



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος

Διερεύνηση Διάτρησης Πλακών κατά τους
Ευρωκώδικες 2 και Εφαρμογή σε Κτίριο ΟΣ Χωρίς
Δοκούς υπό Σεισμική Φόρτιση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικολέττα Δ. Σκαλούμπακα

Επιβλέπων: Χρήστος Ζέρης

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

Σκαλούμπακα Ν. Δ. (2023).
Διερεύνηση Διάτρησης Πλακών κατά τους Ευρωκώδικες 2 και Εφαρμογή σε Κτίριο ΟΣ Χωρίς
Δοκούς υπό Σεισμική Φόρτιση
Διπλωματική Εργασία ΕΟΣ ΔΕ 2023
Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Skaloumpaka N. D. (2023).
Investigation of Punching Shear of Slabs According to Eurocodes 2 and Application in an RC
Flat Slab Building under Seismic Loading
Diploma Thesis ΕΟΣ ΔΕ 2023
Laboratory of Reinforced Concrete, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract.....	2
Ευχαριστίες	3
1 Εισαγωγή.....	4
1.1 Γενικά	4
1.2 Πλάκες χωρίς δοκούς (Flat slabs).....	4
1.3 Το φαινόμενο της διάτρησης.....	6
2 Διάτρηση πλακών κατά ΕΚ2 (EN 1992-1-1:2004).....	8
2.1 Εισαγωγή	8
2.2 Βασικές έννοιες.....	8
2.2.1 Διαδικασία υπολογισμών	8
2.2.2 Περίμετροι ελέγχου	9
2.2.3 Εξαιρέσεις περιμέτρων ελέγχου	10
2.2.4 Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης	13
2.3 Τέμνουσες αντοχής.....	17
2.3.1 Μέγιστη αντοχή σε διάτρηση.....	17
2.3.2 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης.....	17
2.3.3 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας με οπλισμό διάτρησης.....	18
3 Διάτρηση πλακών κατά ΕΚ2 (FprEN 1992-1-1:2023).....	22
3.1 Εισαγωγή	22
3.2 Βασικές έννοιες.....	23
3.2.1 Διαδικασία υπολογισμών	23
3.2.2 Περίμετροι ελέγχου	25
3.2.3 Εξαιρέσεις περιμέτρων ελέγχου	26
3.2.4 Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης	27
3.3 Τέμνουσες αντοχής.....	29
3.3.1 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης	29
3.3.2 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας με οπλισμό διάτρησης.....	32
4 Αναλυτική επαλήθευση πειράματος διάτρησης.....	39
4.1 Εισαγωγή	39
4.2 Περιγραφή πειράματος.....	39
4.2.1 Γεωμετρία δείγματος και ιδιότητες υλικών.....	39
4.2.2 Διαδικασία πειράματος	40
4.2.3 Αποτελέσματα πειράματος.....	42
4.3 Προσομοίωση με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων.....	44

4.3.1 Γεωμετρία φορέα.....	44
4.3.2 Ιδιότητες υλικών.....	48
4.3.3 Συνοριακές συνθήκες	55
4.3.4 Φορτία	57
4.3.5 Ανάλυση.....	58
4.3.6 Ανάλυση ευαισθησίας.....	60
4.3.7 Αποτελέσματα.....	61
4.4 Αποτελέσματα ισχύουσας και νέας έκδοσης ΕΚ2	66
4.5 Συμπεράσματα	71
5 Διαστασιολόγηση σε διάτρηση κτιρίου χωρίς δοκούς.....	72
5.1 Εισαγωγή.....	72
5.2 Περιγραφή φορέα.....	72
5.3 Φορτία	75
5.3.1 Κατακόρυφα φορτία	75
5.3.2 Σεισμικά φορτία	76
5.3.3 Συνδυασμοί φόρτισης.....	85
5.4 Προσομοίωση κατασκευής.....	86
5.4.1 Γεωμετρία φορέα.....	86
5.4.2 Εισαγωγή φορτίσεων και συνδυασμών τους.....	95
5.5 Έλεγχοι γεωμετρίας στοιχείων και σεισμικών μετακινήσεων	96
5.5.1 Πάχος πλακών.....	96
5.5.2 Γεωμετρικοί έλεγχοι υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων.....	99
5.5.3 Επιρροή φαινομένων 2ας τάξεως και περιορισμός βλαβών	99
5.6 Διαστασιολόγηση πλάκας έναντι κάμψης	101
5.7 Διαστασιολόγηση σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος έναντι διάτρησης.....	107
5.7.1 Εσωτερικά υποστυλώματα.....	107
5.7.2 Περιμετρικά υποστυλώματα	117
5.8 Έλεγχος παραμορφώσεων	120
5.9 Συμπεράσματα	122
6 Συμπεράσματα	124
Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	127
Βιβλιογραφία.....	128
Παράρτημα	130

Διερεύνηση Διάτρησης Πλακών κατά τους Ευρωκώδικες 2 και Εφαρμογή σε Κτίριο ΟΣ Χωρίς Δοκούς υπό Σεισμική Φόρτιση

Σκαλούμπακα Ν. Δ. (Επιβλέπων: Ζέρης Χ.)

Περίληψη

Το βασικό πρόβλημα που συναντάται στα κτίρια με πλάκες χωρίς δοκούς είναι η διάτρηση των πλακών. Πρόκειται για μία ψαθυρή μορφή τοπική αστοχία που αναπτύσσεται γύρω από τα κατακόρυφα στοιχεία που στηρίζουν απευθείας την πλάκα, χωρίς την παρεμβολή δοκών. Η αντιμετώπιση του φαινομένου προβλέπεται από τις ανάλογες κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 2, με την κατάλληλη διαμόρφωση της γεωμετρίας των συνδέσεων και την προσθήκη οπλισμών. Ωστόσο, η έκδοση EN 1992-1-1:2004 που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα πρόκειται να αντικατασταθεί από την ανανεωμένη έκδοση FprEN 1992-1-1:2023, προκειμένου να συμβαδίζουν οι εξισώσεις και διαδικασίες υπολογισμών με τα πειραματικά και ερευνητικά ευρήματα των τελευταίων χρόνων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία λοιπόν πραγματοποιείται η συγκριτική εφαρμογή των δύο εκδόσεων.

Αρχικά, εξετάζεται η δυνατότητα προσέγγισης των αποτελεσμάτων ενός πειράματος διάτρησης, τμήματος πλάκας περιμετρικά ενός εσωτερικού υποστυλώματος, το οποίο δέχεται κεντρική φόρτιση, μέσω μη γραμμικής ανάλυσης προσομοιώματος κόμβου. Το πείραμα αφορά τμήμα πλάκας οπλισμένο έναντι κάμψης, χωρίς την προσθήκη διατμητικού οπλισμού. Διερευνάται η ακρίβεια πρόβλεψης της πραγματικής συμπεριφοράς και αντοχής έναντι διάτρησης του κόμβου, τόσο από τους υπολογισμούς του λογισμικού πεπερασμένων στοιχείων, όσο και από τις προτεινόμενες εξισώσεις των κανονισμών, ενώ συμπεραίνεται ότι η νέα έκδοση παρουσιάζει μικρότερη απόκλιση από την εκτιμώμενη αντοχή του πειράματος. Έπειτα, πραγματοποιείται ελαστική ανάλυση ενός τυπικού πενταώροφου κτιρίου χώρων συνάθροισης με πλάκες χωρίς δοκούς και απόλυτης γεωμετρικής συμμετρίας. Ο φορέας περιλαμβάνει συνολικά τέσσερα τοιχώματα, δύο ανά διεύθυνση, προς παραλαβή της σεισμικής φόρτισης. Εξετάζεται λοιπόν η διαστασιολόγηση και η όπλιση έναντι διάτρησης των πλακών, και κατά τις δύο εξεταζόμενες εκδόσεις του ΕΚ2, στην περίπτωση επιβολής έκκεντρης φόρτισης στα υποστυλώματα λόγω του σεισμού. Διαπιστώνεται πως τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη, για τον συγκεκριμένο έλεγχο, προκύπτουν από τους σεισμικούς συνδυασμούς, ενώ βάσει της νέας έκδοσης απαιτείται προσθήκη περισσότερων συνδετήρων, σε σχέση με την ισχύουσα, λόγω αυστηρότερων κατασκευαστικών διατάξεων. Τέλος σχολιάζεται η μη ικανοποίηση ενός πρόσθετου ελέγχου, σύμφωνα με τον Αμερικανικό κανονισμό, που αφορά τη συμβατότητα των πλευρικών μετατοπίσεων του φορέα.

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
LABORATORY OF REINFORCED CONCRETE

DIPLOMA THESIS
ΕΟΣ ΔΕ 2023

Investigation of Punching Shear of Slabs According to Eurocodes 2 and Application in an RC Flat Slab Building under Seismic Loading

Skaloumpaka N. D. (Supervisor: by Zeris C.)

Abstract

The main issue encountered in flat slab buildings is the punching shear of slabs. This is a brittle form of local failure that develops around the vertical elements directly supporting the slab, without the presence of beams. The mitigation of this phenomenon is regulated by the provisions of Eurocode 2, via the appropriate configuration of these connections and the addition of reinforcement. However, the EN 1992-1-1:2004 version, which is currently in use, is set to be replaced by the updated edition FprEN 1992-1-1:2023 to align the equations and calculation procedures with recent experimental and research findings.

This thesis, therefore, conducts a comparative analysis of the two editions. Firstly, the possibility of approximating the results of a punching shear test is examined using non-linear finite element simulation of the slab-column connection. The experiment concerns a portion of a slab, reinforced against flexure without the addition of shear reinforcement, around an internal column subjected to central loading. The accuracy of predicting the actual behavior and shear resistance of the connection is investigated, both through finite element software calculations and the proposed code equations, and it is concluded that the new edition exhibits smaller deviation from the estimated test resistance. Subsequently, an elastic analysis of a typical five-story flat slab building with absolute geometric symmetry is conducted. The structure includes four walls, two in each direction, to resist seismic loads. The design and reinforcement against punching shear of the slabs are examined for both versions of Eurocode 2 in the case of eccentric loading on the columns due to seismic action. The study reveals that the most adverse intensities, for this particular check, arise from seismic combinations, and the new edition demands the addition of more stirrups compared to the current version, due to stricter construction provisions. Finally, a discussion is provided regarding the non-satisfaction of an additional check, according to the American code, concerning the compatibility of the lateral deformations of the structure.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου προς τους ανθρώπους που στάθηκαν δίπλα μου τα χρόνια των σπουδών μου και με βοήθησαν να εκπληρώσω τους στόχους μου. Για την καθοδήγησή τους και τις πολύτιμες γνώσεις που παρείχαν σε εμένα και τους συμφοιτητές μου, οφείλω να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές της σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., εκ των οποίων το μεγαλύτερο “ευχαριστώ” θα ήθελα να το απευθύνω στον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κύριο Χρήστο Ζέρη. Οι συμβουλές και η βοήθειά του υπήρξαν καθοριστικές για την διεκπεραίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Είμαι λοιπόν ιδιαίτερα ευγνώμων για τα εφόδια που αποκόμισα μέσω αυτής της συνεργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου που δεν σταμάτησε ποτέ όλα αυτά τα χρόνια να με στηρίζει και να πιστεύει σε μένα. Η ψυχολογική συμπαράσταση και η αγάπη τους με βοήθησαν όσο τίποτα άλλο σε αυτό μου το ταξίδι. Μπαμπά, Μαμά, Χρήστο, Θεοφανία και Γιάννη μου σας ευχαριστώ για όλα.

Ολοκληρώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την αγαπημένη μου ξαδέλφη, Κατερίνα, και φίλη, Σοφία, που με στήριξαν σε κάθε βήμα μου και ήταν δίπλα μου σε κάθε δυσκολία. Ιδιαίτερη αναφορά ωστόσο αξίζουν οι αγαπημένες μου συμφοιτήτριες και φίλες, με τις οποίες μοιράστηκα τα πιο υπέροχα φοιτητικά χρόνια. Νικολέτα, Ανδριάννα, Αργυρώ και Μαριάννα νιώθω πολύ τυχερή που σας έχω στη ζωή μου.

Τη διπλωματική αυτή την αφιερώνω στον μπαμπά μου που μου γνώρισε το επάγγελμα του πολιτικού μηχανικού και αποτελεί το πρότυπό μου στη ζωή.

Αθήνα, Νοέμβριος 2023

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

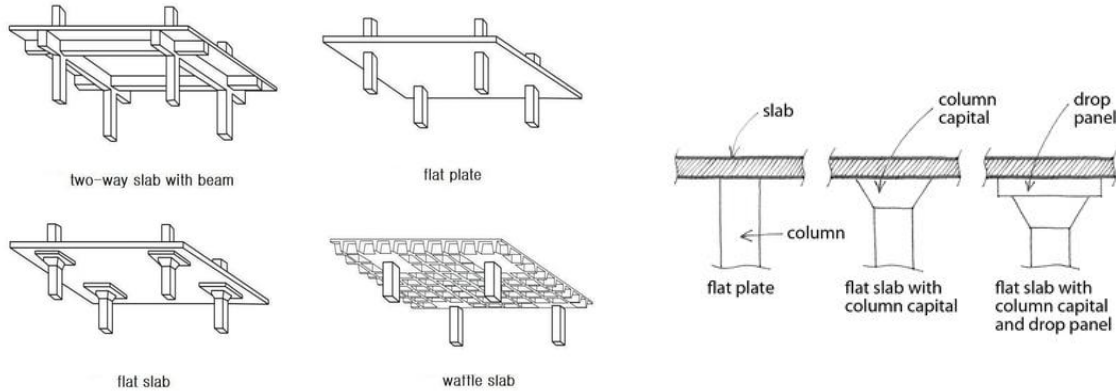
Με αφορμή την ανανεωμένη έκδοση του Ευρωκώδικα 2, που θα τεθεί σύντομα σε εφαρμογή αντικαθιστώντας την υπάρχουσα, επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί η διερεύνηση των αλλαγών που αφορούν το φαινόμενο της διάτρησης σε πλάκες χωρίς δοκούς. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι ανάλογες κανονιστικές διατάξεις σύμφωνα με τις δύο εξεταζόμενες εκδόσεις (Κεφάλαια 2 και 3) και ακολούθως γίνεται η συγκριτική εφαρμογή τους. Η σύγκριση πραγματοποιείται αρχικά με τα ευρήματα ενός πειράματος, που προκύπτουν από την προσομοίωση της πειραματικής διαδικασίας σε λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων (Κεφάλαιο 4). Έπειτα, εξετάζεται η διαστασιολόγηση έναντι διάτρησης (σύμφωνα με τις δύο εκδόσεις) ενός τυπικού πεντάωροφου κτιρίου γραφείων, προς εύρεση των πρακτικών διαφορών κατά το σχεδιασμό (Κεφάλαιο 5). Πρωτού όμως αναλυθούν τα προαναφερθέντα ζητήματα, κρίνεται αναγκαία η συνοπτική επεξήγηση των εννοιών “Πλάκα χωρίς δοκούς” και “Διάτρηση”.

1.2 Πλάκες χωρίς δοκούς (Flat slabs)

Με τον όρο “πλάκες χωρίς δοκούς” (flat slabs) περιγράφονται οι πλάκες οπλισμένου σκυροδέματος οι οποίες στηρίζονται απευθείας σε υποστυλώματα, χωρίς την παρεμβολή δοκών. Κατά την συγκεκριμένη μέθοδο κατασκευής πραγματοποιείται μονολιθική σύνδεση μεταξύ πλακών και υποστυλωμάτων και τα επιφανειακά φορτία των πλακών μεταφέρονται απευθείας στους στύλους που τις στηρίζουν. Στις περιοχές των κεφαλών των υποστυλωμάτων η σύνδεση μπορεί να γίνεται απευθείας, είτε να διαμορφώνεται κάποια ενίσχυση (στην περίπτωση αυτή η πλάκα χαρακτηρίζεται ως μυκητοειδής) με την μορφή τοπικής αύξησης του πάχους της πλάκας ή διαπλάτυνσης (πρισματικής ή κωνικής) της κεφαλής του στύλου. Η ενίσχυση αυτή αποσκοπεί στην αύξηση της φορτιζόμενης επιφάνειας και επομένως στην αύξηση της διατμητικής αντοχής του κόμβου. Οι περιγραφόμενες πλάκες είναι είτε συμπαγείς είτε με νευρώσεις, αρκεί στην δεύτερη περίπτωση να δημιουργείται μια συμπαγής ζώνη γύρω από την κεφαλή του στύλου για την αποφυγή του φαινομένου της διάτρησης που θα αναλυθεί παρακάτω.

Η χρήση των πλακών χωρίς δοκούς περιορίζεται κυρίως σε χώρους στάθμευσης, κτίρια γραφείων, εμπορικά κέντρα και βιομηχανικά κτίρια, όπου η ανάγκη ύπαρξης μεγάλων χώρων με καλό φωτισμό είναι αυξημένη. Τα πλεονεκτήματά τους είναι πολυάριθμα με βασικό την ελευθερία αρχιτεκτονικής διαμόρφωσης του έργου, καθώς η ύπαρξη δοκών περιορίζει τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό και επηρεάζει την θέση τοποθέτησης των εσωτερικών και περιμετρικών τοιχοποιιών. Η έλλειψη δοκών επιτρέπει ταυτόχρονα την ελευθερία επιλογής θέσεων για τη διέλευση του ηλεκτρομηχανολογικού εξοπλισμού. Όσον αφορά την κατασκευή, καθίσταται δυνατή η μείωση του ύψους κάθε ορόφου, καθώς αφαιρείται το ύψος κρέμασης των δοκών. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του συνολικού ύψους του κτιρίου, η οποία λειτουργεί ως ευνοϊκός παράγοντας στην οικονομικότητα ανεγέρσεως της κατασκευής. Σε περιπτώσεις μάλιστα μεγάλων

ανοιγμάτων (>9m), η χρήση οικονομικότερων μεθόδων προέντασης καθίσταται δυνατή. Εκτός όμως από την οικονομική ελάφρυνση παρατηρείται και διευκόλυνση στην τοποθέτηση του ξυλότυπου, των οπλισμών και στην διάστρωση του σκυροδέματος.



Εικόνα 1.1: Είδη πλακών, πηγή: (Midas Structure, 2022)



Εικόνα 1.2: Μυκητοειδής πλάκες με ενίσχυση στις κεφαλές των στύλων, πηγή: www.housing.com

Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το συγκεκριμένο είδος κατασκευών έχει σημαντικά μειονεκτήματα που αφορούν την στατική του λειτουργία. Η έλλειψη ουσιαστικής πλαισιακής λειτουργίας του φορέα οδηγεί σε μειωμένη αντισεισμική συμπεριφορά, καθώς η δημιουργία πλαστικών αρθρώσεων στις δοκούς, με σκοπό την απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας, καθίσταται αδύνατη. Οι συγκεκριμένες πλάκες λοιπόν αποφεύγονται σε δομήματα με απαιτήσεις αντισεισμικότητας αν δεν έχουν προβλεφθεί οι απαραίτητοι μηχανισμοί ανάληψης της σεισμικής δράσης, η τοποθέτηση δηλαδή κατάλληλα διατεταγμένων τοιχωμάτων στις δύο διευθύνσεις του κτιρίου. Μάλιστα, σε περιπτώσεις ισχυρής κατακόρυφης συνιστώσας της σεισμικής δράσης (κυρίως σε περιοχές κοντά στο επίκεντρο του σεισμού) παρατηρούνται έντονα προβλήματα

διάτρησης. Η εμφάνιση του φαινομένου της διάτρησης ωστόσο δεν προϋποθέτει την ύπαρξη ισχυρής κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας. Πρόκειται για ένα πρόβλημα που συναντάται σε οποιαδήποτε πλάκα χωρίς δοκούς η οποία δέχεται τα συνήθη κατακόρυφα στατικά φορτία και αποτελεί το φαινόμενο που θα μελετηθεί εκτενέστερα στην παρούσα διπλωματική εργασία.

1.3 Το φαινόμενο της διάτρησης

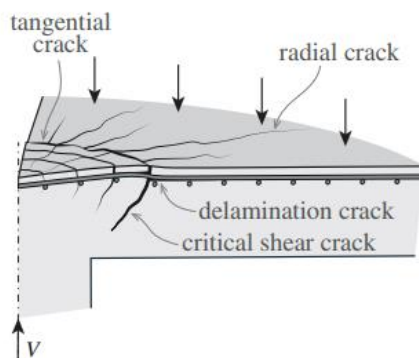
Το φαινόμενο της διάτρησης παρατηρείται όταν ένα συγκεντρωμένο φορτίο δρα κάθετα σε ένα επιφανειακό στοιχείο είτε όταν ένα επιφανειακό στοιχείο στηρίζεται σε μία σχετικά μικρή επιφάνεια (Τρέζος Κ.Γ., 2020). Συνήθως αναπτύσσεται σε πλάκες χωρίς δοκούς, σε πλάκες επί των οποίων εδράζονται “φυτευτά” υποστυλώματα και σε εύκαμπτα πέδιλα ή γενικές κοιτοστρώσεις επί των οποίων θεμελιώνονται υποστυλώματα. Η συγκεκριμένη μορφή αστοχίας είναι ψαθυρή επομένως θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη για τα παραπάνω είδη κατασκευών.



Εικόνα 1.3: Πραγματική αστοχία έναντι διάτρησης σε οροφή χώρου στάθμευσης, πηγή: (ASCE Library, 2010)

Λόγω της πολυπλοκότητας του φαινομένου δεν έχει αναπτυχθεί, μέχρι σήμερα, κάποιο ακριβές θεωρητικό προσομοίωμα περιγραφής του. Σύμφωνα με τις πρώτες μελέτες των Kinnunen και Nylander, στη δεκαετία του 1960, η διάτμηση παραλαμβάνεται από ένα κολουροκωνικό τμήμα της πλάκας γύρω από το υποστύλωμα του οποίου η αστοχία σε θλίψη ενεργοποιεί την διατρητική αστοχία της σύνδεσης. Το κριτήριο αστοχίας που καθιέρωσαν οι ίδιοι αποτελούσε συνάρτηση της περιστροφής της πλάκας, η οποία υπολογιζόταν μέσω μίας διγραμμικής σχέσης ροπής-καμπυλότητας. Το 1985 οι Regan και Braestrup πρότειναν εμπειρικές εξισώσεις, υποστηρίζοντας ότι η διατρητική αντοχή σχετίζεται με το γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού κάμψης και τον συντελεστή μεγέθους (Genikomsou A.S., 2015). Συμφωνώντας με τις βασικές αρχές της θεωρίας των Kinnunen και Nylander, οι Muttoni και Schwartz (2008-2009) ανέπτυξαν τη “Θεωρία της Κρίσιμης Διατμητικής Ρηγμάτωσης” (Critical Shear Crack Theory). Η κύρια ιδέα της θεωρίας τους είναι πως οι παραμορφώσεις συγκεντρώνονται σε μία κρίσιμη διατμητική ρωγμή που επηρεάζει την ικανότητα της πλάκας να μεταφέρει διατμητικές δυνάμεις (συναρτήσει των χειλιών της ρωγμής και της τραχύτητάς τους). Όσο μεγαλώνει το εύρος της συγκεκριμένης ρωγμής

μειώνεται η ικανότητα μεταφοράς διατμητικών δυνάμεων στην πλάκα, διαπίστωση που επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα. Συνδυάζοντας λοιπόν το κριτήριο αστοχίας με την σχέση φορτίου-παραμόρφωσης, η οποία σχετίζεται με την περιστροφή (ψ) της πλάκας, μπορεί να υπολογιστεί η διατρητική αντοχή της.



Εικόνα 1.4: Ρηγμάτωση σε μία σύνδεση πλάκας-υποστυλώματος, πηγή: (Wiley online library, 2017)

Ο μηχανισμός της διατρητικής αστοχίας θεωρείται περίπλοκος καθώς η περιοχή σύνδεσης δοκού υποστυλώματος δέχεται ταυτόχρονα διατμητική και καμπτική ένταση. Στο πάνω μέρος της πλάκας διακρίνονται τόσο εφαπτομενικές όσο και ακτινικές ρηγματώσεις (Εικόνα 1.4), ως αποτέλεσμα των αντίστοιχων εφελκυστικών παραμορφώσεων που αναπτύσσονται. Συγκεκριμένα, οι εφαπτομενικές ρηγματώσεις εξελίσσονται παράλληλα με τους λοξούς θλιπτήρες (κεκλιμένοι ως προς το επίπεδο της πλάκας) οι οποίοι μεταφέρουν την τέμνουσα δύναμη στο υποστύλωμα. Η κολουροκωνική λοιπόν ρηγμάτωση ξεκινά από την περίμετρο της φορτιζουσας επιφάνειας (δηλαδή το υποστύλωμα σε περιπτώσεις μη ενίσχυσης της κεφαλής του) και καταλήγει στο πάνω μέρος της πλάκας σχηματίζοντας γωνία θ με το επίπεδό της.

Σε μία σύνδεση πλάκας-υποστυλώματος η τέμνουσα μεταφέρεται μέσω κάποιων μηχανισμών. Κατά μήκος της κεκλιμένης ρωγμής, η αλληλεπίδραση των αδρανών συμβάλλει στη μεταφορά αυτή, η οποία ευνοείται με την αύξηση του μεγέθους των αδρανών και επομένως της τραχύτητας των χειλιών της ρωγμής. Η δράση βλήτρου του καμπτικού οπλισμού της πλάκας, καθώς και η κατακόρυφη συνιστώσα του ιδεατού θλιπτήρα που σχηματίζουν οι κύριες θλιπτικές τάσεις, στην πορεία τους προς το υποστύλωμα, αποτελούν επίσης μηχανισμούς μεταφοράς τέμνουσας. Τέλος, ευνοϊκές θεωρούνται οι ορθές θλιπτικές τάσεις εντός του πάχους της πλάκας που αναπτύσσονται στις προεντεταμένες πλάκες, λόγω της θλιπτικής δύναμης προέντασης που δρα κάθετα στη διατομή τους. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις οι παραπάνω μηχανισμοί δεν επαρκούν με αποτέλεσμα να κρίνεται αναγκαία η τοποθέτηση διατμητικού οπλισμού, περιμετρικά του υποστυλώματος, ώστε να αποφευχθεί η αστοχία έναντι διάτρησης. Η κανονιστική διαδικασία που ακολουθείται για το σχεδιασμό έναντι διάτρησης παρουσιάζεται στα Κεφάλαια 2 και 3.

2 Διάρθρωση πλακών κατά ΕΚ2 (EN 1992-1-1:2004)

2.1 Εισαγωγή

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή Τυποποίησης (CEN) ολοκλήρωσε το 2007 τη σύνταξη των Ευρωκωδίκων, οι οποίοι αποτελούν κοινά, για τα κράτη της Ε.Ε., Πρότυπα και τέθηκαν σε εφαρμογή το 2014, παράλληλα με τα Εθνικά Προσαρτήματα κάθε χώρας. Οι Ευρωκώδικες περιλαμβάνουν όλες τις απαιτήσεις σύμφωνα με τις οποίες γίνεται ο κανονιστικός σχεδιασμός κατασκευών Πολιτικού Μηχανικού και χωρίζονται στα ακόλουθα Ευρωπαϊκά Πρότυπα:

- ΕΚ0 (EN 1990) - Βασικές αρχές σχεδιασμού
- ΕΚ1 (EN 1991) - Δράσεις στις κατασκευές
- ΕΚ2 (EN 1992) - Σχεδιασμός κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα
- ΕΚ3 (EN 1993) - Σχεδιασμός κατασκευών από χάλυβα
- ΕΚ4 (EN 1994) - Σχεδιασμός σύμμικτων κατασκευών από χάλυβα και οπλ. σκυρόδεμα
- ΕΚ5 (EN 1995) - Σχεδιασμός ξύλινων κατασκευών
- ΕΚ6 (EN 1996) - Σχεδιασμός κατασκευών από τοιχοποιία
- ΕΚ7 (EN 1997) - Γεωτεχνικός σχεδιασμός
- ΕΚ8 (EN 1998) - Σχεδιασμός αντισεισμικών κατασκευών
- ΕΚ9 (EN 1999) - Σχεδιασμός κατασκευών από αλουμίνιο

Το σύνολο των Ευρωκωδίκων καλύπτει όλες τις πιθανές καταπονήσεις που μπορούν να υποστούν διάφορα είδη κατασκευών καθώς και τα προβλήματα αστοχίας και λειτουργικότητας που θα προκύψουν στον φορέα. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις σχέσεις του Ευρωκώδικα 2 που ισχύουν και εφαρμόζονται μέχρι σήμερα για το σχεδιασμό έναντι διάρθρωσης. Οι κανονιστικές διατάξεις του ΕΚ2 καλύπτουν τις περιπτώσεις των συμπαγών πλακών χωρίς δοκούς, των θεμελιώσεων και των δοκιδωτών πλακών χωρίς δοκούς, με συμπαγή τμήματα στις κεφαλές των υποστυλωμάτων. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει αναφορά στις διατάξεις που αφορούν την πρώτη κατηγορία. Να σημειωθεί πως λόγω έλλειψης κάποιου ακριβούς θεωρητικού προσομοιώματος, οι μέθοδοι που περιγράφονται είναι εμπειρικές, σε μία προσπάθεια να συμβαδίσουν με τα πειραματικά ευρήματα, και βασίζονται στο ερευνητικό έργο του Regan (1985).

2.2 Βασικές έννοιες

2.2.1 Διαδικασία υπολογισμών

Κατά το σχεδιασμό έναντι διάρθρωσης, σύμφωνα με τον ΕΚ2, πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι σε όρους τάσεων:

- ✓ Στην περίμετρο (u_0) της φορτιζόμενης επιφάνειας (συνήθως του υποστρώματος) εξετάζεται αν η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση (v_{Ed}) δεν υπερβαίνει τη μέγιστη τάση αντοχής σε διάτρηση ($v_{Rd,max}$). Σε περίπτωση που δεν ικανοποιείται η συνθήκη $v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$ συνιστάται η αλλαγή της γεωμετρίας (αύξηση πάχους h).
- ✓ Στη βασική περίμετρο ελέγχου (u_1) εξετάζεται αν η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση (v_{Ed}) είναι μικρότερη της τιμής σχεδιασμού της αντοχής της πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης ($v_{Rd,c}$). Αν η συνθήκη $v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$ ικανοποιείται, δεν απαιτείται η προσθήκη οπλισμού διάτρησης.
- ✓ Αν για την παραπάνω περίμετρο ελέγχου ισχύει ότι $v_{Ed} > v_{Rd,c}$, η πλάκα οπλίζεται έως την περίμετρο $u_{out,ef}$, πέρα από την οποία η αντοχή της πλάκας επαρκεί χωρίς πρόσθετο οπλισμό διάτρησης.

Να σημειωθεί πως για να είναι αποτελεσματική η προσθήκη διατρητικού οπλισμού, η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση $v_{Ed(u_1)}$ πρέπει να είναι μικρότερη της μέγιστης τάσης σχεδιασμού που μπορεί να παραλάβει μια πλάκα με οπλισμό διάτρησης ($v_{Rd,cs,max}$), η οποία ισούται με $1.5v_{Rd,c}$. Η αναπτυσσόμενη διατμητική τάση v_{Ed} υπολογίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_i d} \quad (2.1)$$

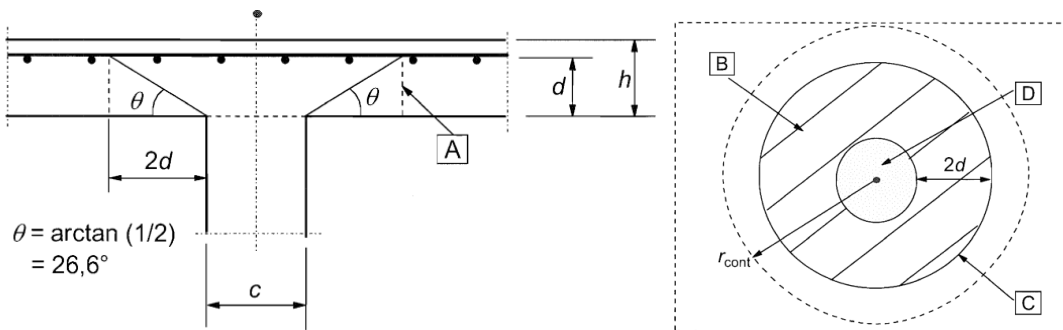
όπου, β συντελεστής εκκεντρότητας που αναλύεται παρακάτω, V_{Ed} η δρώσα τέμνουσα δύναμη δηλαδή η αξονική δύναμη που ασκείται στο υποστύλωμα για τα φορτία σχεδιασμού, u_i η περίμετρος ελέγχου που εξετάζεται κάθε φορά και d το μέσο στατικό ύψος της πλάκας.

2.2.2 Περίμετροι ελέγχου

Σε μία πλάκα χωρίς δοκούς οι έλεγχοι έναντι διάτρησης πραγματοποιούνται σε δύο περιμέτρους (u_0, u_1). Η πρώτη αποτελεί την περίμετρο της φορτιζόμενης επιφάνειας (δηλαδή του υποστρώματος, εφόσον δεν υπάρχει κάποιου είδους ενίσχυση στην περιοχή της κεφαλής του).

Η u_1 ονομάζεται βασική περίμετρος ελέγχου, βρίσκεται σε απόσταση $2d$ από την φορτιζόμενη επιφάνεια και σχεδιάζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να έχει το μικρότερο δυνατό μήκος (κυρτή καμπύλη). Η απόσταση $2d$ (Εικόνα 2.1) προκύπτει επειδή θεωρείται πως η κολουροκωνική επιφάνεια διατρητικής αστοχίας σχηματίζεται με κλίση ως προς το επίπεδο της πλάκας και διαγράφει με το ίδιο γωνία θ , ίση με $26,6^\circ$ ($\tan\theta=0,5$).

Σε περίπτωση απαίτησης διατμητικού οπλισμού ορίζεται μία επιπλέον περίμετρος ($u_{out,ef}$) πέρα από την οποία η πλάκα δύναται να παραλάβει τις διατμητικές τάσεις χωρίς την προσθήκη οπλισμού. Η $u_{out,ef}$ υπολογίζεται εξισώνοντας την αναπτυσσόμενη τάση $v_{Ed(u_{out,ef})}$ (όπως προκύπτει από την Εξίσωση (2.1) για $u_i = u_{out,ef}$) με την τιμή σχεδιασμού της αντοχής της πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης $v_{Rd,c}$. Με αυτό τον τρόπο προσδιορίζεται ένα όριο με βάση το οποίο καθορίζεται μέχρι που θα εκτείνονται οι απαιτούμενοι συνδετήρες.

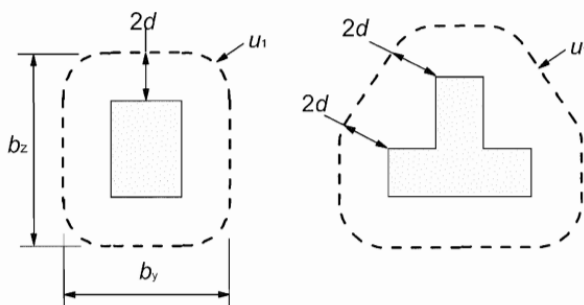


Εικόνα 2.1: Σχηματική απεικόνιση των περιμέτρων ελέγχου, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A: Βασική διατομή ελέγχου εμβαδού $u_1 \cdot d$, B: Βασική επιφάνεια ελέγχου, C: Βασική περίμετρος ελέγχου, D: Φορτιζόμενη επιφάνεια, r_{cont} : Επιπλέον περίμετρος ελέγχου)

Το μέσο στατικό ύψος d_{eff} ισούται με το ημιάθροισμα των στατικών υψών (d_y , d_z) των διαμήκων οπλισμών της πλάκας, οι οποίοι εκτείνονται σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις.

$$d_{eff} = \frac{(d_y + d_z)}{2} \quad (2.2)$$

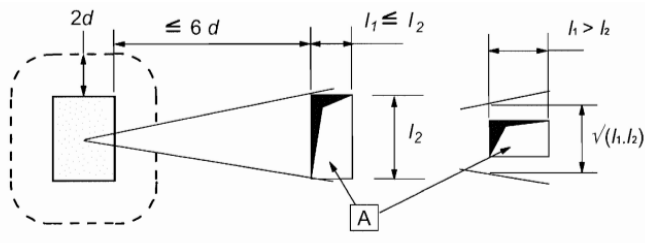


Εικόνα 2.2: Παραδείγματα βασικής περιμέτρου ελέγχου u_1 για ορθογωνικό υποστύλωμα και υποστύλωμα σχήματος T, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

2.2.3 Εξαιρέσεις περιμέτρων ελέγχου

Ανοίγματα

Σε περίπτωση που υπάρχει κάποιο άνοιγμα σε μικρότερη από $6d$ απόσταση από την περίμετρο της φορτιζόμενης επιφάνειας, ένα τμήμα της περιμέτρου ελέγχου u_1 θεωρείται ανενεργό. Πρόκειται για το τμήμα που εσωκλείεται μεταξύ των δύο εφαπτομένων, με το περίγραμμα του ανοίγματος, ημιευθειών οι οποίες ξεκινούν από το κέντρο της φορτιζόμενης επιφάνειας.

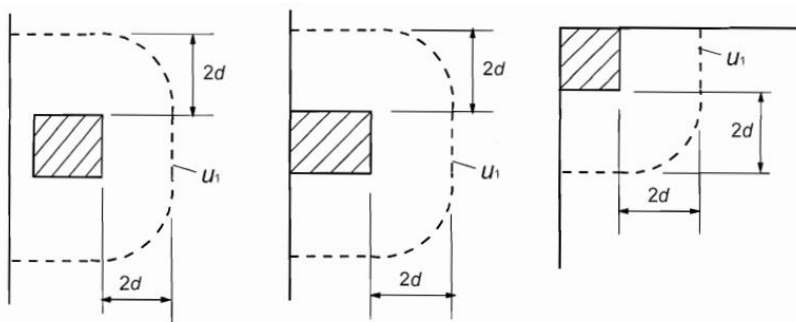


Εικόνα 2.3: Περίμετρος ελέγχου κοντά σε άνοιγμα, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A: Άνοιγμα)

Περιμετρικά ή γωνιακά υποστρώματα

Μία ακόμα ειδική περίπτωση είναι οι περιμετρικοί ή γωνιακοί στύλοι. Όταν η φοριζόμενη επιφάνεια βρίσκεται κοντά σε γωνία ή κάποιο άκρο, η βασική περίμετρος ελέγχου u_1 σχεδιάζεται σύμφωνα με την Εικόνα 2.4, με την προϋπόθεση ότι η συγκεκριμένη περίμετρος (μόνο η διακεκομμένη καμπύλη της εικόνας) έχει μικρότερο μήκος από την τυπική της μορφή όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.4: Βασική περίμετρος ελέγχου για περιμετρικά και γωνιακά υποστρώματα, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

Διαπλάτυνσεις

Όπως έχει προαναφερθεί, είναι σύνηθες στις πλάκες χωρίς δοκούς να διαμορφώνεται κάποιου είδους ενίσχυση στην περιοχή του υποστρώματος, είτε με τοπική αύξηση του πάχους της πλάκας είτε με διαπλάτυνση της κεφαλής του. Σκοπός της συγκεκριμένης ενέργειας είναι η αύξηση του στατικού ύψους και κατ' επέκταση η μείωση των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων. Οι περιπτώσεις διαπλάτυνσεων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες, αναλόγως με τη σχέση μεταξύ του μήκους l_H και του διπλάσιου ύψους h_H της διαπλάτυνσης.

- Η πρώτη κατηγορία αφορά τις περιπτώσεις όπου $l_H < 2h_H$

Θεωρώντας ότι η ρηγμάτωση ξεκινά από το περίγραμμα του στύλου και εκτείνεται με κλίση γωνίας θ ($=26,6^\circ$) μέσα στη διαπλάτυνση, παρατηρείται ότι λόγω του μικρού μήκους της ίδιας, η

ρηγμάτωση δεν καταλήγει εντός της πλάκας. Επομένως ο έλεγχος γίνεται μόνο εξωτερικά της διαπλάτυνσης, θεωρώντας φορτίζουσα επιφάνεια την ίδια, στατικό ύψος αυτό της πλάκας και την βασική περίμετρο, απλοποιητικά, ως κύκλο ακτίνας r_{cont} .

Για κυκλικά υποστυλώματα η ακτίνα αυτή ισούται με:

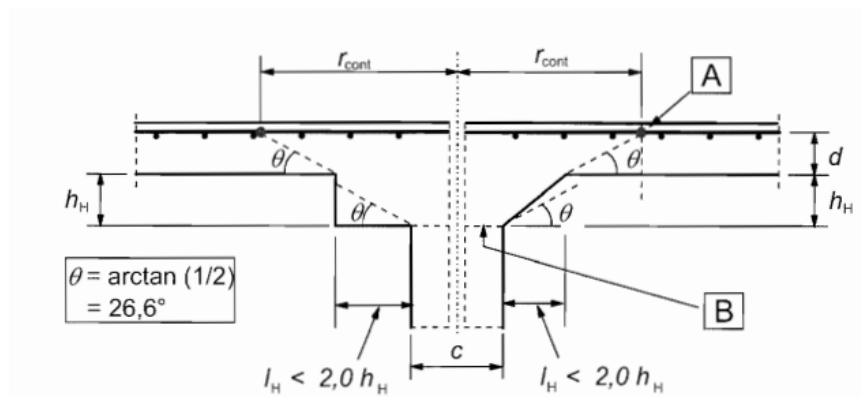
$$r_{cont} = 2d + l_H + 0,5c \quad (2.3)$$

όπου, d το μέσο στατικό ύψος της πλάκας, l_H το μήκος της διαπλάτυνσης (η απόσταση μεταξύ του περιγράμματος του στύλου και αυτού της διαπλάτυνσης), c η διάμετρος του στύλου.

Ενώ για ορθογωνικά υποστυλώματα η ακτίνα αυτή ισούται με:

$$r_{cont} = \min(2d + 0,56\sqrt{l_1 l_2}; 2d + 0,69l_i) \quad (2.4)$$

όπου, d το μέσο στατικό ύψος της πλάκας, l_1 και l_2 οι διαστάσεις της ορθογωνικής διαπλάτυνσης ($l_1 = c_1 + 2l_{H1}$, $l_2 = c_2 + 2l_{H2}$ με $l_1 \leq l_2$).



Εικόνα 2.5: Πλάκα όπου στη διαπλάτυνση της κεφαλής του υποστυλώματος ισχύει $l_H < 2h_H$, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A: Βασική διατομή ελέγχου, B: Φορτιζόμενη επιφάνεια)

- Η δεύτερη κατηγορία αφορά τις περιπτώσεις όπου $l_H \geq 2h_H$

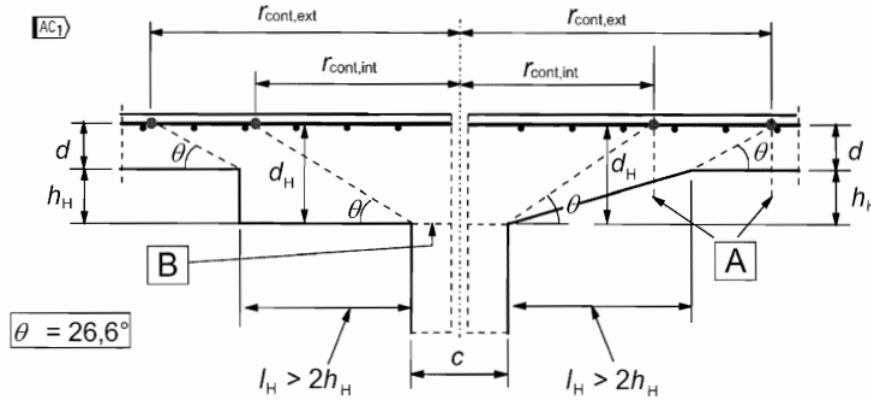
Στην προκειμένη περίπτωση πραγματοποιούνται δύο έλεγχοι καθώς δεν μπορεί να προσδιοριστεί ποια επιφάνεια αστοχίας είναι δυσμενέστερη. Στον πρώτο έλεγχο θεωρείται φορτίζουσα επιφάνεια η διαπλάτυνση και στατικό ύψος το d της πλάκας, ενώ στον δεύτερο το υποστυλώμα και το άθροισμα $d+h_H$ αντίστοιχα.

Για κυκλικά υποστυλώματα οι βασικές περιμέτροι ελέγχου λαμβάνονται απλοποιητικά ως κύκλοι με κέντρο αυτό του στύλου και ακτίνες ίσες με:

$$r_{cont,ext} = 2d + l_H + 0,5c \quad (2.5)$$

$$r_{cont,int} = 2(d + h_H) + 0,5c \quad (2.6)$$

όπου, d το μέσο στατικό ύψος της πλάκας, l_H το μήκος της διαπλάτυνσης, h_H το ύψος της διαπλάτυνσης και c η διάμετρος του στύλου.



Εικόνα 2.6: Πλάκα όπου στη διαπλάτυνση της κεφαλής του υποστυλώματος ισχύει $l_H \geq 2h_H$, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A: Βασικές διατομές ελέγχου, B: Φορτιζόμενη επιφάνεια)

2.2.4 Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης

Στην Εξίσωση (2.1) παρατίθεται η σχέση υπολογισμού της δρώσας διατμητικής τάσεως η οποία περιλαμβάνει τον όρο “ β ”, δηλαδή έναν αυξητικό συντελεστή μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψιν η εκκεντρότητα της φόρτισης. Ανάλογα με τη θέση του εξεταζόμενου υποστυλώματος ως προς την κάτοψη του κτιρίου προκύπτει και η διαδικασία υπολογισμού του συγκεκριμένου συντελεστή, καθώς και της ανάλογης περιμέτρου ελέγχου.

- Εσωτερικά υποστυλώματα

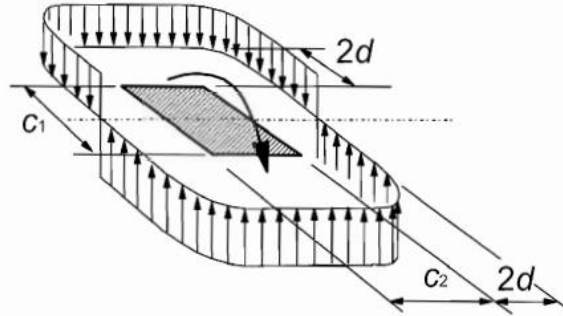
Για εσωτερικά υποστυλώματα τα οποία φορτίζονται έκκεντρα, ο συντελεστής β υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_1} \quad (2.7)$$

όπου, k συντελεστής που εξαρτάται από το λόγο των πλευρών c_1 και c_2 του υποστυλώματος (c_1 κάθετη με το διάνυσμα της ροπής), M_{Ed} η δρώσα ροπή σχεδιασμού, V_{Ed} η δρώσα τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού, u_1 η βασική περίμετρος ελέγχου και W_1 όρος που αφορά την κατανομή της τέμνουσας όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.7 ως συνάρτηση της περιμέτρου u_1 .

Πίνακας 2.1: Τιμές του συντελεστή k συναρτήσει του λόγου c_1/c_2

c_1/c_2	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,60	0,70	0,80



Εικόνα 2.7: Κατανομή της τέμνουσας λόγω ροπής σε μία σύνδεση πλάκας-εσωτερικού υποστυλώματος, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

Ο όρος W_1 υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$W_1 = \int_0^{u_i} |e| dl \quad (2.8)$$

όπου, dl στοιχειώδες μήκος πάνω στην περίμετρο και e η απόσταση του dl από τον άξονα περί τον οποίο δρα η ροπή M_{Ed} .

Για ορθογωνικά υποστυλώματα η σχέση παίρνει τη μορφή:

$$W_1 = 0,5c_1^2 + c_1c_2 + 4c_2d + 16d^2 + 2\pi dc_1 \quad (2.9)$$

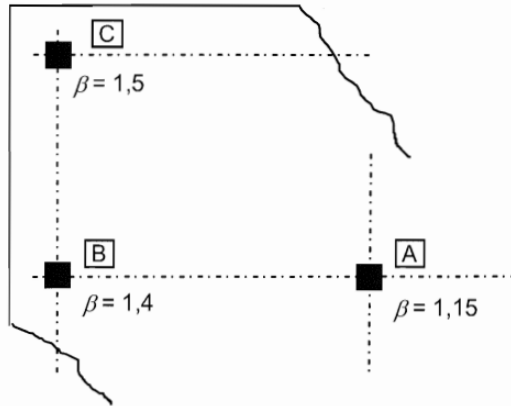
όπου, c_1 η πλευρά του στύλου που είναι παράλληλη με την εκκεντρότητα (κάθετη στο διάνυσμα της ροπής) και c_2 η πλευρά του στύλου που είναι κάθετη με την εκκεντρότητα.

Για κυκλικά (εσωτερικά) υποστυλώματα ο συντελεστής β υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\beta = 1 + 0,6\pi \frac{e}{D + 4d} \quad (2.10)$$

όπου, D η διάμετρος του στύλου και e η εκκεντρότητα του εφαρμοζόμενου φορτίου ($= M_{Ed}/V_{Ed}$).

Σε φορείς των οποίων η ευστάθεια, υπό οριζόντια φορτία, δεν εξαρτάται από την πλαισιακή λειτουργία πλακών-υποστυλωμάτων και στους οποίους τα γειτονικά ανοίγματα δεν διαφέρουν παραπάνω από 25%, ο συντελεστής β μπορεί προσεγγιστικά να ληφθεί ίσος με τις αντίστοιχες τιμές της Εικόνας 2.8.



Εικόνα 2.8: Συνιστώμενες προσεγγιστικές τιμές για το β , πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A:Εσωτερικό υποστύλωμα, B: Περιμετρικό υποστύλωμα, C: Γωνιακό υποστύλωμα)

Οι παραπάνω σχέσεις αφορούν εσωτερικά υποστυλώματα υπό μονοαξονική έκκεντρη φόρτιση λόγω ροπής. Στην περίπτωση όπου ασκείται διαξονική ροπή στον στύλο, χρησιμοποιείται η ακόλουθη προσεγγιστική σχέση για τον υπολογισμό του β :

$$\beta = 1 + 1,8 \sqrt{\left(\frac{e_y}{b_z}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b_y}\right)^2} \quad (2.11)$$

όπου, e_y και e_z οι εκκεντρότητες κατά τον άξονα y και z (αποτέλεσμα της ροπής περί τον άξονα z και y αντίστοιχα), b_y και b_z οι διαστάσεις της περιμέτρου ελέγχου u_1 (Εικόνα 2.2).

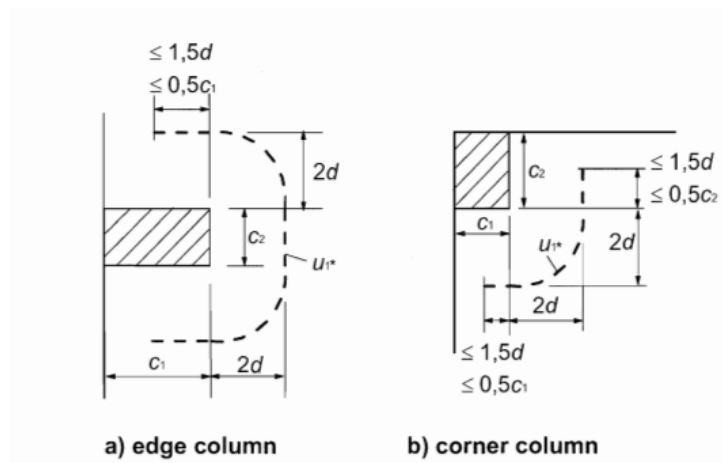
- Περιμετρικά υποστυλώματα

Για περιμετρικά υποστυλώματα όπου η κάθετη με το άκρο της πλάκας εκκεντρότητα (αποτέλεσμα ροπής παράλληλη με το ίδιο), είναι προς το εσωτερικό της και δεν υπάρχει εκκεντρότητα στην άλλη διεύθυνση, η βασική περίμετρος ελέγχου μπορεί να θεωρηθεί η u_1 όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9.

Αν υπάρχει εκκεντρότητα και στις δύο διευθύνσεις, ο συντελεστής β λαμβάνεται ίσος με:

$$\beta = \frac{u_1}{u_1'} + k \frac{u_1}{W_1} e_{par} \quad (2.12)$$

όπου, u_1 η βασική περίμετρος ελέγχου, u_1' η απομειωμένη βασική περίμετρος ελέγχου, k ο συντελεστής που προκύπτει από τον Πίνακα 2.1 αντικαθιστώντας το λόγο c_1/c_2 με $c_1/2c_2$, W_1 υπολογίζεται για την περίμετρο u_1 από την Εξίσωση (2.8), e_{par} η παράλληλη με το άκρο της πλάκας εκκεντρότητα.



Εικόνα 2.9: Μειωμένη βασική περίμετρος ελέγχου u_1 , πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

Για ορθογωνικά υποστυλώματα ο όρος W_1 υπολογίζεται από τη σχέση:

$$W_1 = 0,25c_1^2 + c_1c_2 + 4c_1d + 8d^2 + pdc_2 \quad (2.13)$$

Αν η κάθετη με το άκρο της πλάκας εκκεντρότητα δεν είναι προς το εσωτερικό της, χρησιμοποιείται η Εξίσωση (2.7). Κατά τον υπολογισμό του W_1 η απόσταση e μετριέται από τον άξονα που διέρχεται από το κέντρο της περιμέτρου ελέγχου.

Όσον αφορά την περίμετρο u_0 , η ίδια λαμβάνεται ίση με $u_0 = c_2 + 3d$, δεδομένου ότι αυτή η τιμή δεν υπερβαίνει την περίμετρο του υποστυλώματος ($= c_2 + 2c_1$). Οι διαστάσεις c_1, c_2 ορίζονται στην Εικόνα 2.9.

- Γωνιακά υποστυλώματα

Για γωνιακά υποστυλώματα όπου η εκκεντρότητα είναι προς το εσωτερικό της πλάκας, βασική περίμετρος ελέγχου λαμβάνεται η απομειωμένη u_1 όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.9. Η τιμή του συντελεστή β υπολογίζεται ως:

$$\beta = \frac{u_1}{u_0} \quad (2.14)$$

Στην περίπτωση που η εκκεντρότητα είναι προς το εξωτερικό, χρησιμοποιείται η Εξίσωση (2.7).

Όσον αφορά την περίμετρο u_0 , η ίδια λαμβάνεται ίση με $u_0 = 3d$, δεδομένου ότι αυτή η τιμή δεν υπερβαίνει την περίμετρο του υποστυλώματος ($= c_1 + c_2$). Οι διαστάσεις c_1, c_2 ορίζονται στην Εικόνα 2.9.

2.3 Τέμνουσες αντοχής

2.3.1 Μέγιστη αντοχή σε διάτρηση

Ο πρώτος έλεγχος έναντι διάτρησης που πραγματοποιείται σε μία σύνδεση πλάκας-υποστυλώματος είναι αυτός που καθορίζει αν επαρκούν οι διαστάσεις. Προϋπόθεση ώστε να μην απαιτείται αλλαγή διαστάσεων είναι η δρώσα διατμητική τάση $v_{Ed(u0)}$, στην περίμετρο της φορτιζόμενης επιφάνειας u_0 , να μην υπερβαίνει την μέγιστη αντοχή $v_{Rd,max}$, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$v_{Rd,max} = 0,5 v f_{cd} \quad (2.15)$$

όπου f_{cd} η θλιπτική αντοχή σχεδιασμού του σκυροδέματος, v μειωτικός συντελεστής της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος λόγω της παρουσίας εγκάρσιου εφελκυσμού που ισούται με:

$$v = 0,6 (1 - f_{ck}/250) \quad (2.16)$$

όπου f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa.

