice, C.M., Shi, Y., Bower, J. and Brooks, O.M.K., 2019. 'Novel materials can radically improve whole-system environmental impacts of additive manufacturing', *Journal of Cleaner Production*, 212, pp.1580-1590, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.017>

Galizia, F.G., ElMaraghy, W., ElMaraghy, H., Bortolini, M. and Mora, C., 2019. 'The evolution of molds in manufacturing: from rigid to flexible', *Procedia Manufacturing*, 33, pp.319-326, ISSN 2351-9789, <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.04.039>

Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J.M. and Visser, C., 2014. 'A global sustainability perspective on 3D printing technologies', *Energy Policy*, 74, pp.158-167, ISSN 0301-4215, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>

Gramazio, F., Kohler, M. and Langenberg, S., 2014. 'Fabricate: Negotiating Design & Making', gta Verlag, Zurich

Habert, G., Arribe, D., Dehove, T., Espinasse, L. and Le Roy, R., 2012. 'Reducing environmental impact by increasing the strength of concrete: quantification of the improvement to concrete bridges', *Journal of Cleaner Production*, 35, pp.250-262.

Hack, N., Lauer, W., Langenberg, S., Gramazio, F. and Kohler, M., 2013. 'Overcoming Repetition: Robotic fabrication processes at a large scale', *International journal of architectural computing*, 3(11) pp.285-99, <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1260/1478-0771.11.3.285>

Hawes, H. A., U.K. Patent Office No. GB668372-A, 1952

Hawkins, W.J., Herrmann, M., Ibell, T.J., Kromoser, B., Michaelski, A., Orr, J.J., Pedreschi, R., Pronk, A., Schipper, H.R., Shepherd, P., Veenendaal, D., Wansdrong, R. and West, M., 2016. 'Flexible formwork technologies – a state of the art review.', *Structural Concrete*, 17, pp.911-935. doi:10.1002/suco.201600117

Horvath, A., 2004. 'Construction materials and the environment', *Annu. Rev. Environ. Resource*, 29, pp.181–204.

Hotza, D. and Goulart de Oliveira Maia, B., 2014. 'Environmental performance and energy assessment of fired-clay brick masonry', *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability*. pp.447-459. 10.1016/B978-1-78242-305-8.00020-6.

Huijben, F., 2016. 'Vacuumatic formwork: a novel granular manufacturing technique for producing topology-optimised structures in concrete.', *Granular Matter* 18, 23, doi:10.1007/s10035-015-0602-0

Houben, H. and Guillaud, H., 1994. *Earth construction: a comprehensive guide*. Intermediate Technology Publications, London

Illampas, R., Loizou, V. G. and Ioannou, I., 2017. 'Effect of straw fiber reinforcement on the mechanical properties of adobe bricks', *Sixth Biot Conference on Poromechanics July 9–13*, Paris, France

Ingrao, C., Scrucca, F., Tricase, C. and Asdrubali, F., 2016. 'A comparative Life Cycle Assessment of external wall-compositions for cleaner construction solutions in buildings', *Journal Cleaner Production*, 124, pp.283-298.

Jaillon, L., Poon, C.S. and Chiang, Y., 2008. 'Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong'. *Waste management* (New York, N.Y.), 29, pp.309-320. 10.1016/j.wasman.2008.02.015

Kato, A., Nicoletti, G., Gregotti, V., Grandori, G., Ueda, A. and Kawasaki, K., 1981. *Process Architecture No. 23: Pier Luigi Nervi*. Process Architecture Publishing Co., Ltd., Tokyo

Keating, S. J., Leland, J. C., Cai L. and Oxman, N., 2017. 'Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales', *Science Robotics*, 2(5)

Khabazi, Z. and Budig, M., 2016. 'Adaptive fabrication, Cellular concrete casting using digital moulds', Herneoja, Aulikki; Toni Österlund and Piia Markkanen (eds.), *Complexity & Simplicity - Proceedings of the 34th eCAADe Conference - Volume 1*, University of Oulu, Oulu, Finland

Kim, T., Lim H., Lee, U. K., Cha, M., Cho, H. and Kang K. I., 2012. 'Advanced formwork method integrated with a layout planning model for tall building construction', *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39, pp.1173-1183.

Koc, B. and Thangaswamy, S., 2011. 'Design and analysis of a reconfigurable discrete pin tooling system for molding of three-dimensional free-form objects', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(2), pp.335-348, ISSN 0736-5845, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2010.07.017>

Kohtala, C. and Sampsa, H., 2015. 'Anticipated environmental sustainability of personal fabrication', *Journal of Cleaner Production*, 99, pp.333-344.

Kokawa, T., 2012. 'Building Techniques for Ice Shells as Temporary Structure', Tokai University, Hokkaido, Japan

Konatzii, P., 2019. 'Static performance-oriented design of variable modular bricks for automated fabrication using an adaptive formwork', *Archidoc*, 7(1), http://archidoc.net/Issues/vol7_iss1/ArchiDoct_vol7_iss1%2005%20Panagiota%20Konatzii.pdf.

Kontovourkis, O. and Konatzii, P. 'Environmental and cost assessment of customized modular wall components production based on an adaptive formwork casting mechanism', *Journal of Cleaner Production*. (Submitted in revised form on 27th of April, 2020)

Kontovourkis, O., and Konatzii, P., 2018. 'Design-static analysis and environmental assessment investigation based on a kinetic formwork driven by digital fabrication principles', In O. Kontovourkis ed. *Proceedings of the 6th eCAADe Regional International Symposium: Sustainable Computational Workflows*. Nicosia: University of Cyprus, pp.131-140.

Kontovourkis, O., and Konatzii, P., 2016. 'Optimization Process Towards Robotic Manufacturing in Actual Scale - The Implementation of Genetic Algorithms in the Robotic Construction of Modular Formwork Systems'. In A. Hernejoja, T. Österlund and P. Markkanen, eds. *Proceedings of the 34th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe: Complexity & Simplicity (Volume 1)*. Oulu: University of Oulu, pp.169-178.

