



Πανεπιστήμιο
Κύπρου

Διπλωματική Εργασία

**ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΤΗΡΙΟΥ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ
ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕ ΕΣΚΕΜΜΕΝΗ ΦΘΟΡΑ ΓΙΑ ΠΡΟΚΛΗΣΗ
ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ**

Αντρέας Τομάζος

**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

Δεκέμβριος 2020

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Μη γραμμική ανάλυση κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα με εσκεμμένη
φθορά για την πρόκληση προοδευτικής κατάρρευσης

Αντρέας Τομάζος

Επιβλέπων Καθηγητής
Δήμος Χαρμπής

Η Διπλωματική Εργασία υποβλήθηκε προς μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων
απόκτησης του μεταπτυχιακού προγράμματος MSc, Αντισεισμική Μηχανική του
Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Περιβάλλοντος

Δεκέμβριος 2020

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον Δρ. Δήμο Χαρμπή για το ιδιαίτερα ενδιαφέρον, θέμα διπλωματικής που μου ανέθεσε και για όλη την συνεχή καθοδήγηση και συμβουλές που μου παρείχε. Είναι πολύ σημαντική η εκμάθηση ενός νέου λογισμικού ανάλυσης για την επίλυση κατασκευών καθώς μας διευρύνει τις γνώσεις και μας προετοιμάζει για την εργασία στο επάγγελμα του Πολιτικού Μηχανικού. Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές του μεταπτυχιακού προγράμματος για τα μαθήματα που με δίδαξαν και κυρίως για την καλλιέργεια του τρόπου σκέψης και της μεθοδικότητας που μου μετάφεραν.

Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα να δώσω στην Πολιτικό Μηχανικό κυρία Δέσποινα Χ' Μάρκου η οποία μας διάθεσε τη στατική της μελέτη του κτηρίου που μελετήθηκε στη συγκεκριμένη διπλωματική. Επίσης στον κύριο Φίλιππο Καμέρη, ο οποίος με εργοδότησε στην εταιρεία Φ.Χ.Κ. Υπεροικοδομική Λτδ, μέσα από την οποία απέσπασα σημαντικές εμπειρίες που αποτέλεσαν πηγή έμπνευσης για την συγκεκριμένη διατριβή.

Επίσης ευχαριστώ πολύ την εταιρεία SeismoSoft η οποία διάθεσε το λογισμικό πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία για την ανάλυση του φορέα.

Την διπλωματική εργασία αφιερώνω στους γονείς μου Άγι και Βασιλική και στην γυναίκα μου Ιωάννα και στον υιό μου Άγι. Η συνεχής και απόλυτη στήριξη τους ήταν καταλυτική για την ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών σπουδών μου.

Περίληψη

Στη σύγχρονη εποχή, παρατηρείται ότι πέραν των συνηθισμένων φορτιστικών καταστάσεων, που καταπονούν τις κατασκευές, όπως ίδιο βάρος, μόνιμα, κινητά φορτία κ.ο.κ. δύναται να εμφανιστούν σε σπάνιες περιπτώσεις, ακραίες φορτιστικές καταστάσεις. Μερικά παραδείγματα είναι η πυρκαγιά, οι εκρήξεις και έντονα κρουστικά φορτία. Η πιθανότητα να συμβούν αυτά τα συμβάντα, παρουσιάζεται βέβαια σε δημόσια κτίρια, σε πολυώροφα κτίρια, ή σε κτίρια υψηλού ενδιαφέροντος, των οποίων η οποιαδήποτε ζημιά έχει υψηλό κοινωνικοοικονομικό αντίκτυπο.

Οι ακραίες φορτιστικές καταστάσεις και τυχηματικές δράσεις όπως είναι τα κρουστικά φορτία, η φωτιά και οι εκρήξεις μπορεί να οδηγήσουν σε τοπικές αστοχίες του φέροντα οργανισμού των κτιρίων και σε ορισμένες περιπτώσεις σε προοδευτική κατάρρευση της κατασκευής. Για παράδειγμα η ξαφνική απώλεια ακραίου υποστυλώματος ενός φορέα επιφέρει σημαντική αύξηση της έντασης των γειτονικών υποστυλωμάτων και δοκών που είναι πιθανό να αστοχήσουν και αυτά με την σειρά τους. Μερικά παραδείγματα είναι η κατάρρευση των Δίδυμων Πύργων στην Αμερική (11η Σεπτεμβρίου 2001), η πυρκαγιά σε πολυώροφο κτίριο στην Σανγκάη (15η Νοεμβρίου 2010), η πυρκαγιά στην Notre-Dame στο Παρίσι (15η Απριλίου 2019) κ.ο.κ.

Στην Κύπρο ορισμένα παραδείγματα είναι η κατάρρευση της στέγης του Κρατικού Θεάτρου του ΘΟΚ (11η Ιουνίου 2008) και κατάρρευση κτηρίων από πυρκαγιές (π.χ. σε αποθήκη κεριών, σε αποθήκη γεωργικών προϊόντων κ.ο.κ.).

Επίσης, στην Κύπρο, η βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος χρονολογείται πέραν των πενήντα χρόνων. Πολλά κτήρια σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν χωρίς έλεγχο σε σεισμό, με παλαιότερους κανονισμούς, δεν συντηρούνται και δεν επισκευάζονται καθώς επίσης υπάρχουν ακόμα κτήρια κτισμένα με παραδοσιακά υλικά όπως για παράδειγμα το πλιθάρι. Τέτοια κτήρια συναντώνται σε ιστορικούς πυρήνες αρκετών δήμων και στην πλειοψηφία τους, παρουσιάζουν σημαντικές ρηγματώσεις, καθιζήσεις και άλλες σημαντικές φθορές οι οποίες τα καθιστούν μη κατοικήσιμα και πολλές φορές είναι ανάγκη να κατεδαφιστούν.

Σε περιπτώσεις όπου ένα υπάρχον κτίριο ζητείται να κατεδαφιστεί, όπου δηλαδή η κατάρρευση είναι το ζητούμενο αποτέλεσμα, είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα η ανάλυση που μπορεί να γίνει για την πιο αποτελεσματική, γρήγορη και ασφαλή αφαίρεση των στοιχείων του φέροντα οργανισμού. Για την επιβολή της κατάρρευσης η σειρά και η θέση των στοιχείων που θα αφαιρεθούν και των πλαστικών αρθρώσεων που θα προκύψουν αποτελεί αντικείμενο άμεσα συνδεδεμένο με την μη γραμμική ανάλυση των κατασκευών.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν ο εντοπισμός του βέλτιστου αριθμού υποστυλωμάτων που πρέπει να αφαιρεθούν, για την κατεδάφιση υφιστάμενου πολυώροφου κτηρίου από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αρχικά προσομοιώθηκε ο φορέας και έπειτα πραγματοποιήθηκε μια σειρά από αναλύσεις “pushdown”, αντίστοιχων με την “pushover” μέθοδο μη γραμμικής ανάλυσης, με την διαφορά ότι το επαυξανόμενο φορτίο αντί για οριζόντια διεύθυνση είχε κατακόρυφη διεύθυνση. Σημειώνεται ότι η απώλεια κάθε στοιχείου του φέροντα οργανισμού θεωρείται ότι συντελείται στιγμιαία και έτσι ελέγχεται μόνο η εναπομένουσα κατασκευή με τη νέα της δομή χωρίς επιπλέον δυναμική καταπόνηση από την αφαίρεση στοιχείων.

Για να είναι δυνατή η μη γραμμική ανάλυση του τρισδιάστατου φορέα ο οποίος οδηγήθηκε σε κατάρρευση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct.

Abstract

It is observed that, in modern times, in addition to the usual load conditions, which strain the structures (self weight, permanent loads, live loads etc), extreme loading conditions may occur. Some examples are fire, explosions and shocks. These events are more likely to occur in public buildings, high-rise buildings and buildings of high interest because of their higher socio-economic impact.

The mentioned accidental actions and load states, can lead to local failures of the load-bearing structure of the building and in some cases to the progressive collapse of the structure.

In Cyprus, the concrete industry is over fifty years old. Many buildings were designed and built without any earthquake checks, with older regulations, some of them are not maintained nor repaired and some are built with traditional materials such as mud bricks. These buildings are found in the historical cores of several municipalities and in the majority of them, they show significant cracks, and other major damages, which make them uninhabitable and often need to be demolished.

In cases where an existing building is requested to be demolished and where the collapse is the desired result, the analysis that can be done for the most efficient, fast and safe removal of the elements of the structure is of great interest. In order to enforce the collapse, the order and position of the elements to be removed and the resulting plastic hinges are an object directly related to the non-linear analysis of the structures.

The purpose of this dissertation was to identify the optimal number of columns to be removed for the demolition of an existing high-rise building made of reinforced concrete. The structure was first simulated and then a series of "pushdown" analysis were performed, corresponding to the "pushover" method of nonlinear analysis, with the difference that the increasing load had a vertical direction instead of a horizontal direction.

Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	i
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	ii
1 ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΙΣ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	1
1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΗΣ.....	2
1.3 ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗ.....	7
2 ΦΟΡΕΑΣ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ	8
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΦΟΡΕΑ- ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ	8
2.2 ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΜΕΛΕΤΗΣ	11
2.3 ΔΙΑΤΟΜΕΣ ΦΟΡΕΑ	13
3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ	16
3.1 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	16
3.2 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΦΟΡΕΑ	17
3.3 ΈΛΕΓΧΟΙ- ΚΩΔΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΕΛΩΝ	22
3.4 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ	25
4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PUSHOVER	29
4.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ $G+0.3Q$	29
4.2 ΑΝΑΛΥΣΗ PUSHOVER	31
5 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ	35
5.1 ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΜΕ ΚΑΘΑΙΡΕΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ	35
5.2 ΠΡΟΚΛΗΣΗ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΧΩΡΙΣ ΚΑΘΑΙΡΕΣΗ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ...	41
6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ	62
6.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	62
6.2 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ	65

EIKONEΣ

Εικόνα 1: Κτήριο υπό κατεδάφιση.....	1
Εικόνα 2: Κατεδάφιση δια χειρός (Νομικού, 2011)	2
Εικόνα 3: Κατεδάφιση με μηχανικά μέσα.....	3
Εικόνα 4: Κατεδάφιση με εκρηκτικά μέσα (2020, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Explosives).....	4
Εικόνα 5: Πολυώροφο κτήριο προς κατεδάφιση στο κέντρο της Λευκωσίας	5
Εικόνα 6: Ανύψωση μηχανημάτων με κινητό γερανό για την κατεδάφιση του κτηρίου	6
Εικόνα 7: Φωτογραφία νότιας όψης του υφιστάμενου κτηρίου	8
Εικόνα 8: Φωτογραφία βορινής όψης του υφιστάμενου κτηρίου.....	8
Εικόνα 1: Κτήριο υπό κατεδάφιση.....	1
Εικόνα 2: Κατεδάφιση δια χειρός (Νομικού, 2011)	2
Εικόνα 3: Κατεδάφιση με μηχανικά μέσα.....	3
Εικόνα 4: Κατεδάφιση με εκρηκτικά μέσα (2020, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Explosives).....	4
Εικόνα 5: Πολυώροφο κτήριο προς κατεδάφιση στο κέντρο της Λευκωσίας	5
Εικόνα 6: Ανύψωση μηχανημάτων με κινητό γερανό για την κατεδάφιση του κτηρίου	6
Εικόνα 7: Φωτογραφία νότιας όψης του υφιστάμενου κτηρίου	8
Εικόνα 8: Φωτογραφία βορινής όψης του υφιστάμενου κτηρίου.....	8

ΣΧΗΜΑΤΑ

Σχήμα 2.1: Κάτοψη κτηρίου προς μελέτη	9
Σχήμα 2.2: Λεπτομέρεια εξωτερικού κλιμακοστασίου	10
Σχήμα 2.3: Σεισμικά φορτία βάση παλιού Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ..	11
Σχήμα 2.4: Σεισμικά φορτία βάση της τροποποίησης του 1984 του παλιού Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού	12
Σχήμα 2.5: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 1	13
Σχήμα 2.6: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 2	14
Σχήμα 2.7: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 3	14
Σχήμα 2.8: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 4	15
Σχήμα 3.1: Γραφικό περιβάλλον λογισμικού ανάλυσης SeismoStruct	16
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα αρίθμησης κόμβου στο πρόγραμμα SeismoStruct	17
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα αρίθμησης κολώνας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct	18
Σχήμα 3.4: Παράδειγμα αρίθμησης δοκού στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct ...	18
Σχήμα 3.5: Χωρική αναπαράσταση του φορέα στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct	19
Σχήμα 3.6: Καρτέλα Performance criteria του λογισμικού ανάλυσης SeismoStruct ..	22
Σχήμα 3.7 Οριακή τιμή συνολικής ικανότητας στροφής χορδής: EN 1998-3: A.3.2.2 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC)	23
Σχήμα 3.8 Διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση VR από τον Ευρωκώδικα 8 EN 1998-3: A.3.3.1 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC)	24
Σχήμα 3.9: Κόμβος αναφοράς που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το υποστύλωμα που αφαιρέθηκε.....	25
Σχήμα 3.10: Παραμορφωμένος φορέας από άλλη έρευνα. 2017, Parisi, Brunesi	26
Σχήμα 3.11: Παραμορφωμένος φορέας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct για φορτιστικό συντελεστή ίσο με 37,98	26
Σχήμα 3.12: Παραμορφωμένος φορέας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct για φορτιστικό συντελεστή ίσο με 18,76	27

Σχήμα 3.13: Παραμορφωμένος φορέας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct για φορτιστικό συντελεστή ίσο με 47.15	27
Σχήμα 3.14: Διάγραμμα μετακίνησης κόμβου αναφοράς και φορτιστικού συντελεστή (κατανεμημένο φορτίο) από ανάλυση για επαλήθευση λογισμικού SeismoStruct	28
Σχήμα 4.1: Κατηγορίες χρήσης: Πίνακας 6.1 του Ευρωκώδικα 1 EN1991-1-1:2002-κυπριακό εθνικό προσάρτημα	29
Σχήμα 4.2: Επιβαλλόμενα φορτία σε δάπεδα, μπαλκόνια και σκάλες κτηρίων: Πίνακας 6.2 του Ευρωκώδικα 1 EN1991-1-1:2002- κυπριακό εθνικό προσάρτημα	30
Σχήμα 4.3: Κάτοψη κατασκευής με επιβολή οριζόντιων φορτίων κατά τον ασθενή άξονα	32
Σχήμα 4.4: Τρισδιάστατος φορέας με επιβολή οριζόντιων φορτίων κατά τον ασθενή άξονα	32
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτιστικού συντελεστή και μετακινήσεων κόμβου n588..	33
Σχήμα 4.6: Παραμορφωμένος φορέας σε ανάλυση pushover στον ασθενή άξονα	33
Σχήμα 4.7: Παραμορφωμένος φορέας σε ανάλυση pushover στον ασθενή άξονα	34
Σχήμα 4.8: Διάγραμμα σεισμικής τέμνουσας και μετατοπίσεων	34
Σχήμα 5.1: Αφαίρεση του υποστυλώματος K9 από το ισόγειο.	36
Σχήμα 5.2: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K9 ...	36
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστυλώμα K9 που αφαιρέθηκε.....	35
Σχήμα 5.4: Αφαίρεση του υποστυλώματος K16 από το ισόγειο.	35
Σχήμα 5.5: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K16 ..	38
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστυλώμα K16 που αφαιρέθηκε.....	38
Σχήμα 5.7: Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16 από το ισόγειο.	39
Σχήμα 5.8: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16.	39
Σχήμα 5.9: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16	40
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστυλώμα K9 που αφαιρέθηκε.....	40
Σχήμα 5.11 Αφαίρεση του υποστυλώματος K13 από το ισόγειο.	41
Σχήμα 5.12: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K13	42

Σχήμα 5.13: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K13 που αφαιρέθηκε.	42
Σχήμα 5.14 Αφαίρεση του υποστυλώματος K1, K8, K13, K15, K20 από το ισόγειο. .	43
Σχήμα 5.15: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K1, K8, K13, K15, K20	44
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K13 που αφαιρέθηκε	44
Σχήμα 5.17 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K6, K8, K11, K13, K15, K18 και K20 από το ισόγειο.	45
Σχήμα 5.18: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K6, K8, K11, K13, K15, K18 και K20	46
Σχήμα 5.19: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17	46
Σχήμα 5.20: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K13 που αφαιρέθηκε	47
Σχήμα 5.21 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17 από το ισόγειο.	47
Σχήμα 5.22: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17	48
Σχήμα 5.23: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17	48
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K15 που αφαιρέθηκε	49
Σχήμα 5.25 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K3, K8, K10, K15, K17 και K22 από το ισόγειο.	49
Σχήμα 5.26: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K3, K8, K10, K15, K17 και K22.....	50
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K3 που αφαιρέθηκε.	50
Σχήμα 5.28 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6 από το ισόγειο.....	51
Σχήμα 5.29: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6	51
Σχήμα 5.30: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6	52
Σχήμα 5.31: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K1 που αφαιρέθηκε	52

Σχήμα 5.32 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6 και K8 από το ισόγειο.	53
Σχήμα 5.33: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8	54
Σχήμα 5.34: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K1 που αφαιρέθηκε	54
Σχήμα 5.35 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24 από το ισόγειο.	55
Σχήμα 5.36: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24	56
Σχήμα 5.37: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24	56
Σχήμα 5.38: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα που αφαιρέθηκε	57
Σχήμα 5.39: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23 και K24	57
Σχήμα 5.40: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23 και K24	58
Σχήμα 5.41: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23 και K24	58
Σχήμα 5.42: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστιού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K1 που αφαιρέθηκε	59
Σχήμα 5.43: Συγκεντρωτικός πίνακας με σενάρια προοδευτικής κατάρρευσης	60

Παραρτήματα

Παράρτημα Α-Παραδείγματα μεθόδων κατεδάφισης με την χρήση μηχανικών μέσων.	53
Παράρτημα Β - Προσομοίωση διατομών στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct.....	56
Παράρτημα Γ - Κριτήρια διαρροής/αστοχίας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct..	63

ΑΝΤΡΕΑΣ ΤΟΜΙΑΖΟΣ

Κεφάλαιο 1

1 ΚΑΤΕΔΑΦΙΣΕΙΣ

1.1 Γενικά

Ο χρόνος ζωής των συμβατικών κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα είναι 50-100 χρόνια. Σε περιπτώσεις κτηρίων που έχουν μεγάλη ηλικία, για τη διατήρηση της στατικής τους επάρκειας συνήθως απαιτούνται σοβαρές επεμβατικές ενέργειες, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν μεγάλο κόστος σε σχέση με την αξία του φορέα. Τέτοιες περιπτώσεις κτηρίων όπου η συντήρησή τους κρίνεται απαραίτητη είναι τα μουσεία, τα κάστρα και άλλα κτήρια ιστορικής σημασίας.

Μια κατασκευή είθισται να κατεδαφίζεται όταν οι εργασίες κατεδάφισης κοστίζουν περισσότερο από το 70% της απομένουσας αξίας της κατασκευής. Μερική κατεδάφιση δύναται να γίνει σε περιπτώσεις ανακαίνισης, επιδιόρθωσης ή και αλλαγής χρήσης του κτηρίου, ενώ ολική κατεδάφιση (εικόνα 1) γίνεται σε κτήρια που υπέστησαν σημαντικές παραμορφώσεις καθιζήσεων και ρηγματώσεων, με σοβαρά προβλήματα υγρασίας καθώς επίσης και σε κατασκευές που κατασκευάστηκαν παλαιότερα με προβληματικά υλικά και παρουσιάζουν σημαντικές αστοχίες σε βάθος χρόνου.



Εικόνα 1: Κτήριο υπό κατεδάφιση

1.2 Μέθοδοι κατεδάφισης

Οι συνήθεις μέθοδοι κατεδάφισης που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

1. Εργαλεία χειρός
2. Μηχανικά μέσα
3. Εκρηκτικά μέσα

Οι ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι στα Κυπριακά και Ελληνικά δεδομένα είναι οι πρώτες δύο οι οποίες βρίσκουν εφαρμογή σε κτίρια έως και 10 ορόφων, ενώ πέραν αυτού του ύψους και σε άλλες εξειδικευμένες περιπτώσεις είναι προτιμότερη η χρήση των εκρηκτικών μέσων. Η κατεδάφιση με εκρηκτικά έχει σημαντικά μικρότερο χρόνο και κόστος σε σχέση με τις προηγούμενες δύο όμως παρουσιάζονται αρκετές δυσκολίες και περιορισμοί στην εκτέλεση της, όπως ο χώρος γύρω από το προς κατεδάφιση κτήριο και οι γειτονικές κατασκευές, οι δονήσεις, η σκόνη και τα θραύσματα που θα εκτοξευθούν ως αποτέλεσμα των εκρήξεων.

Οι κατεδαφίσεις δια χειρός (εικόνα 2) πραγματοποιούνται με κομπρεσέρ, αξίνες και λοστούς συνήθως όταν δεν είναι δυνατή η πρόσβαση μηχανικού μέσου στην περιοχή αυτή ή όταν η χρήση μηχανικού μέσου είναι απαγορευτική βάσει οδηγιών του εκάστοτε επιβλέποντος μηχανικού. Η μέθοδος κατεδάφισης δια χειρός βρίσκει συχνή εφαρμογή όταν είναι επιθυμητή η αφαίρεση στοιχείων χαμηλής αντοχής ή και σε μικρής επιφάνειας στοιχεία. Ορισμένα παραδείγματα είναι η μερική κατεδάφιση πατωμάτων και τοιχοποιίας, διάνοιξη οπών για την δημιουργία αγωγών αποκομιδής για διέλευση των προϊόντων κατεδάφισης καθώς και η αφαίρεση στοιχείων άοπλου σκυροδέματος (π.χ. ελαφροσκυρόδεμα). Επίσης οι κατεδαφίσεις δια χειρός δεν προκαλούν σοβαρές ζημιές σε όμορα κτίρια ή στοιχεία όπως θα προκαλούσαν μεγαλύτερα μηχανήματα που χρησιμοποιούν δονητική σφύρα. Για παράδειγμα η αφαίρεση τμήματος του φορέα οπλισμένου σκυροδέματος που εφάπτεται με γειτονικό κτίριο είθισται να γίνεται με την χρήση εργαλείων χειρός για αποφυγή μετάδοσης των κραδασμών που μπορεί να επιφέρουν ρηγματώσεις στο διπλανό κτήριο.



Εικόνα 2: Κατεδάφιση δια χειρός (Νομικού, 2011) [2]

Οι κατεδαφίσεις με μηχανικά μέσα (εικόνα 3) πραγματοποιούνται με εκσκαφείς στους οποίους συνδέονται αποσπώμενα εξαρτήματα όπως σφύρες, υδραυλικές σιαγόνες ή και σε εξαρτήματα που εφαρμόζονται σε γερανό όπως το αιωρούμενο βάρος. Οι σφύρες προκαλούν την θραύση των στοιχείων από σκυρόδεμα με την μέθοδο της κρούσης, ενώ οι υδραυλικές σιαγόνες προκαλούν τη σύνθλιψη των στοιχείων του σκυροδέματος και παράλληλα την αποσύνδεση από τον οπλισμό. Η κατεδάφιση με αιωρούμενο βάρος επιτυγχάνεται με την αιώρηση και κρούση μεταλλικής σφαίρας με μεγάλη μάζα. Η μέθοδος αυτή δεν συνηθίζεται λόγω των δυσκολιών χειρισμού αλλά και των υψηλών κινδύνων που προκύπτουν κατά την κατεδάφιση (π.χ. μη ελεγχόμενη κατεύθυνση εκτόξευσης θραυσμάτων κατεδάφισης).

Και στην περίπτωση των εργαλείων χειρός αλλά και με την χρήση μηχανικών μέσων η κατεδάφιση γίνεται από πάνω προς τα κάτω και πάντα προηγείται η κατεδάφιση και απομάκρυνση των στοιχείων πλήρωσης και ακολούθως η κατεδάφιση του φέροντος οργανισμού.



Εικόνα 3: Κατεδάφιση με μηχανικά μέσα

Οι κατεδαφίσεις με εκρηκτικά μέσα (εικόνα 4) γίνονται σε περιπτώσεις πολώροφων κτηρίων και κατασκευών με μεγάλο όγκο όπου εξασφαλίζεται η πτώση ή η ανατροπή αυτών. Τοποθετούνται εκρηκτικά (συνήθως δυναμίτες) στους πρώτους ορόφους για την αφαίρεση των βασικών στοιχείων του φέροντος οργανισμού και σε άλλα στοιχεία του φορέα για να προκύψουν μικρότερα τμήματα τα οποία δύναται να μεταφερθούν πιο εύκολα. Η θέση, η ποσότητα αλλά και ο χρόνος που θα ενεργοποιηθούν τα εκρηκτικά, έχει άμεση σχέση με την πορεία πτώσης καθώς και με τα θραύσματα που θα προκύψουν από την έκρηξη.



Εικόνα 4: Κατεδάφιση με εκρηκτικά μέσα (2020, <https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Explosives>)

Σε όλες τις περιπτώσεις πριν την έναρξη των κατεδαφίσεων προηγούνται οι εργασίες αφαίρεσης μεταλλικών στοιχείων, ντεπόζιτων, ηλιακών πλαισίων και άλλων ηλεκτρομηχανολογικών υπηρεσιών όπου είναι δυνατόν. Παράλληλα γίνεται η αφαίρεση σταθερών και κινητών επίπλων (ερμάρια, βιβλιοθήκες, γραφεία, ξύλινων decks κ.τ.λ.), ψευδοροφών, ψυγείων, κλιματιστικών και χώρων υγιεινής. Μένει επομένως ο φορέας μαζί με τις επικαλύψεις μόνο, δηλαδή αμέσως πριν την ζητούμενη κατεδάφιση, ο φορέας έχει μόνο τα μόνιμα φορτία G.

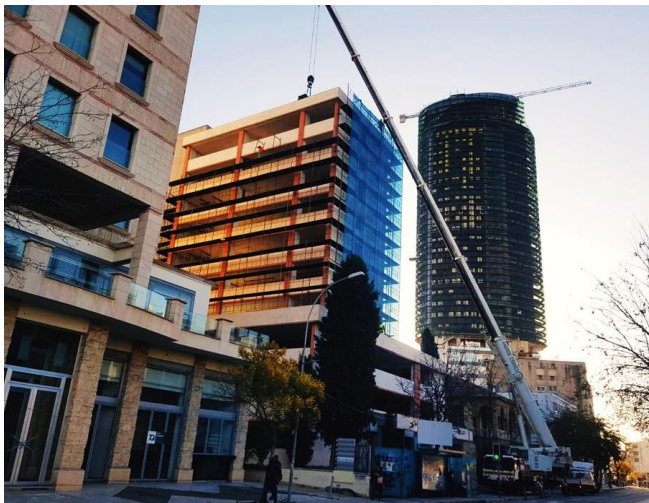
Με αυτόν τον τρόπο είναι πιο εύκολη η αποκομιδή και ο διαχωρισμός των προϊόντων κατεδάφισης καθώς επίσης δεν παρουσιάζονται εμπόδια κατά την κίνηση του προσωπικού ή και των μηχανημάτων αφού από τον χώρο έχουν αφαιρεθεί όσο το δυνατόν περισσότερα «περιττά» στοιχεία.

Στην Κύπρο δεν επιτρέπεται η χρήση εκρηκτικών για οποιαδήποτε εργασία κατεδάφισης. Επομένως σε πολυώροφα κτήρια πάνω από 3 ορόφους (εικόνα 5) , οι εργασίες κατεδάφισης εκτελούνται, όπου είναι δυνατόν με τη χρήση μηχανημάτων και με εργαλεία χειρός όπου είναι απαραίτητο. Η κατεδάφιση ξεκινά από τον τελευταίο όροφο προς τα κάτω και δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην περίφραξη του χώρου καθώς και στην τοποθέτηση ικριωμάτων περιμετρικά του κτηρίου ειδικά αν υπάρχουν γειτονικά κτήρια. Σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τα ψηλά κτήρια στην Κύπρο βρίσκονται κοντά σε πολυσύχναστους δρόμους και έχουν μικρή απόσταση από γειτονικά κτήρια, γι' αυτό και δεν είναι δυνατή η ανεξέλεγκτη, βίαιη και γρήγορη κατεδάφιση τους. Αντιθέτως η κατεδάφιση πρέπει να γίνεται τμηματικά, οργανωμένα, και να αποφεύγονται οι ζημιές σε γειτονικά κτήρια ή και πεζούς από τον εκσφενδονισμό θραυσμάτων. Για παράδειγμα, η ξαφνική απώλεια στοιχείου είτε δοκού είτε υποστυλώματος είτε ακόμα και πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος εκτός του κτηρίου, από τον όγδοο όροφο στο ισόγειο, μπορεί να είναι θανατηφόρα για πεζούς σε ακτίνα τουλάχιστον πενήντα μέτρων. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο πρέπει να τηρούνται όλα τα μέτρα ασφαλείας και υγείας και το πιο σημαντικό η κατεδάφιση να είναι ελεγχόμενη στο μέγιστο βαθμό.



Εικόνα 5: Πολυώροφο κτήριο προς κατεδάφιση στο κέντρο της Λευκωσίας

Πριν την έναρξη των κατεδαφίσεων, γίνεται έλεγχος της υφιστάμενης κατάστασης και αντοχής του φέροντος οργανισμού της υπό κατεδάφιση οικοδομής από τον πολιτικό μηχανικό του έργου, και διατυπώνεται τι μηχανήματα μπορούν να εκτελέσουν εργασίες με ασφάλεια στις πλάκες της οικοδομής, με ή χωρίς την προσωρινή στήριξη των πλακών με κριώματα. Έπειτα γίνεται η ανύψωση των μηχανημάτων (εικόνα 6) στον τελευταίο όροφο, με άλλα ανυψωτικά μηχανήματα (σταθεροί ή κινητοί γερανοί).



Εικόνα 6: Ανύψωση μηχανημάτων με κινητό γερανό για την κατεδάφιση του κτηρίου

Χρησιμοποιούνται εκσκαπτικά μηχανήματα με δυνατότητα ενσωμάτωσης υδραυλικής σφύρας, σιαγόνας και ψαλιδιού. Η συνήθης πορεία εργασιών κατεδάφισης περιλαμβάνει αρχικά την αφαίρεση των πλακών, έπειτα δοκών και τέλος υποστρωμάτων. Η εξασθένηση και καθαίρεση των στοιχείων του φέροντα οργανισμού επιτυγχάνεται με τη χρήση της σιαγόνας (κονιοποιητής- pulverizer) για την σύνθλιψη του σκυροδέματος και τον διαχωρισμό του από τον οπλισμό. Η σιαγόνα αποτελείται από δύο μεταλλικά τμήματα που έχουν σειρές από μεταλλικές κόγχες (‘‘δόντια’’) και είναι αρθρωτά συνδεδεμένες μεταξύ τους. Στα σημεία όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σιαγόνα λόγω μεγάλης διατομής, γίνεται η χρήση της υδραυλικής σφύρας που εφαρμόζει κρουστικό επαναλαμβανόμενο φορτίο για τη σύνθλιψη των στοιχείων. Η υδραυλική σφύρα δεν χρησιμοποιείται στην περίπτωση κατεδάφισης κτηρίου που εφάπτεται με γειτονική κατασκευή, για την αποφυγή βλαβών λόγω μετάδοσης των ισχυρών δονήσεων που προκαλούνται. Επιπρόσθετα, η χρήση του ψαλιδιού χρησιμοποιείται για την επιβολή διαμητικής αστοχίας στον εναπομείναντα οπλισμό και για τη συλλογή του οπλισμού.

Παράλληλα για την απομακρυσμένη αφαίρεση στοιχείων (συνήθως άοπλων υποστρωμάτων) μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εγκάρσια έλξη μέσω καλωδίου το οποίο στηρίζεται πάνω στο εκσκαπτικό μηχάνημα σε ένα σταθερό σημείο του βραχίονα. Η αστοχία επέρχεται με τη σταδιακή αύξηση του φορτίου που προκαλείται με την κίνηση του βραχίονα ή και του μηχανήματος σε αντίθετη κατεύθυνση από το προς κατεδάφιση στοιχείο.

Φωτογραφίες κατεδαφίσεων με την χρήση μηχανημάτων βρίσκονται στο Παράρτημα 1.

1.3 Προοδευτική κατάρρευση

Σημειώνεται ότι η πορεία αφαίρεσης στοιχείων: πλάκα→ δοκοί→ υποστυλώματα εφαρμόζεται για τον τμηματικό τεμαχισμό των στοιχείων που οδηγεί στον ευκολότερο διαχωρισμό σκυροδέματος και οπλισμού, τη συλλογή των κατεδαφισθέντων υλικών και το φόρτωμα τους σε φορτηγά για ανακύκλωση και απομάκρυνση. Αυτή η διαδικασία έχει όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα, την αύξηση του χρόνου κατεδάφισης του κτηρίου. Παρόλα αυτά εξακολουθεί να εφαρμόζεται στην Κύπρο, λόγω του μεγάλου κόστους της διαχείρισης των αποβλήτων που προκύπτουν από τις κατεδαφίσεις.

Η αφαίρεση ομάδας υποστυλωμάτων οδηγεί στην κατάρρευσή δοκών, που οδηγεί στην κατάρρευση των πλακών. Η ακολουθία απώλειας στοιχείων του φέροντα οργανισμού μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων, που οδηγεί στην αστοχία μεγάλου μέρους, ή και ολόκληρου του φορέα, ονομάζεται προοδευτική κατάρρευση. Με αυτόν τον τρόπο, απαλείφεται ο χρόνος αφαίρεσης πλακών ή και δοκών αφού τα στοιχεία αυτά αστοχούν μετά την αφαίρεση υποστυλωμάτων. Έτσι ελαχιστοποιείται ο χρόνος και το κόστος κατεδάφισης του κτηρίου.

Η προοδευτική κατάρρευση μπορεί να συμβεί με την ξαφνική απώλεια στοιχείων του φέροντα οργανισμού, λόγω φθορών σε βάθος χρόνου ή από κακή συντήρηση της κατασκευής ή από κακής ποιότητας υλικά, από τυχηματικές δράσεις (πυρκαγιά, ισχυρούς σεισμούς κ.ο.κ.).

Στην συγκεκριμένη διατριβή στόχος είναι η εύρεση της βέλτιστης λύσης για την επίτευξη της εσκεμμένης προοδευτικής κατάρρευσης. Αυτό επιτυγχάνεται με την προμελετημένη αφαίρεση- κατεδάφιση ομάδας «σημαντικών» στοιχείων του φορέα, συνήθως υποστυλωμάτων.