2.3.2 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης

Η αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης αφορά τη βασική περίμετρο ελέγχου και υπολογίζεται (σε MPa) μέσω της ακόλουθης σχέσης (όμοια με την αντίστοιχη σχέση της διάτμησης):

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp}) \quad (2.17)$$

όπου,

$C_{Rd,c}$ συντελεστής του οποίου η τιμή μπορεί να βρεθεί στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Προτείνεται να λαμβάνεται ίσος με $0,18/\gamma_c$ (γ_c ο συντελεστής ασφαλείας του σκυροδέματος ίσος με 1,5).

k συντελεστής που προκύπτει από τη σχέση:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (d \text{ σε mm}) \quad (2.18)$$

ρ_l το γεωμετρικό ποσοστό εφελκυσμένου οπλισμού κάμψης ($= (\rho_{ly} \rho_{lz})^{0,5}$) με μέγιστη τιμή το 0,02. Τα γεωμετρικά ποσοστά, ρ_{ly} και ρ_{lz} , αναφέρονται στον εφελκυσμένο οπλισμό κάμψης, με συνάφεια, στις διευθύνσεις y και z αντίστοιχα και υπολογίζονται ως μέσες τιμές, θεωρώντας ένα πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστυλώματος συν $3d$ σε κάθε πλευρά.

f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε MPa

k_1 συντελεστής του οποίου η τιμή μπορεί να βρεθεί στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας, ωστόσο προτείνεται να λαμβάνεται ίσος με 0,1

σ_{cp} η μέγιστη θλιπτική τάση που επιβάλλεται στη διατομή της πλάκας (συνήθως λόγω προεντάσεως), στην περιοχή του υποστυλώματος και ισούται με:

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2 \quad (2.19)$$

όπου, σ_{cy} και σ_{cz} οι ορθές τάσεις στην κρίσιμη διατομή σκυροδέματος στις διευθύνσεις y και z αντίστοιχα (σε MPa και θετικές για θλίψη). Ισχύει $\sigma_{ci} = N_{Ed,i} / A_{ci}$, όπου $N_{Ed,i}$ η αξονική δύναμη, σε ολόκληρο το φάτνωμα για εσωτερικά υποστυλώματα και στη διατομή ελέγχου για περιμετρικά, και A_{ci} το εμβαδόν της διατομής σκυροδέματος, σύμφωνα με τον ορισμό της N_{Ed} .

v_{min} η ελάχιστη τιμή της αντοχής σε διάτρηση μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης (ανεξαρτήτως της επιρροής ορθών τάσεων), η οποία υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (η τιμή της v_{min} διατίθεται και στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας):

$$v_{min} = 0.035 k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad (2.20)$$

Η $v_{Rd,c}$, έτσι όπως προκύπτει από την Εξίσωση (2.17), είναι η τέμνουσα αντοχής της σύνδεσης, χωρίς οπλισμό διάτρησης, ανηγμένη στην επιφάνεια $A_1 = u_1 d$. Εφόσον λοιπόν ικανοποιείται η ανίσωση $v_{Ed(u1)} \leq v_{Rd,c}$, δεν απαιτείται οπλισμός διάτρησης, διαφορετικά τοποθετείται σύμφωνα με τη διαδικασία και τις διατάξεις που περιγράφονται παρακάτω.

2.3.3 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας με οπλισμό διάτρησης

Ο οπλισμός διάτρησης μπορεί να αποτελείται από δίμητους κλειστούς συνδετήρες, πολύμητους ανοικτούς συνδετήρες μορφής κυλινδρικού μαιάνδρου, ήλους διπλής κεφαλής ή άλλα βιομηχανικά προϊόντα. Οι βασικές μορφές του παρατίθενται στην Εικόνα 2.10, με συνηθέστερη και απλούστερη την περίπτωση των κλειστών συνδετήρων. Οι οπλισμοί τοποθετούνται σε περιμέτρους γύρω από το υποστύλωμα, ομοιόθετες προς την βασική περίμετρο ελέγχου, οι οποίες απέχουν μεταξύ τους (ακτινικά) απόσταση s_r . Η τιμή σχεδιασμού $v_{Rd,cs}$ της αντοχής σε διάτρηση μιας πλάκας με οπλισμό διάτρησης δίνεται από τη σχέση:

$$v_{Rd,cs} = 0,75 v_{Rd,c} + 1,5 (d/s_r) A_{sw} f_{ywd,ef} (1/(u_1 d)) \sin \alpha \leq 1.5 v_{Rd,c} \quad (2.21)$$

όπου,

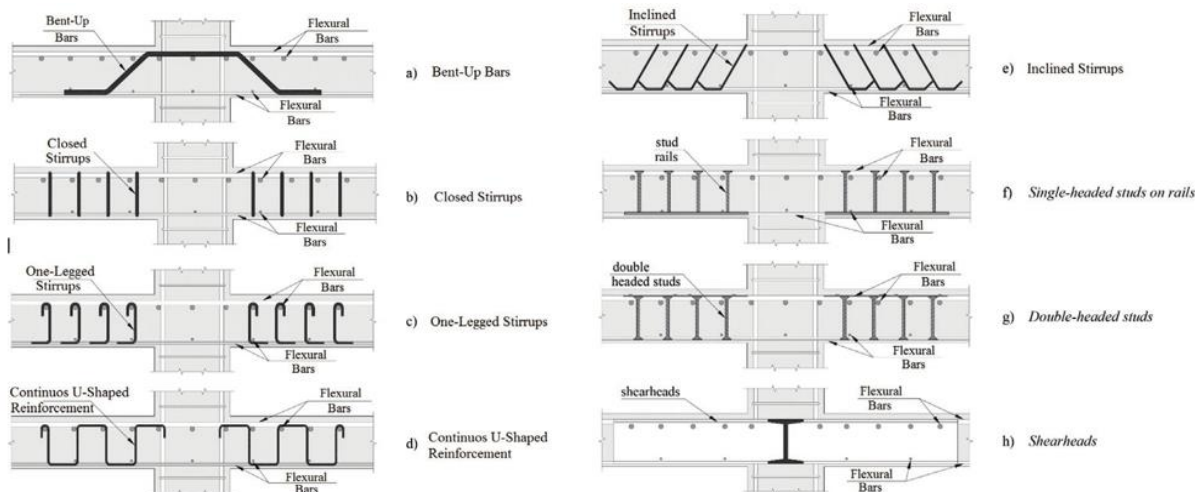
A_{sw} είναι το συνολικό εμβαδόν (λαμβάνονται υπόψιν οι τμήσεις του συνδετήρα) του οπλισμού διάτρησης σε μία από τις περιμέτρους γύρω από το υποστύλωμα (σε mm²)

s_r η ακτινική απόσταση των περιμέτρων του οπλισμού διάτρησης, σε περίπτωση όπλισης μίας περιμέτρου ο λόγος d/s_r μπορεί να λάβει την τιμή 0,67 (σε mm)

$f_{ywd,ef}$ η ενεργός τιμή σχεδιασμού της αντοχής του οπλισμού διάτρησης, με $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$ (σε MPa)

d το μέσο στατικό ύψος της πλάκας (σε mm)

α η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτρησης με το επίπεδο της πλάκας (συνήθως 90°)



Εικόνα 2.10: Μορφές οπλισμού διάτρησης, πηγή: (IBRACON Structures and Materials Journal, 2013)

Να σημειωθεί πως η μέγιστη ικανότητα, $v_{Rd,cs,max}$, που μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση οπλισμού διάτρησης ισούται με $1.5v_{Rd,c}$, καθώς θεωρείται πως αν η δρώσα διατμητική τάση (στην περίμετρο u_1) υπερβαίνει την συγκεκριμένη τιμή, υπάρχει κίνδυνος αστοχίας του σκυροδέματος υπό θλίψη. Στην περίπτωση αυτή κρίνεται αποτελεσματική η αλλαγή των διαστάσεων και όχι η τοποθέτηση οπλισμού.

Με βάση την Εξίσωση (2.21) περιγράφεται η διαδικασία όπλισης έναντι διάτρησης (εφόσον έχει αποδειχθεί ότι απαιτείται) μιας σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος:

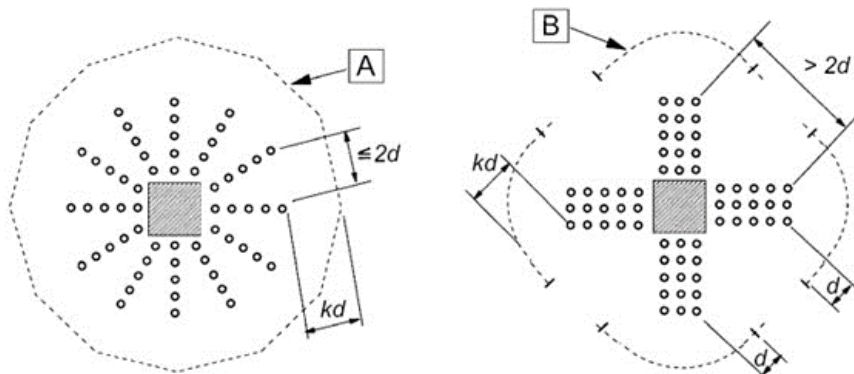
- 1) Επιλέγεται ο τρόπος τοποθέτησης του οπλισμού, καθώς και η γωνία α που διαγράφεται μεταξύ των σκελών του και του επιπέδου της πλάκας. Στην Εικόνα 2.11 παρουσιάζονται δύο ενδεικτικοί τρόποι. Αριστερά η τοποθέτηση των συνδετήρων γίνεται ακτινικά, ενώ δεξιά γίνεται ορθογωνικά, με την δεύτερη περίπτωση να συνδυάζεται καλύτερα με τους οπλισμούς κάμψης, οι οποίοι εκτείνονται κατά τις ίδιες διευθύνσεις.
- 2) Εκτιμάται η ακτινική απόσταση s_r μεταξύ των περιμέτρων τοποθέτησης των συνδετήρων. Η τιμή που επιλέγεται πρέπει να ικανοποιεί την ανίσωση $s_r \leq 0,75d$.
- 3) Γνωρίζοντας πλέον όλες τις απαραίτητες παραμέτρους, εξισώνεται η δρώσα διατμητική τάση $v_{Ed(u_1)}$ με την τιμή σχεδιασμού $v_{Rd,cs}$ της αντοχής σε διάτρηση μιας πλάκας με οπλισμό

διάτρησης, μέσω της Εξίσωσης (2.21). Ο μόνος άγνωστος στο δεύτερο σκέλος της εξίσωσης είναι ο όρος “ A_{sw} ”. Έτσι λοιπόν προκύπτει το συνολικό εμβαδόν του απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης, ανά περίμετρο όπλισης.

- 4) Προσδιορίζεται η εξώτατη περίμετρος u_{out} (ή $u_{out,ef}$), πέραν της οποίας δεν απαιτείται οπλισμός διάτρησης. Το μήκος της υπολογίζεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο §2.2.2 και η μορφή της εξαρτάται από τη διάταξη τοποθέτησης των συνδετήρων, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.11. Με βάση τη γεωμετρία προκύπτει η απόσταση, έστω b_{out} , της εξώτατης περιμέτρου u_{out} από το υποστύλωμα.
- 5) Η τοποθέτηση του οπλισμού ξεκινά σε περίμετρο απόστασης b_1 από το υποστύλωμα, η οποία πρέπει να ικανοποιεί την ανίσωση $0,3d \leq b_1 \leq 0,5d$ (συνήθως λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή). Η τελευταία περίμετρος πρέπει να απέχει από την u_{out} απόσταση $b_2 \leq kd$, δηλαδή από το υποστύλωμα απόσταση μεγαλύτερη ή ίση με $b_{out} - kd$. Η τιμή του k βρίσκεται στο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας, ωστόσο προτείνεται να λαμβάνεται ίση με 1,5. Ο αριθμός των περιμέτρων τοποθέτησης των οπλισμών θα προκύψει με βάση τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις και την μεταξύ τους απόσταση s_r , από το Βήμα 2.
- 6) Το πλήθος και η διάμετρος των συνδετήρων προσδιορίζονται με βάση κάποιες κανονιστικές διατάξεις που πρέπει να ικανοποιούνται. Η απόσταση s_t μεταξύ των συνδετήρων κατά μήκος κάθε περιμέτρου δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή $1,5d$, για οπλισμούς εντός της βασικής περιμέτρου ελέγχου u_1 , και $2d$, για ράβδους εκτός της ίδιας. Τέλος, το ελάχιστο εμβαδόν κάθε σκέλους των συνδετήρων πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση:

$$A_{sw,min} (1,5 \sin \alpha + \cos \alpha) / (s_r s_t) \geq 0,08 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \quad (2.22)$$

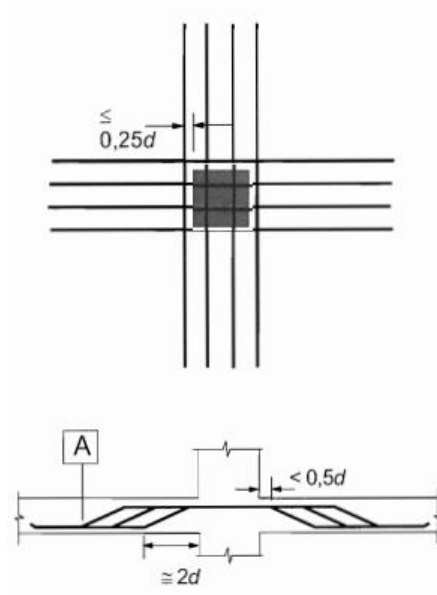
όπου, α η γωνία μεταξύ του οπλισμού διάτρησης και του κύριου οπλισμού, s_r η ακτινική απόσταση μεταξύ των περιμέτρων, s_t η απόσταση των συνδετήρων κατά μήκος της περιμέτρου, f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (σε MPa) και f_{yk} η χαρακτηριστική αντοχή του χάλυβα (σε MPa).



Εικόνα 2.11: Διατάξεις οπλισμού διάτρησης για εσωτερικούς στύλους, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A: Ακτινωτή διάταξη/ Περίμετρος u_{out} , B: Σταυροειδής διάταξη/ Περίμετρος $u_{out,ef}$)

Οι κεκαμμένες ράβδοι μπορούν να θεωρηθούν οπλισμός έναντι διάτρησης, εφόσον οι ίδιες διαπερνούν την φορτιζόμενη επιφάνεια ή βρίσκονται σε απόσταση μικρότερη από $0,25d$ από εκείνη. Για κεκαμμένες ράβδους, όπως φαίνονται στην Εικόνα 2.12, μία περίμετρος όπλισης θεωρείται επαρκής, δεδομένου ότι η κλίση τους τίθεται στις 30° .



Εικόνα 2.12: Διατάξεις για κεκαμμένες ράβδους ως οπλισμό διάτρησης, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

(A: Εξώτατη περίμετρος που απαιτείται διατμητικός οπλισμός)

3 Διάτρηση πλακών κατά EK2 (FprEN 1992-1-1:2023)

3.1 Εισαγωγή

Ο Model Code αποτελεί έναν διεθνή κανονισμό που συντάσσεται από τη Διεθνή Ομοσπονδία Δομικών Σκυροδέματος FIB (International Federation for Structural Concrete) και αφορά το σχεδιασμό, την κατασκευή και τη συντήρηση των κατασκευών από σκυρόδεμα. Εμπεριέχει το θεωρητικό υπόβαθρο στο οποίο βασίζονται οι κώδικες σχεδιασμού διαφόρων κρατών. Η ανανέωσή του γίνεται κάθε δέκα χρόνια, ώστε να συμπεριληφθούν οι εκάστοτε εξελίξεις που προκύπτουν από πειραματικά ευρήματα και έρευνες.

Ο Model Code γενικά εντάσσει την έννοια των διαφόρων Επιπέδων Προσέγγισης (Levels of Approximation) που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε μία μελέτη. Η βασική ιδέα είναι πως η απαιτούμενη ακρίβεια της ανάλυσης αυξάνεται σε ειδικές περιπτώσεις και με την πάροδο της μελέτης (Muttoni A., Ruiz MF., 2012). Με γνώμονα την εξοικονόμηση χρόνου δεν επιδιώκεται μεγαλύτερη ακρίβεια αν δεν κρίνεται απαραίτητη. Οι ασφαλείς υποθέσεις προσφέρουν μια αρχική εικόνα του φορέα και των μηχανισμών αστοχίας του, ενώ ο λεπτομερής υπολογισμός των παραμέτρων των εξισώσεων, μέσω αριθμητικών αναλύσεων, οδηγεί σε ακριβέστερο προσδιορισμό της αντοχής κρίσιμων μελών και σε ενδεχόμενη εξοικονόμηση χρημάτων κατά την κατασκευή. Το πρώτο Επίπεδο Προσέγγισης λοιπόν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την προδιαστασιολόγηση, το δεύτερο προτείνεται για το σχεδιασμό νέων κατασκευών, το τρίτο για ειδικές περιπτώσεις (π.χ. περίπλοκους μηχανισμούς αστοχίας) ή γενικά για την ανάλυση μιας υφιστάμενης κατασκευής και τέλος, το τέταρτο Επίπεδο επίσης για ειδικές περιπτώσεις και ακριβή αξιολόγηση μιας υφιστάμενης κατασκευής (Genikomsou A.S., 2015).

Ο Model Code 2020 (MC2020) αποτελεί την πιο πρόσφατη έκδοση. Όσον αφορά τη διάτρηση, βασίζεται στη Θεωρία της Κρίσιμης Διατμητικής Ρηγμάτωσης (Critical Shear Crack Theory) του Muttoni, όπου η αντοχή έναντι διάτρησης εξαρτάται από τη γωνία στροφής της πλάκας (παράγραφος §1.3). Συγκριτικά με την προγενέστερη έκδοση, MC2010 (Muttoni A., 2022):

- ✓ Λαμβάνονται υπόψιν οι νέες προδιαγραφές για το οπλισμένο σκυρόδεμα.
- ✓ Λαμβάνεται υπόψιν η επιρροή των τάξεων ολκιμότητας του οπλισμού.
- ✓ Παρέχονται καλύτερες και πρόσθετες οδηγίες σχετικά με τη χρήση των διαφόρων Επιπέδων Προσέγγισης.
- ✓ Εφαρμόζεται ένα νέο μοντέλο μεταφοράς των φορτίων στην στήριξη μέσω δράσης θλιπτήρων.
- ✓ Επεξηγούνται οι ομοιότητες εξισώσεων κλειστής μορφής με προσεγγίσεις που βασίζονται στις ανηγμένες παραμορφώσεις.
- ✓ Παρέχονται στατιστικά δεδομένα για λεπτομερή αξιολόγηση υφιστάμενων κατασκευών.

Η δεύτερη γενιά Ευρωκωδίκων λοιπόν, συμβαδίζει με τις παραπάνω αλλαγές, ώστε ο σχεδιασμός έναντι διάτρησης να έρχεται σύμφωνος με τα νέα δεδομένα. Το φαινόμενο της

διάτρησης εμπεριέχεται στο Επίπεδο Προσέγγισης III, οπότε χρησιμοποιούνται οι ανάλογες εξισώσεις. Προκειμένου να διευκολύνεται η χρήση των εξισώσεων από τους μελετητές, παρατίθενται απλοποιημένες σχέσεις κλειστής μορφής, οι οποίες έχει αποδειχτεί πως περιγράφουν ικανοποιητικά την πραγματικότητα, σύμφωνα με τη Θεωρία της Κρίσιμης Διατμητικής Ρηγμάτωσης.

3.2 Βασικές έννοιες

3.2.1 Διαδικασία υπολογισμών

Οι κανονιστικές διατάξεις που παρουσιάζονται καλύπτουν το φαινόμενο της διάτρησης σε συμπαγείς και δοκιδωτές (με συμπαγή τμήματα στις κεφαλές των υποστυλωμάτων) πλάκες χωρίς δοκούς. Οι κανόνες έχουν εφαρμογή κατ' αναλογία και στην περίπτωση των θεμελίων. Κατά τον σχεδιασμό έναντι διάτρησης πραγματοποιούνται οι ακόλουθοι έλεγχοι:

$$\checkmark \tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,c,min}$$

Εφόσον η δρώσα διατμητική τάση τ_{Ed} εκτός της περιμέτρου ελέγχου $b_{0,5}$ είναι μικρότερη ή ίση της ελάχιστης διατμητικής αντοχής $\tau_{Rd,c,min}$, οι λεπτομερείς υπολογισμοί για τον προσδιορισμό της διατμητικής αντοχής της σύνδεσης παραλείπονται. Η ελάχιστη διατμητική αντοχή εξασφαλίζει πως το δομικό μέλος θα φτάσει τη διατμητική αντοχή του για το ίδιο φορτίο για το οποίο θα διαρρεύσει ο εφελκόμενος οπλισμός του και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{Rd,c,min} = \frac{11}{\gamma_V} \sqrt{\frac{f_{ck} d_{dg}}{f_{yd} d}} \quad (3.1)$$

όπου, γ_V ο μερικός συντελεστής ασφαλείας για σχεδιασμό έναντι τέμνουσας σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνας 3.1 (ή τον Πίνακα A.1a/b του Παραρτήματος Α της νέας έκδοσης του Ευρωκώδικα 2 για ειδικές περιπτώσεις), f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος, f_{yd} η τιμή σχεδιασμού της αντοχής του χάλυβα των οπλισμών κάμψης ($=f_{yk}/\gamma_s$ όπου γ_s ο συντελεστής ασφαλείας του χάλυβα που λαμβάνεται από τους ίδιους πίνακες με το γ_V), d το μέσο στατικό ύψος της πλάκας (σε mm) όπως υπολογίζεται στην Εξίσωση (3.2), d_{dg} παράμετρος μεγέθους (σε mm) που περιγράφει την τραχύτητα της ζώνης αστοχίας η οποία εξαρτάται από τον τύπο του σκυροδέματος και τις ιδιότητες των αδρανών και ισούται με:

- $16 \text{ mm} + D_{lower} \leq 40 \text{ mm}$ για σκυρόδεμα με $f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$
- $16 \text{ mm} + D_{lower} (60/f_{ck})^4 \leq 40 \text{ mm}$ για σκυρόδεμα με $f_{ck} > 60 \text{ MPa}$

όπου, D_{lower} η μικρότερη τιμή του μεγέθους D του ανώτατου κοσκίνου σε ένα αδρανές, για το πιο χονδρό κλάσμα των αδρανών, στο σκυρόδεμα, που επιτρέπεται από τις προδιαγραφές του σκυροδέματος (EN 206). Πρόκειται ουσιαστικά για τη μέγιστη ονομαστική διάσταση αδρανών d_{max}) του χρησιμοποιούμενου σκυροδέματος.

Design situations — Limit states	γ_s for reinforcing and prestressing steel	γ_c and γ_{CE} for concrete	γ_v for shear and punching resistance without shear reinforcement
Persistent and transient design situation	1,15	1,50 ^a	1,40
Fatigue design situation	1,15	1,50	1,40
Accidental design situation	1,00	1,15	1,15
Serviceability limit state	1,00	1,00	–
NOTE The partial factors for materials correspond to geometrical deviations of Tolerance Class 1 and Execution Class 2 in EN 13670.			
^a The value for γ_{CE} apply when the indicative value for the elastic modulus according 5.1.4(2) is used. A value $\gamma_{CE} = 1,3$ apply when the elastic modulus is determined according to 5.1.4(1).			

Εικόνα 3.1: Πίνακας 4.3 νέας έκδοσης ΕΚ2 για τον προσδιορισμό των συντελεστών ασφαλείας υλικών, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

✓ $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,c}$

Σε περίπτωση που η δρώσα διατμητική τάση τ_{Ed} στην περίμετρο $b_{0,5}$ δεν ξεπερνά την τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση μιάς πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης $\tau_{Rd,c}$ (Εξίσωση (3.5)), δεν απαιτείται η προσθήκη διατμητικού οπλισμού στην περιοχή της πλάκας γύρω από το υποστύλωμα.

✓ $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,max}$

Δεδομένου ότι δεν ικανοποιείται η προαναφερθείσα σχέση (άρα ισχύει $\tau_{Ed} > \tau_{Rd,c}$) και επομένως απαιτείται τοποθέτηση διατμητικού οπλισμού, η δρώσα διατμητική τάση τ_{Ed} στην περίμετρο ελέγχου $b_{0,5}$ δεν πρέπει να υπερβαίνει τη μέγιστη τιμή σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής $\tau_{Rd,max}$ (Εξίσωση (3.15)). Σε περίπτωση υπέρβασης συνιστάται αλλαγή των διαστάσεων της σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος καθώς η προσθήκη οπλισμού θεωρείται μη αποτελεσματική.

✓ $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,cs}$

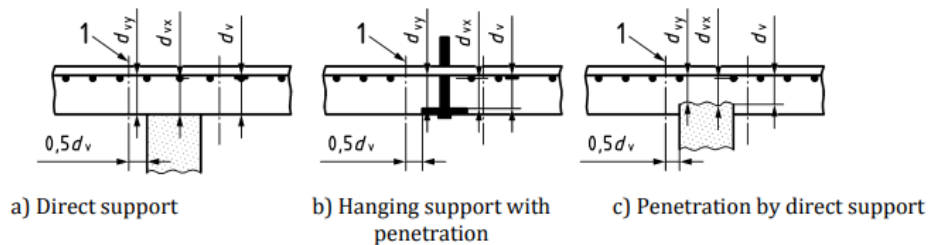
Αφού έχουν επιλεγθεί κατάλληλες διαστάσεις, ώστε να ικανοποιείται η προηγούμενη σχέση, υπολογίζεται το εμβαδόν του απαιτούμενου διατμητικού οπλισμού, τέτοιο ώστε η τιμή σχεδιασμού της διατμητικής αντοχής σε πλάκα με οπλισμό διάτρησης (σύμφωνα με την Εξίσωση (3.11)) να είναι επαρκής. Ο τοποθετούμενος οπλισμός πρέπει επίσης να ικανοποιεί της κατασκευαστικές διατάξεις που περιγράφονται στην παράγραφο §3.3.2.

3.2.2 Περίμετροι ελέγχου

Για την παρουσίαση των περιμέτρων ελέγχου πρέπει αρχικά να οριστεί το στατικό ύψος, έναντι διάτμησης, της πλάκας d_v . Η τιμή του ισούται με την απόσταση μεταξύ της περιοχής στήριξης και του μέσου επιπέδου των στρώσεων οπλισμού και υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

$$d_v = \frac{d_{vx} + d_{vy}}{2} \quad (3.2)$$

όπου, d_{vx} και d_{vy} τα στατικά ύψη των διαμήκων οπλισμών της πλάκας, οι οποίοι εκτείνονται σε κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις κατά τους άξονες x και y αντίστοιχα. Στην Εικόνα 3.2 ορίζονται οι αποστάσεις d_{vx} και d_{vy} με βάση τους διάφορους τύπους στηρίξεων. Να σημειωθεί πως για να συμπεριλαμβάνεται η στήριξη στην κατηγορία (c) της Εικόνας 3.1, πρέπει η διείσδυση να είναι μεγαλύτερη της τιμής $d/20$.

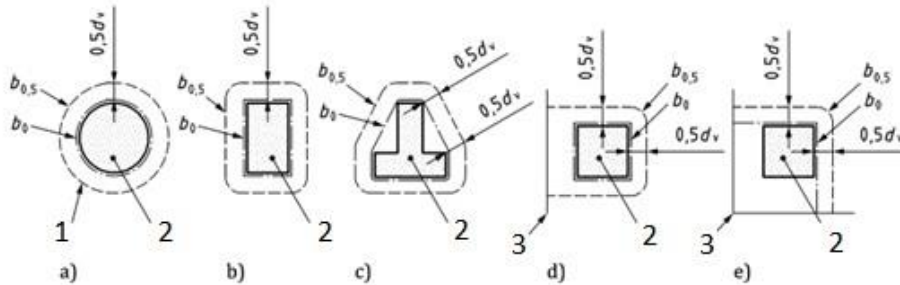


Εικόνα 3.2: Στατικό ύψος, έναντι διάτμησης, της πλάκας d_v με βάση το επίπεδο της περιοχής στήριξης (a: Άμεση στήριξη, b: Κρεμαστή στήριξη με διείσδυση, c: Διείσδυση από άμεση στήριξη), πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

Η περίμετρος b_0 αφορά την περίμετρο της επιφάνειας στήριξης και σχεδιάζεται έτσι ώστε το μήκος της να είναι το μικρότερο δυνατό. Για παράδειγμα, σε υποστυλώματα σχήματος Γ ή T δεν λαμβάνεται το περίγραμμά τους αλλά ένα κυρτό πολύγωνο όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3(c). Εξαιρέση αποτελεί και η περίπτωση των περιμετρικών ή γωνιακών υποστυλωμάτων, τα οποία αν βρίσκονται αρκετά κοντά στα άκρα της πλάκας μπορεί να έχουν απομειωμένη περίμετρο b_0 , σύμφωνα με την Εικόνα 3.2(e).

Η περίμετρος ελέγχου $b_{0,5}$ είναι ομοιόθετη με την b_0 και απέχει από την ίδια απόσταση $0,5d_v$. Σχεδιάζεται με στρογγυλεμένες γωνίες (Εικόνα 3.3), ώστε να προκύπτει το μικρότερο δυνατό μήκος της.

Εφόσον απαιτείται προσθήκη διατρητικού οπλισμού, σχεδιάζεται μία επιπλέον περίμετρος ελέγχου, $b_{0,5,out}$ (Εξίσωση (3.17)) για τον προσδιορισμό των ορίων τοποθέτησης των συνδετήρων. Εκτός της περιμέτρου $b_{0,5,out}$, η δρώσα διατμητική τάση είναι πλέον τόσο μικρή που το σκυρόδεμα δύναται να την παραλάβει χωρίς προσθήκη διατμητικού οπλισμού.



Εικόνα 3.3: Τυπικά παραδείγματα περιμέτρων b_0 και περιμέτρων ελέγχου $b_{0,5}$, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

(1: Περίμετρος ελέγχου, 2: Επιφάνεια στήριξης, 3: Άκρα πλακών)

3.2.3 Εξαιρέσεις περιμέτρων ελέγχου

Μεγάλα υποστυλώματα

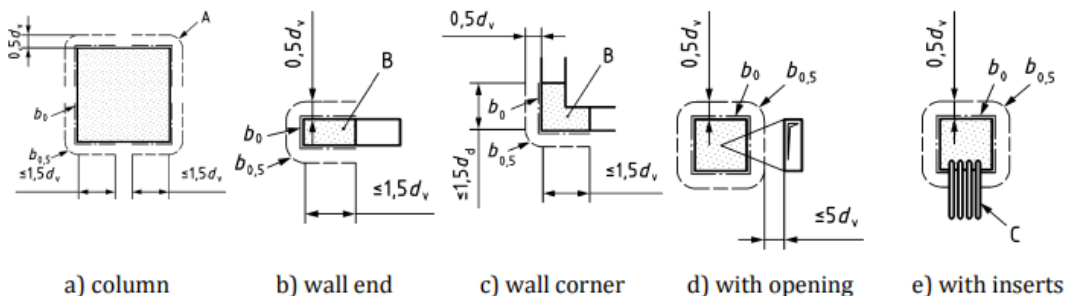
Το μήκος της περιμέτρου ελέγχου λαμβάνεται απομειωμένο σε περιπτώσεις όπου το μήκος των ευθύγραμμων τμημάτων της είναι μεγάλο. Αυτό συμβαίνει διότι η διάτρηση είναι εντονότερη κοντά στις γωνίες των υποστυλωμάτων, καθώς εκεί υπάρχει συγκέντρωση διατμητικών τάσεων. Για μεγάλα υποστυλώματα λοιπόν το ευθύγραμμο τμήμα δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο του $3d_v$, σε κάθε πλευρά, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.4(a).

Άκρες ή γωνίες τοίχων

Στα άκρα και στις γωνίες τοίχων, το φορτίο που παραλαμβάνεται από τις επιφάνειες στήριξης που ορίζονται στις Εικόνες 3.4(b) και (c) πρέπει να εξετάζεται για αντοχή σε διάτρηση, ενώ το φορτίο που παραλαμβάνεται εκτός των επιφανειών στήριξης για αντοχή σε διάτμηση, σύμφωνα με τις υποδείξεις του αντίστοιχου κεφαλαίου του Ευρωκώδικα 2 (§8.2.1 και §8.2.2).

Ανοίγματα ή εσοχές

Η επιρροή ανοιγμάτων ή εσοχών που βρίσκονται σε απόσταση μεγαλύτερη από $5d_v$, από την περίμετρο ελέγχου, μπορεί να αγνοηθεί. Διαφορετικά, το τμήμα της περιμέτρου που εσωκλείεται από τις δύο εφαπτομένες, οι οποίες χαράσσονται από το κέντρο της φορτιζόμενης επιφάνειας και καταλήγουν στο περίγραμμα του ανοίγματος, θεωρείται ανενεργό (Εικόνες 3.4(d) και (e)).

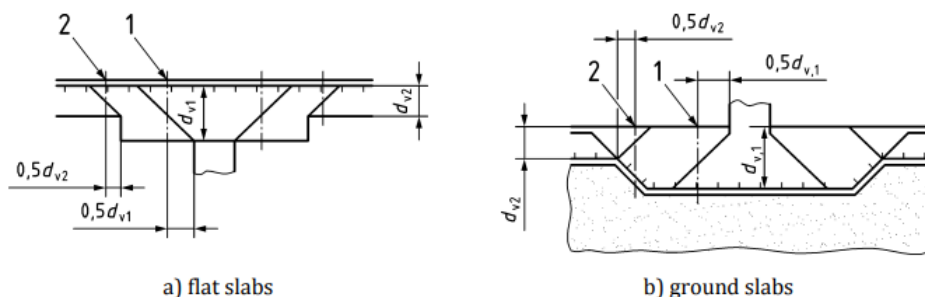


Εικόνα 3.4: Μήκος της περιμέτρου ελέγχου $b_{0,5}$ για μεγάλα υποστυλώματα και υποστυλώματα κοντά σε ανοίγματα ή εσοχές, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

(A: Περίμετρος ελέγχου, B: Επιφάνεια στήριξης, C: Εσοχές)

Πλάκες με μεταβλητό πάχος

Σε περιπτώσεις όπου το πάχος της πλάκας μεταβάλλεται στην περιοχή της κεφαλής του υποστυλώματος, πρέπει να εξετάζονται δύο περιμέτροι ελέγχου και να λαμβάνεται υπόψιν η δυσμενέστερη. Στην πρώτη περίμετρο θεωρείται φορτιζουσα επιφάνεια το υποστυλώμα και το στατικό ύψος μετράται εντός της διαπλάτυνσης, ενώ στη δεύτερη φορτιζουσα επιφάνεια είναι η διαπλάτυνση και το στατικό ύψος αυτό της πλάκας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 3.5. Οι υπολογισμοί γίνονται και στις δύο περιμέτρους καθώς δεν είναι εμφανές εξαρχής ποια προσφέρει τη μικρότερη αντοχή έναντι διάτρησης (η πρώτη έχει μεγαλύτερο d_v αλλά μικρότερη $b_{0,5}$ από τη δεύτερη).



Εικόνα 3.5: Περιμέτροι ελέγχου και στατικά ύψη σε περιοχές αύξησης του πάχους της πλάκας, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

(1: Περίμετρος ελέγχου 1, 2: Περίμετρος ελέγχου 2)

3.2.4 Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης

Η δρώσα διατμητική τάση σχεδιασμού, τ_{Ed} , που αναπτύσσεται στην επιφάνεια ελέγχου $A_v = b_{0,5}d_v$ είναι ουσιαστικά η δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού, ανηγμένη σε αυτή την επιφάνεια και πολλαπλασιασμένη με έναν συντελεστή εκκεντρότητας και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

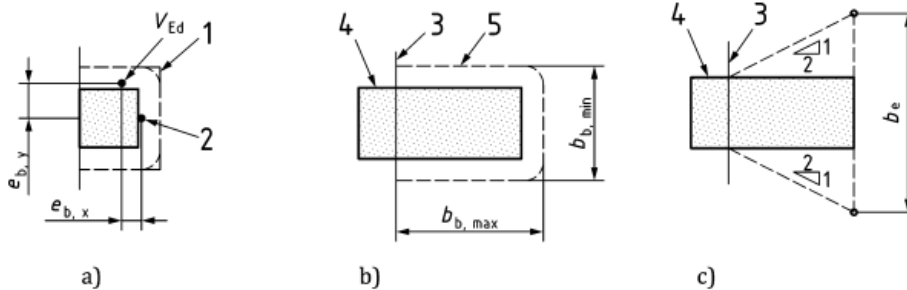
$$\tau_{Ed} = \beta_e \frac{V_{Ed}}{b_{0,5} d_v} \quad (3.3)$$

όπου, V_{Ed} η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού στην αντίστοιχη περίμετρο ελέγχου (αφαιρουμένων όλων των ευνοϊκών φορτίων), $b_{0,5}$ το μήκος της περιμέτρου ελέγχου, d_v το μέσο στατικό ύψος, β_e συντελεστής ο οποίος λαμβάνει υπόψιν τυχόν εκκεντρότητες της φόρτισης λόγω συγκεντρώσεων τεμνουσών δυνάμεων (οι τιμές του δίνονται στον πίνακα της Εικόνας 3.6).

Support	Approximated	Refined ^a	
internal columns	$\beta_e = 1,15$	$\beta_e = 1 + 1,1 \frac{e_b}{b_b}$	where $e_b = \sqrt{e_{b,x}^2 + e_{b,y}^2}$
edge columns	$\beta_e = 1,4$		where $e_b = 0,5 e_{b,x} + e_{b,y} $
corner columns	$\beta_e = 1,5$		where $e_b = 0,27(e_{b,x} + e_{b,y}) \leq 0,45 \cdot b_b$
ends of walls	$\beta_e = 1,4$		
corners of walls	$\beta_e = 1,2$		

Εικόνα 3.6: Πίνακας 8.3 νέας έκδοσης ΕΚ2 για τον προσδιορισμό του συντελεστή εκκεντρότητας β_e , πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

όπου, e_{bx} και e_{by} οι συνιστώσες της εκκεντρότητας της αντίδρασης των τεμνουσών δυνάμεων σε σχέση με το κεντροειδές της περιμέτρου ελέγχου το οποίο μπορεί να υπολογιστεί απλοποιητικά αντικαθιστώντας τα στρογγυλεμένα τμήματα με γωνίες (όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.7(a)) σε περιοχές όπου τα ευθύγραμμα τμήματα δεν περιορίζονται σε μήκος $3d_v$ (Εικόνα 3.4(a)), b_b ο γεωμετρικός μέσος του ελαχίστου και μεγίστου πλάτους της περιμέτρου ελέγχου ($b_b = \sqrt{b_{b,min} b_{b,max}}$) όπως αυτά ορίζονται στην Εικόνα 3.7(b).



Εικόνα 3.7: Για περιμετρικά υποστύλωματα a) Ορισμός εκκεντρότητας e_b b) Ορισμός πλατών $b_{b,min}$ και $b_{b,max}$ της περιμέτρου ελέγχου c) Ορισμός πάχους d_e , πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

(1: Απλοποιημένη περίμετρος ελέγχου για προσδιορισμό του κεντροειδούς της, 2: Κεντροειδές της περιμέτρου ελέγχου, 3: Άκρο πλάκας, 4: Υποστύλωμα, 5: Περίμετρος ελέγχου)

Οι προσεγγιστικές τιμές του πίνακα της Εικόνας 3.6 λαμβάνονται υπόψιν μόνο αν ικανοποιούνται όλες οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- ✓ Η ευστάθεια υπό οριζόντια φορτία δεν εξαρτάται από την πλαισιακή λειτουργία μεταξύ πλακών και υποστυλωμάτων.
- ✓ Τα γειτονικά ανοίγματα δεν διαφέρουν σε μήκος πάνω από 25%.
- ✓ Η πλάκα δέχεται μόνο ομοιόμορφα κατανεμημένα φορτία.
- ✓ Οι ροπές που μεταφέρονται στα περιμετρικά και γωνιακά υποστυλώματα δεν είναι μεγαλύτερες της τιμής $M_{td,max} = 0,25b_e d^2 f_{cd}$, όπου b_e το πλάτος που ορίζεται στην Εικόνα 3.7(c).

Διαφορετικά, πρέπει να χρησιμοποιούνται οι ακριβείς τιμές. Ωστόσο, η χρήση τους μπορεί να γενικευθεί και σε περιπτώσεις που ικανοποιούνται οι παραπάνω προϋποθέσεις, για ακριβέστερους υπολογισμούς.

Η δρώσα διατμητική τάση σχεδιασμού, τ_{Ed} , μπορεί επίσης να υπολογιστεί από μία λεπτομερή ανάλυση της κατανομής διατμητικών τάσεων κατά μήκος της περιμέτρου ελέγχου, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\tau_{Ed} = \frac{v_{Ed}}{d_v} \quad (3.4)$$

όπου, v_{Ed} η τέμνουσα δύναμη ανά μονάδα πλάτους. Όταν η τέμνουσα δύναμη, σε επίπεδα μέλη, δεν είναι σταθερή κατά μήκος της διατομής ελέγχου, μπορεί να ληφθεί η μέση τιμή της σε πλάτος που δεν υπερβαίνει τα $2d$ εκατέρωθεν του σημείου εφαρμογής της μέγιστης τέμνουσας. Σε περίπτωση που απαιτούνται και άλλες εσωτερικές δυνάμεις, για τον υπολογισμό της διατμητικής αντοχής, χρησιμοποιείται αντίστοιχα η μέση τιμή τους εντός του προαναφερθέντος πλάτους.

Σε περιπτώσεις όπου σημαντικά συγκεντρωμένα φορτία ($\geq 0,2 V_{Ed}$) εφαρμόζονται κοντά στην επιφάνεια στήριξης (σε απόσταση μικρότερη από $3d_v$ από την περίμετρο ελέγχου) ή σε περιπτώσεις που δεν καλύπτονται παραπάνω, η δρώσα διατμητική τάση σχεδιασμού τ_{Ed} μπορεί να υπολογιστεί στην περιοχή της περιμέτρου ελέγχου χρησιμοποιώντας μία μέθοδο που λαμβάνει υπόψη τις συνθήκες ισορροπίας και συμβατότητας της πλάκας (για παράδειγμα, γραμμική ελαστική ανάλυση).

3.3 Τέμνουσες αντοχής

3.3.1 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης

Η αντοχή έναντι διάτρησης της σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος, χωρίς την προσθήκη εγκάρσιου διατρητικού οπλισμού υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,6}{\gamma_V} k_{pb} (100 \rho_l f_{ck} \frac{d_{ag}}{d_v})^{1/3} \leq \frac{0,6}{\gamma_V} \sqrt{f_{ck}} \quad (3.5)$$

όπου,

γ_V ο συντελεστής ασφαλείας για σχεδιασμό έναντι τέμνουσας σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνας 3.1 (ή τον Πίνακα Α.1α/β του Παραρτήματος Α της νέας έκδοσης του Ευρωκώδικα 2 για ειδικές περιπτώσεις)

k_{pb} ο αυξητικός συντελεστής διάτρησης που υπολογίζεται με βάση τη σχέση:

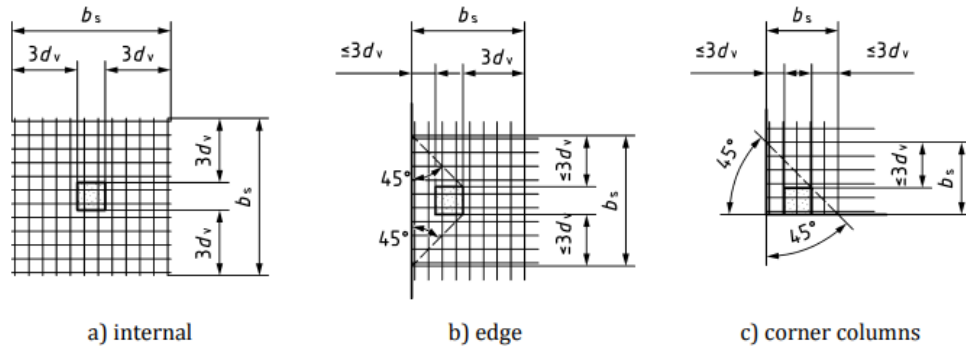
$$1 \leq k_{pb} = 3,6 \sqrt{1 - \frac{b_0}{b_{0,5}}} \leq 2,5 \quad (3.6)$$

ρ_l ο γεωμετρικός μέσος ($\rho_l = \sqrt{\rho_{l,x} \rho_{l,y}}$) των γεωμετρικών ποσοστών $\rho_{l,x}$, $\rho_{l,y}$ των εφελκόμενων οπλισμών κάμψης, με συνάφεια, στις διευθύνσεις x και y αντίστοιχα. Οι τιμές $\rho_{l,x}$ και $\rho_{l,y}$ πρέπει να υπολογίζονται ως μέσες τιμές, λαμβάνοντας υπόψη πλάτος πλάκας ίσο με b_s , όπως το ίδιο ορίζεται στην Εικόνα 3.8.

d_{dg} παράμετρος μεγέθους (σε mm) που περιγράφει την τραχύτητα της ζώνης αστοχίας και αναλύεται στην παράγραφο §3.2.1 (στις επεξηγήσεις της Εξίσωσης (3.1))

d_v το μέσο στατικό ύψος (σε mm) όπως προκύπτει από την Εξίσωση (3.2)

f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (σε MPa)



Εικόνα 3.8: Ορισμός του πλάτους b_s , πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

Εφόσον το κέντρο της επιφάνειας στήριξης απέχει από το σημείο μηδενισμού των ροπών, του εξεταζόμενου συνδυασμού φόρτισης, απόσταση α_p μικρότερη από $8d$, η τιμή του d_v αντικαθίσταται από τον όρο:

$$\alpha_{pb} = \sqrt{\frac{\alpha_p}{8}} d_v \quad (3.7)$$

όπου, $\alpha_p = \sqrt{\alpha_{p,x} \alpha_{p,y}} \geq d_v$ και $\alpha_{p,x}$, $\alpha_{p,y}$ οι μέγιστες αποστάσεις μεταξύ του κεντροειδούς της περιμέτρου ελέγχου (μπορεί να προσδιοριστεί απλοποιητικά σύμφωνα με την Εικόνα 3.7(a)) και των δύο σημείων (στους άξονες x και y αντίστοιχα) όπου οι ροπές κάμψης $m_{Ed,x}$ και $m_{Ed,y}$,

αντίστοιχα, μηδενίζονται. Το τοπικό σύστημα αξόνων (x,y) έχει αρχή το κέντρο της επιφάνειας στήριξης και συμπίπτει με τις διευθύνσεις των διαμήκων οπλισμών (κύριες διευθύνσεις στην περίπτωση που οι στρώσεις δεν είναι κάθετες μεταξύ τους).

Η ευνοϊκή επιρροή της θλιπτικής δράσης μεμβράνης γύρω από εσωτερικά υποστυλώματα (χωρίς σημαντικά ανοίγματα, εσοχές ή άκρα πλακών σε απόσταση μικρότερη από $5d_v$ από την περίμετρο ελέγχου $b_{0,5}$) μπορεί να ληφθεί υπόψιν πολλαπλασιάζοντας την παράμετρο α_p με τον αυξητικό συντελεστή:

$$n_{pm} = \left(\frac{h}{d}\right)^{1/2} \left(1,2 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\rho_l f_{yk}}\right)^{1/4} \geq 1 \quad (3.8)$$

Οι αποστάσεις $\alpha_{p,x}$ και $\alpha_{p,y}$ μπορούν να προκύψουν από τη γραμμική ελαστική ανάλυση κατάλληλου προσομοιώματος. Για συνήθεις πλάκες χωρίς δοκούς όπου η ευστάθεια υπό οριζόντια φορτία δεν εξαρτάται από την πλαισιακή λειτουργία μεταξύ πλακών και υποστυλωμάτων και ο λόγος των πλευρών τους ικανοποιεί τη σχέση $0,5 \leq L_x/L_y \leq 2$, οι τιμές $\alpha_{p,x} \approx 0,22L_x$ και $\alpha_{p,y} \approx 0,22L_y$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν απλοποιητικά. Για διαφορετικά μήκη ανοιγμάτων σε συνεχείς πλάκες, λαμβάνεται υπόψιν το μεγαλύτερο εκ των γειτονικών ανοιγμάτων του εξεταζόμενου υποστυλώματος. Για γωνιακούς στύλους και για την κάθετη στο άκρο της πλάκας διεύθυνση, στην περίπτωση των περιμετρικών στύλων, ο υπολογισμός του α_p γίνεται λαμβάνοντας υπόψιν τα μήκη των περιμετρικών ανοιγμάτων στις δύο διευθύνσεις.

Σε πλάκες όπου αναπτύσσονται αξονικές δυνάμεις και σε προεντεταμένες πλάκες, η τιμή k_{pb} της Εξίσωσης (3.6) πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή k_{pp} για τον οποίο ισχύει:

$$k_{pp} = \begin{cases} k_N \text{ για θλιπτικές αξονικές δυνάμεις (π.χ. προένταση)} \\ 1/k_N \text{ για εφελκυστικές αξονικές δυνάμεις} \end{cases} \quad (3.9)$$

όπου:

$$k_N = \sqrt{1 + 1,2 \frac{b_{0,5}}{\mu_p d_v} \frac{|\sigma_d|}{\sqrt{f_{ck}}}} \quad (3.10)$$

όπου, σ_d η μέση ορθή τάση εντός πλάτους b_s (ορίζεται στην Εικόνα 3.8) και μ_p συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν την κλίση της τέμνουσας δύναμης και τις ροπές κάμψης στην περιοχή της περιμέτρου ελέγχου γύρω από την επιφάνεια στήριξης.

Σε περίπτωση που στις δύο διευθύνσεις αναπτύσσονται διαφορετικές τάσεις λόγω αξονικών δυνάμεων, λαμβάνεται η μέση τιμή:

$$k_{pp} = \sqrt{k_{pp,x} k_{pp,y}} \quad (3.11)$$

όπου, $k_{pp,x}$ και $k_{pp,y}$ υπολογίζονται από την Εξίσωση (3.9) για τις αντίστοιχες διευθύνσεις. Η αρνητική επιρροή των εφελκυστικών αξονικών δυνάμεων στην πλάκα πρέπει να ληφθεί υπόψιν ($k_{pp} < 1,0$).

Να σημειωθεί πως η αντοχή $\tau_{Rd,c}$ μπορεί να υπολογιστεί πιο λεπτομερώς με βάση τις υποδείξεις της παραγράφου §I.8.5.1 του ΕΚ2 (FprEN 1992-1-1:2023, Παράρτημα I), συναρτήσει της περιστροφής ψ της πλάκας (η οποία αναφέρθηκε και στην παράγραφο §1.3, κατά την αναφορά της “Critical Shear Crack Theory”). Η συγκεκριμένη μεταβλητή αφορά τη μέγιστη σχετική περιστροφή μεταξύ του κέντρου της περιοχής στήριξης και μίας απόστασης $2d_v$ από την περίμετρο ελέγχου. Η τιμή της προκύπτει από τη μη γραμμική ανάλυση της κατασκευής, επομένως κατά τον προσδιορισμό της έχει ληφθεί υπόψη η μη γραμμική συμπεριφορά της σύνδεσης που οφείλεται σε φαινόμενα όπως η ρηγμάτωση, η διαρροή των οπλισμών και η διαφραγματική λειτουργία της πλάκας.

3.3.2 Αντοχή σε διάτρηση μιας πλάκας με οπλισμό διάτρησης

Υπολογισμός αντοχής

Όταν η δρώσα διατμητική τάση σχεδιασμού στην περίμετρο ελέγχου υπερβαίνει την τιμή $\tau_{Rd,cs}$ απαιτείται τοποθέτηση οπλισμού διάτρησης, κατάλληλου ώστε η τιμή της αντοχής $\tau_{Rd,cs}$ έναντι διάτρησης της πλάκας με οπλισμό, όπως υπολογίζεται μέσω της Εξίσωσης (3.12), να επαρκεί για την παραλαβή της δρώσας τέμνουσας ($\tau_{Rd,cs} \geq \tau_{Ed}$).

$$\tau_{Rd,cs} = n_c \tau_{Rd,c} + n_s \rho_w f_{ywd} \geq \rho_w f_{ywd} \quad (3.12)$$

όπου,

$$n_c = \tau_{Rd,c} / \tau_{Ed} \quad (3.13)$$

$$n_s = \frac{d_v}{150 \varphi_v} + \left(15 \frac{d_{dg}}{d_v} \right)^{1/2} \left(\frac{1}{n_c k_{pb}} \right)^{3/2} \leq 0,8 \quad (3.14)$$

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s_r s_t} \quad (3.15)$$

όπου,

d_{dg} ορίζεται παράγραφο §3.2.1 (στις επεξηγήσεις της Εξίσωσης (3.1))

φ_v η διάμετρος του εγκάρσιου οπλισμού διάτρησης

ρ_w το γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού διάτρησης στην εξεταζόμενη περίμετρο ελέγχου

A_{sw} το εμβαδόν ενός σκέλους συνδετήρα

s_r η ακτινική απόσταση των διατρητικών οπλισμών ($s_r = s_1$ στην Εικόνα 3.10). Για ομοιόμορφα διατεταγμένους συνδετήρες που ικανοποιούν τις κατασκευαστικές διατάξεις της παρούσας

παραγράφου (§3.3.2), το ρ_w μπορεί να υπολογιστεί απευθείας στη βάση της απόστασης και στις δύο διευθύνσεις (αν έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο κεκαμμένες ράβδοι ισχύει $s_r=0,67d_v$).

s_t η μέση εφαπτομενική απόσταση των διατρητικών οπλισμών των περιμέτρων όπλισης, μετρημένη στην εκάστοτε εξεταζόμενη περίμετρο ελέγχου (ίση με το μήκος της περιμέτρου που ελέγχεται, διαιρούμενου με τον αριθμό των τετμημένων σειρών οπλισμού, στην περίπτωση σταυροειδούς ή ακτινωτής τοποθέτησής του).

Όπου έχει χρησιμοποιηθεί κεκλιμένος διατμητικός οπλισμός που σχηματίζει γωνία α_w με το επίπεδο της πλάκας, ο όρος ρ_w της Εξίσωσης (3.15) πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή $(\sin\alpha_w + \cos\alpha_w)$, ενώ ο συντελεστής n_s της Εξίσωσης (3.14) με τον συντελεστή $(\sin\alpha_w + \cos\alpha_w)\sin\alpha_w$ (με την προϋπόθεση ότι $n_s \leq 0,8$).

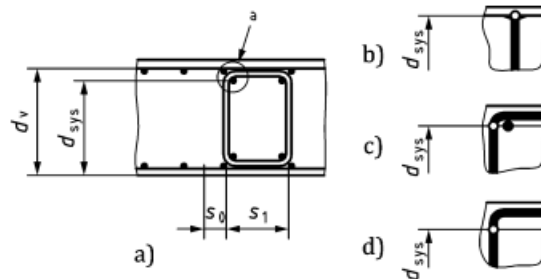
Η αντοχή έναντι διάτρησης που δύναται να φτάσει μία πλάκα με διατμητικό οπλισμό περιορίζεται από τη μέγιστη αντοχή $\tau_{Rd,max}$, όπως η ίδια προκύπτει από την Εξίσωση (3.16). Η ύπαρξη του περιορισμού αυτού οφείλεται στο γεγονός ότι αν η δρώσα τέμνουσα είναι τόσο μεγάλη ώστε να απαιτούνται μεγάλα ποσοστά οπλισμού, υπάρχει κίνδυνος αστοχίας του σκυροδέματος υπό θλίψη. Στην περίπτωση λοιπόν που η τ_{Ed} , στην περίμετρο ελέγχου, υπερβαίνει τη μέγιστη αντοχή $\tau_{Rd,max}$, η τοποθέτηση διατμητικού οπλισμού κρίνεται αναποτελεσματική και συστήνεται η αλλαγή των διαστάσεων της σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος.

$$\tau_{Rd,max} = n_{sys} \tau_{Rd,c} \quad (3.16)$$

όπου, n_{sys} συντελεστής που αφορά την επίδοση των διαφόρων συστημάτων διατρητικών οπλισμών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$n_{sys} = 1,15 \frac{d_{sys}}{d_v} + 0,63 \left(\frac{b_0}{d_v}\right)^{1/4} - 0,85 \frac{s_0}{d_{sys}} \quad (3.17)$$

όπου, οι όροι d_{sys} και s_0 ορίζονται στην Εικόνα 3.8. Αν η τιμή της απόστασης s_0 δεν είναι σταθερή, χρησιμοποιείται η μέση τιμή κατά μήκος της περιμέτρου ελέγχου.



Εικόνα 3.9: a) Ορισμός της παραμέτρου d_{sys} , b) Κορυφή της κεφαλής του ήλου, c) Επίπεδο του κεντροβαρικού άξονα του διαμήκους οπλισμού εντός του συνδετήρα, d) Όριο της καμπύλης του συνδετήρα, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

Η μέγιστη δυνατή αντοχή έναντι διάτρησης $\tau_{Rd,max}$ για εσωτερικά υποστυλώματα πολλαπλασιάζεται με το συντελεστή n_{pb} , προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η θλιπτική δράση μεμβράνης, δεδομένου ότι:

- δεν υπάρχουν σημαντικά ανοίγματα, εσοχές ή άκρα πλακών σε απόσταση μικρότερη από $5d_v$ από την περίμετρο ελέγχου $b_{0,5}$ και
- ο συντελεστής n_{pb} έχει αγνοηθεί στον υπολογισμό της $\tau_{Rd,c}$ σύμφωνα με την Εξίσωση (3.8).