Kontovourkis, O., Phocas, M.C. and Katsambas, C., 2019. 'Digital to physical development of a reconfigurable modular formwork for concrete casting and assembling of a shell

structure', *Automation in Construction*, 106, 102855,
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102855>

Kontovourkis, O., Tryfonos, G. and Konatzii, P., 2019. 'A review on environmental and economic potential of robotic construction in actual scale driven by structural optimization'. In C. Lázaro, K.-U. Bletzinger, E. Oñate eds. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2019 – Structural Membranes 2019: Form and Force*. Barcelona, Spain, pp.809-816.

Koomey, J.G., Martin, N.C., Brown, M., Price, LK. and Levine, M.D., 1998. 'Costs of reducing carbon emissions: US building sector scenarios.', *Energy Policy* 1998, 26(5), pp.433–440.

Koroneos, C. and Dompros, A., 2007. 'Environmental assessment of brick production in Greece', *Building and Environment*, 42, pp.2114–2123.

Kosche, F. P.: Schaltisch und Verfahren zur Herstellung von doppelt gekrümmten Bauteilen, German Patent No. DEI 9823610B4, 1998

Kreiger, M. and Pearce J.M., 2013. 'Environmental Life Cycle Analysis of Distributed Three-Dimensional Printing and Conventional Manufacturing of Polymer Products', *ACS Sustainable Chem. Eng.*, 1 (12), pp.1511–1519.

Kristensen, E.L., Gramazio, F., Kohler, M. and Langenberg, S., 2013. 'Complex Concrete Constructions: Merging existing casting techniques with digital fabrication', *Open Systems: Proceedings of the 18th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research (CAADRIA 2013)*, Asia, pp.613–622.

Καραντώνη, Φ. Β., 2012. *Κατασκευές από τοιχοποιία*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου

Lee, D., Lim, H., Kim, T., Cho, H. and Kang, K.I.A., 2014. 'Formwork Layout Model based on Genetic Algorithm', *31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*, pp.474-479.

Lim, S., Buswell, R.A., Le, T.T., Austin, S.A., Gibb, A.G.F. and Thorpe, T., 2012. 'Developments in construction-scale additive manufacturing processes', *Automation in Construction*, 21(1), pp.262-268.

Lloret, E., Shahab, A.R., Linus, M., Flatt, R.J., Gramazio, F., Kohler, M. and Langenberg, S., 2014. 'Complex concrete structures: Merging existing techniques with digital fabrication', *Computer-Aided Design*, 60, pp.40–49.

López, D.L., Veenendaala, D., Akbarzadeha, M. and Block, P., 2014. 'Prototype of an ultra-thin, concrete vaulted floor system', *Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium*

Lorenzo, G. A. and Bergado, D. T., 2006. 'Fundamental characteristics of cement-admixed clay in deep mixing', *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(2) (April 2006), pp.161-174.

Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E. and Díaz, S., 2011. 'Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines', *Energy*, 36(4), pp.1990-1907.

Minke, G., 2006. *Building with Earth*, Design and Technology of a Sustainable Architecture

Naboni, R. and Paoletti, I., 2015. *Advanced Customization in Architectural Design and Construction*, Springer, Cham, ISBN: 978-3-319-04422-4

Nakao, Y., Amano, A., Matsumura, K., Genba, K. and Nakano, M., 2007. 'Relationship between environmental performance and financial performance: an empirical analysis of japanese corporations', *Business Strategy and the Environment*, 16, pp.106-118. doi:10.1002/bse.476

Oesterle, S., Vansteenkiste, A. and Mirjan, A., 2012. 'Zero Waste Free-Form Formwork', *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork, BRE CICM*, University of Bath, pp.258 – 267.

Pan, M., Linner, T., Pan, W., Cheng, H. and Bock, T., 2018. 'A framework of indicators for assessing construction automation and robotics in the sustainability context', *Journal of Cleaner Production*, 182, pp.82-95, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.053>

Paulson Jr, BC., 1976. 'Designing to reduce construction costs', *Journal of the construction division*, 102(C04), pp.587-592.

Petrovic, B., Myhren, J.A., Zhang, X., Wallhagen, M. and Eriksson, O., 2019. 'Life Cycle Assessment of Building Materials for a Single-family House in Sweden', *Energy Procedia*, 158, pp. 3547-3552, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.913>.

Pronk, A., 2014. 'The calculation and construction of a 30 meter span ice dome', *In: Proceedings of the IASS-SLTE Symposium, Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints, Brasilia, Brazil*

Πρωτονοτάριος, Ε., και Θεολόγου, Μ., 1999. *Ειδικά μαθήματα ηλεκτροτεχνίας, Συμμετρία*

Raun, C. and Kirkegaard, P.H., 2012. 'Reconfigurable Double-Curved Mould', *Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork: Full Papers. Bath: BRE CICM, University of Bath, pp.292-299.*

Schipper, H.R. and Grünewald, S., 2014. 'Efficient material use through smart flexible formwork method'

Schipper, R., 2015. 'Shaping building surfaces by Renzo Piano'

Scotto, F., Lloret, E., Gramazio, F., Kohler, M. and Flatt, R. 2018. 'Adaptive control system for smart dynamic casting, Defining fabrication-informed design tools and process parameters in digital fabrication processes.', *Conference CAADRIA 2018-Learning, Adapting, Prototyping, Beijing, China, pp.255-264.*

Sitnikov, V., 2019. 'Ice Formwork for High-Performance Concrete: A Model of Lean Production for Prefabricated Concrete Industry', *Structures*, 18, pp.109-116, <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.004>

Sonnemann, G.W., 2004. 'Environmental damage estimations in industrial process chains.', *International Journal LCA*, 9(20).

Soust-Verdaguer, B., Llatas, C. and García-Martínez, A., 2017. 'Critical review of bim-based LCA method to buildings', *Energy and Buildings*, 136, pp.110-120.

Thayer, K., 2017. What is the real cost of an industrial robot arm? <https://insights.globalspec.com/article/4788/what-is-the-real-cost-of-an-industrial-robot-arm>

Vähä, P., Heikkilä, T., Kilpeläinen, P., Järviluoma, M. and Gambao, E., 2013. 'Extending automation of building construction — Survey on potential sensor technologies and robotic applications', *Automation in Construction*, 36, pp.168-178.