Κεφάλαιο 2

2 ΦΟΡΕΑΣ ΠΡΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗ

2.1 Περιγραφή φορέα- Γεωμετρία

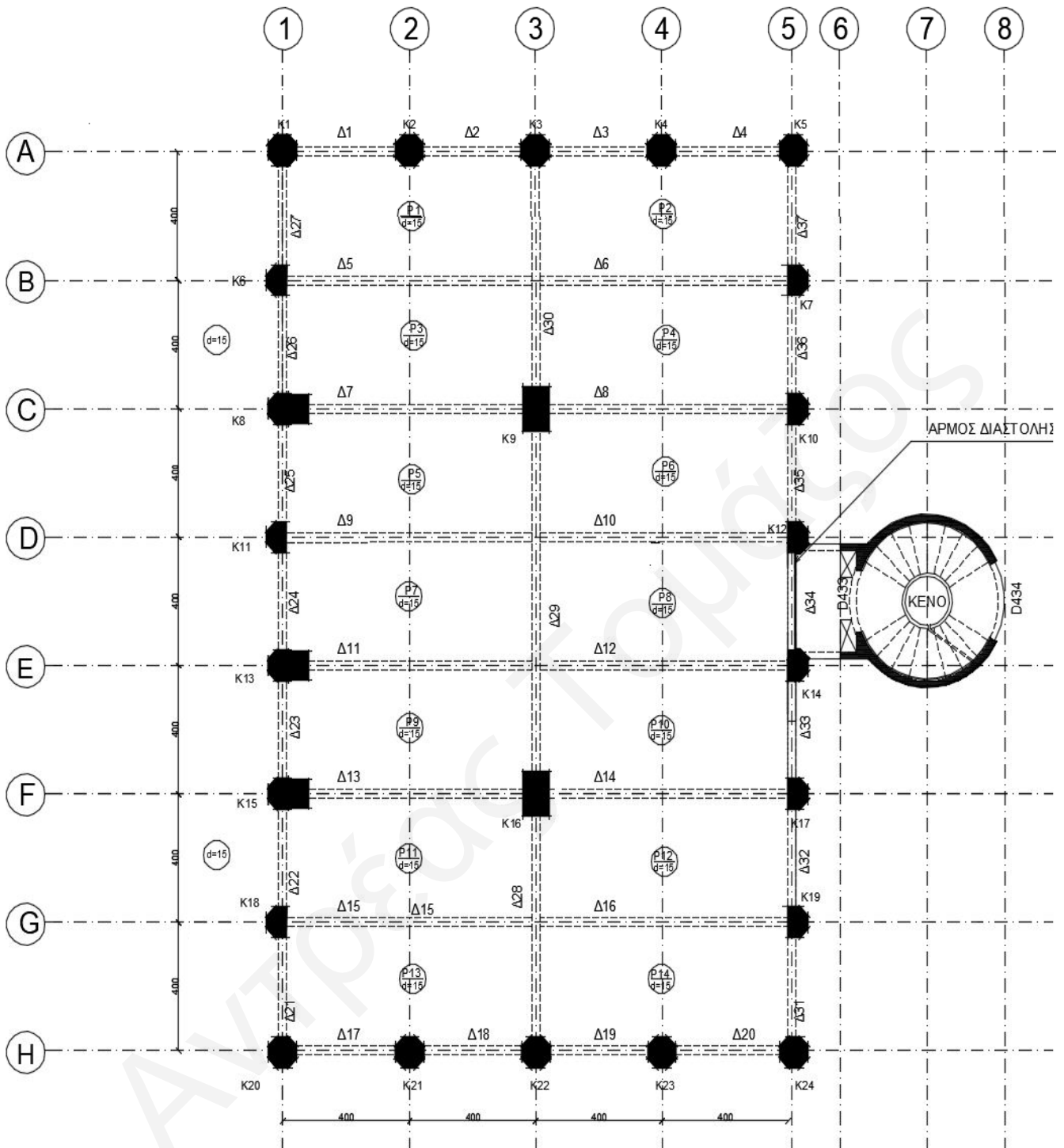
Το κτήριο που μελετήθηκε βρίσκεται στη Λευκωσία επί της οδού Δημοσθένη Σεβέρη (εικόνα 7 και 8) . Μέχρι σήμερα έχει κτιστεί μόνο το ισόγειο και ο 1^{ος} όροφος. Η στατική μελέτη έγινε από την κα Δέσποινα Π. Χατζημάρκου [8], διπλωματούχο πολιτικό μηχανικό του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.



Εικόνα 7: Φωτογραφία νότιας όψης του υφιστάμενου κτηρίου



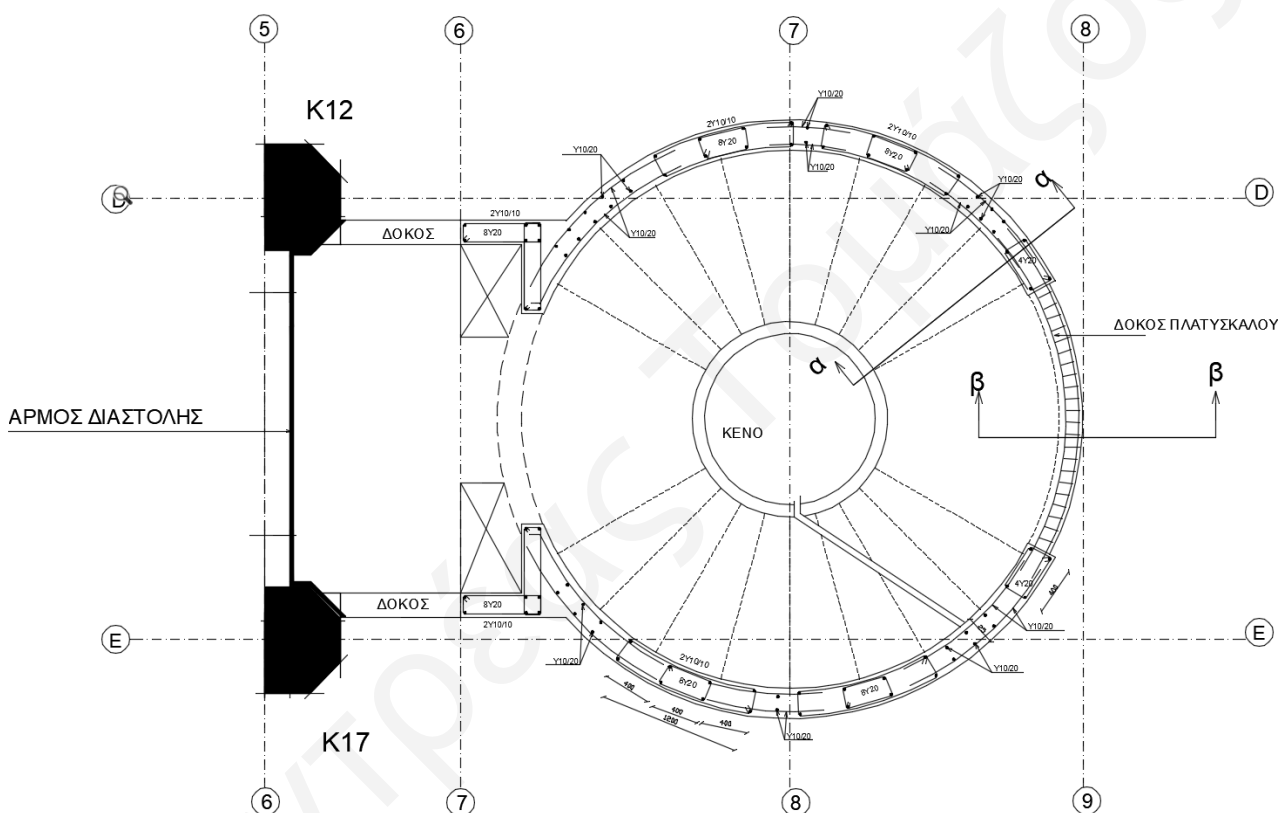
Εικόνα 8: Φωτογραφία βορινής όψης του υφιστάμενου κτηρίου



Σχήμα 2.1: Κάτοψη κτηρίου προς μελέτη. Αρχείο προγράμματος AutoCad [7]

Ο φορέας είναι από οπλισμένο σκυρόδεμα και έχει διαστάσεις $16\text{m} \cdot 28\text{m}$ (Σχήμα 2.1) και ύψος ορόφων 3m . Ως αρχή των αξόνων ορίστηκε το ακραίο υποστύλωμα K20, ο άξονας των x είναι ο μικρός άξονας, ο άξονας των y είναι ο μεγάλος άξονας και ο άξονας των z είναι καθ' ύψος. Το κτήριο αποτελείται από έξι ορόφους γραφείων χωρίς υπόγειο δηλαδή συνολικά επτά πλάκες με την οροφή του 6^{ου} ορόφου. Έχει τετραγωνικό κάναβο $4\text{m} \cdot 4\text{m}$ και αποτελείται από 8 πλαίσια στην μεγάλη διεύθυνση και 3 πλαίσια στην μικρή διεύθυνση. Ο κάθε όροφος αποτελείται από πλάκες διαστάσεων $8\text{m} \cdot 4\text{m}$ ($X \cdot Y$).

Στην ανατολική πλευρά του κτηρίου υπάρχει εξωτερικό κλιμακοστάσιο (Σχήμα 2.4) το οποίο λειτουργεί ξεχωριστά από το υπόλοιπο κτήριο αφού μεταξύ των δύο υπάρχει αντισεισμικός αρμός.



Σχήμα 2.4: Λεπτομέρεια εξωτερικού κλιμακοστασίου

2.2 Κανονισμός μελέτης

Η στατική μελέτη του συγκεκριμένου κτηρίου, χρονολογείται το 1987 και χρησιμοποιήθηκε ο παλιός Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ) ο οποίος τέθηκε σε εφαρμογή το 1959 και εμπλουτίστηκε με τροποποιήσεις το 1984. Τον ΕΑΚ ακολούθησε ο νέος Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΝΕΑΚ), του οποίου η εφαρμογή έγινε υποχρεωτική το έτος 1995.

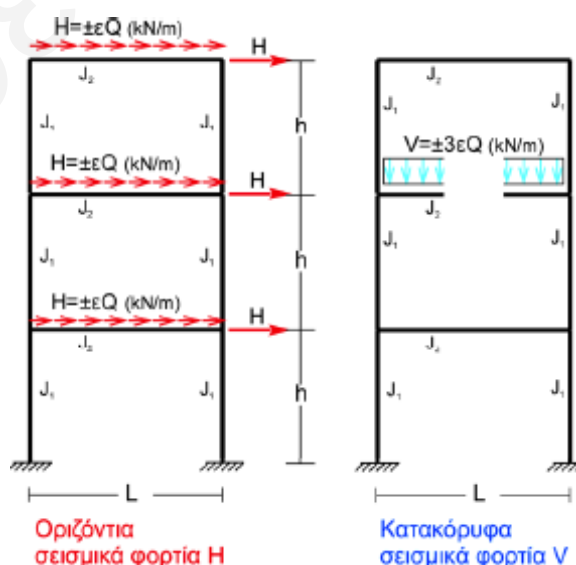
Ο ΕΑΚ ήταν ο πρώτος υποχρεωτικός Αντισεισμικός Κανονισμός σε ολόκληρη την Ελλάδα. Στον Κανονισμό αυτό, υπήρχε ο «Πίναξ χαρακτηρισμού σεισμικότητας οικισμών Ελλάδος» και οι περιοχές χαρακτηρίζονταν ως: α) ασθενώς, β) μετρίως και γ) ισχυρώς σεισμόπληκτες. Επίσης και στην περίπτωση του εδάφους έγινε αντίστοιχη κατάταξη σε τέσσερις κατηγορίες επικινδυνότητας: α) μικρής, β) μέτριας, γ) μεγάλης και δ) εξαιρετικής. Βάση της σεισμικότητας της περιοχής και της επικινδυνότητας του εδάφους, προκύπτει ο σεισμικός συντελεστής ε βάση της ακόλουθης σχέσης:

$$\varepsilon = a/g$$

Ο συντελεστής ε κυμαίνεται από 0,04 μέχρι 0,16. Στο κέντρο της κάθε μάζας του ορόφου εφαρμόζεται η οριζόντια σεισμική δύναμη (\pm) H_i (Σχήμα 2.4) η οποία ήταν ίση με το ποσοστό ε του βάρους (όπου M_i : η μάζα του ορόφου i). Σε ειδικές περιπτώσεις (πρόβολοι κλπ) εφαρμόζεται και κατακόρυφη δύναμη V_i . Εφαρμόζεται η ακριβής ελληνική μέθοδος αντισεισμικού υπολογισμού (μέθοδος Ρουσόπουλου), ή μία των ευρέως αποδεκτών άλλων επιστημονικών μεθόδων.

$$H_i = \varepsilon \cdot (M_i \cdot g)$$

$$V_i = 3\varepsilon \cdot (M_i \cdot g)$$

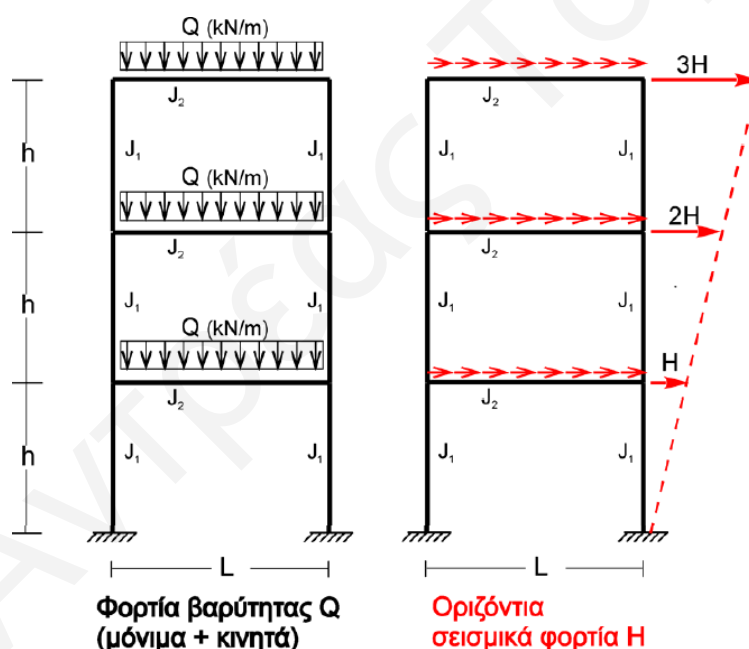


Σχήμα 2.2: Σεισμικά φορτία βάση παλιού Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού

Βάσει εμπειρικών δεδομένων από προηγούμενους σεισμούς, έγινε δυνατή η σύνταξη χαρτών με ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας. Ο πρώτος χάρτης που δημοσιεύτηκε στην Ελλάδα ήταν το 1939, ο οποίος εμπλουτίστηκε σε επόμενα χρόνια με νέα σεισμικά δεδομένα. Λόγω της αδυναμίας χρήσης Η.Υ. στη συγκεκριμένη εποχή, η εκτίμηση της έντασης των πολυώροφων συστημάτων γινόταν κατά προσέγγιση, αντί της στατικής επίλυσης, γεγονός που αποτελεί το αδύναμο σημείο του εκάστοτε κανονισμού. Βάσει του ΕΑΚ, η διαστασιολόγηση γινόταν με τη μέθοδο των επιτρεπόμενων τάσεων.

Μετά το 1959 που εφαρμόστηκε ο ΕΑΚ, ακολούθησαν στις επόμενες δεκαετίες ορισμένοι σεισμοί στην Ελλάδα με σημαντικές καταστροφικές συνέπειες που οδήγησαν στην ανάγκη τροποποίησης του συγκεκριμένου κανονισμού αναθεωρώντας βασικά στοιχεία στη μοντελοποίηση των κατασκευών. Παραδείγματα των σεισμών αυτών είναι στον Άγιο Ευστράτιο (19/2/1968) και στη λίμνη Βόλβης με καταστροφές στην Θεσσαλονίκη (20/6/1978)

Το 1984 (ΦΕΚ 239B/16-4-1984) τροποποιείται εσπευσμένα ο παλιός Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός, λόγω των καταστροφών των προηγούμενων χρόνων. Οι κυριότερες αλλαγές αφορούν τη μοντελοποίηση. Η κατανομή των οριζόντιων σεισμικών δράσεων αλλάζει και γίνεται τριγωνική και για πολυώροφα κτήρια, άνω των 3 ορόφων η ανάλυση γίνεται με το μοντέλο «πολυώροφου πλαισίου».



Σχήμα 2.4: Σεισμικά φορτία βάση της τροποποίησης του 1984 του παλιού Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού

Παράλληλα με την επιβολή τριγωνικής κατανομής, εισάγονται κι άλλες καινούριες έννοιες όπως ο συντελεστής σπουδαιότητας του κτηρίου και ο έλεγχος οριζόντιων μετακινήσεων λόγω σεισμού, όπου σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων, απαιτείται ο ικανοτικός έλεγχος. Επίσης γίνονται κατασκευαστικές συστάσεις στα σημεία των κόμβων πλαισίων και άλλων δομικά στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος καθώς επίσης και τοιχοπληρώσεων.

Έτσι με τα νέα μέτρα που λαμβάνονται υπόψιν κατά τη μοντελοποίηση και τον υπολογισμό της εντατικής κατάστασης λόγω σεισμικών φορτιστικών δράσεων, προκύπτουν μεγαλύτερες υπολογιστικές ανάγκες οι οποίες είναι σημαντικές για την ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων μέσω του ηλεκτρονικού υπολογιστή για τα επόμενα χρόνια. Η εσπευσμένη επιβολή των τροποποιήσεων του 1984 είναι γεγονός πως αποτέλεσε ένα σημαντικό βήμα στον πιο αξιόπιστο και πιο ποιοτικό αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Κτήρια τα οποία κατασκευάστηκαν μετά το 1984, αλλά και αργότερα με του νέους κανονισμούς (NEAK, ΕΚΟΣ 2000, ΕΑΚ2000, Ευρωκώδικες) έχουν πολύ καλύτερη συμπεριφορά έναντι σεισμού από παλαιότερα και είναι βέβαιο ότι οι κανονισμοί θα τροποποιούνται και θα εμπλουτίζονται σε βάθος χρόνου βάση των νέων σεισμικών δεδομένων που θα προκύψουν και της συνεχούς έρευνας γύρω από το αντικείμενο.

2.3 Διατομές φορέα

Σε όλα τα στοιχεία της κατασκευής χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C25/30 και χάλυβας ποιότητας S500. Οι επικαλύψεις οπλισμών για τις δοκούς είναι 0.025m, για τις κολώνες 0.025m και για τις πλάκες 0.015m. Οι αναμονές οπλισμών είναι το μεγαλύτερο μέγεθος από τα δύο: α) 50Φ (όπου Φ η διάμετρος του εκάστοτε οπλισμού) ή β) 0.80m. Η τοποθέτηση σωληνώσεων εντός των δοκών και υποστυλωμάτων είναι απαγορευτική. Θεωρείται απερίσφικτο σκυρόδεμα λόγω σχετικά αραιών συνδετήρων.

Οι πλάκες έχουν πάχος 0.15m και είναι σταυροειδώς οπλισμένες με οπλισμό Φ12/20. Στα υποστυλώματα υπάρχουν 4 διατομές και τα δοκάρια έχουν όλα την ίδια διατομή ως ακολούθως:

A) Υποστυλώματα

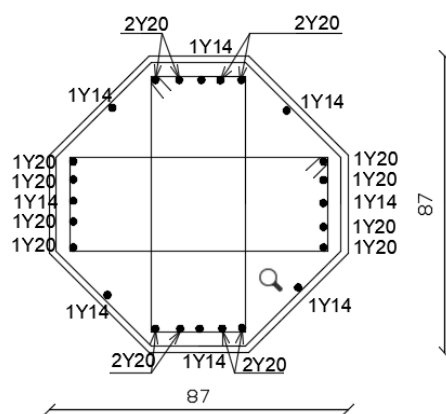
i) Διατομή 1 (Σχήμα 2.5)

Διαστάσεις: 0.87m · 0.87m,

Υποστυλώματα: K1, K2, K3, K4, K5, K20, K21, K22, K23, K24

Κύριος οπλισμός: 16Φ20 + 8Φ14

Συνδετήρες 3Φ10/12,5



Σχήμα 2.5: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 1

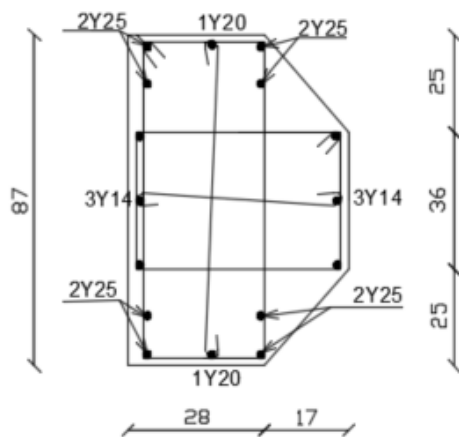
ii) Διατομή 2 (Σχήμα 2.6)

Διαστάσεις: 0.61m · 0.87m,

Υποστυλώματα: K6, K7, K10, K11, K12, K14, K17, K18, K19

Κύριος σπλισμός: 8Φ25 + 2Φ20 + 6Φ14

Συνδετήρες 4Φ10/12,5



Σχήμα 2.6: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 2

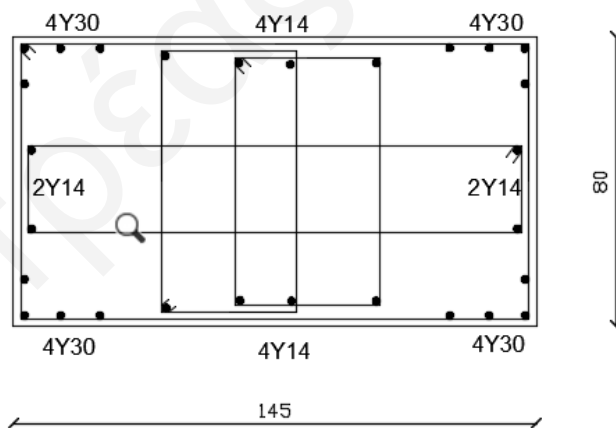
iii) Διατομή 3 (Σχήμα 2.7)

Διαστάσεις: 0.80m · 1.45m,

Υποστυλώματα: K9, K16

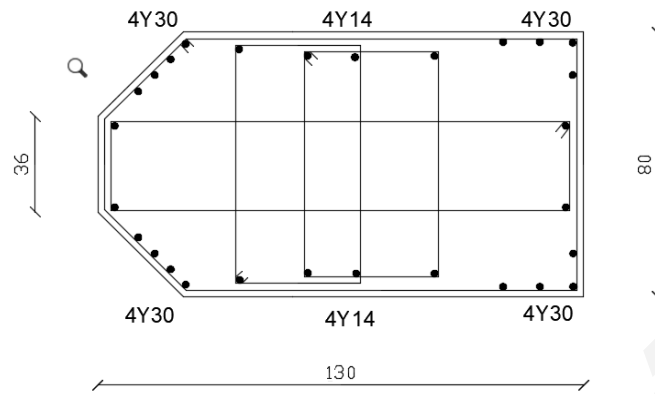
Κύριος σπλισμός: 16Φ28 + 12Φ14

Συνδετήρες Φ10/12,5



Σχήμα 2.7: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 3

- iv) Διατομή 4 (Σχήμα 2.8)
 Διαστάσεις: 1.45m · 0.80m,
 Υποστυλώματα: K8, K13, K15
 Κύριος οπλισμός: 16Φ28 + 12Φ14
 Συνδετήρες Φ10/12,5



Σχήμα 2.8: Διατομή υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 4

- B) Δοκοί
 Διαστάσεις: 0.25m · 0.60m
 Οπλισμός: άνω και κάτω 5Φ18
 Συνδετήρες Φ10/15

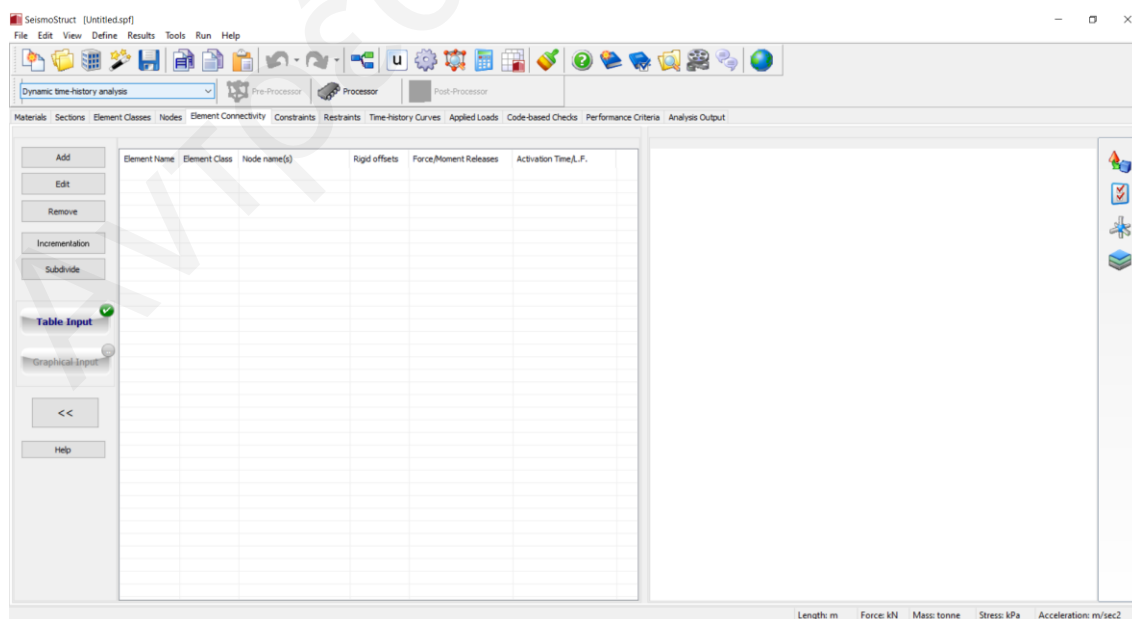
Κεφάλαιο 3

3 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

3.1 Λογισμικό ανάλυσης

Το λογισμικό πρόγραμμα ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας είναι το SeismoStruct (Σχήμα 3.1) της εταιρείας ανάπτυξης λογισμικών ανάλυσης SeismoSoft [6]. Το πρόγραμμα έχει τη δυνατότητα υπολογισμού μεγάλων μετατοπίσεων σε τρισδιάστατους φορείς, χωρικών πλαισίων που καταπονούνται υπό στατική ή δυναμική φόρτιση και μπορεί να λάβει υπόψη την ανελαστική συμπεριφορά και την μη γραμμικότητα των υλικών. Υπάρχει επιλογή ποικιλίας αναλύσεων όπως: ιδιομορφική, στατική, στατική ανελαστική (pushover), φασματικής απόκρισης κ.α. Στη βιβλιοθήκη των διατομών του προγράμματος περιλαμβάνονται διατομές από σκυρόδεμα και χάλυβα, σύμμικτες διατομές, μανδύες ενίσχυσης σύνθετων υλικών όπως FRP, φέρουσες τοιχοποιίες κ.α. Δίνεται επίσης δυνατότητα εξαγωγής αποτελεσμάτων με έλεγχο μετακινήσεων κόμβων καθώς και διαγράμματα εντατικών μεγεθών.

Κατά τις επιλύσεις της μη γραμμικής ανάλυσης, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος των ινών, όπου με την συμπεριφορά του συνόλου των ινών (100 ίνες ανά στοιχείο) επιτυγχάνεται η προσομοίωση της συμπεριφοράς του κάθε στοιχείου.

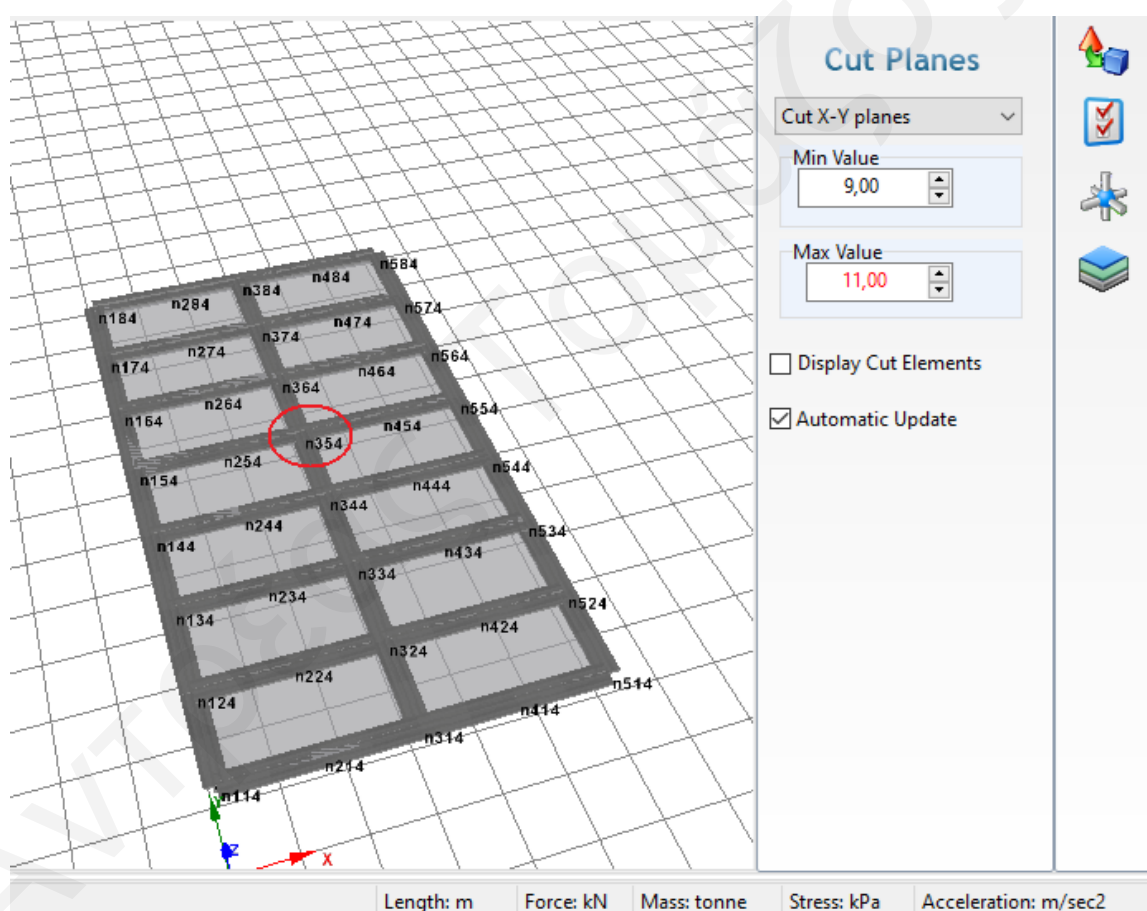


Σχήμα 3.1: Γραφικό περιβάλλον λογισμικού ανάλυσης SeismoStruct

3.2 Μοντελοποίηση φορέα

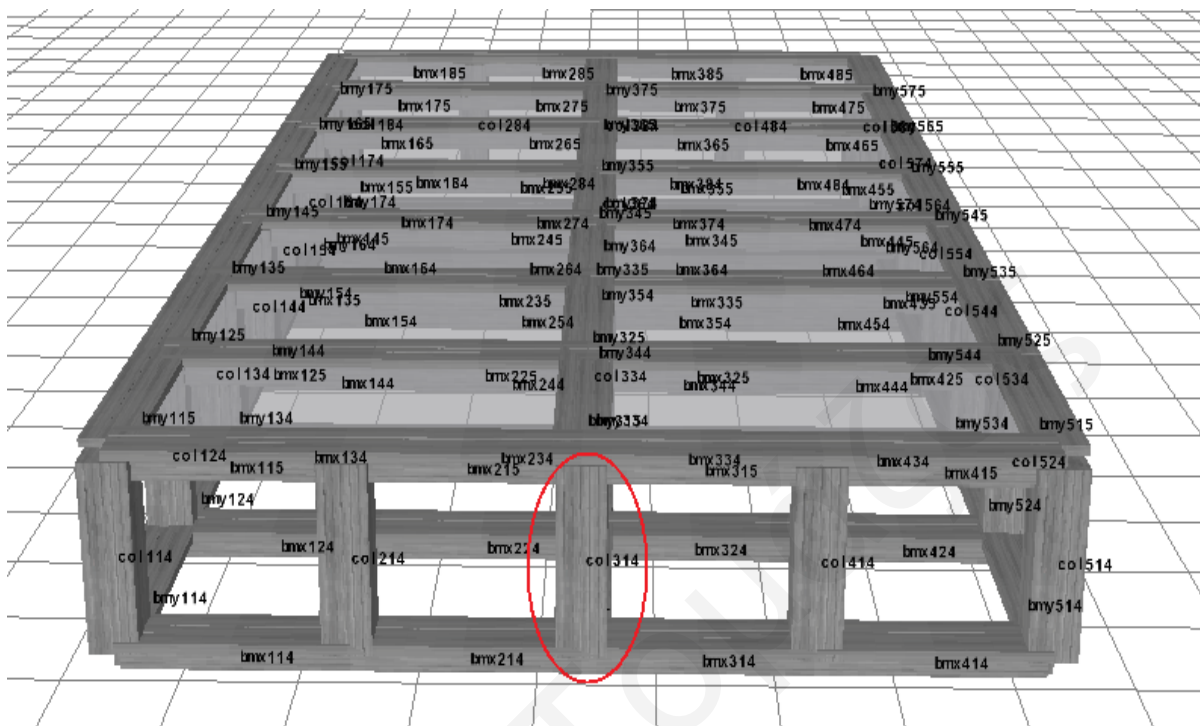
Χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct έγινε η εισαγωγή των δεδομένων του κτηρίου, όπως των υλικών της κατασκευής καθώς και των διατομών των στοιχείων. Ορίστηκε τετραγωνικός κώνναβος σχεδίασης με αποστάσεις 4m κατά x και κατά y και ύψους ορόφων 3m βάση σχεδίων. Επίσης σε όλα τα επίπεδα των ορόφων ορίστηκε διαφραγματική λειτουργία πλακών.

Παράλληλα, κατά τη μοντελοποίηση του τρισδιάστατου φορέα ορίστηκε μια αρίθμηση για την πιο εύκολη αναγνώριση κόμβων και στοιχείων. Για παράδειγμα, ο κόμβος n354 (Σχήμα 3.2) βρίσκεται στην τρίτη γραμμή του κωνάβου κατά x, στην πέμπτη σειρά κατά y και βρίσκεται στον 4^ο όροφο.