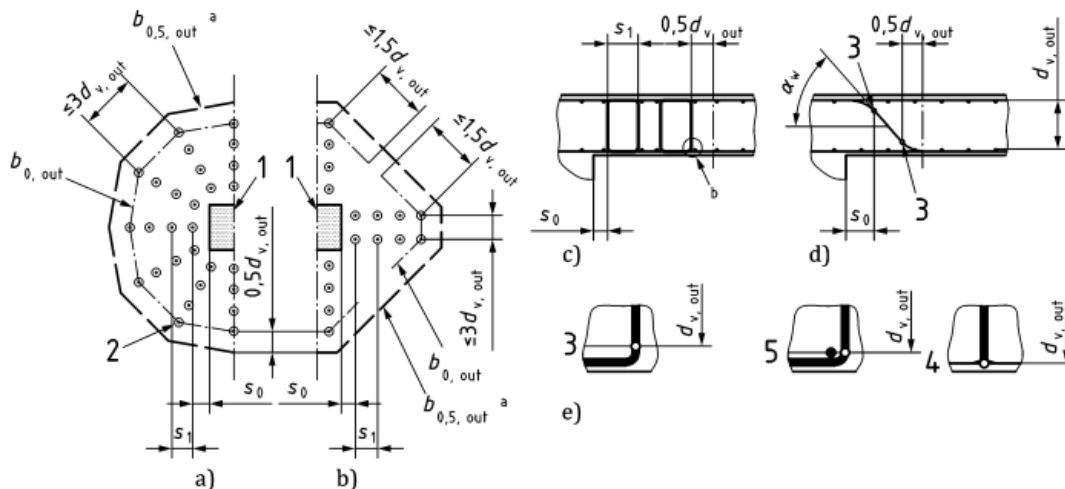
Για νέες κατασκευές ισχύει $n_{pb}=1,0$ ενώ για υφιστάμενες, εκτός αν ορίζεται διαφορετικά από το Εθνικό Προσάρτημα, χρησιμοποιείται η τιμή που προκύπτει μέσω της Εξίσωσης (3.8).

Για τον προσδιορισμό των ορίων τοποθέτησης του οπλισμού διάτρησης, σχεδιάζεται η περίμετρος $b_{0,5,out}$, πέραν της οποίας δεν απαιτείται προσθήκη οπλισμού καθώς η αντοχή του σκυροδέματος επαρκεί. Το μήκος της περιμέτρου υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$b_{0,5,out} = b_{0,5} \left(\frac{d_v}{d_{v,out}} \frac{1}{n_c} \right)^{3/2} \quad (3.18)$$

όπου, $d_{v,out}$ το στατικό ύψος έναντι διάτμησης σύμφωνα με την Εικόνα 3.10 και n_c συντελεστής που προκύπτει από την Εξίσωση (3.13).

Η εξώτατη περίμετρος οπλισμών διάτρησης πρέπει να τοποθετείται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη από $0,5d_{v,out}$ από την εξώτερη περίμετρο ελέγχου $b_{0,5,out}$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.10.



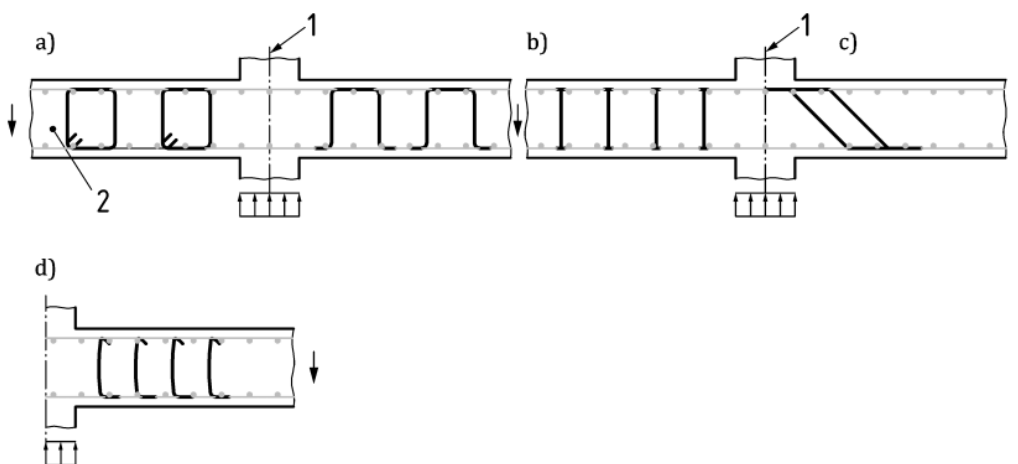
Εικόνα 3.10: Περίμετροι ελέγχου εκτός της περιοχής διατμητικών οπλισμών, α) Ακτινωτή τοποθέτηση, β) Σταυροειδής τοποθέτηση, γ) Στατικό ύψος έναντι διάτμησης για συνδετήρες και ήλους, δ) Στατικό ύψος έναντι διάτμησης για κεκαμμένες ράβδους, ε) Λεπτομέρειες για τον προσδιορισμό του $d_{v,out}$, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

(X: Εξώτερη περίμετρος ελέγχου, 1: Επιφάνεια στήριξης, 2: Εγκάρσιος οπλισμός, 3: Όριο της καμπύλης του συνδετήρα, 4: Κορυφή της κεφαλής του ήλου, 5: Επίπεδο του κεντροβαρικού άξονα του διαμήκους οπλισμού εντός του συνδετήρα)

Να σημειωθεί πως εφόσον η αντοχή $\tau_{Rd,c}$ έχει υπολογιστεί πιο λεπτομερώς (συναρτήσει της περιστροφής ψ της πλάκας), όπως αναφέρεται στο τέλος της παραγράφου §3.3.1 (έπειτα από μη γραμμική ανάλυση του εξεταζόμενου προσομοιώματος), η νέα έκδοση του ΕΚ2 παρέχει τις ανάλογες εξισώσεις και για τον υπολογισμό των αντοχών $\tau_{Rd,cs}$, $\tau_{Rd,max}$. Συγκεκριμένα, η διαδικασία υπολογισμών και ο προσδιορισμός των απαιτούμενων συντελεστών περιγράφονται στην παράγραφο §I.8.5.2 του Παραρτήματος I του ΕΚ2.

Κατασκευαστικές διατάξεις

Υπάρχουν διάφορα είδη οπλισμών έναντι διάτρησης με συνηθέστερα τους συνδετήρες (μονότμητους ή δίτμητους), τους διατμητικούς ήλους διπλής κεφαλής και τις κεκαμμένες ράβδους, όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 3.11.

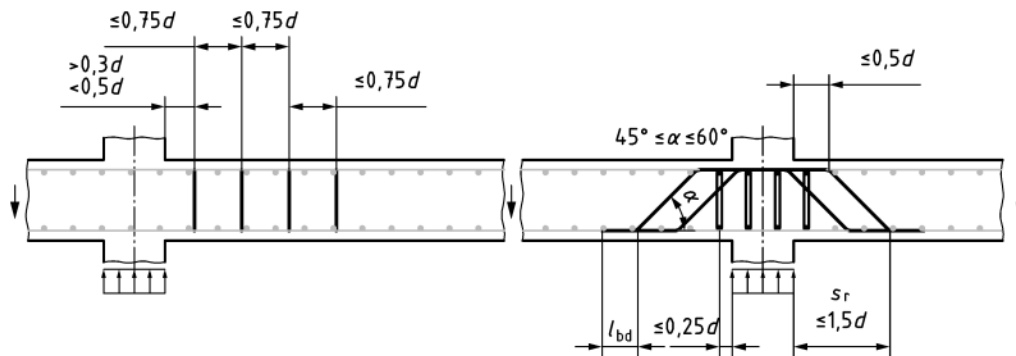


Εικόνα 3.11: Είδη διατμητικών οπλισμών a) Δίτμητοι συνδετήρες, b) Διατμητικοί ήλοι διπλής κεφαλής, c) Κεκαμμένες ράβδοι, d) Μονότμητοι συνδετήρες, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

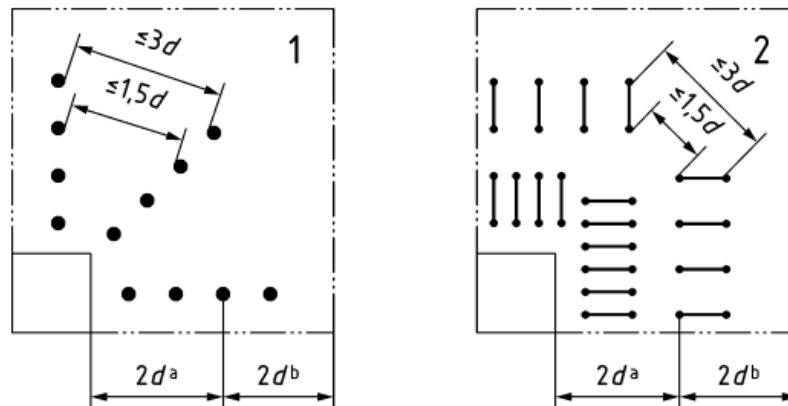
(1: Κεντρικός άξονας υποστυλώματος, 2: Θλιπτική ζώνη)

Οι περίμετροι όπλισης τοποθετούνται εντός της περιοχής μεταξύ της φορτιζόμενης επιφάνειας A_{load} και απόστασης $0,5d_{v,out}$ εντός της εξώτερης περιμέτρου ελέγχου b_{out} . Εάν χρησιμοποιηθούν συνδετήρες ή ήλοι πρέπει να τοποθετηθούν τουλάχιστον δύο περίμετροι όπλισης, ενώ για τις κεκαμμένες ράβδους μία περίμετρος κρίνεται επαρκής. Οι κατασκευαστικές διατάξεις που πρέπει να ικανοποιούνται όσον αφορά τις ακτινικές και εφαπτομενικές αποστάσεις των οπλισμών παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.12 και 3.13 (στην απλοποιημένη τους μορφή χωρίς λεπτομέρειες αγκύρωσης). Οι εφαπτομενικές αποστάσεις των διατμητικών οπλισμών που απέχουν από το περίγραμμα του υποστυλώματος λιγότερο από $2d_v$ δεν πρέπει να υπερβαίνουν την τιμή $1,5d_v$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13, διαφορετικά η μέγιστη επιτρεπτή απόστασή τους είναι $3d_v$.

Οι κεκαμμένες ράβδοι που διαπερνούν την φορτιζουσα επιφάνεια ή δεν απέχουν από την ίδια απόσταση μεγαλύτερη από $0,25d$ μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως διατμητικός οπλισμός. Για τον προσδιορισμό του όρου s_r κατά τον υπολογισμό του ρ_{sw} , χρησιμοποιείται η οριζόντια προβολή των ράβδων.



Εικόνα 3.12: Κανόνες ακτινικών αποστάσεων για πλάκες χωρίς δοκούς, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)



Εικόνα 3.13: Κανόνες επαπτομενικών αποστάσεων για πλάκες χωρίς δοκούς, πηγή: (FprEN 1992-1-1:2023)

(a: Εντός απόστασης $2d_v$, b: Εκτός απόστασης $2d_v$, 1: Ακτινωτή τοποθέτηση, 2: Σταυροειδής τοποθέτηση)

Η μέγιστη επιτρεπτή διάμετρος κάθε σκέλους διατμητικού οπλισμού $\varphi_{w,max}$ υπολογίζεται ως:

- $\varphi_{w,max} = 10\sqrt{d/200}$ για μονότμητους και ανοιχτούς συνδετήρες
- $\varphi_{w,max} = 11\sqrt{d/200}$ για κλειστούς συνδετήρες
- $\varphi_{w,max} = 16\sqrt{d/200}$ για κεκαμμένες ράβδους και διατμητικούς ήλους

όπου το στατικό ύψος d σε mm.

Πρόσθετες διατάξεις

Για λόγους πληρότητας παρατίθενται κάποιες πρόσθετες διατάξεις της νέας έκδοσης των Ευρωκωδίκων 2 και 8 που αφορούν τη διάτρηση και τις πλάκες χωρίς δοκούς. Ωστόσο οι ίδιες δε θα εξεταστούν περαιτέρω στην παρούσα εργασία καθώς για την ολοκληρωμένη εφαρμογή τους απαιτούνται πληροφορίες Προτύπων που δεν έχουν λάβει την τελική τους μορφή. Όσον αφορά τον ΕΚ2, προβλέπεται η προσθήκη οπλισμού ακεραιότητας προς αποφυγή της προοδευτικής κατάρρευσης της πλάκας χωρίς δοκούς, για κτίρια κατηγορίας CC2 και υψηλότερης (σύμφωνα με τον prEN 1990). Συγκεκριμένα, πρέπει να τοποθετούνται τουλάχιστον δύο ράβδοι ανά διεύθυνση, σε όλα τα υποστυλώματα χωρίς οπλισμό διάτρησης αλλά και σε εκείνα που διαθέτουν διατρητικό οπλισμό και για τα οποία ισχύει:

$$V_{Rd,w,int} = \rho_w f_{ywd} \sin \alpha_w b_0 d_v \leq V_{Ed} \quad (3.19)$$

όπου, ρ_w το γεωμετρικό ποσοστό διατμητικού οπλισμού όπως προκύπτει από την Εξίσωση (3.15).

Για την πρώτη περίπτωση (υποστυλώματα χωρίς οπλισμό διάτρησης) οι τοποθετούμενες ράβδοι πρέπει να είναι σχεδιασμένες, για λόγους στιβαρότητας, ώστε να παρέχουν αντοχή όπως περιγράφεται στην Εξίσωση (3.20). Όσον αφορά τα υποστυλώματα με διατρητικό οπλισμό, η τιμή V_{Ed} της Εξίσωσης (3.20) αντικαθίσταται από την τιμή $V_{Ed} - V_{Rd,w,int}$.

$$V_{Rd,int} = \sum A_{s,int} f_{yd} k_{int} \geq V_{Ed} \quad (3.20)$$

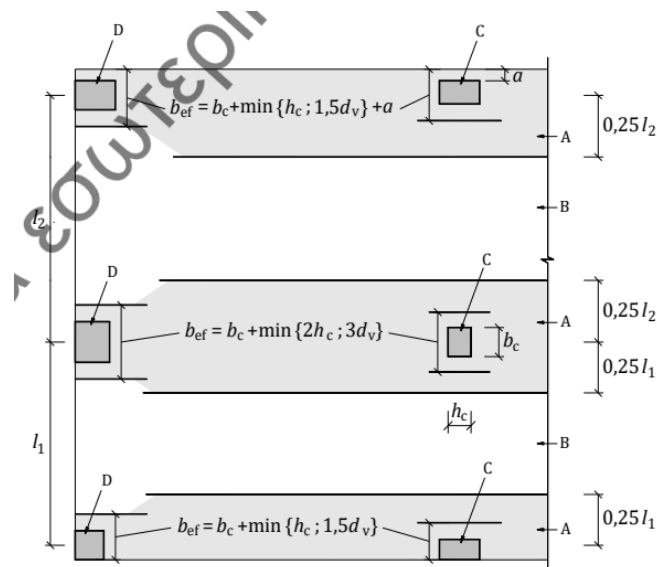
όπου, V_{Ed} η δρώσα τέμνουσα σχεδιασμού που προκύπτει για την τυχηματική κατάσταση σχεδιασμού, $A_{s,int}$ το συνολικό εμβαδόν όλων των οπλισμών που διαπερνούν μία πλευρά του υποστυλώματος (η ίδια ράβδος μπορεί να προσμετρηθεί δύο φορές αν διαπερνά το υποστυλώμα και είναι πλήρως αγκυρωμένη εκτός των δύο παράλληλων πλευρών του), k_{int} συντελεστής ίσος με 0,37 για ράβδους κατηγορίας B και 0,49 για κατηγορίας C.

Οι τοποθετούμενες ράβδοι πρέπει να είναι κατηγορίας B ή C, αγκυρωμένες εντός του υποστυλώματος ή να το διαπερνούν και να βρίσκονται στη θλιβόμενη παρειά της πλάκας, εντός των κάθετων οπλισμών του στύλου.

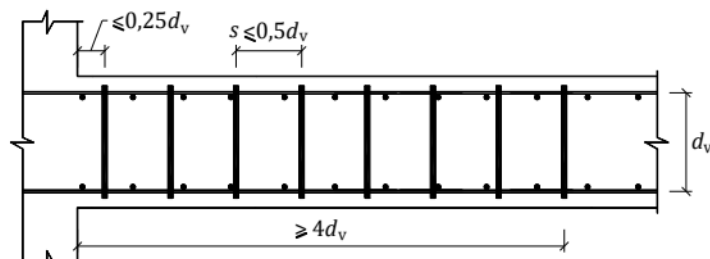
Τέλος, αναφέρονται επιγραμματικά οι πρόσθετες διατάξεις του prEN 1998 που αφορούν τις πλάκες χωρίς δοκούς:

- Στη σύνδεση πλάκας-περιμετρικών και γωνιακών υποστυλωμάτων πρέπει να γίνεται χρήση όλης της διατομής των κατακόρυφων στοιχείων και να υπάρχουν περιμετρικές δοκοί.
- Το πάχος της πλάκας δεν πρέπει να είναι μικρότερο από το 3,5% του μεγαλύτερου ανοίγματος της.
- Εάν γίνεται χρήση προσομοιώματος με επιφανειακά στοιχεία για τις πλάκες, πρέπει να ληφθεί υπόψη η ρηγμάτωση μειώνοντας την καμπτική και διατμητική δυσκαμψία των πλακών στο 1/4 των αντίστοιχων αρηγμάτωτων τιμών.
- Στις λωρίδες υποστυλωμάτων (όπως ορίζονται στην παράγραφο §5.6) πρέπει να τοποθετείται ελάχιστος οπλισμός κάμψης σύμφωνα με τα παρακάτω:

- 1) Σε όλο το άνοιγμα, άνω οπλισμός τουλάχιστον ίσος με το 1/4 του άνω οπλισμού των στηρίξεων.
 - 2) Σε όλο το άνοιγμα, κάτω οπλισμός τουλάχιστον ίσος με το 1/3 του άνω οπλισμού των στηρίξεων.
 - 3) Εντός της επιφάνειας των υποστυλωμάτων, κάτω οπλισμός τουλάχιστον ίσος με τον κάτω οπλισμό του ανοίγματος.
- Κάθετα της ζώνης συμβολής των λωρίδων υποστυλωμάτων και ανοίγματος (όπως ορίζονται στην παράγραφο §5.6) πρέπει να τοποθετείται οπλισμός κάμψης τουλάχιστον ίσος με τον μισό κάτω οπλισμό των λωρίδων ανοίγματος.
 - Οι οπλισμοί κάμψης που παραλαμβάνουν τις ροπές των στηρίξεων πρέπει να τοποθετούνται εντός πλάτους b_{ef} , σύμφωνα με την Εικόνα 3.14.
 - Δεν συνιστάται η χρήση κεκαμμένων ράβδων ως διατμητικό οπλισμό.
 - Οι διατμητικοί οπλισμοί πρέπει να τοποθετούνται σε αποστάσεις τέτοιες ώστε να ικανοποιούνται οι περιορισμοί της Εικόνας 3.15.



Εικόνα 3.14: Προσδιορισμός πλάτους b_{ef} , πηγή: (prEN 1998-1-2:2022)



Εικόνα 3.15: Περιορισμοί αποστάσεων οπλισμών διάτρησης, πηγή: (prEN 1998-1-2:2022)

4 Αναλυτική επαλήθευση πειράματος διάτρησης

4.1 Εισαγωγή

Πολυάριθμα πειράματα έχουν διεξαχθεί παγκοσμίως με στόχο την κατανόηση του φαινομένου της διάτρησης τόσο σε πλάκες χωρίς δοκούς όσο και σε θεμέλια. Τα πειραματικά ευρήματα παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για την ανάπτυξη των υπολογιστικών μεθόδων και την προσομοίωση των φορέων στα χρησιμοποιούμενα λογισμικά.

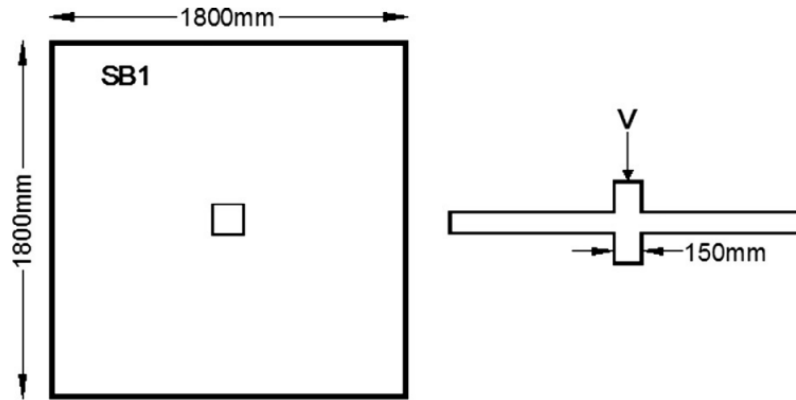
Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έγινε προσπάθεια προσομοίωσης μίας πειραματικής διάταξης που αφορά τη μελέτη σύνδεσης πλάκας-εσωτερικού υποστυλώματος χωρίς οπλισμό διάτρησης. Το πείραμα διεξήχθη από τους Adetifa και Polak στο Πανεπιστήμιο του Waterloo στον Καναδά (2005). Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό DIANA, με στόχο τη σύγκλιση των αποτελεσμάτων με τα πειραματικά ευρήματα και τη δημιουργία ενός προσομοιώματος με βάση το οποίο δύναται να γίνει περαιτέρω παραμετρική διερεύνηση.

4.2 Περιγραφή πειράματος

4.2.1 Γεωμετρία δείγματος και ιδιότητες υλικών

Το δοκίμιο SB1 που εξετάστηκε είναι μία σύνδεση πλάκας-υποστυλώματος μεγάλης κλίμακας. Θεωρείται τμήμα συνεχούς συστήματος πλακών, αποτελούμενο από τουλάχιστον πέντε ανοίγματα των 3,75 m κατά τις δύο, κάθετες μεταξύ τους, διευθύνσεις. Οι διαστάσεις της πλάκας καθορίστηκαν (και στις δύο διευθύνσεις) από την περίμετρο μηδενισμού των ροπών, οι πλευρές της οποίας είναι περίπου ίσες με το 40% των αντίστοιχων ανοιγμάτων ($0,4 \cdot 3750 = 1500$ mm).

Κατασκευάστηκε λοιπόν πλάκα διαστάσεων 1800x1800x120 mm. Απλές στηρίξεις εφαρμόστηκαν σε περίμετρο διαστάσεων 1500x1500 mm εντός του επιπέδου της πλάκας. Η ονομαστική επικάλυψη στην πλάκα, τόσο στην εφελκυσμένη όσο και στη θλιβόμενη παρειά, τέθηκε ίση με 20 mm. Όσον αφορά τον οπλισμό κάμψης της, στην εφελκυσμένη ίνα τοποθετήθηκαν ράβδοι διαμέτρου 10 mm ανά 100 και 90 mm στην κάτω και άνω στρώση αντίστοιχα. Η πλάκα είχε παρόμοιες τιμές ανηγμένων ροπών κατά τις δύο διευθύνσεις. Η μικρή διαφορά στις αποστάσεις των οπλισμών οφείλεται στη διαφορά του στατικού ύψους ανά στρώση (μεγαλύτερο στατικό ύψος, μεγαλύτερη απόσταση οπλισμών). Για τη θλιβόμενη ίνα, τοποθετήθηκαν ράβδοι διαμέτρου 10 mm ανά 200 mm και στις δύο διευθύνσεις. Στην πραγματικότητα, εφελκύεται η άνω ίνα της πλάκας στην στήριξη όμως λόγω της πειραματικής διάταξης, όπου το φορτίο ασκείται προς τα κάτω, συμβαίνει το αντίθετο. Επομένως ο εφελκυσμένος και ο θλιβόμενος οπλισμός τοποθετήθηκαν στην κάτω και άνω στρώση αντίστοιχα.



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση δείγματος SB1, πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)

Κατασκευάστηκε τμήμα του υποστυλώματος, το οποίο εξείχε κατά 150 mm από την άνω και κάτω παρειά της πλάκας, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1. Το υποστύλωμα χρησιμοποιήθηκε για την εφαρμογή του φορτίου, σύμφωνα με διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο §4.2.2. Επρόκειτο για τετραγωνικό στύλο διαστάσεων 150x150 mm, οπλισμένο με τέσσερις διαμήκεις ράβδους διαμέτρου 20 mm περισφιγμένες εντός τεσσάρων συνδετήρων διαμέτρου 8 mm.

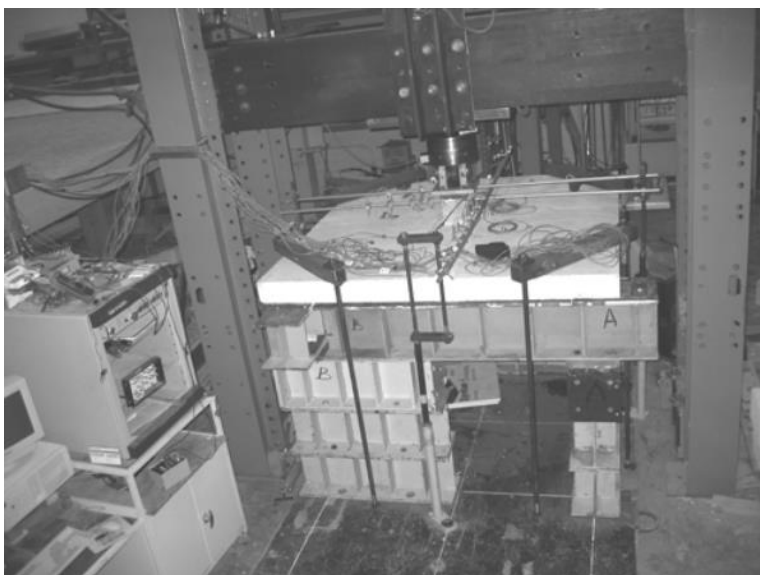
Οι ιδιότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν μετρήθηκαν στο εργαστήριο κατά τις προδιαγραφές τυπικών δοκιμών. Κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος 28 ημερών χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής του, οι οποίες προέκυψαν ίσες με 44 και 2,2 MPa αντίστοιχα. Η τάση διαρροής του χάλυβα οπλισμού βρέθηκε στα 455 MPa. Οι παραπάνω ιδιότητες συνοψίζονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Ιδιότητες υλικών

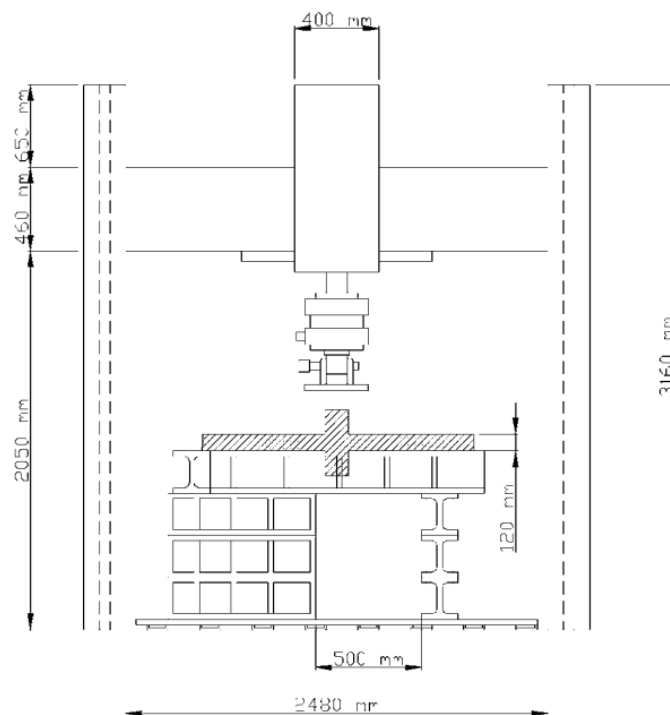
Δοκίμιο πλάκας	Θλιπτική αντοχή [MPa]	Εφελκυστική αντοχή [MPa]	Τάση διαρροής οπλισμού [MPa]
SB1	44	2,2	455

4.2.2 Διαδικασία πειράματος

Η διάταξη του πειράματος παρουσιάζεται στις Εικόνες 4.2 και 4.3. Οι στηρίξεις υλοποιήθηκαν με τη χρήση λεπτών πλακών χάλυβα, πάχους 25 mm και πλάτους 40 mm, οι οποίες συνδέθηκαν με την πλάκα σκυροδέματος μέσω ταινιών από νεοπρένιο, για τη διασφάλιση της ομοιομορφίας της επαφής και της ελευθερίας περιστροφών στις στηρίξεις. Οι πλάκες χάλυβα τοποθετήθηκαν σε άκαμπτο σύστημα βάθρου, κατασκευασμένο από διατομές σχήματος W. Το φορτίο εφαρμόστηκε κεντρικά στο υποστύλωμα μέσω υδραυλικού επενεργητή, ως επιβαλλόμενη μετατόπιση μέχρι την αστοχία του δοκιμίου. Για την προσομοίωση της συνέχειας της πλάκας και για να αποφευχθεί η ανύψωση των άκρων της, περιορίστηκε η ανύψωση των γωνιών. Η μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεων των εφελκυστικών οπλισμών πραγματοποιήθηκε με την τοποθέτηση, στους ίδιους, δεκατεσσάρων ηλεκτρικών αισθητήρων παραμόρφωσης.



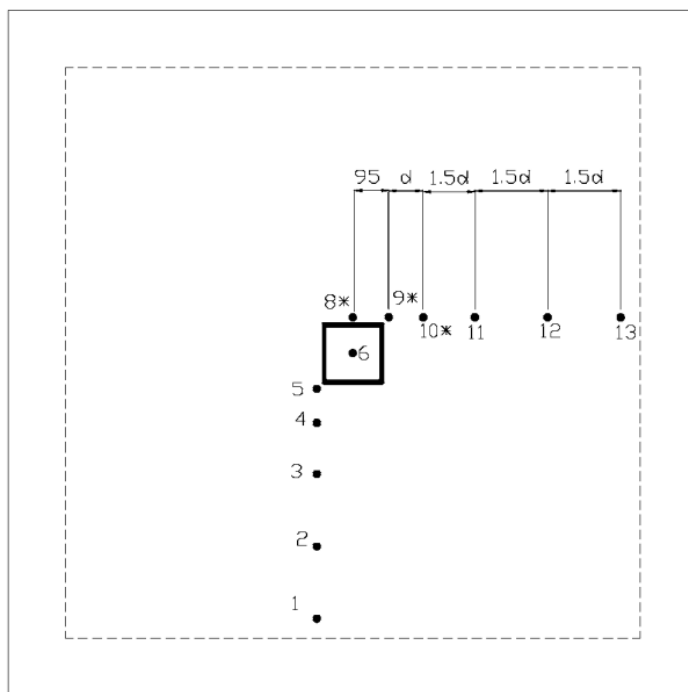
Εικόνα 4.2: Πειραματική διάταξη, πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)



Εικόνα 4.3: Σχηματική πειραματική διάταξη, πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)

Για τη μέτρηση του προφίλ καμπυλοτήτων του δοκιμίου χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός γραμμικών μεταβαλλόμενων μετασχηματιστών (LVDTs: Linear Variable Displacement Transformers), μετασχηματιστών μετατόπισης συνεχούς ρεύματος (DCDTs: Direct Current Displacement Transformers) και ποτενσιόμετρων. Τα σημεία τοποθέτησης των επαγωγικών

βελομέτρων παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.4. Στα σημεία 8, 9 και 10 (με το *) τοποθετήθηκαν στο άνω και κάτω μέρος της πλάκας, με στόχο την παρακολούθηση της εσωτερικής κεκλιμένης ρηγμάτωσης. Συγκεκριμένα, η κάθετη συνισταμένη του πλάτους της εσωτερικής κεκλιμένης ρηγμάτωσης λόγω διάτρησης, στο κάθε σημείο, προσδιορίστηκε ως η τιμή της σχετικής μετατόπισης που μετρήθηκε (διαφορά των δύο μετρήσεων από το άνω και κάτω μέρος της πλάκας).



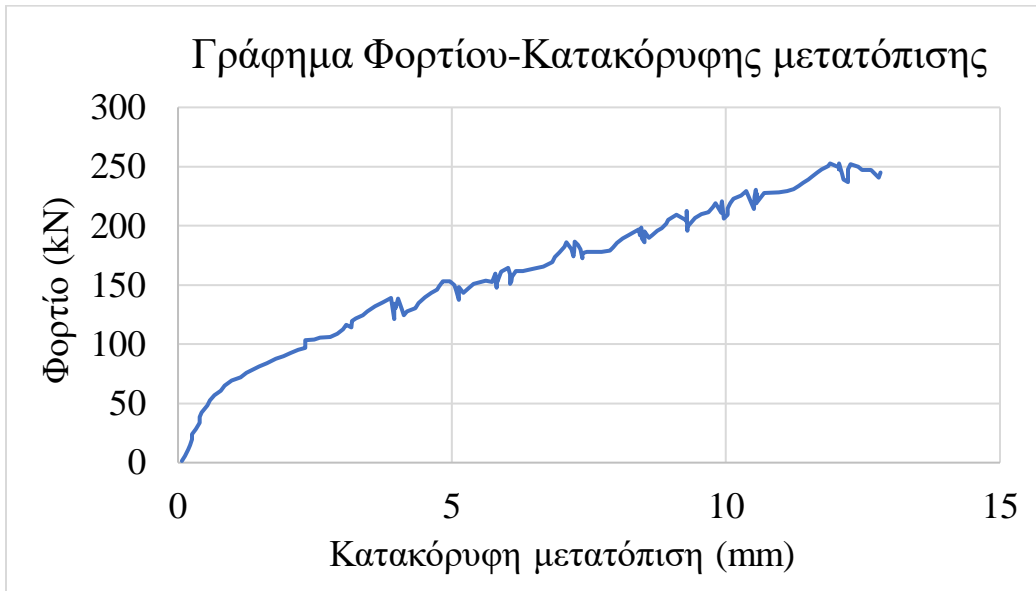
Εικόνα 4.4: Σχηματική απεικόνιση των θέσεων τοποθέτησης των LVDTs (οι αποστάσεις σε mm), πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)

4.2.3 Αποτελέσματα πειράματος

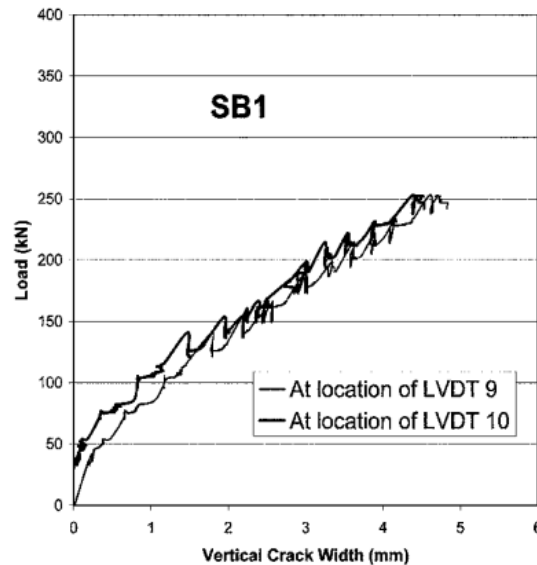
Παρουσιάζεται το γράφημα Φορτίου-Κατακόρυφης Μετατόπισης που προέκυψε στην Εικόνα 4.5 (αναδιαμορφώθηκε στο Excel για καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων). Επιλέχθηκε να απεικονιστεί η κεντρική μετατόπιση που κατέγραψε το τοποθετούμενο κάτω από το υποστύλωμα επαγωγικό βελόμετρο. Οι ενδείξεις που κατέγραψε κρίθηκαν πιο αντιπροσωπευτικές της παραμόρφωσης του δοκιμίου, καθώς οι αντίστοιχες που προέκυψαν από εκείνο στο εσωτερικό του μηχανισμού επιβολής του φορτίου συμπεριλάμβαναν τυχόν κάμψεις του πλαισίου φόρτισης που σημειώθηκαν.

Η εσωτερική κεκλιμένη ρηγμάτωση δεν είναι ορατή κατά την εξέλιξη του πειράματος. Στην Εικόνα 4.6 παρατίθενται λοιπόν οι σχετικές μετατοπίσεις που προέκυψαν από τα βελόμετρα στις θέσεις 9 και 10 (στη θέση 8 δεν καταγράφηκαν μετατοπίσεις), ως αντιπροσωπευτικές της κάθετης συνισταμένης του πλάτους ρωγμής, συναρτήσε του επιβαλλόμενου φορτίου. Παρατηρήθηκε πως η ρηγμάτωση ξεκίνησε ως αποτέλεσμα μικρού φορτίου (0 έως 40 kN) και συνέχισε να αυξάνεται

κατά την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου, φτάνοντας μέγιστη τιμή κάθετου πλάτους ρωγμής τα 5 mm.



Εικόνα 4.5: Γράφημα Φορτίου-Κατακόρυφης μετατόπισης (Από τις ενδείξεις του βελομέτρου που τοποθετήθηκε κάτω από το κέντρο του υποστυλώματος), πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)



Εικόνα 4.6: Γράφημα Φορτίου-Κάθετης συνισταμένης πλάτους ρωγμής, πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)

Τα αποτελέσματα των αισθητήρων που τοποθετήθηκαν σε διάφορα σημεία των διαμήκων ράβδων της πλάκας, για την μέτρηση των ανηγμένων παραμορφώσεών τους, έδειξαν ότι ο οπλισμός δεν διέρρευσε, για την πλειοψηφία των θέσεων τοποθέτησης των αισθητήρων. Στον

Πίνακα 4.2 συνοψίζονται οι τιμές του φορτίου της πρώτης διαρροής καθώς και της αστοχίας έναντι διάτρησης και οι αντίστοιχες κατακόρυφες μετατοπίσεις. Η πλαστιμότητα υπολογίστηκε ως ο λόγος της μετατόπισης αστοχίας προς τη μετατόπιση διαρροής.

Πίνακας 4.2: Αποτελέσματα πειράματος

Δοκίμιο πλάκας	Επιβαλλόμενο φορτίο κατά την πρώτη διαρροή [kN]	Επιβαλλόμενο φορτίο αστοχίας [kN]	Κατακόρυφη μετατόπιση κατά την πρώτη διαρροή [mm]	Κατακόρυφη μετατόπιση κατά την αστοχία [mm]	Πλαστιμότητα
SB1	240	253	11,5	12	1,04

Η καμπτική ρηγμάτωση ήταν ορατή στην εφελκόμενη ίνα της πλάκας. Ξεκίνησε, όπως ήταν αναμενόμενο, από τις γωνίες του υποστυλώματος και αναπτύχθηκε έως τις στηρίξεις κατά την αύξηση του επιβαλλόμενου φορτίου. Η αστοχία επήλθε λόγω διάτρησης. Η τελική ρηγματωμένη μορφή του δοκιμίου παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Αναπτυσσόμενες ρωγμές κατά τη διατρητική αστοχία του δοκιμίου, πηγή: (ACI Structural Journal, 2005)

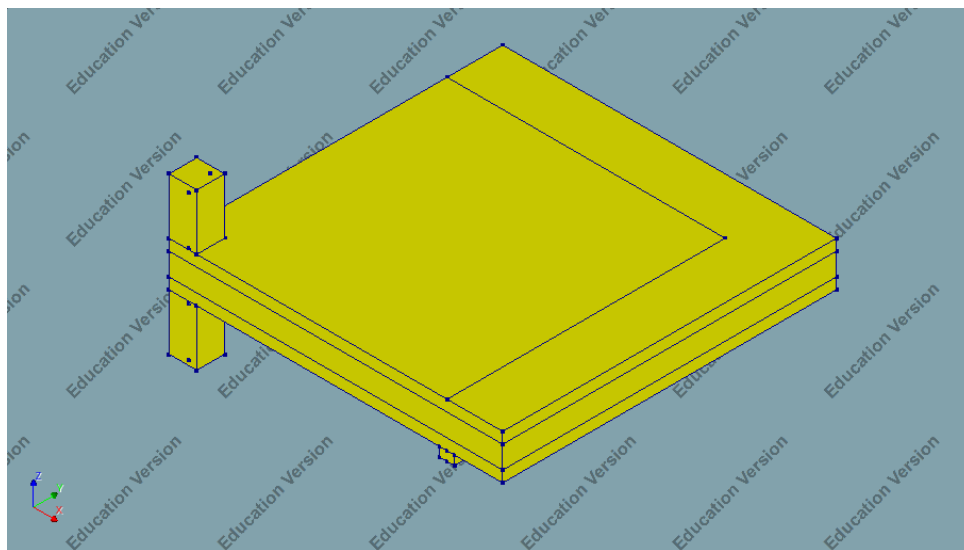
4.3 Προσομοίωση με λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων

4.3.1 Γεωμετρία φορέα

Για την προσομοίωση της σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος επιλέχθηκε το λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων DIANA FEA και έγινε χρήση της ακαδημαϊκής άδειας που προσφέρεται από το Πολυτεχνείο. Το λογισμικό περιλαμβάνει εκτεταμένα μοντέλα υλικού, βιβλιοθήκες στοιχείων και διαδικασίες ανάλυσης, βασισμένες στις πιο προηγμένες τεχνικές ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων. Κρίνεται κατάλληλο για μη γραμμικές αναλύσεις και μελέτες περίπλοκων μηχανισμών αστοχίας που απαιτούν ιδιαίτερη λεπτομέρεια.

Κατά τη διαδικασία ορισμού του φορέα στο περιβάλλον του προγράμματος συντάσσεται κώδικας ειδικών εντολών Python, επιτρέποντας στον χρήστη την εξαγωγή και μορφοποίησή του ίδιου. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται εύκολη η αλλαγή γεωμετριών και άλλων παραμέτρων, με στόχο την βελτιστοποίηση και την παραμετρική διερεύνηση, έπειτα από την ολοκλήρωση του βασικού προσομοιώματος.

Για λόγους εξοικονόμησης στοιχείων και χρόνου υπολογισμών σχεδιάστηκε το 1/4 της πλάκας και του υποστυλώματος, εφόσον επιτρεπόταν λόγω συμμετρίας κατά τους άξονες x και y. Ακολουθώντας τις υποδείξεις του πειράματος αναφοράς, σχεδιάστηκε η πλάκα (solid element) διαστάσεων 900x900x120 mm, αποτελούμενη από 8-κομβικά εξάεδρα στοιχεία, πλευράς 20 mm. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του DIANA, απαιτείται υψηλότερη ακρίβεια κατά την αριθμητική ολοκλήρωση (higher integration) σε προβλήματα με σημαντική μη γραμμική συμπεριφορά, οπότε για τα στοιχεία της πλάκας έγινε η ανάλογη επιλογή στην κατηγορία “Element data”. Τα προεξέχοντα τμήματα του υποστυλώματος διαστάσεων 75x75x150 mm καθώς και οι μεταλλικές πλάκες έδρασης (solid elements) πλάτους 40 mm και πάχους 25 mm ακολούθησαν την διακριτοποίηση της πλάκας. Οι μεταλλικές πλάκες τοποθετήθηκαν στην κάτω παρειά της πλάκας σκυροδέματος, έτσι ώστε το ευθύγραμμο τμήμα στο μέσον του πλάτους τους να απέχει από τη γωνία του υποστυλώματος (κέντρο ολόκληρου του φορέα) 750 mm (όπου και θεωρήθηκε ο μηδενισμός των ροπών κατά το πείραμα).

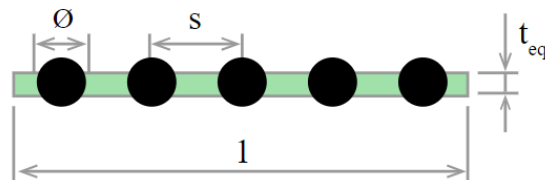


Εικόνα 4.8: Γεωμετρία προσομοιώματος

Οι οπλισμοί κάμψης της πλάκας προσομοιώθηκαν ως επιφανειακά στοιχεία (sheet elements) ενσωματωμένα εντός του στερεού στοιχείου της ίδιας. Δοκιμάστηκε και η χρήση μεμονωμένων ράβδων (wire elements), ωστόσο προέκυψε πιο δύσκαμπτος φορέας, επομένως επιλέχθηκαν τα επιφανειακά στοιχεία που πλησίασαν καλύτερα τα επιθυμητά αποτελέσματα. Το DIANA για την προσθήκη πλέγματος οπλισμού προσφέρει τη μέθοδο πλήρους συνάφειας κατά την οποία δεν επιτρέπεται η ολίσθηση των ράβδων εντός του σκυροδέματος. Ορίζοντας τη διάμετρο και την σταθερή απόσταση των ράβδων, για τις δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις, δημιουργείται ένα

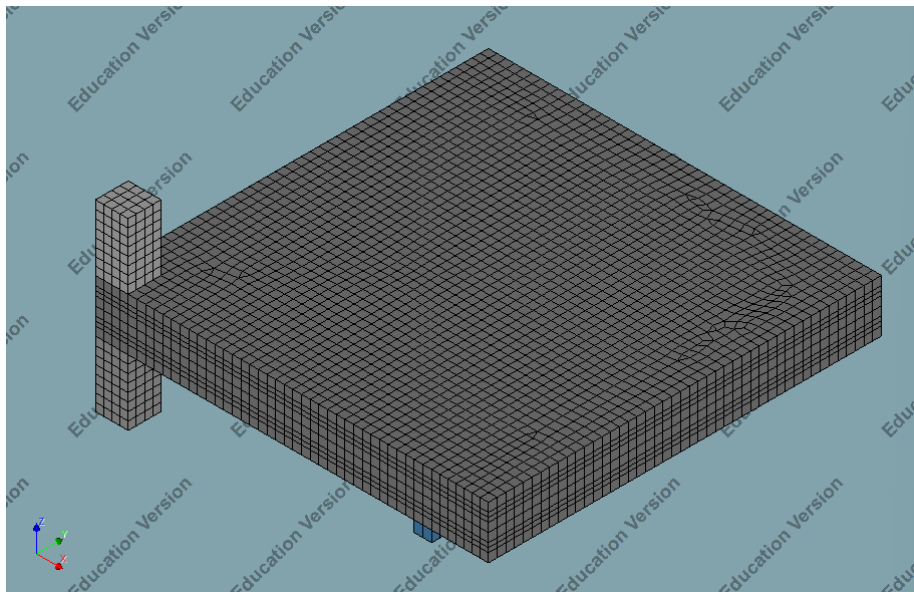
επιφανειακό στοιχείο ισοδύναμου πάχους (Εικόνα 4.9) ώστε να προστεθεί στο προσομοίωμα η αντίστοιχη δυσκαμψία. Η διακριτοποίησή του ακολουθεί εκείνη των στοιχείων εντός των οποίων ενσωματώνεται (mother elements).

Στην προκειμένη περίπτωση λοιπόν ορίστηκαν ράβδοι διαμέτρου 10 mm. Για το κάτω (εφελκυσμένο) πλέγμα τέθηκαν αποστάσεις ίσες με 100 και 90 mm κατά x και y αντίστοιχα, ενώ για το άνω (θλιβόμενο) πλέγμα, αποστάσεις των 200 mm και στις δύο διευθύνσεις (σύμφωνα με το πείραμα). Η ονομαστική επικάλυψη των οπλισμών τέθηκε στα 20 mm. Λαμβάνοντας υπόψιν τις διαμέτρους των διαμήκων ράβδων, τα επιφανειακά στοιχεία τοποθετήθηκαν σε απόσταση 30 mm από την αντίστοιχη παρειά της πλάκας, στο επίπεδο δηλαδή του στατικού ύψους (το οποίο προκύπτει ως το ημιάθροισμα των στατικών υψών των διευθύνσεων x και y).



Εικόνα 4.9: Ορισμός επιφανειακού στοιχείου πλέγματος οπλισμού, πηγή: (DIANA User's Manual)

Η διαμήκης και οι εγκάρσιες ράβδοι του υποστυλώματος προσομοιώθηκαν ως γραμμικά στοιχεία (wire elements) 2 κόμβων, έχοντας πλήρη συνάφεια με το σκυρόδεμα. Η επικάλυψή τους τέθηκε στα 20 mm. Οι 4 τοποθετούμενοι συνδετήρες (συγκεκριμένα το 1/4 της γεωμετρίας τους) απέχουν μεταξύ τους κατά 130 mm.

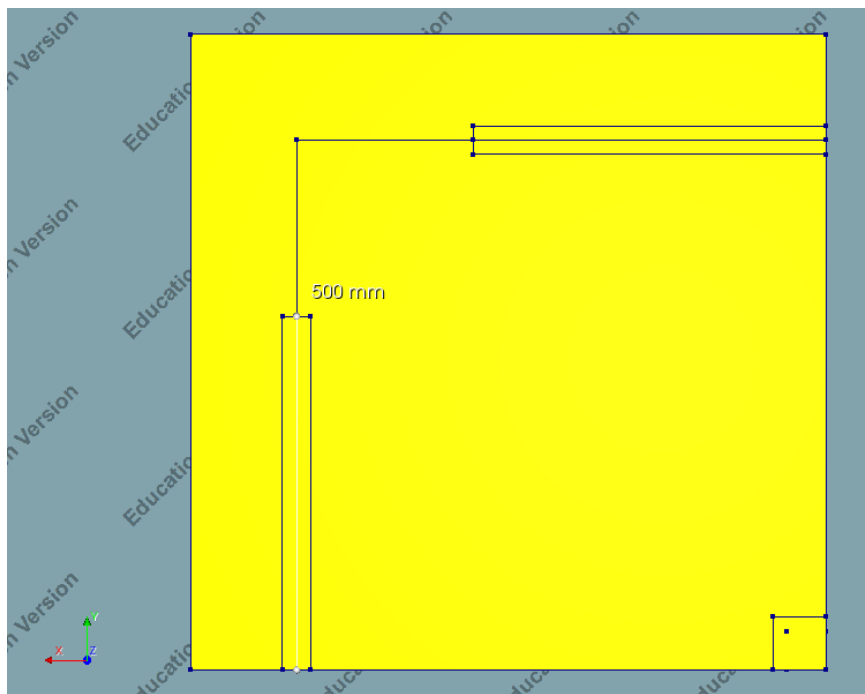


Εικόνα 4.10: Διακριτοποίηση προσομοιώματος

Οι μεταλλικές πλάκες τοποθετήθηκαν προς αποφυγή συγκέντρωσης τάσεων στις στηρίξεις, ώστε να μην επηρεαστεί ο μηχανισμός αστοχίας. Στη διεπιφάνεια των μεταλλικών πλακών και της πλάκας σκυροδέματος ορίστηκε ένα είδος επαφής (interface element) για να προσομοιωθεί σωστά η αλληλεπίδραση των δύο υλικών και να αποφευχθεί η διείσδυση ενός στοιχείου στο άλλο. Κατά την επαφή αναπτύσσεται δύναμη κατά τον άξονα z του στοιχείου διεπιφάνειας, η οποία μετατρέπεται σε εφαπτομενική δύναμη τριβής μέσω του νόμου Coulomb ($F_t = \mu F_n$). Αν οι εσωτερικές τάσεις των εν επαφή στοιχείων είναι μικρότερες από αυτή τη δύναμη τριβής τα στοιχεία θεωρούνται κολλημένα στα σημεία επαφής, διαφορετικά ξεκινά η ολίσθηση σύμφωνα με την ανάλογη δύναμη τριβής.

Στα στοιχεία διεπιφάνειας για τον προσδιορισμό των τοπικών τους αξόνων ορίζονται δύο ειδών επιφάνειες, η πηγή και ο στόχος (source και target face). Ο άξονας z τίθεται κάθετος στο επίπεδό τους με φορά από την πηγή στον στόχο. Στην προκειμένη περίπτωση λοιπόν οι άνω επιφάνειες των μεταλλικών πλακών ορίστηκαν ως πηγή, ενώ η κάτω επιφάνεια της πλάκας σκυροδέματος (εκτός του τμήματος που έρχεται σε επαφή με την κάτω προεξοχή του υποστυλώματος) ως στόχος.

Ωστόσο, παρά τον ορισμό της προαναφερθείσας διεπιφάνειας στο προσομοίωμα και της επιλογής του κατάλληλου υλικού (όπως περιγράφεται στην παράγραφο §4.3.2), παρατηρήθηκε μη επιθυμητή αλληλεπίδραση της πλάκας σκυροδέματος και των μεταλλικών πλακών. Το μήκος των μεταλλικών στηρίξεων αποδείχθηκε κρίσιμο για την προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων, επομένως επιλέχθηκε, ως έμμεση λύση, να τεθεί ίσο με 500 mm (έπειτα από ανάλυση ευαισθησίας, όπως παρουσιάζεται στην παράγραφο §4.3.6).



Εικόνα 4.11: Προβολή κάτω παρειάς πλάκας σκυροδέματος και μεταλλικών πλακών

4.3.2 Ιδιότητες υλικών

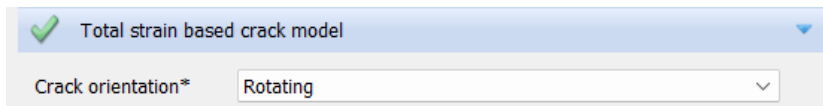
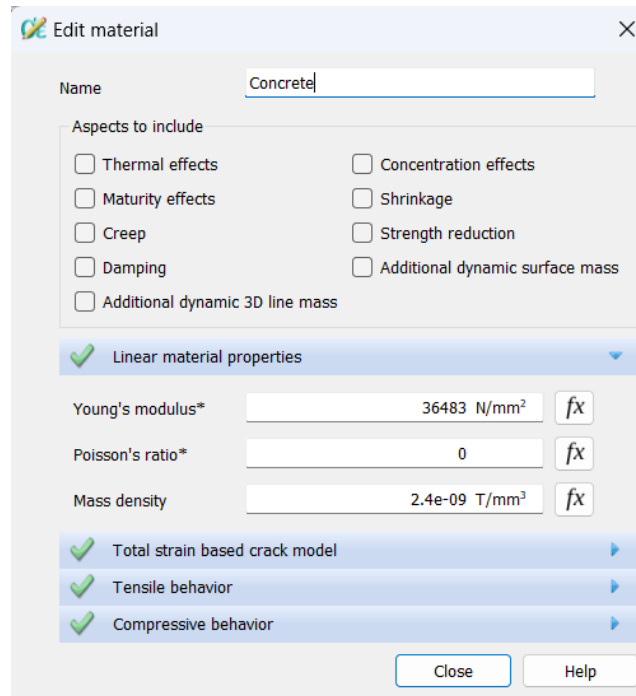
Σκυρόδεμα (Concrete)

Το DIANA προσφέρει πληθώρα μοντέλων υλικού για το σκυρόδεμα. Στο φαινόμενο της διάτρησης η σωστή προσομοίωση της ρηγμάτωσης είναι απαραίτητη. Επιλέχθηκε η χρήση του “Total strain based crack model”, το οποίο βασίζεται στη Θεωρία Τροποποιημένου Πεδίου Θλίψης (Modified Compression Field Theory), που αναπτύχθηκε από τους Vecchio και Collins και επεκτάθηκε για χρήση σε τρισδιάστατα προβλήματα από τους Selby και Vecchio. Το “Total strain based crack model” συμπεριλαμβάνεται στα μοντέλα διανεμημένης ρωγμής (smeared crack models). Η προσομοίωση της ρηγμάτωσης γίνεται με αλλαγή των καταστατικών ιδιοτήτων των πεπερασμένων στοιχείων στα σημεία ολοκλήρωσης Gauss έτσι ώστε μια ρωγμή σε ένα από αυτά να είναι ισοδύναμη με έναν άπειρο αριθμό μικρορηγματώσεων διανεμημένων σε όλο τον όγκο που αντιστοιχεί σε αυτό (Σπηλιόπουλος Κ. Β., Λυκίδης Γ. Χ., 2007).