Van Mele, T. and Block, P., 2011. 'A novel form finding method for fabric formwork for concrete shells.' *Journal International Association Shell and Spatial Structures*, 52, pp.217-224.

Veenendaal, D. and Block, P., 2014. 'Design process for prototype concrete shells using a hybrid cable-net and fabric formwork', *Engineering Structures*, 75, pp.39-50, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.05.036>

Wang, J., Li, Z. and Tam, V.W.Y., 2014. 'Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study', China, Resources, *Conservation and Recycling*, 82, pp.1-7, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.11.003>

Wang, Y., Wang, Z.J. and Gindy, N., 2011. 'A method for representation of component geometry using discrete pin for reconfigurable moulds', *Advances in Engineering Software*, 42, pp.409-418.

Wangler, T., Lloret, E., Reiter, L., Hack, N., Gramazio, F., Kohler, M., Bernhard, M., Dillenburger, B., Buchli, J., Roussel, N. and Flatt, R., 2016. 'Digital Concrete: Opportunities and Challenges.', *RILEM Technical Letters*. 1. 67. 10.21809/rilemtechlett.2016.16

West, M. and Araya, R., 2010. 'Fabric-Formwork For Reinforced Concrete Structures And Architecture, Centre for Architectural Structures and Technology (C.A.S.T.)', University of Manitoba, Canada

Willmann, J., Knauss, M., Bonwetsch, T., Apolinarska, A.A., Gramazio, F. and Kohler, M., 2016. 'Robotic timber construction expanding additive fabrication to new dimensions', *Automation in Construction*, 61, pp.16-23.

Zabalza, I., Aranda A. and Scarpellini, S., 2009. 'Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification', *Building and Environment*, 44, pp.2510-20.

ΑΛΛΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] COAA architects, 2018. Available at: <https://coaa.mx/> (accessed 20 December, 2019)

[2] Cleia Builds. Available at: <https://tc.cleia.fr/en/news/248-cleia-1st-fired-roof-tiles> (accessed 20 December, 2019)

- [3] Aimix. Available at: <https://aimix.com.bd/brick-making-machine/> (accessed 20 December, 2019)
- [4] PERI formworks. Available at: <https://www.peri.com/en/products/formwork.html> (accessed 20 December, 2019)
- [5] ADAPA. Available at: The adaptive mould: <https://adapa.dk/> (accessed 20 December, 2019)
- [6] Kenzo Unno. Available at: http://www.fabwiki.fabric-formedconcrete.com/lib/exe/fetch.php?media=unno:kenzo_unno_article_part_1.pdf (accessed 20 December, 2019)
- [7] C.A.S.T. Available at: https://block.arch.ethz.ch/brg/files/suco_201100014.pdf (accessed 20 December, 2019)
- [8] Smart Dynamic Casting. Available at: <https://gramaziokohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/325.html> (accessed 20 December, 2019)
- [9] Immensa Technology Labs. Available at: <https://www.immensalabs.com/> (accessed 20 December, 2019)
- [10] European Platform of Life Cycle Assessment. Available at: <https://ec.europa.eu/environment/ipp/lca.htm> (accessed 20 December, 2019)
- [11] ISO, 2006b. ISO 14040, Environmental Management Life Cycle Assessment Principles and Framework. International Standard Organisation
- [12] One Click LCA: <https://www.oneclicklca.com/>
- [13] EPD: European Commission. *What is EPD?* In Environmental Product Declaration; European Commission. Available at: <http://ec.europa.eu/environment/ipp/epds.htm> (accessed 20 December, 2019)
- [14] Oekobau.dat 2016-I: ÖKOBAUDAT platform is provided as a standardized database for ecological evaluations of buildings. Available at: <https://www.oekobaudat.de/en/archive/oekobaudat-2016/database.html> (accessed 20 December, 2019)

- [15] IMPACT. Available at: <https://www.bregroup.com/impact/the-impact-database/> (accessed 20 December, 2019)
- [16] TailorCrete by Gramazio, F. and Kohler, M., 2011. (online): <http://gramazio-kohler.arch.ethz.ch/web/e/forschung/164.html> (accessed 20 December, 2019)
- [17] ABAQUS: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/abaqus/>
- [18] Firefly (plug-in for Grasshopper): <https://www.grasshopper3d.com/group/fireflyplugin>
- [19] TACO ABB (plug-in for Grasshopper):
<http://blickfeld7.com/architecture/rhino/grasshopper/Taco/>
- [20] Πολυκατοικία Ν.Βαλσαμάκη Λεωφόρος Κηφισίας 272, 1958. Available at:
<http://domesindex.com/buildings/polykatoikia-epi-ths-lewforoy-khfsias-272/> (accessed 20 December, 2019)
- [21] Sumart Diseño y Arquitectura SAS, 2015. Available at:
Chi She Gallery: <https://www.archdaily.com/797505/chi-she-archi-union-architects/> (accessed 20 December, 2019)
- [22] Gallery of winery Gantenbein, 2006. Available at:
<https://www.archdaily.com/260612/winery-gantenbein-gramazio-kohler-bearth-deplazes-architekten/> (accessed 20 December, 2019)
- [23] Ευροκώδικα 6 (EN:1996-1-1, 2005): EN:1996-1-1, Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-1, General rules for buildings: rules for reinforced and unreinforced masonry, 2005
- [24] Ευροκώδικα 8: EN 1998-1:2004, Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings
- [25] Grasshopper: <https://grasshopper.app/>
- [26] Ladybag: <https://www.food4rhino.com/app/ladybug-tools>
- [27] Heliotrope: <https://www.food4rhino.com/app/heliotrope-solar>
- [28] EnergyPlus: <https://energyplus.net/>

[29] Robot Studio 6.0: <http://new.abb.com/products/robotics/robotstudio/>

[30] Arduino: <https://www.arduino.cc/>

[31] European Standard EN 15978. Available at:

https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT:31325&cs=16BA443169318FC086C4652D797E50C47 (accessed 20 December, 2019)

[32] Ecoinvent 2014: ecoinvent database provides well documented process data for thousands of products. Available at: <https://www.ecoinvent.org/> (accessed 20 December, 2019)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