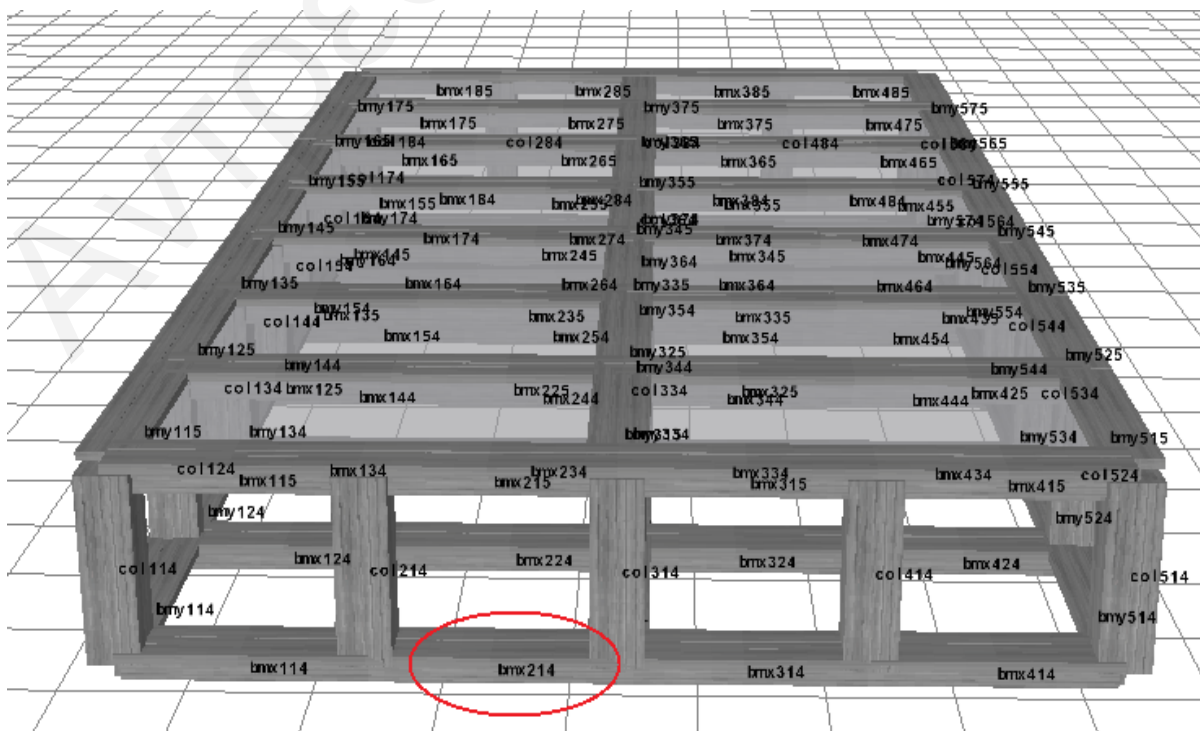
Σχήμα 3.2: Παράδειγμα αρίθμησης κόμβου στο πρόγραμμα SeismoStruct

Αντίστοιχα, η κολώνα col314 (Σχήμα 3.3) αντιστοιχεί στην κολώνα που βρίσκεται στην 3^η γραμμή του καννάβου κατά x, στην πρώτη γραμμή κατά y και στον τέταρτο όροφο.



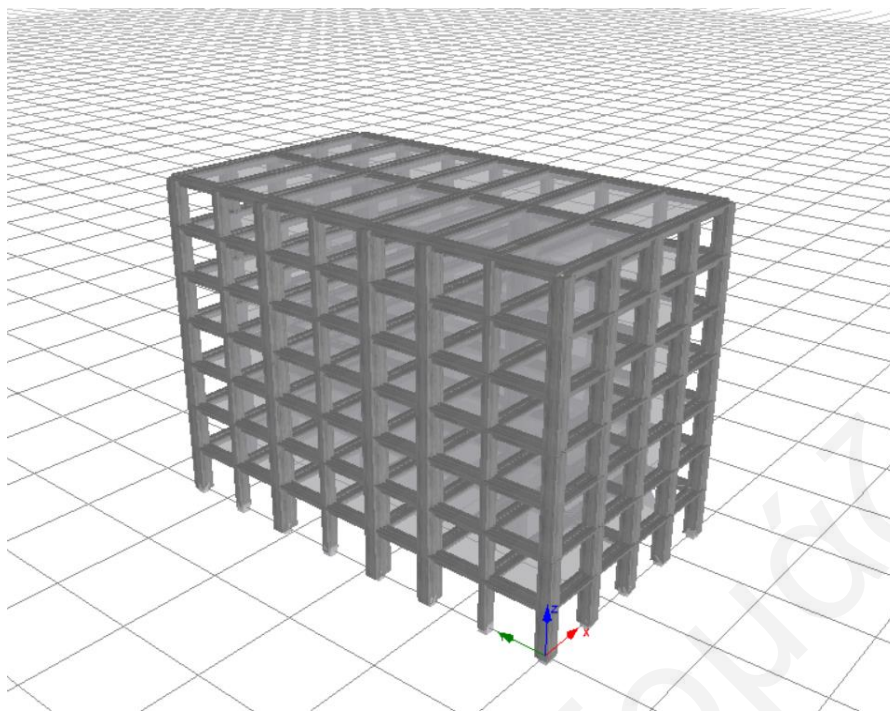
Σχήμα 3.3: Παράδειγμα αρίθμησης κολώνας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct

Τέλος, η δοκός bmx214 (Σχήμα 3.4) αντιστοιχεί στη δοκό με διεύθυνση κατά x η οποία βρίσκεται στο δεύτερο άνοιγμα κατά x, στην πρώτη γραμμή κατά y και στον τέταρτο όροφο. Η δοκός που βρίσκεται στην ίδια θέση στον πέμπτο όροφο έχει αρίθμηση bmx215 (Σχήμα 3.5).



Σχήμα 3.4: Παράδειγμα αρίθμησης δοκού στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct

Έτσι προκύπτει η παρακάτω χωρική αναπαράσταση του φορέα:



Σχήμα 3.5: Χωρική αναπαράσταση του φορέα στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct

Μοντελοποίηση υποστυλωμάτων και δοκών

Ακολουθούν οι διατομές των υποστυλωμάτων και δοκών όπως μοντελοποιήθηκαν. Σχετικές εικόνες για την εισαγωγή των διατομών στο λογισμικό βρίσκονται στο παράρτημα 2.

A) Υποστυλώματα

i) Διατομή 1

Τα υποστυλώματα διατομής υπ' αριθμό 1 έχουν οκταγωνική διατομή και διαστάσεις $0.87\text{m} \cdot 0.87\text{m}$. Το πρόγραμμα δεν είχε στη βιβλιοθήκη του τέτοια διατομή ούτε μπορούσε να εισαχθεί νέα με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που έχει η οκταγωνική αφού δεν υποστηρίζεται η εισαγωγή ιδιοτήτων με γενική διατομή. Στην περίπτωση αυτή, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί διατομή σε σχήμα σταυρού και να αγνοηθεί ο οπλισμός $1\Phi 14$ στις τέσσερις πλευρές του οκταγώνου, ο οποίος τοποθετήθηκε για να σχηματιστεί η οκταγωνική διατομή λόγω της αρχιτεκτονικής του κτηρίου. Δυστυχώς ούτε η διατομή σε σχήμα σταυρού υπάρχει στο πρόγραμμα και επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί η τετραγωνική διατομή διάστασης $0.87\text{m} \cdot 0.87\text{m}$ με κύριο οπλισμό $16\Phi 20$ και $4\Phi 14$ και συνδετήρες $\Phi 10/12.5$.

Τα υποστυλώματα διατομής 1 (K1, K2, K3, K4, K5, K20, K21, K22, K23, K24) αντιστοιχούν στα στοιχεία του μοντέλου με διατομή col1 και έχουν την εξής αρίθμηση: col111, col112, col113, col114, col115, col116, col117, col181, col182, col183, col184, col185, col186, col187, col211, col212, col213, col214, col215, col216, col217, col281, col282, col283, col284, col285, col286, col287, col311, col312, col313, col314, col315, col316, col317, col381, col382, col383, col384, col385, col386, col387, col411, col412, col413, col414, col415, col416, col417, col481, col482, col483, col484, col485, col487, col511, col512, col513, col514, col515, col516, col517, col581, col582, col583, col584, col585, col586, col587.

ii) Διατομή 2

Για τη διατομή 2 επιλέγεται ορθογωνική διατομή διαστάσεων 0.45m·0.87m και με κύριο 8Φ25 + 2Φ20 + 6Φ14 και συνδετήρες Φ10/12.5.

Τα υποστυλώματα διατομής 1 (K6, K7, K10, K11, K12, K14, K17, K18, K19) αντιστοιχούν στα στοιχεία του μοντέλου με διατομή col2 και έχουν την εξής αρίθμηση: col567, col124, col566, col127, col525, col526, col175, col563, col126, col565, col564, col123, col576, col575, col523, col521, col125, col522, col577, col524, col571, col176, col572, col574, col177, col573, col157, col547, col533, col546, col156, col171, col551, col532, col155, col541, col542, col537, col536, col535, col544, col545, col543, col534, col154, col527, col557, col121, col556, col173, col174, col562, col561, col122, col553, col172, col552, col153, col152, col151, col555, col554, col531, col582, col583, col584, col585, col586, col587.

iii) Διατομή 3

Για τη διατομή 3 επιλέγεται ορθογωνική διατομή διαστάσεων 0.80m·1.45m και με κύριο 16Φ28 + 12Φ14 και συνδετήρες Φ10/12.5

Τα υποστυλώματα διατομής 3 (K9, K16) αντιστοιχούν στα στοιχεία του μοντέλου με διατομή col3 και έχουν την εξής αρίθμηση: col335, col336, col337, col334, col331, col332, col333, col365, col366, col367, col364, col361, col362, col363.

iv) Διατομή 4

Για τη διατομή 4 επιλέγεται ορθογωνική διατομή διαστάσεων 1.30m·0.80m και με κύριο 8Φ25 + 2Φ20 + 6Φ14 και συνδετήρες Φ10/12.5

Τα υποστυλώματα διατομής 4 (K8, K13, K15) αντιστοιχούν στα στοιχεία του μοντέλου με διατομή col2 και έχουν την εξής αρίθμηση col165, col166, col167, col164, col136, col135, col141, col137, col132, col131, col134, col133, col142, col161, col147, col163, col162, col144, col143, col146, col145.

B) Δοκοί

Η διατομή των δοκών ορίστηκε ως πλακοδοκός διαστάσεων $0.25\text{m} \cdot 0.60\text{m}$ με οπλισμό 5Φ18 άνω και κάτω και συνδετήρες Φ10/15 και πάχος επικάλυψης οπλισμών ίσο με 0.025m .

Οι δοκοί που αντιστοιχούν στα στοιχεία του μοντέλου με διατομή beam και έχουν την εξής αρίθμηση bmx287, bmx286, bmx285, bmx288, bmx313, bmy312, bmx312, bmx277, bmx276, bmx275, bmx278, bmx284, bmx283, bmx282, bmy318, bmy317, bmx317, bmx318, bmx323, bmx322, bmy322, bmx314, bmy314, bmy313, bmy315, bmx316, bmy316, bmx315, bmx247, bmx246, bmx245, bmx248, bmx253, bmx252, bmx237, bmx236, bmx235, bmx238, bmx244, bmx243, bmx242, bmx267, bmx266, bmx265, bmx268, bmx274, bmx273, bmx272, bmx257, bmx256, bmx255, bmx258, bmx264, bmx263, bmx262, bmx345, bmy345, bmy344, bmx346, bmy347, bmx347, bmy346, bmx342, bmx338, bmy338, bmy342, bmx344, bmy343, bmx343, bmy355, bmx355, bmx354, bmx356, bmy357, bmx357, bmy356, bmx352, bmy348, bmx348, bmy352, bmy354, bmy353, bmx353, bmy328, bmy327, bmx327, bmx328, bmy332, bmx332, bmx116, bmx324, bmy324, bmy323, bmy325, bmy326, bmx326, bmx325, bmx336, bmy335, bmx335, bmy336, bmx337, bmy114, bmy337, bmy333, bmx333, bmx115, bmy334, bmx114, bmx334, bmy115, bmx234, bmx146, bmy146, bmx122, bmy147, bmx148, bmy148, bmx147, bmy144, bmy143, bmx143, bmx144, bmx145, bmy145, bmy122, bmx156, bmy156, bmy155, bmy157, bmx158, bmy158, bmx157, bmx153, bmx152, bmy152, bmy153, bmx155, bmx154, bmy154, bmx133, bmy125, bmy132, bmy133, bmx125, bmx134, bmy134, bmx127, bmy127, bmy126, bmy128, bmx132, bmx126, bmx128, bmx138, bmy138, bmx137, bmy123, bmx123, bmx142, bmy142, bmy135, bmx124, bmx135, bmx136, bmy137, bmy136, bmy124, bmx186, bmx185, bmx184, bmx187, bmx213, bmx212, bmx188, bmy177, bmx177, bmx176, bmy178, bmx183, bmx182, bmx178, bmx226, bmx225, bmx224, bmx227, bmx233, bmx232, bmx228, bmx216, bmx215, bmx214, bmx217, bmx223, bmx222, bmx218, bmy165, bmx117, bmx164, bmx165, bmx166, bmy166, bmy117, bmy162, bmx162, bmx118, bmy118, bmy164, bmx163, bmy163, bmx174, bmx173, bmy173, bmy174, bmy176, bmy175, bmx175, bmy167, bmy116, bmx167, bmy168, bmy172, bmx172, bmx168, bmy358, bmx452, bmx448, bmx454, bmx453, bmx447, bmx444, bmy544, bmx446, bmx445, bmx455, bmx465, bmx464, bmx467, bmx466, bmx463, bmx457, bmx456, bmx462, bmx458, bmx434, bmy554, bmy553, bmx435, bmy555, bmy556, bmx428, bmx433, bmx432, bmy552, bmy546, bmx442, bmy545, bmx443, bmx438, bmy548, bmx436, bmy547, bmx437, bmy513, bmy532, bmy514, bmy528, bmy533, bmy535, bmx488, bmy534, bmy512, bmy527, bmy516, bmy522, bmy517, bmy518, bmy523, bmy525, bmy526, bmy515, bmy524, bmx477, bmx476, bmy543, bmx478, bmx475, bmx472, bmx468, bmx474, bmx473, bmx482, bmy536, bmx485, bmx487, bmx486, bmy537, bmy542, bmx483, bmy538, bmx484, bmx373, bmy373, bmx374, bmy374, bmy368, bmx368, bmx372, bmy372, bmy375, bmy378, bmx377, bmx382, bmx378, bmy376, bmx375, bmy377, bmx376, bmx363, bmy363, bmy364, bmx113, bmy113, bmx358, bmx362, bmy362, bmx364, bmy112, bmy366, bmx367, bmy367, bmx112, bmx365, bmx366, bmy365, bmx383, bmx416, bmy565, bmy563, bmy564, bmy566, bmx414, bmy568, bmx415, bmy567, bmx423, bmy558, bmx425, bmx424, bmx426, bmy562, bmx417, bmx422, bmx413, bmx385, bmy576, bmx386, bmy575, bmy577, bmy578, bmx427, bmx384, bmy557, bmx412, bmx388, bmy573, bmy574, bmy572, bmx387.

3.3 Έλεγγοι- κωδικοποίηση αστοχίας μελών

Μέσω του λογισμικού SeismoStuct, εκτελείται πληθώρα ελέγχων, οι οποίοι βρίσκονται κάτω από καρτέλα “Performance criteria” (σχήμα 3.6) και αναλυτικά στο παράρτημα Γ) και ορίζονται πριν το τρέξιμο των αναλύσεων. Στις ιδιότητες των ελέγχων υπάρχει επίσης χρωματισμός για την πιο εύκολη αναγνώριση των στοιχείων που δεν περνούν τους ελέγχους και έχουν αστοχήσει. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατή η παρακολούθηση της κατάστασης του στοιχείου, εντός του παραμορφωμένου φορέα, στο κάθε βήμα επιβολής του επαυξητικού φορτίου. Οι έλεγχοι που πραγματοποιούνται είναι οι εξής:

1. Έλεγχος υπέρβασης ορίου συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής από τον EN 1998-3: A.3.2.2 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC) μέσα από την σχέση του σχήματος 3.7 (χρώμα κόκκινο στον παραμορφωμένο φορέα).
2. Έλεγχος υπέρβασης διατμητικής αντοχής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση V_R από τον Ευρωκώδικα 8 EN 1998-3: A.3.3.1 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC) βάση της σχέσης του σχήματος 3.8 (χρώμα γκριζο στον παραμορφωμένο φορέα).
3. Έλεγχος υπέρβασης ορίου παραμόρφωσης > 0.0035 που οδηγεί στην αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος (χρώμα κίτρινο στον παραμορφωμένο φορέα).
4. Έλεγχος υπέρβασης ορίου παραμόρφωσης χάλυβα > 0.0025 που οδηγεί στη διαρροή οπλισμού από εφελκυσμό (χρώμα μπλε στον παραμορφωμένο φορέα).
5. Έλεγχος υπέρβασης ορίου παραμόρφωσης χάλυβα > 0.1 που οδηγεί στην θραύση οπλισμού (χρώμα μαύρο στον παραμορφωμένο φορέα).

Criteria...	Description	Type	Value	Material	Elements
yield	(Reinforcement Strain [RC/Composite sections]) $> 0,0025$	Reinforcement Strain [RC/Composite sections]	0,0025	rein	bmx112 bmy1...
crush_unc	(Concrete Strain [RC/Composite sections]) $> 0,0035$	Concrete Strain [RC/Composite sections]	0,0035	All Concrete Ma...	col111 col112 ...
fracture	(Reinforcement Strain [RC/Composite sections]) $> 0,10$	Reinforcement Strain [RC/Composite sections]	0,10	All Steel Materials	col111 col112 ...
chord_rot	(Frame Element Chord Rotation) $<$ Calculated mean value	Frame Element Chord Rotation Capacity	auto		col111 col112 ...
shear	(Frame Element Shear force) $<$ Calculated mean value	Frame Element Shear Capacity	auto		col111 col112 ...

Σχήμα 3.6: Καρτέλα Performance criteria του λογισμικού ανάλυσης SeismoStruct

(1) Η οριακή τιμή της συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής (ελαστικό συν ανελαστικό μέρος), θ_{um} , μελών από σκυρόδεμα υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\theta_{um} = \frac{1}{\gamma_d} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,15} 25^{\left(\frac{\omega_{\text{max}} f_{yw}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_d}) \quad (\text{A.1})$$

όπου:

- γ_d ισούται με 1,5 για κύρια σεισμικά στοιχεία και 1,0 για δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία (όπως ορίζεται στο **2.2.1(6)P**),
 h είναι το ύψος της διατομής
 $L_v = M/V$ λόγος ροπής/ διάτμησης στην ακραία διατομή
 v = N / bhf_c (b πλάτος της θλιβόμενης ζώνης, N αξονική δύναμη, θετική για θλίψη)
 ω, ω' το μηχανικό ποσοστό οπλισμού του εφελκόμενου και θλιβόμενου (συμπεριλαμβανομένου του οπλισμού κορμού) διαμήκη οπλισμού αντίστοιχα.
 f_c and f_{yw} είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (Μρα) και η αντοχή διαρροής των συνδετήρων (Μρα), αντίστοιχως, που προκύπτουν απευθείας ως μέσες τιμές από επί τόπου δοκιμές, και από πρόσθετες πηγές πληροφόρησης, διαιρεμένες κατάλληλα με τους συντελεστές εμπιστοσύνης, όπως ορίζεται στο **3.5(1)P** και τον Πίνακα 3.1, λαμβάνοντας υπόψη το επίπεδο της αποκτηθείσας γνώσης
 $\rho_{xx} = A_{sx}/b_w s_x$ = ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού παράλληλου προς την κατεύθυνση x της φόρτισης s_x = απόσταση μεταξύ συνδετήρων)
 ρ_d είναι το ποσοστό του διαγώνιου οπλισμού (εάν υπάρχει), σε κάθε διαγώνια κατεύθυνση
 α είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης, ο οποίος μπορεί να λαμβάνεται ίσος με:

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_o} \right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_o} \right) \left(1 - \frac{\sum h_i^2}{6h_o b_o} \right) \quad (\text{A.2})$$

όπου:

- b_o και h_o είναι η διάσταση του περισφιγμένου πυρήνα μετρούμενου μέχρι τον άξονα του συνδετήρα
 b_i είναι η αξονική απόσταση μεταξύ των διαμήκων ράβδων (με δείκτη i) οι οποίες συγκρατούνται πλευρικά από ένα γωνιακό συνδετήρα ή έναν εγκάρσιο σύνδεσμο κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής.

Σχήμα 3.7 Οριακή τιμή συνολικής ικανότητας στροφής χορδής: EN 1998-3: A.3.2.2 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC). [4]

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\frac{h-x}{2L_V} \min(N; 0,55A_c f_c) + (1 - 0,05 \min(5; \mu_s^{pl})) \cdot \left[0,16 \max(0,5; 100\rho_{sk}) \left(1 - 0,16 \min\left(5; \frac{L_V}{h}\right) \right) \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right] \quad (\text{A.12})$$

όπου:

- γ_{el} ισούται με 1,15 για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία και 1,0 για τα δευτερεύοντα σεισμικά στοιχεία (όπως ορίζεται στο **2.2.1(6P)**),
 h είναι το ύψος της διατομής (ισούται με τη διάμετρο D σε κυκλικές διατομές)
 x είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης
 N είναι η θλιπτική αξονική δύναμη (θετική, λαμβάνεται ως μηδενική για εφελκυσμό)
 $L_V = M/V$ λόγος ροπής/ τέμνουσας στην ακραία διατομή
 A_c είναι η επιφάνεια της διατομής, η οποία λαμβάνεται ίση με $b_w d$ για μια διατομή με ορθογωνικό κορμό πλάτους (πάχους) b_w και στατικού ύψους d , ή με $\pi D_c^2/4$ (όπου $D_c = D - 2c$ και $2d_{bw}$ είναι η διάμετρος του πυρήνα σκυροδέματος στο εσωτερικό των σπείρων, με τα D και d_{bw} όπως ορίζονται στο β) που ακολουθεί και με d_{bw} τη διάμετρο του εγκάρσιου οπλισμού) για κυκλικές διατομές
 f_c είναι θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, όπως ορίζεται για την σχέση (A.1). Για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία το f_c θα πρέπει επιπλέον να διαιρείται με τον επιμέρου συντελεστή για το σκυρόδεμα σύμφωνα με το EN 1998-1:2004, **5.2.4**
 ρ_{sk} είναι το συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού
 V_w είναι η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού στην διατμητική αντοχή, η οποία λαμβάνεται ως ίση με:

α) για διατομές με ορθογωνικό κορμό πλάτους (πάχους) b_w :

$$V_w = \rho_w b_w z f_{yw} \quad (\text{A.13})$$

όπου:

- ρ_w είναι το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού
 z είναι το μήκος του εσωτερικού μοχλοβραχίονα, όπως καθορίζεται στο **A.3.1.3(2)**, και
 f_{yw} είναι η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού όπως ορίζεται στην έκφραση (A.1). Για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία το f_{yw} θα πρέπει να διαιρείται περαιτέρω δια του επιμέρου συντελεστή για το χάλυβα σύμφωνα με το EN 1998-1:2004, **5.2.4**.

β) για κυκλικές διατομές:

$$V_w = \frac{\pi A_{sw}}{2s} f_{yw} (D - 2c) \quad (\text{A.14})$$

όπου:

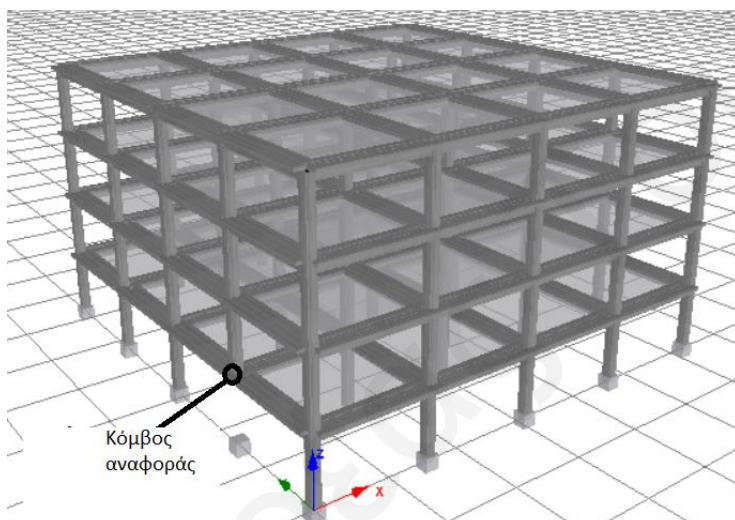
- D είναι η διάμετρος της διατομής
 A_{sw} είναι η επιφάνεια της διατομής ενός κυκλικού συνδετήρα
 s είναι η απόσταση μεταξύ των συνδετήρων
 f_{yw} είναι όπως ορίζεται πιο πάνω στο (α), και

Σχήμα 3.8 Διατμητική αντοχή υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση V_R από τον Ευρωκώδικα 8 EN 1998-3: A.3.3.1 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC). [4]

3.4 Δοκιμαστικές αναλύσεις

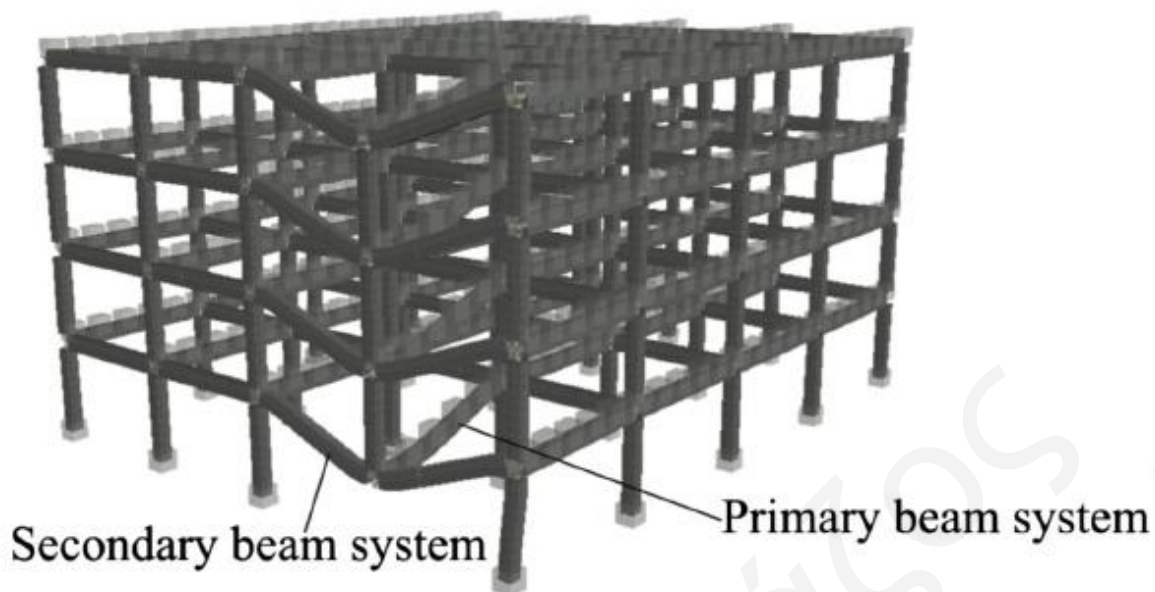
Πριν την εισαγωγή του φορέα προς επίλυση, πραγματοποιήθηκε δοκιμή του προγράμματος εισάγοντας ένα παράδειγμα ανάλυσης από έρευνα των μηχανικών Emanuele Brunesi και Fulvio Parisi το 2017 [1]. Στην συγκεκριμένη περίπτωση αναλύθηκε πλαίσιακός φορέας στο πρόγραμμα SeismoStruct και επαληθεύτηκε με πραγματικό φορέα διαστάσεων 1/3 του μοντέλου. Η μελέτη είχε θέμα την ‘pushdown’ ανάλυση του φορέα δηλαδή την βήμα προς βήμα μη γραμμική ανάλυση με την εισαγωγή κατακόρυφων επαυξητικών φορτίων χρησιμοποιώντας έλεγχο μετακινήσεων (displacement control).

Ο παραμορφωμένος φορέας της έρευνας καθώς επίσης και της ανάλυσης που έγινε για σκοπούς επαλήθευσης, προκύπτει ο ίδιος. Ακολουθούν εικόνες που δείχνουν την παραμόρφωση της κατασκευής. Ο κόμβος αναφοράς (Σχήμα 3.9) είναι ο κόμβος ακριβώς πάνω από το υποστύλωμα που αφαιρέθηκε στο κέντρο του περιμετρικού πλαισίου. Έτσι προκύπτει η ακόλουθη καμπύλη μεταξύ του επιβαλλόμενου φορτίου και της κατακόρυφης μετακίνησης του κόμβου αναφοράς.

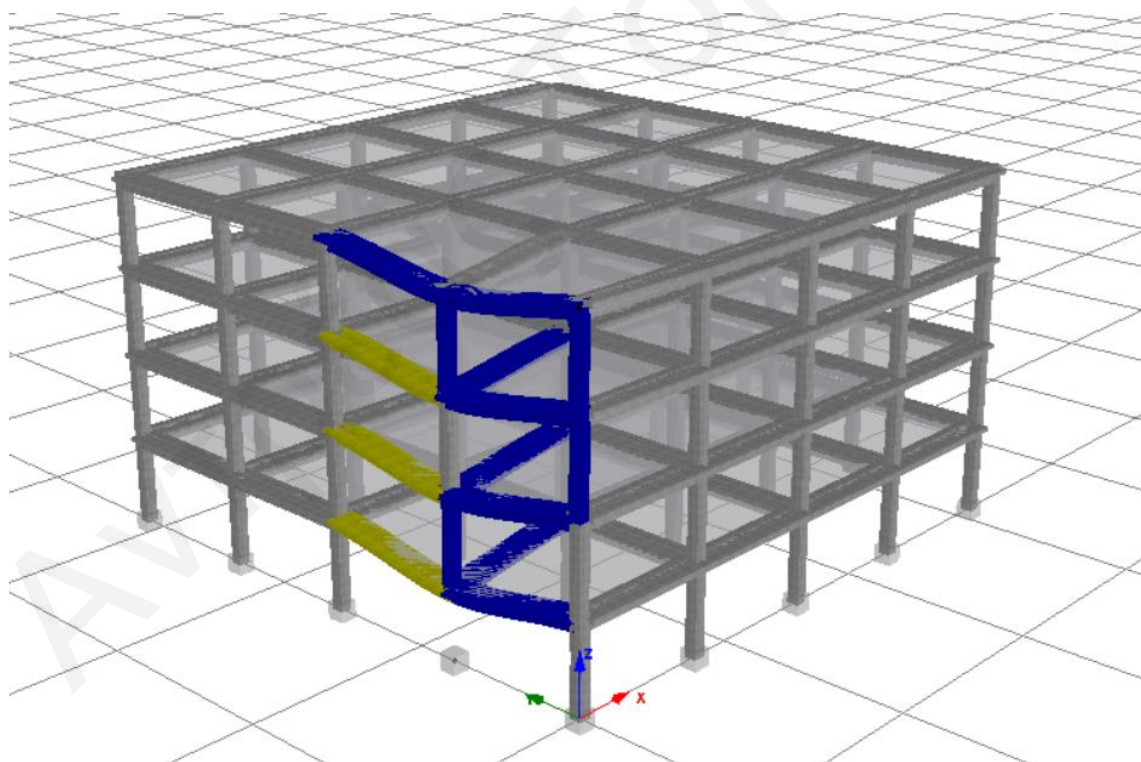


Σχήμα 3.9: Κόμβος αναφοράς που βρίσκεται ακριβώς πάνω από το υποστύλωμα που αφαιρέθηκε.

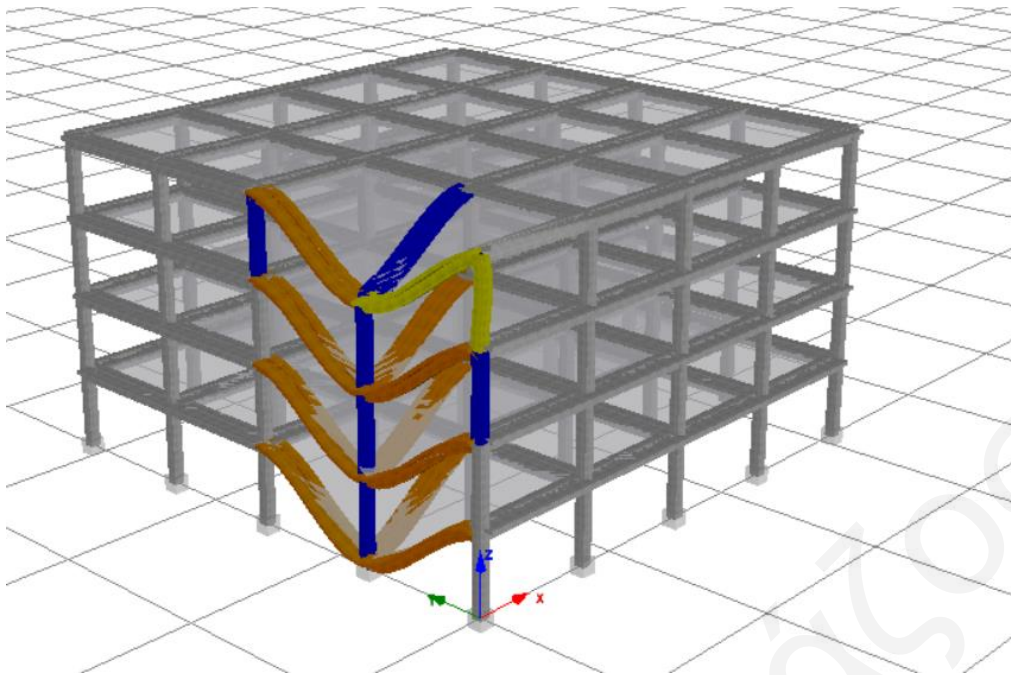
Από τον παραμορφωμένο φορέα (σχήμα 3.11, 3.12 και 3.13) φαίνεται ότι επηρεάστηκαν σημαντικά τα στοιχεία του φέροντα οργανισμού που στηρίζονταν στο υποστύλωμα που αφαιρέθηκε όπως και στην έρευνα των μηχανικών Emanuele Brunesi και Fulvio Parisi το 2017 (σχήμα 3.10). Γειτονικά δοκάρια και υποστυλώματα έχουν υποστεί βλάβες προκαλώντας μερική κατάρρευση του κτηρίου αφού μεγάλο μέρος του φορέα δεν έχει επηρεαστεί. Παρατηρείται ότι το διάγραμμα φορτιστικού συντελεστή και μετακινήσεων κόμβου αναφοράς που προκύπτει από το SeismoStruct είναι αρκετά κοντά στην ανάλυση που έγινε στα πλαίσια της έρευνας των μηχανικών Emanuele Brunesi και Fulvio Parisi το 2017 (σχήμα 3.14) και έτσι έχει ολοκληρωθεί μια αρχική δοκιμή του λογισμικού ανάλυσης. Επιπρόσθετα παρατηρούμε τα στάδια των αστοχιών των επηρεαζόμενων δοκών κατά την αύξηση του φορτιστικού συντελεστή ως εξής: αρχική διαρροή οπλισμών και σύνθλιψη σκυροδέματος, υπέρβαση ορίου στροφής της χορδής και τέλος υπέρβαση διατμητικής αντοχής.