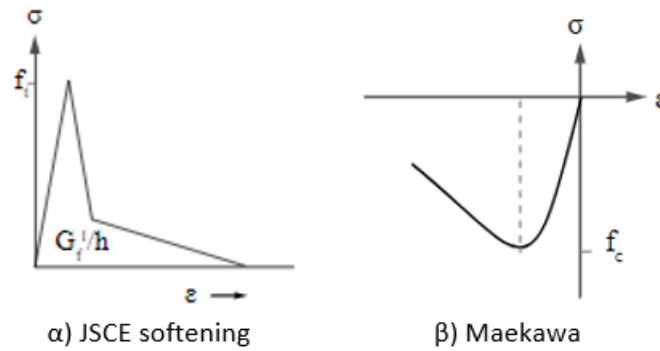
Οι τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων που επιλέχθηκαν παρατίθενται στην Εικόνα 4.12. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος υπολογίστηκε με βάση τη σχέση $E_0 = 5500\sqrt{f'_c}$ του ACI (Αμερικανικός Κανονισμός). Η συγκεκριμένη σχέση επιλέχθηκε έναντι της αντίστοιχης του Ευρωκώδικα ($E_{cm} = 22(f_{cm}/10)^{0.3}$) ακολουθώντας τη λογική υπολογισμών του πειράματος και δεδομένου ότι τα αποτελέσματα των δύο εξισώσεων είχαν μικρή απόκλιση. Η πυκνότητα του σκυροδέματος τέθηκε ίση με $2,4 \cdot 10^{-9}$ T/mm³ και ο λόγος Poisson ίσος με μηδέν εφόσον η τιμή του επιλέχθηκε να παραμείνει σταθερή. Κατά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος, το υλικό θεωρείται ανισοτροπικό, επομένως ο λόγος Poisson μηδενίζεται. Κατά την προσομοίωση του υλικού λοιπόν μπορεί να επιλεγεί σταθερή τιμή ίση με μηδέν, είτε αρχική τιμή $\nu=0,2$, με την προϋπόθεση ότι στον προσδιορισμό της εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος θα επιλεγεί το μοντέλο μείωσης “Damage based” του λόγου Poisson.

Όσον αφορά τον προσανατολισμό της ρηγμάτωσης, επιλέχθηκε το μοντέλο περιστρεφόμενων ρωγμών (Rotating crack orientation), σύμφωνα με το οποίο οι ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στη διεύθυνση της κύριας εφελκυστικής παραμόρφωσης, ενώ παράλληλα λαμβάνεται υπόψιν η περιστροφή των κύριων αξόνων.

Η εφελκυστική καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων θεωρήθηκε τριγωνική, σύμφωνα με το μοντέλο που έχει προταθεί από τον Ιαπωνικό Σύνδεσμο Πολιτικών Μηχανικών (Japan Society of Civil Engineers/JSCE), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.13(α). Τα σημεία της καμπύλης υπολογίστηκαν με βάση την ενέργεια θραύσης G_f , όπως προέκυψε από την Εξίσωση (4.1), την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος f_t' και το εύρος δέσμης ρωγμής h_{cr} . Η παράμετρος h_{cr} τέθηκε ίση με την κυβική ρίζα του όγκου κάθε πεπερασμένου στοιχείου σκυροδέματος (δηλαδή 20 mm) μέσω της επιλογής “Rots”.



Εικόνα 4.12: Εισαγωγή μηχανικών ιδιοτήτων υλικού “Concrete” στο DIANA

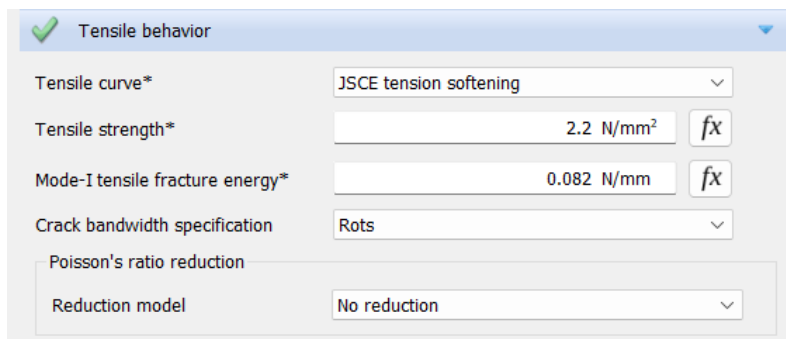


Εικόνα 4.13: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων, α) Εφελκυσμού, β) Θλίψης, πηγή: (DIANA User’s Manual)

Σύμφωνα με τον κανονισμό CEB-FIP Model Code 90, η ενέργεια θραύσης υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$G_f = G_{fo} (f_{cm}/f_{cmo})^{0,7} \quad (4.1)$$

όπου, G_{fo} η ενέργεια θραύσης βάσης η οποία εξαρτάται από το μέγιστο μέγεθος αδρανούς d_{max} και ισούται με 0,026 N/mm για $d_{max}=10$ mm (όπως προκύπτει από τα δεδομένα του πειράματος), $f_{cmo}=10$ MPa και f_{cm} η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος κατά τη σχέση $f_{cm} = f_{ck}+8$ MPa = 42,4+8 = 50,4 MPa (σύμφωνα με τη βιβλιογραφία ισχύει προσεγγιστικά $f_{ck} = f_c' -1,6$ MPa).



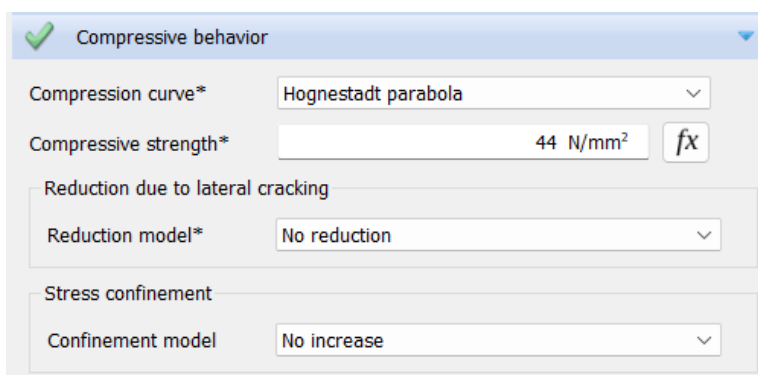
Εικόνα 4.14: Εισαγωγή παραμέτρων της εφελκυστικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο DIANA

Όσον αφορά τη θλιπτική συμπεριφορά του σκυροδέματος, ο νόμος του υλικού προσδιορίστηκε αρχικά με τη χρήση του Hognestad Parabola. Η παραβολική καμπύλη υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$f = f_c \left(2 \frac{\alpha}{\alpha_p} - \left(\frac{\alpha}{\alpha_p} \right)^2 \right) \quad (4.2)$$

όπου, $\alpha_p = - 2f_c/E_0$ και $f_c = f_c'$.

Το πρώτο τμήμα της καμπύλης αφορά τη γραμμική-ελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος με αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_0 . Το δεύτερο τμήμα περιγράφει την παραβολική αύξηση της τάσης μέχρι τη μέγιστη τιμή της και τέλος το τρίτο τμήμα αφορά τον κλάδο της καμπύλης μετά την αιχμή, όπου παρατηρείται μείωση τάσεων μέχρι τη μέγιστη τιμή της παραμόρφωσης (ϵ_u). Στο DIANA ζητείται μόνο η εισαγωγή της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (μέγιστη τιμή τάσης) και οι υπόλοιποι υπολογισμοί, για τον ορισμό της καμπύλης, γίνονται αυτόματα (Εικόνα 4.15).



Εικόνα 4.15: Εισαγωγή παραμέτρων της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο DIANA (Hognestad Parabola)

Έπειτα, εξετάστηκε η χρήση του μοντέλου Maekawa Cracked Concrete curves (για τη θλιπτική συμπεριφορά), το οποίο λαμβάνει υπόψιν τη μείωση της αντοχής του υλικού με βάση τη βλάβη που προκαλείται στο ίδιο (damage based reduction). Στο περιβάλλον του προγράμματος απαιτήθηκε ο προσδιορισμός της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος (44 MPa) ενώ για τις υπόλοιπες παραμέτρους διατηρήθηκαν οι αρχικές επιλογές του λογισμικού (Εικόνα 4.16). Η καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπολογίζεται σύμφωνα με τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\sigma = KE (\varepsilon - \varepsilon_p) \quad (4.3)$$

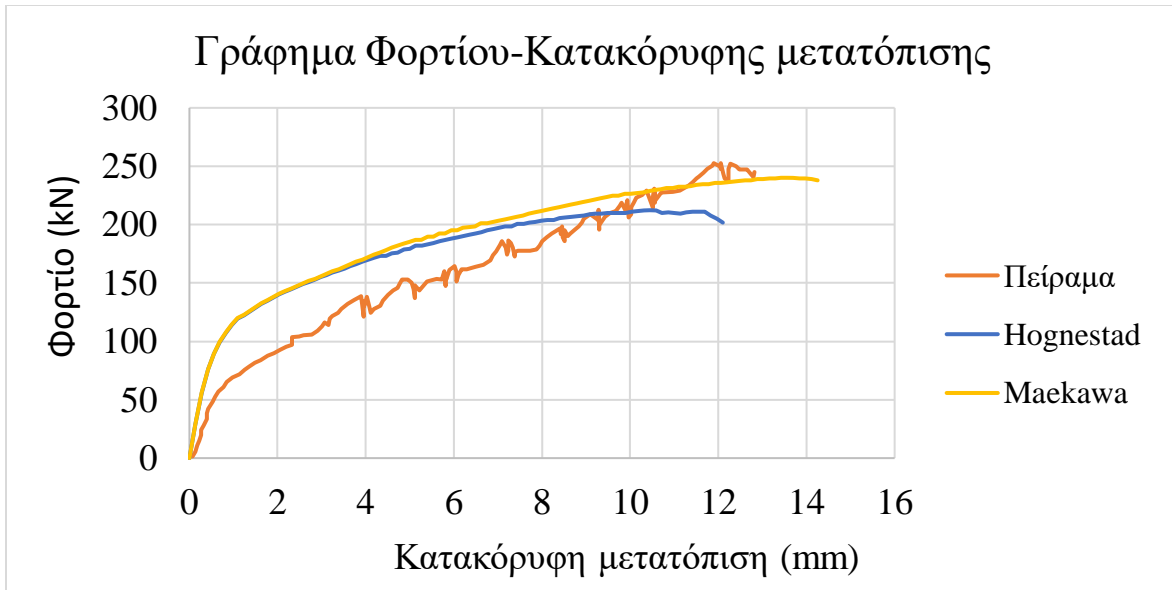
$$K = \exp\left(-0,73 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \left(1 - \exp\left(-1,25 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)\right)\right) \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} - \frac{20}{7} \left(1 - \exp\left(-0,35 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}\right)\right)\right) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_p = 2 \frac{f'_{t,c}}{E} \quad (4.6)$$

Εικόνα 4.16: Εισαγωγή παραμέτρων της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος στο DIANA (Maekawa Cracked Concrete curves)

Μεταξύ των δύο μοντέλων επιλέχθηκε το “Maekawa Cracked Concrete curves”, καθώς έδωσε πιο σωστή καμπύλη Φορτίου-Κατακόρυφης μετατόπισης και τα αποτελέσματά του πλησίασαν καλύτερα τα επιθυμητά (προέκυψε μεγαλύτερη τιμή αντοχής και μέγιστης μετατόπισης).



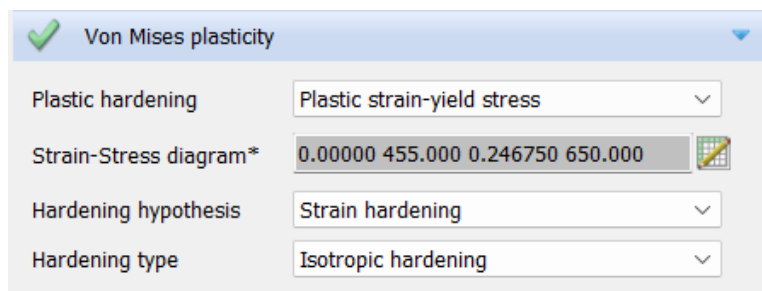
Εικόνα 4.17: Σύγκριση μοντέλων περιγραφής της θλιπτικής συμπεριφοράς του σκυροδέματος

Χάλυβας οπλισμού (Steel)

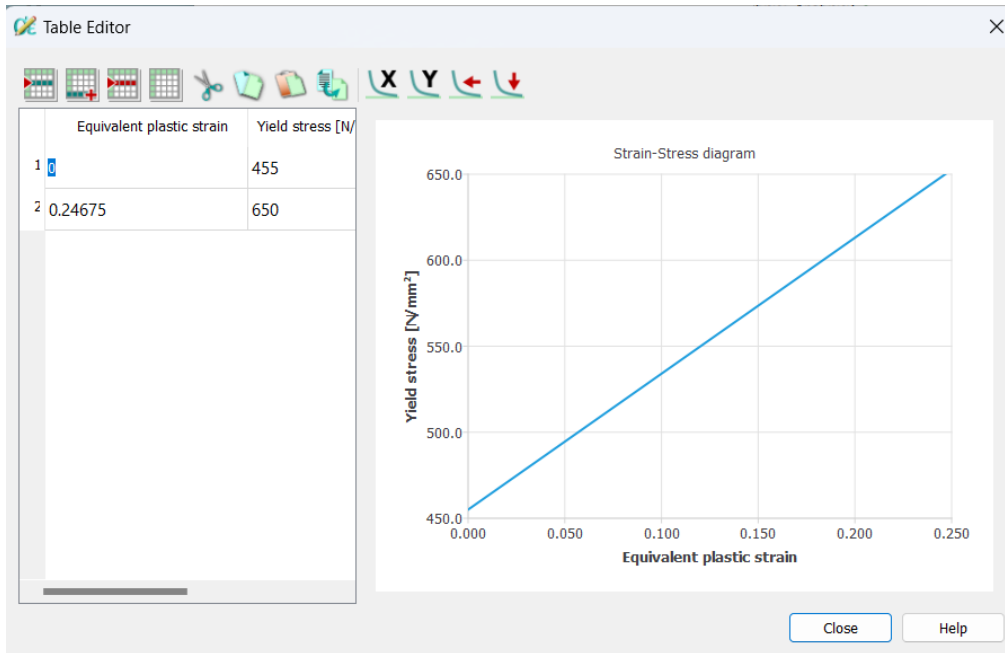
Για τα πλέγματα της πλάκας αλλά και τους οπλισμούς του υποστυλώματος χρησιμοποιήθηκε χάλυβας, του οποίου ο νόμος υλικού προσδιορίστηκε σύμφωνα με το μοντέλο Von Mises. Το μέτρο ελαστικότητάς του τέθηκε ίσο με τη συνήθη τιμή των 200 GPa, ενώ ο μεταελαστικός κλάδος του διαγράμματος τάσεων-παραμορφώσεων θεωρήθηκε κρατυνόμενος (με την κράτυνση να είναι ιστροπική). Οι χαρακτηριστικές τιμές του διαγράμματος συνοψίζονται στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Μηχανικές ιδιότητες χάλυβα οπλισμού

Τάση διαρροής f_y [MPa]	Ανηγγμένη παραμόρφωση διαρροής ϵ_y [-]	Τάση αστοχίας f_u [MPa]	Ανηγγμένη παραμόρφωση αστοχίας ϵ_u [-]
455	0,0023	650	0,25

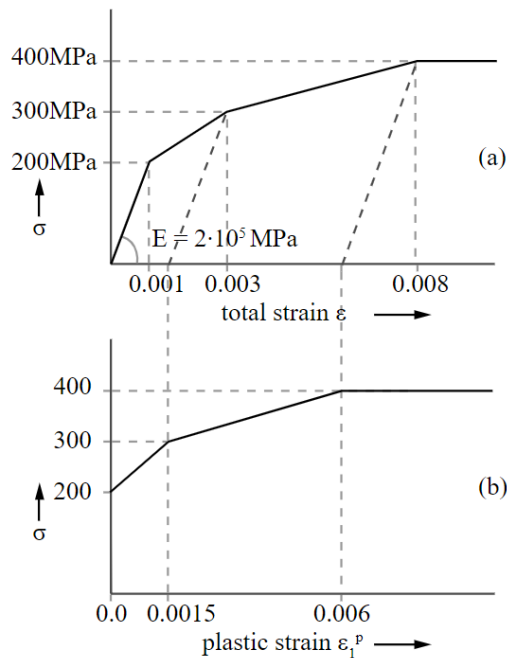


Εικόνα 4.18α: Εισαγωγή του νόμου υλικού του χάλυβα οπλισμού στο DIANA



Εικόνα 4.18β: Εισαγωγή του νόμου υλικού του χάλυβα οπλισμού στο DIANA

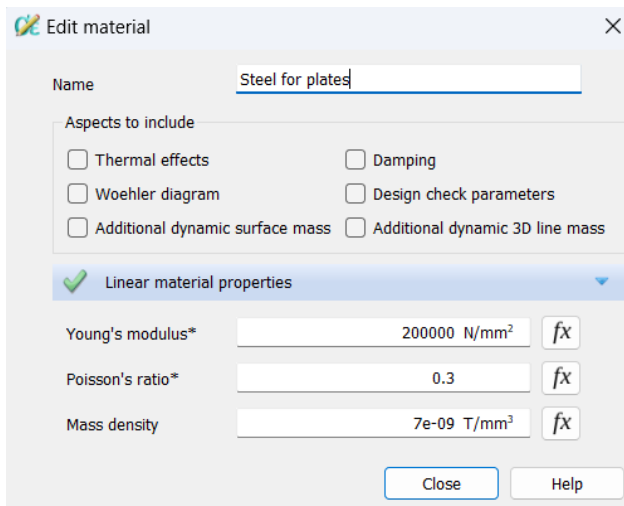
Παρατηρείται πως έγινε εισαγωγή του διαγράμματος τάσεων-πλαστικών παραμορφώσεων. Η μετατροπή πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις υποδείξεις του εγχειριδίου του DIANA, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.19. Ουσιαστικά η πλαστική παραμόρφωση ϵ^p υπολογίζεται ως ϵ_i^e , όπου $\epsilon_i^e = \sigma/E$.



Εικόνα 4.19: Μετατροπή ολικών ανηγμένων παραμορφώσεων σε πλαστικές, πηγή: (DIANA User's Manual)

Χάλυβας πλακών έδρασης (Steel for plates)

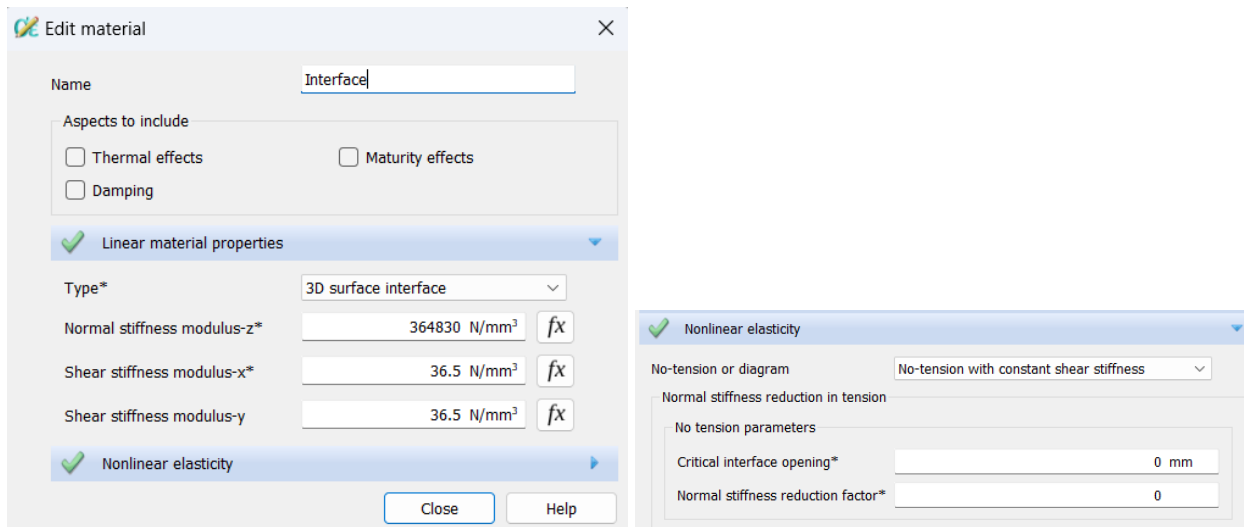
Για τις μεταλλικές πλάκες έδρασης ορίστηκε ελαστικός χάλυβας, μέτρου ελαστικότητας 200 GPa και λόγου Poisson $\nu=0,3$, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.20.



Εικόνα 4.20: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού “Steel for plates” στο DIANA

Διεπιφάνεια μεταλλικών πλακών-σκυροδέματος (Interface)

Στη διεπιφάνεια της μεταλλικής πλάκας και του σκυροδέματος απαιτήθηκε η εισαγωγή μοντελικού υλικού, προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά η αλληλεπίδραση των στοιχείων και να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα, όσον αφορά τις σχετικές μετακινήσεις τους. Κατά τη διεύθυνση z λοιπόν, όπου στόχος ήταν η αποτροπή των σχετικών μετακινήσεων, ορίστηκε μεγάλη τιμή του μέτρου δυσκαμψίας (ενδεικτικά 10 φορές μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή του μέτρου ελαστικότητας των εν επαφή υλικών). Αντιθέτως, κατά τις διευθύνσεις x και y , όπου η σχετική ολίσθηση είναι επιτρεπτή, ορίστηκαν μικρές τιμές για τα διατμητικά μέτρα δυσκαμψίας. Οι ακριβείς εισαγόμενες τιμές δίνονται στην Εικόνα 4.21.



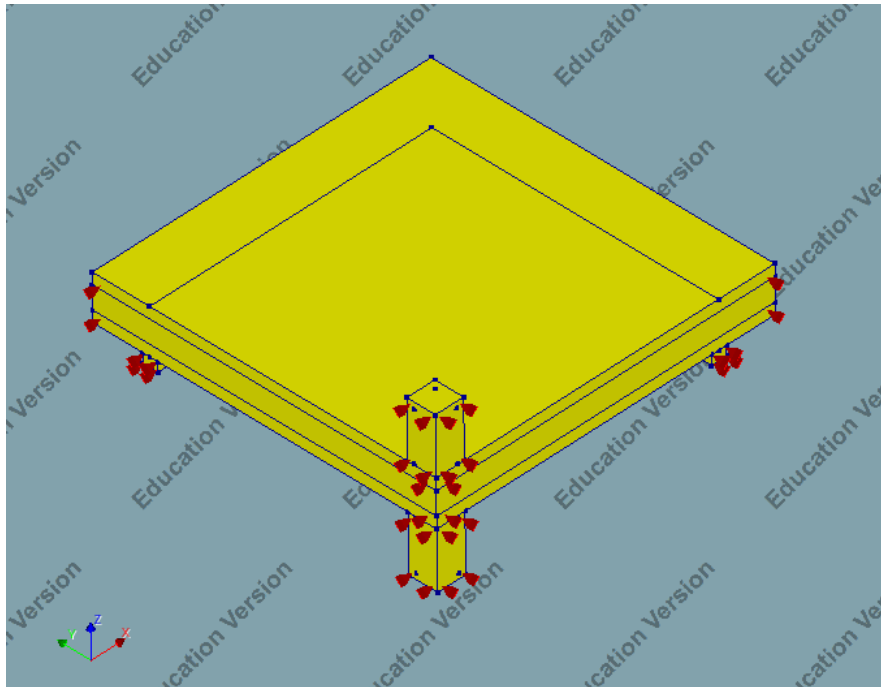
Εικόνα 4.21: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού “Interface” στο DIANA

Προς αποφυγή της συγκέντρωσης τάσεων στην περιοχή των στηρίξεων και της έντονης ρηγμάτωσής της (γεγονός που θα επηρέαζε τη μορφή αστοχίας του προσομοιώματος), η λειτουργία του υλικού διεπιφάνειας περιορίστηκε μόνο για θλιπτικές παραμορφώσεις. Όταν ξεκινά ο εφελκυσμός της κάτω παρειάς της πλάκας στην περιοχή των στηρίξεων, το σκυρόδεμα αποκόπτεται από τις μεταλλικές πλάκες και παραμορφώνεται αναλόγως. Η συμπεριφορά αυτή προσομοιώνεται με το μηδενισμό του μέτρου δυσκαμψίας κατά τη διεύθυνση z, για θετικές παραμορφώσεις, σύμφωνα με την Εικόνα 4.21. Ωστόσο όπως προαναφέρθηκε, παρά την τήρηση των υποδείξεων του εγχειριδίου του λογισμικού, δεν επιτεύχθηκε η επιθυμητή αλληλεπίδραση των στοιχείων.

4.3.3 Συνοριακές συνθήκες

Συμμετρία (Symmetry)

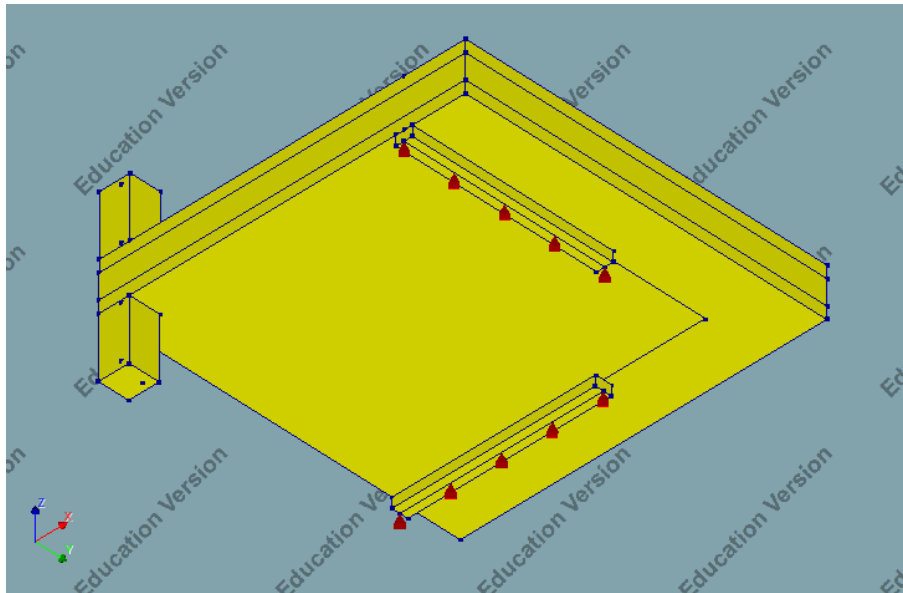
Λόγω της συμμετρίας ως προς τον άξονα x δεσμεύτηκε στην ανάλογη επιφάνεια (πλάκας, υποστυλώματος και μεταλλικής πλάκας έδρασης) η μετατόπιση κατά y, ενώ αντίστοιχα, για τη συμμετρία ως προς τον άξονα y, η μετατόπιση κατά x (επίσης στην ανάλογη επιφάνεια).



Εικόνα 4.22: Εισαγωγή οριακών συνθηκών “Symmetry” στο DIANA

Συνθήκες στήριξης (Supports)

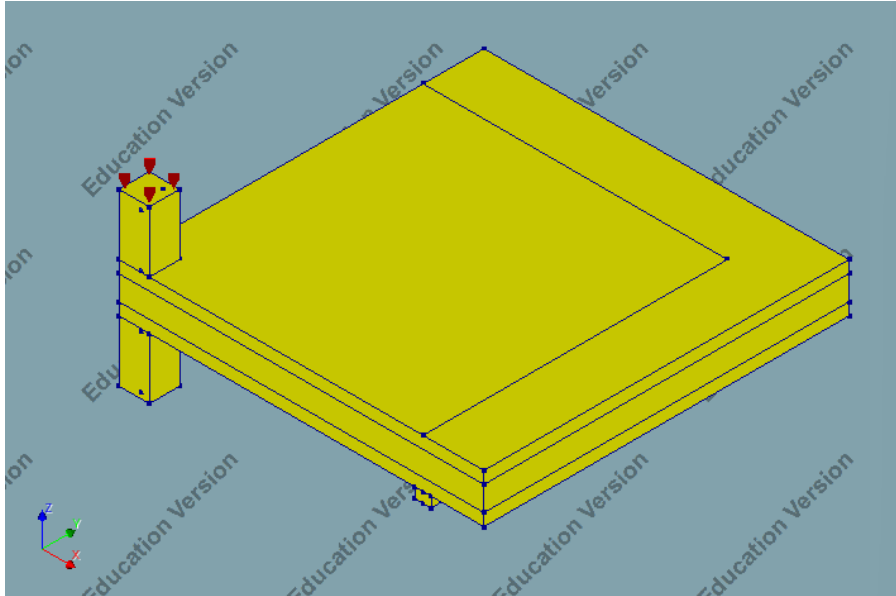
Κατά μήκος των μεταλλικών πλάκων, συγκεκριμένα στο μέσο των κάτω επιφανειών τους, εφαρμόστηκε γραμμικά η δέσμευση της κατακόρυφης μετατόπισης κατά τον άξονα z.



Εικόνα 4.23: Εισαγωγή οριακών συνθηκών “Supports” στο DIANA

Επιβαλλόμενη παραμόρφωση (Prescribed deformation)

Η εφαρμογή φορτίου επιβαλλόμενης παραμόρφωσης, που πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται παρακάτω (παράγραφος §4.3.4), προϋποθέτει τη δέσμευση της μετατόπισης κατά τον αντίστοιχο άξονα (στην προκειμένη περίπτωση κατά z) στην επιφάνεια επιβολής του φορτίου. Αυτό συμβαίνει για τη σωστή εξαγωγή αποτελεσμάτων κατά την ανάλυση, όπου η συνισταμένη δύναμη αντίδρασης της συγκεκριμένης στήριξης μεταφράζεται ως η επιβαλλόμενη δύναμη στην καμπύλη Φορτίου-Κατακόρυφης μετατόπισης που προκύπτει.

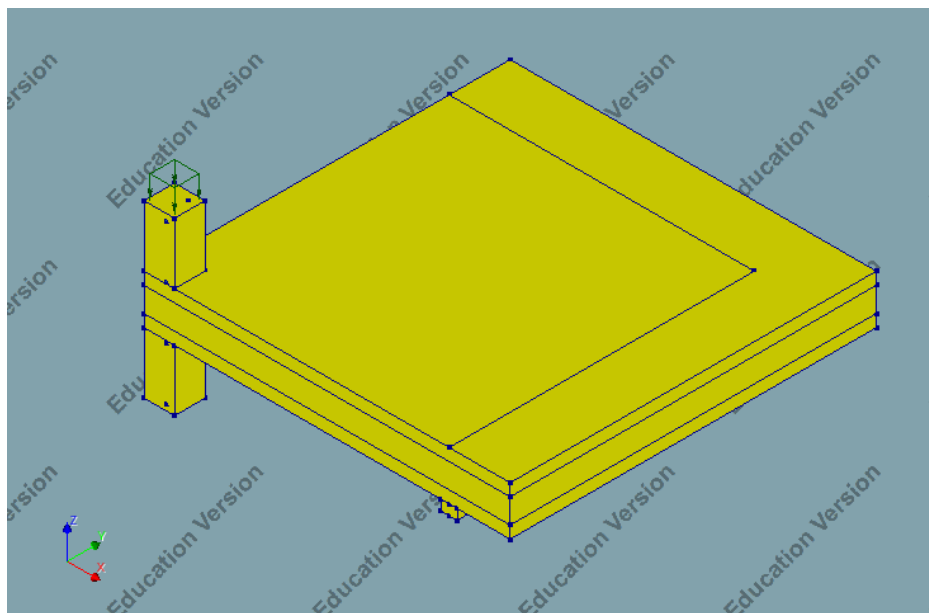


Εικόνα 4.24: Εισαγωγή οριακών συνθηκών “Prescribed deformation” στο DIANA

4.3.4 Φορτία

Για λόγους ελέγχου της σωστής λειτουργίας του προσομοιώματος ορίστηκε το φορτίο του ιδίου βάρους, το οποίο όμως δεν λήφθηκε υπόψιν στη μη γραμμική ανάλυση, προς απλοποίηση της διαδικασίας, δεδομένης της μικρής συνεισφοράς του στο εξεταζόμενο φαινόμενο.

Ακολουθώντας τη μέθοδο του πειράματος, εφαρμόστηκε φορτίο κατακόρυφης επιβαλλόμενης παραμόρφωσης στην άνω επιφάνεια του υποστυλώματος. Η φορά του φορτίου τέθηκε προς τα αρνητικά του άξονα z (όμοια με το πείραμα και αντίθετα από την πραγματικότητα) και η τιμή του ίση με 14 mm (κοντά στη μέγιστη κατά το πείραμα κατακόρυφη μετατόπιση).



Εικόνα 4.24: Εισαγωγή φορτίου επιβαλλόμενης παραμόρφωσης στο DIANA

4.3.5 Ανάλυση

Για λόγους ελέγχου της σωστής συμπεριφοράς του φορέα κατά την φόρτιση και την εύρεση πιθανών προβλημάτων προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκε αρχικά γραμμική ανάλυση. Μετά τη διαπίστωση της σωστής λειτουργίας ακολούθησε η μη γραμμική ανάλυση όπως περιγράφεται παρακάτω. Η μη γραμμική συμπεριφορά ενός φορέα, η κατάργηση δηλαδή της αναλογίας μεταξύ επιβαλλόμενων φορτίων και αναπτυσσόμενης έντασης και παραμόρφωσης, μπορεί να οφείλεται είτε στη γεωμετρία είτε στα υλικά από τα οποία αποτελείται.

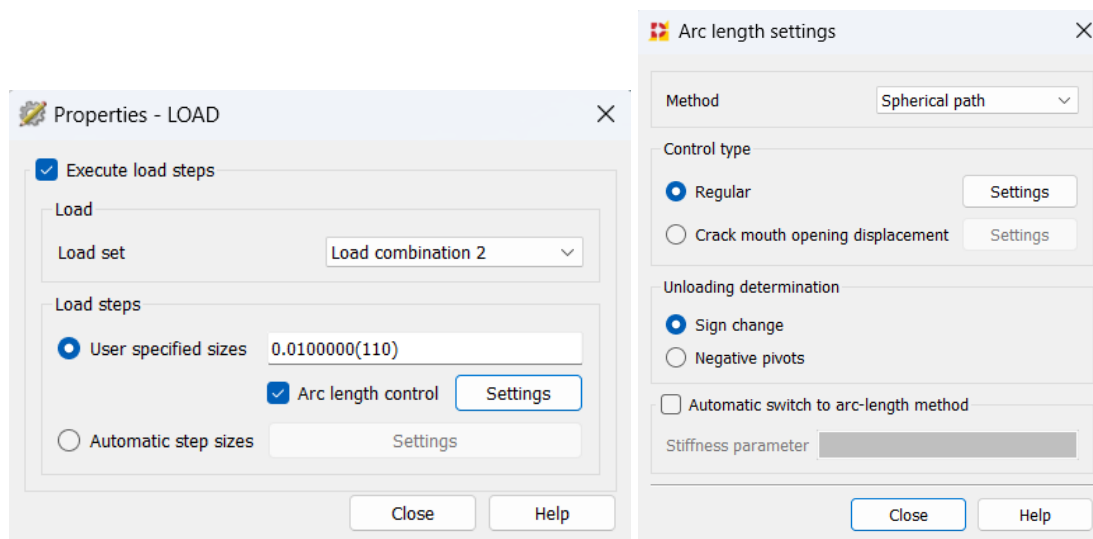
Δεδομένης της μεγάλης ακρίβειας και αξιοπιστίας στις μεθόδους ανάλυσης των κατασκευών, καθίσταται δυνατή η μόρφωση πιο εύκαμπτων φορέων, όπου επιτρέπονται μεγαλύτερες παραμορφώσεις. Λόγω της ανάπτυξης έντονων παραμορφώσεων κατά την επιβολή των φορτίων παρατηρείται σημαντική διαφορά στη γεωμετρία του απαραμόρφωτου και του παραμορφωμένου φορέα. Κρίνεται λοιπόν απαραίτητη η διατύπωση των εξισώσεων ισορροπίας στην παραμορφωμένη γεωμετρία, με αποτέλεσμα η συμπεριφορά του φορέα να χαρακτηρίζεται γεωμετρικά μη γραμμική.

Κατά τον σχεδιασμό μιας κατασκευής επιτρέπεται, σε προκαθορισμένες θέσεις, η εκμετάλλευση της μετελαστικής συμπεριφοράς των υλικών, με αποτέλεσμα την καλύτερη αξιοποίησή τους. Λαμβάνονται υπόψιν ιδιότητες των υλικών, όπως η ρηγματώση για το σκυρόδεμα και η διαρροή του χάλυβα για τους οπλισμούς, καταργώντας έτσι τη γραμμική σχέση φορτίων-αναπτυσσόμενων εντάσεων και παραμορφώσεων, ιδιότητα που χαρακτηρίζεται ως μη γραμμική συμπεριφορά του υλικού.

Για το εξεταζόμενο φαινόμενο της διάτρησης λοιπόν κρίθηκε απαραίτητη η μη γραμμική ανάλυση του προσομοιώματος. Η διαδικασία που ακολουθείται πίσω από οποιοδήποτε είδους ανάλυση (γραμμική ή μη) είναι ο υπολογισμός του διανύσματος της μετατόπισης, ώστε να επέλθει

ισορροπία μεταξύ εσωτερικών και εξωτερικών δυνάμεων. Κατά τη μη γραμμική ανάλυση, η επίλυση αυτή δεν είναι τόσο απλή όσο στη γραμμική. Το πρόβλημα εκτός από διακριτό στο χώρο (μέσω των πεπερασμένων στοιχείων) γίνεται και διακριτό στο χρόνο, καθώς το φορτίο εφαρμόζεται σταδιακά. Στο τέλος κάθε προσαύξησης του φορτίου επιτυγχάνεται η ισορροπία του φορέα μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας μέχρι τη σύγκλιση των λύσεων.

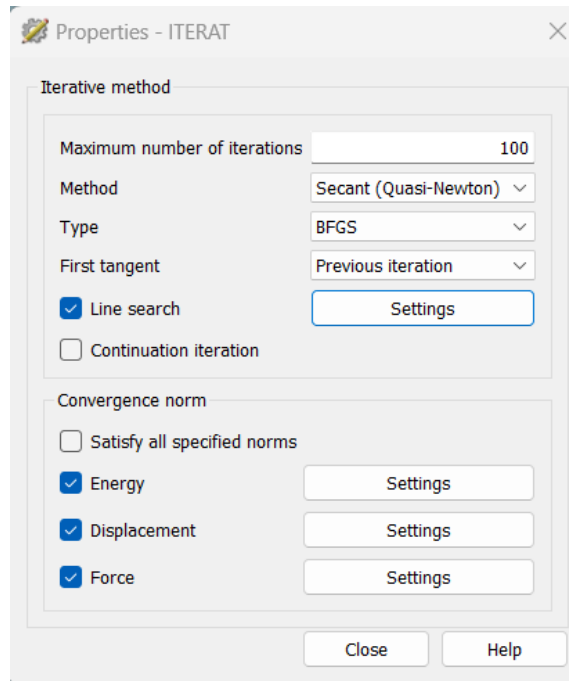
Η προαναφερθείσα λογική χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση της σύνδεσης πλάκας υποστυλώματος στο DIANA. Το φορτίο της επιβαλλόμενης μετατόπισης εφαρμόστηκε με συντελεστή 0,01 μέσω 110 προσαυξήσεων. Ο αριθμός των βημάτων δεν είναι δεσμευτικός, καθώς ο φορέας μπορεί να αστοχήσει πριν την ολοκλήρωσή τους, γεγονός που θα γίνει αντιληπτό από τη μη σύγκλιση των λύσεων κατά την επαναληπτική διαδικασία.



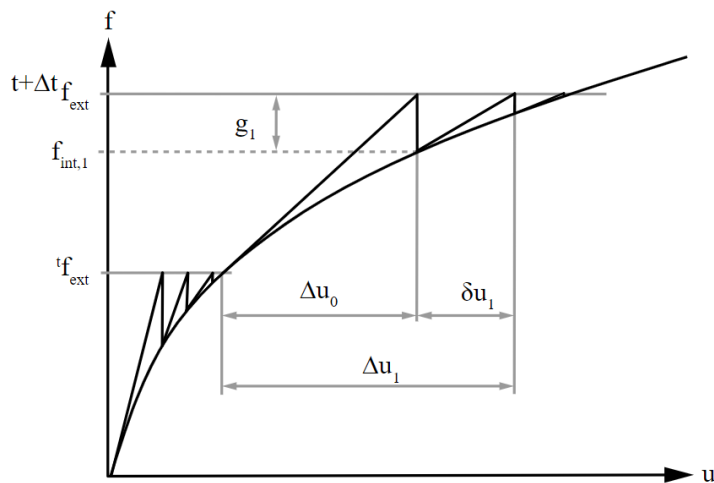
Εικόνα 4.25: Εισαγωγή ιδιοτήτων μη γραμμικής ανάλυσης στο DIANA

Στις συνήθεις επαναληπτικές διαδικασίες ενδέχεται να παρουσιαστεί το πρόβλημα πρόβλεψης μεγάλων μετατοπίσεων κατά την προσαύξηση του φορτίου. Προς αποφυγή του συγκεκριμένου προβλήματος και για την εξαγωγή καλύτερων αποτελεσμάτων, επιλέχθηκε η χρήση της μεθόδου ελέγχου “Arc length control” κατά την οποία λήφθηκαν υπόψιν οι μετατοπίσεις της άνω επιφάνειας του υποστυλώματος (όπου εφαρμόστηκε το φορτίο).

Όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.26, τέθηκε μέγιστος αριθμός επαναλήψεων το 100 για την επίτευξη της σύγκλισης σε κάθε βήμα, με κριτήριο είτε την ενέργεια, είτε τη μετατόπιση είτε τη δύναμη. Όσον αφορά τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση της επαναληπτικής διαδικασίας, επιλέχθηκε η “Secant/ Quasi-Newton”, κατά την οποία αξιοποιούνται πληροφορίες από προηγούμενα διανύσματα λύσης και δύναμης εκτός ισορροπίας, προκειμένου να υπάρξει καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος.



Εικόνα 4.26: Εισαγωγή ιδιοτήτων επαναληπτικής διαδικασίας στο DIANA



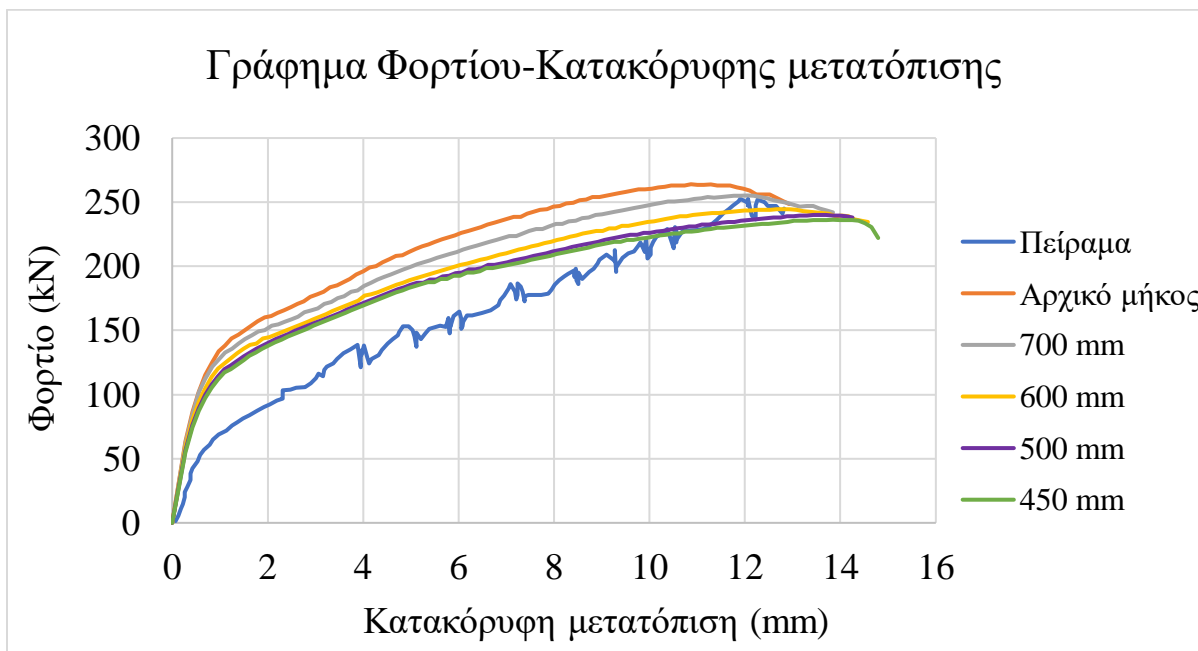
Εικόνα 4.27: Μέθοδος επαναληπτικής διαδικασίας “Secant/ Quasi-Newton”, πηγή: (DIANA User’s Manual)

4.3.6 Ανάλυση ευαισθησίας

Όπως προαναφέρθηκε, διαπιστώθηκε πως το μήκος των μεταλλικών πλακών ήταν κρίσιμο για την επίτευξη της επιθυμητής απόκρισης του προσομοιώματος, δεδομένου ότι η διεπιφάνεια δεν λειτούργησε όπως προβλεπόταν. Έχοντας επιλέξει λοιπόν όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους και

μεθόδους προσομοίωσης, πραγματοποιήθηκαν κάποιες αναλύσεις όπου μειωνόταν σταδιακά το μήκος των στηρίξεων, προκειμένου να συγκριθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Αρχικά, εξετάστηκε το προσομοίωμα με ολόκληρο το μήκος τους (έτσι ώστε να εφάπτονται οι δύο πλάκες στην αντίστοιχη γωνία) και έπειτα ακολούθησαν διαδοχικές αναλύσεις με μήκη 700, 600, 500 και 450 mm (Εικόνα 4.28).

Στην πρώτη περίπτωση, ενώ η τιμή της αντοχής και της μέγιστης κατακόρυφης μετατόπισης προέκυψαν ικανοποιητικές, παρατηρήθηκε ότι ο φορέας ήταν ιδιαίτερα δύσκαμπτος. Αυτό το πρόβλημα βελτιωνόταν αναλογικά με τη μείωση του μήκους έως μία τιμή όπου η καμπύλη σταθεροποιήθηκε και οποιαδήποτε προσαύξηση είχε ως αποτέλεσμα πολύ μικρές αλλαγές, κυρίως ως προς τη μέγιστη μετατόπιση. Επιλέχθηκε λοιπόν να διατηρηθεί το μήκος των 500 mm, καθώς τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το αντίστοιχο προσομοίωμα φάνηκε ότι προσέγγισαν καλύτερα την καμπύλη του πειράματος.



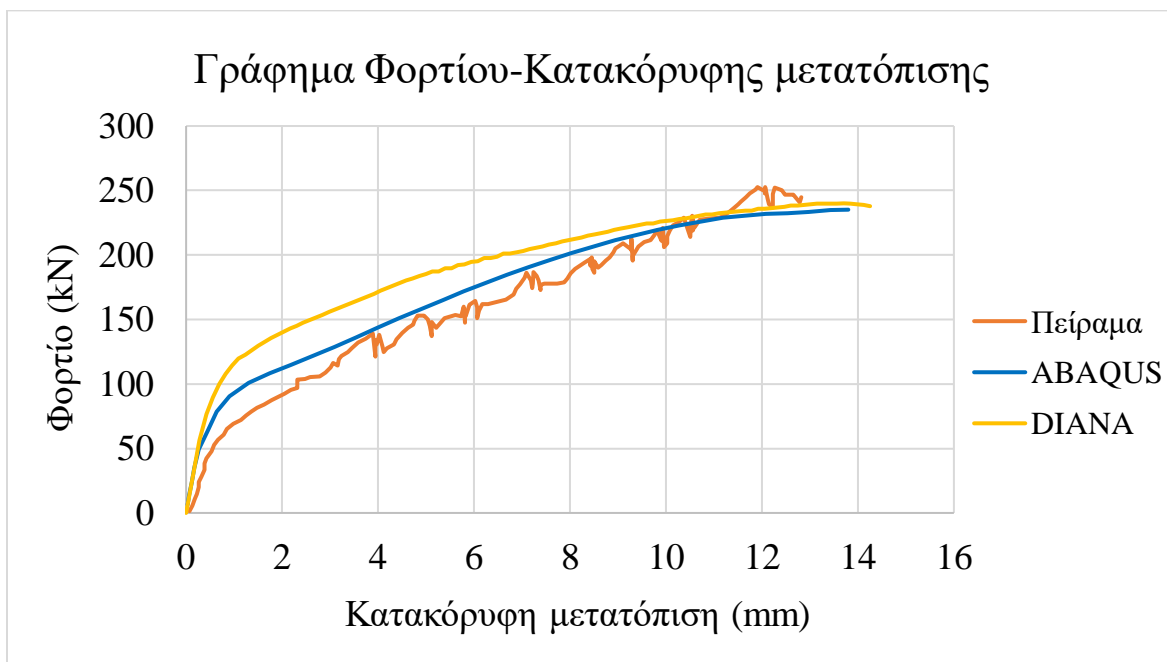
Εικόνα 4.28: Σύγκριση διαφορετικών μηκών μεταλλικών πλακών

4.3.7 Αποτελέσματα

Το προσομοίωμα αστόχησε από διάτρηση, όπως συνέβη και στην περίπτωση του πειράματος αναφοράς. Η συγκριτική απεικόνιση της καμπύλης Φορτίου-Κατακόρυφης μετατόπισης που προέκυψε από το πρόγραμμα και αυτής του πειράματος πραγματοποιήθηκε μέσω Excel, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.29. Οι τιμές του άξονα x (Κατακόρυφη μετατόπιση) προέκυψαν από εξαγωγή των μετατοπίσεων του άνω γωνιακού κόμβου του υποστυλώματος (θεωρητικά ο κεντρικός κόμβος του υποστυλώματος αν υπήρχαν και τα 4/4 του δοκιμίου) και χρήση της απόλυτης τιμής τους, καθώς οι μετατοπίσεις λόγω φοράς των αξόνων είχαν αρνητικό πρόσημο. Όσον αφορά τις τιμές του φορτίου, έγινε εξαγωγή των αντιδράσεων στήριξης της άνω επιφάνειας

του υποστυλώματος για όλους τους κόμβους της και προστέθηκαν οι εξαγόμενες τιμές. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε για κάθε βήμα. Έπειτα από τετραπλασιασμό των αποτελεσμάτων (καθώς προσομοιώθηκε μόνο το 1/4 του δοκιμίου) αλλά και κατάλληλη μετατροπή των μονάδων μέτρησης, προέκυψαν οι τιμές της καμπύλης στην Εικόνα 4.29. Ο φορέας του προσομοιώματος προέκυψε πιο δύσκαμπτος από την πραγματικότητα, γεγονός στο οποίο πιθανώς συμβάλλει η ύπαρξη μικρορηγματώσεων στην πλάκα του πειράματος, πριν την έναρξη επιβολής του φορτίου.

Να σημειωθεί πως για λόγους σύγκρισης παρουσιάζεται και η καμπύλη που προέκυψε από την ανάλυση της εξεταζόμενης πειραματικής διάταξης στο λογισμικό ABAQUS, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διατριβής της Αικατερίνης Γενίκομσου στο Πανεπιστήμιο του Waterloo στον Καναδά. Η συγκεκριμένη διατριβή αποτέλεσε πηγή χρήσιμων πληροφοριών για τη διαδικασία της προσομοίωσης στην παρούσα διπλωματική εργασία. Παρατηρείται λοιπόν ότι τα εξαγόμενα αποτελέσματα των δύο λογισμικών παρουσιάζουν ικανοποιητική σύγκλιση, εξαιρουμένου του φορτίου στο οποίο παρατηρήθηκε μείωση της κλίσης της καμπύλης. Η αυξημένη τιμή του συγκεκριμένου φορτίου πιθανώς οφείλεται στη μη επιθυμητή αλληλεπίδραση των επιφανειών της πλάκας σκυροδέματος και των μεταλλικών πλακών έδρασης και στη χρήση διαφορετικών μοντέλων υλικού (στο ABAQUS διατίθεται το “Damage plasticity model”).

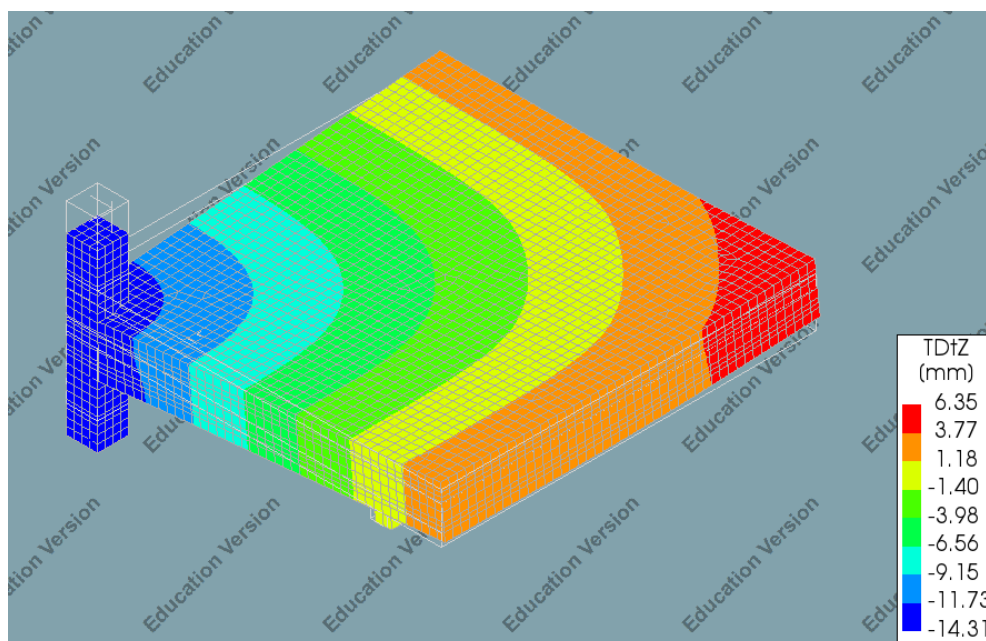


Εικόνα 4.29: Καμπύλη Φορτίου-Κατακόρυφης μετατόπισης όπως προέκυψε από το προσομοίωμα στο DIANA, στο ABAQUS και από το πείραμα αναφοράς

Στον Πίνακα 4.4 συνοψίζονται το φορτίο και η κατακόρυφη μετατόπιση αστοχίας του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων και του πειράματος.