ΑΝΑΛΥΣΗ SHADING RATIO

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1Γ: ΤΥΠΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ: ΑΝΟΙΓΜΑ ΜΕ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Δεκέμβριος (21/12) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 29.33 | 9.79 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 21.45 | 100% | 100% |
| 15 | 30.56 | 11.42 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 2.14% | 23.30 | 100% | 100% |
| 25 | 29.70 | 7.70 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 20.56 | 100% | 100% |
| 45 | 31.95 | 12.31 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 2.74 | 23.29 | 100% | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Ιούνιος (21/06) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 32.68 | 8.68 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 19.74 | 40.05 | 44.07 |
| 15 | 33.38 | 11.24 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 22.15 | 39.42 | 41.31 |
| 25 | 30.77 | 8.96 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 19.07 | 38.20 | 44.64 |
| 45 | 33.16 | 13.73 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 22.12 | 39.21 | 40.43 |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Μάρτιος (21/03) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 54.71 | 28.17 | 2.27 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 7.71 | 35.63 | 56.78 | 100% |
| 15 | 52.40 | 28.92 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 5.03 | 35.43 | 56.78 | 100% |
| 25 | 56.78 | 28.08 | 3.92 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 8.73 | 35.35 | 56.78 | 100% |
| 45 | 50.78 | 25.63 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 0.75 | 32.51 | 56.31 | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Σεπτέμβριος (21/09) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 50.14 | 21.39 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 13.66 | 42.82 | 56.78 | 100% |
| 15 | 47.34 | 21.43 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 12.46 | 41.12 | 56.78 | 100% |
| 25 | 51.24 | 21.53 | 0.85 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 14.19 | 42.45 | 56.78 | 100% |
| 45 | 45.38 | 18.64 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 9.37 | 38.55 | 56.78 | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Ν / Δεκέμβριος (21/12) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 100% | 100% | 4.75 | 17.57 | 25.54 | 25.19 | 21.69 | 11.58 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 0.45 | 17.37 | 25.76 | 25.17 | 21.84 | 11.76 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 6.72 | 17.13 | 23.65 | 26.81 | 21.86 | 10.30 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 16.14 | 26.50 | 28.49 | 20.16 | 9.84 | 0.51 | 100% | 100% | 100% |

Case 1 -
Μοίρες
περιστροφής
ανοίγματος(°)
/πάχος 8 cm

Προσανατολισμός: N / Ιούνιος (21/06)
Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%)

| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Case 1 -
Μοίρες
περιστροφής
ανοίγματος(°)
/πάχος 8 cm

Προσανατολισμός: N / Μάρτιος (21/03)
Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%)

| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Case 1 -
Μοίρες
περιστροφής
ανοίγματος(°)
/πάχος 8 cm

Προσανατολισμός: N / Σεπτέμβριος (21/09)
Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%)

| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1B: ΤΥΠΟΛΟΓΙΑ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ: ΑΝΟΙΓΜΑ ΧΩΡΙΣ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Δεκέμβριος (21/12) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|--|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 39.00 | 10.65 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 25.64 | 100% | 100% |
| 15 | 35.34 | 12.17 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 3.59 | 24.30 | 100% | 100% |
| 25 | 37.14 | 9.92 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 28.10 | 100% | 100% |
| 45 | 33.00 | 13.03 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 3.24 | 24.21 | 100% | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Ιούνιος (21/06) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 35.65 | 11.87 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 24.08 | 41.22 | 46.75 |
| 15 | 34.47 | 12.18 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 23.14 | 40.56 | 48.86 |
| 25 | 37.69 | 11.67 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 25.99 | 42.57 | 45.85 |
| 45 | 34.24 | 14.47 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 23.02 | 41.92 | 50.80 |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Μάρτιος (21/03) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 60.59 | 29.18 | 2.72 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 8.34 | 36.74 | 68.94 | 100% |
| 15 | 62.28 | 29.98 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 5.76 | 38.07 | 70.55 | 100% |
| 25 | 60.11 | 29.07 | 4.34 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 9.32 | 36.44 | 68.43 | 100% |
| 45 | 67.26 | 34.13 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 1.98 | 43.01 | 74.38 | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Α-Δ / Σεπτέμβριος (21/09) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 52.99 | 22.29 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 14.43 | 44.01 | 76.91 | 100% |
| 15 | 54.75 | 22.41 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 13.31 | 45.58 | 78.22 | 100% |
| 25 | 52.51 | 22.41 | 1.06 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 14.93 | 43.63 | 76.50 | 100% |
| 45 | 59.95 | 24.97 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 13.05 | 51.10 | 81.40 | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Ν / Δεκέμβριος (21/12) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|--|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 100% | 100% | 6.53 | 19.35 | 28.30 | 32.45 | 23.60 | 13.29 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 2.91 | 19.20 | 27.66 | 33.27 | 23.99 | 13.43 | 0.92 | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 8.21 | 19.03 | 29.86 | 30.49 | 23.66 | 12.27 | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 0.18 | 18.74 | 27.48 | 29.52 | 26.17 | 10.72 | 0.92 | 100% | 100% | 100% |

| Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος(°) /πάχος 8 cm | Προσανατολισμός: Ν / Ιούνιος (21/06) Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%) | | | | | | | | | | | |
|---|---|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
| 0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Case 1 -
Μοίρες
περιστροφής
ανοίγματος(°)
/πάχος 8 cm

Προσανατολισμός: N / Μάρτιος (21/03)
Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%)

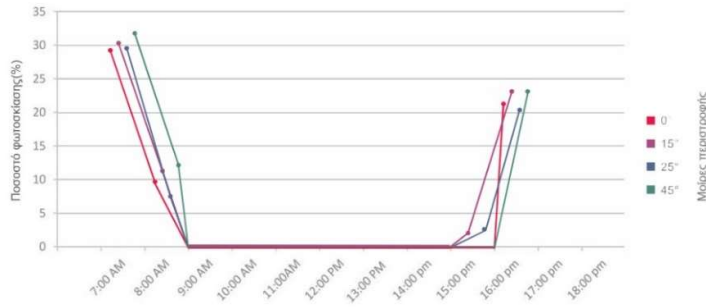
| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Case 1 -
Μοίρες
περιστροφής
ανοίγματος(°)
/πάχος 8 cm