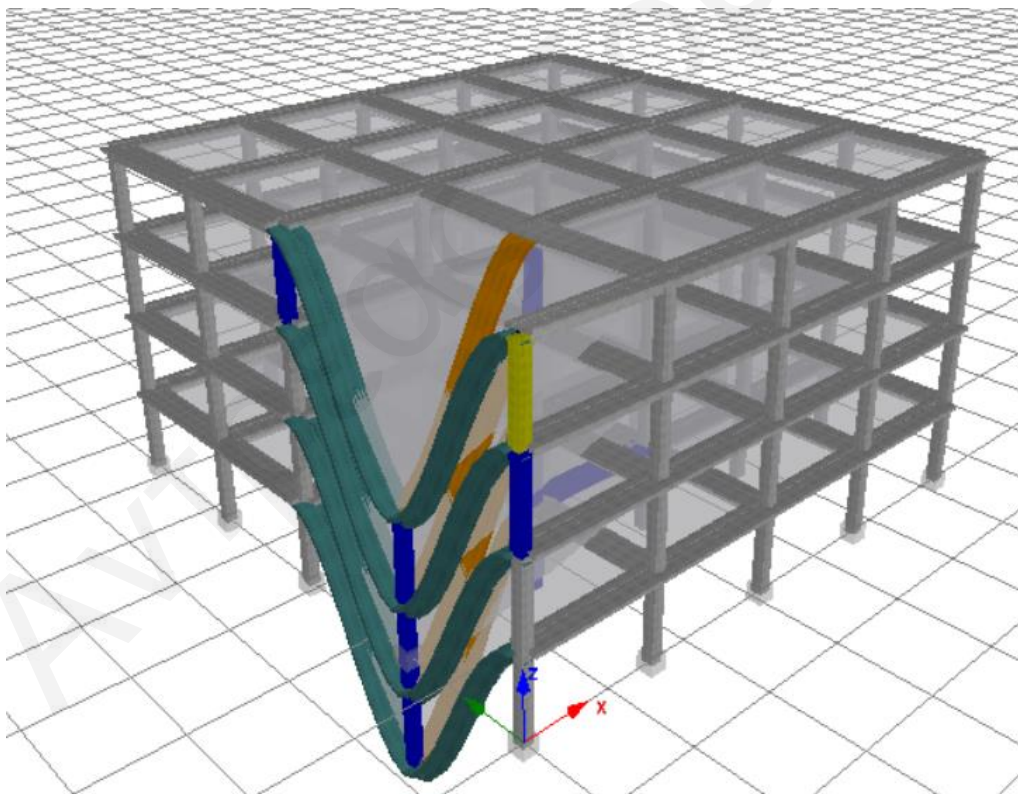
Σχήμα 3.10: Παραμορφωμένος φορέας από άλλη έρευνα. 2017, Parisi, Brunesi [1]



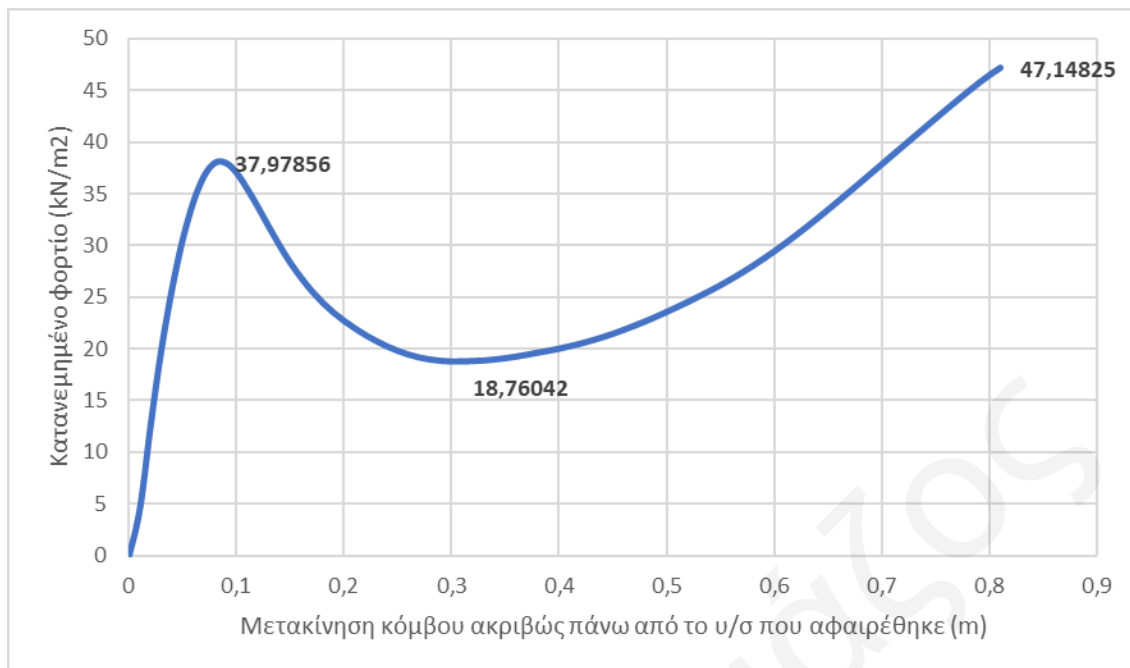
Σχήμα 3.11: Παραμορφωμένος φορέας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct για φορτιστικό συντελεστή ίσο με 37.98



Σχήμα 3.12: Παραμορφωμένος φορέας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct για φορτιστικό συντελεστή ίσο με 18.76



Σχήμα 3.13: Παραμορφωμένος φορέας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct για φορτιστικό συντελεστή ίσο με 47.15



Σχήμα 3.14: Διάγραμμα μετακίνησης κόμβου αναφοράς και φορτιστικού συντελεστή (κατανεμημένο φορτίο) από ανάλυση για επαλήθευση λογισμικού SeismoStruct

Κεφάλαιο 4

4 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ PUSHOVER

4.1 Ορισμός κατακόρυφων φορτίων G+0.3Q

Εκτός από την προοδευτική κατάρρευση Pushdown πραγματοποιήθηκαν και 2 αναλύσεις pushover. Στις αναλύσεις αυτές έχει γίνει εισαγωγή κατακόρυφου φορτίου $G + 0.3Q$ και επιβολή οριζόντιου επαυξανόμενου φορτίου P στον άξονα x και y αντίστοιχα. Παρακάτω περιγράφεται ο υπολογισμός του κατακόρυφου φορτίου $G+0.3Q$ και ακολουθούν οι αναλύσεις pushover στον ασθενή και ισχυρό άξονα.

Υπολογισμός κατακόρυφου φορτίου $G+0.3Q$

Ορίζεται πρόσθετο μόνιμο φορτίο (τοιχοπληρώσεις κτλ) $G_{\text{προσθ}}$ ίσο με 1.2 kN/m^2

$$G = h_f \cdot 25 + h_{\text{ελαφ}} \cdot 10 + h_{\text{ασβ}} \cdot 18 + G_{\text{προσθ}}$$

$$G = 0.15 \cdot 25 + 0.2 \cdot 10 + 0.02 \cdot 18 + 1.2$$

$$G = 7.31 \text{ kN/m}^2$$

Όπου:

h_f : ύψος πλάκας ορόφου

$h_{\text{ελαφ}}$: ύψος ελαφρομετόν

$h_{\text{ασβ}}$: ύψος κονιάματος οροφής

Επομένως το μόνιμο φορτίο G είναι ίσο με 7.31 kN/m^2

Υπολογισμός κινητού φορτίου Q

Για κατηγορία χρήσης B (σχήμα 4.1) το κινητό φορτίο Q ορίζεται ίσο με 3 kN/m^2 (σχήμα 4.2).

Table 6.1 (CYS): Categories for use

Category	Specific Use	Example
A	Areas for domestic and residential activities	Rooms in residential buildings and houses; bedrooms and wards in hospitals; bedrooms in hotels and hostels, kitchens and toilets.
B	Office areas	

Σχήμα 4.1: Κατηγορίες χρήσης: Πίνακας 6.1 του Ευρωκώδικα 2 EN1991-1-1:2002-κυπριακό εθνικό προσάρτημα. [3]

Table 6.2 (CYS): Imposed loads on floors, balconies and stairs in buildings

Categories of loaded areas	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
Category A		
- Floors	2,0	2,0
- Stairs	3,0	2,0
- Balconies	4,0	2,0
Category B	3,0	4,0
Category C		
- C1	3,0	4,0
- C2	4,0	4,0
- C3	5,0	4,0
- C4	5,0	7,0
- C5	5,0	4,5
Category D		
- D1	5,0	7,0
- D2	5,0	7,0

Σχήμα 4.2: Επιβαλλόμενα φορτία σε δάπεδα, μπαλκόνια και σκάλες κτηρίων: Πίνακας 6.2 του Ευρωκώδικα 2 EN1991-1-1:2002- κυπριακό εθνικό προσάρτημα. [3]

$$G+0.3Q= 7.31 + 0.3 \cdot 3= 8.21 \text{ kN/m}^2.$$

Το συνολικό κατακόρυφο φορτίο $G+0.3Q$ ισούται με 8.21 kN/m^2 .

$$\text{Εμβαδό κάτοψης} \cdot (G+0.3Q) \cdot \text{αριθμός ορόφων} = (16 \cdot 28) \cdot 8.21 \cdot 7 = 25747 \text{ kN}.$$

Για όλο το φορέα, το συνολικό κατακόρυφο φορτίο ισούται με 25747 kN .

4.2 Ανάλυση pushover

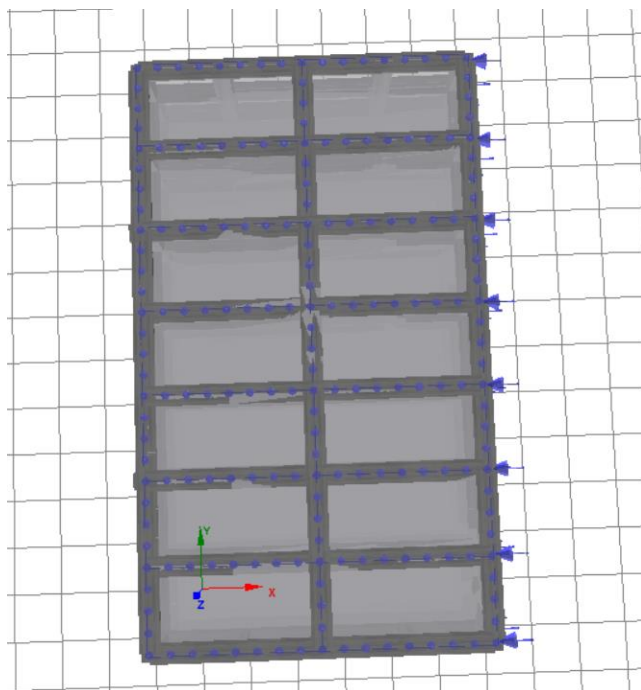
Η διεύθυνση του οριζόντιου φορτίου στον ασθενή άξονα (άξονας x) ορίστηκε, για τη δυσμενέστερη περίπτωση, από τα δεξιά προς τα αριστερά (σχήμα 4.3 και 4.4) λόγω του ότι στη δεξιά πλευρά υπάρχει εξωτερικό κλιμακοστάσιο από μπετόν, το οποίο θα αντιστεκόταν στην οριζόντια κίνηση του φορέα. Σημειώνεται ότι το κλιμακοστάσιο δεν προσομοιώνεται μαζί με τον υπόλοιπο φορέα γιατί αποτελεί ξεχωριστό τμήμα της κατασκευής λόγω του αρμού που υπάρχει μεταξύ των δύο.

Ως κόμβος αναφοράς ορίστηκε ο ακραίος κόμβος n588 (σχήμα 4.4) στον ανώτατο όροφο στο ακραίο πλαίσιο κατά x . Στον κόμβο αυτό έγινε ο έλεγχος μετακινήσεων “displacement control” της ανάλυσης pushover σε έντεκα βήματα για να φτάσει ο κόμβος σε μετακίνηση κατά x ίση με -0.11m . Δηλαδή το φορτίο αυξανόταν με τέτοια βήματα ώστε ο κόμβος να μετακινείται με βήμα ίσο με 0.01m . Η ίδια μεθοδολογία έγινε σε όλες τις αναλύσεις και pushover αλλά και pushdown με πενήντα βήματα για μετακίνηση 0.50m παράλληλα στην διεύθυνση του φορτιστικού συντελεστή.

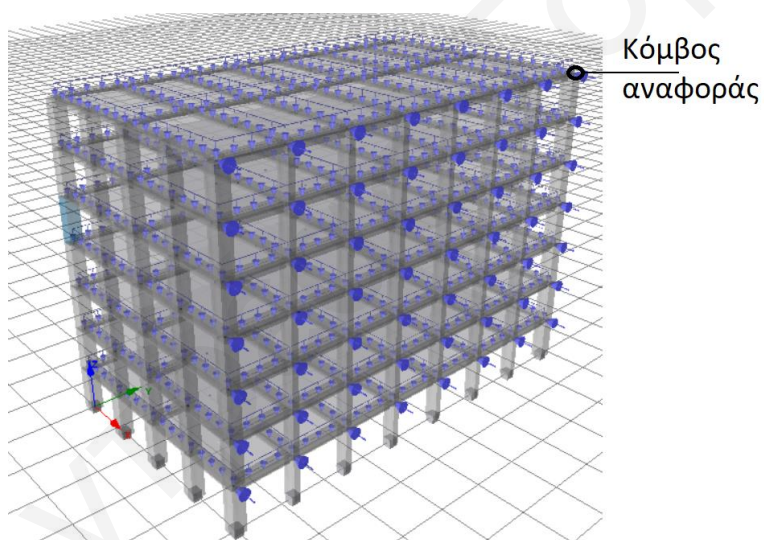
Μετά το τρέξιμο της ανάλυσης pushover στον ασθενή άξονα προκύπτει φορτιστικός συντελεστής ίσος με 0.5505 στο 11° βήμα με τη μετακίνηση του κόμβου κατά $u_x = -0.11\text{m}$. Σχετικό διάγραμμα μετατοπίσεων του κόμβου αναφοράς με φορτιστικό συντελεστή (σχήμα 4.5) ακολουθεί παρακάτω.

Από τον παραμορφωμένο φορέα (σχήμα 4.6 και σχήμα 4.7) φαίνεται ότι υπάρχει αστοχία σε σύνθλιψη του σκυροδέματος των υποστυλωμάτων του ισογείου και αρκετών δοκών των δύο ακραίων πλαισίων κατά x . Παράλληλα διαρρέουν και οπλισμοί εσωτερικών δοκών του κτηρίου.

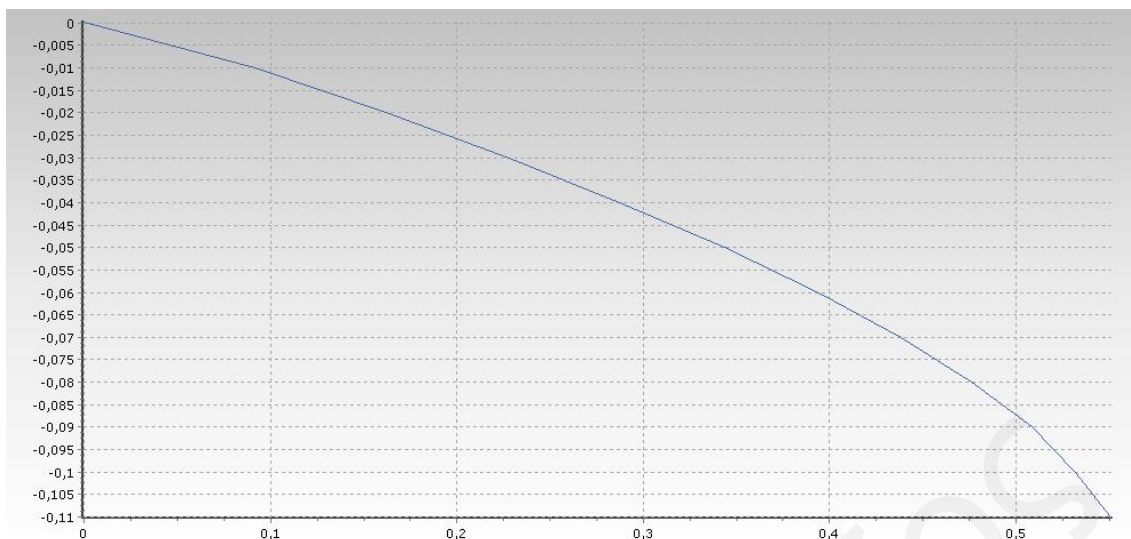
Τέλος, η σεισμική τέμνουσα βάσης προκύπτει ίση με 14.2 mN (σχήμα 4.8) και για κατακόρυφο φορτίο ίσο με 25.7 mN προκύπτει σεισμικός συντελεστής ίσος με 0.55g .



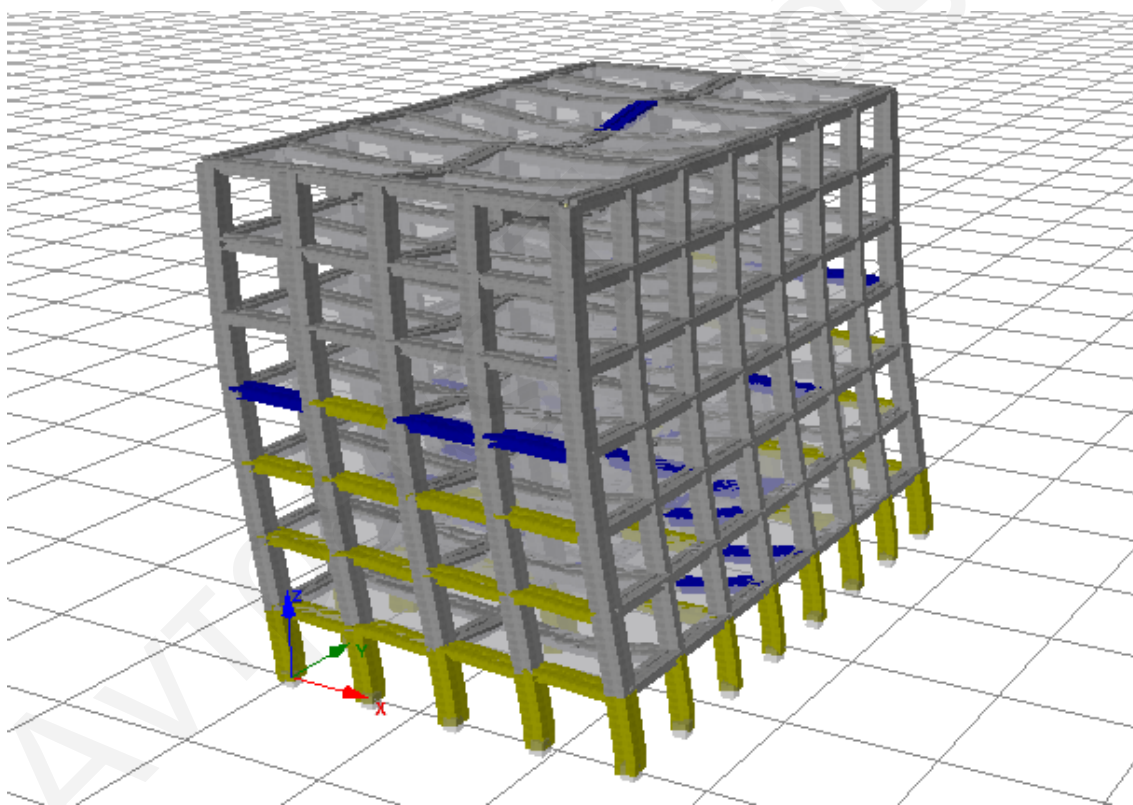
Σχήμα 4.3: Κάτοψη κατασκευής με επιβολή οριζόντιων φορτίων κατά τον ασθενή άξονα.



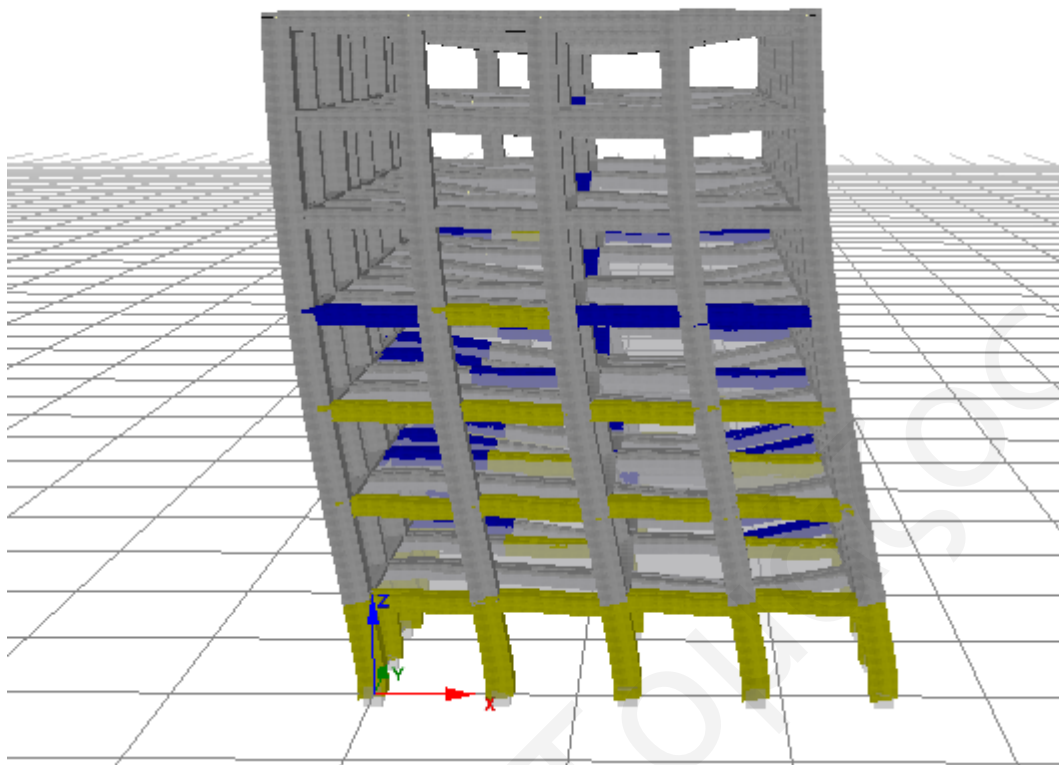
Σχήμα 4.4: Τρισδιάστατος φορέας με επιβολή οριζόντιων φορτίων κατά τον ασθενή άξονα



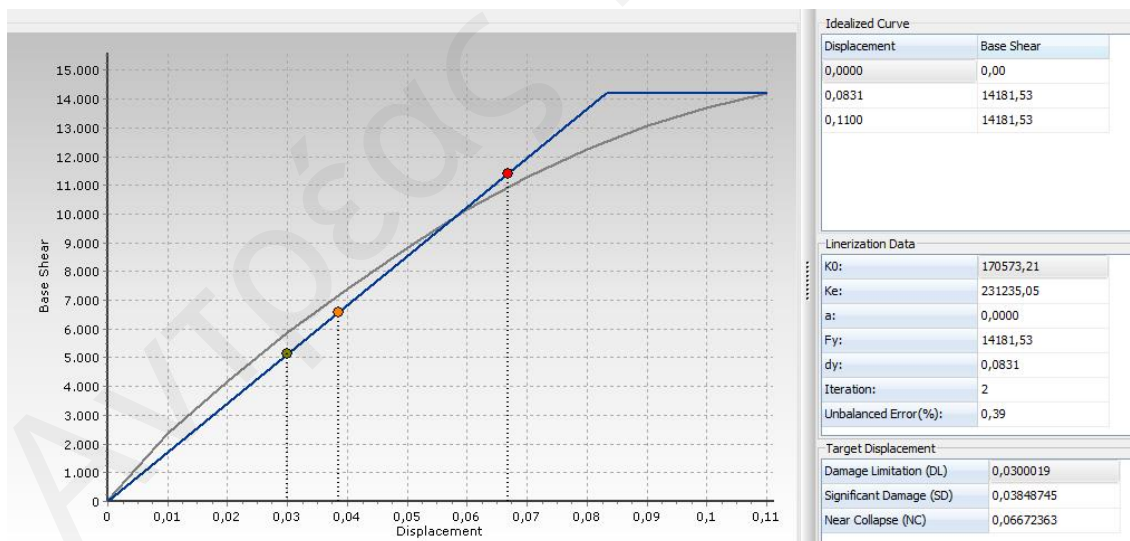
Σχήμα 4.5: Διάγραμμα φορτιστικού συντελεστή και μετακινήσεων κόμβου n588. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής (-).



Σχήμα 4.6: Παραμορφωμένος φορέας σε ανάλυση pushover στον ασθενή άξονα



Σχήμα 4.7: Παραμορφωμένος φορέας σε ανάλυση pushover στον ασθενή άξονα



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα σεισμικής τέμνουσας και μετατοπίσεων, οριζόντιος άξονας: μετατόπιση u (m), κατακόρυφος άξονας: τέμνουσα βάσης (kN).

Κεφάλαιο 5

5 ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ

5.1 Πρόκληση προοδευτικής κατάρρευσης με καθαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων

Στην περίπτωση της πρόκλησης της προοδευτικής κατάρρευσης, τα κατακόρυφα φορτία του φορέα, είναι μόνο τα φορτία G (7.31 kN/m^2). Τα έπιπλα, τα γραφεία και όλος ο κινητός εξοπλισμός αφαιρείται και μεταφέρεται εκτός του κτηρίου και το κινητό φορτίο $0.3Q$ παύει να υφίσταται. Τα υλικά αυτά αφαιρούνται λόγω της αξίας τους καθώς και για την ευκολότερη διαλογή και διαχείριση των υλικών που θα προκύψουν από την κατεδάφιση της κατασκευής.

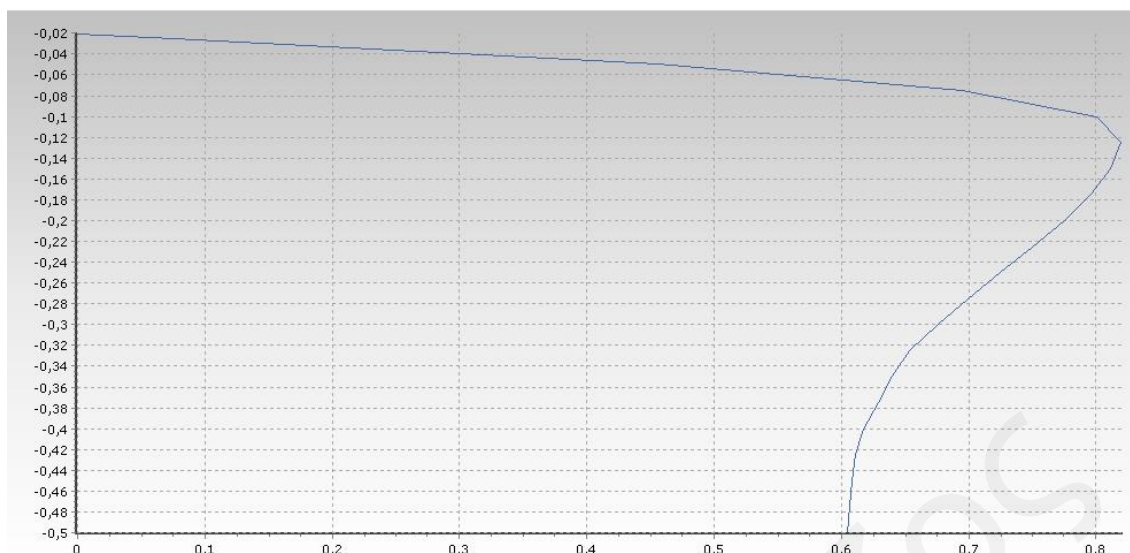
Το ζητούμενο των αναλύσεων της προοδευτικής κατάρρευσης είναι η εύρεση της βέλτιστης ομάδας υποστυλωμάτων που χρειάζεται να αφαιρεθούν προκειμένου ο φορέας να μην αντέχει τα μόνιμα φορτία που ήδη έχει. Δηλαδή ποια στοιχεία θα αφαιρεθούν για την ολική κατάρρευση της κατασκευής. Τα κατακόρυφα φορτία κατανεμήθηκαν στην κατασκευή ως φορτιστικός συντελεστής P και με αυτόν το τρόπο θα είναι δυνατόν να περιγράψει το ποσοστό του φορτίου G που δύναται να αντέξει ο φορέας μετά την κάθε αφαίρεση υποστυλωμάτων. Σημειώνεται ότι επιτυγχάνεται η κατάρρευση του φέροντα οργανισμού (μερική ή ολική), για φορτιστικό συντελεστή $P < 1$.

Παράλληλα σε κάθε ανάλυση γίνεται έλεγχος βυθίσεων του κόμβου πάνω από υποστύλωμα το οποίο αφαιρέθηκε. Στην περίπτωση που στο διάγραμμα μετατοπίσεων-φορτιστικού συντελεστή δεν παρατηρείται αστοχία, τότε υπάρχει άλλος κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση σε διαφορετική περιοχή, η οποία έχει αστοχήσει.

Αρχικά θα γίνει η προσπάθεια επίτευξης της ολικής κατάρρευσης με την αφαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων και έπειτα με την αφαίρεση περιμετρικών υποστυλωμάτων.

A) Αφαίρεση εσωτερικού υποστυλώματος K9

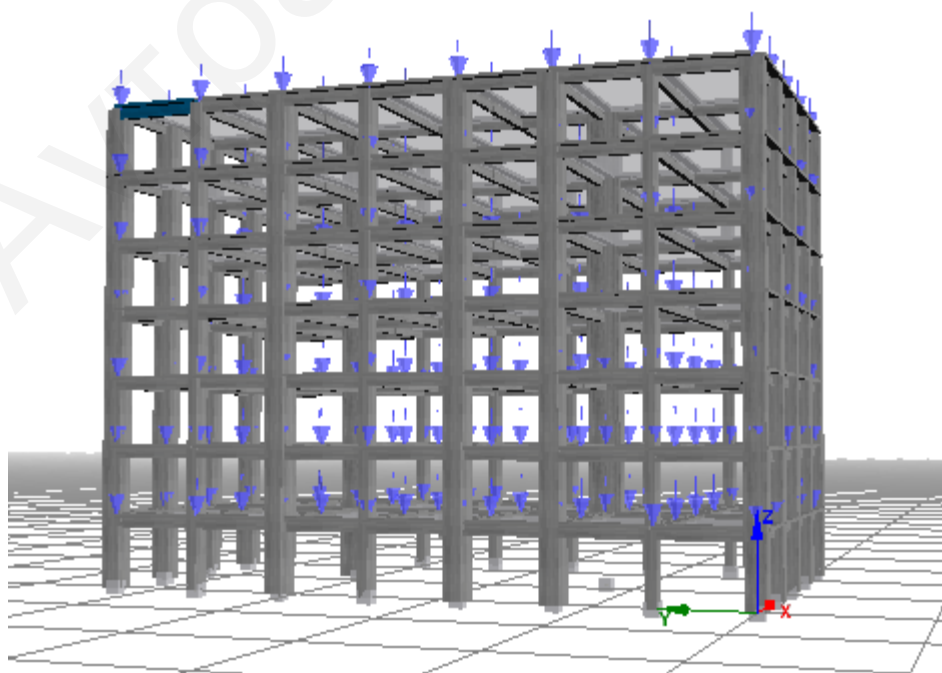
Με την αφαίρεση του υποστυλώματος K9 (σχήμα 5.1) παρατηρείται ότι ο φορέας δεν αντέχει ολόκληρο αλλά το 81.95% (σχήμα 5.3) του μόνιμου φορτίου G όπου ο κόμβος πάνω από το υποστύλωμα K9 έχει κατακόρυφη βύθιση ίση με $u_z = -0.13\text{m}$. Με τον παραμορφωμένο φορέα όμως του σχήματος παρατηρείται μόνο μερική κατάρρευση της κατασκευής αφού αστοχούν τα στοιχεία που στηρίζονται στο K9 και ορισμένα γειτονικά (σχήμα 5.2). Τα στοιχεία από το υποστύλωμα K16 μέχρι το πρώτο πλαίσιο της πρόσοψης του κτηρίου δεν έχουν αστοχήσει.