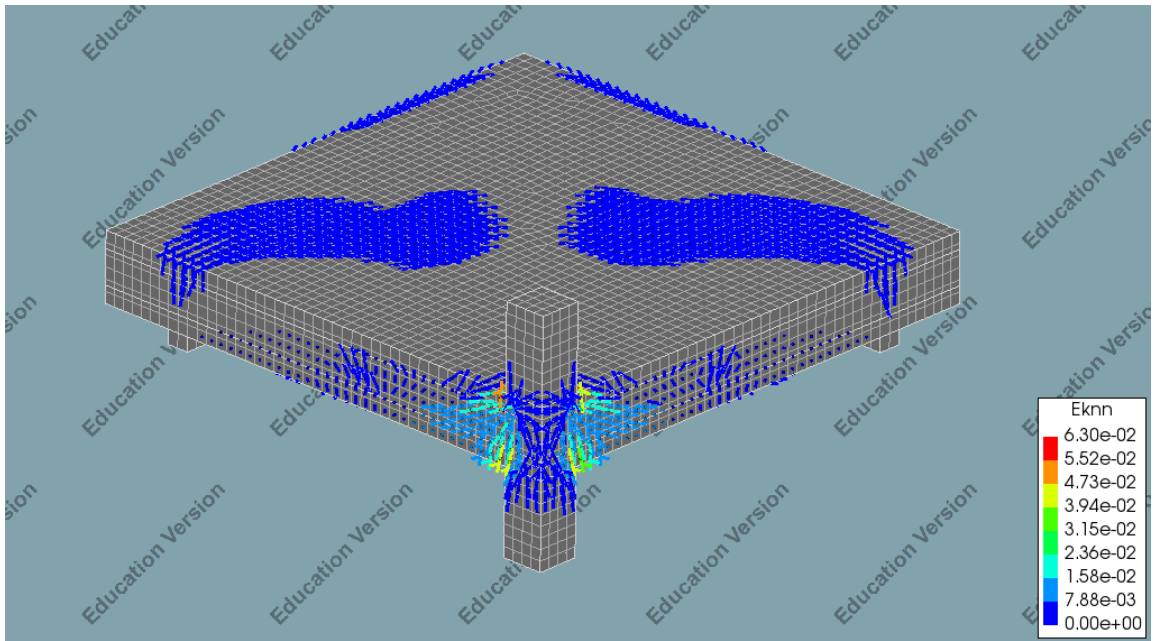
Πίνακας 4.4: Αποτελέσματα πειράματος και ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων

	Φορτίο αστοχίας [kN]	Κατακόρυφη μετατόπιση αστοχίας [mm]
Πείραμα αναφοράς	253	11,9
Ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων στο DIANA	240	13,7

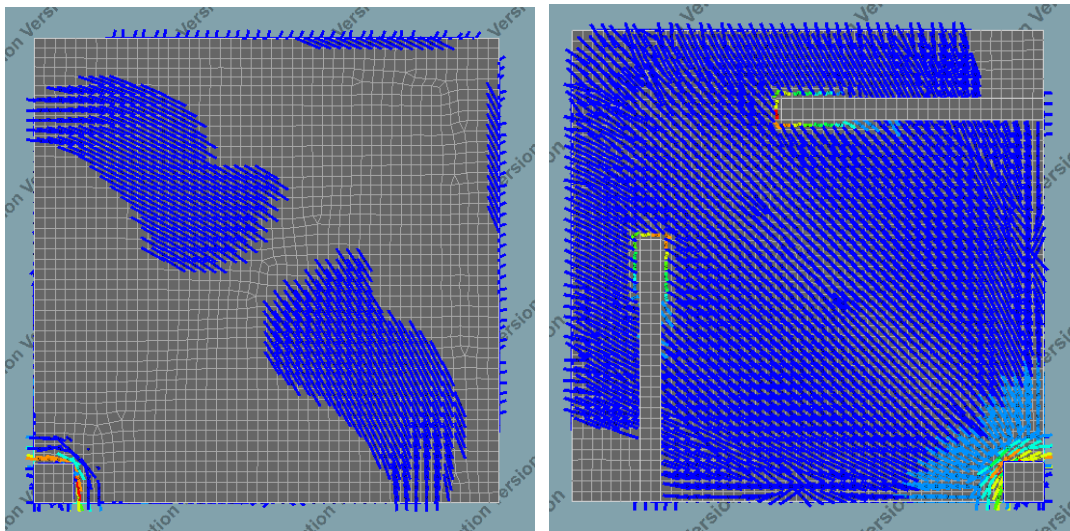


Εικόνα 4.30: Κατακόρυφες μετατοπίσεις κατά το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

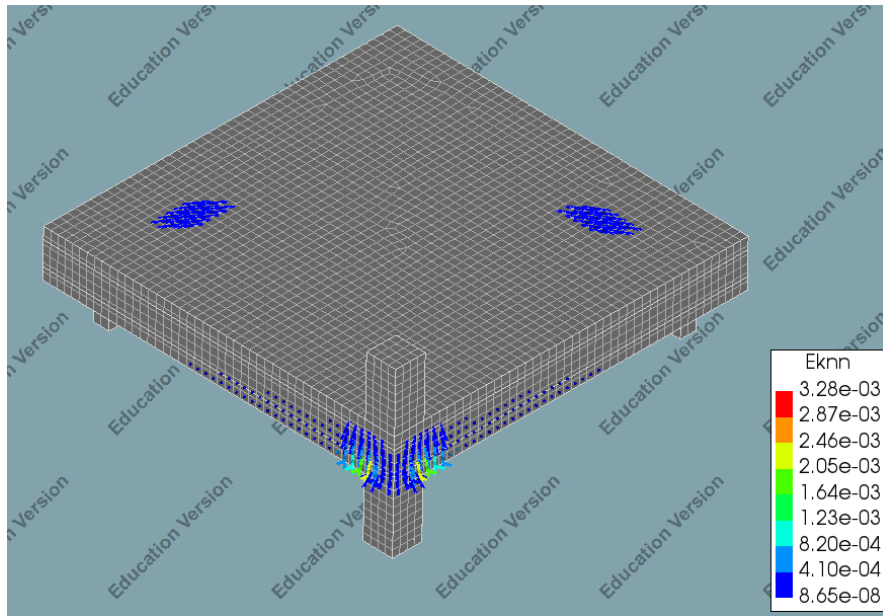
Παρατηρώντας την ανάπτυξη των ρωγμών κατά τα διαδοχικά βήματα φόρτισης, διαπιστώθηκε πως η ρηγμάτωση ξεκίνησε εφαιπτομενικά στην περίμετρο του υποστυλώματος και επεκτάθηκε ακτινικά στην πλάκα με την αύξηση του φορτίου. Στις Εικόνες 4.31 και 4.32 παρουσιάζεται το μοτίβο της ρηγμάτωσης λόγω διάτρησης κατά το τελευταίο βήμα της αστοχίας, μέσω της απεικόνισης των ανηγμένων παραμορφώσεων ρηγμάτωσης (crack strains). Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαίωσαν το σχηματισμό κόλουρου κώνου κατά την αστοχία, ο οποίος διαγράφει γωνία θ περίπου ίση με $26,6^\circ$ με το επίπεδο της πλάκας. Το σημείο που μειώθηκε η κλίση της καμπύλης (χρώματος κίτρινου) της Εικόνας 4.29 ταυτίζεται με το 7^ο βήμα της ανάλυσης. Μέσω των παραμορφώσεων ρηγμάτωσης στο συγκεκριμένο βήμα (Εικόνα 4.33) διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για το φορτίο υπό το οποίο ξεκίνησαν να δημιουργούνται ρωγμές στην άνω παρειά της πλάκας, στην περιοχή πάνω από τις μεταλλικές πλάκες στήριξης.



Εικόνα 4.31: Ανηγμένες παραμορφώσεις ρηγμάτωσης κατά την αστοχία λόγω διάτρησης

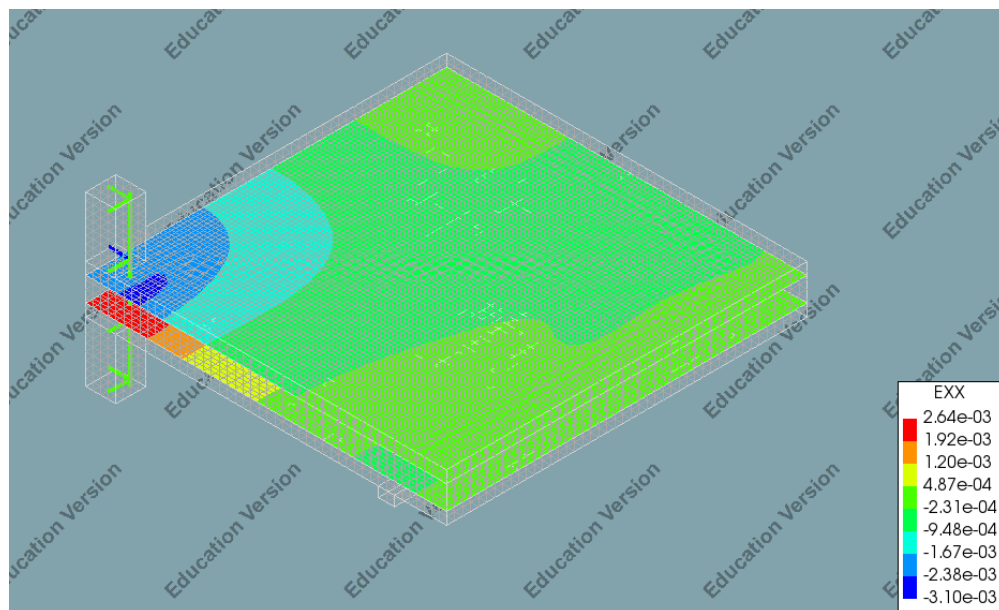


Εικόνα 4.32: Ανηγμένες παραμορφώσεις ρηγμάτωσης κατά την αστοχία λόγω διάτρησης (αριστερά η άνω επιφάνεια της πλάκας και δεξιά η κάτω)



Εικόνα 4.33: Ανηγμένες παραμορφώσεις ρηγμάτωσης κατά το 7^ο βήμα της ανάλυσης

Οι διαμήκεις οπλισμοί της πλάκας διέρρευσαν στην περιοχή του υποστυλώματος, όπως ήταν αναμενόμενο με βάση τα πειραματικά ευρήματα. Παρουσιάζονται ενδεικτικά οι ανηγμένες παραμορφώσεις, κατά τον άξονα x (η απεικόνιση και κατά τον άξονα y θεωρείται περιττή λόγω συμμετρίας), των επιφανειακών στοιχείων των οπλισμών κατά το φορτίο αστοχίας. Στην περιοχή με κόκκινο χρώμα της Εικόνας 4.34 παρατηρείται υπέρβαση της παραμόρφωσης διαρροής ($\epsilon_y=2,3e-03$), επομένως αποδεικνύεται η διαρροή του χάλυβα στα αντίστοιχα σημεία.

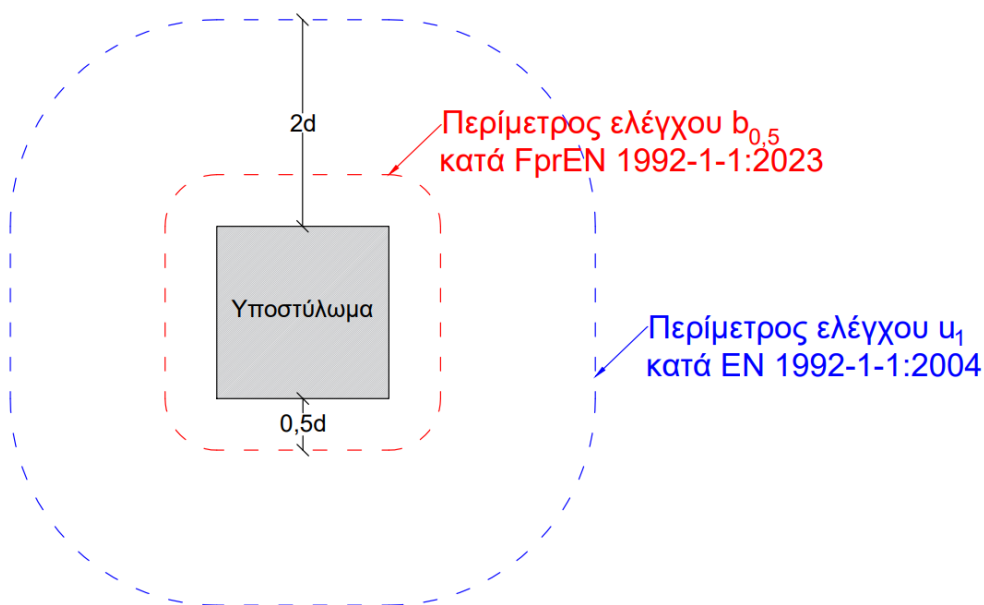


Εικόνα 4.34: Ανηγμένες παραμορφώσεις οπλισμών (κατά x) κατά το τελευταίο βήμα της ανάλυσης

4.4 Αποτελέσματα ισχύουσας και νέας έκδοσης ΕΚ2

Για να γίνει η σύγκριση των αποτελεσμάτων με τις κανονιστικές προσεγγίσεις υπολογίστηκε η αντοχή της πλάκας (χωρίς διατμητικό οπλισμό) έναντι διάτρησης κατά την ισχύουσα και τη νέα έκδοση του Ευρωκώδικα 2, σύμφωνα με τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στα Κεφάλαια 2 και 3 αντίστοιχα.

Οι κανονιστικές διατάξεις προσδιορίζουν την αντοχή της πλάκας σε όρους διατμητικών τάσεων κατά μήκος της εκάστοτε περιμέτρου ελέγχου. Το εξεταζόμενο υποστύλωμα είναι τυπικό εσωτερικό, χωρίς ανοίγματα ή εσοχές κοντά του, επομένως οι περίμετροι ελέγχου σχεδιάζονται στη συνήθη μορφή τους. Κατά την ισχύουσα έκδοση η συγκεκριμένη περίμετρος απέχει απόσταση $2d$, ενώ στη νέα έκδοση $0,5d$ από το περίγραμμα του υποστυλώματος (φορτίζουσας επιφάνειας) και σχεδιάζονται όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.35.



Εικόνα 4.35: Περίμετροι ελέγχου διατρητικής αντοχής

Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν μέσω φύλλων Excel, σύμφωνα με τις Εξισώσεις (2.17) και (3.5). Προκειμένου να συγκριθούν τα φορτία αστοχίας, οι τάσεις αντοχής, πολλαπλασιαζόμενες με το μέσο στατικό ύψος d και το μήκος της περιμέτρου ελέγχου $u_1/b_{0,5}$, μετατράπηκαν σε τέμνουσα δύναμη αντοχής. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στους Πίνακες 4.5-4.7.

Πίνακας 4.5: Δεδομένα υπολογισμών

Γεωμετρικά στοιχεία-Οπλισμοί		
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή
Πάχος πλάκας	h [mm]	120
Διάσταση υποστρώματος κατά x	$b_{\text{οπ},x}$ [mm]	150
Διάσταση υποστρώματος κατά y	$b_{\text{οπ},y}$ [mm]	150
Ονομαστική επικάλυψη	c_{nom} [mm]	20
Διάμετρος διαμήκων ράβδων πλάκας	Φ [mm]	10

Πίνακας 4.6: Υπολογισμός αντοχής $V_{Rd,c}$ κατά EN 1992-1-1:2004

Υπολογισμός αντοχής			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Στατικό ύψος στη διεύθυνση x	d_x [mm]	95	Εξωτερική στρώση
Στατικό ύψος στη διεύθυνση y	d_y [mm]	85	Εσωτερική στρώση
Στατικό ύψος	d [mm]	90	Εξίσωση (2.2)
Περίμετρος υποστρώματος	u_0 [mm]	600	-
Βασική περίμετρος ελέγχου	u_1 [mm]	1731	-
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	f_{ck} [MPa]	42,4	$f_c' - 1,6$
Συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος	γ_c [-]	1,0	Ζητούμενη η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής
Απόσταση ράβδων στη διεύθυνση x	s_x [cm]	10	-
Απόσταση ράβδων στη διεύθυνση y	s_y [cm]	9	-
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση x σε λωρίδα ενός μέτρου	A_{sx} [cm ²]	7,85	-
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση y σε λωρίδα ενός μέτρου	A_{sy} [cm ²]	8,73	-
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση x	ρ_{lx} [-]	0,0087	Η πλάκα είναι ομοιόμορφα οπλισμένη άρα ταυτίζονται με τις μέσες τιμές σε πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστρώματος συν $3d$ σε κάθε πλευρά
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση y	ρ_{ly} [-]	0,0097	

Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού	ρ_l [-]	0,0092	-
Συντελεστής	$C_{Rk,c}$ [-]	0,18	-
Συντελεστής	k [-]	2	Εξίσωση (2.18)
Συντελεστής	k_1 [-]	0,1	-
Ορθές τάσεις στο σκυρόδεμα της κρίσιμης διατομής	σ_{cp} [MPa]	0	-
Συντελεστής εκκεντρότητας	β [-]	1	Κεντρική θλίψη
Ελάχιστη τιμή της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης (σε όρους τάσεων)	v_{min} [MPa]	0,645	Εξίσωση (2.20)
Χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης (σε όρους τάσεων)	$v_{Rk,c}$ [MPa]	1,221	Εξίσωση (2.17)
Χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης	$V_{Rk,c}$ [kN]	190	$V_{Rk,c} = v_{Rk,c} \cdot u_1 \cdot d$

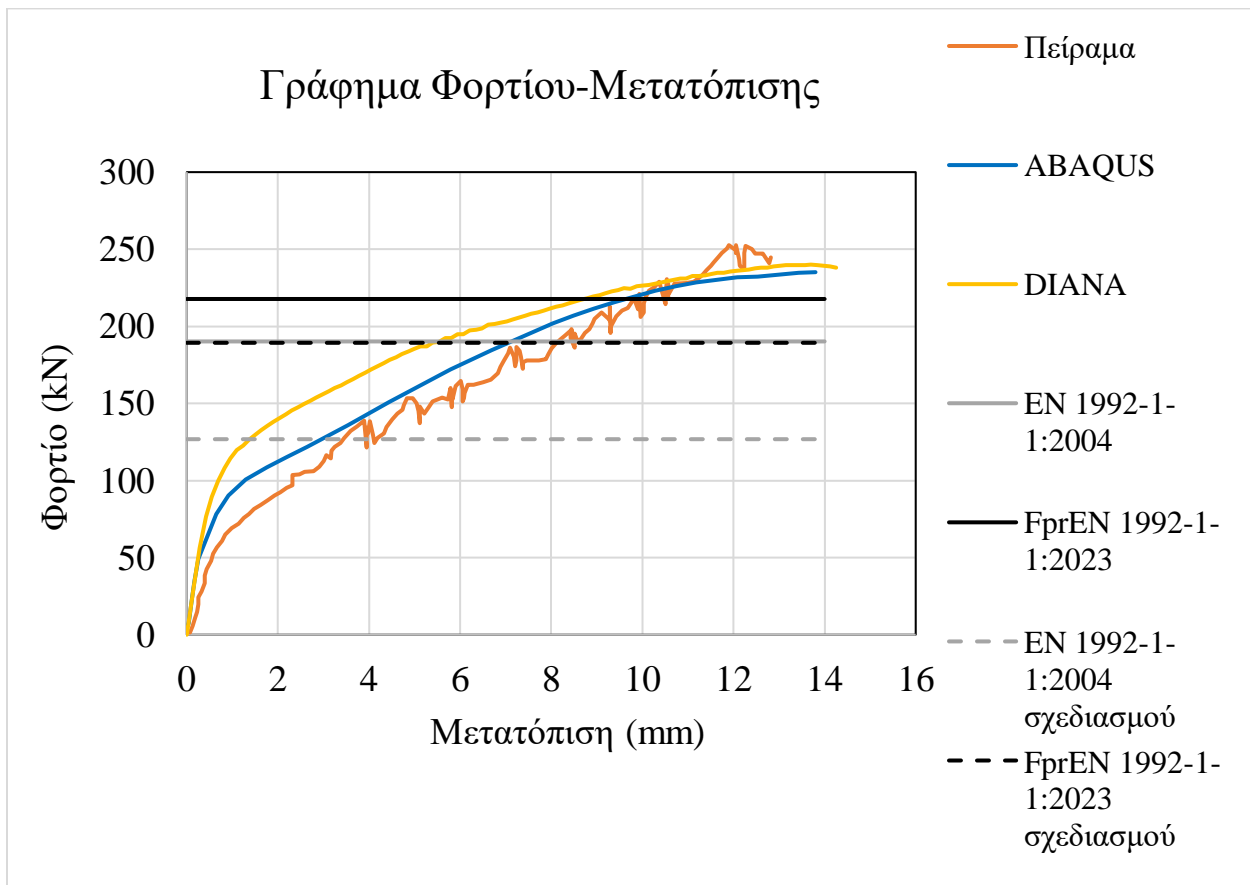
Πίνακας 4.7: Υπολογισμός αντοχής $V_{Rk,c}$ κατά FprEN 1992-1-1:2023

Υπολογισμός αντοχής			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Στατικό ύψος στη διεύθυνση x	d_{vx} [mm]	95	Εξωτερική στρώση
Στατικό ύψος στη διεύθυνση y	d_{vy} [mm]	85	Εσωτερική στρώση
Στατικό ύψος	d_v [mm]	90	Εξίσωση (3.2)
Περίμετρος υποστυλώματος	b_0 [mm]	600	-
Βασική περίμετρος ελέγχου	$b_{0,5}$ [mm]	883	-
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	f_{ck} [MPa]	42,4	$f_c' - 1,6$
Συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος	γ_c [-]	1,0	Ζητούμενη η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής
Απόσταση ράβδων στη διεύθυνση x	s_x [cm]	10	-
Απόσταση ράβδων στη διεύθυνση y	s_y [cm]	9	-

Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση x σε λωρίδα πλάτους ενός μέτρου	A_{sx} [cm ²]	7,85	-
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση y σε λωρίδα πλάτους ενός μέτρου	A_{sy} [cm ²]	8,73	-
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση x	ρ_{lx} [-]	0,0087	Η πλάκα είναι ομοιόμορφα οπλισμένη άρα ταυτίζονται με τις μέσες τιμές σε πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστυλώματος συν 3d σε κάθε πλευρά
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση y	ρ_{ly} [-]	0,0097	
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού	ρ_l [-]	0,0092	-
Συντελεστής ασφαλείας διάτμησης	γ_v [-]	1,0	Ζητούμενη η χαρακτηριστική τιμή της αντοχής
Αυξητικός συντελεστής	k_{pb} [-]	2,04	Εξίσωση (3.6)
Ελάχιστη διάμετρος κόσκινου σύμφωνα με EN206	D_{lower} [mm]	10	-
Παράμετρος μεγέθους που αφορά την τραχύτητα της ζώνης αστοχίας	d_{dg} [mm]	26	-
Συντελεστής εκκεντρότητας	β_e [-]	1	Κεντρική θλίψη
Μέγιστη τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτμηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτμησης (σε όρους τάσεων)	τ_{max} [MPa]	3,307	Άνω όριο Εξίσωσης (3.5)
Μήκος ανοίγματος κατά x	L_x [mm]	3750	-
Μήκος ανοίγματος κατά y	L_y [mm]	3750	-
Μέγιστη απόσταση μεταξύ κεντροειδούς περιμέτρου ελέγχου και σημείου μηδενισμού ροπών κατά x	$a_{p,x}$ [mm]	825	Προσεγγιστική τιμή
Μέγιστη απόσταση μεταξύ κεντροειδούς περιμέτρου ελέγχου και σημείου μηδενισμού ροπών κατά y	$a_{p,y}$ [mm]	825	Προσεγγιστική τιμή
Απόσταση κέντρου επιφάνειας στήριξης με σημείο μηδενισμού των ροπών	a_p [mm]	825	-

Τιμή στατικού ύψους που χρησιμοποιείται τελικά	a_{pb} ή d_v [mm]	90	Τελικά χρησιμοποιείται η τιμή d_v
Χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς σπλισμό διάτρησης (σε όρους τάσεων)	$\tau_{Rk,c}$ [MPa]	2,741	Εξίσωση (3.5)
Χαρακτηριστική τιμή της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς σπλισμό διάτρησης	$V_{Rk,c}$ [kN]	218	$V_{Rk,c} = \tau_{Rk,c} \cdot b_{0,5} \cdot d_v$

Δεδομένου ότι η σύγκριση γίνεται με τα ευρήματα ενός πειράματος, υπολογίστηκαν οι χαρακτηριστικές τιμές των αντοχών γι' αυτό και οι συντελεστές ασφαλείας τέθηκαν ίσοι με τη μονάδα. Στην Εικόνα 4.36 παρατίθεται το γράφημα της Εικόνας 4.29 με την προσθήκη των κανονιστικών αντοχών, προς σύγκριση των τιμών. Για εποπτικούς λόγους, ως προς το πόσο συντηρητικά είναι τα αποτελέσματα κατά το σχεδιασμό, παρουσιάζονται και οι αντίστοιχες τιμές με διακεκομμένες γραμμές (127 kN για την ισχύουσα και 189 kN για τη νέα έκδοση).



Εικόνα 4.36: Γράφημα προς σύγκριση των υπολογιζόμενων τεμνουσών αντοχής

4.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφηκε η διαδικασία προσομοίωσης του πειράματος αναφοράς και παρουσιάστηκαν τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε ικανοποιητική συσχέτιση των αποτελεσμάτων και συγκεκριμένα της προκύπτουσας καμπύλης Φορτίου-Κατακόρυφης μετατόπισης (Εικόνα 4.29). Η μικρή απόκλιση ως προς το φορτίο όπου σημειώθηκε μείωση της κλίσης της καμπύλης αποδόθηκε σε δυσλειτουργία κατά την προσομοίωση της δυσκαμψίας του φορέα, ωστόσο δεν επηρέασε το φορτίο αστοχίας και τη μέγιστη κατακόρυφη μετατόπιση του υποστυλώματος. Όσον αφορά τις κανονιστικές τιμές της αντοχής, διαπιστώθηκε ότι τα αποτελέσματα, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 4.8, είναι συντηρητικά σε σχέση με την πραγματικότητα. Η νέα έκδοση του Ευρωκώδικα 2 φαίνεται να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια το φορτίο αστοχίας του πειράματος (και κατ' επέκταση του προσομοιώματος πεπερασμένων στοιχείων). Συγκεκριμένα, η απόκλιση των κανονιστικών αντοχών με το πείραμα και τη μη γραμμική ανάλυση υπολογίστηκε ίση με 25% και 21% αντίστοιχα για την ισχύουσα έκδοση, ενώ για τη νέα ίση με 14% και 9%.

Πίνακας 4.8: Σύγκριση τεμνουσών δυνάμεων αντοχής (kN) για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης

Μέθοδος προσδιορισμού φορτίου	Πείραμα αναφοράς	Μη γραμμική ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων (DIANA)	EN 1992-1-1:2004	FprEN 1992-1-1:2023
Τέμνουσα δύναμη αντοχής [kN]	253	240	190	218

5 Διαστασιολόγηση σε διάτρηση κτιρίου χωρίς δοκούς

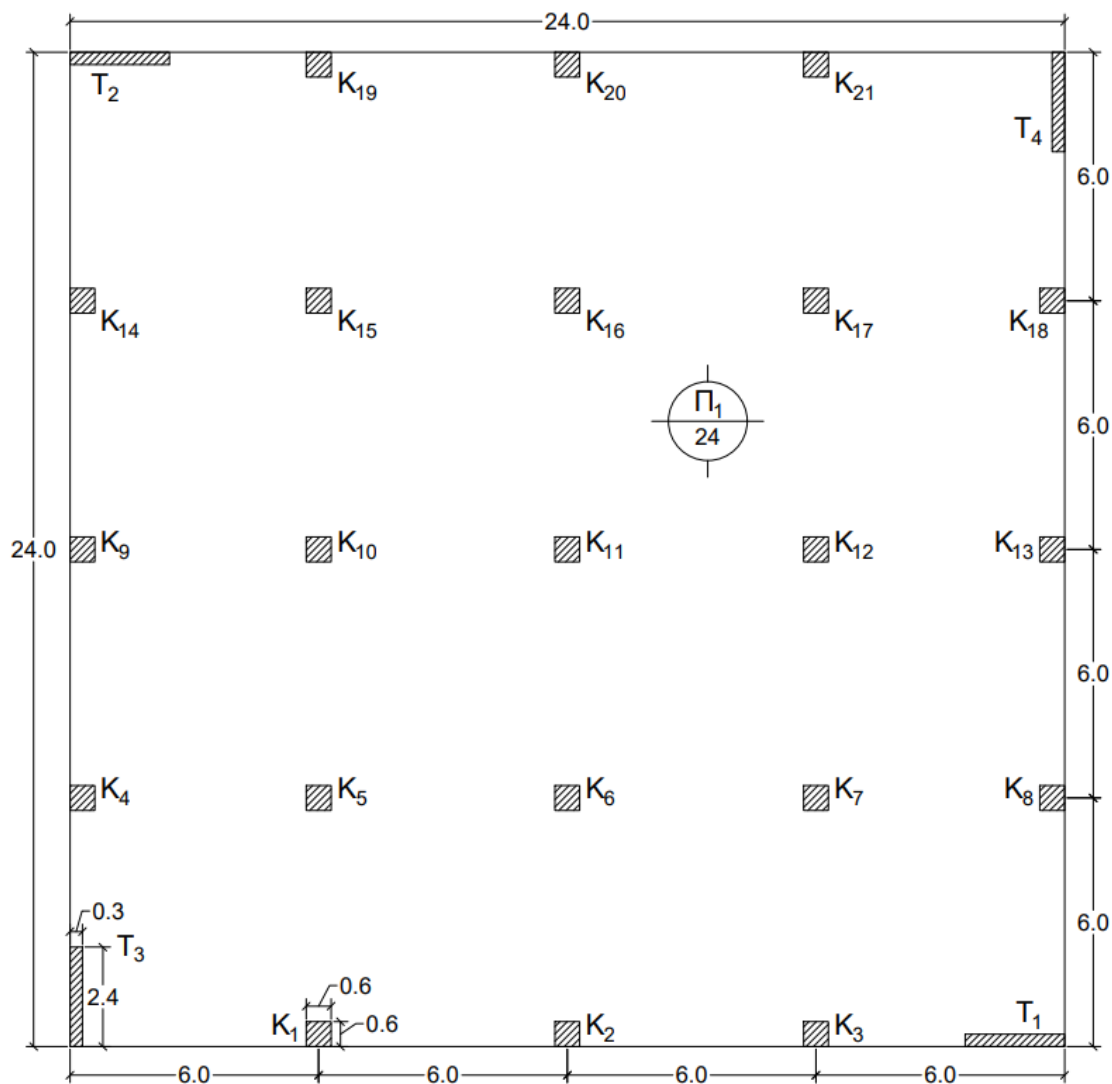
5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επιλέχθηκε να γίνει η πρακτική σύγκριση των εκδόσεων του ΕΚ2 και να εντοπιστούν οι διαφορές που προκύπτουν ως προς τη διαστασιολόγηση μιας σύνδεσης πλάκας χωρίς δοκούς και υποστυλώματος. Η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί αξιοποιώντας το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων στο DIANA FEA, που περιγράφηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, με αλλαγή της γεωμετρίας του φορέα. Λόγω περιορισμένου αριθμού κόμβων της Ακαδημαϊκής έκδοσης και προκειμένου να προσομοιωθεί ρεαλιστικά ολόκληρη η κατασκευή, στην οποία εμπεριέχεται η ζητούμενη σύνδεση, έγινε η ανάλυση ενός τυπικού φορέα στο λογισμικό SAP2000.

Αφού μορφώθηκε και αναλύθηκε ελαστικά το κτίριο στο SAP2000, πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητοι έλεγχοι με βάση τον Ευρωκώδικα 8 που αφορούν αποκλειστικά την γεωμετρία των κατακόρυφων στοιχείων η οποία επηρεάζει το εξεταζόμενο φαινόμενο της διάτρησης. Ελέγχθηκε επίσης η επιρροή των φαινομένων 2ας τάξεως και οι επιτρεπόμενες σεισμικές μετακινήσεις για περιορισμό των βλαβών καθώς οι συγκεκριμένοι περιορισμοί μπορούν να προκύψουν κρίσιμοι σε τέτοιου είδους φορείς. Με βάση τα εξαγόμενα εντατικά μεγέθη διαστασιολογήθηκαν οι πλάκες έναντι κάμψης κατά τις υποδείξεις της ισχύουσας έκδοσης του Ευρωκώδικα 2. Λόγω ελλείψεων της νέας έκδοσης σε κατηγοριοποιήσεις και παραμέτρους, που θα προσδιοριστούν στο Εθνικό Προσάρτημα το οποίο δεν έχει συνταχθεί ακόμα, επιλέχθηκε η χρήση της αποκλειστικά για το φαινόμενο της διάτρησης. Αφού πλέον ήταν γνωστές όλες οι απαιτούμενες παράμετροι, διαστασιολογήθηκε ενδεικτικά το δυσμενέστερο εσωτερικό και περιμετρικό υποστύλωμα έναντι διάτρησης και διενεργήθηκε ένας πρόσθετος έλεγχος σχετικά με τη συμβατότητα των πλευρικών μετατοπίσεων.

5.2 Περιγραφή φορέα

Επιλέχθηκε να εξεταστεί κτίριο 5 ορόφων ύψους 3,2 m έκαστος (συνολικό ύψος 16 m), με συμμετρική κάτοψη κατά τις δύο διευθύνσεις, συνολικών διαστάσεων 24x24 m. Τετραγωνικά υποστυλώματα διαστάσεων 0,6x0,6 m τοποθετήθηκαν ανά 6 m και στις δύο διευθύνσεις, ενώ για την παραλαβή των σεισμικών φορτίων, οι στύλοι των τεσσάρων γωνιών αντικαταστάθηκαν από τοιχώματα πάχους 0,3 m και μήκους 2,4 m (2 σε κάθε διεύθυνση). Οι διαστάσεις των κατακόρυφων στοιχείων επαληθεύτηκαν ως προς τους γεωμετρικούς περιορισμούς του Ευρωκώδικα 8, στην παράγραφο §5.5.2. Το πάχος των πλακών επιλέχθηκε με γνώμονα την απαλλαγή από τον έλεγχο βελών κάμψης και προέκυψε ίσο με 0,24 m, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στην παράγραφο §5.5.1. Στην Εικόνα 5.1 παρατίθεται η κάτοψη που αντιπροσωπεύει τη διάταξη όλων των ορόφων, καθώς δεν πραγματοποιήθηκαν αλλαγές στη γεωμετρία καθ' ύψος του κτιρίου.



Εικόνα 5.1: Κάτοψη τυπικού ορόφου

Ο φορέας εντάσσεται στις κατασκευές Κατηγορίας C3, ως κτίριο με χώρους συνάθροισης, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 που λήφθηκε από το Μέρος 1 του Ευρωκώδικα. Όσον αφορά τις περιβαλλοντικές συνθήκες, το εξεταζόμενο κτίριο εντάσσεται στην κατηγορία XC3, σύμφωνα με τον αντίστοιχο πίνακα του Ευρωκώδικα 2 (Εικόνα 5.3), με θεωρούμενο περιβάλλον μετρίως διαβρωτικό. Η κατηγοριοποίηση αυτή σχετίζεται με τον προσδιορισμό της απαιτούμενης ελάχιστης επικάλυψης των οπλισμών, όπως αναλύεται στην παράγραφο §5.5.1.

Κατηγορία	Συγκεκριμένη Χρήση	Παράδειγμα
A	Χώροι διαμονής	Δωμάτια σε κτήρια κατοικιών και σπίτια. Θάλαμοι και πτέρυγες σε νοσοκομεία. Υπνοδωμάτια σε ξενοδοχεία και ξενώνες, κουζίνες και τουαλέτες.
B	Χώροι γραφείων	
C	Χώροι στους οποίους οι άνθρωποι μπορεί να συναθροισθούν (με εξαίρεση τους χώρους που κατατάσσονται στις κατηγορίες A,B, και D¹⁾)	C1: Χώροι με τραπέζια κλπ. Π.χ. σχολικοί χώροι, νηπιαγωγεία, καφενεία, εστιατόρια, αίθουσες φαγητού, αναγνωστήρια, χώροι υποδοχής. C2: Χώροι με σταθερά καθίσματα, Π.χ. χώροι σε εκκλησίες, θέατρα ή κινηματογράφους, αίθουσες συνεδριάσεων, αίθουσες ομιλίας, αίθουσες συγκεντρώσεων, χώροι αναμονής, χώροι αναμονής σε σιδηροδρομικούς σταθμούς. C3: Χώροι χωρίς εμπόδια στη διακίνηση του κοινού, π.χ. χώροι σε μουσεία, εκθεσιακοί χώροι, κλπ. και χώροι πρόσβασης σε δημόσια και διοικητικά κτήρια, ξενοδοχεία και νοσοκομεία. Προαύλια σιδηροδρομικών σταθμών. C4: Χώροι για πιθανές σωματικές δραστηριότητες, π.χ. αίθουσες χορού, αίθουσες γυμναστικής και θεατρικές σκηνές C5: Χώροι προσβάσιμοι από μεγάλα πλήθη, π.χ. για δημόσιες εκδηλώσεις όπως αίθουσες συναυλιών, κλειστά γήπεδα, εξέδρες γηπέδων, εξώστες και χώροι πρόσβασης, πλατφόρμες σιδηροδρόμων.
D	Χώροι με εμπορικά καταστήματα	D1: Χώροι σε καταστήματα λιανικής πώλησης, γενικά D2: Χώροι σε πολυκαταστήματα

Εικόνα 5.2: Πίνακας 6.1 ΕΚ1 για τον προσδιορισμό κατηγορίας χρήσης κτιρίων, πηγή: (Μαλακάτας και Τρέζος, 2011)

Για την κατασκευή χρησιμοποιήθηκε σκυρόδεμα C30/37 (ενδεικτική κατηγορία αντοχής σκυροδέματος για κατηγορία έκθεσης XC3) και χάλυβας οπλισμού τύπου B500C. Η μέγιστη διάμετρος αδρανούς D_{lower} επιλέχθηκε στα 16 mm.

Χαρακτηρισμός Κατηγορίας	Περιγραφή περιβάλλοντος	Πληροφοριακά παραδείγματα όπου οι κατηγορίες έκθεσης θα μπορούσαν να συμβούν
1 Χωρίς διακινδύνευση διάβρωσης ή προσβολής		
X0	Για άοπλο σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα χωρίς ενσωματωμένο μέταλλο: όλες οι συνθήκες έκθεσης εκτός περιπτώσεων ύπαρξης ψύξης/απόψυξης, επιφανειακής τριβής ή χημικής προσβολής. Για οπλισμένο σκυρόδεμα: πολύ ξηρό	Σκυρόδεμα εντός κτιρίων με πολύ χαμηλή υγρασία αέρος
2 Διάβρωση από ενανθράκωση		
XC1	Ξηρό ή μόνιμα υγρό	Σκυρόδεμα εντός κτιρίων με μέτρια ή υψηλή υγρασία αέρος Σκυρόδεμα μόνιμα βυθισμένο στο νερό
XC2	Υγρό, σπανίως ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος υπό μακροχρόνια επαφή με το νερό. Πληθώρα θεμελιώσεων.
XC3	Μέτρια υγρασία	Σκυρόδεμα εντός κτιρίων με πολύ χαμηλή υγρασία αέρος Εξωτερικό σκυρόδεμα προσβαλλόμενο από τη βροχή
XC4	Περιοδικά υγρό και ξηρό	Επιφάνειες σκυροδέματος σε επαφή με το νερό, εκτός της κατηγορίας έκθεσης XC2
3 Διάβρωση από χλωριούχα		
XD1	Μέτρια υγρασία	Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε αερομεταφερόμενα χλωριούχα.
XD2	Υγρό, σπανίως ξηρό	Πισίνες. Στοιχεία σκυροδέματος εκτεθειμένα σε βιομηχανικά απόβλητα που περιέχουν χλωριούχα.
XD3	Περιοδικά υγρό και ξηρό	Τμήματα γεφυρών εκτεθειμένα σε ψεκασμό χλωριούχων. Πεζοδρόμια. Πλάκες χώρων στάθμευσης αυτοκινήτων.
4 Διάβρωση από χλωριούχα θαλασσινού νερού		
XS1	Εκτεθειμένο σε άλατα θαλάσσης αερομεταφερόμενα αλλά χωρίς άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό.	Κατασκευές κοντά ή επί της ακτής
XS2	Μόνιμα βυθισμένο σε θαλασσινό νερό	Τμήματα λιμενικών έργων
XS3	Ζώνες παλίρροιας, παφλασμού και πισιλιζήματος.	Τμήματα λιμενικών έργων
5. Προσβολή ψύξης / απόψυξης		
XF1	Μέτριας κλίμακας υδρεμοτισμός χωρίς παράγοντα απόψυξης	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και τον πάγο
XF2	Μέτριας κλίμακας υδρεμοτισμός με παράγοντα απόψυξης	Κατακόρυφες επιφάνειες σκυροδέματος κατασκευών οδοποιίας εκτεθειμένες σε ψύξη και παράγοντες απόψυξης που μεταφέρονται με τον αέρα.
XF3	Εκτεταμένος υδρεμοτισμός χωρίς παράγοντα απόψυξης	Οριζόντιες επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες στη βροχή και τον πάγο
XF4	Εκτεταμένος υδρεμοτισμός με παράγοντα απόψυξης ή θαλασσινό νερό	Καταστρώματα οδών ή γεφυρών εκτεθειμένα σε παράγοντες απόψυξης. Επιφάνειες σκυροδέματος εκτεθειμένες σε άμεσο ψεκασμό με παράγοντες απόψυξης. Ζώνες παφλασμού σε λιμενικά έργα εκτεθειμένα σε πάγο.
6. Χημική προσβολή		
XA1	Ελαφρώς επιθετικό χημικό περιβάλλον σύμφωνα με το EN 206-1, Πίνακας 2	Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα
XA2	Μετρίως επιθετικό χημικό περιβάλλον σύμφωνα με το EN 206-1, Πίνακας 2	Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα
XA3	Ιδιαίτερος επιθετικό χημικό περιβάλλον σύμφωνα με το EN 206-1, Πίνακας 2	Φυσικά εδάφη και υπόγεια ύδατα

Εικόνα 5.3: Πίνακας 4.1 ΕΚ2 για τον προσδιορισμό της κατηγορίας έκθεσης με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες, πηγή: (Τυπολόγιο Σκυροδέματος ΕΜΠ, 2020)

5.3 Φορτία

5.3.1 Κατακόρυφα φορτία

Η εφαρμογή των κατακόρυφων ομοιόμορφα κατανεμημένων επιφανειακών φορτίων έγινε σύμφωνα με τις παρακάτω τιμές. Τα πρόσθετα μόνιμα φορτία αφορούν επικαλύψεις και επιστρώσεις δαπέδων, την εξωτερική τοιχοποιία (1^{ος}-4^{ος} όροφος) και το περιμετρικό στηθαίο του δώματος, ενώ τα κινητά προέκυψαν με βάση την κατηγορία χρήσης του κτιρίου (σύμφωνα με τον

πίνακα της Εικόνας 5.4), όπως ορίζεται από τον Ευρωκώδικα 1. Η διαφοροποίηση ως προς τα φορτία του δώματος οφείλεται στο γεγονός ότι δεν προβλέπεται διέλευση ανθρώπων στο συγκεκριμένο επίπεδο (μικρότερα κινητά φορτία), ενώ οι απαιτήσεις μόνωσης έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των πρόσθετων μόνιμων φορτίων.

- Ίδιο βάρος πλάκας σκυροδέματος πάχους 0,24 m, ειδικού βάρους $\gamma_c=25 \text{ kN/m}^3$: 6 kN/m^2
- Πρόσθετα μόνιμα φορτία πλακών (επίστρωση δαπέδου): 2 kN/m^2
- Μπατική τοιχοποιία (για ύψος τοιχοπληρώσεων 2,96 m): $10,7 \text{ kN/m}$
- Πρόσθετα μόνιμα φορτία δώματος: $3,5 \text{ kN/m}^2$
- Περιμετρικό στηθαίο δώματος (ύψους 0,8 m και πάχους 0,2 m): 4 kN/m
- Κινητά φορτία πλακών: 5 kN/m^2
- Κινητά φορτία δώματος: $1,5 \text{ kN/m}^2$

Κατηγορίες φορτιζόμενων επιφανειών	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]
<i>Κατηγορία Α και Κατηγορία Β</i>		
- Δάπεδα	2,0	2,0
- Σκάλες	3,5	2,0
- Μπαλκόνια	5,0	3,0
Κατηγορία C		
- C1	3,0	3,0
- C2	5,0	4,0
- C3	5,0	4,0
- C4	5,0	4,0
- C5	7,5	4,5
Κατηγορία D		
- D1	5,0	4,0
- D2	5,0	4,0

Εικόνα 5.4: Πίνακας 6.2 ΕΚ1 για τον προσδιορισμό των τιμών των κινητών φορτίων, πηγή: (Μαλακάτας και Τρέζος, 2011)

5.3.2 Σεισμικά φορτία

Δυνατότητα χρήσης της Μεθόδου Ανάλυσης Οριζόντιας Φόρτισης

Για την επιβολή των σεισμικών δράσεων χρησιμοποιήθηκε η Μέθοδος Ανάλυσης Οριζόντιας Φόρτισης. Πρόκειται για στατική μέθοδο και εφαρμόζεται σε φορείς η απόκριση των οποίων, σε κάθε κύρια διεύθυνση, δεν επηρεάζεται σημαντικά από από τις υψηλότερες ιδιομορφές ανάλυσης, αλλά κυριαρχείται από τη θεμελιώδη. Το κριτήριο αυτό ικανοποιείται σε κτίρια τα οποία:

- ✓ Έχουν θεμελιώδεις περιόδους ταλάντωσης T_1 , κατά τις δύο κύριες διευθύνσεις, που ικανοποιούν την ακόλουθη σχέση:

$$T_1 \leq \begin{cases} 4T_c \\ 2,0 \text{ s} \end{cases} \quad (5.1)$$

όπου, T_C η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης, στο φάσμα σχεδιασμού, σύμφωνα με τον Πίνακα 5.1 και T_I η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος που προκύπτει από την Εξίσωση (5.2).

✓ Χαρακτηρίζονται κανονικά σε όψη σύμφωνα με τα ακόλουθα κριτήρια:

α) Τα συστήματα ανάληψης οριζόντιων φορτίων (π.χ. τοιχώματα, πλαίσια) είναι κατακόρυφα και συνεχή από τη θεμελίωση έως την άνω επιφάνεια του κτιρίου.

β) Η μεταφορική δυσκαμψία και η μάζα των επιμέρους ορόφων παραμένουν σταθερές ή μειώνονται βαθμιαία, χωρίς απότομες αλλαγές, καθ' ύψος του κτιρίου (από τη βάση προς την κορυφή).

γ) Για πλαισιωτά συστήματα, ο λόγος της πραγματικής αντοχής ορόφων προς την αντοχή που απαιτείται από την ανάλυση δε διαφέρει δυσανάλογα μεταξύ συνεχόμενων ορόφων.

δ) Στην περίπτωση ύπαρξης εσοχών πληρούνται πρόσθετες προϋποθέσεις, οι οποίες δεν παρατίθενται αναλυτικά καθώς δεν αφορούν τον εξεταζόμενο φορέα (παράγραφος §4.2.3.3 Ευρωκώδικα 8).

Για τον προσδιορισμό της θεμελιώδους ιδιοπεριόδου ταλάντωσης T_I (σε s), σε κτίρια ύψους μέχρι 40 m, επιτρέπεται η χρήση της παρακάτω προσεγγιστικής σχέσης:

$$T_I = C_t H^{3/4} \quad (5.2)$$

όπου, H το συνολικό ύψος του κτιρίου (από τη θεμελίωση ή την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου) και C_t συντελεστής ίσος με 0,179 (και για τις δύο διευθύνσεις λόγω συμμετρίας) που προσδιορίστηκε μέσω των σχέσεων:

$$C_t = 0,075/\sqrt{A_c} \quad (5.3)$$

και

$$A_c = \sum [A_i (0,2 + l_{wi}/H)^2] \quad (5.4)$$

όπου,

A_c η συνολική δρώσα επιφάνεια των αντίστοιχων τοιχωμάτων στον πρώτο όροφο του κτιρίου (σε m^2),

A_i η δρώσα επιφάνεια του τοιχώματος i που λειτουργεί κατά τη διεύθυνση φόρτισης, στον πρώτο όροφο του κτιρίου (σε m^2),

l_{wi} το μήκος του αντίστοιχου τοιχώματος (κατά τη διεύθυνση της φόρτισης).

Η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του λόγου l_{wi}/H στην Εξίσωση (5.4) είναι το 0,9. Στην προκειμένη περίπτωση, ενδεικτικά για σεισμική φόρτιση κατά x (ομοίως και κατά y), ενεργοποιούνται δύο τοιχώματα μήκους 2,4 m, συνολικού ύψους 16 m και δρώσας επιφάνειας $0,72 \text{ m}^2 (= 0,3 \cdot 2,4)$, οπότε το A_c προέκυψε ίσο με $0,176 \text{ m}^2$.

Το εξεταζόμενο κτίριο εντάσσεται στη Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας Z2, ανήκει στην Κατηγορία Εδάφους B και Κατηγορία Σπουδαιότητας Μεγάλη (III), ως κτίριο χώρων συνάθροισης. Στην ισχύουσα έκδοση του ΕΚ8 ορίζεται πως τα κτίρια σπουδαιότητας III σε σεισμική ζώνη Z2 εντάσσονται στην Υψηλή Κατηγορία Πλαστιμότητας, ωστόσο δε γίνεται κάποια ειδική αναφορά στην περίπτωση των κτιρίων με πλάκες χωρίς δοκούς. Αντιθέτως, στη νέα έκδοση, αναφέρεται πως οι συγκεκριμένες κατασκευές πρέπει να σχεδιάζονται για Μέση Κατηγορία Πλαστιμότητας, οδηγία που ακολουθήθηκε για τον εξεταζόμενο φορέα.

Πίνακας 5.1: Τιμές παραμέτρων φάσματος σχεδιασμού με βάση την Κατηγορία Εδάφους

Κατηγορία Εδάφους	S	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)
A	1,00	0,15	0,40	2,50
B	1,20	0,15	0,50	2,50
C	1,15	0,20	0,60	2,50
D	1,35	0,20	0,80	2,50
E	1,40	0,15	0,50	2,50

Προκύπτει λοιπόν ότι ικανοποιείται η Εξίσωση (5.1), καθώς η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος T_1 υπολογίστηκε ίση με 1,43 s (για συνολικό ύψος κτιρίου 16 m κατά την Εξίσωση (5.2)), τιμή μικρότερη του $4T_C (= 2 \text{ s}$ για Κατηγορία Εδάφους B) και του 2 s. Επομένως, δεδομένου ότι πληρούνται και οι προαναφερθείσες προϋποθέσεις για τον χαρακτηρισμό του φορέα ως κανονικό καθ' ύψος, επιτρέπεται η χρήση της Μεθόδου Ανάλυσης Οριζόντιας Φόρτισης.

Προσδιορισμός φάσματος σχεδιασμού

Το φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε, κατά τον ΕΚ8, περιγράφεται από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$S_d(T) = \alpha_g S \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2,5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad \text{για } 0 \leq T \leq T_B \quad (5.5)$$

$$S_d(T) = \alpha_g S \frac{2,5}{q} \quad \text{για } T_B \leq T \leq T_C \quad (5.6)$$

$$S_d(T) = \alpha_g S \frac{2,5}{q} \frac{T_C}{T} \geq \beta \alpha_g \quad \text{για } T_C \leq T \leq T_D \quad (5.7)$$

$$S_d(T) = \alpha_g S \frac{2,5}{q} \frac{T_C T_D}{T^2} \geq \beta \alpha_g \quad \text{για } T_D \leq T \leq 4\text{s} \quad (5.8)$$

όπου,

a_g η εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού, όπως προκύπτει από τη σχέση:

$$a_g = a_{gR} \gamma_I \quad (5.9)$$

όπου, a_{gR} η ενεργός εδαφική επιτάχυνση ίση με 0,24 g για Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II και γ_I ο συντελεστής σπουδαιότητας ίσος με 1,2 για Κατηγορία Σπουδαιότητας III.

S ο συντελεστής εδάφους (κατά τον Πίνακα 5.1)

T_B η περίοδος κάτω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης (κατά τον Πίνακα 5.1)

T_C η περίοδος άνω ορίου του κλάδου σταθερής φασματικής επιτάχυνσης (κατά τον Πίνακα 5.1)

T_D η τιμή της περιόδου που ορίζει την αρχή της περιοχής σταθερής μετακίνησης του φάσματος (κατά τον Πίνακα 5.1)

β συντελεστής κατώτατου ορίου για το οριζόντιο φάσμα σχεδιασμού με συνιστώμενη τιμή το 0,2

q ο συντελεστής συμπεριφοράς

Οι τιμές των παραμέτρων που προέκυψαν για τα δεδομένα του εξεταζόμενου φορέα συνοψίζονται στον Πίνακα 5.2, ενώ στην Εικόνα 5.6 παρατίθεται η γραφική απεικόνιση του φάσματος σχεδιασμού.

Πίνακας 5.2: Τιμές παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον προσδιορισμό του φάσματος σχεδιασμού

Παράμετροι φάσματος σχεδιασμού			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Ενεργός εδαφική επιτάχυνση	a_{gR} [m/s ²]	2,35	Για Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II
Συντελεστής σπουδαιότητας	γ_I [-]	1,2	Για Κατηγορία Σπουδαιότητας III
Εδαφική επιτάχυνση σχεδιασμού	a_g [m/s ²]	2,83	Εξίσωση (5.9)
Μέγιστη τιμή συντελεστή συμπεριφοράς	q_{max} [-]	3,6	Εξίσωση (5.10) για διπλό προς τοιχωματικό σύστημα και ΚΠΜ
Συντελεστής συμπεριφοράς	q [-]	3,5	-
Συντελεστής εδάφους	S [-]	1,20	Κατηγορία εδάφους Β
Περίοδος φάσματος σχεδιασμού	T_B [s]	0,15	Κατηγορία εδάφους Β
Περίοδος φάσματος σχεδιασμού	T_C [s]	0,50	Κατηγορία εδάφους Β
Περίοδος φάσματος σχεδιασμού	T_D [s]	2,50	Κατηγορία εδάφους Β
Ποσοστό κρίσιμης απόσβεσης	ζ [%]	5,00	Άρα $n=1$
Συντελεστής	β [-]	0,20	-

Υπολογισμός συντελεστή συμπεριφοράς q

Ο συντελεστής συμπεριφοράς q είναι μια προσέγγιση του λόγου των σεισμικών δυνάμεων στις οποίες θα υποβαλλόταν ο φορέας εάν η απόκρισή του ήταν απεριόριστα ελαστική, με ιξώδες 5%, προς τις σεισμικές δυνάμεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη μελέτη, με ένα συμβατικό προσομοίωμα ελαστικής ανάλυσης. Η ανώτατη τιμή του (ίδια για τις δύο διευθύνσεις λόγω συμμετρίας) προέκυψε από τη σχέση:

$$q = q_0 k_w \geq 1,5 \quad (5.10)$$

όπου,

q_0 η βασική τιμή του συντελεστή συμπεριφοράς που εξαρτάται από τον τύπο του στατικού συστήματος, σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνας 5.5, για συστήματα κανονικά σε όψη όπως το παρόν κτίριο.

k_w συντελεστής που εκφράζει την κυρίαρχη μορφή αστοχίας και λαμβάνει τιμές:

- 1,00 για πλαισιωτά και ισοδύναμα προς πλαισιωτά συστήματα τοιχωμάτων
- $0,5 \leq (1 + \alpha_0)/3 \leq 1$ για συστήματα τοιχωμάτων, ισοδύναμα προς τοιχωματικά διπλά συστήματα και στρεπτικά εύκαμπτα συστήματα

α_0 η κυριαρχούσα τιμή του λόγου όψεως των τοιχωμάτων του στατικού συστήματος, η οποία για τη δεδομένη περίπτωση (όπου δεν παρουσιάζονται διαφορές στους λόγους όψεως των τοιχωμάτων) υπολογίστηκε ως:

$$\alpha_0 = h_{wi}/l_{wi} \quad (5.11)$$

όπου, h_{wi} το συνολικό ύψος ενός εκ των τεσσάρων ομοίων τοιχωμάτων και l_{wi} το μήκος του.

Στατικός τύπος	ΚΠΜ	ΚΠΥ
Πλαισιωτά – Διπλά συστήματα – Συστήματα με συζευγμένα τοιχώματα	$3.0\alpha_u/\alpha_1$	$4.5\alpha_u/\alpha_1$
Συστήματα με ασύζευκτα τοιχώματα	3.0	$4.0\alpha_u/\alpha_1$
Στρεπτικά εύκαμπτα συστήματα	2.0	3.0
Ανεστραμμένα εκκερεμή	1.5	2.0

Εικόνα 5.5: Πίνακας 5.1 ΕΚ8 για προσδιορισμό της βασικής τιμής του συντελεστή συμπεριφοράς q_0

Για τον χαρακτηρισμό του τύπου στατικού συστήματος έπρεπε να προσδιοριστεί το ποσοστό παραλαβής της σεισμικής δύναμης από τα τοιχώματα. Τέθηκε αρχικά μια τυχαία τιμή τέμνουσας βάσης $F_b=1000$ kN, η κατανομή της οποίας θεωρήθηκε τριγωνική σύμφωνα με τη σχέση:

$$F_i = F_b \frac{z_i m_i}{\sum z_j m_j} \quad (5.12)$$

όπου, z_i/z_j το ύψος του εκάστοτε ορόφου από τη θεμελίωση ή από την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου και m_i/m_j η μάζα του.

Υπολογίστηκαν λοιπόν οι τιμές των οριζόντιων δυνάμεων που εφαρμόστηκαν στα κέντρα μάζας των ορόφων (λόγω συμμετρίας της κάτοψης συμπίπτουν με το γεωμετρικό κέντρο της πλάκας) ενδεικτικά κατά τη διεύθυνση x. Οι τιμές των αντιδράσεων στήριξης, κατά τη διεύθυνση της φόρτισης, των τοιχωμάτων που λειτουργούν στη δεδομένη διεύθυνση, καθόρισαν το ζητούμενο ποσοστό παραλαβής της σεισμικής δύναμης. Προέκυψε λοιπόν ποσοστό ίσο με 53% (>50%), καθιστώντας το σύστημα διπλό προς τοιχωματικό. Οι προαναφερθέντες υπολογισμοί συνοψίζονται στους Πίνακες 5.6 και 5.7 (ακριβέστερη περιγραφή της διαδικασίας υπολογισμού των μαζών παρουσιάζεται παρακάτω).