Προσανατολισμός: N / Σεπτέμβριος (21/09)
Ποσοστά σκίασης-ηλιασμού(%)

| | 7.00 | 8.00 | 9.00 | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 17.00 | 18.00 |
|----|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 15 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 25 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| 45 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

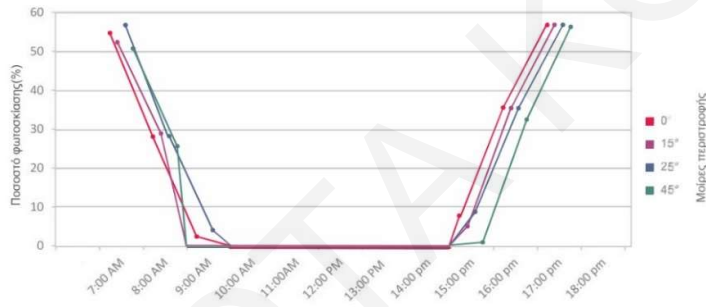
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1Γ: ΓΡΑΦΙΚΕΣ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΦΩΤΟΣΚΙΑΣΗΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΙΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗΣ ΤΟΥ ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ



Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος (*) / πάχος 8 Προσανατολισμός: Α-Δ / Δεκέμβριος (21/12)



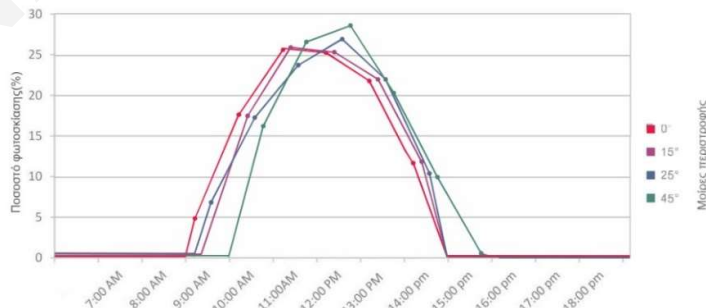
Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος (*) / πάχος 8 Προσανατολισμός: Α-Δ / Ιανουάριος (21/06)



Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος (*) / πάχος 8 Προσανατολισμός: Α-Δ / Μάρτιος (21/03)



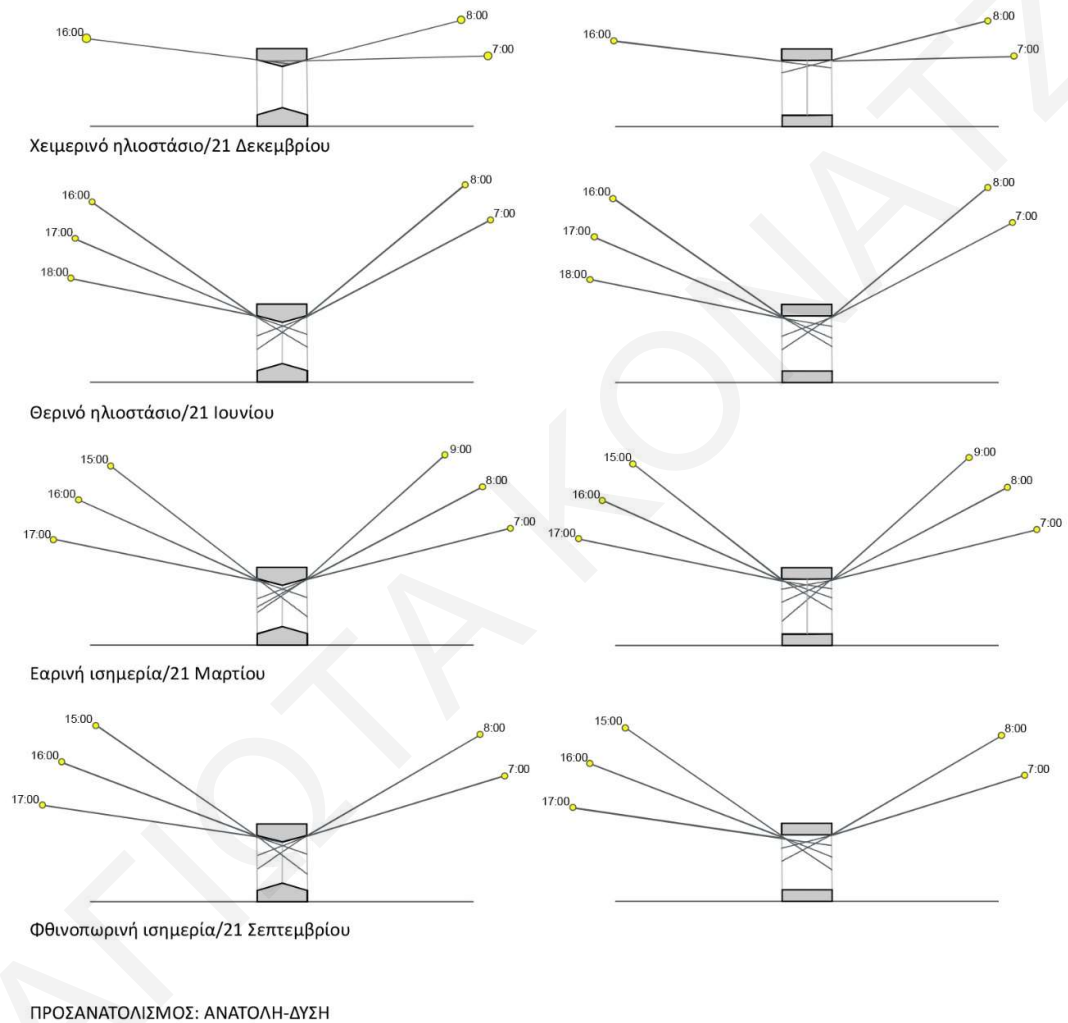
Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος (*) / πάχος 8 Προσανατολισμός: Α-Δ / Σεπτέμβριος (21/09)



Case 1 - Μοίρες περιστροφής ανοίγματος (*) / πάχος 8 Προσανατολισμός: Ν / Δεκέμβριος (21/12)