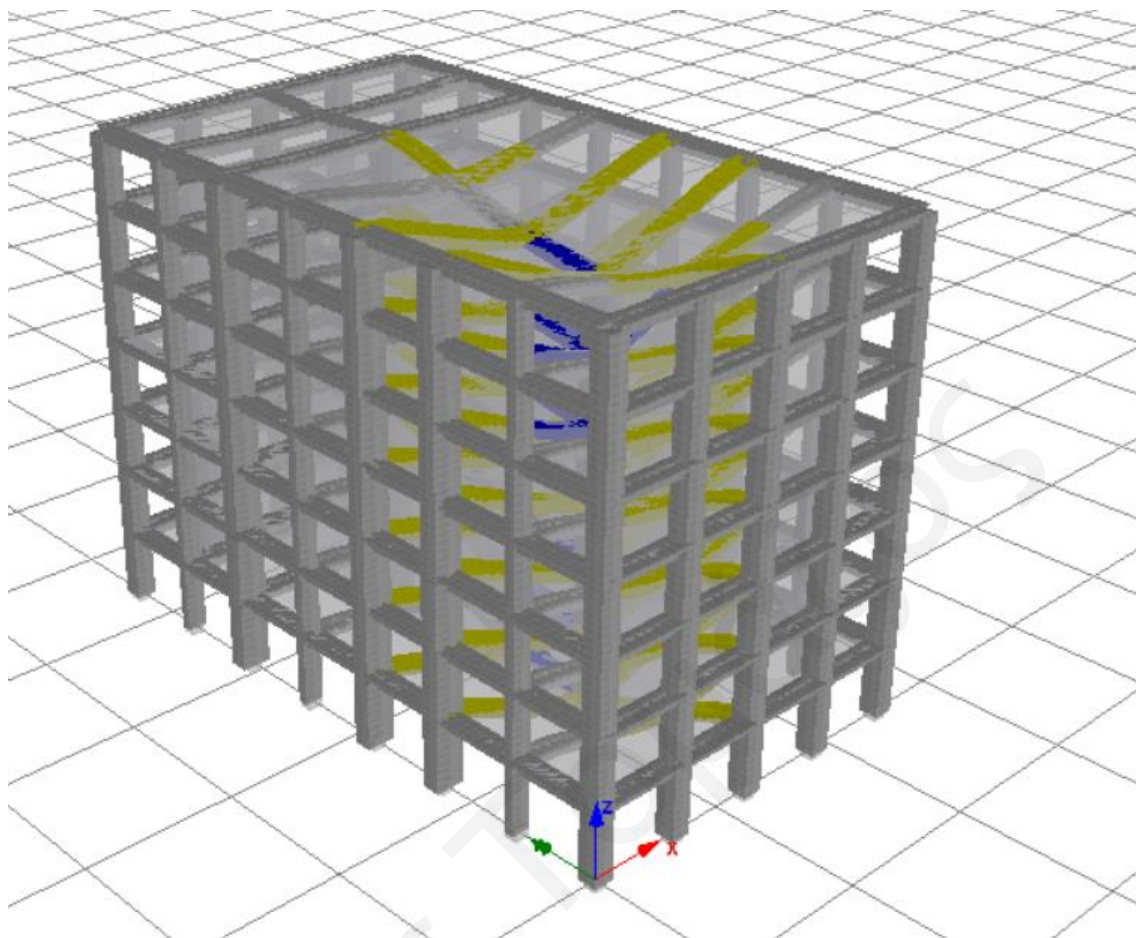
Σχήμα 5.3: Διάγραμμα μετακινήσεων και φοριστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K9 που αφαιρέθηκε. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φοριστικός συντελεστής.

B) Αφαίρεση εσωτερικού υποστυλώματος K16

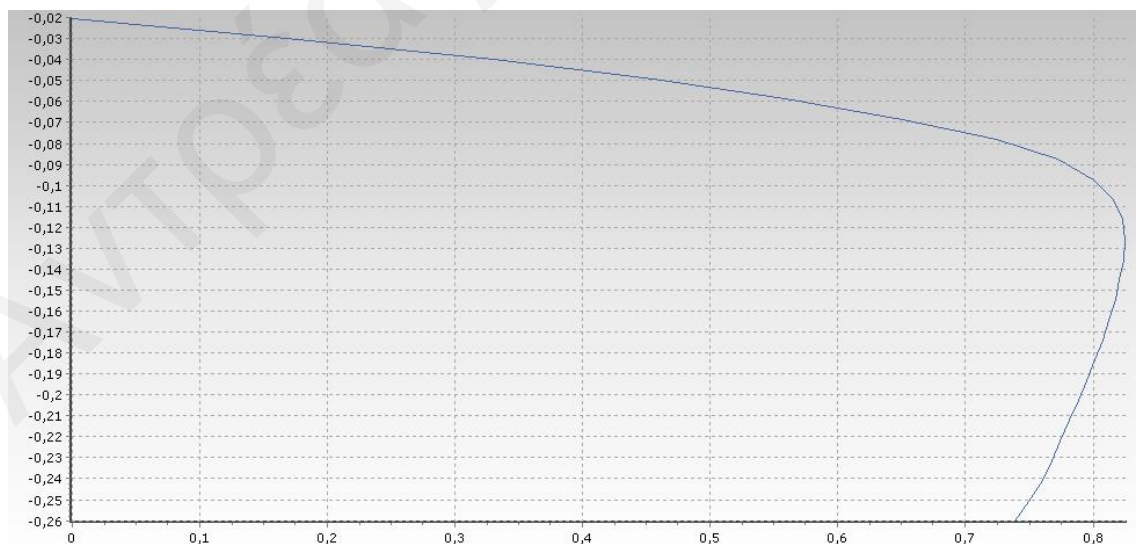
Με την αφαίρεση του υποστυλώματος K9 (σχήμα 5.4) παρατηρείται ότι ο φορέας δεν αντέχει ολόκληρο αλλά το 82,50% (σχήμα 5.6) του μόνιμου φορτίου G όπου ο κόμβος πάνω από το υποστύλωμα K16 έχει κατακόρυφη βύθιση ίση με $u_z = -0.14\text{m}$. Με τον παραμορφωμένο φορέα όμως του σχήματος παρατηρείται μόνο μερική κατάρρευση της κατασκευής αφού αστοχούν τα στοιχεία που στηρίζονται στο K16 και ορισμένα γειτονικά (σχήμα 5.5). Τα στοιχεία από το υποστύλωμα K9 μέχρι το τελευταίο πλαίσιο της πρόσοψης του κτηρίου δεν έχουν αστοχήσει.



Σχήμα 5.4: Αφαίρεση του υποστυλώματος K16 από το ισόγειο.



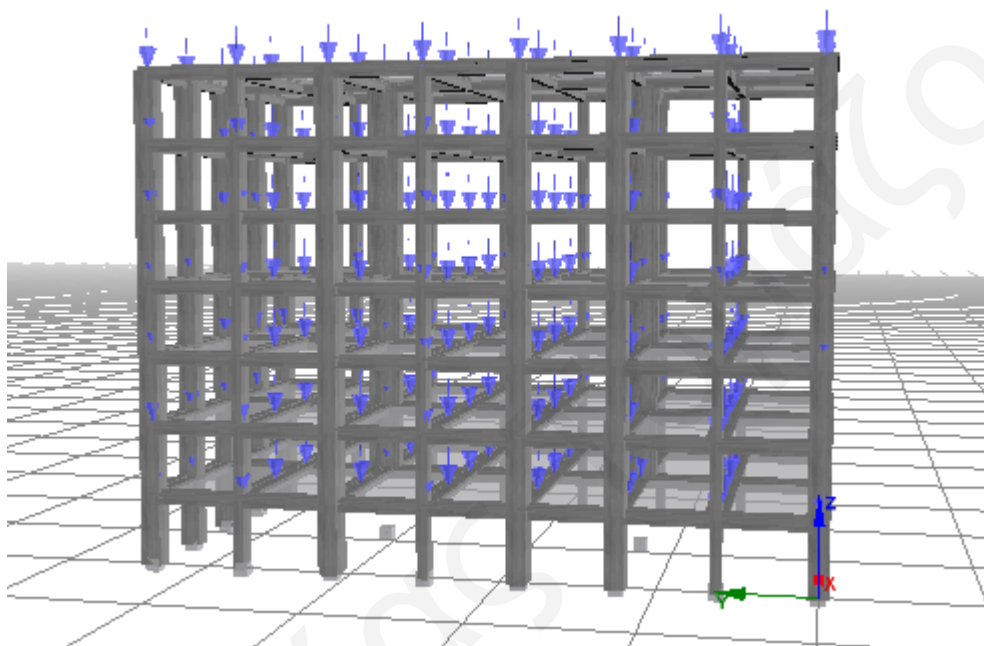
Σχήμα 5.5: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K16



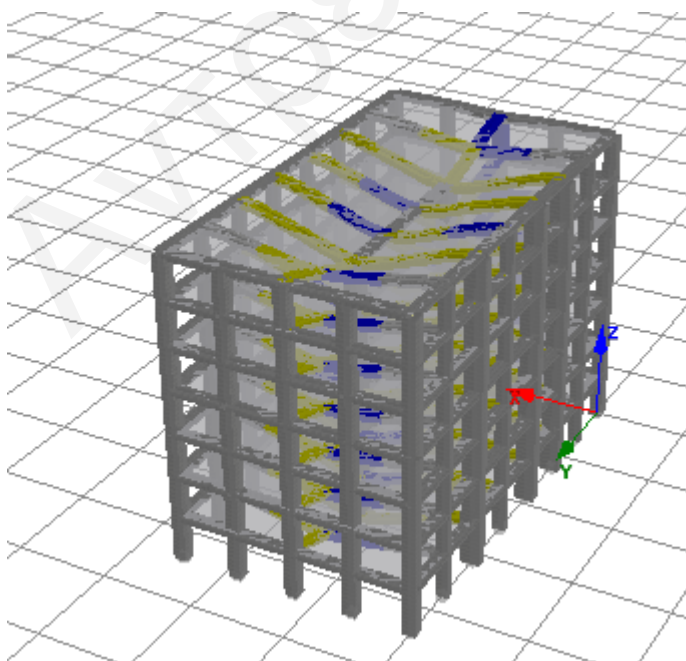
Σχήμα 5.6: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K16 που αφαιρέθηκε. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Γ) Ταυτόχρονη αφαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων K9 και K16

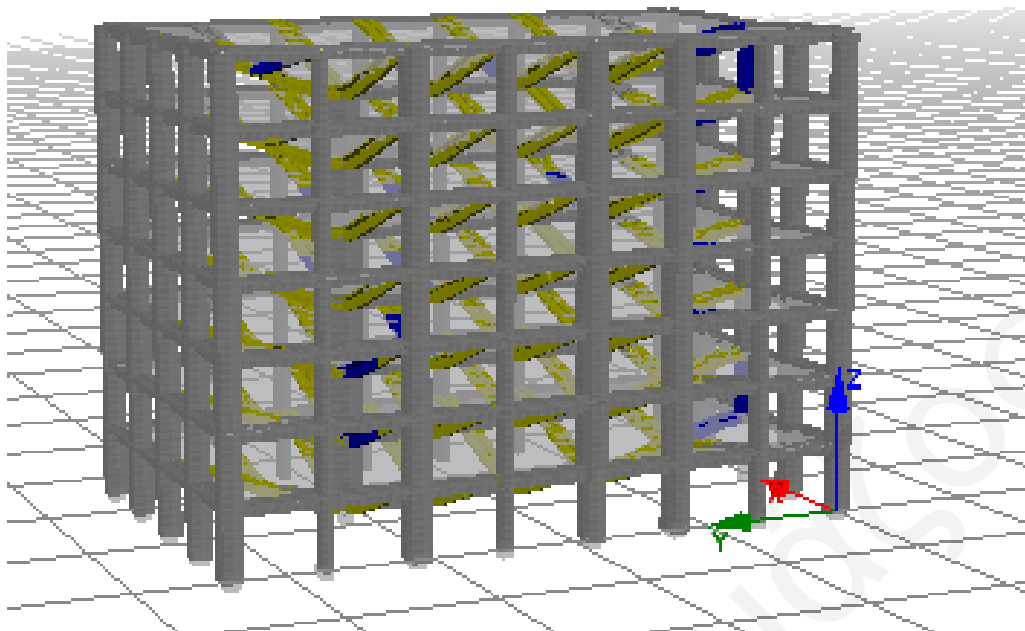
Με την ταυτόχρονη αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16 (σχήμα 5.7) παρατηρείται ότι ο φορέας δεν αντέχει ολόκληρο αλλά το 73.47% (σχήμα 5.10) του μόνιμου φορτίου G όπου ο κόμβος πάνω από το υποστήλωμα K9 έχει κατακόρυφη βύθιση ίση με $u_z = -0.11\text{m}$. Με τον παραμορφωμένο φορέα του σχήματος παρατηρείται ολική κατάρρευση της κατασκευής όπου αστοχούν περισσότερα από τα 2/3 των εσωτερικών στοιχείων του φορέα (σχήμα 5.8 και 5.9). Τα περιμετρικά πλαίσια, τα οποία δεν έχουν αστοχήσει βάσει της ανάλυσης, δύναται να παρασυρθούν και αυτά κατά την πτώση των υπόλοιπων στοιχείων ή αν δεν γίνει αυτό, για την κατεδάφιση τους αρκεί μόνο η επιβολή φορτίου κάθετο στη μεγάλη διεύθυνση τους αφού πρόκειται για δυσδιάστατα πλαίσια.



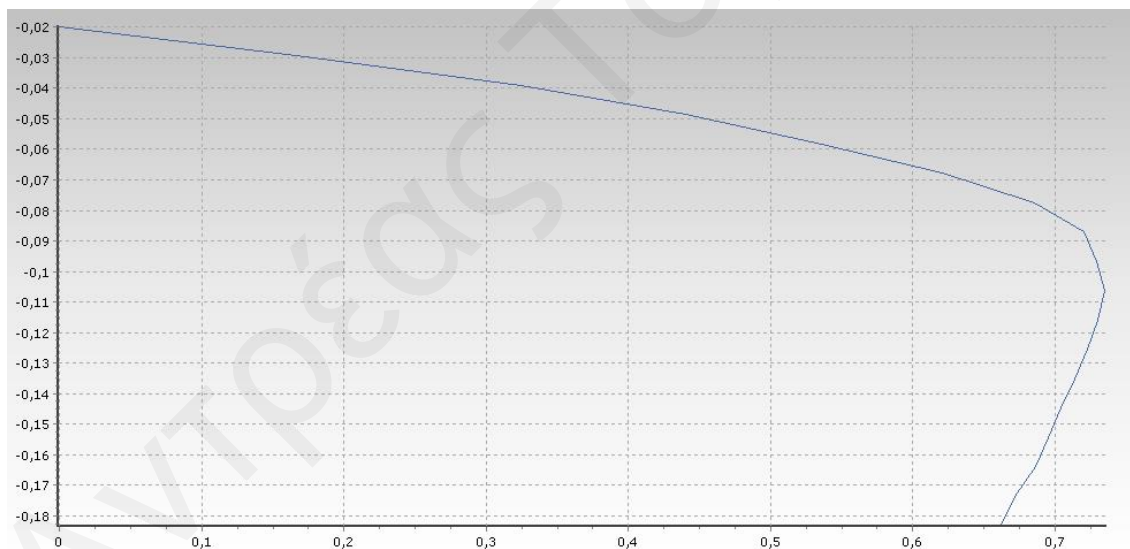
Σχήμα 5.7: Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16 από το ισόγειο.



Σχήμα 5.8: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16.



Σχήμα 5.9: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K9 και K16



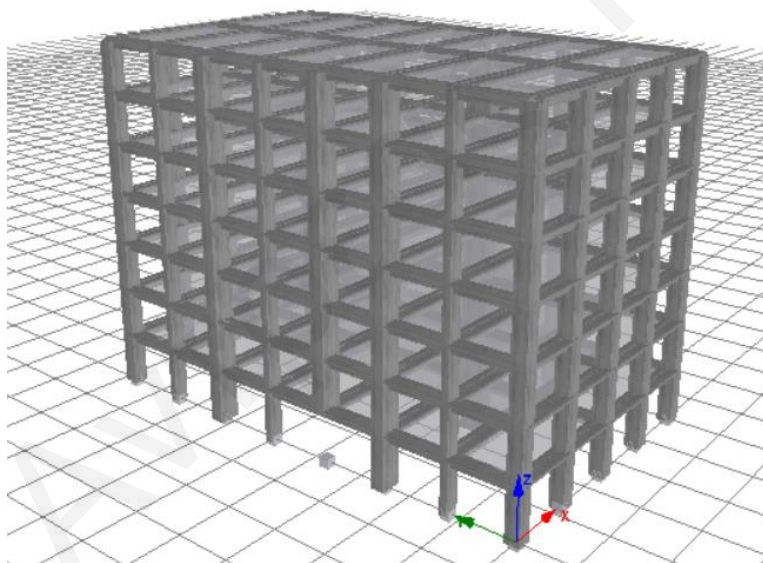
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K9 που αφαιρέθηκε. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

5.2 Πρόκληση προοδευτικής κατάρρευσης χωρίς καθαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων

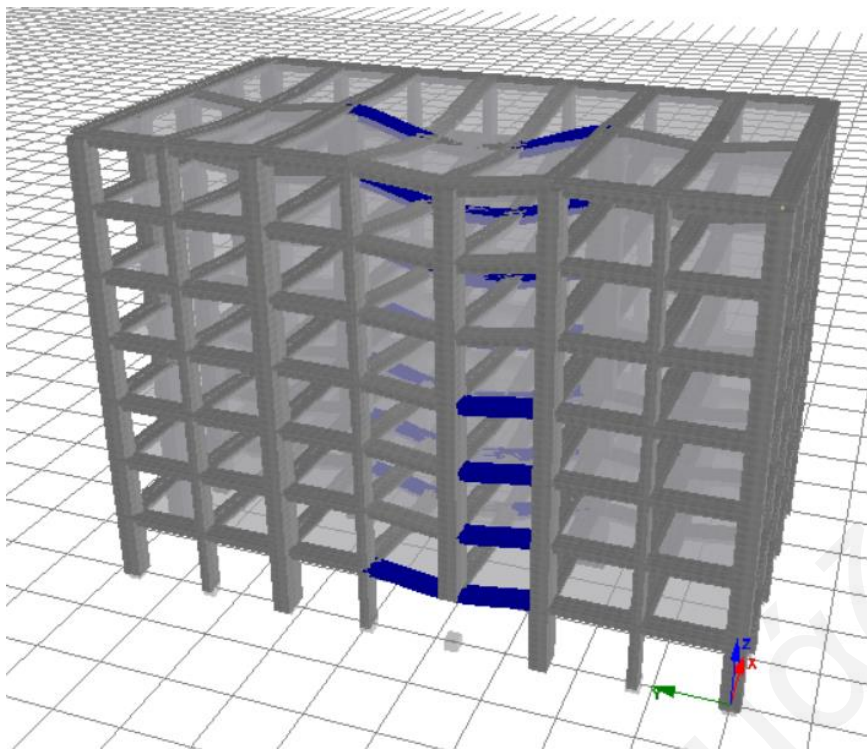
Η καθαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων του φορέα φαίνεται να ήταν πολύ αποτελεσματική αφού ο φορέας έφτασε στην πλήρη κατάρρευση με την αφαίρεση μόνο δύο υποστυλωμάτων του ισόγειου. Παρόλα αυτά, η αφαίρεση των εσωτερικών υποστυλωμάτων στο ισόγειο μιας κατασκευής, δεν μπορεί να γίνει εύκολα και με ασφάλεια διότι τα μηχανήματα που θα χρησιμοποιηθούν μπορεί να εγκλωβιστούν εντός της κατασκευής κατά την κατάρρευση της. Επομένως είναι σημαντικό να διερευνηθούν και περιπτώσεις καθαίρεσης περιμετρικών υποστυλωμάτων για την πρόκληση της ολικής κατάρρευσης του φορέα.

A) Αφαίρεση περιμετρικού υποστυλώματος K13

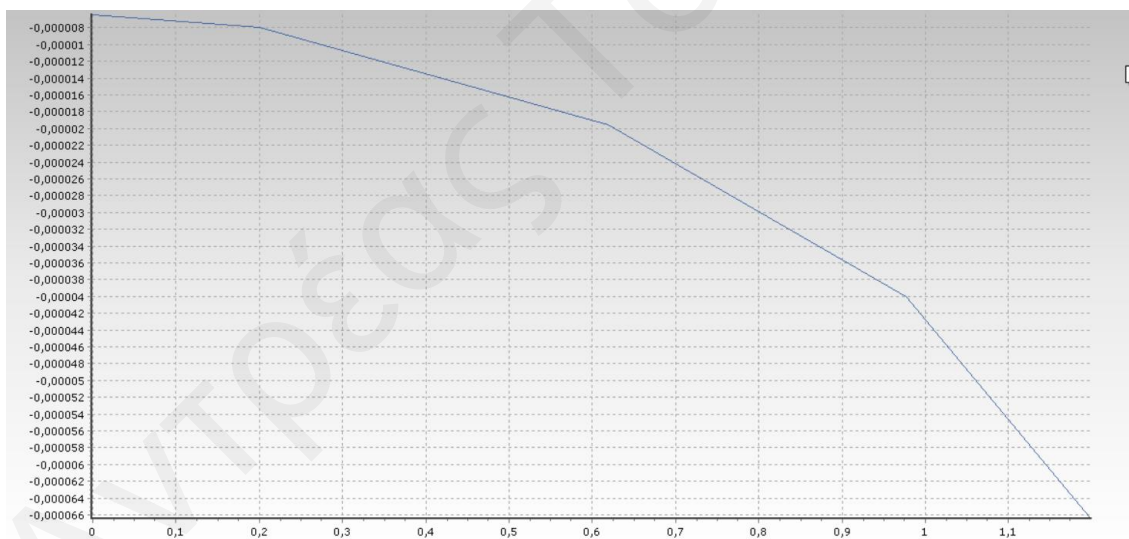
Αρχικά έγινε η αφαίρεση του περιμετρικού υποστυλώματος K13 (σχήμα 5.11). Από τον παραμορφωμένο φορέα (σχήμα 5.12) φαίνεται ότι η αστοχία γίνεται στις δοκούς του εσωτερικού πλαισίου κατά y και η κατασκευή δεν έχει καταρρεύσει πλήρως αφού μεγάλος αριθμός στοιχείων δεν έχει φτάσει σε επίπεδα αστοχίας. Επίσης η κατασκευή αντέχει φορτιστικό συντελεστή ίσο με 1.1980 (σχήμα 5.13) του κατανεμημένου φορτίου G επομένως ένα περιμετρικό υποστυλώμα δεν αρκεί για να φέρει την κατάρρευση του φορέα.



Σχήμα 5.11 Αφαίρεση του υποστυλώματος K13 από το ισόγειο.



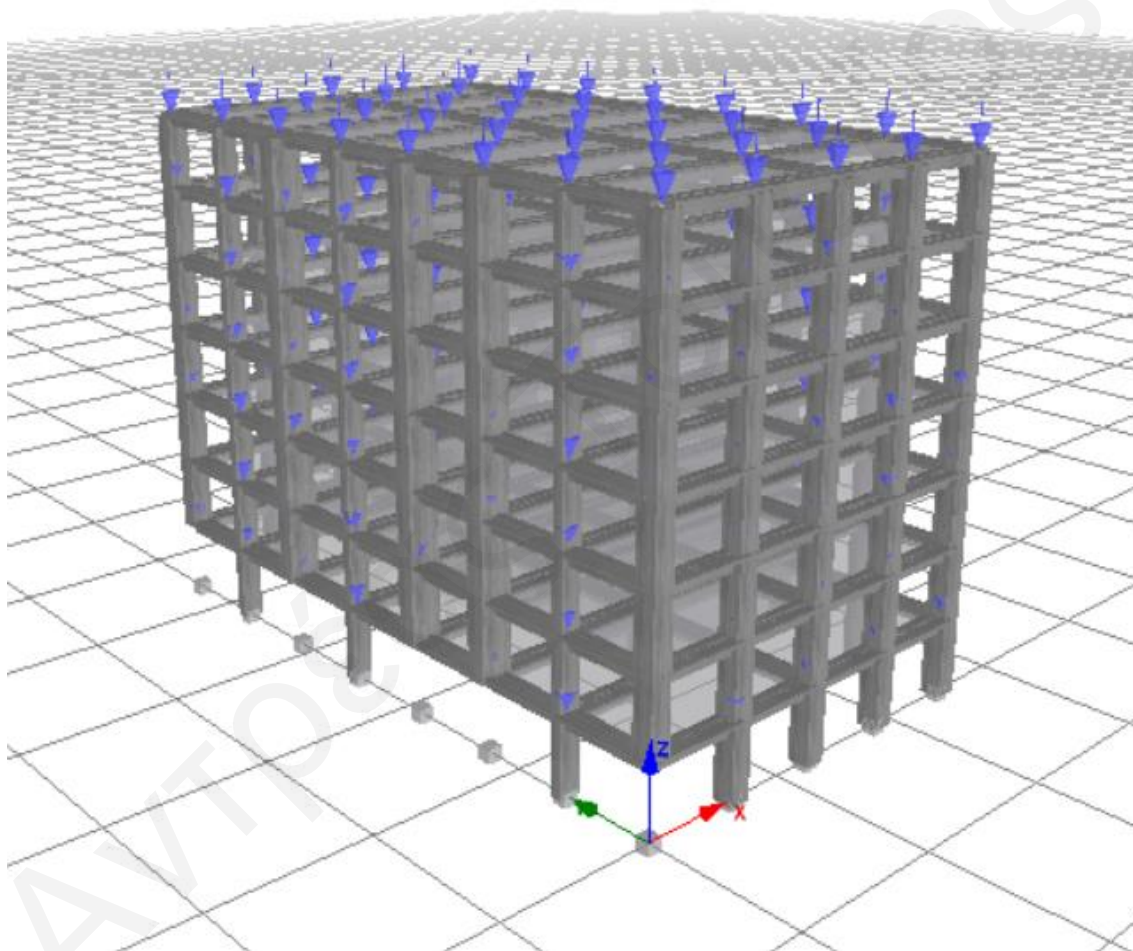
Σχήμα 5.12: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K13



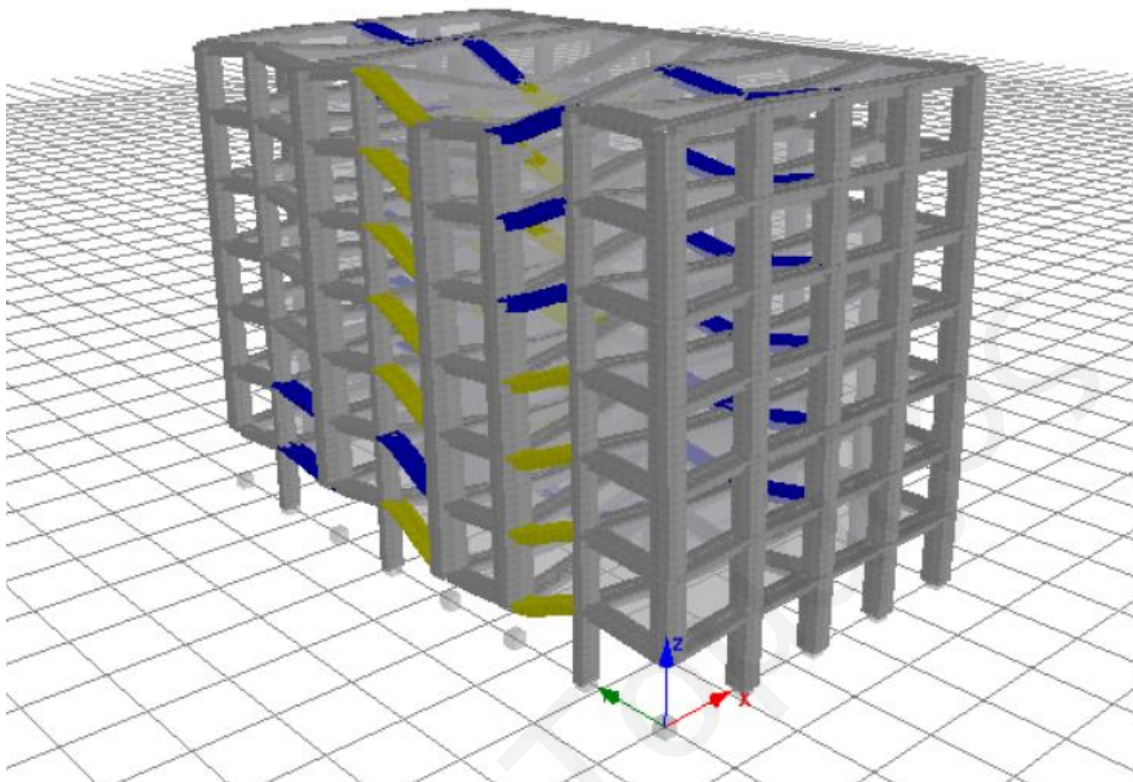
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα μετακινήσεων και φοριστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K13 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φοριστικός συντελεστής.

B) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K8, K13, K15, K20

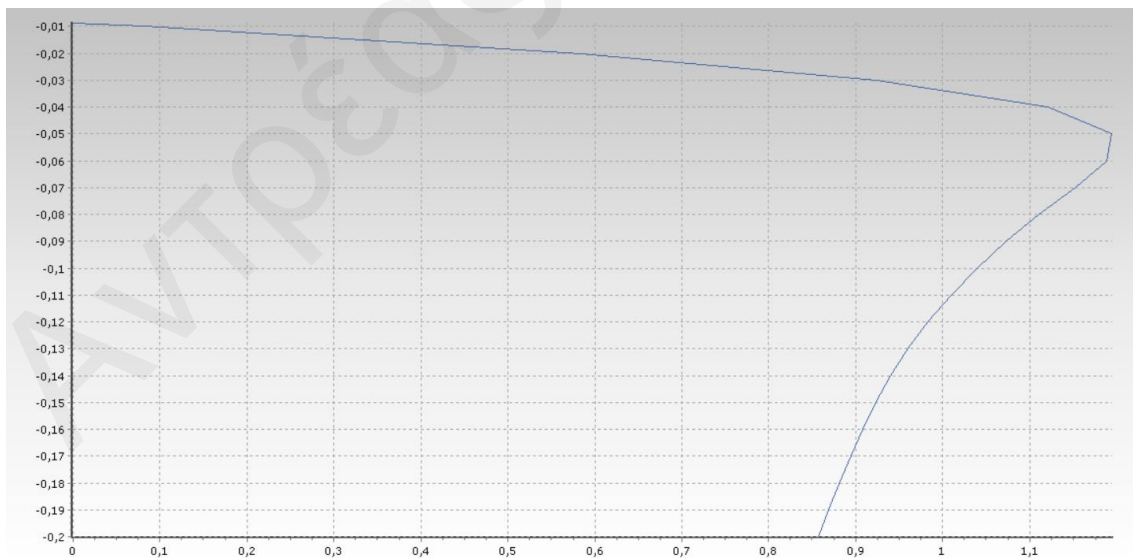
Μετά την αφαίρεση του περιμετρικού υποστυλώματος K13 και του γωνιακού υποστυλώματος K1 ο φορέας δεν είχε ολική κατάρρευση και επιλέγεται η επιπλέον αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K15 και K20 (σχήμα 5.14) για σύγκριση αποτελεσμάτων. Από τον παραμορφωμένο φορέα (σχήμα 5.15) φαίνεται η αστοχία των δοκών του εσωτερικού πλαισίου κατά y ορισμένων περιμετρικών δοκών ειδικά αυτών που συνδέονταν με τα K13 και K15. Επίσης η κατασκευή αντέχει φορτιστικό συντελεστή ίσο με 1.1943 του κατανεμημένου φορτίου G (σχήμα 5.16) επομένως χρειάζεται περαιτέρω αφαίρεση στοιχείων για τη επίτευξη της ολικής κατάρρευσης.



Σχήμα 5.14 Αφαίρεση του υποστυλώματος K1, K8, K13, K15, K20 από το ισόγειο.



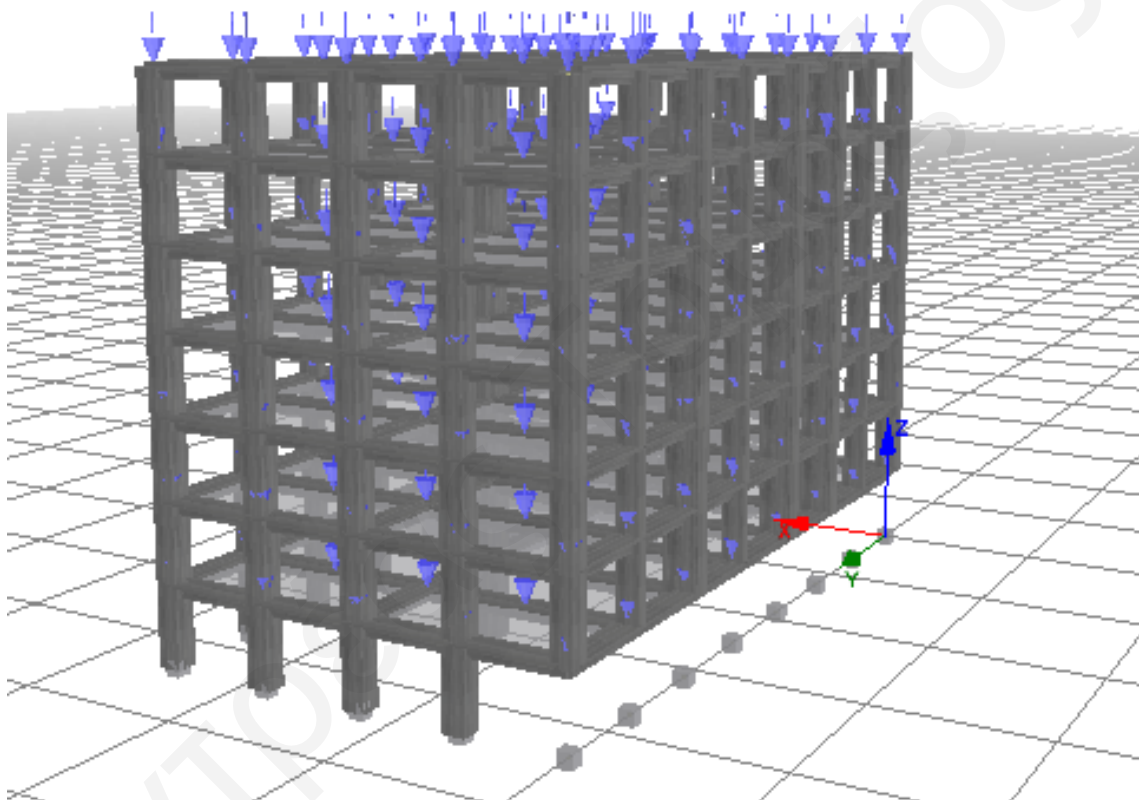
Σχήμα 5.15: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση του υποστυλώματος K1, K8, K13, K15, K20



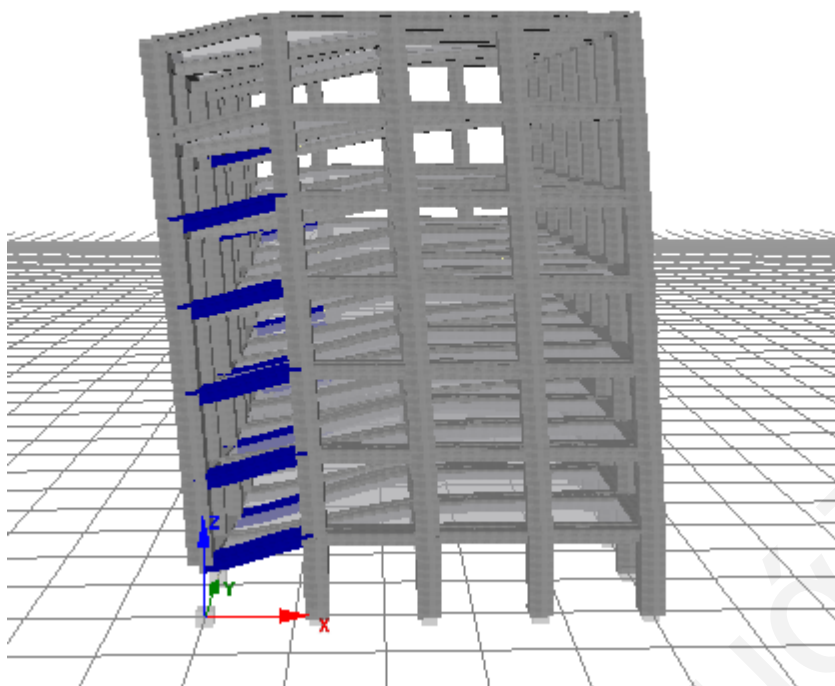
Σχήμα 5.16: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K13 που αφαιρέθηκε. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Γ) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K6, K8, K11, K13, K15, K18, K20

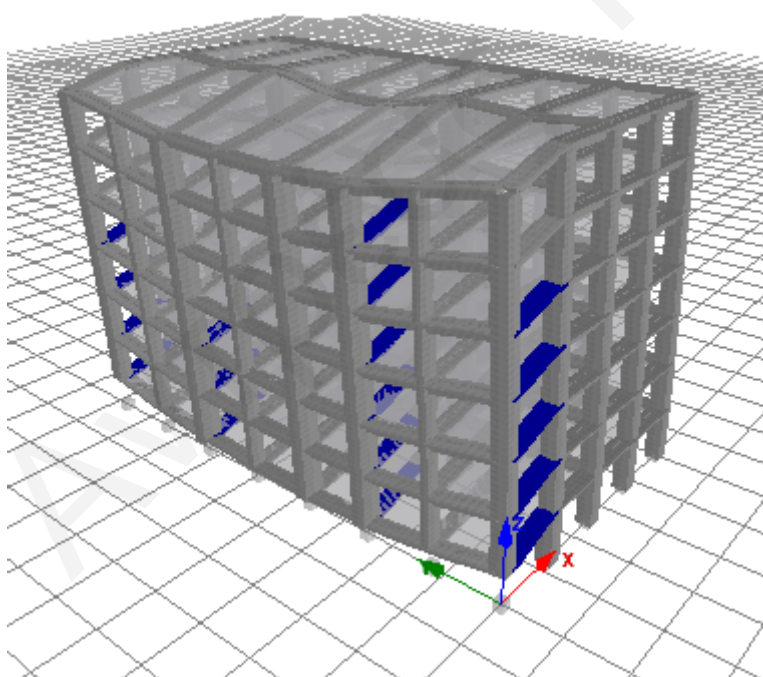
Επιλέγεται η αφαίρεση ακραίας σειράς υποστυλωμάτων του πλαισίου κατά y (σχήμα 5.17) για την πρόκληση ολικής κατάρρευσης προς την μια πλευρά της κατασκευής. Με την αφαίρεση των υποστυλωμάτων, ο φορέας αστοχεί σε φορτίο 8.45% του μόνιμου φορτίου G (σχήμα 5.20) όπου ο κόμβος αναφοράς έχει κατακόρυφη βύθιση ίση με $uz=-0.059m$. Στον παραμορφωμένο φορέα του σχήματος παρατηρούνται αστοχίες των στοιχείων δοκών που συνδέονταν με τα υποστυλώματα που αφαιρέθηκαν και μερική κατάρρευση του φορέα (σχήματα 5.18 και 5.19). Τα υπόλοιπα πλαίσια του φορέα δεν έχουν αστοχήσει καθώς επίσης η αφαίρεση μεγάλου αριθμού στοιχείων έχει και μεγαλύτερο κόστος, επομένως δεν θεωρείται αυτή η βέλτιστη λύση.