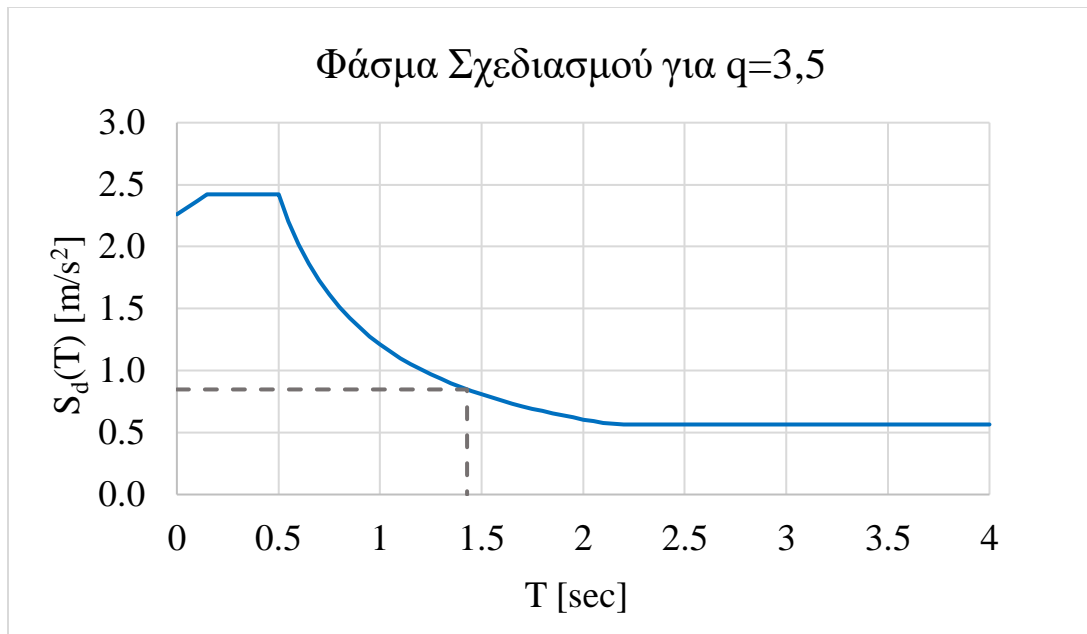
Πίνακας 5.6: Κατανομή οριζόντιων φορτίων για προσδιορισμό στατικού τύπου

Κατανομή οριζόντιων φορτίων για $F_b=1000\text{kN}$				
Όροφοι	z_i [m]	m_i [t]	$z_i \cdot m_i$ [m·t]	F_i [kN]
1ος	3,2	650,0	2080,1	66,67
2ος	6,4	650,0	4160,1	133,33
3ος	9,6	650,0	6240,2	200,00
4ος	12,8	650,0	8320,2	266,67
5ος	16	650,0	10400,3	333,33
Σύνολο	-	3250,1	31200,9	1000,0

Πίνακας 5.7: Προσδιορισμός ποσοστού παραλαβής σεισμικής δύναμης από τα τοιχώματα

	Τέμνουσα βάσης [kN]
Τοίχωμα T1	263,742
Τοίχωμα T2	263,742
Τοίχωμα T3	-
Τοίχωμα T4	-
Σύνολο φορέα	1000
Ποσοστό τοιχωμάτων	53%

Ο πολλαπλασιαστικός συντελεστής α_u/α_1 για κτίρια κανονικά σε κάτοψη, όπως το εξεταζόμενο, επιτρέπεται να ληφθεί προσεγγιστικά ίσος με 1,2 για διπλά προς τοιχωματικά συστήματα. Επομένως, η τιμή q_0 προέκυψε ίση με 3,6, ενώ ο συντελεστής k_w έλαβε τη μέγιστη τιμή του ίση με 1,0 (εφόσον η παράμετρος α_0 προσδιορίστηκε ίση με 6,7 για ύψος τοιχωμάτων 16 m και μήκος 2,4 m και το κλάσμα $(1+\alpha_0)/3=3$ προέκυψε μεγαλύτερο της μέγιστης επιτρεπόμενης τιμής). Βάσει λοιπόν της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής του ($=3,6$) επιλέχθηκε να ληφθεί συντελεστής συμπεριφοράς $q=3,5$.



Εικόνα 5.6: Φάσμα σχεδιασμού για $q = 3,5$

Υπολογισμός σεισμικών δράσεων

Η εφαρμογή της Μεθόδου Ανάλυσης Οριζόντιας Φόρτισης προϋποθέτει αρχικά τον προσδιορισμό της τέμνουσας βάσης F_b , κατά τη σχέση:

$$F_b = S_d(T_l) m \lambda \quad (5.13)$$

όπου,

T_l η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος ταλάντωσης κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση (στην προκειμένη περίπτωση όμοια και για τις δύο κύριες διευθύνσεις)

$S_d(T_l)$ η τετμημένη του φάσματος σχεδιασμού για ιδιοπερίοδο T_l όπως υπολογίζεται από τις Εξισώσεις (5.5)-(5.8) και παρουσιάζεται γραφικά (διακεκομμένη γκρι γραμμή) στο διάγραμμα της Εικόνας (5.6)

m η συνολική μάζα του κτιρίου πάνω από τη θεμελίωση ή την άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου. Η μάζα του κάθε ορόφου λαμβάνεται ίση με τα φορτία βαρύτητας κατά τον συνδυασμό δράσεων $G+\psi_E Q$ ($\psi_E = \varphi \cdot \psi_2$, όπως ορίζονται στους πίνακες των Εικόνων 5.7 και 5.8 για την αντίστοιχη κατηγορία χρήσης του εκάστοτε ορόφου).

λ συντελεστής διόρθωσης, ίσος με 0,85 αν το κτίριο έχει πάνω από δύο ορόφους και ισχύει $T_l \leq 2T_C$ ή ίσος με 1,0 για κάθε άλλη περίπτωση.

Δράσεις	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Επιβαλλόμενα φορτία σε κτήρια, κατηγορία (βλέπε EN 1991-1-1)			
Κατηγορία A: κατοικίες, συνήθη κτήρια κατοικιών	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία B: χώροι γραφείων	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία C: χώροι συνάθροισης	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία D: χώροι καταστημάτων	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία E: χώροι αποθήκευσης	1,0	0,9	0,8
Κατηγορία F: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων βάρος οχημάτων $\leq 30\text{kN}$	0,7	0,7	0,6
Κατηγορία G: χώροι κυκλοφορίας οχημάτων $30\text{kN} < \text{βάρος οχημάτων} \leq 160\text{kN}$	0,7	0,5	0,3
Κατηγορία H: στέγες	0	0	0
Φορτία χιονιού επάνω σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-3)*			
Φιλανδία, Ισλανδία, Νορβηγία, Σουηδία	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H > 1000\text{ m}$	0,70	0,50	0,20
Υπόλοιπα Κράτη Μέλη του CEN για τοποθεσίες που βρίσκονται σε υψόμετρο $H \leq 1000\text{ m}$	0,50	0,20	0
Φορτία ανέμου σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0
Θερμοκρασία (μη-πυρκαϊάς) σε κτήρια (βλέπε EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0

Εικόνα 5.7: Πίνακας A1.1 ΕΚ0 για προσδιορισμό των συντελεστών ψ , πηγή: (Μαλακάτας και Τρέζος, 2011)

Τύπος μεταβλητής δράσης	Όροφος	ϕ
Κατηγορίες A-C*	Δώμα	1,0
	Όροφοι με συσχετισμένες χρήσεις	0,8
	Όροφοι με μη-συσχετισμένες χρήσεις	0,5
Κατηγορίες D-F* και αρχαία		1,0

Εικόνα 5.8: Πίνακας 4.2 ΕΚ8 για προσδιορισμό του συντελεστή ϕ , πηγή: (Μαλακάτας και Τρέζος, 2011)

Στη μάζα του κάθε ορόφου, όσον αφορά τα μόνιμα φορτία, συμπεριλήφθηκαν το ίδιο βάρος και τα πρόσθετα μόνιμα φορτία της πλάκας, καθώς και τα ίδια βάρη των υποστυλωμάτων και των τοιχωμάτων, που αντιστοιχούν στο μισό καθαρό τους ύψος. Ο προσδιορισμός των μαζών των ορόφων παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.8, ενώ τα αποτελέσματα του υπολογισμού της τέμνουσας βάσης (ίδια και για τις δύο διευθύνσεις) στον Πίνακα 5.9.

Πίνακας 5.8: Προσδιορισμός μαζών των ορόφων

Μάζες ορόφων				
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή		Σχόλιο
		Όροφοι (1 ^{ος} -4 ^{ος})	Δώμα	
Μόνιμα φορτία	G [kN]	4994,3	5858,3	-
Κινητά φορτία	Q [kN]	2880	864	-
Συντελεστής	φ [-]	0,8	1	Πίνακας Εικόνας 5.8
Συντελεστής	ψ_2 [-]	0,6	0,6	Πίνακας Εικόνας 5.7 (Κατηγορία C)
Συντελεστής	ψ_E [-]	0,48	0,6	$\psi_E = \varphi \cdot \psi_2$
Συνδυασμός φόρτισης	$G + \psi_E \cdot Q$ [kN]	6376,7	6376,7	-
Επιτάχυνση βαρύτητας	g [m/s ²]	9,81		-
Μάζα	m [t]	650	650	$(G + \psi_E \cdot Q) / g$
Συνολική μάζα κτιρίου	m_{tot} [t]	3250,1		$4 \cdot m_{op} + m_{\delta\omega\mu}$

Πίνακας 5.9: Υπολογισμός σεισμικής τέμνουσας βάσης (κατά x και y)

Μάζες ορόφων			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Συνολική μάζα κτιρίου	m_{tot} [t]	3250,1	-
Θεμελιώδης ιδιοπερίοδος	T_1 [s]	1,43	Εξίσωση (5.2)
Τετμημένη φάσματος σχεδιασμού	$S_d(T_1)$ [m/s ²]	0,85	Εξισώσεις (5.5)-(5.8)
Συντελεστής διόρθωσης	λ [-]	1,0	Αφού $T_1 > 2T_C$
Σεισμική τέμνουσα βάση	F_b [kN]	2754,7	Εξίσωση (5.13)

Με δεδομένη την τιμή της τέμνουσας βάσης και με χρήση της Εξίσωσης (5.12) για τριγωνική κατανομή των φορτίων (μεγαλύτερα στην οροφή και μειώνονται προς τη βάση) προσδιορίστηκαν οι οριζόντιες δυνάμεις κάθε ορόφου. Η εφαρμογή τους έγινε στα κέντρα μάζας των ορόφων, τα οποία συμπίπτουν, λόγω συμμετρίας, με το γεωμετρικό κέντρο των πλακών.

Πίνακας 5.10: Κατανομή οριζόντιας σεισμικής φόρτισης

Κατανομή οριζόντιων φορτίων				
Όροφοι	z_i [m]	m_i [t]	$z_i \cdot m_i$ [mt]	F_i [kN]
1ος	3,2	650,0	2080,1	183,6
2ος	6,4	650,0	4160,1	367,3
3ος	9,6	650,0	6240,2	550,9
4ος	12,8	650,0	8320,2	734,6
5ος	16	650,0	10400,3	918,2
Σύνολο	-	3250,1	31200,9	2754,7

Επιρροή στρεπτικών επιδράσεων

Η ύπαρξη αβεβαιοτήτων στη θέση των μαζών κάθε ορόφου και στη χωρική μεταβολή της σεισμικής κίνησης πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ανάλυση ενός φορέα. Η απαίτηση αυτή επιτυγχάνεται με τη μετατόπιση του κέντρου μάζας κάθε ορόφου από την ονομαστική του θέση, κατά απόσταση, σε καθεμία από τις δύο κύριες διευθύνσεις, ίση με την ακόλουθη τυχηματική εκκεντρότητα:

$$e_{ai} = \pm 0,05 L_i \quad (5.14)$$

όπου, e_{ai} η τυχηματική εκκεντρότητα εφαρμοζόμενη κατά την ίδια διεύθυνση σε όλους τους ορόφους, L_i η κάθετη προς τη διεύθυνση της σεισμικής φόρτισης διάσταση του ορόφου.

Οι τιμές των εκκεντροτήτων λοιπόν, για το εξεταζόμενο κτίριο διαστάσεων 24x24 m, προέκυψαν ίσες με $\pm 1,2$ m και για τις δύο διευθύνσεις. Δεδομένου ότι χρησιμοποιήθηκε χωρικό προσομοίωμα για την ανάλυση, η επιρροή των στρεπτικών επιδράσεων προσομοιώθηκε με την προσαύξηση των εντατικών μεγεθών που προκύπτουν σε κάθε στοιχείο μέσω επιβολής στρεπτικών ροπών περί τον κατακόρυφο άξονα κάθε ορόφου. Η τιμές των στρεπτικών ροπών υπολογίστηκαν σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση και συνοψίζονται στον Πίνακα 5.11.

$$M_{ai} = e_{ai} F_i \quad (5.15)$$

όπου, e_{ai} η τυχηματική εκκεντρότητα, κατά την Εξίσωση (5.14) και F_i το οριζόντιο φορτίο του εκάστοτε ορόφου, όπως υπολογίστηκε στον Πίνακα 5.10 σε διεύθυνση κάθετη προς εκείνη της e_{ai} .

Πίνακας 5.11: Υπολογισμός επιβαλλόμενων στρεπτικών ροπών

Στρεπτικές επιδράσεις			
Όροφοι	F_i [kN]	e_{ai} [m]	M_{ai} [kNm]
1ος	183,6	1,2	220,4
2ος	367,3	1,2	440,8
3ος	550,9	1,2	661,1
4ος	734,6	1,2	881,5
5ος	918,2	1,2	1101,9
Σύνολο	2754,7	-	-

5.3.3 Συνδυασμοί φόρτισης

Για τη διαστασιολόγηση δημιουργήθηκαν συγκεκριμένοι συνδυασμοί των προαναφερθέντων φορτίσεων, όπως ορίζονται από το Μέρος 0 του Ευρωκώδικα, για την Οριακή Κατάσταση Αστοχίας (Ο.Κ.Α.). Δεδομένου ότι αγνοήθηκε η επιρροή θερμοκρασιακών μεταβολών, ερπυσμού και συστολής ξήρανσης, χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι συνδυασμοί για την εξαγωγή των εντατικών μεγεθών των ανάλογων ελέγχων:

- 1) $1,35G + 1,5Q$
- 2) $G + \psi_2Q \pm E_x \pm 0,3E_y$
- 3) $G + \psi_2Q \pm 0,3E_x \pm E_y$

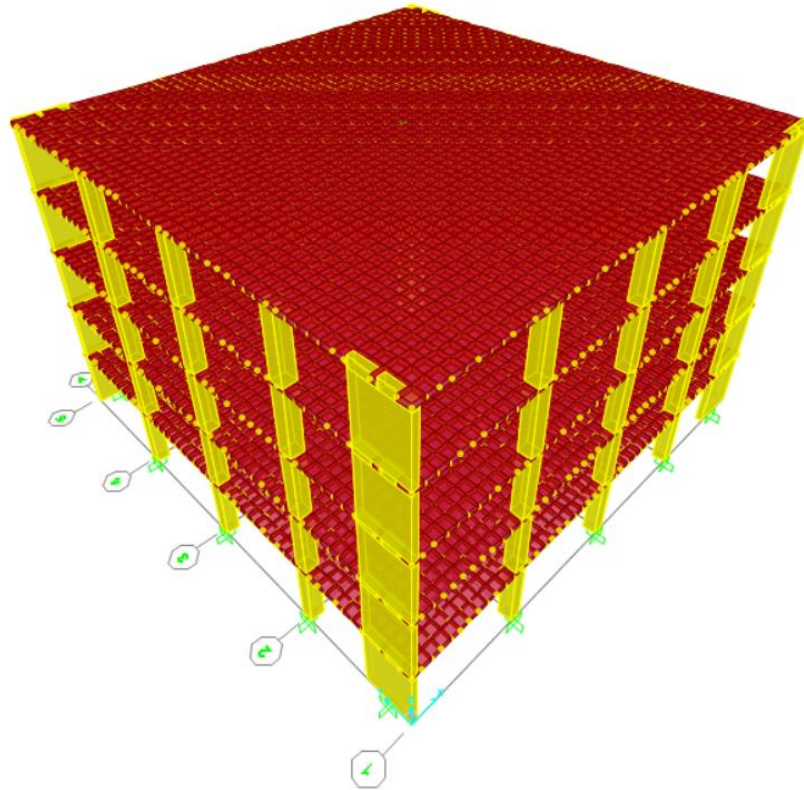
όπου, G το σύνολο των μονίμων φορτίων (ίδιο βάρος και πρόσθετα μόνιμα), Q το σύνολο των κινητών φορτίων, E_x και E_y οι συνιστώσες της σεισμικής δράσης κατά τον άξονα x και y αντίστοιχα (όπως υπολογίστηκαν στην παράγραφο §5.3.2), $\psi_2=0,6$ σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνας 5.7.

Ο πρώτος συνδυασμός ήταν κρίσιμος για τη διαστασιολόγηση των πλακών έναντι κάμψης, καθώς η εντατική τους κατάσταση δεν επηρεάζεται από τις οριζόντιες σεισμικές δράσεις. Οι οπλισμοί έναντι διάτρησης προέκυψαν με βάση την περιβάλλουσα των συνδυασμών 1-3, ώστε να ληφθεί υπόψιν και η επιρροή της εκκεντρότητας των αναπτυσσόμενων διατμητικών τάσεων, αποτέλεσμα της ανάπτυξης ροπών στα υποστυλώματα λόγω των οριζόντιων σεισμικών δράσεων. Η επιρροή των στρεπτικών επιδράσεων συμπεριλήφθηκε στους σεισμικούς συνδυασμούς. Εκτενέστερη αναφορά γίνεται στην παράγραφο §5.4.2, όπου περιγράφεται η εισαγωγή των φορτίων και ο προσδιορισμός των συνδυασμών φόρτισης στο πρόγραμμα.

5.4 Προσομοίωση κατασκευής

5.4.1 Γεωμετρία φορέα

Όπως προαναφέρθηκε, η προσομοίωση του εξεταζόμενου κτιρίου έγινε με το λογισμικό SAP2000. Για την προσομοίωση των υποστυλωμάτων και των τοιχωμάτων χρησιμοποιήθηκαν γραμμικά πεπερασμένα στοιχεία, ενώ για εκείνη της πλάκας χρησιμοποιήθηκαν επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία.

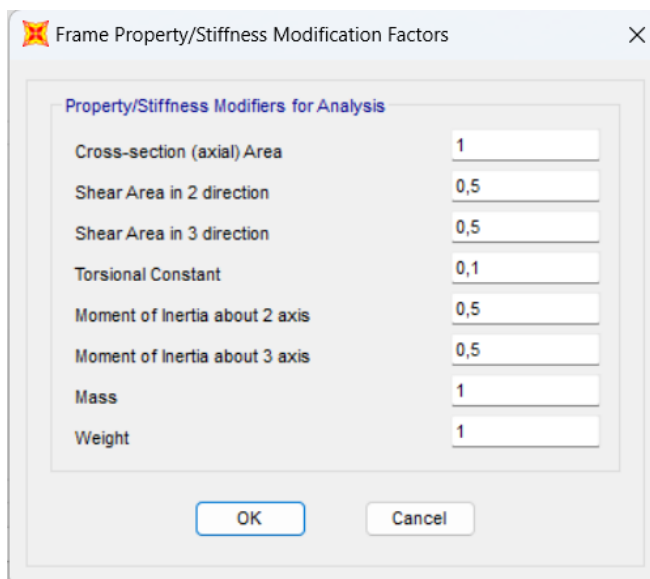
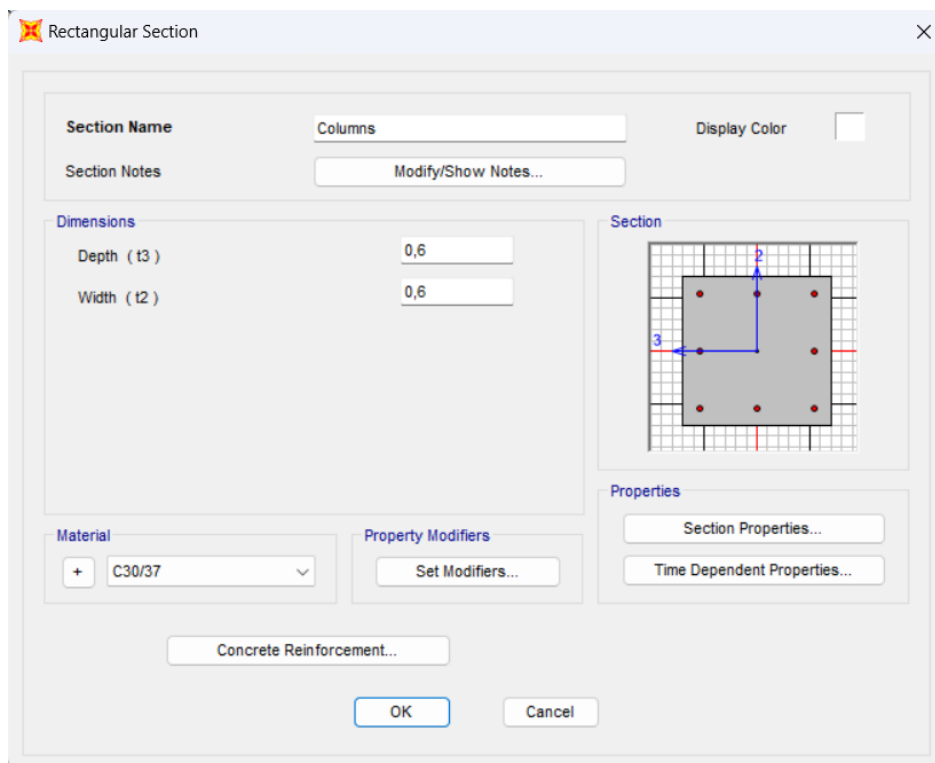


Εικόνα 5.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση προσομοιώματος κτιρίου στο λογισμικό SAP2000

Αρχικά, δημιουργήθηκε κατάλληλος κάναβος (6x6x3,2) για την εισαγωγή των κατακόρυφων στοιχείων και των πλακών των ορόφων στις σωστές θέσεις και ακολούθησε ο ορισμός του υλικού που χρησιμοποιήθηκε. Επιλέχθηκε σκυρόδεμα κατηγορίας C30/37, ενώ η εισαγωγή των ιδιοτήτων του (Εικόνα 5.10) έγινε με βάση τις προδιαγραφές του Ευρωκώδικα. Το ειδικό βάρος του οπλισμένου σκυροδέματος τέθηκε ίσο με 25 kN/m^3 , ωστόσο η τιμή αυτή δεν επηρέασε την προσομοίωση, καθώς το ίδιο βάρος του φορέα επιλέχθηκε να μην υπολογιστεί αυτόματα από το πρόγραμμα (όπως αναφέρεται παρακάτω στην εισαγωγή των φορτίων). Το μέτρο ελαστικότητας E τέθηκε ίσο με 33 GPa , ενώ ο λόγος Poisson ν ίσος με 0 , όπως ενδείκνυται για ρηγματωμένες διατομές σκυροδέματος. Για τις υπόλοιπες ιδιότητες διατηρήθηκαν οι αρχικά οριζόμενες από το πρόγραμμα τιμές, καθώς υπολογίζονται αυτόματα με βάση τις ανάλογες παραμέτρους.

Εικόνα 5.10: Εισαγωγή ιδιοτήτων υλικού στο SAP2000

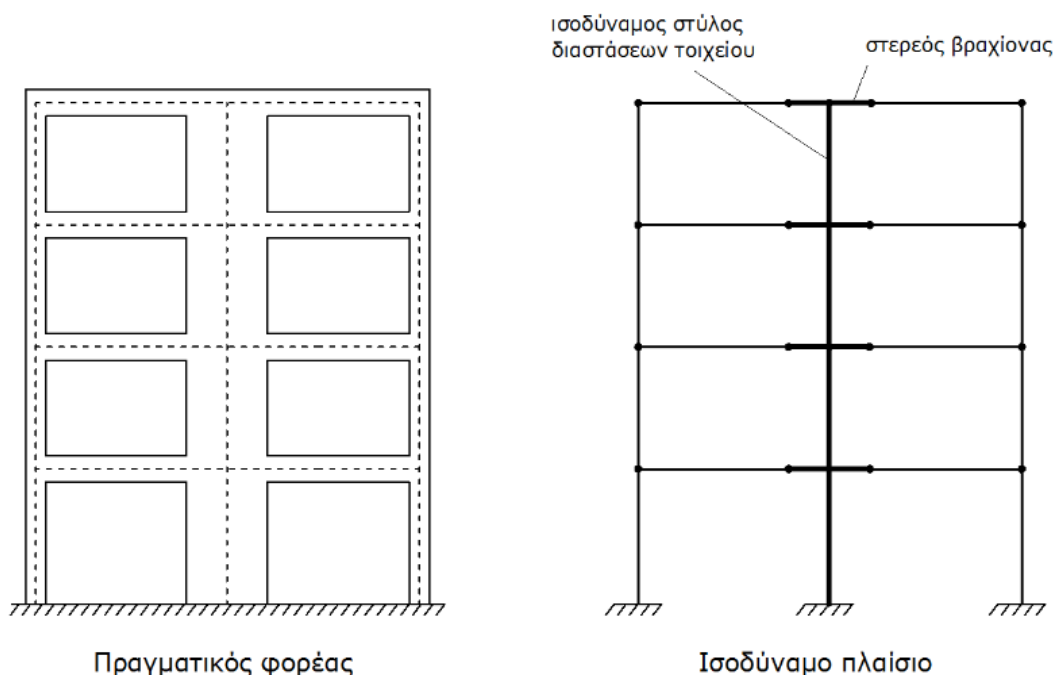
Ακολούθησε η εισαγωγή της διατομής των υποστυλωμάτων (κοινή για το σύνολό τους) στα ανάλογα κατακόρυφα γραμμικά στοιχεία. Στην Εικόνα 5.11 παρουσιάζονται οι διαστάσεις της και οι συντελεστές τροποποίησης των ιδιοτήτων της. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν οι προδιαγραφές του Ευρωκώδικα, σύμφωνα με τις οποίες προβλέπεται απομείωση της δυσκαμψίας και της δυστημσίας των ρηγματωμένων διατομών κατά 50%, αλλά και απομείωση της δυστρεψίας στο 10% της αρχικής της τιμής. Οι ενδεικτικοί οπλισμοί που εμφανίζονται στη διατομή με κόκκινο χρώμα είναι καθαρά σχηματικοί και δεν αντιπροσωπεύουν πραγματικές ράβδους οπλισμού που τοποθετούνται στο δομικό στοιχείο.



Εικόνα 5.11: Ορισμός διατομής υποστυλωμάτων στο SAP2000

Για τα τοιχώματα των τεσσάρων γωνιών εφαρμόστηκε η ισοδύναμη πλαισιακή προσομοίωση, η οποία έχει αποδειχτεί αποτελεσματική για τοιχώματα με προέχουσα καμπτική συμπεριφορά, όπως θεωρούνται εκείνα του εξεταζόμενου φορέα (ως τοιχώματα σημαντικού ύψους, με λόγο ύψους προς πλάτος μεγαλύτερο του 2). Το κάθε τοίχωμα αποτελείται από ένα κατακόρυφο

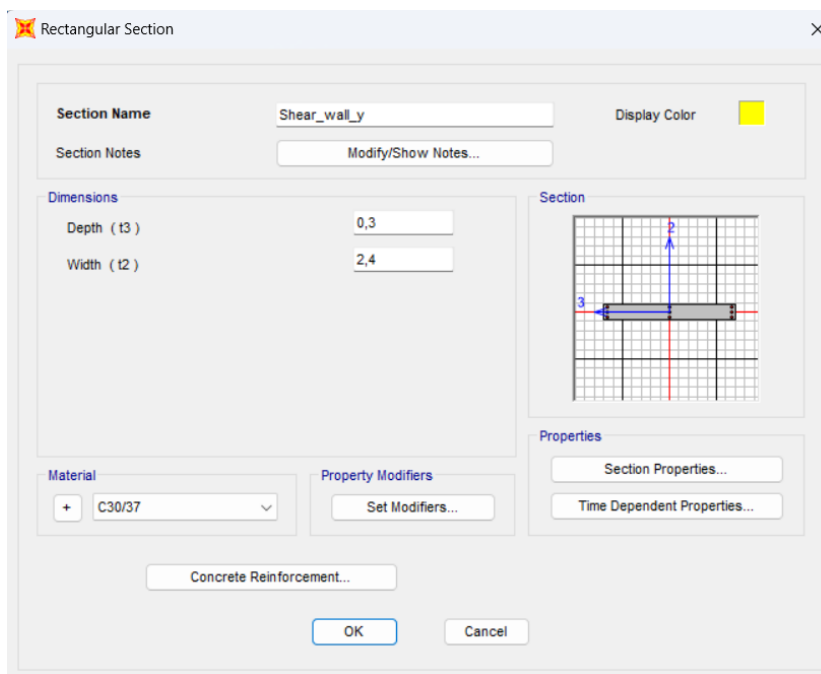
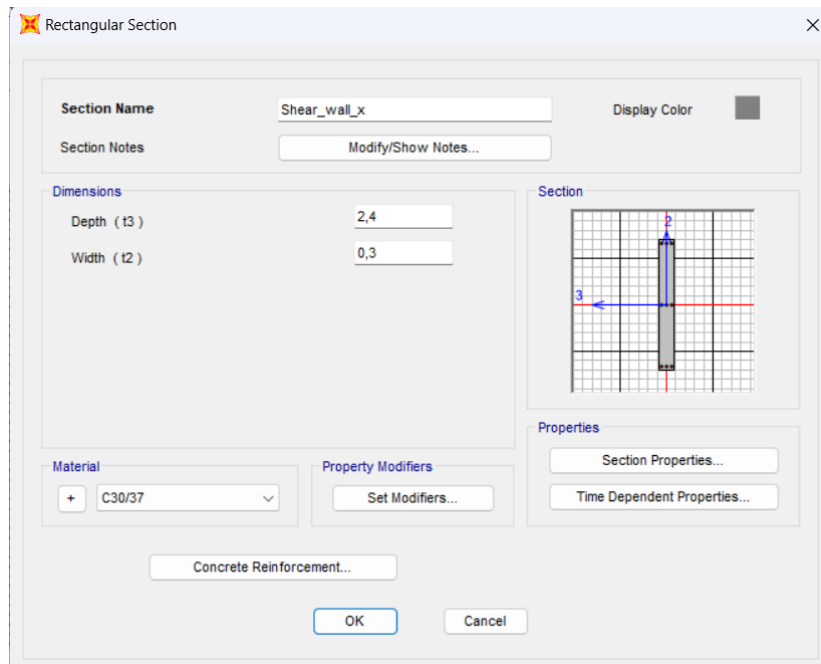
γραμμικό στοιχείο (ισοδύναμος στύλος) και τα οριζόντια βοηθητικά στοιχεία (στερεοί βραχίονες) στο επίπεδο κάθε ορόφου (Εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12: Προσομοίωση τοιχώματος με χρήση γραμμικών στοιχείων, πηγή: (Κίρτας και Παναγόπουλος, 2015)

Ο ισοδύναμος στύλος έχει τα χαρακτηριστικά της διατομής του τοιχώματος που προσομοιώνει. Αντίστοιχα λοιπόν με τη διατομή των υποστυλωμάτων, ορίστηκαν δύο διατομές για τα τοιχώματα του κτιρίου (Εικόνα 5.13), μία για εκείνα που λειτουργούν κατά τη διεύθυνση x και μία για εκείνα της διεύθυνσης y . Δεδομένων των κοινών τους διαστάσεων θα αρκούσε μία διατομή με κατάλληλη περιστροφή της στις αντίστοιχες θέσεις. Ο λόγος που για την κάθε διεύθυνση ορίστηκε διαφορετική διατομή ήταν η διατήρηση κοινού προσανατολισμού των τοπικών αξόνων όλων των στοιχείων από την εισαγωγή τους. Οι συντελεστές τροποποίησης των ιδιοτήτων της διατομής είναι ίδιοι με αυτούς που παρουσιάστηκαν για τα υποστυλώματα στην Εικόνα 5.11.

Να σημειωθεί πως για όλα τα περιμετρικά και γωνιακά κατακόρυφα στοιχεία μετατράπηκε καταλλήλως το σημείο εισαγωγής τους στο φορέα. Προκειμένου να προσομοιωθεί σωστά η κάτοψη του κτιρίου και οι αποστάσεις των στοιχείων, τέθηκε ως σημείο εισαγωγής (Insertion point) των συγκεκριμένων διατομών το μέσον της εξωτερικής παρειάς τους και όχι το κέντρο τους.



Εικόνα 5.13: Ορισμός διατομών τοιχωμάτων στο λογισμικό SAP2000

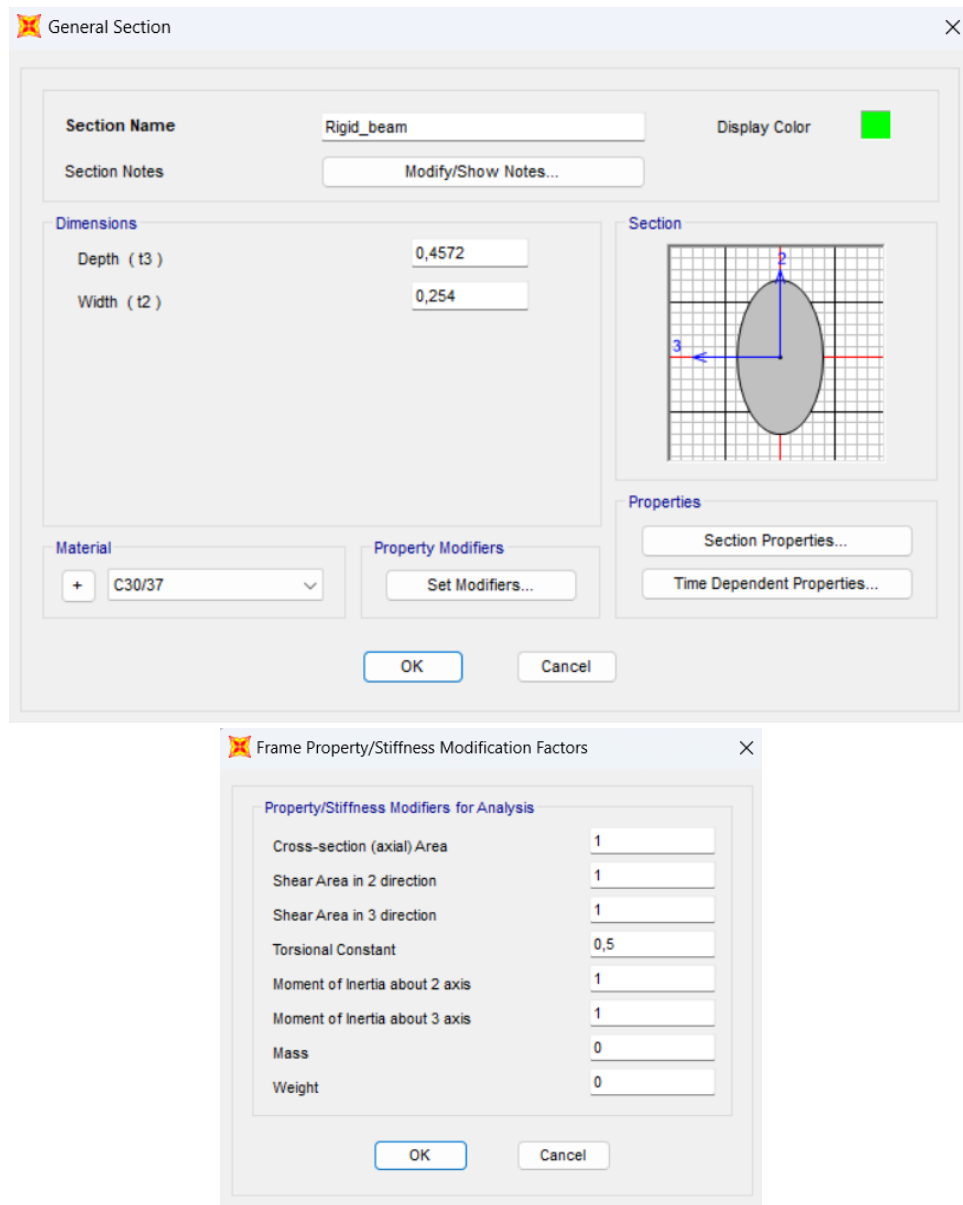
Οι στερεοί βραχίονες εκτείνονται από το κέντρο του τοιχώματος, όπου βρίσκεται ο άνω κόμβος του ισοδύναμου στύλου, μέχρι τις παρειές του. Προκειμένου να προσομοιωθεί η συμπεριφορά του κορμού του τοιχώματος, οι στερεοί βραχίονες αποτελούνται από διατομές με μεγάλες τιμές δυστένειας, δυσκαμψίας και δυσμησίας. Για τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διατομής που ορίστηκε τέθηκε ενδεικτικά η τιμή 100 (Εικόνα 5.14). Συγκεκριμένα, για τη

δυστρεψία ορίστηκε πεπερασμένη τιμή (όπως προτείνουν οι Κίτρας και Παναγόπουλος, 2015), σύμφωνα με την Εξίσωση (5.16).

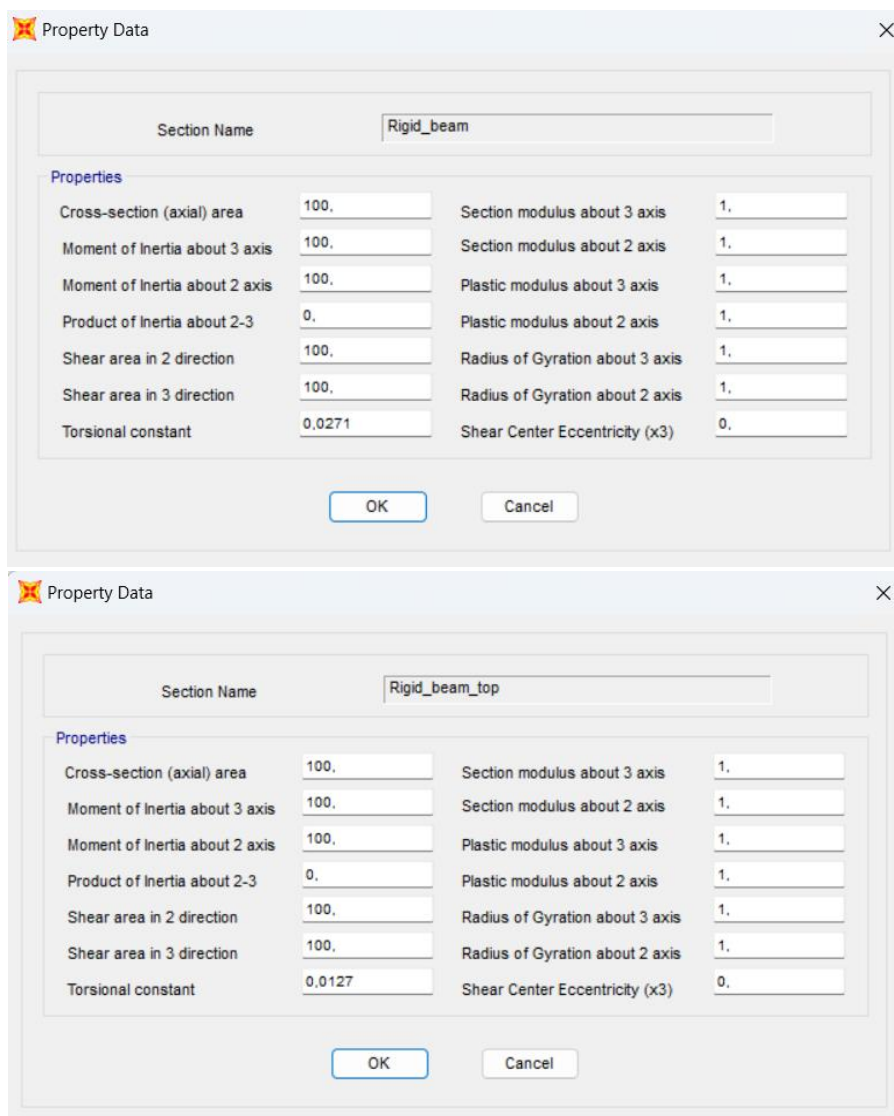
$$J = \alpha t^3 h \quad \text{με } \alpha = \frac{1}{3} \left[1 - \left(\frac{192 t}{\pi^5 h} \right) \tanh \left(\frac{\pi h}{2 t} \right) \right] \quad (5.16)$$

όπου, h το ύψος από το μέσον του προηγούμενου έως το μέσον του επόμενου ορόφου, t το πάχος του τοιχώματος και α συντελεστής που υπολογίζεται με βάση την παραπάνω εξίσωση.

Δεδομένου ότι η τιμή του h για τον τελευταίο όροφο είναι η μισή σε σχέση με τους υπόλοιπους, ορίστηκαν δύο διατομές με μόνο αυτή τη διαφοροποίηση (όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.14).

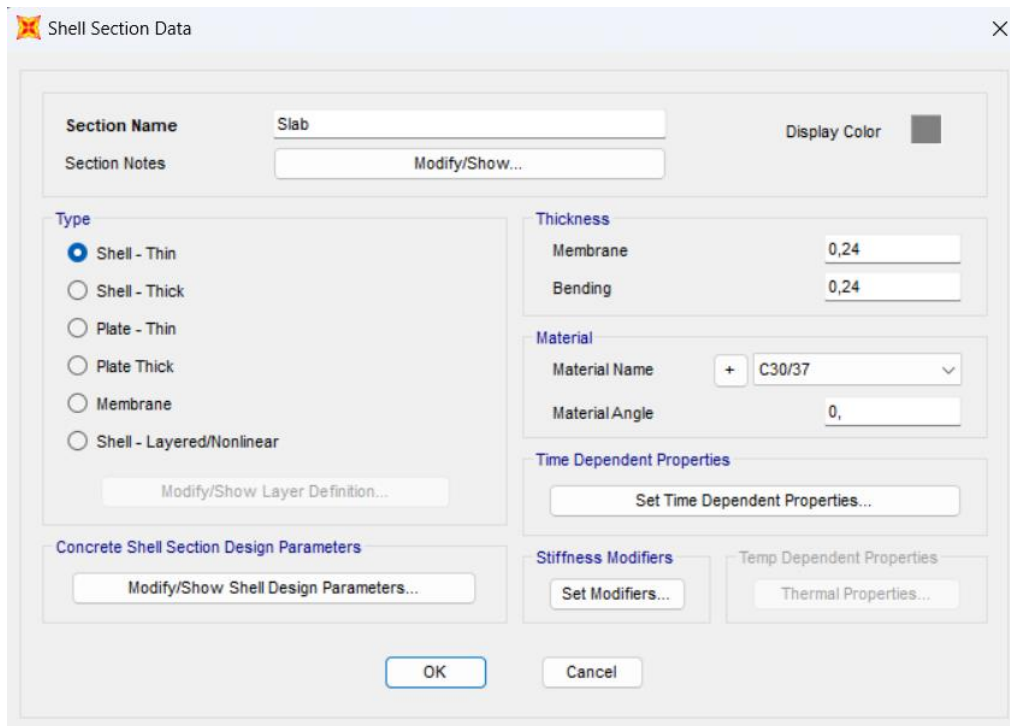


Εικόνα 5.14α: Ορισμός διατομών στερεών βραχίωνων στο SAP2000

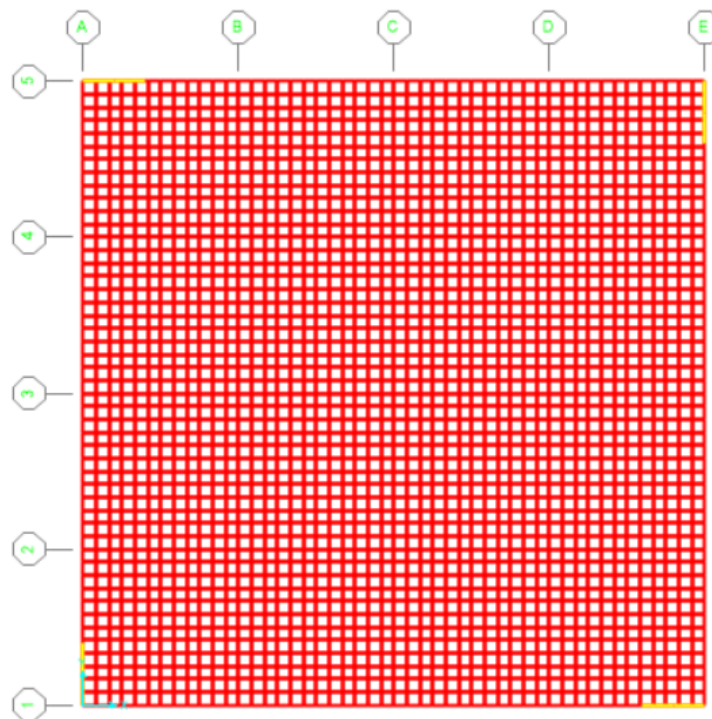


Εικόνα 5.14β: Ορισμός διατομών στερεών βραχίωνων στο SAP2000

Για τις πλάκες ορίστηκε επιφανειακή διατομή (Area section), τύπου Shell-Thin, πάχους 0,24m σε καταπόνηση εντός και εκτός επιπέδου (Membrane και Bending αντίστοιχα). Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα στοιχεία, δεν ακολουθήθηκε η πρόβλεψη του Ευρωκώδικα 8 που αφορά την απομείωση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών των φερόντων στοιχείων από σκυρόδεμα, καθώς η πλάκα δεν αναμένεται να παρουσιάσει ανελαστική παραμόρφωση κατά τη σεισμική απόκριση. Όλες οι ιδιότητες παρουσιάζονται όπως εισήχθησαν στο πρόγραμμα στην Εικόνα 5.15. Η διακριτοποίηση του επιφανειακού στοιχείου της πλάκας σε κάθε όροφο πραγματοποιήθηκε με το διαχωρισμό του σε 48 πεπερασμένα στοιχεία ανά τις δύο διευθύνσεις x και y του επιπέδου της (Εικόνα 5.16). Ο αριθμός αυτός επιλέχθηκε ώστε να προκύψουν πεπερασμένα επιφανειακά στοιχεία διαστάσεων 0,5x0,5 m (συνολικές διαστάσεις κάτοψης 24x24 m).



Εικόνα 5.15: Ορισμός διατομής πλάκας στο SAP2000



Εικόνα 5.16: Διακριτοποίηση πλάκων στο SAP2000

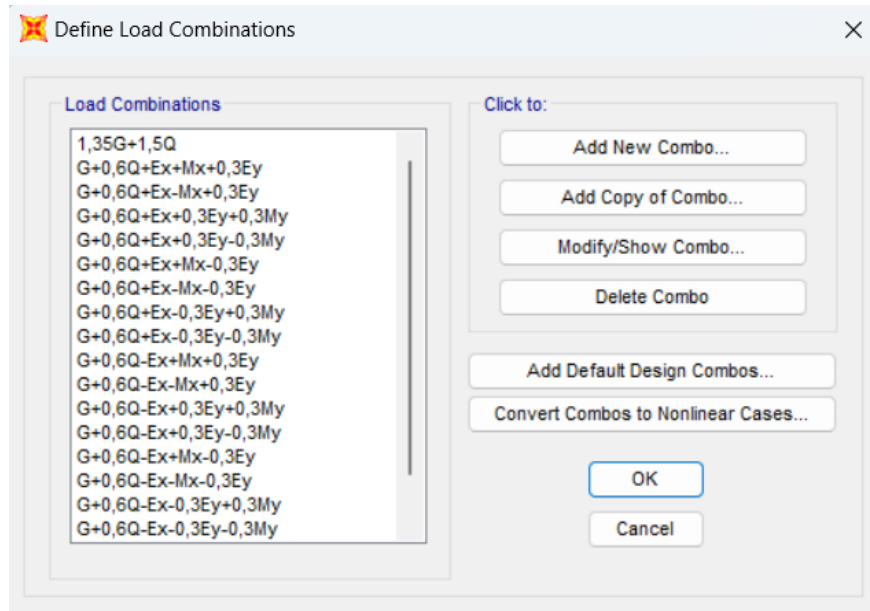
Παρ' όλο που ορίστηκαν οι πλάκες μέσω πεπερασμένων επιφανειακών στοιχείων κρίθηκε απαραίτητη και η ανάθεση διαφραγμάτων στις στάθμες του κτιρίου ώστε να επιτευχθεί η κοινή μετατόπιση όλων των κόμβων κάθε ορόφου. Όσον αφορά τις στηρίξεις, ορίστηκαν πακτώσεις στις βάσεις των υποστυλωμάτων με περιορισμό όλων των βαθμών ελευθερίας των αντίστοιχων κόμβων. Για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων μετονομάστηκαν οι κόμβοι και τα γραμμικά στοιχεία του προσομοιώματος σύμφωνα με τον όροφο στον οποίο ανήκαν, με την αρίθμηση εντός κάθε ορόφου να ξεκινά από κάτω αριστερά προς τα πάνω δεξιά (βλέποντας την κάτοψη του κτιρίου).

5.4.2 Εισαγωγή φορτίσεων και συνδυασμών τους

Ορίστηκαν τα είδη των φορτίσεων ώστε να γίνει η εισαγωγή των ανάλογων φορτίων και ο συνδυασμός τους. Για το ίδιο βάρος των πλακών επιλέχθηκε να γίνει χρήση εξωτερικά επιβαλλόμενου επιφανειακά κατανεμημένου φορτίου, και όχι αυτόματος υπολογισμός του από το πρόγραμμα (Self weight multiplier: 0). Η τιμή του προέκυψε ίση με 6 kN/m^2 , πολλαπλασιάζοντας το ειδικό βάρος του σκυροδέματος (25 kN/m^3) με το πάχος της πλάκας (0,24 m). Αντίστοιχα, τα πρόσθετα μόνιμα και κινητά φορτία εφαρμόστηκαν σε όλα τα επιφανειακά πεπερασμένα στοιχεία, σύμφωνα με τις τιμές της παραγράφου §5.3.1.

Τα οριζόντια σεισμικά φορτία (Quake_x, Quake_y), το βοηθητικό φορτίο για τον προσδιορισμό του στατικού τύπου του συστήματος (F_x) καθώς και η ροπή για την επιρροή των στρεπτικών επιδράσεων (M_x/M_y) εφαρμόστηκαν στον κεντρικό κόμβο της πλάκας κάθε ορόφου, προς την κατάλληλη διεύθυνση, σύμφωνα με τις τιμές της παραγράφου §5.3.2.

Η εισαγωγή των συνδυασμών φόρτισης στο πρόγραμμα, κατά την παράγραφο §5.3.3, παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.17. Λόγω απόλυτης συμμετρίας επιλέχθηκε ο ορισμός των μισών σεισμικών συνδυασμών, οι οποίοι συμπεριλαμβάνουν το 100% της δράσης E_x και το 30% της E_y . Οι υπόλοιποι σεισμικοί συνδυασμοί (με το 100% της δράσης E_y και το 30% της E_x) θα έδιναν τα ίδια αποτελέσματα στην άλλη διεύθυνση γι' αυτό και παραλήφθηκαν, χάριν απλότητας. Οι στρεπτικές επιδράσεις συμπεριλήφθηκαν με προσθήκη της στρεπτικής ροπής M ($M_x=M_y$) με το ανάλογο ποσοστό και πρόσημο σε κάθε περίπτωση, ώστε να ληφθούν υπόψιν και οι τέσσερις δυνατές μετατοπίσεις του κέντρου μάζας κάθε ορόφου. Έτσι προέκυψαν οι ακόλουθοι 16 συνδυασμοί ($G+0,6Q\pm(E_x\pm M_x)\pm 0,3(E_y\pm M_y)$). Τέλος ορίστηκαν οι περιβάλλουσες, μία για όλους τους συνδυασμούς φόρτισης της Ο.Κ.Α (Envelope) και μία μόνο για τους σεισμικούς (Envelope quake).



Εικόνα 5.17: Εισαγωγή συνδυασμών φόρτισης στο SAP2000

5.5 Έλεγχοι γεωμετρίας στοιχείων και σεισμικών μετακινήσεων

5.5.1 Πάχος πλακών

Για την επιλογή του πάχους των πλακών προσδιορίστηκε η ονομαστική επικάλυψη των οπλισμών c_{nom} και το στατικό ύψος d , με κριτήριο την απαλλαγή από τον έλεγχο βελών κάμψης. Όπως προαναφέρθηκε, ακολουθήθηκε η διαδικασία που περιγράφεται στον EN 1992-1-1:2004 για τους ανάλογους υπολογισμούς.

Επικάλυψη οπλισμών

Η ελάχιστη επιτρεπόμενη επικάλυψη προβλέπεται για τη διασφάλιση της σωστής μεταφοράς των δυνάμεων συνάφειας, της προστασίας του χάλυβα έναντι διάβρωσης και της επαρκούς πυροπροστασίας. Το περιβάλλον του κτιρίου χαρακτηρίστηκε ως μετρίως διαβρωτικό, κατηγορίας XC3. Η τιμή της ονομαστικής επικάλυψης υπολογίστηκε ίση με 0,03 m από τις σχέσεις:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (5.17)$$

και

$$c_{min} = \max\{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,y} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} \quad (5.18)$$

όπου, c_{min} η ελάχιστη επικάλυψη, Δc_{dev} η ανοχή για την αντιμετώπιση αποκλίσεων με συνιστώμενη τιμή 10 mm, $c_{min,b}$ η ελάχιστη επικάλυψη βάσει απαίτησης συνάφειας, $c_{min,dur}$ η ελάχιστη επικάλυψη βάσει περιβαλλοντολογικών συνθηκών και $\Delta c_{dur,\gamma}$, $\Delta c_{dur,st}$, $\Delta c_{dur,add}$ ενδεχόμενες προσαυξήσεις (για πρόσθετη ασφάλεια στοιχείου, χρήση ανοξειδώτου χάλυβα και ενδεχόμενη πρόσθετη προστασία αντίστοιχα) με συνιστώμενη τιμή 0.

Η ελάχιστη επικάλυψη βάσει απαίτησης συνάφειας, $c_{min,b}$, ισούται με τη διάμετρο των τοποθετούμενων ράβδων οπλισμού. Προέκυψε λοιπόν ίση με 0,014 m (για τοποθέτηση διαμήκων ράβδων διαμέτρου $\Phi 14$), σύμφωνα με τους υπολογισμούς της παραγράφου §5.6. Η ελάχιστη επικάλυψη βάσει περιβαλλοντολογικών συνθηκών, $c_{min,dur}$, λήφθηκε ίση με 0,02 m (από τον πίνακα της Εικόνας 5.18), για κατηγορία κατασκευής S3 (η αρχική κατηγορία S4 μειώθηκε κατά 1, δεδομένου ότι εξετάζεται πλάκα, σύμφωνα με τον πίνακα της Εικόνας 5.19), και αποτέλεσε τη μέγιστη τιμή του δεύτερου σκέλους της Εξίσωσης (5.18).

Πίνακας 11.4 Απαιτήσεις ελάχιστης επικάλυψης, $c_{min,dur}$, από άποψη ανθεκτικότητας σε διάρκεια για χάλυβα οπλισμού (EC2, Πίνακας 4.4N)							
Περιβαλλοντολογική απαίτηση							
Κατηγορία Κατασκευής	Κατηγορία έκθεσης (Πίνακας 11.1)						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Εικόνα 5.18: Πίνακας 4.4N EK2 για τις απαιτήσεις ελάχιστης επικάλυψης $c_{min,dur}$, πηγή: (Τυπολόγιο Σκυροδέματος ΕΜΠ, 2020)

Πίνακας 11.5 Συνιστώμενη κατηγοριοποίηση κατασκευών (EC2, Πίνακας 4.3N)							
Κατηγορία Κατασκευής							
Κριτήριο	Κατηγορία έκθεσης σύμφωνα (Πίνακα 11.1)						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1	XD2 / XS1	XD3 / XS2 / XS3
Χρόνος ζωής σχεδιασμού 100 χρόνια	αύξηση κατηγορίας κατά 2	αύξηση κατηγορίας κατά 2	αύξηση κατηγορίας κατά 2	αύξηση κατηγορίας κατά 2	αύξηση κατηγορίας κατά 2	αύξηση κατηγορίας κατά 2	αύξηση κατηγορίας κατά 2
Κατηγορία αντοχής	$\geq C30/37$ μείωση κατηγορίας κατά 1	$\geq C30/37$ μείωση κατηγορίας κατά 1	$\geq C35/45$ μείωση κατηγορίας κατά 1	$\geq C40/50$ μείωση κατηγορίας κατά 1	$\geq C40/50$ μείωση κατηγορίας κατά 1	$\geq C40/50$ μείωση κατηγορίας κατά 1	$\geq C45/55$ μείωση κατηγορίας κατά 1
Δομικό στοιχείο με γεωμετρία πλάκας (η θέση του οπλισμού δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία κατασκευής)	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1
Διασφάλιση ειδικού ελέγχου ποιότητας παραγωγής σκυροδέματος	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1	μείωση κατηγορίας κατά 1

Η συνιστώμενη Κατηγορία Κατασκευής (για χρόνο ζωής σχεδιασμού 50 έτη) είναι S4 για τις ενδεικτικές αντοχές του σκυροδέματος του Πίνακα 11.2 (EC2, Πίνακας E.1N). Η συνιστώμενη ελάχιστη Κατηγορία Κατασκευής είναι S1.