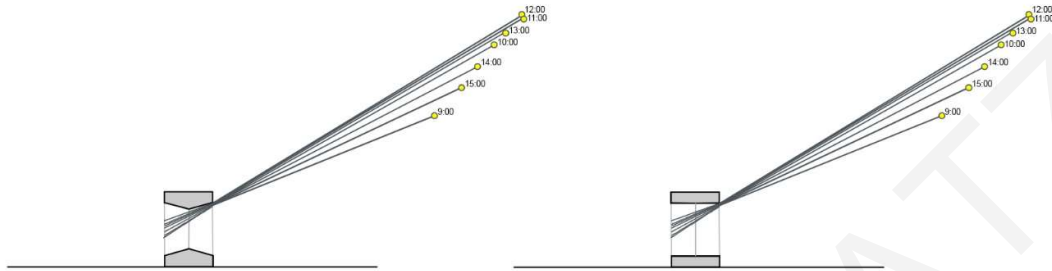
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1Δ: ΤΟΜΕΣ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΩΡΕΣ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΣΕ ΑΝΑΤΟΛΙΚΟ-ΔΥΤΙΚΟ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ.

ΤΟΜΗ

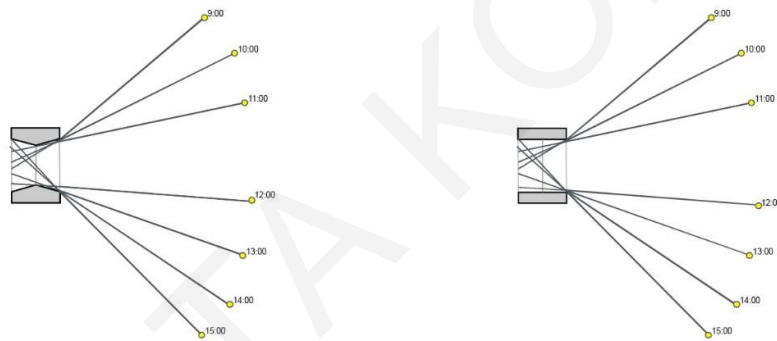


ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1Ε: ΤΟΜΕΣ ΚΑΙ ΚΑΤΟΨΕΙΣ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ ΚΑΙ ΔΟΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΧΩΡΙΣ ΠΤΥΧΩΣΕΙΣ, ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗ ΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΚΑΤΑ ΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΩΡΕΣ ΤΗΣ ΗΜΕΡΑΣ ΣΕ ΝΟΤΙΟ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ

ΤΟΜΗ



ΚΑΤΟΨΗ

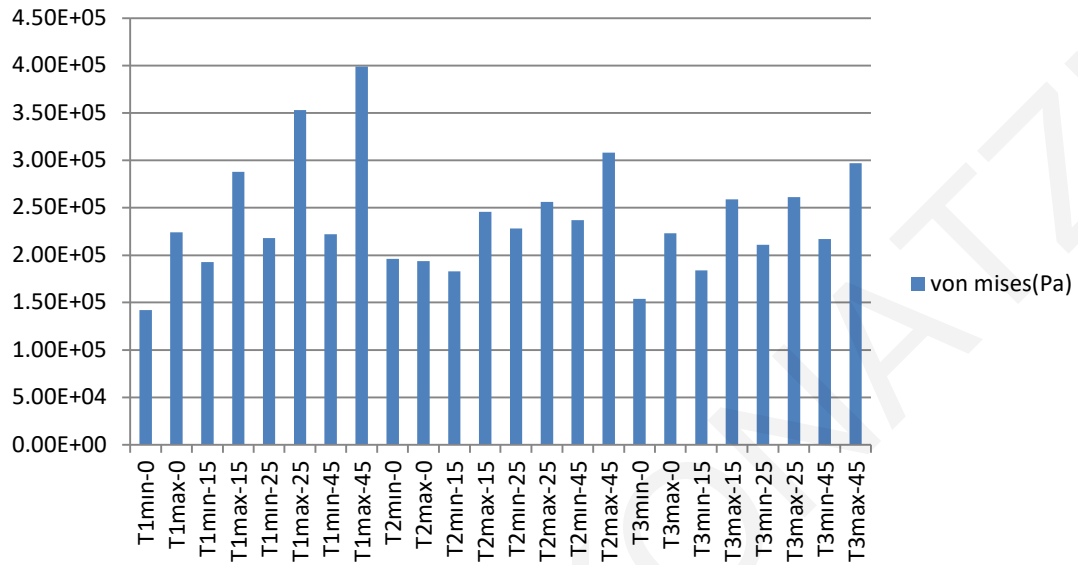


Χειμερινό ηλιοστάσιο/21 Δεκεμβρίου

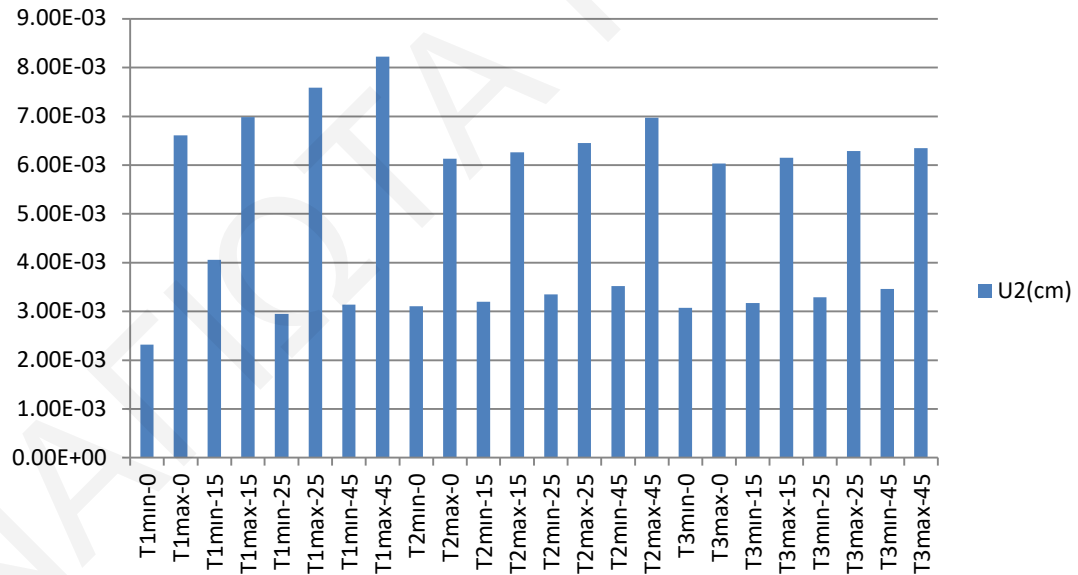
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΣ: ΝΟΤΟΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2