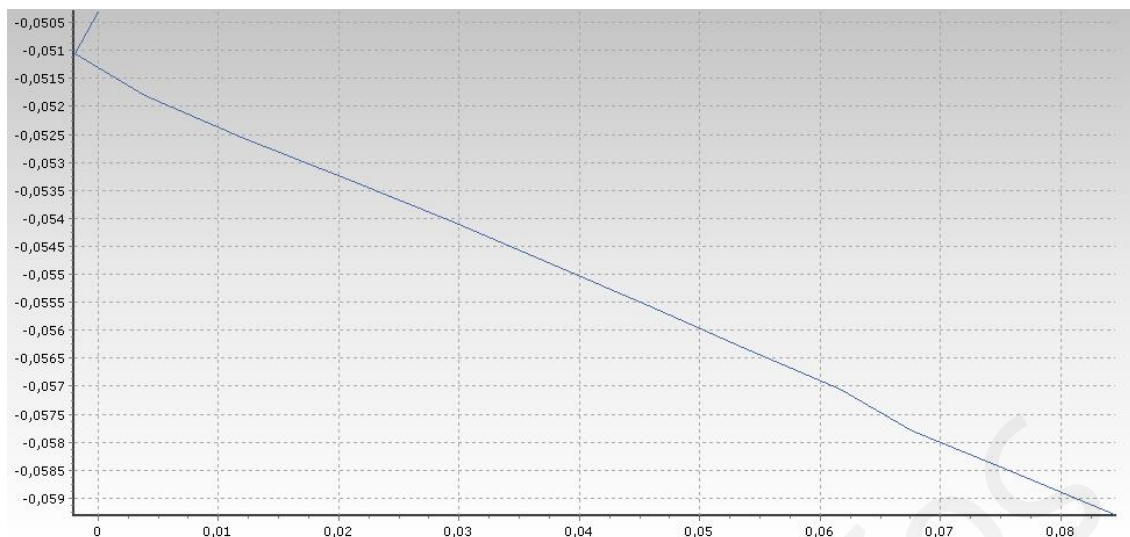
Σχήμα 5.17 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K6, K8, K11, K13, K15, K18 και K20 από το ισόγειο.



Σχήμα 5.18: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K6, K8, K11, K13, K15, K18 και K20



Σχήμα 5.19: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17

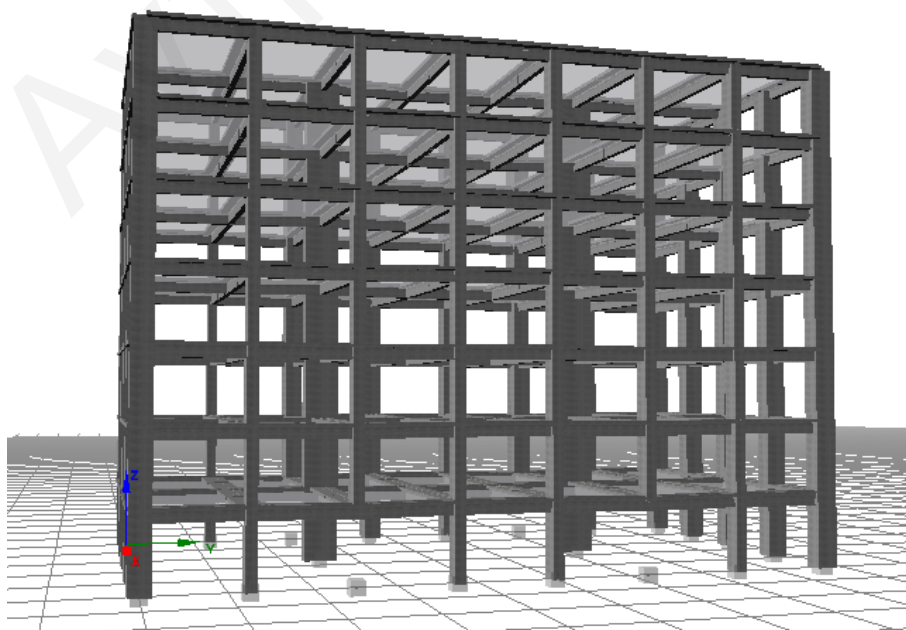


Σχήμα 5.20: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K13 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

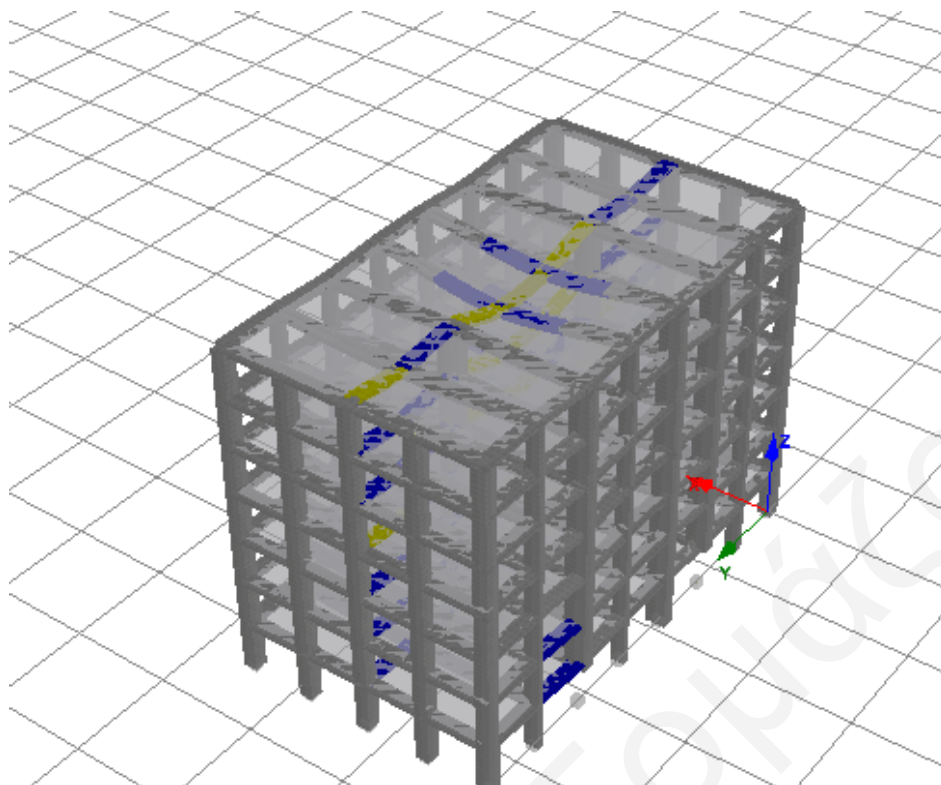
Δ) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17

Αφού είναι πλέον γνωστό ότι με την αφαίρεση των στοιχείων K9 και K16 ο φορέας καταρρέει, επιλέγεται η αφαίρεση των γειτονικών στοιχείων K8 και K10 (δίπλα από το K9) και K15 και K17 (δίπλα από το K16), για την επίτευξη της κατάρρευσης του φορέα στο σενάριο αποδυνάμωσης δύο πλαισίων κατά x

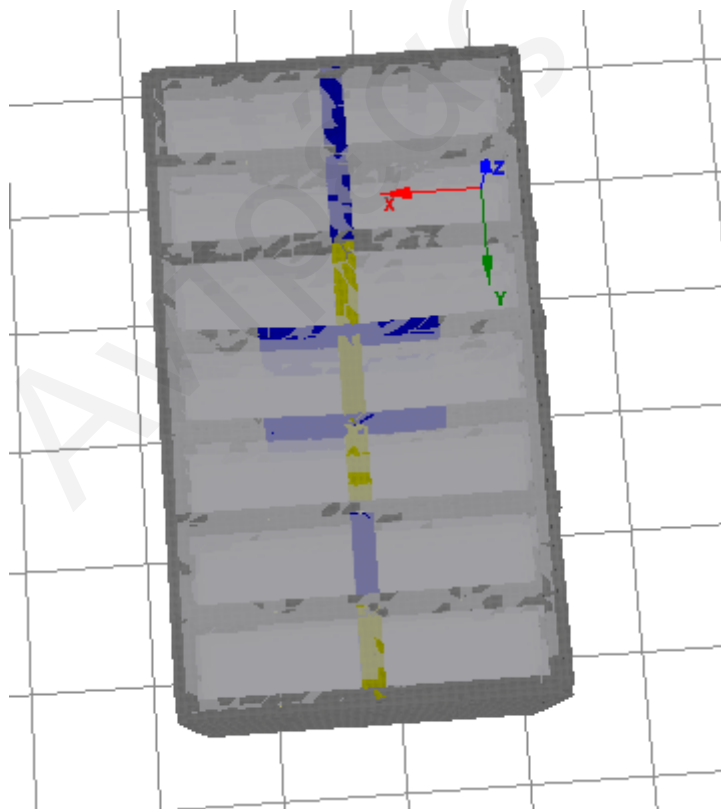
Με την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17 (σχήμα 5.21) παρατηρείται ότι ο φορέας δεν καταρρέει και αντέχει φορτίο 138.97% του μόνιμου φορτίου G (σχήμα 5.24) όπου ο κόμβος πάνω από το υποστύλωμα K15 έχει κατακόρυφη βύθιση ίση με $u_z = -0.07\text{m}$. Στον παραμορφωμένο φορέα του σχήματος παρατηρούνται αστοχίες των εσωτερικών στοιχείων του φορέα (σχήμα 5.22 και 5.23) και δύο δοκών στο περιμετρικό πλαίσιο κατά y.



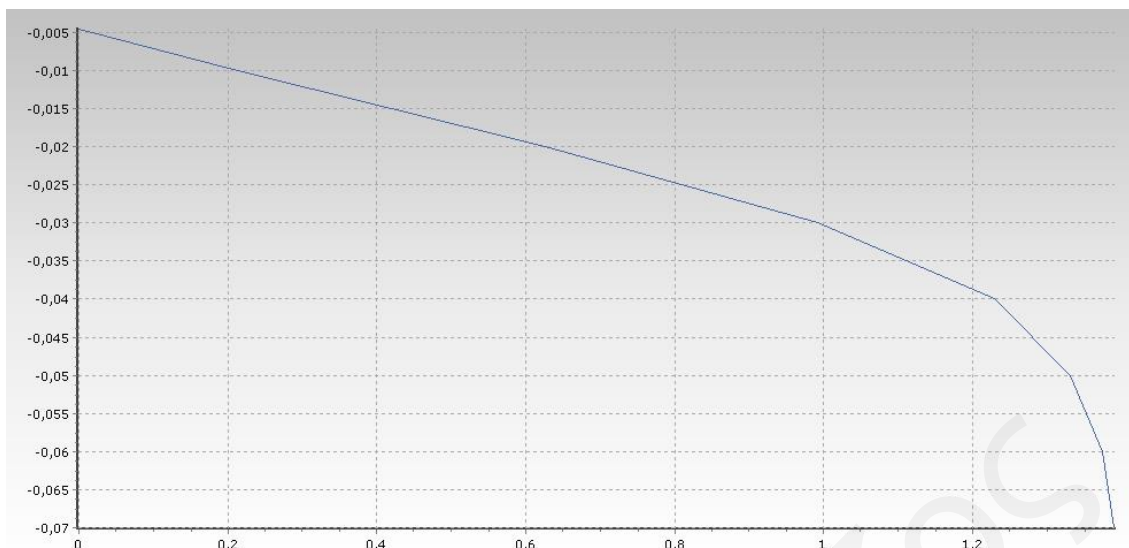
Σχήμα 5.21 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17 από το ισόγειο.



Σχήμα 5.22: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17



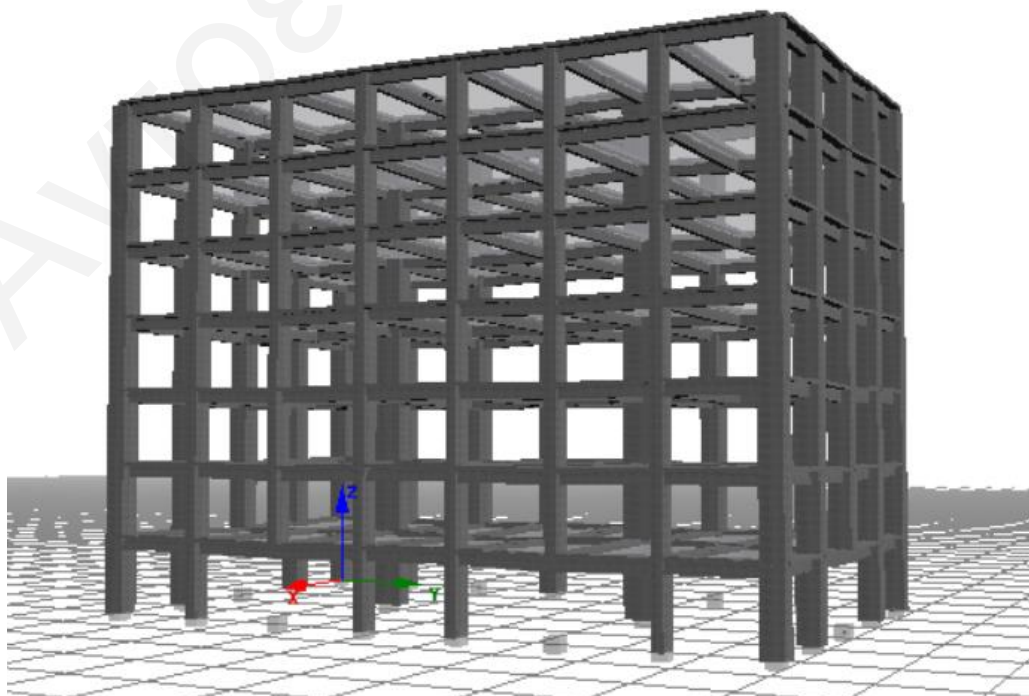
Σχήμα 5.23: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K8, K10, K15 και K17



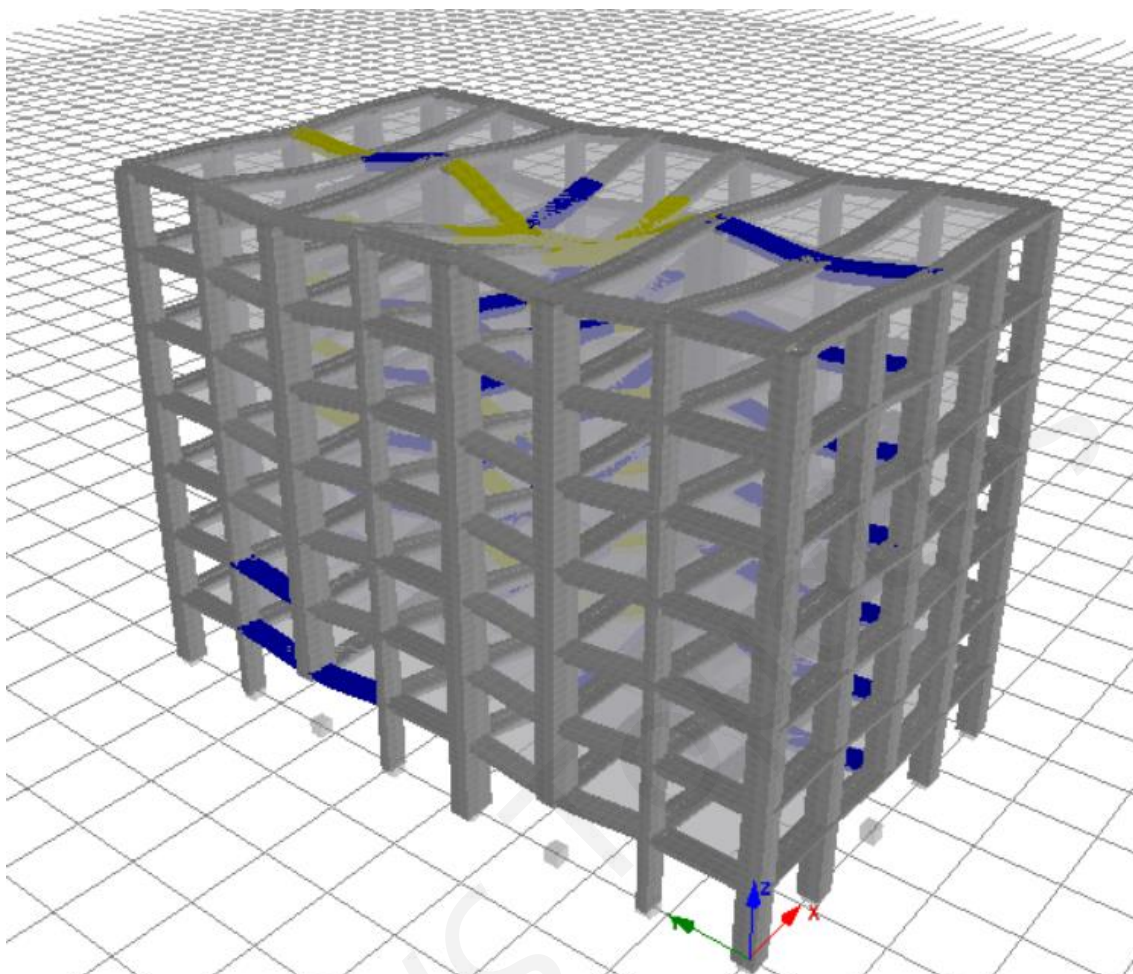
Σχήμα 5.24: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστυλώμα K15 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Ε) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K3, K8, K10, K15, K17 και K22

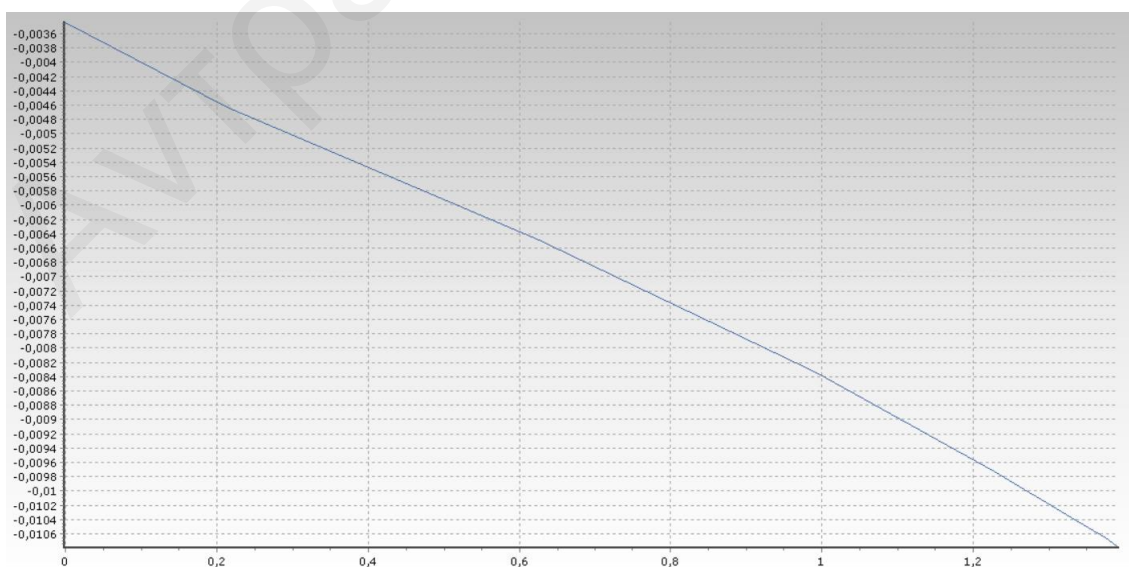
Εν συνεχεία της προηγούμενης ανάλυσης, αφού δεν επήλθε η ολική κατάρρευση του φορέα για φορτίο κάτω του μόνιμου, αφαιρούνται επιπλέον τα υποστυλώματα K3 και K22 (σχήμα 5.25) για διερεύνηση της αποδυνάμωσης δύο πλαισίων κατά x και του εσωτερικού πλαισίου κατά y . Με την αφαίρεση των υποστυλωμάτων, παρατηρείται ότι ο φορέας δεν καταρρέει και αντέχει φορτίο 136,08% του μόνιμου φορτίου G (σχήμα 5.27) δηλαδή ελάχιστα μικρότερο από την προηγούμενη ανάλυση. Στον παραμορφωμένο φορέα του σχήματος παρατηρούνται παρόμοιες αστοχίες με πριν στα εσωτερικών στοιχείων του φορέα (σχήμα 5.26) και τριών δοκών στο περιμετρικό πλαίσιο κατά y .



Σχήμα 5.25 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K3, K8, K10, K15, K17 και K22 από το ισόγειο.



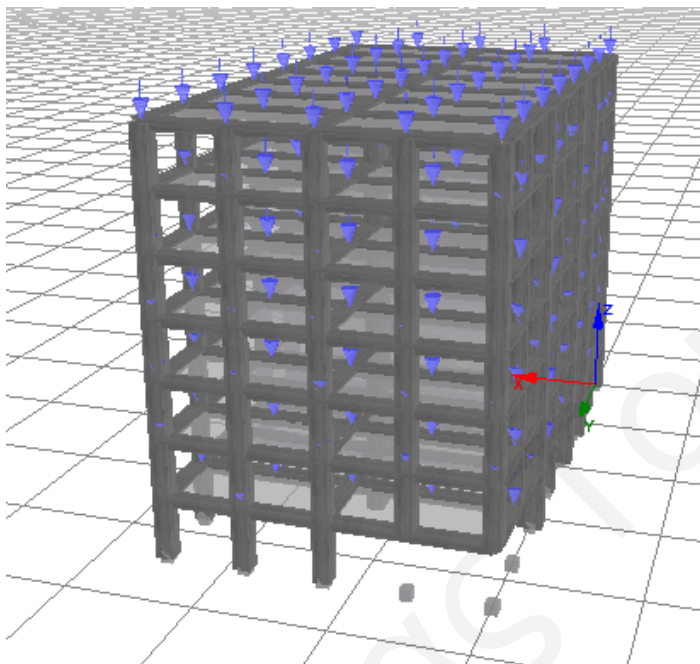
Σχήμα 5.26: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K3, K8, K10, K15, K17 και K22



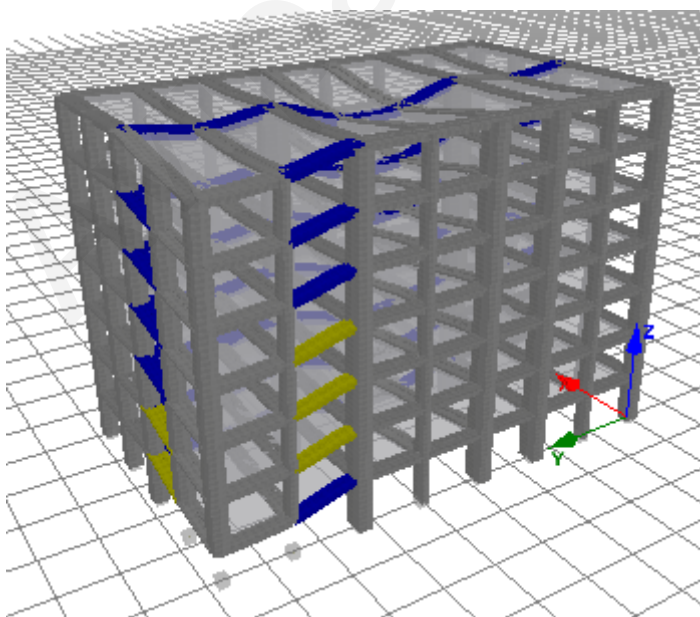
Σχήμα 5.27: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K3 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Z) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K2, K6

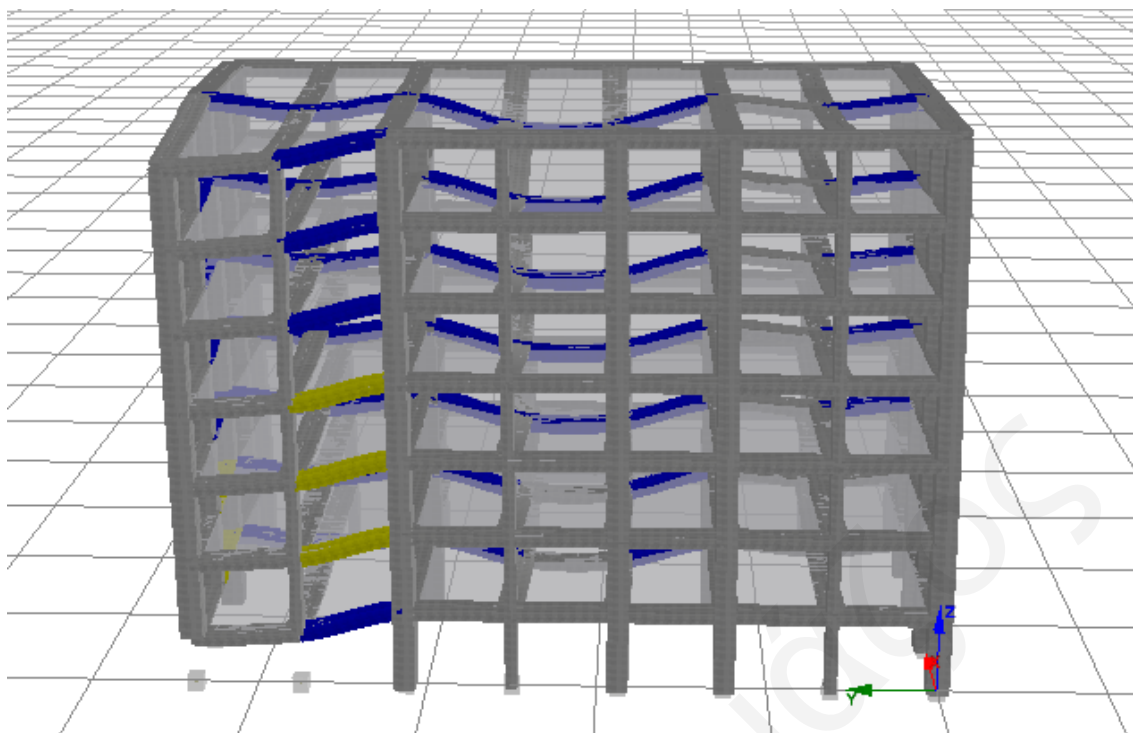
Επιλέγεται η αφαίρεση του γωνιακού υποστυλώματος K1 και των γειτονικών του K2 και K6 (σχήμα 5.28) για την πρόκληση προοδευτικής κατάρρευσης στο άκρο της κατασκευής. Με την αφαίρεση των υποστυλωμάτων ο φορέας αντέχει 121.12% του μόνιμου φορτίου G (σχήμα 5.31). Στον παραμορφωμένο φορέα του σχήματος παρατηρούνται αστοχίες δοκών της κεντρικής δοκοσειράς και των περιμετρικών δοκών οι οποίες συνδέονταν με τα υποστυλώματα που αφαιρέθηκαν (σχήματα 5.29 και 5.30). Παράλληλα, φαίνεται ότι προκαλείται μόνο μερική κατάρρευση του φορέα προς το άκρο όπου αφαιρέθηκαν τα τρία υποστυλώματα.



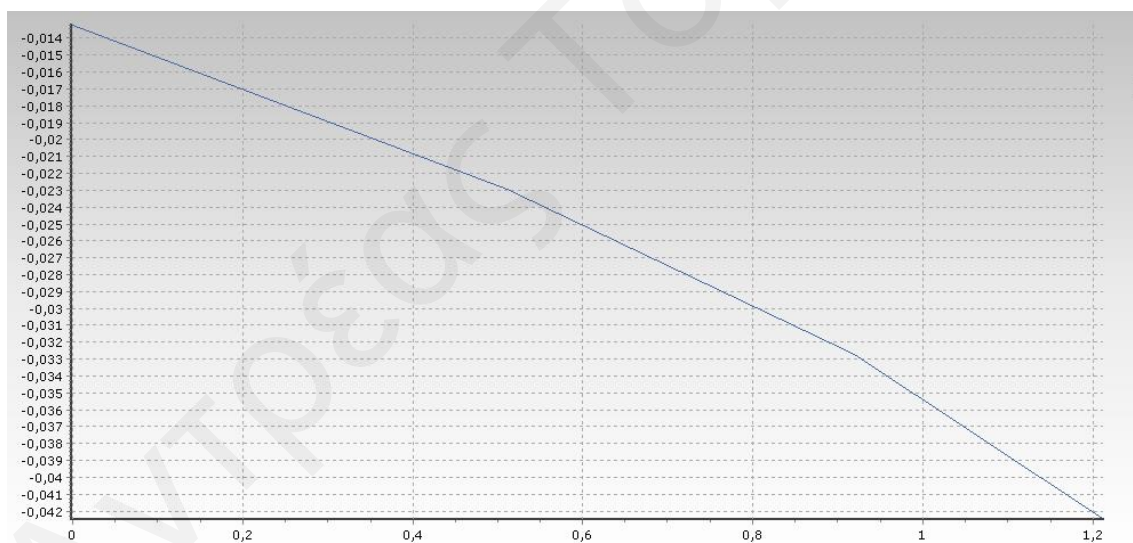
Σχήμα 5.28 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6 από το ισόγειο.