Εικόνα 5.19: Πίνακας 4.3N EK2 για την κατηγοριοποίηση κατασκευών, πηγή: (Τυπολόγιο Σκυροδέματος ΕΜΠ, 2020)

Απαλλαγή από έλεγχο βελών κάμψης

Για τον προσδιορισμό του στατικού ύψους d έγινε αρχικά μια εκτίμηση μέσω του πίνακα της Εικόνας 5.20. Στις πλάκες χωρίς δοκούς, για την τιμή του ανοίγματος l επιλέγεται η μέγιστη διάσταση. Στην προκειμένη περίπτωση η συγκεκριμένη διάσταση είναι ίδια και στις δύο διευθύνσεις, οπότε δεν τίθεται θέμα επιλογής. Λαμβάνοντας λοιπόν το θεωρητικό μήκος των πλακών $l=6$ m και το λόγο $l/d=24$, προέκυψε συνιστώμενο στατικό ύψος $d=0,25$ m. Δεδομένου ότι η εκτίμηση αυτή είναι ιδιαίτερα συντηρητική και το θεωρητικό άνοιγμα υπερεκτιμήθηκε, επιλέχθηκε αρχική τιμή της επαναληπτικής διαδικασίας μικρότερη από την προκύπτουσα και ίση με 0,22 m. Με βάση αυτό το στατικό ύψος και έπειτα από αρχική θεώρηση τοποθέτησης ράβδων διαμέτρου $\Phi 10$, προσδιορίστηκε το πάχος των πλακών ίσο με 0,26 m ($h=c_{nom}+\Phi+d=0,03+0,01+0,22=0,26$ m) και κατ' επέκταση το ίδιο βάρος τους. Εκτιμήθηκε το γεωμετρικό ποσοστό του απαιτούμενου εφελκόμενου οπλισμού για το συνδυασμό φόρτισης 1,35G+1,5Q και με χρήση των Εξισώσεων (5.19) και (5.20) υπολογίστηκε το ελάχιστο επιτρεπόμενο στατικό ύψος.

Πίνακας 10.1 Βασικοί λόγοι l/d (EC2, Πίνακας 7.4.N)			
Δομικό σύστημα	K	Σκυρόδεμα υπό υψηλή τάση $\rho = 1,5\%$	Σκυρόδεμα υπό χαμηλή τάση $\rho = 0,5\%$
Αμφιέριστη δοκός ή πλάκα κατά μία ή δύο διευθύνσεις	1,0	14	20
Ακραίο άνοιγμα συνεχούς δοκού ή πλάκας κατά μία διεύθυνση, ή πλάκας κατά δύο διευθύνσεις συνεχούς καταμήκος μιας επιμήκους πλευράς	1,3	18	26
Μεσαίο άνοιγμα δοκού ή πλάκας κατά μία ή δύο διευθύνσεις	1,5	20	30
Πλάκα επί υποστυλωμάτων χωρίς δοκούς (μυκητοειδής) (έλεγχος βάσει του μεγαλύτερου ανοίγματος)	1,2	17	24
Πρόβολος	0,4	6	8

Εικόνα 5.20: Πίνακας 7.4N EK2 για λόγους ανοίγματος προς στατικό ύψος (για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς αξονική δύναμη), πηγή: (Τυπολόγιο Σκυροδέματος ΕΜΠ, 2020)

Για να προκύψει το ελάχιστο επιτρεπόμενο στατικό ύψος πρέπει (για δεδομένο l) ο λόγος ανοίγματος προς στατικό ύψος (l/d) να ικανοποιεί τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$\frac{l}{d} \leq K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right] \quad \text{για } \rho \leq \rho_0 \quad (5.19)$$

$$\frac{l}{d} \leq K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \quad \text{για } \rho > \rho_0 \quad (5.20)$$

όπου, K συντελεστής που λαμβάνεται από τον πίνακα της Εικόνας 5.20 (ίσος με 1,2 για πλάκες χωρίς δοκούς), f_{ck} η χαρακτηριστική τιμή της θλιπτικής αντοχής σκυροδέματος σε MPa, ρ_0 το

ποσοστό οπλισμού αναφοράς ίσο με $\sqrt{f_{ck}} \cdot 10^{-3}$, ρ και ρ' το απαιτούμενο γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου και θλιβόμενου οπλισμού, αντίστοιχα, για την παραλαβή της ροπής (λόγω φορτίων σχεδιασμού στην Ο.Κ.Α.) στο κέντρο του ανοίγματος.

Ακολούθησε λοιπόν μία επαναληπτική διαδικασία, κατά την οποία, με βάση το ελάχιστο επιτρεπόμενο στατικό ύψος (Εξίσωση (5.19)) και τη διάμετρο των ράβδων που προέκυπτε από τη διαστασιολόγηση έναντι κάμψης της πλάκας (σύμφωνα με τη διαδικασία της παραγράφου §5.6), επαναπροσδιορίζονταν τα φορτία και κατ' επέκταση το γεωμετρικό ποσοστό ρ . Με τα νέα δεδομένα λοιπόν υπολογιζόταν εκ νέου το ελάχιστο d και τελικά προέκυψε πάχος πλακών ίσο με 0,24 m (με $d_{min}=0,197$ m και $h_{min}=0,233$ m, για ράβδους διαμέτρου Φ12).

5.5.2 Γεωμετρικοί έλεγχοι υποστυλωμάτων και τοιχωμάτων

Η αρχική επιλογή των διαστάσεων των υποστυλωμάτων επαληθεύτηκε μέσω του ελέγχου της μέγιστης επιτρεπτής ανηγμένης αξονικής δύναμης κατά τον Ευρωκώδικα 8, απ' όπου διαπιστώθηκε η ύπαρξη επαρκούς επιφάνειας σκυροδέματος. Η ανηγμένη αξονική v_d υπολογίστηκε με βάση τη μέγιστη δρώσα θλιπτική δύναμη για συνδυασμούς δράσεων με σεισμό, σύμφωνα με τη σχέση:

$$v_d = N_d / (A_c f_{cd}) \quad (5.21)$$

όπου, N_d η μέγιστη δρώσα θλιπτική δύναμη για συνδυασμούς δράσεων με σεισμό (ίση με 2252 kN) και A_c το συνολικό εμβαδόν της διατομής των υποστυλωμάτων ίσο με 0,36 m².

Η v_d λοιπόν προέκυψε ίση με 0,31, ικανοποιώντας τον περιορισμό για κατασκευές μέσης πλαστιμότητας (ΚΠΜ), κατά τον οποίο δεν πρέπει να ξεπερνά την τιμή 0,65.

Ο αντίστοιχος έλεγχος πραγματοποιήθηκε και για τις διατομές των τοιχωμάτων. Αρχικά, προσδιορίστηκε το ελάχιστο πάχος του κορμού τους, κατά τον Ευρωκώδικα 8, ίσο με 0,15 m (< 0,3 m που τέθηκε το πάχος των τοιχωμάτων του κτιρίου), ως το μέγιστο των τιμών 0,15 m και $h_s/20=0,148$ m (όπου h_s το καθαρό ύψος ορόφου ίσο με 2,96 m). Με χρήση της Εξίσωσης (5.21) υπολογίστηκε η ανηγμένη αξονική δύναμη (για $N_d=984$ kN και $A_c=0,72$ m²). Η προκύπτουσα τιμή (=0,07) ικανοποιεί τον αντίστοιχο περιορισμό που αφορά τοιχώματα σε κατασκευές μέσης πλαστιμότητας, κατά τον οποίο πρέπει να ισχύει $v_d \leq 0,40$.

5.5.3 Επιρροή φαινομένων 2ας τάξεως και περιορισμός βλαβών

Παρ' όλο που στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν εξετάστηκε η διαστασιολόγηση των κατακόρυφων στοιχείων του κτιρίου και οι λοιπές κανονιστικές διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 για τα ίδια, κρίθηκαν απαραίτητοι οι έλεγχοι επιρροής φαινομένων 2ας τάξεως και περιορισμού βλαβών, λόγω της ευαισθησίας του φορέα που οφείλεται στην έλλειψη δοκών.

Με τον όρο «φαινόμενα 2ας τάξεως» υπονοείται η επί πλέον ένταση (πρόσθετες ροπές) που προκαλείται σε ένα φορέα λόγω των παραμορφώσεων που προκαλούν στο φορέα κατά την επιβολή τους οι οριζόντιες σεισμικές φορτίσεις (Χ. Γ. Καραγιάννης, 2019). Ουσιαστικά, λόγω των σεισμικών μετακινήσεων του κτιρίου, τα κατακόρυφα φορτία της κατασκευής εφαρμόζονται με

μία ορισμένη εκκεντρότητα, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη πρόσθετων ροπών (ίσων με το γινόμενο των κατακόρυφων φορτίων και της εκκεντρότητας) που ονομάζονται ροπές 2ας τάξεως. Κριτήριο για τον συνυπολογισμό ή όχι των φαινομένων 2ας τάξεως αποτελεί ο δείκτης θ , ο οποίος υπολογίζεται ξεχωριστά σε κάθε όροφο του κτιρίου και αντιπροσωπεύει την ευαισθησία του σε πλευρική παραμόρφωση, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$\theta = \frac{M_{II}}{M_I} = \frac{P_{tot} d_r}{V_{tot} h} \quad (5.22)$$

όπου, M_I και M_{II} οι ροπές 1ης και 2ας τάξεως αντίστοιχα, P_{tot} το συνολικό κατακόρυφο φορτίο ορόφου για τους συνδυασμούς φορτίσεων με σεισμό, V_{tot} η συνολική τέμνουσα δύναμη ορόφου, d_r η πραγματική σχετική υπολογιστική μετακίνηση του κέντρου μάζας της πλάκας του ορόφου και h το ύψος του ορόφου.

Ανάλογα με τις τιμές του θ σε κάθε όροφο επιλέγεται και ο τρόπος που λαμβάνεται υπόψιν η επιρροή των φαινομένων 2ας τάξεως σύμφωνα με τον κανονισμό.

- Αν ισχύει $\theta \leq 0,1$ σε όλους τους ορόφους της κατασκευής, επιτρέπεται η παράλειψη της επιρροής των φαινομένων 2ας τάξεως.
- Αν ισχύει $0,1 \leq \theta \leq 0,2$ σε κάποιους ορόφους, η επιρροή των φαινομένων 2ας τάξεως επιτρέπεται να λαμβάνεται υπόψιν προσεγγιστικά πολλαπλασιάζοντας την αντίστοιχη σεισμική δράση με το συντελεστή $1/(1-\theta)$.
- Αν ισχύει $0,2 \leq \theta \leq 0,3$ σε κάποιους ορόφους, η επιρροή των φαινομένων 2ας τάξεως πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν με ακριβέστερη μέθοδο και συγκεκριμένα με χρήση ανάλυσης 2ας τάξεως.
- Η υπέρβαση της τιμής 0,3 δεν επιτρέπεται από τον κανονισμό.

Υπολογίστηκαν λοιπόν, ανά όροφο, οι συντελεστές μεταθετότητας και τα αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 5.12, απ' όπου παρατηρείται η μη υπέρβαση της τιμής 0,1 σε όλους τους ορόφους. Να σημειωθεί πως οι τιμές των πραγματικών σχετικών μετακινήσεων του Πίνακα λήφθηκαν ίσες με τις εξαγόμενες από το λογισμικό τιμές, πολλαπλασιασμένες με το συντελεστή συμπεριφοράς q ($= 3,5$), καθώς από την ελαστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα προέκυψαν οι αντίστοιχες ελαστικές μετακινήσεις του φορέα.

Πίνακας 5.12: Υπολογισμός συντελεστών μεταθετότητας θ ανά όροφο

Όροφος	h [m]	P_{tot} [kN]	V_{tot} [kN]	d_r [m]	θ [-]
5ος	3,2	5990,4	918,2	0,025	0,051
4ος	3,2	12326,4	1652,8	0,030	0,069
3ος	3,2	18662,4	2203,8	0,032	0,083
2ος	3,2	24998,4	2571,1	0,028	0,084
1ος	3,2	31334,4	2754,7	0,013	0,048

Ο έλεγχος των σχετικών μετακινήσεων πραγματοποιείται με ικανοποίηση της απαίτησης για περιορισμό των βλαβών κατά το σεισμό λειτουργικότητας (σεισμός μέσης έντασης με μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης από το σεισμό σχεδιασμού), και συγκεκριμένα τον περιορισμό των βλαβών που αφορούν τα μη-φέροντα στοιχεία. Ελέγχεται λοιπόν, για κάθε όροφο, ότι το γινόμενο $d_r \cdot \nu$ δεν ξεπερνά μία τιμή που εξαρτάται από το είδος των μη-φερόντων στοιχείων, σύμφωνα με τα παρακάτω.

- Κτίρια με ψαθυρά μη-φέροντα στοιχεία: $d_r \cdot \nu \leq 0,005h$
- Κτίρια με πλάστιμα μη-φέροντα στοιχεία: $d_r \cdot \nu \leq 0,0075h$
- Κτίρια όπου δεν υπάρχουν μη-φέροντα στοιχεία ή τα ίδια δεν επηρεάζονται από τις μετακινήσεις: $d_r \cdot \nu \leq 0,01h$

όπου, ν ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψιν τη μικρότερη περίοδο επαναφοράς του σεισμού λειτουργικότητας και λαμβάνεται ίσος με 0,5 για κατηγορία σπουδαιότητας I ή II και 0,4 για III ή IV.

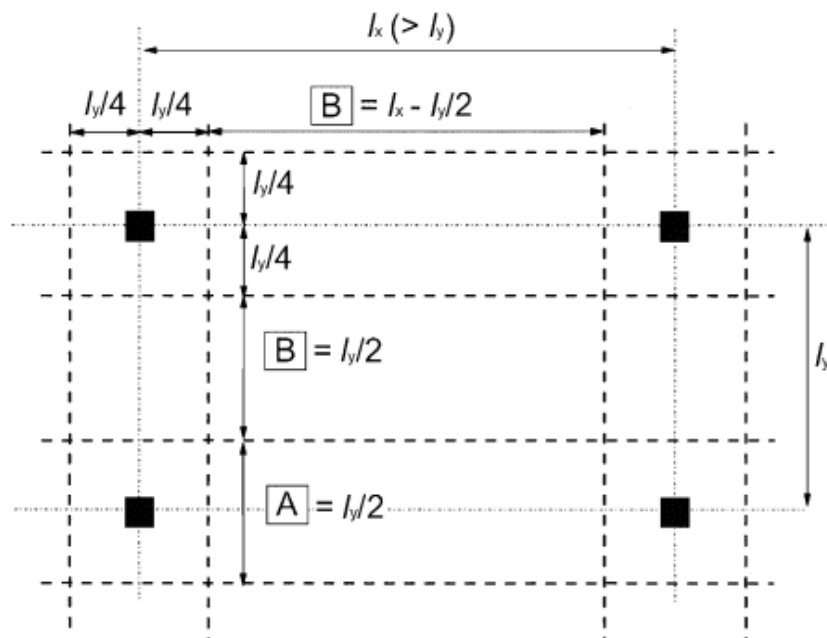
Εξετάστηκε λοιπόν η δυσμενέστερη περίπτωση που αφορά τα κτίρια με ψαθυρά μη-φέροντα στοιχεία και επιλέχθηκε η τιμή $\nu=0,4$ δεδομένου ότι η κατασκευή ανήκει στην κατηγορία σπουδαιότητας III. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών παρατίθενται στον Πίνακα 5.13, όπου φαίνεται η ικανοποίηση των περιορισμών σε όλους στους ορόφους.

Πίνακας 5.13: Έλεγχος περιορισμού βλαβών

Όροφος	h [m]	d_r [m]	$d_r \cdot \nu$ [m]	0,005h [m]
5ος	3,2	0,025	0,010	0,016
4ος	3,2	0,030	0,012	0,016
3ος	3,2	0,032	0,013	0,016
2ος	3,2	0,028	0,011	0,016
1ος	3,2	0,013	0,005	0,016

5.6 Διαστασιολόγηση πλάκας έναντι κάμψης

Για να διαστασιολογηθεί μία σύνδεση πλάκας-υποστυλώματος έναντι διάτρησης πρέπει να είναι γνωστοί οι διαμήκεις οπλισμοί της πλάκας που παραλαμβάνουν τις ροπές κάμψης, από τους οποίους θα προκύψει το αντίστοιχο γεωμετρικό ποσοστό οπλισμού. Πραγματοποιήθηκε λοιπόν διαστασιολόγηση των πλακών έναντι κάμψης, για το συνδυασμό φορτίσεων της οριακής κατάστασης αστοχίας “1,35G+1,5Q”, ο οποίος και αποδείχθηκε δυσμενέστερος από τους σεισμικούς. Για τη λήψη των εντατικών μεγεθών από το προσομοίωμα ακολουθήθηκε η προτεινόμενη από τον κανονισμό διαδικασία, σύμφωνα με την “Ανάλυση ισοδύναμων πλαισίων” που αφορά πλάκες χωρίς δοκούς. Πρόκειται για μία διαδικασία κατά την οποία τα φαινόμενα υποδιαιρούνται σε λωρίδες υποστυλωμάτων και λωρίδες ανοιγμάτων, σύμφωνα με την Εικόνα 5.21, και οι καμπτικές ροπές κατανέμονται στις ίδιες όπως φαίνεται στον πίνακα της Εικόνας 5.22.



Εικόνα 5.21: Υποδιαίρεση φατνωμάτων για πλάκες χωρίς δοκούς, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

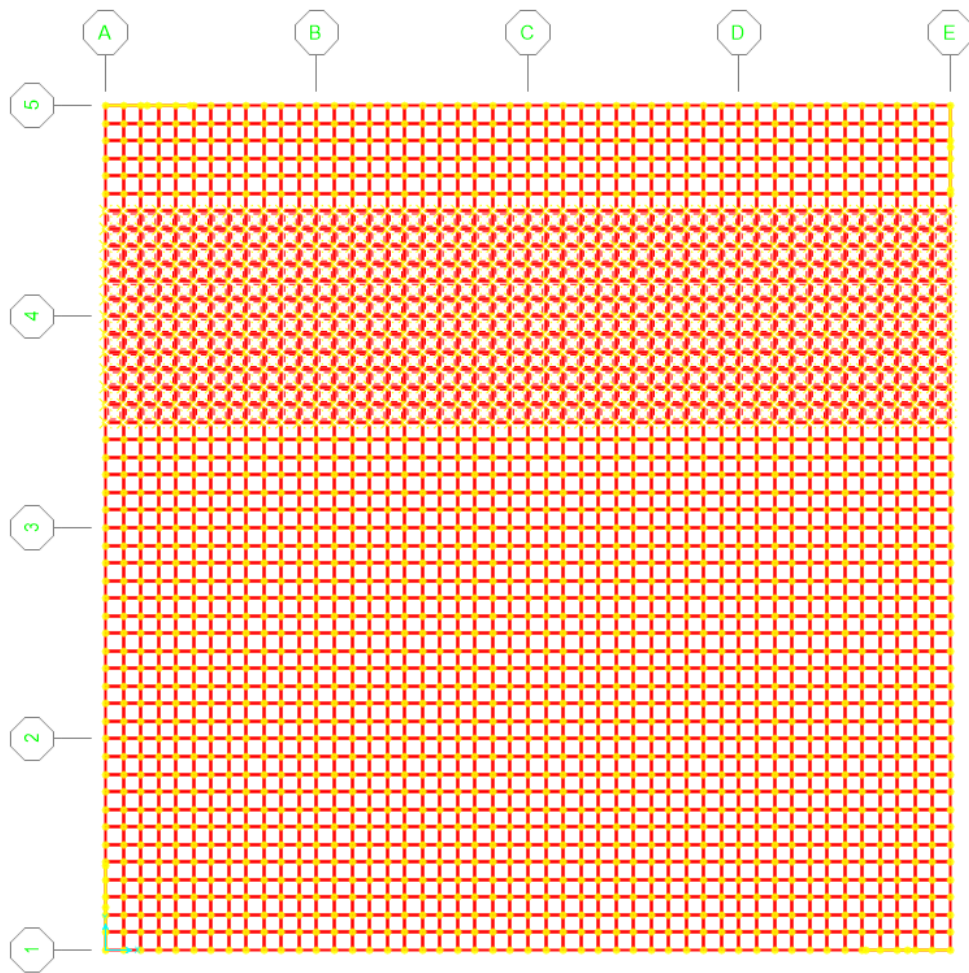
(A: Λωρίδα υποστλωμάτων, B: Λωρίδα ανοίγματος)

	Negative moments	Positive moments
Column Strip	60 - 80%	50 - 70%
Middle Strip	40 - 20%	50 - 30%
Note: Total negative and positive moments to be resisted by the column and middle strips together should always add up to 100%.		

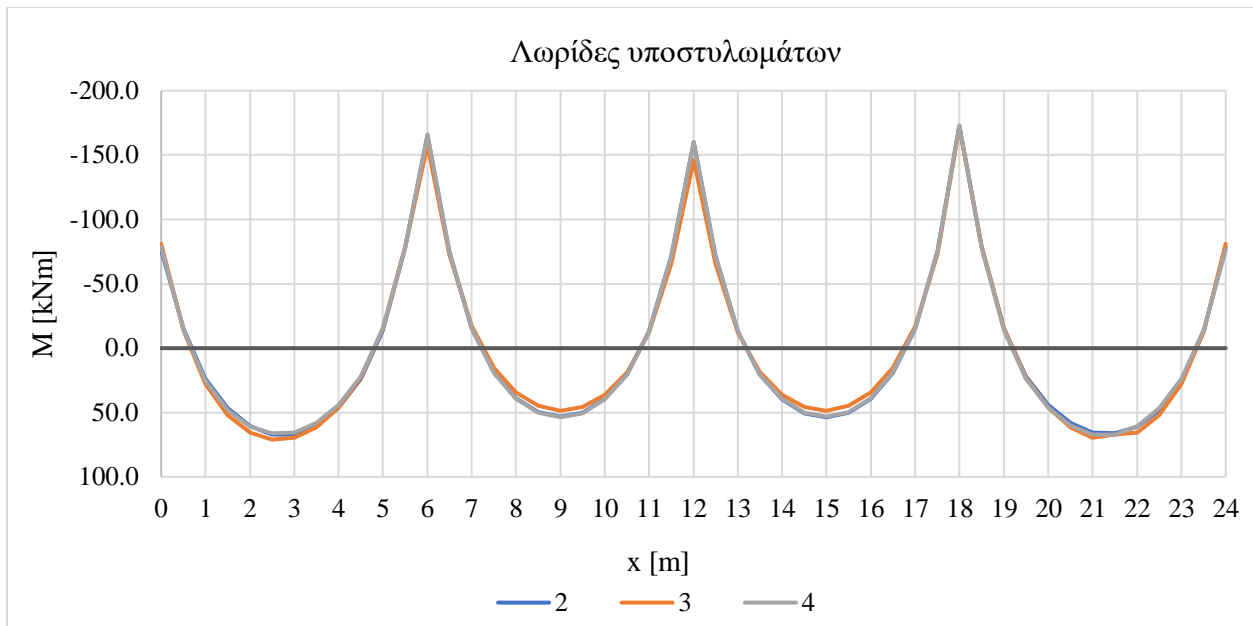
Εικόνα 5.22: Πίνακας I.1 ΕΚ2 για την κατανομή των καμπτικών ροπών σε πλάκες χωρίς δοκούς, πηγή: (EN 1992-1-1:2004)

Στο λογισμικό SAP2000, όπου οι πλάκες προσομοιώθηκαν με τη χρήση πεπερασμένων επιφανειακών στοιχείων, η ανάγνωση των καμπτικών ροπών προϋποθέτει τον ορισμό λωρίδων συγκεκριμένου πλάτους επιρροής και την ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων των αντίστοιχων κόμβων, ώστε να προκύψουν τα ζητούμενα διαγράμματα. Η διαδικασία αυτή εφαρμόστηκε ενδεικτικά για τις τρεις λωρίδες υποστλωμάτων που εκτείνονται κατά τη διεύθυνση x (οριζόντια διεύθυνση Εικόνας 5.23), η μία εκ των οποίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.23, με πλάτος επιρροής ίσο με 6 m ($= 2l_y/2$). Κάθε σειρά πεπερασμένων στοιχείων που εκτείνεται κατά πλάτος κάθε λωρίδας εντάχθηκε σε ένα διαφορετικό “Group” και με τη χρήση της επιλογής των “Section cuts” επιτεύχθηκε η ολοκλήρωση των αποτελεσμάτων των ανάλογων στοιχείων. Προέκυψαν λοιπόν οι τιμές των καμπτικών ροπών ανά 0,5 m (όσο η διάσταση των πεπερασμένων επιφανειακών στοιχείων) κατά μήκος της κάθε λωρίδας. Με εξαγωγή των αποτελεσμάτων στο

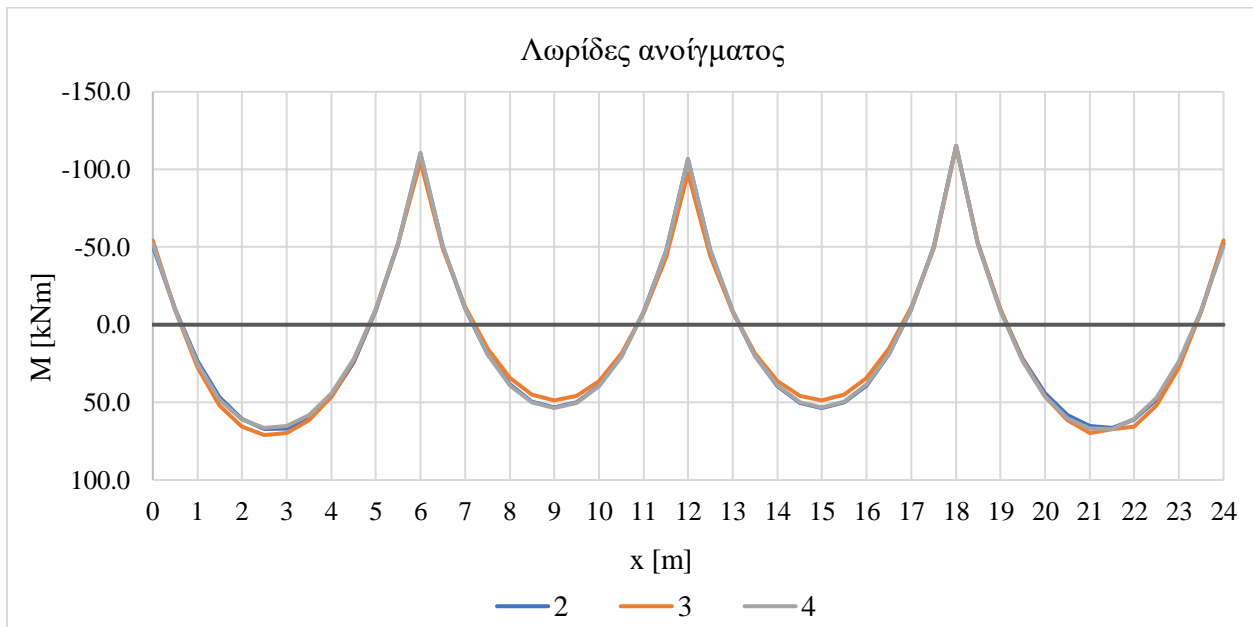
Excel και κατάλληλο πολλαπλασιασμό τους με τα ανάλογα ποσοστά του πίνακα της Εικόνας 5.22 σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα των καμπτικών ροπών (Εικόνες 5.24 και 5.25) με βάση τα οποία διαστασιολογήθηκαν οι πλάκες έναντι κάμψης. Να σημειωθεί πως επιλέχθηκε η μέγιστη τιμή των ποσοστών που αφορούν τις λωρίδες ανοίγματος, δηλαδή 40% και 50% για τις αρνητικές και τις θετικές ροπές αντίστοιχα, ενώ για τις λωρίδες υποστυλωμάτων λήφθηκε υπόψιν το 60% και 50% αντίστοιχα, ώστε το άθροισμα των ποσοστών κατανομής να είναι και στις δύο περιπτώσεις 100%.



Εικόνα 5.23: Πλάτος επιρροής ενδεικτικής λωρίδας φόρτισης



Εικόνα 5.24: Διάγραμμα καμπτικών ροπών για τις λωρίδες υποστυλωμάτων



Εικόνα 5.25: Διάγραμμα καμπτικών ροπών για τις λωρίδες ανοίγματος

Λόγω απόλυτης συμμετρίας τα παραπάνω διαγράμματα αφορούν και τις δύο διευθύνσεις (x και y) του επιπέδου της πλάκας. Επιλέχθηκε οι οπλισμοί που εκτείνονται κατά τη διεύθυνση $x-x$ να τοποθετηθούν στις εξωτερικές στρώσεις, επομένως προέκυψαν τα ανάλογα στατικά ύψη που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.14, όπου παρατίθενται οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των απαιτούμενων διαμήκων οπλισμών των πλακών. Στον Πίνακα 5.15 παρουσιάζονται οι οπλισμοί

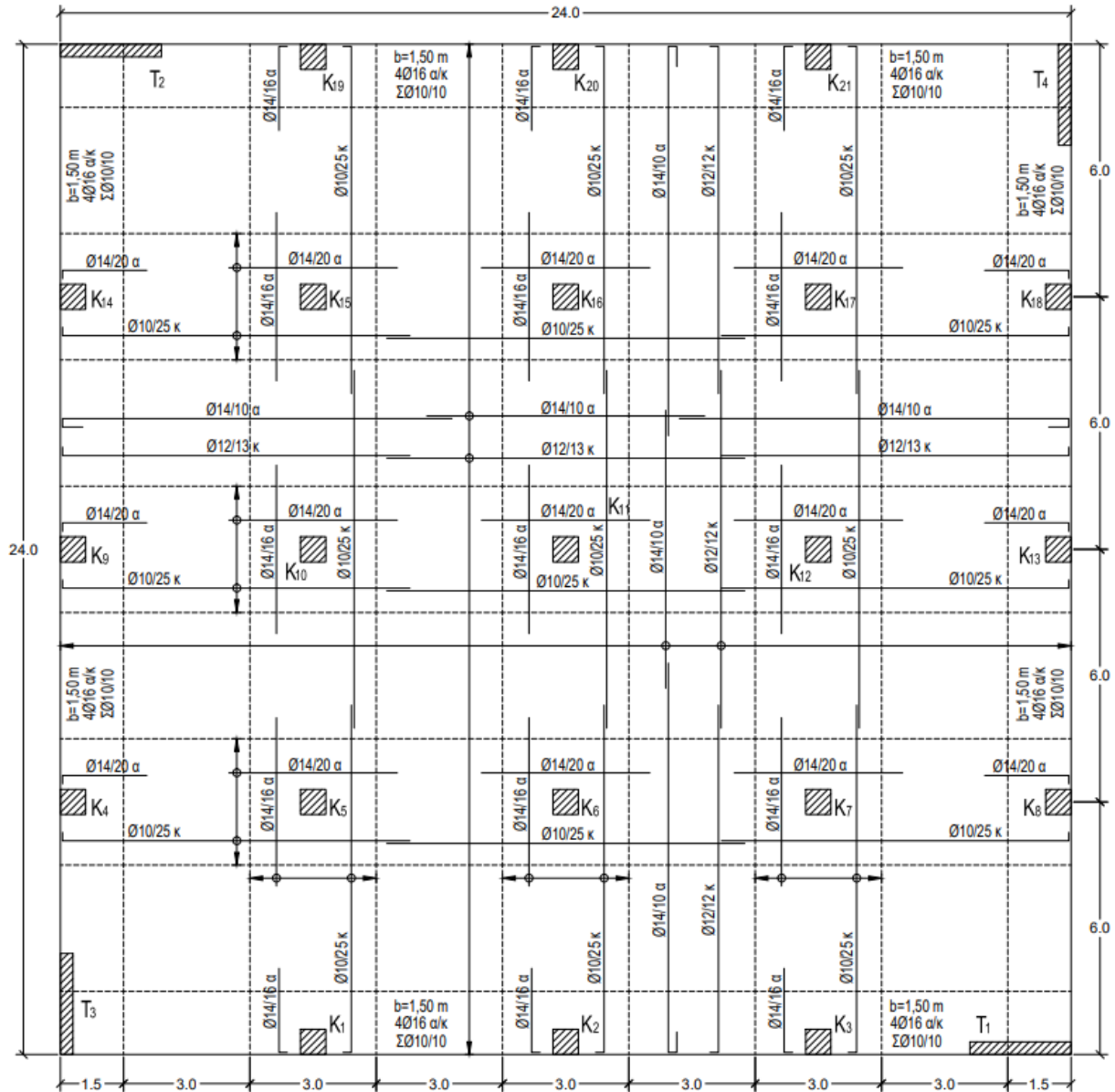
που τοποθετήθηκαν, ώστε να καλύπτουν τις ανάλογες απαιτήσεις και να ικανοποιούν τις κατασκευαστικές διατάξεις του Πίνακα 5.16.

Πίνακας 5.14: Προσδιορισμός απαιτούμενων διαμήκων οπλισμών πλακών

Ροπή που χρησιμοποιήθηκε	Διεύθυνση	d [cm]	M_{sd} [kNm]	μ_{sd} [-]	ω [-]	$A_{s,req}$ [cm ² /m]
Μέγιστη θετική της λωρίδας ανοίγματος	x-x	20,3	71	0,0861	0,0902	8,42
	y-y	18,9	71	0,0994	0,1049	9,12
Μέγιστη αρνητική της λωρίδας ανοίγματος	x-x	20,3	114	0,1383	0,1495	13,96
	y-y	18,9	114	0,1596	0,1749	15,20
Μέγιστη αρνητική της λωρίδας υποστυλωμάτων	x-x	20,3	173	0,2099	0,2383	22,25
	y-y	18,9	173	0,2422	0,2819	24,51

Πίνακας 5.15: Επιλογή τοποθετούμενων διαμήκων οπλισμών πλακών

Ροπή που χρησιμοποιήθηκε	Θέση που τοποθετήθηκε	Διεύθυνση	$A_{s,req}$ [cm ² /m]	$A_{s,req,add}$ [cm ² /m]	s [cm]	Φ [mm]	$A_{s,prov}$ [cm ² /m]
Μέγιστη θετική της λωρίδας ανοίγματος	Εσχάρα παντού κάτω	x-x	8,38	-	13	12	8,70
		y-y	8,96	-	12	12	9,42
Μέγιστη αρνητική της λωρίδας ανοίγματος	Εσχάρα παντού άνω	x-x	13,96	-	10	14	15,39
		y-y	15,20	-	10	14	15,39
-	Πρόσθετα κάτω στις λωρίδες υποστυλωμάτων (εντός πλάτους $li/2$)	x-x	11,55	2,85	25	10	3,14
		y-y	12,51	3,08	25	10	3,14
Μέγιστη αρνητική της λωρίδας υποστυλωμάτων	Πρόσθετα άνω στις στηρίξεις των λωρίδων υποστυλωμάτων (εντός πλάτους $li/2$)	x-x	22,25	6,86	20	14	7,70
		y-y	24,51	9,11	16	14	9,62



Εικόνα 5.26: Ξυλότυπος τυπικού ορόφου με σπλισμούς κάμψης

Οι καμπτικοί σπλισμοί των πλακών παρουσιάζονται στην Εικόνα 5.26. Δεδομένου ότι οι λωρίδες υποστρωμάτων, κατά την επιβολή των οριζόντιων σεισμικών φορτίων, λειτουργούν ως ενισχυμένες ζώνες και αντικαθιστούν την λειτουργία των δοκών στα πλαίσια που δημιουργούνται, κρίθηκε απαραίτητη η τήρηση της κατασκευαστικής διάταξης του ΕΚ8 κατά την οποία απαιτείται η τοποθέτηση κάτω σπλισμού τουλάχιστον ίσου με το μισό του άνω τοποθετούμενου. Οι πρόσθετοι κάτω σπλισμοί των λωρίδων υποστρωμάτων λοιπόν, που αναφέρονται στον Πίνακα 5.15, αφορούν αυτή την κατασκευαστική διάταξη. Τα άνω σίδηρα που εκτείνονται σε όλη την επιφάνεια κάμφθηκαν κατάλληλα ώστε να αντικαταστήσουν τη φουρκέτα που τοποθετείται ως σπλισμός ελεύθερου άκρου. Τέλος, διαμορφώθηκαν περιμετρικές ζώνες με την προσθήκη 4Φ16

άνω και κάτω και συνδετήρων Φ10/10, όπως προβλέπεται για διαφράγματα σε κατασκευές που δεν έχουν οπλιστεί σε σεισμό.

Πίνακας 5.16: Κατασκευαστικές διατάξεις πλακών

Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή		Σχόλιο
		x-x (εξωτερική στρώση)	y-y (εσωτερική στρώση)	
Στατικό ύψος οπλισμού κάτω στο άνοιγμα	d [cm]	20,4	19,2	Για διάμετρο ράβδων Φ12
Ελάχιστο εμβαδόν οπλισμού κάτω	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	3,08	2,90	$\max(0,26 \cdot 100 \cdot d \cdot f_{ctm} / f_{yk}; 0,0013 \cdot 100 \cdot d)$
Μέγιστη απόσταση ράβδων	s_{max} [mm]	250	250	$\min(2 \cdot h; 250)$
Στατικό ύψος οπλισμού άνω στις στηρίξεις	d [cm]	20,3	18,9	Για διάμετρο ράβδων Φ14
Ελάχιστο εμβαδόν οπλισμού άνω	$A_{s,min}$ [cm ² /m]	10,2	9,6	$0,005 \cdot 100 \cdot d$

5.7 Διαστασιολόγηση σύνδεσης πλάκας-υποστυλώματος έναντι διάτρησης

5.7.1 Εσωτερικά υποστυλώματα

Η διαστασιολόγηση έναντι διάτρησης έγινε ξεχωριστά για τα εσωτερικά και τα περιμετρικά υποστυλώματα λόγω της διαφοροποίησης στον προσδιορισμό κάποιων παραμέτρων κατά τη διαδικασία ελέγχου. Αρχικά εξετάστηκαν τα εσωτερικά υποστυλώματα (K₅, K₆, K₇, K₁₀, K₁₁, K₁₂, K₁₅, K₁₆, K₁₇) για τον συνδυασμό 1,35G+1,5Q αλλά και τους σεισμικούς συνδυασμούς της Ο.Κ.Α. ώστε να επιλεγεί η δυσμενέστερη περίπτωση. Με βάση τα εξαγόμενα από το SAP2000 εντατικά μεγέθη, προσδιορίστηκαν οι τιμές των ΔN, ΔM_x και ΔM_y των εξεταζόμενων κόμβων που χρησιμοποιήθηκαν στους υπολογισμούς των δρώντων διατμητικών τάσεων. Η διαδικασία ελέγχου για κάθε έκδοση του ΕΚ2 (EN 1992-1-1:2004 και FprEN 1992-1-1:2023) παρουσιάζεται παρακάτω.

EN 1992-1-1:2004

Σύμφωνα με τις περιγραφόμενες κανονιστικές διατάξεις του Κεφαλαίου 2, υπολογίστηκαν αρχικά οι περίμετροι ελέγχου και οι δρώσες διατμητικές τάσεις για τους προαναφερθέντες συνδυασμούς φορτίσεων. Δυσμενέστερος προέκυψε κάποιος από τους σεισμικούς, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.19, τα εντατικά μεγέθη του οποίου αφορούν το δυσμενέστερο εσωτερικό υποστυλώμα, και συγκεκριμένα τον δυσμενέστερο κόμβο του καθώς οι τιμές διαφοροποιούνται από όροφο σε όροφο.

Πίνακας 5.17: Δεδομένα υπολογισμών

Δεδομένα		
Γεωμετρικά στοιχεία-Οπλισμοί		
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή
Πάχος πλάκας	h [mm]	240
Διάσταση υποστρώματος κατά x	$b_{\text{οπ},x}$ [mm]	600
Διάσταση υποστρώματος κατά y	$b_{\text{οπ},y}$ [mm]	600
Ονομαστική επικάλυψη	c_{nom} [mm]	30
Διάμετρος διαμήκων ράβδων πλάκας	Φ [mm]	14
Υλικά		
Χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος	f_{ck} [MPa]	30
Συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος	γ_c [-]	1,5
Χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα (του οπλισμού διάτρησης)	f_{yk} [MPa]	500
Συντελεστής ασφαλείας χάλυβα	γ_s [-]	1,15
Αντοχή σχεδιασμού χάλυβα (του οπλισμού διάτρησης)	f_{ywd} [MPa]	434,78

Πίνακας 5.18: Προσδιορισμός στατικού ύψους και περιμέτρων ελέγχου

Στατικό ύψος-Περίμετροι ελέγχου		
Απόσταση κέντρου βάρους οπλισμού κατά x από την εφελκυσόμενη παρειά	$d_{1,x}$ [mm]	37
Απόσταση κέντρου βάρους οπλισμού κατά y από την εφελκυσόμενη παρειά	$d_{1,y}$ [mm]	51
Στατικό ύψος στη διεύθυνση x	d_x [mm]	203
Στατικό ύψος στη διεύθυνση y	d_y [mm]	189
Στατικό ύψος	d [mm]	196
Περίμετρος υποστρώματος	u_0 [mm]	2400
Βασική περίμετρος ελέγχου	u_1 [mm]	4863

Πίνακας 5.19: Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης

Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης V_{Ed}				
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή		Σχόλιο
		$1,35G+1,5Q$	$G+0,6Q\pm E_x\pm 0,3E_y$	
Δρώσα τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού	V_{Ed} [kN]	741,7	459,2	-
Δρώσα ροπή σχεδιασμού περί τον άξονα y	$M_{Ed,y}$ [kNm]	0	253,6	-
Δρώσα ροπή σχεδιασμού περί τον άξονα x	$M_{Ed,x}$ [kNm]	0	92,3	-
Πλάτος πλευράς υποστυλώματος παράλληλης με την εκκεντρότητα	c_1 [mm]	600	600	Διαχωρισμός αν έχω μονοαξονική κάμψη
Πλάτος πλευράς υποστυλώματος κάθετης με την εκκεντρότητα	c_2 [mm]	600	600	
Λόγος πλευρών υποστυλώματος	c_1 / c_2	1	1	-
Συντελεστής	k [-]	0,6	0,6	Από Πίνακα 2.1
Όρος που αφορά την κατανομή τέμνουσας λόγω ροπής	W_1 [mm ²]	2363959	2363959	Εξίσωση (2.9)
Εκκεντρότητα φόρτισης κατά τον άξονα x	e_x [m]	0,000	0,552	$M_{Ed,y} / V_{Ed}$
Εκκεντρότητα φόρτισης κατά τον άξονα y	e_y [m]	0,000	0,201	$M_{Ed,x} / V_{Ed}$
Διάσταση περιμέτρου ελέγχου κατά x	b_x [m]	1,38	1,38	$b_{οπ,x} + 4d$
Διάσταση περιμέτρου ελέγχου κατά y	b_y [m]	1,38	1,38	$b_{οπ,y} + 4d$
Συντελεστής εκκεντρότητας	β [-]	1,000	1,764	Εξίσωση (2.11)
Δρώσα διατμητική τάση στην περίμετρο u_1	$v_{Ed,u1}$ [MPa]	0,778	0,850	Εξίσωση (2.1) για u_1
Περίμετρος υποστυλώματος	u_0 [mm]	2400	2400	-
Δρώσα διατμητική τάση στην περίμετρο u_0	$v_{Ed,u0}$ [MPa]	1,577	1,722	Εξίσωση (2.1) για u_0

Η μέγιστη αντοχή σε διάτρηση $v_{Rd,max}$ υπολογίστηκε, με βάση την Εξίσωση (2.15), ίση με 5,28 MPa, τιμή μεγαλύτερη της $v_{Ed,u0}=1,722$ MPa, επομένως ακολούθησε η σύγκριση της $v_{Ed,u1}$ με την αντοχή για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης $v_{Rd,c}$, η οποία προέκυψε ίση με 0,798 MPa (<0,85

MPa) όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.20. Εφόσον η δρώσα διατμητική τάση που χρησιμοποιήθηκε για τη διαστασιολόγηση δεν ξεπερνά τη μέγιστη τιμή αντοχής ($1,5 \cdot v_{Rd,c}$) κατά την οποία κρίνεται αποτελεσματική η προσθήκη οπλισμού διάτρησης ($0,85 < 1,5 \cdot 0,798 = 1,197$ MPa), ακολούθησε ο υπολογισμός του απαιτούμενου οπλισμού.

Πίνακας 5.20: Υπολογισμός αντοχής πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης

Υπολογισμός αντοχής $v_{Rd,c}$			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση x σε λωρίδα πλάτους ενός μέτρου	A_{sx} [cm ²]	23,09	Για Φ14/10 και πρόσθετο Φ14/20
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση y σε λωρίδα πλάτους ενός μέτρου	A_{sy} [cm ²]	25,01	Για Φ14/10 και πρόσθετο Φ14/16
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση x	ρ_{ix} [-]	0,0118	Ταυτίζονται με τις μέσες τιμές σε πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστρώματος συν 3d σε κάθε πλευρά
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση y	ρ_{iy} [-]	0,0128	
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού	ρ_i [-]	0,0123	-
Συντελεστής	$C_{Rd,c}$ [-]	0,12	-
Συντελεστής	k [-]	2	Εξίσωση (2.18)
Συντελεστής	k_1 [-]	0,1	-
Ορθές τάσεις στο σκυρόδεμα της κρίσιμης διατομής	σ_{cp} [MPa]	0	-
Ελάχιστη τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης (σε όρους τάσεων)	v_{min} [MPa]	0,542	Εξίσωση (2.20)
Τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης (σε όρους τάσεων)	$v_{Rd,c}$ [MPa]	0,798	Εξίσωση (2.17)

Η αντοχή της σύνδεσης πλάκας-υποστρώματος για πλάκα με οπλισμό διάτρησης $v_{Rd,cs}$ εξισώθηκε με την τιμή της δρώσας τάσεως και επιλύθηκε η Εξίσωση (2.21) ως προς την παράμετρο A_{sw} και προσδιορίστηκε έτσι το συνολικό απαιτούμενο εμβαδόν οπλισμού ανά περίμετρο όπλισης. Επιλέχθηκε η τοποθέτηση μονότμητων συνδετήρων, κάθετων ως προς το επίπεδο της πλάκας. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών και η απεικόνιση της διάταξης των συνδετήρων σύμφωνα με τις ανάλογες κατασκευαστικές διατάξεις παρουσιάζονται στους Πίνακες 5.21-5.22 και την Εικόνα 5.27 αντίστοιχα.

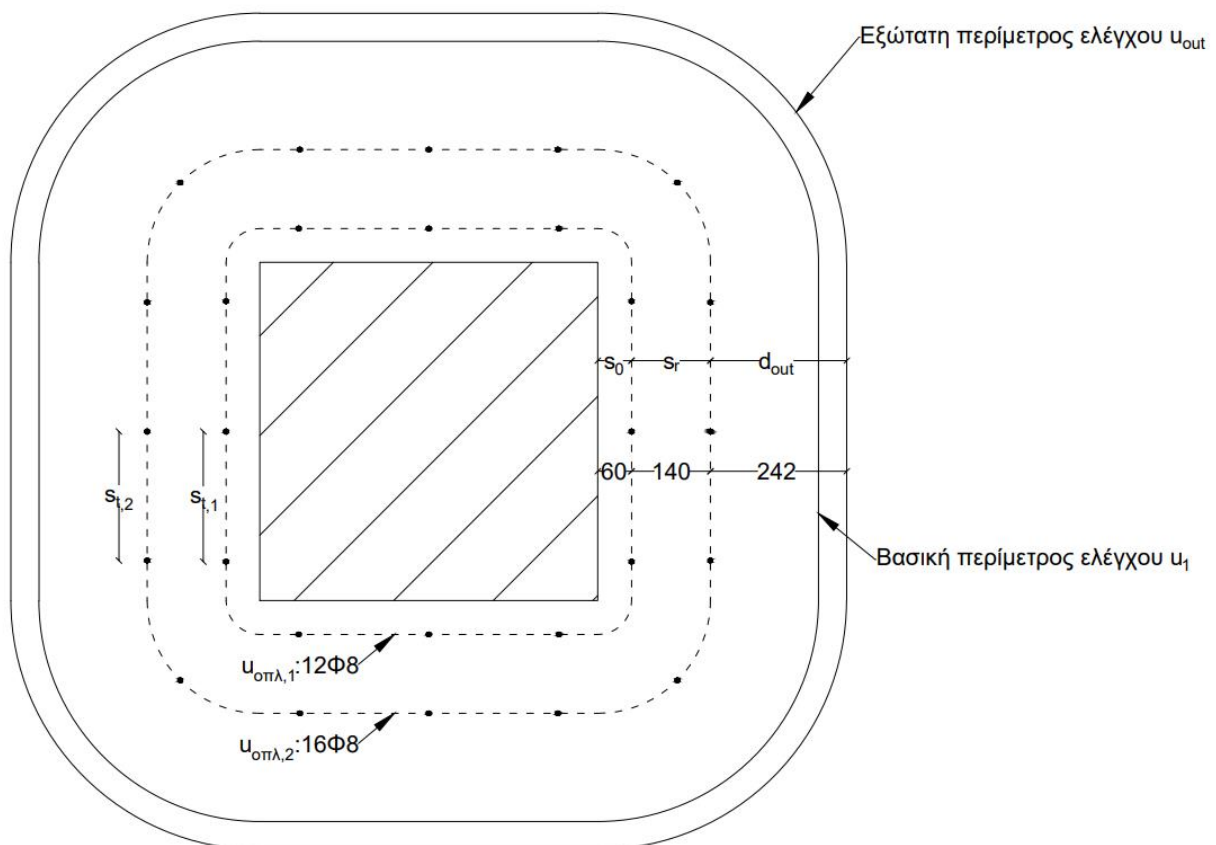
Πίνακας 5.21: Υπολογισμός απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης και αντοχής πλάκας με οπλισμό διάτρησης

Υπολογισμός αντοχής $V_{Rd,cs}$			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Ακτινική απόσταση των περιμέτρων	s_r [cm]	14	$\leq 0,75d = 14,7$ cm
Γωνία μεταξύ οπλισμού διάτρησης και επιπέδου πλάκας	α [rad]	1,57	90°
Συνολικό εμβαδόν απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης ανά περίμετρο	$A_{sw,req}$ [cm ²]	3,82	Εξίσωση (2.21)
Διάμετρος συνδετήρων	Φ [mm]	8	-
Εμβαδόν σκέλους συνδετήρα	$A_{sw,leg}$ [cm ²]	0,50	$\geq A_{sw,min}$ από Πίνακα 5.22
Τμήσεις συνδετήρων	v_1 [-]	1	-
Αριθμός συνδετήρων ανά περίμετρο	v_2 [-]	12	Για τη δυσμενέστερη περίπτωση της πρώτης περιμέτρου όπλισης
Συνολικό εμβαδόν τοποθετούμενου οπλισμού διάτρησης ανά περίμετρο	A_{sw} [cm ²]	6,03	$A_{sw} = A_{sw,leg} v_1 v_2$
Ενεργός τιμή σχεδιασμού της αντοχής του οπλισμού διάτρησης	$f_{ywd,ef}$ [MPa]	299	$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$
Τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα με οπλισμό διάτρησης	$V_{Rd,cs}$ [MPa]	0,996	Εξίσωση (2.21)

Πίνακας 5.22: Προσδιορισμός αποστάσεων οπλισμών διάτρησης και περιμέτρων όπλισης

Τοποθέτηση οπλισμών			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Περίμετρος όπου δεν απαιτείται πλέον οπλισμός διάτρησης	$u_{out,ef}$ [mm]	5179	Περίμετρος όπου $V_{Ed} = V_{Rd,c}$
Απόσταση $u_{out,ef}$ από φορτίζουσα επιφάνεια	$r_{out,ef}$ [mm]	442	$u_{out,ef} = u_0 + 2\pi r_{out,ef}$
Απόσταση πρώτης περιμέτρου από φορτίζουσα επιφάνεια	s_0 [mm]	60	$\geq 0,3d = 59$ mm και $\leq 0,5d = 98$ mm
Απόσταση εξώτατης περιμέτρου από $u_{out,ef}$	d_{out} [mm]	242	$\leq 1,5d = 294$ mm
Ακτινική απόσταση των περιμέτρων	s_r [mm]	140	$\leq 0,75d = 147$ mm
Αριθμός απαιτούμενων περιμέτρων όπλισης	$v_{περ}$ [-]	2	Ωστε $d_{out} \leq 1,5d$

Περίμετρος όπλισης 1	$u_{οπλ,1}$ [mm]	2777	$u_{οπλ,1} = u_0 + 2\pi \cdot s_0$
Αριθμός συνδετήρων περιμέτρου όπλισης 1	$v_{συνδ,1}$ [-]	12	Ωστε $s_{t,1} = u_{οπλ,1} / v_{συνδ,1}$ εντός επιτρεπτών ορίων
Μέση εφαπτομενική απόσταση οπλισμών περιμέτρου όπλισης 1	$s_{t,1}$ [mm]	231	Εντός $u_1: \leq 1,5d=294/$ εκτός $u_1: \leq 2d=392$ mm
Ελάχιστο εμβαδόν σκέλους συνδετήρα (για αποστάσεις περιμέτρου όπλισης 1)	$A_{sw,min}$ [cm ²]	0,19	Εξίσωση (2.22)
Περίμετρος όπλισης 2	$u_{οπλ,2}$ [mm]	3657	$u_{οπλ,2} = u_0 + 2\pi \cdot (s_0 + s_r)$
Αριθμός συνδετήρων περιμέτρου όπλισης 2	$v_{συνδ,2}$ [-]	16	Ωστε $s_{t,2} = u_{οπλ,2} / v_{συνδ,2}$ εντός επιτρεπτών ορίων
Μέση εφαπτομενική απόσταση οπλισμών περιμέτρου όπλισης 2	$s_{t,2}$ [mm]	229	Εντός $u_1: \leq 1,5d=294/$ εκτός $u_1: \leq 2d=392$ mm
Ελάχιστο εμβαδόν σκέλους συνδετήρα (για αποστάσεις περιμέτρου όπλισης 2)	$A_{sw,min}$ [cm ²]	0,19	Εξίσωση (2.22)



Εικόνα 5.27: Διάταξη τοποθέτησης οπλισμού διάτρησης για εσωτερικό υποστύλωμα (κατά EN 1992-1-1:2004)

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφηκε η διαδικασία που ακολουθείται κατά τη νέα έκδοση του ΕΚ2 για τη διαστασιολόγηση έναντι διάτρησης. Για λόγους πληρότητας παρατέθηκαν και κάποιες πρόσθετες διατάξεις της αντίστοιχης ανανεωμένης έκδοσης του ΕΚ8. Ωστόσο, οι ίδιες επιλέχθηκε να αγνοηθούν στα πλαίσια του συγκεκριμένου Κεφαλαίου, καθώς δεν βρίσκονται στην τελική τους μορφή και παράλληλα η ζητούμενη σύγκριση των κανονισμών αφορά τις εκδόσεις του ΕΚ2. Με βάση λοιπόν τα δεδομένα του Πίνακα 5.17 και τις τιμές του Πίνακα 5.18, εξαιρουμένης της περιμέτρου ελέγχου το μήκος της οποίας υπολογίστηκε ίσο με 3016 mm (αφού απέχει $0,5d$ και όχι $2d$ από τη φορτιζόμενη επιφάνεια), επαναπροσδιορίστηκαν τα ζητούμενα μεγέθη, όπως παρουσιάζεται παρακάτω.