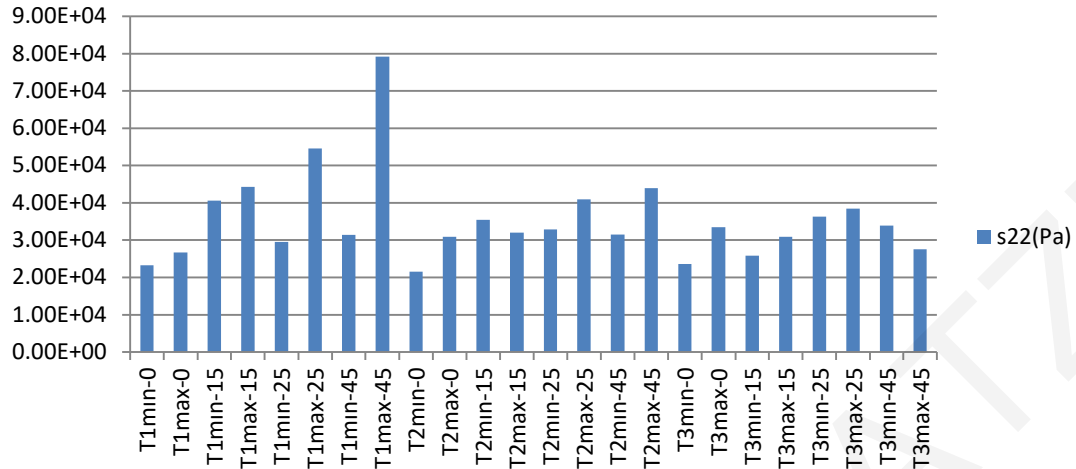
ΣΤΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ



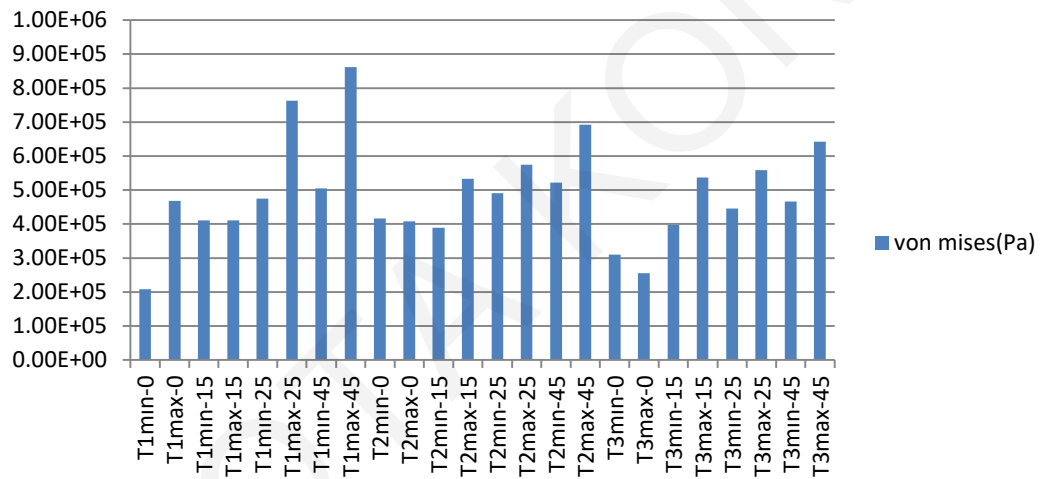
Graph Von-Mises minimum-maximum ανοιγμάτων Scenario 1,2,3 - adobe



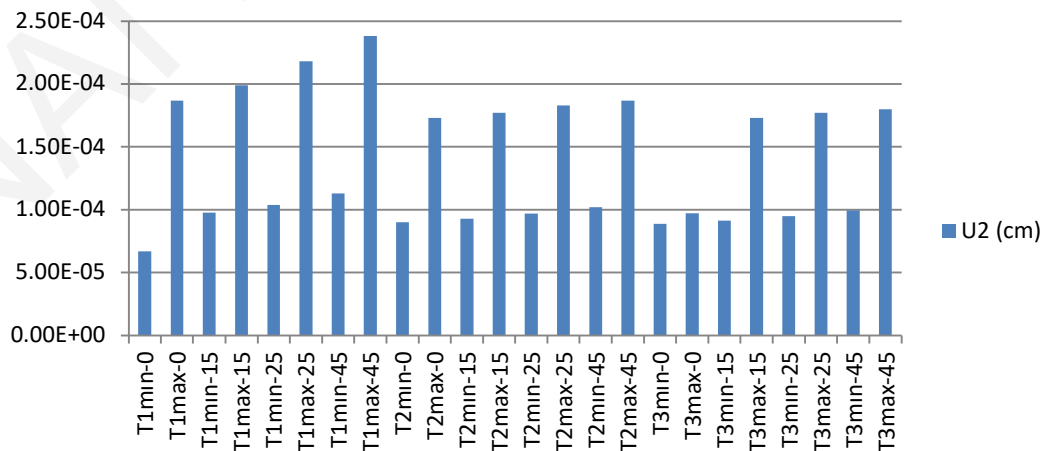
Graph U2 displacement minimum-maximum ανοιγμάτων Scenario 1,2,3 - adobe