Σχήμα 5.29: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6



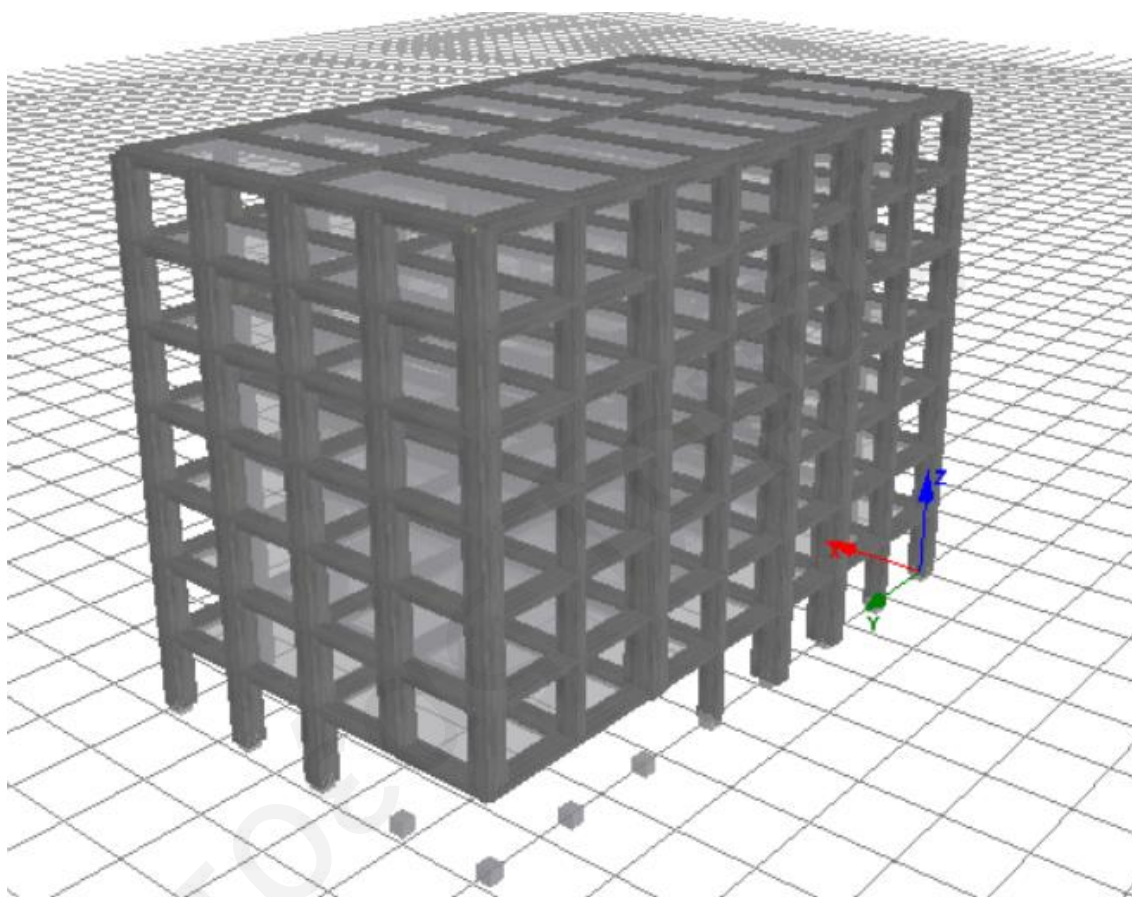
Σχήμα 5.30: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6



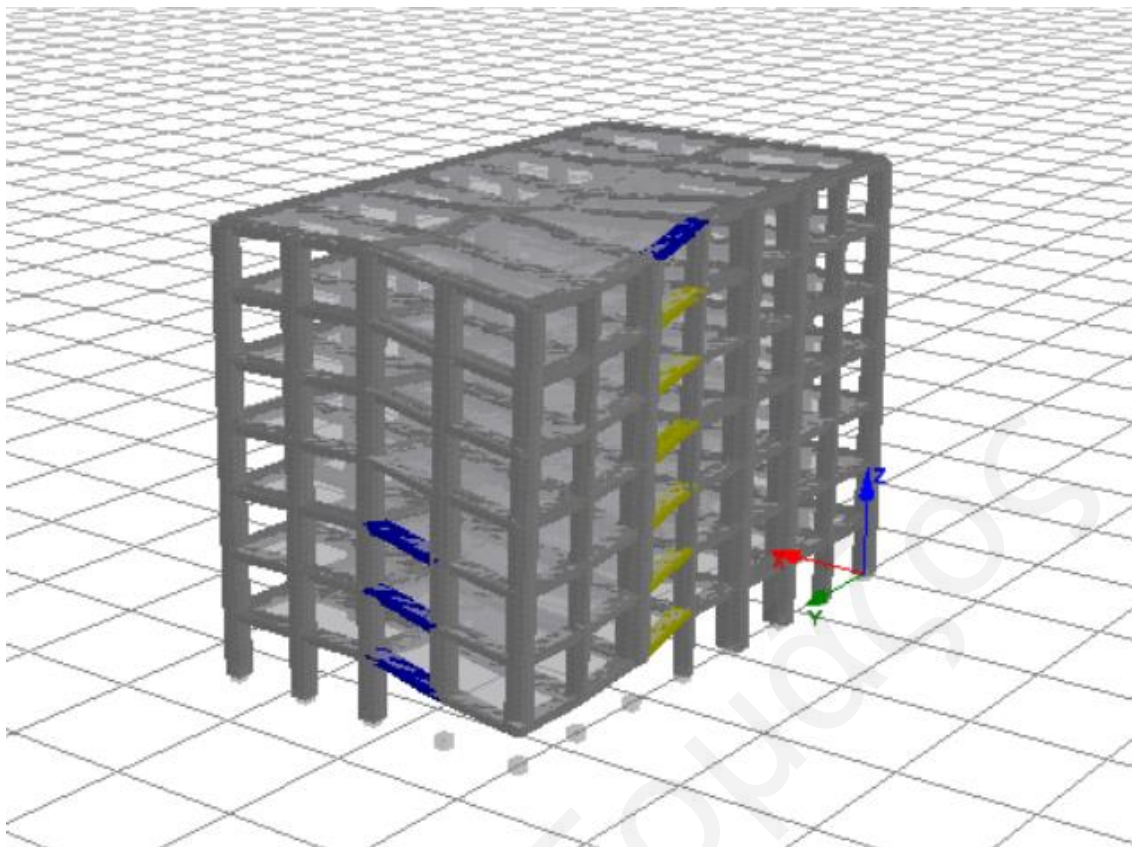
Σχήμα 5.31: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K1 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Η) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K2, K6 και K8

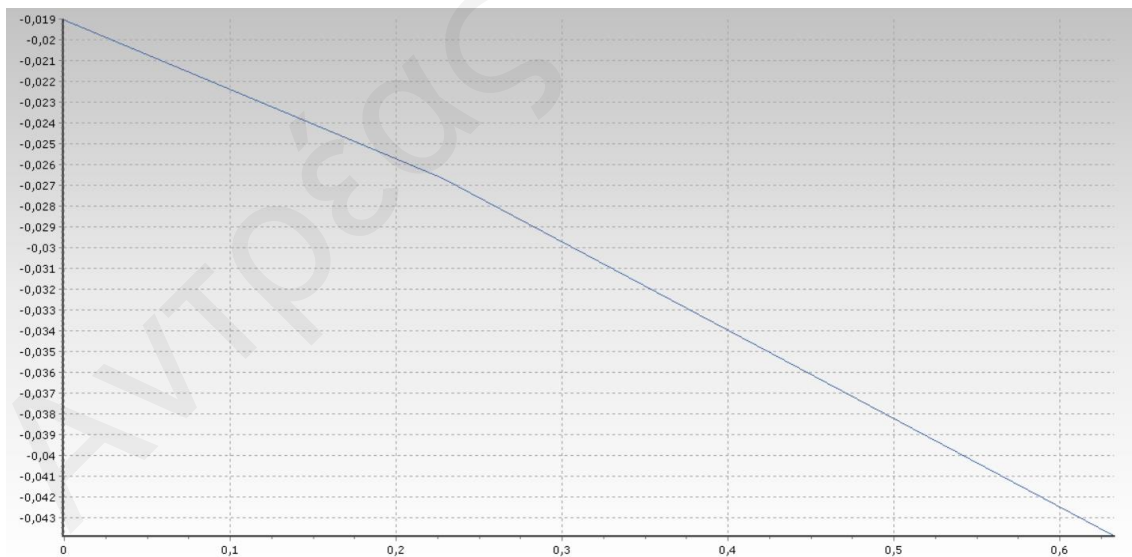
Εν συνεχεία της αφαίρεσης των υποστυλωμάτων K1, K2 και K6 αφού δεν επιτεύχθηκε η ολική κατάρρευση του φορέα, επιλέγεται η αφαίρεση του γειτονικού υποστυλώματος K8 (σχήμα 5.32). Στον παραμορφωμένο φορέα (σχήμα 5.33) η κατάρρευση είναι μερική και σχηματίζεται προς την γωνία όπου αφαιρέθηκε η ομάδα υποστυλωμάτων K1,K2,K6 και K8. Ο φορτιστικός συντελεστής βρίσκεται στο 63.24% των μόνιμων φορτίων (σχήμα 5.34).



Σχήμα 5.32 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6 και K8 από το ισόγειο.



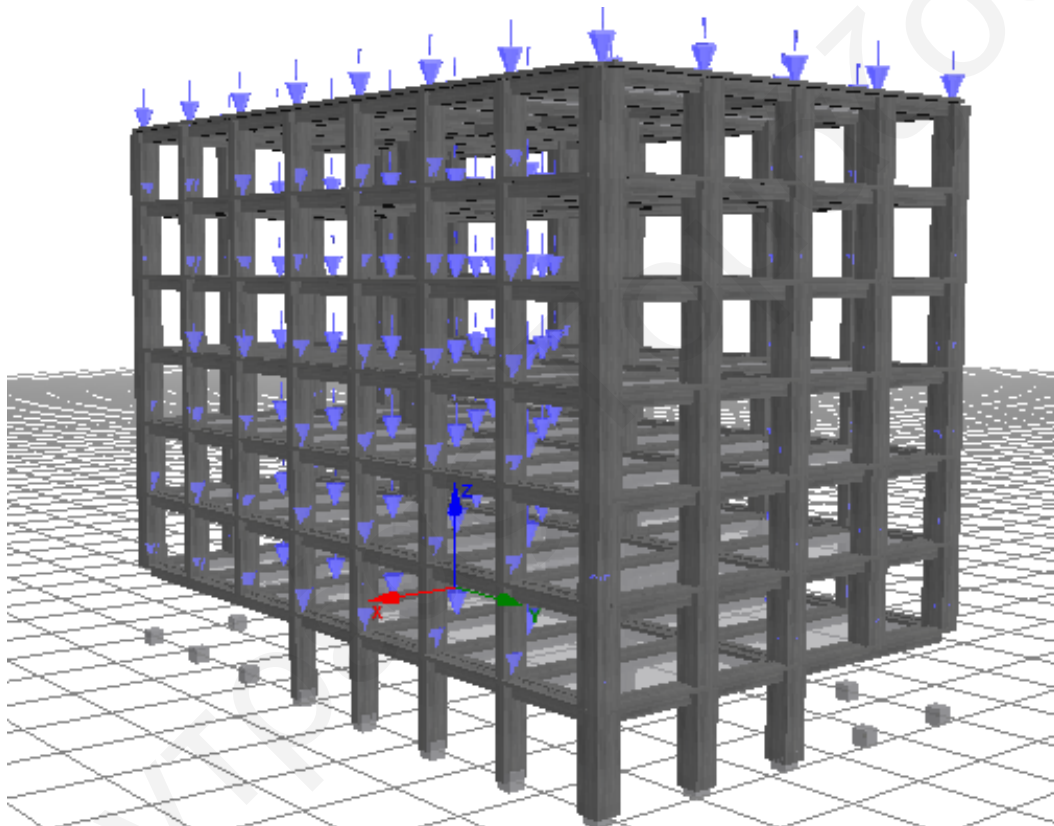
Σχήμα 5.33: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8



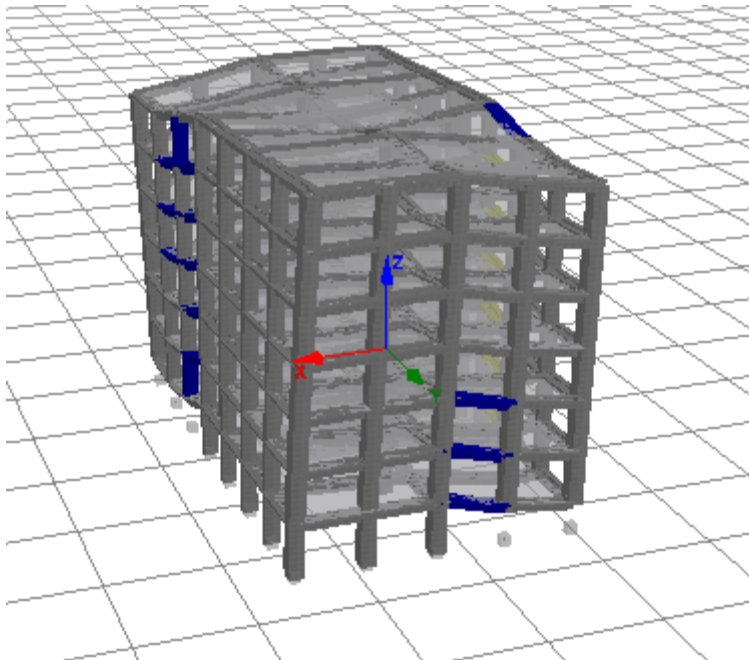
Σχήμα 5.34: Διάγραμμα μετακινήσεων και φοριστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστύλωμα K1 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φοριστικός συντελεστής.

Θ) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24

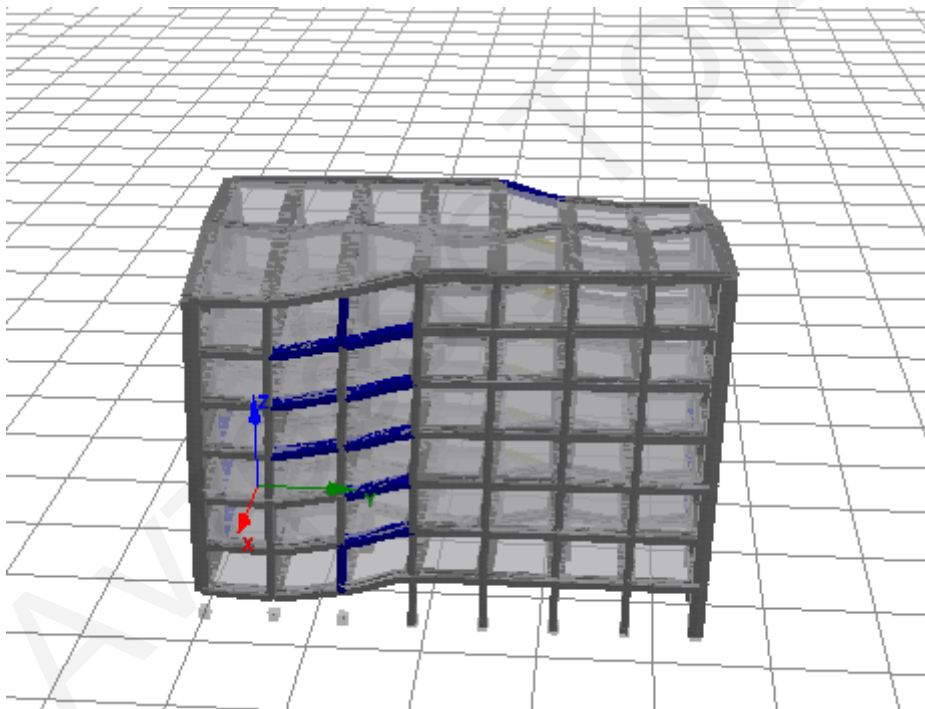
Μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, έγινε η αφαίρεση των K8, K17, K19, K23 και K24 (σχήμα 5.35) με την λογική αφαίρεσης στοιχείων γύρω από μια νοητή διαγώνιο της κατασκευής. Σε αυτή την ανάλυση, το κτήριο καταρρέει σε φορτίο 60.52% του μόνιμου φορτίου G (σχήμα 5.38) όπου ο κόμβος αναφοράς έχει κατακόρυφη βύθιση ίση με $uz=-0.02m$. Στον παραμορφωμένο φορέα (σχήματα 5.36 και 5.37) παρατηρούνται αστοχίες μεγάλο αριθμό περιμετρικών στοιχείων οι οποίες δείχνουν μια εικόνα ολικής κατάρρευσης της κατασκευής. Η περίπτωση αυτή θεωρείται η βέλτιστη όπου επιβάλλεται η αφαίρεση εξωτερικών υποστυλωμάτων. Βέβαια αφαιρούνται 8 υποστυλώματα δηλαδή 4 φορές περισσότερα από την περίπτωση Γ όπου αφαιρέθηκαν μόνο δύο εσωτερικά υποστυλώματα (σχήμα 5.42)



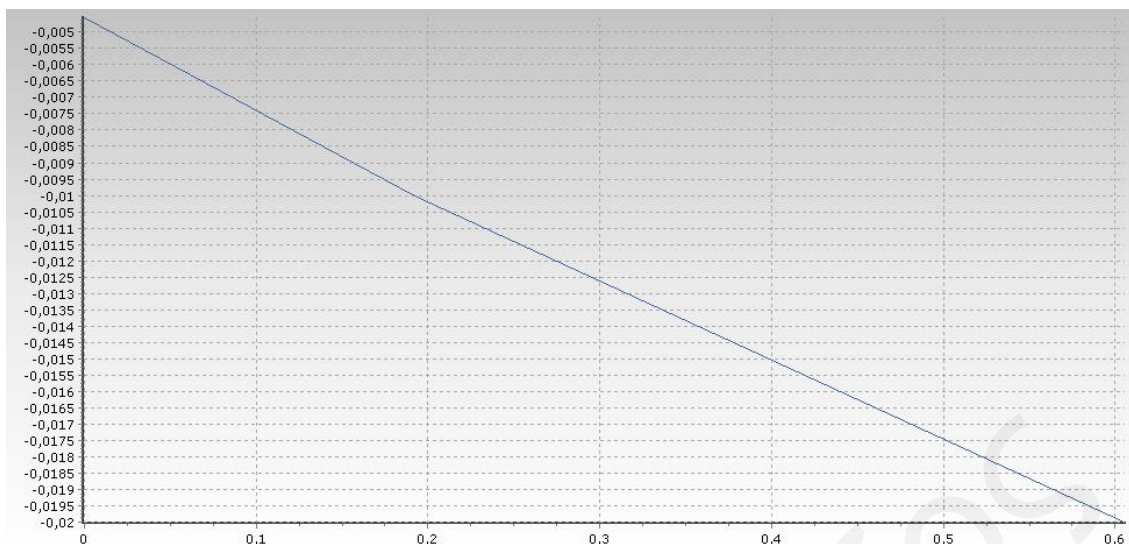
Σχήμα 5.35 Αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24 από το ισόγειο.



Σχήμα 5.36: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24



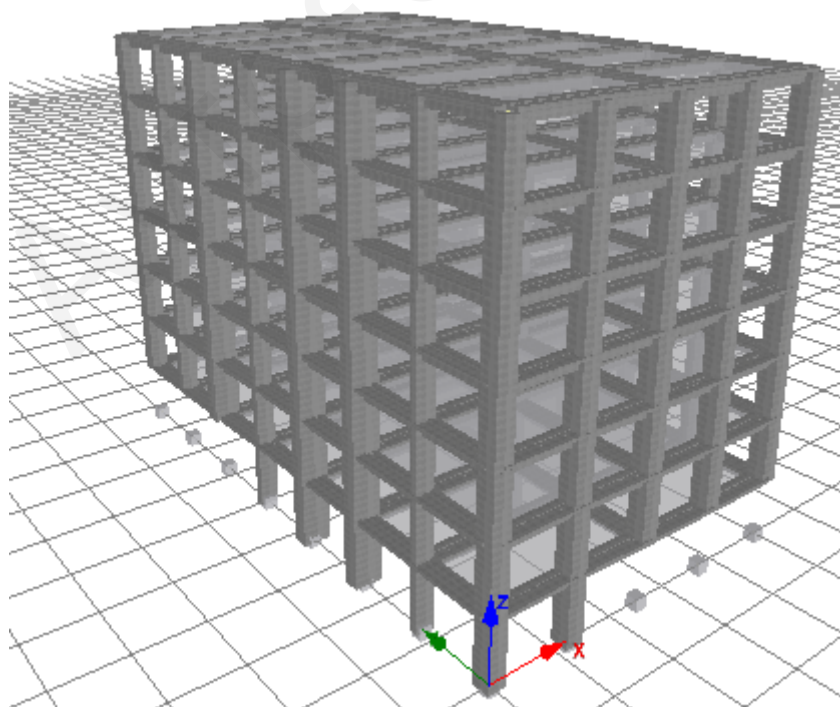
Σχήμα 5.37: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24



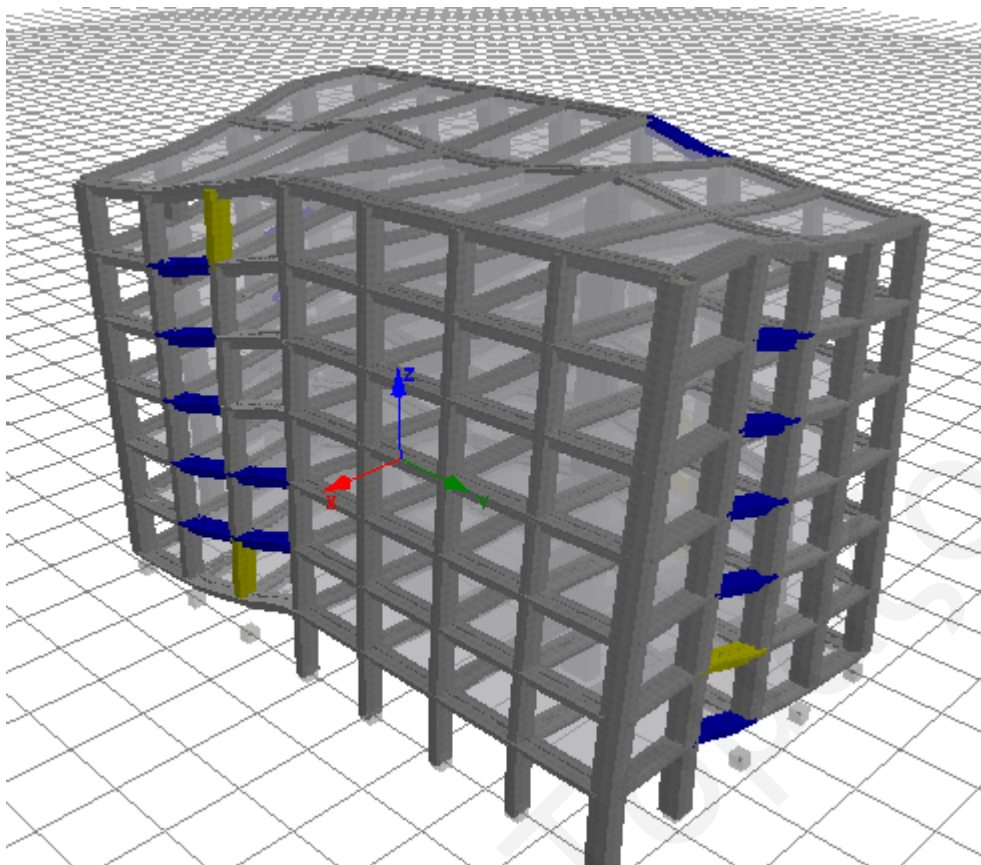
Σχήμα 5.38: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστυλώμα που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Ι) Αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23, K24

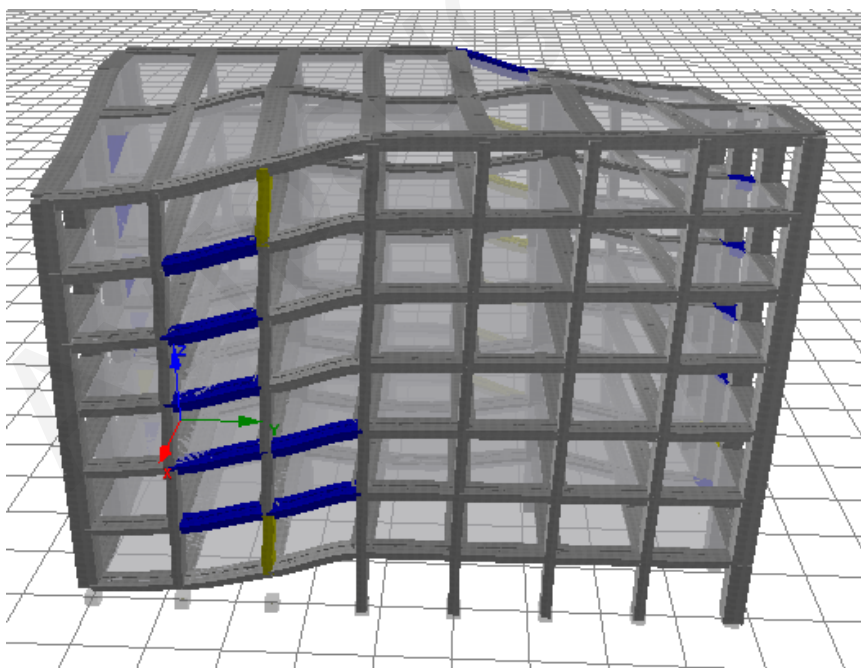
Με την ανάλυση Θ (αφαίρεση υποστυλωμάτων K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24) η κατάρρευση ήταν μερική και έτσι επιλέγεται η επιπρόσθετη αφαίρεση των δύο ακραίων υποστυλωμάτων του εσωτερικού πλαισίου κατά y (Σχήμα 5.39). Παρατηρούνται πλέον απώλειες σημαντικού αριθμού στοιχείων (Σχήμα 3.40 και σχήμα 3.41) και ο φορτιστικός συντελεστής είναι 0.2917, (Σχήμα 3.42) επομένως ο φορέας έχει οδηγηθεί σε ολική κατάρρευση για φορτίο μικρότερο του G .



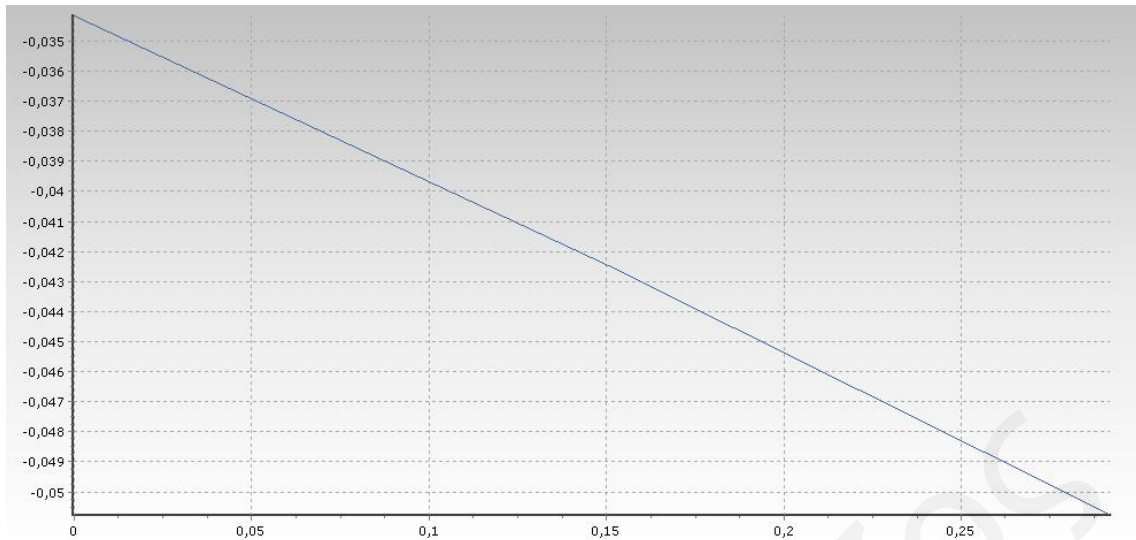
Σχήμα 5.39: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23 και K24



Σχήμα 5.40: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23 και K24



Σχήμα 5.41: Παραμορφωμένος φορέας μετά την αφαίρεση των υποστυλωμάτων K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23 και K24



Σχήμα 5.42: Διάγραμμα μετακινήσεων και φορτιστικού συντελεστή του κόμβου πάνω από το υποστυλώμα K1 που αφαιρέθηκε. Η αστοχία είναι σε άλλη περιοχή και υπάρχει κόμβος με μεγαλύτερη βύθιση. Κατακόρυφος άξονας: βύθιση u_z (m) στον κόμβο αναφοράς, οριζόντιος άξονας: φορτιστικός συντελεστής.

Αποτελέσματα αναλύσεων προοδευτικής κατάρρευσης

Από το σύνολο των αναλύσεων προοδευτικής κατάρρευσης δύο περιπτώσεις ξεχωρίζουν για την ολική κατάρρευση του φορέα. Η μία είναι η περίπτωση Γ όπου αφαιρούνται τα εσωτερικά υποστυλώματα K9 και K16 όπου αστοχεί μεγάλος αριθμός εσωτερικών στοιχείων με την επιβολή φορτίου ίσου με 0.7347G. Συνεχίζοντας η δεύτερη περίπτωση, είναι η περίπτωση I όπου με την αφαίρεση περιμετρικών υποστυλωμάτων από τις δύο γωνίες της κάτοψης και τον σχηματισμό μιας νοητής διαγώνιου επιτυγχάνεται η αστοχία στοιχείων που οδηγεί στην ολική κατάρρευση με την επιβολή φορτίου 0.2856G. Ακολουθεί και συγκεντρωτικός πίνακας με όλες τις σημαντικότερες αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν (σχήμα 5.43).

Σενάρια προοδευτικής κατάρρευσης			
<u>Καθαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων</u>			
A/A	Υποστυλώματα που αφαιρέθηκαν	Φοριστικός συντελεστής α	Παρατηρήσεις
A	K9	81.95 %	Αστοχία εσωτερικών δοκών που συνδέονταν με το υποστύλωμα K9. Μερική αστοχία κατασκευής.
B	K16	82.50 %	Αστοχία εσωτερικών δοκών που συνδέονταν με το υποστύλωμα K16. Μερική αστοχία κατασκευής.
Γ	K9, K16	73.47 %	Αστοχία πάνω από τα δύο τρίτα των εσωτερικών δοκών. Ολική αστοχία κατασκευής.
<u>Καθαίρεση εσωτερικών υποστυλωμάτων</u>			
A	K13	119,80 %	Αστοχία μικρού αριθμού δοκών κοντά στο υποστύλωμα K13. Μερική αστοχία κατασκευής.
B	K1, K8, K13, K15, K20	119.4 %	Αστοχία δοκών κεντρικού και περιμετρικού πλαισίου. Μερική αστοχία κατασκευής.

Γ	K1, K6, K8, K11, K13, K15, K18, K20	8,45 %	Αφαίρεση 1 ^{ης} σειράς υποστυλωμάτων πλαισίου γ. Μεγάλος αριθμός υποστυλωμάτων που αφαιρούνται. Αστοχία των δοκών που στηρίζονταν στα υποστυλώματα που αφαιρέθηκαν. Μερική αστοχία κατασκευής.
Δ	K8, K10, K15, K17	138.97 %	Αστοχία κεντρικής δοκοσειράς και ορισμένων περιμετρικών δοκών. Μερική κατάρρευση έχοντας ξεπεράσει όμως τα μόνιμα φορτία G κατά 39%.
Ε	K3, K8, K10, K15, K17 και K22	136,08%	Παρόμοιες αστοχίες με περίπτωση Ε στα εσωτερικά στοιχεία του φορέα και τριών δοκών στο περιμετρικό πλαίσιο κατά γ.
Ζ	K1, K2, K6	121.12%	Αστοχία κεντρικής δοκοσειράς και ορισμένων περιμετρικών δοκών. Μερική κατάρρευση έχοντας ξεπεράσει όμως τα μόνιμα φορτία G κατά 21%.
Η	K1, K2, K6, K8	63.24%	Η κατάρρευση είναι μερική και σχηματίζεται προς τη γωνία όπου αφαιρέθηκε η ομάδα υποστυλωμάτων K1,K2,K6 και K8
Θ	K1, K2, K6, K8, K17, K19, K23 και K24	60.52%	Αστοχία εσωτερικών δοκών, με σημαντικό αριθμό στοιχείων να μην έχουν αστοχήσει. Μερική αστοχία κατασκευής. Χρειάζεται επιπρόσθετη αφαίρεση μικρού αριθμού υποστυλωμάτων για επίτευξη ολικής κατάρρευσης.
Ι	K1, K2, K3, K6, K8, K17, K19, K22, K23, K24	29.17%	Ολική κατάρρευση κατασκευής μετά την επιπρόσθετη αφαίρεση των υποστυλωμάτων K3 και K22 (σε σχέση με την περίπτωση Θ).

Σχήμα 5.43: Συγκεντρωτικός πίνακας με σενάρια προοδευτικής κατάρρευσης

Κεφάλαιο 6

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

6.1 Συμπεράσματα

Η κατάσταση της προοδευτικής κατάρρευσης είναι μια ειδική περίπτωση που διερευνάται συνήθως σε περιπτώσεις όπου ο φορέας είναι υψηλής σημασίας όπως σε κυβερνητικά κτήρια και πρεσβείες αλλά και σε περιπτώσεις κατεδάφισης κτηρίων. Η κατασκευή που αναλύθηκε είχε σχεδιαστεί με παλαιό κανονισμό, όμως με στοιχεία αντισεισμικού σχεδιασμού. Μέσα και από τις αναλύσεις “pushover”, είναι προφανές ότι η συμπεριφορά του έναντι σεισμού είναι σχετικά καλή. Παρόλα αυτά στην περίπτωση της εσκεμμένης φθοράς μικρού αριθμού στοιχείων ο φορέας δεν έχει καθόλου καλή συμπεριφορά. Δηλαδή με την αφαίρεση ενός ή δύο κεντρικών υποστυλωμάτων, παρουσιάζεται τουλάχιστον μερική αν όχι ολική κατάρρευση της κατασκευής, αφού τα δύο τρίτα των στοιχείων αστοχούν. Επομένως η κατάσταση του φορέα εξαρτάται άμεσα από την κατάσταση που βρίσκονται τα δύο κεντρικά υποστυλώματα τα οποία θεωρούνται τα πιο “κρίσιμα” στοιχεία του φορέα (key elements) από την οπτική της προοδευτικής κατάρρευσης.

Με λίγα λόγια, διαπιστώνεται ότι ένας φορέας έστω και αν έχει καλή συμπεριφορά έναντι σεισμού μπορεί να είναι επιρρεπής σε μεγάλο αριθμό αστοχιών, αν έχει μικρό αριθμό “κρίσιμων” στοιχείων, των οποίων η φθορά προκαλεί την προοδευτική κατάρρευση μεγάλου μέρους ή ολόκληρης της κατασκευής.

Στον συγκεκριμένο φορέα η αφαίρεση των κεντρικών υποστυλωμάτων θα ήταν η βέλτιστη λύση για την κατάρρευση ολόκληρου του φορέα. Παρ’ όλα αυτά, η αφαίρεση των κεντρικών υποστυλωμάτων είναι στην πράξη, μη εφικτή λύση διότι δεν μπορεί να γίνει χρήση εκρηκτικών στην Κύπρο και δεν μπορεί να εισέλθει μηχάνημα για να τα αφαιρέσει χωρίς να γίνει η κατάρρευση με το μηχάνημα εντός του κτηρίου. Στην περίπτωση που δεν υπήρχαν γειτονικά κτήρια, θα γινόταν αφαίρεση των περιμετρικών υποστυλωμάτων του ισογείου με μηχανικά μέσα μέχρι την κατάρρευση της κατασκευής. Αντιθέτως, στην περίπτωση αυτή, που υπάρχουν γειτονικά κτήρια και δρόμος μεγάλης κυκλοφορίας, επιλέγεται η ανύψωση μηχανημάτων και η κατεδάφιση του κτηρίου από πάνω προς τα κάτω.

Υπάρχουν λοιπόν πολλοί παράγοντες οι οποίοι είναι περιοριστικοί, όπως οι απαραίτητες άδειες, οι εκάστοτε κανονισμοί, τα υλικά κατασκευής, τα διαθέσιμα μηχανήματα, ο χώρος που βρίσκεται η κατασκευή προς κατεδάφιση (αν έχει γειτονικά κτήρια ή όχι), οι οποίοι επηρεάζουν άμεσα τον τρόπο κατεδάφισης και επομένως το κόστος και την διάρκεια των εργασιών κατεδάφισης.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Στις αναλύσεις που παρουσιάστηκαν, δεν είχε ληφθεί υπόψιν η επιρροή της εφελκυστικής αντοχής των δοκών και των πλακών, η οποία δύναται να επηρεάσει σημαντικά την προοδευτική κατάρρευση του φορέα, αν και εφόσον λειτουργήσουν τα στοιχεία αυτά σε εφελκυσμό. Για παράδειγμα στην περίπτωση αφαίρεσης ακραίου υποστυλώματος, η πλάκα μπορεί να γίνει πρόβολος και αντί σε θλίψη να λειτουργεί σε εφελκυσμό. Αυτό βέβαια επιτυγχάνεται με την καλή αγκύρωση των οπλισμών σε γειτονικά στοιχεία με επαρκή μήκη αγκύρωσης, γεγονός σπάνιο σε κατασκευές μεγάλης ηλικίας που δύναται να κατεδαφιστούν.

Θα ήταν επομένως ενδιαφέρον, για μελλοντική έρευνα, να αναλυθεί ο συγκεκριμένος φορέας, λαμβάνοντας υπόψιν την επιρροή της λειτουργίας των πλακών και δοκών σε εφελκυσμό κατά την προοδευτική κατάρρευση και να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Είναι γεγονός ότι έστω και με την εικόνα του παραμορφωμένου φορέα, δεν είναι δυνατή η ικανοποιητική αποτύπωση της συμπεριφοράς της κατασκευής κατά την ολική κατάρρευση. Μεγάλο ενδιαφέρον θα είχε να γίνουν αναλύσεις με εξειδικευμένο λογισμικό ανάλυσης που να μπορέσει να παρακολουθήσει ξεχωριστά τη λειτουργία του κάθε στοιχείου του φέροντα οργανισμού μετά την αστοχία. Έτσι γίνεται να γνωρίζει κανείς την κίνηση του στοιχείου, ποια γειτονικά στοιχεία επηρεάζονται και επομένως την περιοχή επιρροής για την οριοθέτηση ακτίνας ασφαλείας γύρω από την προς κατεδάφιση κατασκευή.

Βιβλιογραφία

- [1] E Brunesi, F Parisi, Progressive collapse fragility models of European reinforced concrete framed buildings based on pushdown analysis, *Engineering Structures*, Volume 152, Pages 579-596, 2017.
- [2] Νομικού 2011, 17ο Φοιτητικό Συνέδριο: Επισκευές Κατασκευών- Ελεγχόμενη Κατεδάφιση με χρήση εκρηκτικών Ιωάννα.
- [3] Ευρωκώδικας 2 EN1991-1-1:2002- κυπριακό εθνικό προσάρτημα.
- [4] Ευρωκώδικας 8 EN 1998-3: A.3.2.2 Οριακή Κατάσταση Οιονεί Κατάρρευσης (NC).
- [5] Φωτογραφικό υλικό από εργασίες της εταιρείας Φ.Χ.Κ. ΥΠΕΡΟΙΚΟΔΟΜΙΚΗ ΛΤΔ.
- [6] Seismosoft Earthquake Engineering Solutions, 2020 Λογισμικό ανάλυσης Seismotrust.
- [7] AutoDesk AutoCad, 2018: Λογισμικό σχεδίασης.
- [8] Αρχείο μελέτης κτηρίου - Δέσποινα Π. Χατζημάρκου, 1987

Παραρτήματα

Παράρτημα Α – Παραδείγματα μεθόδων κατεδάφισης με την χρήση μηχανικών μέσων

Α) Χρήση υδραυλικής σιαγόνας για την σύνθλιψη σκυροδέματος. [5]



Β) Χρήση υδραυλικού ψαλιδιού για το κόψιμο και συλλογή του οπλισμού [5]



Γ) Χρήση υδραυλικής σφύρας ψαλιδιού για επιβολή κρουστικού φορτίου για την σύνθλιψη σκυροδέματος [5]



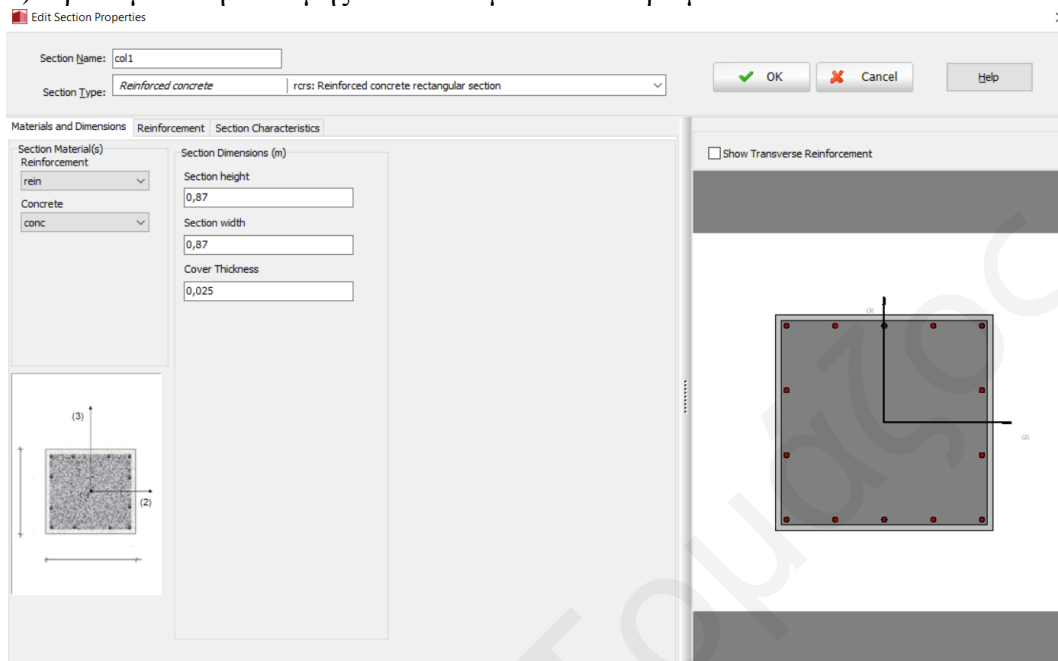
Δ) Χρήση καλωδίου για την αφαίρεση υποστυλώματος



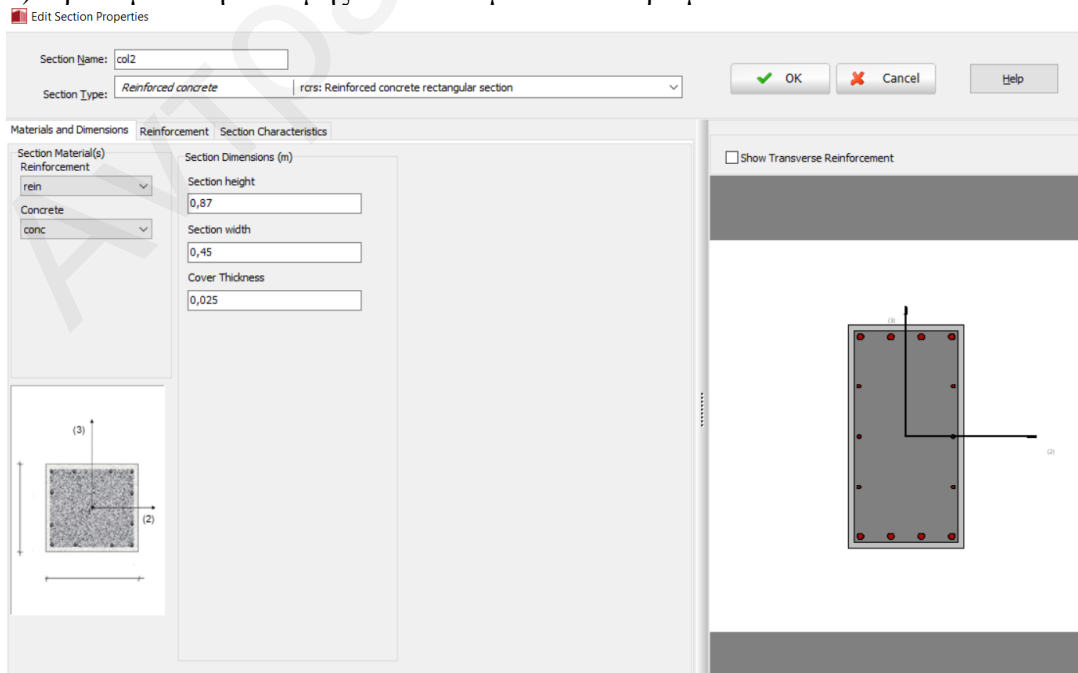
Πηγή: 2020, <https://jimsadventure2012.wordpress.com/2013/03/02/the-last-vertical-brick-wall-falls>

Παράρτημα Β – Προσομοίωση διατομών στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct

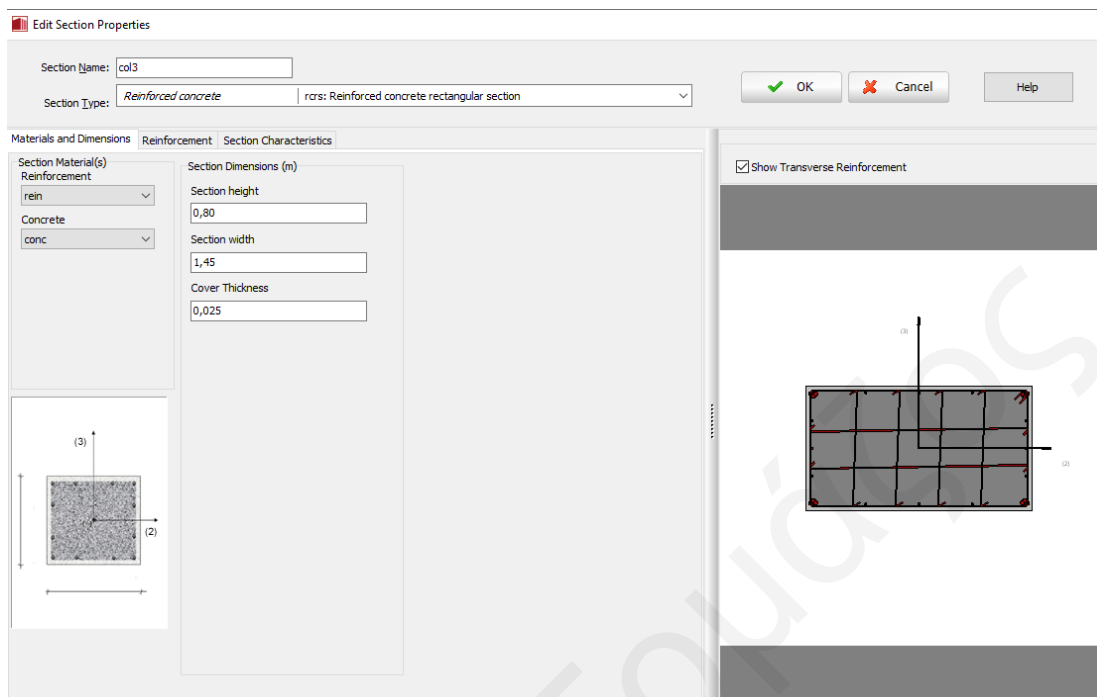
1) Προσομοίωση διατομής υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 1



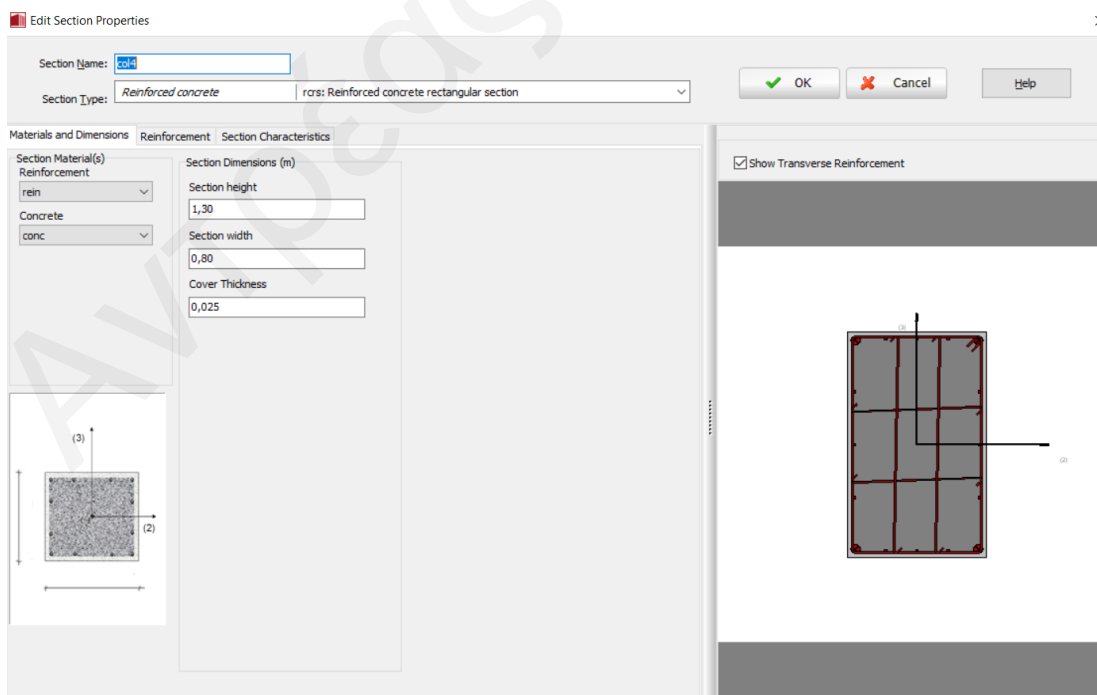
2) Προσομοίωση διατομής υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 2



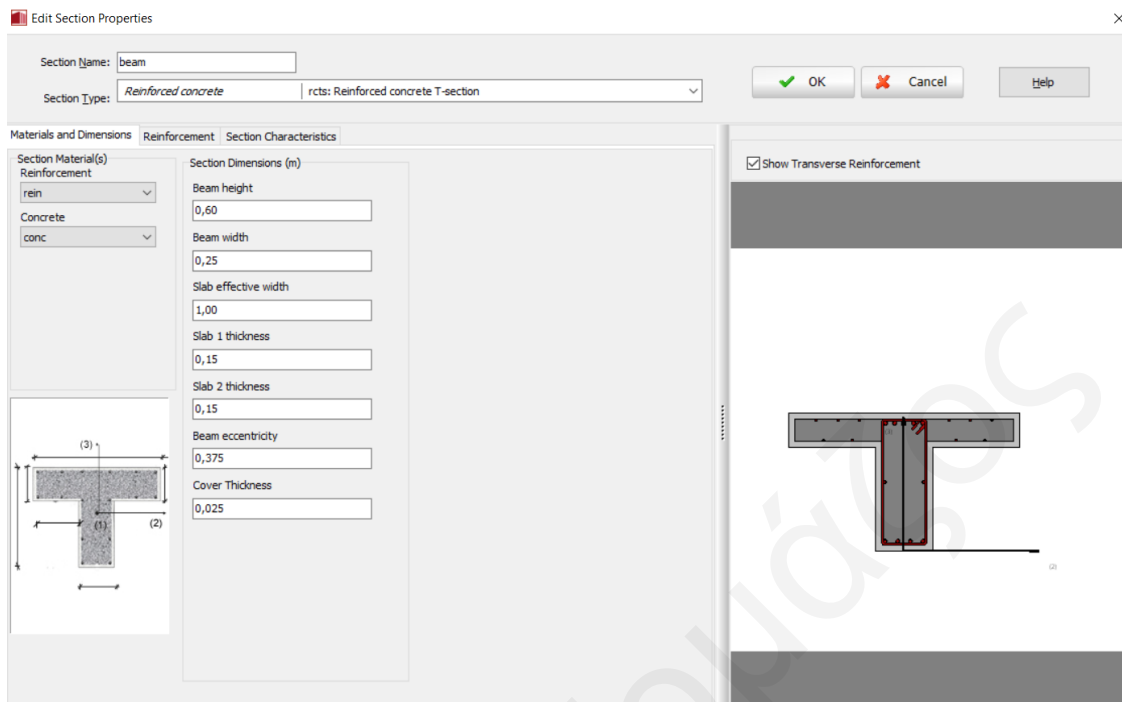
3) Προσομοίωση διατομής υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 3



Δ) Προσομοίωση διατομής υποστυλωμάτων υπ' αριθμόν 4

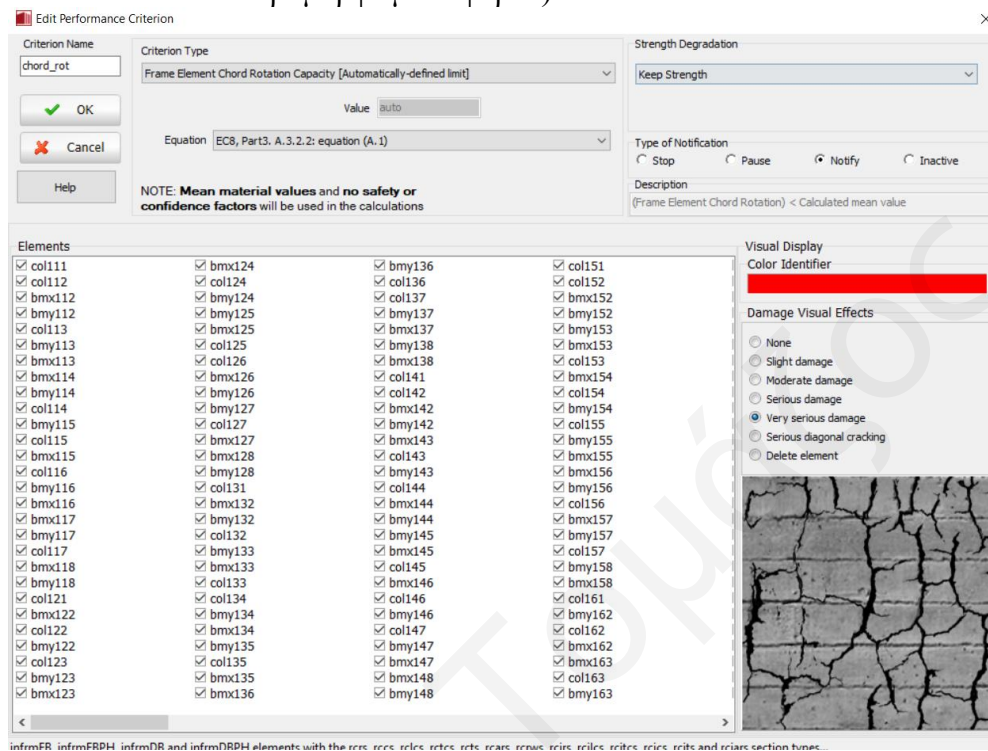


Ε) Προσομοίωση διατομής δοκών

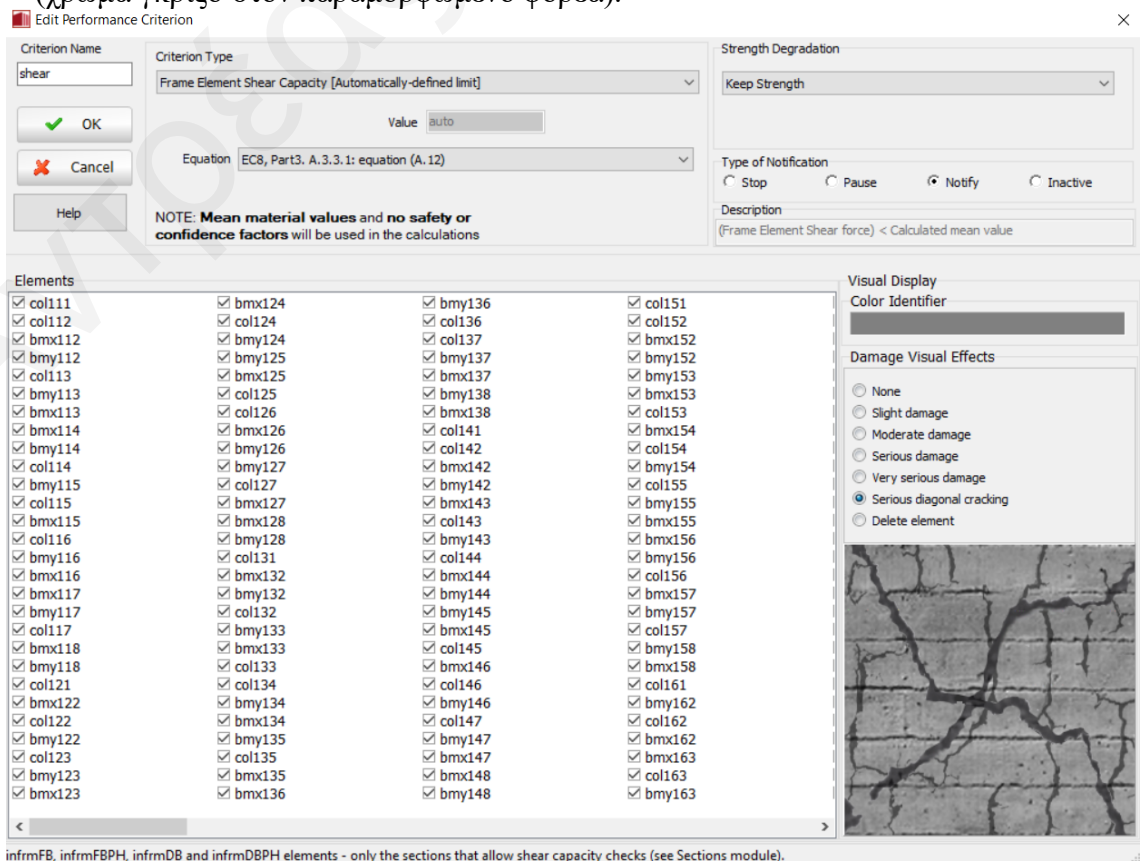


Παράρτημα Γ – Κριτήρια διαρροής/ αστοχίας στο λογισμικό ανάλυσης SeismoStruct

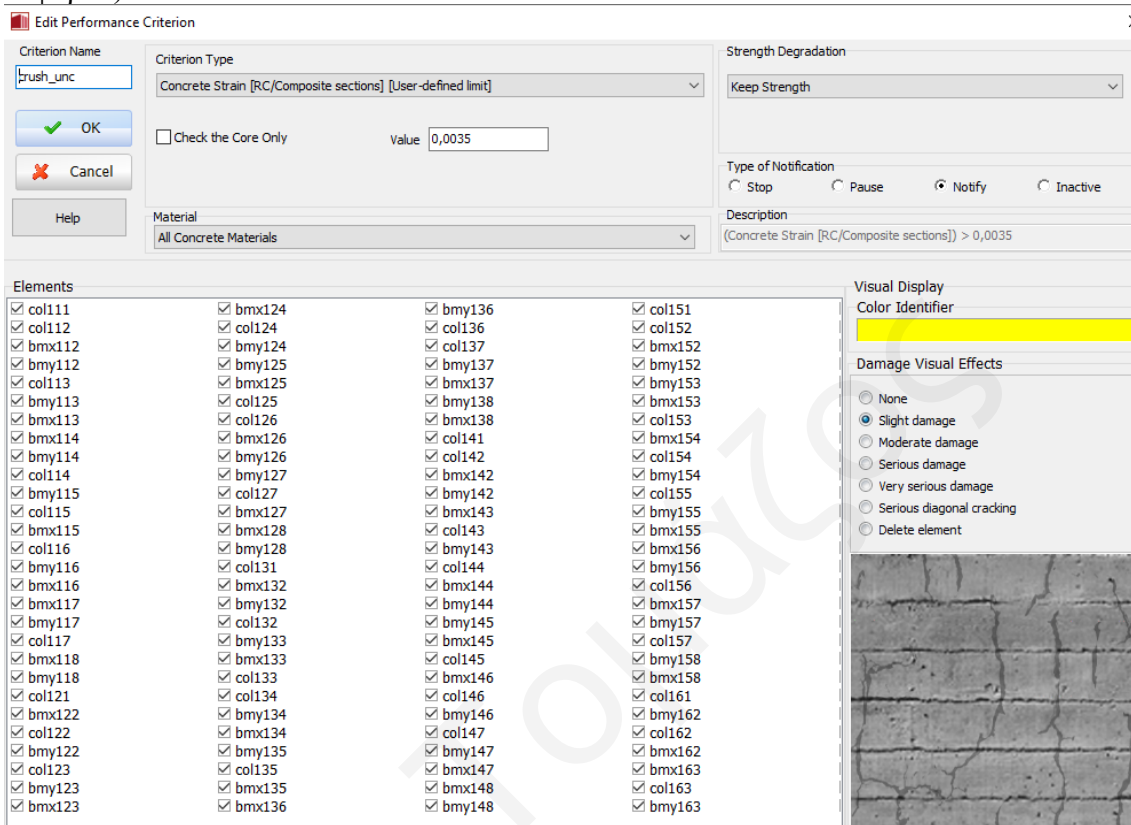
- Έλεγχος υπέρβασης ορίου συνολικής ικανότητας στροφής της χορδής (χρώμα κόκκινο στον παραμορφωμένο φορέα).



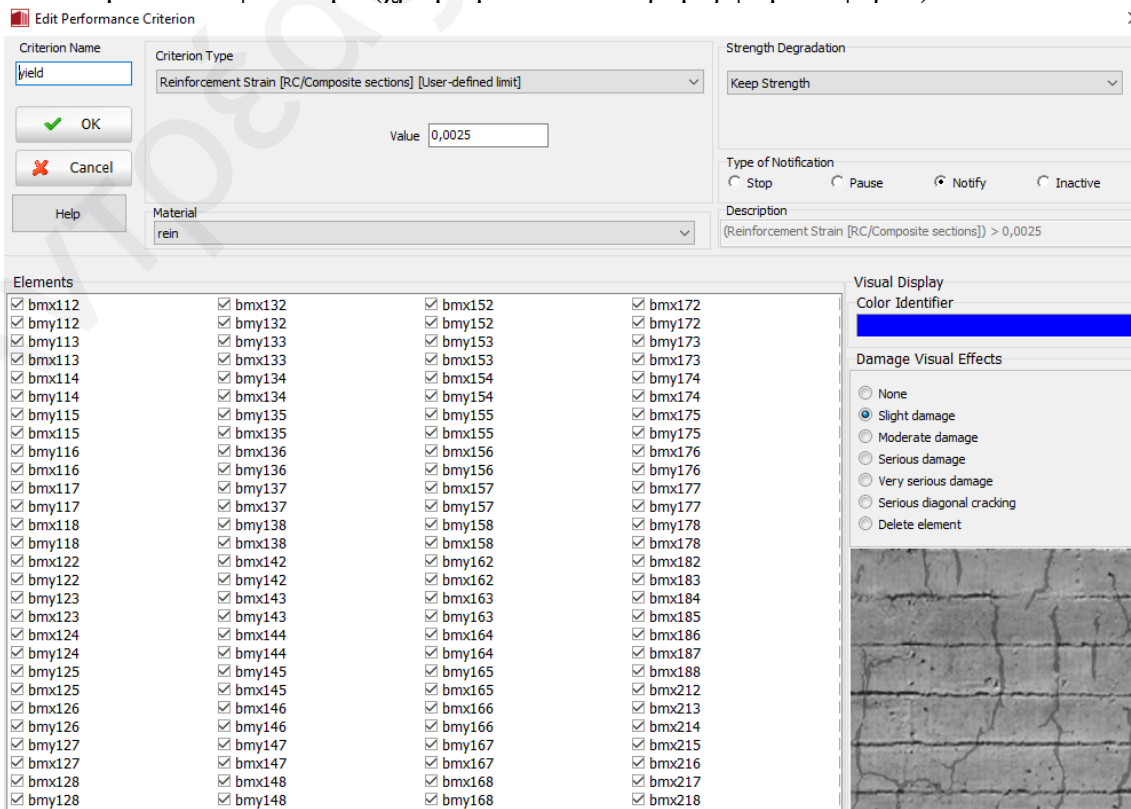
- Έλεγχος υπέρβασης διατμητικής αντοχής υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση V_R (χρώμα γκριζο στον παραμορφωμένο φορέα).



3. Έλεγχος υπέρβασης ορίου παραμόρφωσης που οδηγεί στην αστοχία της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος (χρώμα κίτρινο στον παραμορφωμένο φορέα).



4. Έλεγχος υπέρβασης ορίου παραμόρφωσης χάλυβα που οδηγεί στην διαρροή σπλισμού από εφελκυσμό (χρώμα μπλε στον παραμορφωμένο φορέα).



5. Έλεγχος υπέρβασης ορίου παραμόρφωσης χάλυβα που οδηγεί στην θραύση οπλισμού (χρώμα μαύρο στον παραμορφωμένο φορέα).

Edit Performance Criterion [X]

Criterion Name:

Criterion Type: Reinforcement Strain [RC/Composite sections] [User-defined limit] Value:

Strength Degradation:

Type of Notification: Stop Pause Notify Inactive

Description: (Reinforcement Strain [RC/Composite sections]) > 0,10

Material:

Elements

<input checked="" type="checkbox"/> col111	<input checked="" type="checkbox"/> bmx124	<input checked="" type="checkbox"/> bmy136	<input checked="" type="checkbox"/> col151
<input checked="" type="checkbox"/> col112	<input checked="" type="checkbox"/> col124	<input checked="" type="checkbox"/> col136	<input checked="" type="checkbox"/> col152
<input checked="" type="checkbox"/> bmx112	<input checked="" type="checkbox"/> bmy124	<input checked="" type="checkbox"/> col137	<input checked="" type="checkbox"/> bmx152
<input checked="" type="checkbox"/> bmy112	<input checked="" type="checkbox"/> bmy125	<input checked="" type="checkbox"/> bmy137	<input checked="" type="checkbox"/> bmy152
<input checked="" type="checkbox"/> col113	<input checked="" type="checkbox"/> bmx125	<input checked="" type="checkbox"/> bmx137	<input checked="" type="checkbox"/> bmy153
<input checked="" type="checkbox"/> bmy113	<input checked="" type="checkbox"/> col125	<input checked="" type="checkbox"/> bmy138	<input checked="" type="checkbox"/> bmx153
<input checked="" type="checkbox"/> bmx113	<input checked="" type="checkbox"/> col126	<input checked="" type="checkbox"/> bmx138	<input checked="" type="checkbox"/> col153
<input checked="" type="checkbox"/> bmx114	<input checked="" type="checkbox"/> bmx126	<input checked="" type="checkbox"/> col141	<input checked="" type="checkbox"/> bmx154
<input checked="" type="checkbox"/> bmy114	<input checked="" type="checkbox"/> bmy126	<input checked="" type="checkbox"/> col142	<input checked="" type="checkbox"/> col154
<input checked="" type="checkbox"/> col114	<input checked="" type="checkbox"/> bmy127	<input checked="" type="checkbox"/> bmx142	<input checked="" type="checkbox"/> bmy154
<input checked="" type="checkbox"/> bmy115	<input checked="" type="checkbox"/> col127	<input checked="" type="checkbox"/> bmy142	<input checked="" type="checkbox"/> col155
<input checked="" type="checkbox"/> col115	<input checked="" type="checkbox"/> bmx127	<input checked="" type="checkbox"/> bmx143	<input checked="" type="checkbox"/> bmy155
<input checked="" type="checkbox"/> bmx115	<input checked="" type="checkbox"/> bmx128	<input checked="" type="checkbox"/> col143	<input checked="" type="checkbox"/> bmx155
<input checked="" type="checkbox"/> col116	<input checked="" type="checkbox"/> bmy128	<input checked="" type="checkbox"/> bmy143	<input checked="" type="checkbox"/> bmx156
<input checked="" type="checkbox"/> bmy116	<input checked="" type="checkbox"/> col131	<input checked="" type="checkbox"/> col144	<input checked="" type="checkbox"/> bmy156
<input checked="" type="checkbox"/> bmx116	<input checked="" type="checkbox"/> bmx132	<input checked="" type="checkbox"/> bmx144	<input checked="" type="checkbox"/> col156
<input checked="" type="checkbox"/> bmx117	<input checked="" type="checkbox"/> bmy132	<input checked="" type="checkbox"/> bmy144	<input checked="" type="checkbox"/> bmx157
<input checked="" type="checkbox"/> bmy117	<input checked="" type="checkbox"/> col132	<input checked="" type="checkbox"/> bmy145	<input checked="" type="checkbox"/> bmy157
<input checked="" type="checkbox"/> col117	<input checked="" type="checkbox"/> bmy133	<input checked="" type="checkbox"/> bmx145	<input checked="" type="checkbox"/> col157
<input checked="" type="checkbox"/> bmx118	<input checked="" type="checkbox"/> bmx133	<input checked="" type="checkbox"/> col145	<input checked="" type="checkbox"/> bmy158
<input checked="" type="checkbox"/> bmy118	<input checked="" type="checkbox"/> col133	<input checked="" type="checkbox"/> bmx146	<input checked="" type="checkbox"/> bmx158
<input checked="" type="checkbox"/> col121	<input checked="" type="checkbox"/> col134	<input checked="" type="checkbox"/> col146	<input checked="" type="checkbox"/> col161
<input checked="" type="checkbox"/> bmx122	<input checked="" type="checkbox"/> bmy134	<input checked="" type="checkbox"/> bmy146	<input checked="" type="checkbox"/> bmy162
<input checked="" type="checkbox"/> col122	<input checked="" type="checkbox"/> bmx134	<input checked="" type="checkbox"/> col147	<input checked="" type="checkbox"/> col162
<input checked="" type="checkbox"/> bmy122	<input checked="" type="checkbox"/> bmy135	<input checked="" type="checkbox"/> bmy147	<input checked="" type="checkbox"/> bmx162
<input checked="" type="checkbox"/> col123	<input checked="" type="checkbox"/> col135	<input checked="" type="checkbox"/> bmx147	<input checked="" type="checkbox"/> bmx163
<input checked="" type="checkbox"/> bmy123	<input checked="" type="checkbox"/> bmx135	<input checked="" type="checkbox"/> col148	<input checked="" type="checkbox"/> col163
<input checked="" type="checkbox"/> bmx123	<input checked="" type="checkbox"/> bmx136	<input checked="" type="checkbox"/> bmy148	<input checked="" type="checkbox"/> bmy163

Visual Display

Color Identifier:

Damage Visual Effects:

- None
- Slight damage
- Moderate damage
- Serious damage
- Very serious damage
- Serious diagonal cracking
- Delete element