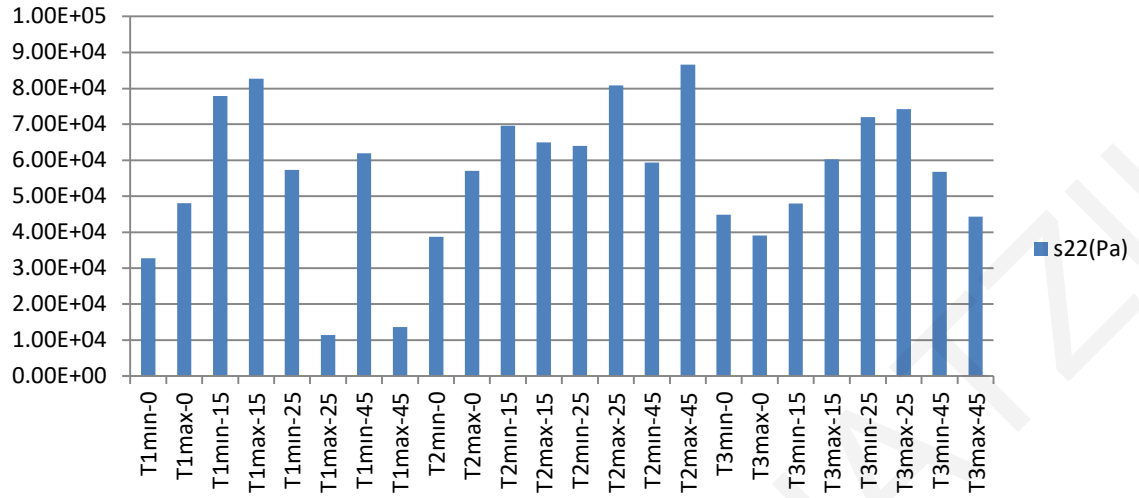
Graph S22 stress values minimum-maximum ανοιγμάτων Scenario 1,2,3 - adobe



Graph Von-Mises minimum-maximum ανοιγμάτων Scenario 1,2,3 - concrete



Graph U2 displacement minimum-maximum ανοιγμάτων Scenario 1,2,3 - concrete



Graph S22 stress values minimum-maximum ανοιγμάτων Scenario 1,2,3 – concrete

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3Α: ΚΩΔΙΚΑΣ ΡΟΜΠΟΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΕΩΝ ROBOT STUDIO 6.0

```
MODULE MainModule
VAR speeddata Work:= [200,80,4000,1000];
PERS tooldata gripper := [TRUE, [[0,0,155.07], [1,0,0,0]], [1.5,[0.10,0.00,0.00],[1,0,0,0],0,0,0]];
PROC Main()
  Confl \Off;
  ConfJ \Off;
  MoveL [[1054.01,-556.24,748.14],[0,0,-0.707107,0.707107],[0,-1,1,0], [0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]] ,v5, z10,
  gripper\WObj:= WObj0;
  SetDO DO10_CloseGripper,0;
  SetDO DO10_OpenGripper,0;
  SetDO DO10_6,0;
  SetDO DO10_7,1;
  SetDO DO10_OpenGripper,1;
  WaitDI DI10_5,1;
  Waittime 30;
  SetDO DO10_7,0;
  SetDO DO10_6,1;
  WaitDI DI10_3,1;
  Waittime 5;
  SetDO DO10_OpenGripper,0;
  SetDO DO10_CloseGripper,1;
  MoveL [[1051,-441.95,792.46],[-0.5,-0.5,-0.5,0.5],[0,-1,-1,0], [0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]] ,v5, z10,
  gripper\WObj:= WObj0;
  MoveL [[1051,-122.95,532.46],[-0.5,-0.5,-0.5,0.5],[0,-1,-1,0], [0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]] ,v5, z10,
  gripper\WObj:= WObj0;
  MoveL [[1051,-122.95,232.46],[-0.5,-0.5,-0.5,0.5],[0,-1,-1,0], [0,9E9,9E9,9E9,9E9,9E9]] ,v5, z10,
  gripper\WObj:= WObj0;
  Waittime 60;
  SetDO DO10_6,0;
  SetDO DO10_7,1;
  WaitDI DI10_8,1;
  SetDO DO10_6,1;
  SetDO DO10_OpenGripper,1;
  WaitTime 10;
  SetDO DO10_CloseGripper,0;
  SetDO DO10_6,0;
```

WaitTime 10;

MoveL [[1051,-122.95,532.46],[-0.5,-0.5,-0.5,0.5],[0,-1,1,0], [0,9E9,9E9,9E9,9E9]], v5, z10,
gripper\WObj:= WObj0;

ENDPROC

ENDMODULE

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΚΟΝΑΤΖΙΗ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3B: ARDUINO PLATFORM

```
const int STEP_PIN = 5;
const int Enable_PIN = 7;
const int DIR_PIN = 6;
long currentMicros = 0;
long previousMicros = 0;
float accel = 10;
float d = accel * 0.4;
float h = d / 100;
int LA = 10; // linear AC

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(STEP_PIN, OUTPUT);
  pinMode(Enable_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DIR_PIN, OUTPUT);
  digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
  digitalWrite(Enable_PIN, HIGH);
  digitalWrite(DIR_PIN, HIGH);
  Serial.println("Starting");
  analogWrite(LA, 0); // add the zero number
  delay (4000);
  Serial.println("Welcome to Step Driver");
}

void loop()
{
  int val = Serial.parseInt();
  Serial.println("Give the Value for Seteps ");
  while (Serial.available() == 0);
  int S = Serial.parseInt();
  Serial.println(S);
  Serial.println("Give the Value for Linear Actuator ");
  while (Serial.available() == 0);
  int A = Serial.parseInt();
```

```
Serial.println(A);
Serial.println("Working ");
analogWrite(LA, A);
delay(6000);

digitalWrite(Enable_PIN, LOW);
digitalWrite(DIR_PIN, LOW);
float b = 333;
float a = 10000;
for (int i = 0; i < S; i++)
{
    // a=a-2;
    if (a <= b) a = b;
    else a = a - h;
    long delay_Micros = a ;
    currentMicros = micros();
    if (currentMicros - previousMicros >= delay_Micros)
    {
        previousMicros = currentMicros;

        digitalWrite(STEP_PIN, HIGH);
        delayMicroseconds(a);
        digitalWrite(STEP_PIN, LOW);
    }
}
Serial.println("Done...");
delay(2000);
}
```