Πίνακας 5.23: Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης

Υπολογισμός δρώσας διατμητικής τάσης τ_{Ed}				
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή		Σχόλιο
		1,35G+1,5Q	G+0,6Q±E _x ±0,3E _y	
Δρώσα τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού	V_{Ed} [kN]	741,7	459,2	-
Δρώσα ροπή σχεδιασμού περί τον άξονα y	$M_{Ed,y}$ [kNm]	0	253,6	-
Δρώσα ροπή σχεδιασμού περί τον άξονα x	$M_{Ed,x}$ [kNm]	0	92,3	-
Εκκεντρότητα φόρτισης κατά τον άξονα x	e_x [m]	0	0,552	$M_{Ed,y} / V_{Ed}$
Εκκεντρότητα φόρτισης κατά τον άξονα y	e_y [m]	0	0,201	$M_{Ed,x} / V_{Ed}$
Εκκεντρότητα φόρτισης	e_b [m]	0	0,588	Από πίνακα Εικόνας 3.6
Διάσταση περιμέτρου ελέγχου κατά x	b_x [m]	0,796	0,796	$b_{\text{ov},x} + d$
Διάσταση περιμέτρου ελέγχου κατά y	b_y [m]	0,796	0,796	$b_{\text{ov},y} + d$
Γεωμετρικός μέσος πλατών περιμέτρου ελέγχου	b_b [m]	0,796	0,796	$b_b = (b_x \cdot b_y)^{0,5}$
Συντελεστής εκκεντρότητας	β_e [-]	1,0	1,812	Από πίνακα Εικόνας 3.6
Περίμετρος ελέγχου	$b_{0,5}$ [mm]	3016	3016	-
Στατικό ύψος	d_v [mm]	196	196	-
Δρώσα διατμητική τάση στην περίμετρο ελέγχου	τ_{Ed} [MPa]	1,255	1,408	Εξίσωση (3.3)

Ελέγχθηκαν με τη σειρά οι ανισότητες της παραγράφου §3.2.1 και διαπιστώθηκε ότι απαιτείται λεπτομερής προσδιορισμός των αντοχών έναντι διάτρησης, αφού η μέγιστη δρώσα διατμητική τάση τ_{Ed} (Πίνακας 5.23) στην περίμετρο ελέγχου προέκυψε μεγαλύτερη από την ελάχιστη διατμητική αντοχή $\tau_{Rd,c,min}$ ($=0,834$ MPa σύμφωνα με την Εξίσωση (3.1)). Η αντοχή σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης $\tau_{Rd,c}$ υπολογίστηκε ίση με $1,304$ MPa (Πίνακας 5.24), τιμή μικρότερη από την $\tau_{Ed} = 1,408$ MPa. Δεδομένου ότι ικανοποιούταν η σχέση $\tau_{Ed} \leq \tau_{Rd,max}$ ($= 2,631$ MPa, Πίνακας 5.24), αποδείχθηκε αποτελεσματική και απαραίτητη η προσθήκη διατμητικού οπλισμού, κατά τις αντίστοιχες κανονιστικές διατάξεις (Πίνακες 5.25-5.26), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.28.

Πίνακας 5.24: Υπολογισμός αντοχής πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης και μέγιστης διατμητικής αντοχής

Υπολογισμός αντοχής $\tau_{Rd,c}$ και $\tau_{Rd,max}$			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση x σε λωρίδα ενός μέτρου	A_{sx} [cm ²]	23,09	-
Εμβαδόν εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού στη διεύθυνση y σε λωρίδα ενός μέτρου	A_{sy} [cm ²]	25,01	-
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση x	ρ_{ix} [-]	0,0118	Ταυτίζονται με τις μέσες τιμές σε πλάτος πλάκας ίσο προς το πλάτος του υποστρώματος συν 3d σε κάθε πλευρά
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού κατά τη διεύθυνση y	ρ_{iy} [-]	0,0128	
Γεωμετρικό ποσοστό εφελκόμενου διαμήκους οπλισμού	ρ_i [-]	0,0123	-
Συντελεστής ασφαλείας διάτμησης	γ_v [-]	1,40	Από πίνακα Εικόνας 3.1
Αυξητικός συντελεστής	k_{pb} [-]	2	Εξίσωση (3.6)
Ελάχιστη διάμετρος κόσκινου σύμφωνα με EN206	D_{lower} [mm]	16	-
Παράμετρος μεγέθους που αφορά την τραχύτητα της ζώνης αστοχίας	d_{dg} [mm]	32	-
Μέγιστη τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτμησης	τ_{max} [MPa]	2,347	Άνω όριο Εξίσωσης (3.5)
Μήκος ανοίγματος κατά x	L_x [mm]	6000	-
Μήκος ανοίγματος κατά y	L_y [mm]	6000	-
Μέγιστη απόσταση μεταξύ κεντροειδούς περιμέτρου ελέγχου και σημείου μηδενισμού ροπών κατά x	$\alpha_{p,x}$ [mm]	1320	Προσεγγιστική τιμή
Μέγιστη απόσταση μεταξύ κεντροειδούς περιμέτρου ελέγχου και σημείου μηδενισμού ροπών κατά y	$\alpha_{p,y}$ [mm]	1320	Προσεγγιστική τιμή

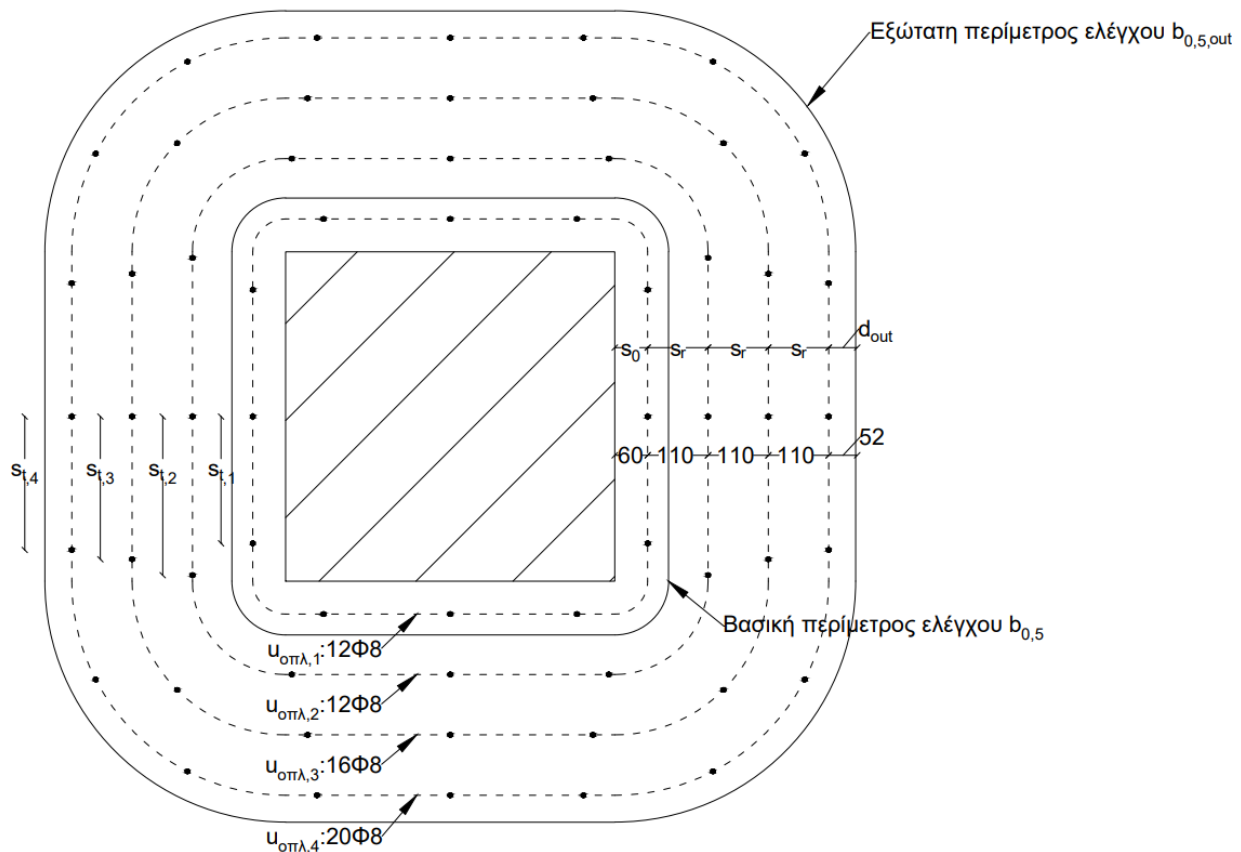
Απόσταση κέντρου επιφάνειας στήριξης με σημείο μηδενισμού των ροπών	α_p [mm]	1320	$\alpha_p = (\alpha_{p,x} \cdot \alpha_{p,y})^{0,5}$
Τιμή στατικού ύψους που χρησιμοποιείται τελικά	α_{pb} ή d_v [mm]	180	Τελικά χρησιμοποιείται η τιμή α_{pd} , αφού $\alpha_p < 8d$ (Εξίσωση (3.7))
Τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης	$\tau_{Rd,c}$ [MPa]	1,304	Εξίσωση (3.5)
Απόσταση φορτιζόμενης επιφάνειας με πρώτη περίμετρο όπλισης	s_0 [mm]	60	$\geq 0,3d=59$ mm και $\leq 0,5d=98$ mm
Απόσταση που προσδιορίζεται σε λεπτομέρεια όπλισης	d_{sys} [mm]	189	Εικόνα 3.9(c)
Συντελεστής	n_{sys} [mm]	2,02	Εξίσωση (3.17)
Μέγιστη διατρητική αντοχή	$\tau_{Rd,max}$ [MPa]	2,631	Εξίσωση (3.16)

Πίνακας 5.25: Υπολογισμός απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης και αντοχής πλάκας με οπλισμό διάτρησης

Υπολογισμός αντοχής $\tau_{Rd,cs}$			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Γεωμετρικό ποσοστό απαιτούμενου διατμητικού οπλισμού	$\rho_{w,req}$ [-]	0,00057	Επίλυση Εξίσωσης (3.12) ως προς ρ_w
Ακτινική απόσταση των περιμέτρων	s_r [mm]	110	$\leq 0,75d = 147$ mm
Εφαπτομενική απόσταση οπλισμών	s_t [mm]	289	Για τη δυσμενέστερη περίμετρο του Πίνακα 5.26
Γωνία μεταξύ οπλισμού διάτρησης και επιπέδου πλάκας	α_w [rad]	1,57	90°
Διάμετρος συνδετήρων	ϕ_v [mm]	8	$\leq \phi_{w,max}$ από Πίνακα 5.26
Τμήσεις συνδετήρων	v_l [-]	1	-
Εμβαδόν ενός σκέλους οπλισμού διάτρησης	A_{sw} [mm ²]	50,3	-
Γεωμετρικό ποσοστό τοποθετούμενου διατμητικού οπλισμού	ρ_w [-]	0,0016	Εξίσωση (3.15)
Τιμή σχεδιασμού της αντοχής του οπλισμού διάτρησης	f_{ywd} [MPa]	434,8	$f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$
Συντελεστής συμβολής αντοχής σκυροδέματος	n_c [-]	0,93	Εξίσωση (3.13)
Συντελεστής συμβολής αντοχής διατμητικού οπλισμού	n_s [-]	0,80	Εξίσωση (3.14)
Τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα με οπλισμό διάτρησης	$\tau_{Rd,cs}$ [MPa]	1,758	Εξίσωση (3.12)

Πίνακας 5.26: Προσδιορισμός αποστάσεων οπλισμών διάτρησης και περιμέτρων όπλισης

Τοποθέτηση οπλισμών			
Επεξήγηση	Συμβολισμός	Τιμή	Σχόλιο
Περίμετρος όπου δεν απαιτείται πλέον οπλισμός διάτρησης	$b_{0,5,out}$ [mm]	5155	Εξίσωση (3.18)
Απόσταση $b_{0,5,out}$ από φορτίζουσα επιφάνεια	r_{out} [mm]	439	$b_{0,5,out} = u_0 + 2\pi r_{out}$
Απόσταση πρώτης περιμέτρου από φορτίζουσα επιφάνεια	s_0 [mm]	60	$\geq 0,3d=59$ mm και $\leq 0,5d=98$ mm
Εξώτατο στατικό ύψος	$d_{v,out}$ [mm]	148	Εικόνα 3.10
Απόσταση εξώτατης περιμέτρου από $b_{0,5,out}$	d_{out} [mm]	49	$\leq 0,5d_{v,out} = 74$ mm
Ακτινική απόσταση των περιμέτρων	s_r [mm]	110	$\leq 0,75d=147$ mm
Αριθμός απαιτούμενων περιμέτρων όπλισης	$v_{περ}$ [-]	4	Ωστε $d_{out} \leq 0,5d_{v,out}$
Μέγιστη διάμετρος συνδετήρα	$\varphi_{w,max}$ [mm]	9,9	$\varphi_{w,max} = 10(d/200)^{0,5}$ για μονότμητους συνδετήρες
Περίμετρος όπλισης 1	$b_{οπλ,1}$ [mm]	2777	$b_{οπλ,i} = b_0 + 2\pi(s_0 + (i-1) s_r)$
Εφαπτομενική απόσταση οπλισμών περιμέτρου όπλισης 1	$s_{t,1}$ [mm]	231	Εντός $2d: \leq 1,5d=294/$ εκτός $2d: \leq 3d=588$ mm
Περίμετρος όπλισης 2	$b_{οπλ,2}$ [mm]	3468	$b_{οπλ,i} = b_0 + 2\pi(s_0 + (i-1) s_r)$
Εφαπτομενική απόσταση οπλισμών περιμέτρου όπλισης 2	$s_{t,2}$ [mm]	289	Εντός $2d: \leq 1,5d=294/$ εκτός $2d: \leq 3d=588$ mm
Περίμετρος όπλισης 3	$b_{οπλ,3}$ [mm]	4159	$b_{οπλ,i} = b_0 + 2\pi(s_0 + (i-1) s_r)$
Εφαπτομενική απόσταση οπλισμών περιμέτρου όπλισης 3	$s_{t,3}$ [mm]	260	Εντός $2d: \leq 1,5d=294/$ εκτός $2d: \leq 3d=588$ mm
Περίμετρος όπλισης 4	$b_{οπλ,4}$ [mm]	4850	$b_{οπλ,i} = b_0 + 2\pi(s_0 + (i-1) s_r)$
Εφαπτομενική απόσταση οπλισμών περιμέτρου όπλισης 4	$s_{t,4}$ [mm]	243	Εντός $2d: \leq 1,5d=294/$ εκτός $2d: \leq 3d=588$ mm



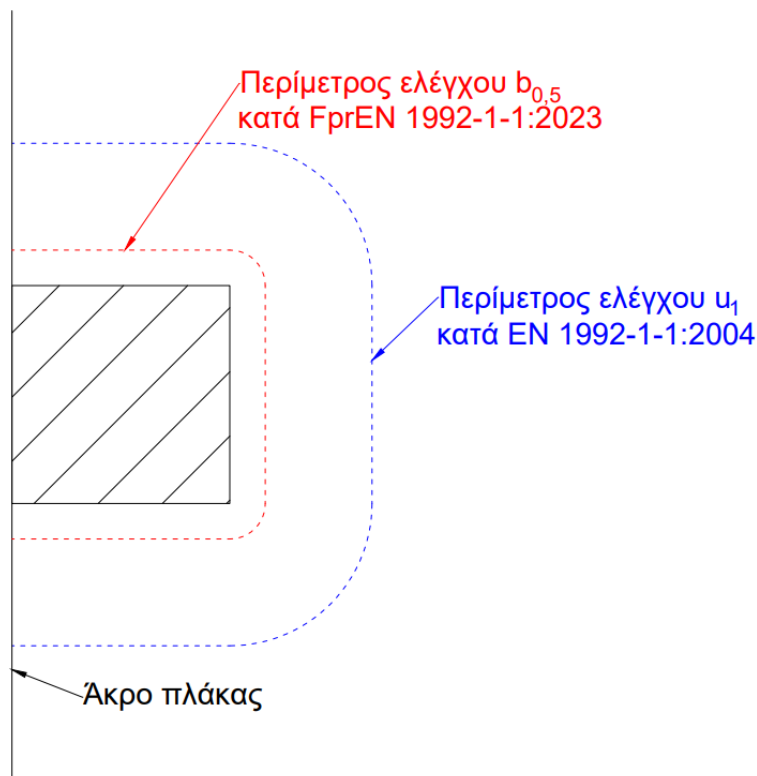
Εικόνα 5.28: Διάταξη τοποθέτησης οπλισμού διάτρησης για εσωτερικό υποστυλώμα (κατά FprEN 1992-1-1:2023)

5.7.2 Περιμετρικά υποστυλώματα

Όσον αφορά τα περιμετρικά υποστυλώματα ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_8, K_9, K_{13}, K_{14}, K_{18}, K_{19}, K_{20}, K_{21}$), η διαφοροποίηση ως προς τους υπολογισμούς αφορά τον προσδιορισμό της βασικής περιμέτρου ελέγχου και της δρώσας διατμητικής τάσεως. Στην Εικόνα 5.29 παρουσιάζεται σχηματικά η περίμετρος ελέγχου ενός εκ των περιμετρικών υποστυλωμάτων του κτιρίου (αφορά όλα τα περιμετρικά υποστυλώματα με κατάλληλη περιστροφή των αξόνων), όπως η ίδια ορίζεται από τις δύο εξεταζόμενες εκδόσεις του ΕΚ2 (Εικόνες 2.4 και 3.3 για ισχύουσα και νέα έκδοση αντίστοιχα).

Υπολογίστηκε, λοιπόν, η δυσμενέστερη δρώσα διατμητική τάση, η οποία προέκυψε (και κατά τις δύο εκδόσεις) για τα εντατικά μεγέθη σεισμικού συνδυασμού, κατά τον οποίο αναπτύσσεται εκκεντρότητα φόρτισης, κάθετης με το άκρο της πλάκας, προς το εξωτερικό της ίδιας. Η διευκρίνηση ως προς τη φορά της εκκεντρότητας γίνεται διότι με βάση αυτή καθορίζεται η διαδικασία υπολογισμού. Συγκεκριμένα, κατά EN 1992-1-1:2004, στην περίπτωση που το υποστυλώμα δέχεται διαξονική κάμψη και η κάθετη στο άκρο της πλάκας εκκεντρότητα αναπτύσσεται προς το εσωτερικό της, χρησιμοποιείται η Εξίσωση (2.12) για τον προσδιορισμό

του συντελεστή β και ορίζεται η απομειωμένη περίμετρος u_1 κατά την Εικόνα 2.9. Για την περίπτωση αντίθετης φοράς της συγκεκριμένης εκκεντρότητας, γίνεται χρήση της Εξίσωσης (2.7), όπου η παράμετρος W_1 υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψιν τις αποστάσεις από το κέντρο της περιμέτρου το οποίο δεν συμπίπτει με το κέντρο του υποστυλώματος (όπως συμβαίνει στα εσωτερικά υποστυλώματα). Ο συντελεστής k (ανεξαρτήτου φοράς) λαμβάνεται από τον Πίνακα 2.1 με αντικατάσταση του λόγου c_1/c_2 με $c_1/2c_2$, ενώ η περίμετρος u_0 κατά τις υποδείξεις της παραγράφου §2.2.4. Στον FprEN 1992-1-1:2023 οι διαφοροποιήσεις αφορούν τόσο τη δρώσα τάση όσο και την αντοχή έναντι διάτρησης για πλάκα χωρίς διατμητικό οπλισμό. Για τον υπολογισμό του συντελεστή β_e χρησιμοποιείται ο αντίστοιχος τύπος από τον πίνακα της Εικόνας 3.6, ο οποίος συμπεριλαμβάνει την επιρροή της φοράς της εκκεντρότητας. Όσον αφορά την αντοχή $\tau_{Rd,c}$, η ίδια επανυπολογίζεται (σε αντίθεση με τον EN 1992-1-1:2004) καθώς ο συντελεστής k_{pb} εξαρτάται από τις περιμέτρους ελέγχου b_0 και $b_{0,5}$.

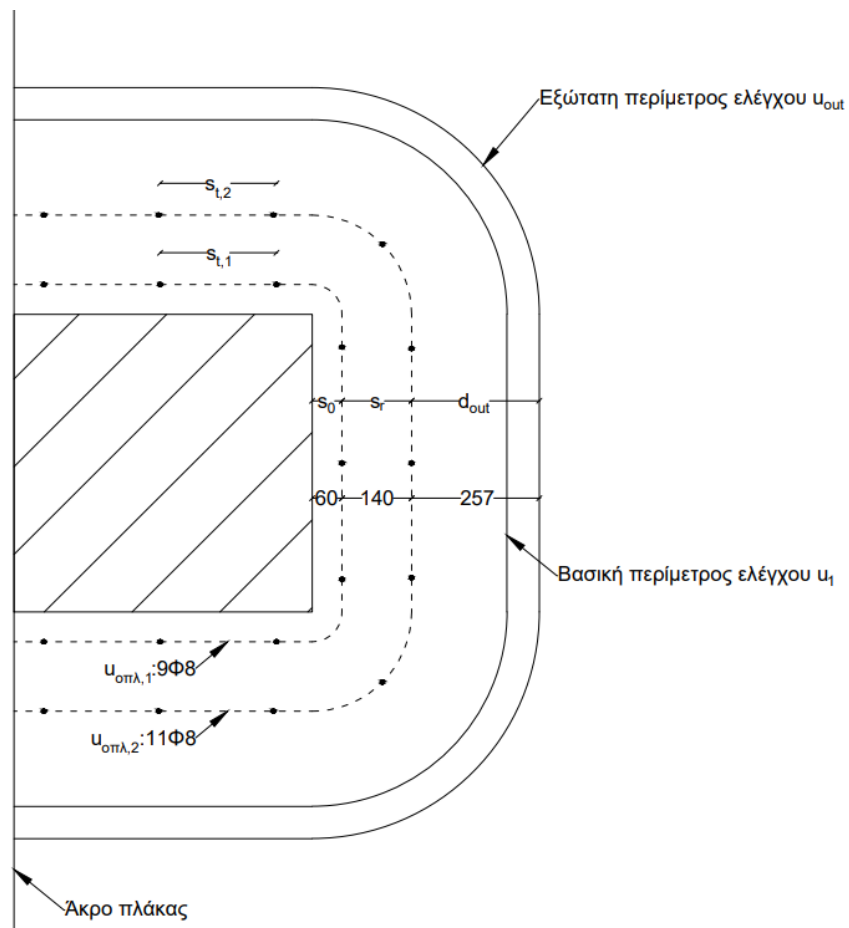


Εικόνα 5.29: Περίμετροι ελέγχου για τα περιμετρικά υποστυλώματα

Να σημειωθεί πως, σύμφωνα με την ισχύουσα έκδοση, η ροπή που μεταφέρεται στα ακραία υποστυλώματα (εφόσον δεν υπάρχουν περιμετρικές δοκοί επαρκώς σχεδιασμένες σε στρέψη) πρέπει να περιορίζεται από τη ροπή αντοχής ορθογωνικής διατομής ίση με $0,17 b_e d^2 f_{ck}$, και οι τιμές των θετικών ροπών των ακραίων ανοιγμάτων να προσαρμόζονται ανάλογα. Το συνεργαζόμενο πλάτος b_e ορίζεται ως το άθροισμα της παράλληλης με το άκρο της πλάκας πλευράς του υποστυλώματος και του κάθετου στην ίδια τμήματός του που βρίσκεται εντός της

πλάκας. Για το εξεταζόμενο κτίριο προέκυψε ίσο με 1,2 m, ενώ η μέγιστη ροπή υπολογίστηκε ίση με 235,1 kNm, τιμή που δεν ξεπερνάται για κανένα συνδυασμό φόρτισης στα περιμετρικά υποστυλώματα, επομένως ικανοποιείται ο περιορισμός και δεν απαιτείται προσαρμογή των θετικών ροπών.

Με βάση τα παραπάνω λοιπόν, και τη διαδικασία υπολογισμών που αναλύθηκε στην παράγραφο §5.7.1, προέκυψε απαίτηση εμβαδού διατηρητικού οπλισμού $A_{sw,req}=2,4 \text{ cm}^2$ ανά περίμετρο όπλισης και γεωμετρικού ποσοστού $\rho_{w,req}=2 \cdot 10^{-3}$, σύμφωνα με την ισχύουσα και τη νέα έκδοση αντίστοιχα. Η τοποθέτηση των συνδετήρων με γνώμονα την ικανοποίηση των κατασκευαστικών διατάξεων παρουσιάζεται στις Εικόνες 5.30-5.31. Παρατηρείται ότι στην περίπτωση του FprEN 1992-1-1:2023 προέκυψε μεγάλη τιμή της απόστασης της εξώτατης περιμέτρου ελέγχου, $b_{0,5,out}$, με τη φορτιζόμενη επιφάνεια, με αποτέλεσμα να απαιτηθούν περισσότερες περιμέτροι όπλισης και να κριθεί αποτελεσματικότερη η προσθήκη κλειστών δίτητων συνδετήρων αντί για μονότητους. Η επιλογή αυτή αύξησε και την τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης διαμέτρου των συνδετήρων (προέκυψε $\phi_{w,max}=10,9 \text{ mm}$), σύμφωνα με τις αντίστοιχες σχέσεις της παραγράφου §3.3.2, ωστόσο προτιμήθηκαν συνδετήρες διαμέτρου $\Phi 8$, καθώς δεν υπήρξε απαίτηση για κάτι διαφορετικό με βάση την αντοχή που έπρεπε να επιτευχθεί.



Εικόνα 5.30: Διάταξη τοποθέτησης οπλισμού διάτρησης για περιμετρικό υποστύλωμα (κατά EN 1992-1-1:2004)

P., 2014). Με την ακόλουθη διαδικασία λοιπόν ελέγχεται η συμβατότητα των πλευρικών παραμορφώσεων των υποστυλωμάτων με τις ανάλογες ανελαστικές μετακινήσεις των ορόφων του φορέα.

Προκειμένου να διενεργηθεί ο συγκεκριμένος έλεγχος λήφθηκε το αρχικό προσομοίωμα του κτιρίου και στη θέση των τοιχωμάτων τοποθετήθηκαν υποστυλώματα διατομής διαστάσεων 0,6x0,6 m (όπως όλα τα υποστυλώματα του φορέα), ώστε το δομικό σύστημα να μετατραπεί σε πλαισιωτό. Αφού διαγράφηκαν όλες οι σεισμικές φορτίσεις, οι συνδυασμοί και τα διαφράγματα των ορόφων, προέκυψε το προσομοίωμα στο SAP2000 που χρησιμοποιήθηκε για τον ζητούμενο έλεγχο. Οι μέγιστες πλευρικές μετακινήσεις κάθε ορόφου κατά x, που προέκυψαν από την ελαστική ανάλυση του αρχικού προσομοιώματος για τους σεισμικούς συνδυασμούς που περιλαμβάνουν το 100% της σεισμικής δράσης κατά x, πολλαπλασιάστηκαν με το συντελεστή συμπεριφοράς $q=3,5$ ώστε να προσδιοριστούν οι αντίστοιχες ανελαστικές μετατοπίσεις. Οι τιμές αυτές εφαρμόστηκαν σε όλους τους κόμβους του εκάστοτε ορόφου, όπως συνοψίζονται στον Πίνακα 5.27, ως επιβαλλόμενες μετατοπίσεις κατά τη διεύθυνση x (Displ_x), ορίζοντας έτσι μία τριγωνική κατανομή φόρτισης με μετατοπίσεις αντί για δυνάμεις. Κατά τη διεύθυνση y εφαρμόστηκαν οι ίδιες τιμές λόγω απόλυτης συμμετρίας του φορέα (Displ_y), ωστόσο στους συνδυασμούς φορτίσεων που ορίστηκαν λήφθηκε το 100% του φορτίου κατά τη μία διεύθυνση και το 30% κατά την άλλη. Ουσιαστικά ορίστηκαν οι σεισμικοί συνδυασμοί αλλά οι σεισμικές δράσεις E_x , E_y αντικαταστάθηκαν από τις φορτίσεις $Displ_x$, $Displ_y$ ($G + 0,6Q \pm Displ_x \pm 0,3Displ_y$). Για να λειτουργήσουν οι επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στο προσομοίωμα και να αναπτυχθούν τα ανάλογα εντατικά μεγέθη, περιορίστηκαν οι αντίστοιχοι βαθμοί ελευθερίας (μετατόπιση κατά x και y) όλων των κόμβων των ορόφων.

Πίνακας 5.27: Τιμές επιβαλλόμενων μετατοπίσεων ανά όροφο

Κατανομή φόρτισης επιβαλλόμενων μετατοπίσεων			
Όροφος	h [m]	d_{rx}/d_{ry} [m]	$q \cdot d_{rx}/q \cdot d_{ry}$ [m]
5ος	16	0,036	0,127
4ος	12,8	0,029	0,102
3ος	9,6	0,021	0,072
2ος	6,4	0,012	0,041
1ος	3,2	0,004	0,013

Πραγματοποιήθηκε λοιπόν ελαστική ανάλυση του περιγραφόμενου φορέα και λήφθηκαν τα δυσμενέστερα εντατικά μεγέθη (ΔN και ΔM) για την επαναδιαστασιολόγηση έναντι διάτρησης των συνδέσεων πλάκας-υποστυλωμάτων. Για τις δεδομένες διαστάσεις των στοιχείων του κτιρίου και τα εξαγόμενα από το πρόγραμμα εντατικά μεγέθη υπολογίστηκαν οι δρώσες διατμητικές τάσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.28. Παρατηρήθηκε πως και κατά τις δύο εξεταζόμενες εκδόσεις του ΕΚ2, οι τιμές αυτές προέκυψαν μεγαλύτερες από τις μέγιστες επιτρεπτές τιμές $V_{Rd,cs,max}$ και $\tau_{Rd,max}$ (ίσες με $1,5 \cdot V_{Rd,c}$ για EN και $n_{sys} \cdot \tau_{Rd,c}$ για FprEN αντίστοιχα), όπου θεωρείται αποτελεσματική η προσθήκη διατρητικού οπλισμού, τόσο για τα εσωτερικά όσο και για τα

περιμετρικά υποστυλώματα. Διατηρώντας όλα τα δεδομένα του κτιρίου ίδια και αλλάζοντας μόνο τις διαστάσεις των υποστυλωμάτων, έγιναν δοκιμές ώστε να προσδιοριστεί η επιτρεπτή γεωμετρία προκειμένου να τηρείται ο παραπάνω περιορισμός. Στον Πίνακα 5.28 συνοψίζονται λοιπόν τα αποτελέσματα που προέκυψαν, καθώς και οι απαιτούμενοι διατρητικοί οπλισμοί, ανά Ευρωκώδικα και ανά θέση υποστυλώματος (εσωτερικό ή περιμετρικό).

Πίνακας 5.28: Απαιτούμενες διαστάσεις υποστυλωμάτων και οπλισμοί διάτρησης

Επεξήγηση	Συμβολισμός	Εσωτερικά υποστυλώματα		Περιμετρικά υποστυλώματα	
		EN 1992-1-1:2004	FprEN 1992-1-1:2023	EN 1992-1-1:2004	FprEN 1992-1-1:2023
Δρώσα διατμητική τάση στην περίμετρο ελέγχου	v_{Ed}/τ_{Ed} [MPa]	1,646	2,772	1,523	2,563
Μέγιστη διατρητική αντοχή όπου θεωρείται αποτελεσματική η προσθήκη οπλισμού	$v_{Rd,cs,max}/\tau_{Rd,max}$ [MPa]	1,197	2,631	1,197	2,135
Διάσταση πλευράς τετραγωνικών υποστυλωμάτων	$b_{οπ,x}=b_{οπ,y}$ [cm]	90	65	75	70
Εμβαδόν απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης	$A_{sw,req}$ [cm ²]	10,51	-	6,46	-
Γεωμετρικό ποσοστό απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης	$\rho_{sw,req}$ [-]	-	0,0053	-	0,0044

5.9 Συμπεράσματα

Δεδομένου ότι ο υπολογισμός της αντοχής έναντι διάτρησης για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης αφορά διαφορετικές περιμέτρους ελέγχου στον κάθε κανονισμό, αλλά και για λόγους σύγκρισης των αποτελεσμάτων, προσδιορίστηκε η ανάλογη τέμνουσα δύναμη αντοχής για κάθε περίπτωση. Συγκεκριμένα, πολλαπλασιάστηκαν οι αντίστοιχες τάσεις με τα εμβαδά των επιφανειών ελέγχου ($A_i = u_i \cdot d$). Με τον ίδιο τρόπο υπολογίστηκε και η ισοδύναμη δρώσα τέμνουσα δύναμη V_{Ed} , για κάθε περίπτωση. Τα αποτελέσματα καθώς και οι σημαντικότερες παράμετροι που διαφοροποιούνται ανά κανονισμό συνοψίζονται στον Πίνακα 5.29. Να σημειωθεί πως ενώ κατά EN υπολογίζεται το απαιτούμενο εμβαδόν οπλισμού ανά περίμετρο, κατά FprEN μέσω της αντίστοιχης εξίσωσης προκύπτει το ανάλογο γεωμετρικό ποσοστό του οπλισμού. Ωστόσο, τα δύο μεγέθη δεν μπορούν να μετατραπούν το ένα στο άλλο, καθώς για αυτό απαιτούνται οι αποστάσεις σύμφωνα με τις οποίες τοποθετήθηκαν οι συνδετήρες, έτσι όμως χάνεται η έννοια του “απαιτούμενου οπλισμού” και οι τιμές που προκύπτουν δεν είναι συγκρίσιμες. Γι’ αυτό το λόγο

στον Πίνακα 5.29 παρουσιάζεται το ανάλογο μέγεθος ανά κανονισμό και η σύγκριση περιορίζεται μεταξύ εσωτερικών και περιμετρικών υποστυλωμάτων.

Πίνακας 5.29: Σύνοψη αποτελεσμάτων κατά τους ΕΚ2

Επεξήγηση	Συμβολισμός	Εσωτερικά υποστυλώματα		Περιμετρικά υποστυλώματα	
		EN 1992-1-1:2004	FprEN 1992-1-1:2023	EN 1992-1-1:2004	FprEN 1992-1-1:2023
Στατικό ύψος	d [mm]	196	196	196	196
Βασική περίμετρος ελέγχου	$u_1/b_{0,5}$ [mm]	4863	3016	3032	2108
Συντελεστής εκκεντρότητας	β/β_e [-]	1,764	1,812	2,129	2,422
Ισοδύναμη δρώσα τέμνουσα δύναμη	V_{Ed} [kN]	810,2	832,2	506,2	575,6
Τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε διάτρηση για πλάκα χωρίς οπλισμό διάτρησης	$V_{Rd,c}$ [kN]	760,8	770,9	474,3	455,7
Εξώτατη περίμετρος ελέγχου	$u_{out}/b_{0,5,out}$ [mm]	5179	5155	3235	4561
Εμβαδόν απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης	$A_{sw,req}$ [cm ²]	3,82	-	2,40	-
Γεωμετρικό ποσοστό απαιτούμενου οπλισμού διάτρησης	$\rho_{sw,req}$ [-]	-	0,0006	-	0,0015

6 Συμπεράσματα

Οι αλλαγές που πραγματοποιήθηκαν για επιστημονικούς λόγους στη δεύτερη γενιά Ευρωκωδίκων, για το φαινόμενο της διάτρησης, αποσκοπούν, εκτός άλλων, στη διευκόλυνση της χρήσης των εξισώσεων. Συγκρίνοντας λοιπόν τη διαδικασία υπολογισμών και τις προτεινόμενες εξισώσεις, παρατηρείται, με μία πρώτη ματιά, πως η νέα έκδοση είναι πιο περιεκτική και ευανάγνωστη όσον αφορά τις υποπεριπτώσεις κάποιων κανόνων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διαδικασία προσδιορισμού του συντελεστή εκκεντρότητας β . Ο FprEN 1992-1-1:2023 επίσης, παρέχει πρόσθετες κανονιστικές διατάξεις για τον υπολογισμό των αντοχών βάσει του Επιπέδου Προσέγγισης της ανάλυσης, κάτι που δεν συναντάται στην ισχύουσα έκδοση. Ωστόσο, σημαντικότερη διαφορά θεωρείται ίσως η επιλογή της βασικής περιμέτρου ελέγχου, η οποία στην περίπτωση του EN απέχει $2d$ από την φορτιζόμενη επιφάνεια ενώ στην περίπτωση του FprEN απόσταση $0,5d$, υιοθετώντας την αντίστοιχη διάταξη του Model Code (θεώρηση που ισχύει και στον Αμερικανικό Κανονισμό).

Οι προαναφερθείσες παρατηρήσεις προκύπτουν από απλή ανάγνωση των κανονισμών, ωστόσο πιο ουσιαστικά συμπεράσματα ανακύπτουν μέσω της εφαρμογής τους σε προβλήματα όπως η προσομοίωση ενός πειράματος (Κεφάλαιο 4) και η διαστασιολόγηση έναντι διάτρησης ενός κτιρίου (Κεφάλαιο 5).

Αναλυτική επαλήθευση πειράματος διάτρησης

1. Η χρήση του “Total strain based crack model” στο λογισμικό DIANA FEA, για την προσομοίωση του υλικού του σκυροδέματος, και συγκεκριμένα των μοντέλων “JSCE softening” και “Maekawa Cracked Concrete curves” για την εφελκυστική και θλιπτική συμπεριφορά του υλικού αντίστοιχα, αποδείχθηκε κατάλληλη στο εξεταζόμενο πρόβλημα. Μέσω της μη γραμμικής ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων προσομοιώθηκε η πειραματική διαδικασία και η μορφή αστοχίας του δοκιμίου, ενώ οι τιμές του επιβαλλόμενου φορτίου και της κατακόρυφης μετατόπισης του υποστυλώματος, κατά την αστοχία, προσέγγισαν τα πραγματικά ευρήματα με μία απόκλιση της τάξεως του 5%. Όσον αφορά τον οπλισμό κάμψης της πλάκας, κρίθηκε καταλληλότερη η χρήση επιφανειακών στοιχείων έναντι γραμμικών ως μεμονωμένες ράβδους. Επίσης, διαπιστώθηκε η σημαντική επιρροή των συνοριακών συνθηκών, και κυρίως της αλληλεπίδρασης των υλικών της πλάκας σκυροδέματος και των μεταλλικών πλακών έδρασης, στη διαμόρφωση της καμπύλης Φορτίου-Κατακόρυφης Μετατόπισης της εξεταζόμενης σύνδεσης. Η μείωση του μήκους των μεταλλικών πλακών θεωρήθηκε αποτελεσματική λύση για την αντιμετώπιση της δυσλειτουργίας που παρατηρήθηκε, ως προς την προσομοίωση της ζητούμενης αλληλεπίδρασης των συγκεκριμένων στοιχείων.

2. Παρατηρώντας την ανάπτυξη της ρηγμάτωσης στο DIANA FEA κατά το τελευταίο βήμα της ανάλυσης, όπου επήλθε η αστοχία έναντι διάτρησης, επαληθεύεται η θεώρηση του EN 1992-1-1:2004 σχετικά με τη γωνία θ . Η ρηγμάτωση αναπτύσσεται σχηματίζοντας γωνία θ περίπου ίση με $26,6^\circ$ ($\tan\theta=1/2$) όπως προβλέπει ο κανονισμός.

3. Κατά την εφαρμογή των εξισώσεων της ισχύουσας έκδοσης του Ευρωκώδικα 2, για τον προσδιορισμό της αντοχής έναντι διάτρησης μιας σύνδεσης πλάκας-εσωτερικού υποστυλώματος όπου δεν υπάρχει διατμητικός οπλισμός, οι κανονιστικές διατάξεις αποδείχθηκαν συντηρητικές. Συγκεκριμένα, το φορτίο αστοχίας υπολογίστηκε ίσο με 190 kN, σημειώνοντας απόκλιση 25% με την πραγματική τιμή του πειράματος (253 kN). Η σύγκριση αυτή αφορά την χαρακτηριστική τιμή της αντοχής, χωρίς απομειώσεις λόγω της χρήσης των συντελεστών ασφαλείας των υλικών.

4. Σύμφωνα με τον FprEN 1992-1-1:2023, κατά τον υπολογισμό της αντοχής χωρίς οπλισμό διάτρησης, λαμβάνεται υπόψιν η συνεισφορά της αλληλεμπλοκής των αδρανών στη μεταφορά τέμνουσας, μέσω της παραμέτρου d_{dg} , μηχανισμός ο οποίος αγνοείται στην περίπτωση της ισχύουσας έκδοσης του ΕΚ2. Η νέα έκδοση φαίνεται να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική τιμή της τέμνουσας αντοχής, σημειώνοντας απόκλιση 14%, δεδομένου ότι η χαρακτηριστική τιμή του φορτίου αστοχίας προέκυψε ίση με 218 kN.

Διαστασιολόγηση σε διάτρηση τοιχωματικού κτιρίου χωρίς δοκούς

5. Η ύπαρξη τοιχωμάτων στο φορέα για την παραλαβή των σεισμικών δράσεων περιόρισε σημαντικά την ανάπτυξη καμπτικών ροπών στα υποστυλώματα. Ωστόσο, η εκκεντρότητα της φόρτισης λόγω των συγκεκριμένων ροπών αποδείχθηκε σημαντική, καθιστώντας τους σεισμικούς συνδυασμούς δυσμενέστερους, κατά τον υπολογισμό της δρώσας διατμητικής τάσεως, σε σχέση με το συνδυασμό 1,35G+1,5Q (παρά το γεγονός ότι κατά τους σεισμικούς συνδυασμούς τα κατακόρυφα φορτία και κατ' επέκταση η δρώσα τέμνουσα δύναμη της σύνδεσης λαμβάνονται μειωμένα σε σχέση με το συνδυασμό 1,35G+1,5Q).

6. Στα περιμετρικά υποστυλώματα, λόγω της ασυμμετρίας των περιμέτρων ελέγχου, έχει σημασία η φορά της κάθετης στο άκρο της πλάκας εκκεντρότητας, σε αντίθεση με τα εσωτερικά όπου δεν απαιτείται αυτός ο διαχωρισμός. Η δρώσα διατμητική τάση στην περίμετρο ελέγχου προέκυψε δυσμενέστερη (βάσει και των δύο Ευρωκωδίκων 2) στην περίπτωση των σεισμικών συνδυασμών οι οποίοι είχαν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εκκεντρότητας (κάθετης στο άκρο της πλάκας) προς το εξωτερικό της πλάκας. Παρά το γεγονός ότι για τα περιμετρικά υποστυλώματα η φόρτιση είναι έκκεντρη και στην περίπτωση του συνδυασμού 1,35G+1,5Q, η εκκεντρότητα αυτή δεν προέκυψε αρκετά σημαντική (η δρώσα διατμητική τάση δεν ξεπέρασε αυτή των σεισμικών συνδυασμών).

7. Τόσο για τα περιμετρικά όσο και για τα εσωτερικά υποστυλώματα ο συντελεστής εκκεντρότητας β/β_e υπολογίζεται μεγαλύτερος σύμφωνα με τις εξισώσεις της νέας έκδοσης (κατά 2,6% στα εσωτερικά και κατά 12,1% στα περιμετρικά υποστυλώματα). Πολλαπλασιάζοντας τις εκάστοτε δρώσες τέμνουσες δυνάμεις, που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαστασιολόγηση, με τις αντίστοιχες τιμές του συντελεστή εκκεντρότητας και συγκρίνοντας τα αποτελέσματα (Πίνακας 5.29) προκύπτει πως ο FprEN 1992-1-1:2023 υπερεκτιμά τη διατμητική τάση που αναπτύσσεται στην περίμετρο ελέγχου σε σχέση με τον EN 1992-1-1:2004 (ίδια ποσοστά απόκλισης με αυτά του συντελεστή εκκεντρότητας).

8. Για τα εσωτερικά υποστυλώματα η αντοχή έναντι διάτρησης για πλάκα χωρίς διατμητικό οπλισμό (σε όρους δυνάμεων για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα) υπολογίστηκε μεγαλύτερη, σύμφωνα με τη νέα έκδοση, κατά 1,3%. Αντιθέτως, για τους περιμετρικούς στύλους

η τιμή που προέκυψε βάσει της ισχύουσας έκδοσης ξεπερνούσε κατά 3,9% την αντίστοιχη τιμή της νέας. Η διαφοροποίηση αυτή σημειώθηκε λόγω του συντελεστή k_{pb} , ο οποίος στην περίπτωση του FprEN εξαρτάται από τον λόγο $b_0/b_{0,5}$, η επιρροή του οποίου δεν συναντάται σε κάποια παράμετρο του EN.

9. Η αντοχή σε διάτρηση της πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης κατά τη νέα έκδοση επηρεάζεται από τη μέγιστη διάμετρο αδρανούς που θα χρησιμοποιηθεί. Συγκεκριμένα, αυξάνεται για αύξηση της τιμής D_{lower} και κατ' επέκταση της παραμέτρου d_{dg} .

10. Η ισχύουσα έκδοση προσδιορίζει την απαίτηση προσθήκης διατρητικού οπλισμού μέσω του συνολικού εμβαδού των συνδετήρων ανά περίμετρο όπλισης, ενώ στη νέα ορίζεται το γεωμετρικό ποσοστό του απαιτούμενου οπλισμού με αποτέλεσμα να μην μπορούν να συγκριθούν τα εκάστοτε αποτελέσματα μέσω αυτών των μεγεθών. Ωστόσο, κατά EN διαπιστώθηκε μείωση της απαίτησης στα περιμετρικά υποστυλώματα, σε σχέση με τα εσωτερικά, ενώ κατά FprEN συνέβη το αντίθετο. Η παρατήρηση αυτή πιθανώς οφείλεται στο γεγονός ότι στην ισχύουσα έκδοση η τιμή της αντοχής χωρίς οπλισμό διάτρησης παρέμεινε σταθερή και για τις δύο περιπτώσεις (ανεξαρτήτως της θέσης του στύλου), ενώ στη νέα έκδοση μειώθηκε στα περιμετρικά υποστυλώματα. Να σημειωθεί επίσης πως κατά την επιλογή της διάταξης τοποθέτησης των οπλισμών προέκυψε κρίσιμη η τήρηση των κατασκευαστικών διατάξεων και όχι η ικανοποίηση των απαιτήσεων ως προς το εμβαδόν των συνδετήρων που έπρεπε να τοποθετηθούν.

11. Η εξώτατη περίμετρος $u_{out}/b_{0,5,out}$ με βάση την οποία προσδιορίζονται τα όρια τοποθέτησης των απαιτούμενων οπλισμών διάτρησης διαφέρει ως προς τον υπολογισμό της στις δύο εξεταζόμενες εκδόσεις. Σύμφωνα με τον EN πρόκειται για την περίμετρο (ομοιόθετη με τη βασική περίμετρο ελέγχου) όπου η δρώσα τάση ισούται με την αντοχή της πλάκας χωρίς οπλισμό διάτρησης, ενώ κατά τον FprEN υπολογίζεται μέσω μίας σχέσης (Εξίσωση (3.18)) που εμπεριέχει παραμέτρους που αφορούν τη γεωμετρία της σύνδεσης. Η διαφορά αυτή ως προς τον προσδιορισμό του μήκους της συγκεκριμένης περιμέτρου και η ανάλογη κατασκευαστική διάταξη που αφορά τη μέγιστη απόσταση της ίδιας με την εξώτερη περίμετρο όπλισης ($1,5d$ κατά EN και $0,5d_{v,out}$ κατά FprEN) κατέστησαν απαραίτητη την προσθήκη περισσότερων περιμέτρων όπλισης στην περίπτωση διαστασιολόγησης με τη νέα έκδοση, σε σχέση με αυτές που τοποθετήθηκαν κατά την ισχύουσα.

12. Κατά τον έλεγχο συμβατότητας των πλευρικών παραμορφώσεων διαπιστώθηκε η απαίτηση αλλαγής γεωμετρίας του φορέα, καθώς οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις προέκυψαν τόσο μεγάλες που η αύξηση της αντοχής έναντι διάτρησης με προσθήκη οπλισμού κρίθηκε αναποτελεσματική (σύμφωνα με τις κανονιστικές διατάξεις). Με βάση την ικανοποίηση του συγκεκριμένου περιορισμού προσδιορίστηκαν τα κατάλληλα εσωτερικά υποστυλώματα διαστάσεων $0,9 \times 0,9$ m και $0,65 \times 0,65$ m και τα κατάλληλα περιμετρικά διαστάσεων $0,75 \times 0,75$ m και $0,7 \times 0,7$ m, σύμφωνα με την ισχύουσα και τη νέα έκδοση αντίστοιχα. Να σημειωθεί πως ο περιορισμός που θέτει ο EN είναι αυστηρότερος για το εξεταζόμενο κτίριο, γι' αυτό και προκύπτει απαίτηση μεγαλύτερων διαστάσεων.

Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Το φαινόμενο της διάτρησης το οποίο συναντάται στις πλάκες χωρίς δοκούς αποτελεί μία σύνθετη μορφή αστοχίας με μεγάλο εύρος διερεύνησης. Με βάση τα προσομοιώματα που παρουσιάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία (τόσο για το πείραμα της διάτρησης όσο και για τη διαστασιολόγηση του κτιρίου) προτείνονται τα ακόλουθα ζητήματα για περαιτέρω έρευνα:

1. Προσομοίωση αντίστοιχων πειραματικών διαδικασιών με προσθήκη διατρητικών οπλισμών και επιβολή οριζόντιων φορτίων προκειμένου να ληφθεί υπόψη η επιρροή της εκκεντρότητας φόρτισης λόγω των σεισμικών δράσεων.
2. Παραμετρική ανάλυση ως προς τις διαστάσεις του υποστυλώματος και του πάχους της πλάκας της εξεταζόμενης σύνδεσης, ώστε να διαπιστωθεί η επιρροή της γεωμετρίας της στην αντοχή έναντι διάτρησης και στις απαιτήσεις όπλισης.
3. Διερεύνηση του πώς επηρεάζει η κατανομή των καμπτικών ροπών, στις λωρίδες υποστυλωμάτων και ανοιγμάτων κατά τη διαστασιολόγηση της πλάκας έναντι κάμψης, την αντοχή της πλάκας έναντι διάτρησης.
4. Έπειτα από τη διαστασιολόγηση της πλάκας έναντι διάτρησης μέσω ελαστικής ανάλυσης ολόκληρου του φορέα θα ήταν ενδιαφέρουσα η μη γραμμική ανάλυση προσομοιώματος κόμβου του κτιρίου, τα δεδομένα του οποίου θα έχουν ληφθεί από τα αποτελέσματα της διαστασιολόγησης. Το προσομοίωμα κόμβου ουσιαστικά θα έχει δημιουργηθεί με βάση την προσέγγιση των αποτελεσμάτων ενός κατάλληλου πειράματος και θα μεταποιηθεί σύμφωνα με τη γεωμετρία και τα φορτία του εξεταζόμενου κόμβου του κτιρίου, με στόχο τον έλεγχο συμβατότητας των αποτελεσμάτων.

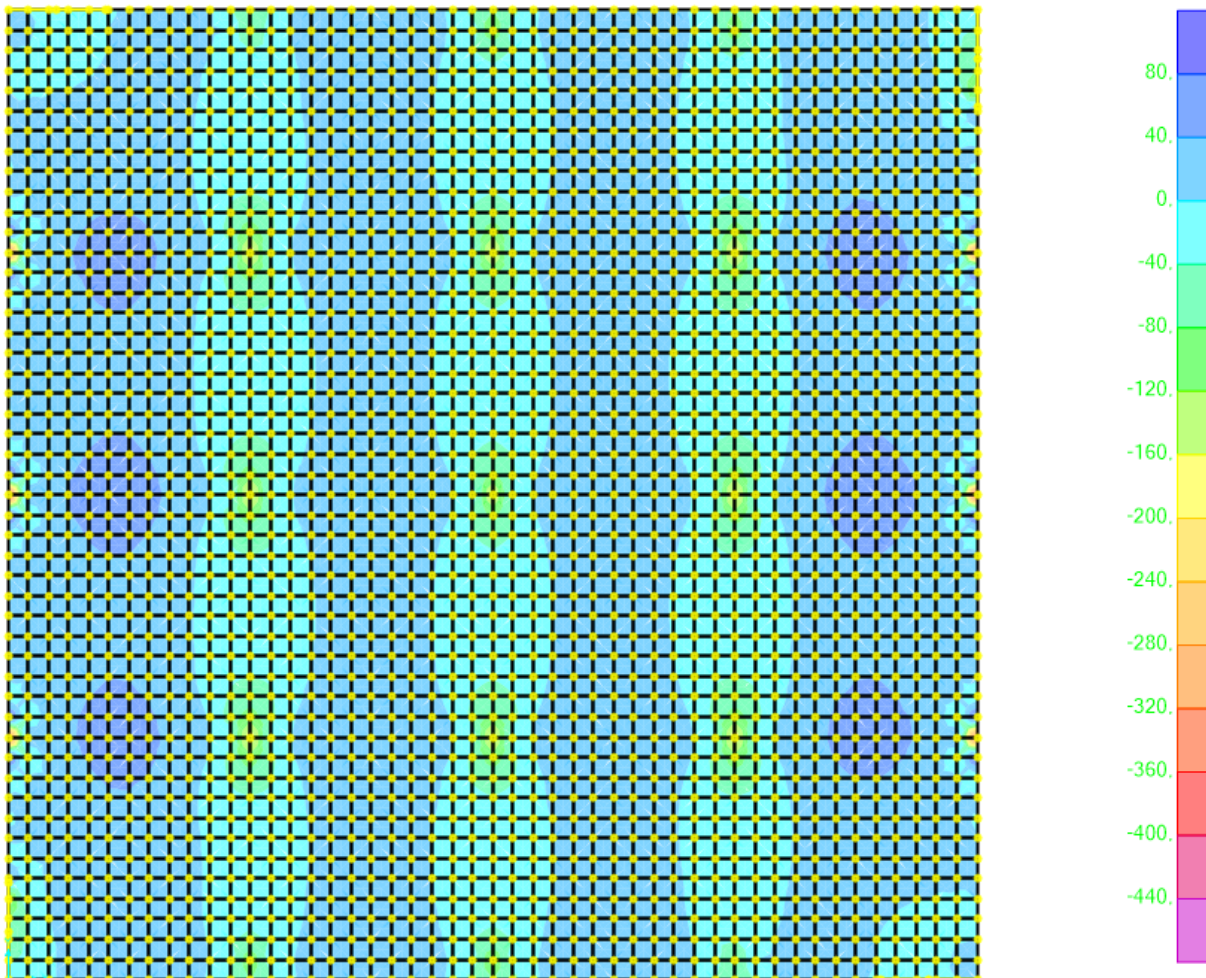
Βιβλιογραφία

1. Adetifa B., Polak MA. (2005) “Retrofit of Slab Column Interior Connections Using Shear Bolts.” *ACI Structural Journal*, 102(2), 268–274.
2. Bazargani P. (2014). “Seismic Demands on Gravity-Load Columns of Reinforced Concrete Shear Wall Buildings.” PhD Thesis, University of British Columbia, Vancouver.
3. CEB-FIB-model Code 1990: Design code. (1993). Comité Euro-International du Béton, London: Thomas Telford.
4. CEN (2004). EN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels.
5. CEN (2004). EN 1998-1 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels.
6. CEN (2023). prEN 1992-1-1 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules - Rules for buildings, bridges and civil engineering structures. Brussels.
7. CEN (2022). prEN 1998-1-2 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1-2. Brussels.
8. DIANA User’s Manual – Release 10.5 (2023). Document editor: Denise Ferreira.
9. Genikomsou A.S. (2015). “Nonlinear Finite Element Analysis of Punching Shear of Reinforced Concrete Slab-Column Connections.” PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario.
10. Genikomsou A.S., Polak MA. (2015). “Finite Element Analysis of Punching Shear of Concrete Slabs Using Damaged Plasticity Model in ABAQUS.” *Engineering Structures*, 98, 38–48.
11. Hansen K. (2022). “Python/DIANA Framework for Robust Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Beams” Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.
12. Kinnunen S., Nylander H. (1960). “Punching of Concrete Slabs without Shear Reinforcement.” *Trans Roy Inst Technol*, 158:112.
13. Muttoni A., Ruiz MF. (2012). “Levels of Approximation Approach in Codes of Practice.”, *Structural Engineering International*, 22(2), 190–194.
14. Muttoni A., Ruiz MF., Simões J.T. (2018). “The Theoretical Principles of the Critical Shear Crack Theory for Punching Shear Failures and Derivation of Consistent Closed-form Design Expressions.” *Structural Concrete*, 19, 174–190.
15. Muttoni A. (2022). “Developments in Shear & Punching in MC2020.” *Concrete Innovation for Sustainability*, Oslo, Norway.
16. Wallace J.W. (2004). “Behavior & Design of RC Elements.” University of California, Los Angeles.
17. Εγγλέζου Α. (2009). “Ανάλυση και Σχεδιασμός Πλακών Χωρίς Δοκούς σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 (NEN-EN 1992-1-1) με τη Μέθοδο του Ισοδύναμου Πλαισίου.” Διπλωματική Εργασία, Ε.Μ.Π., Αθήνα.

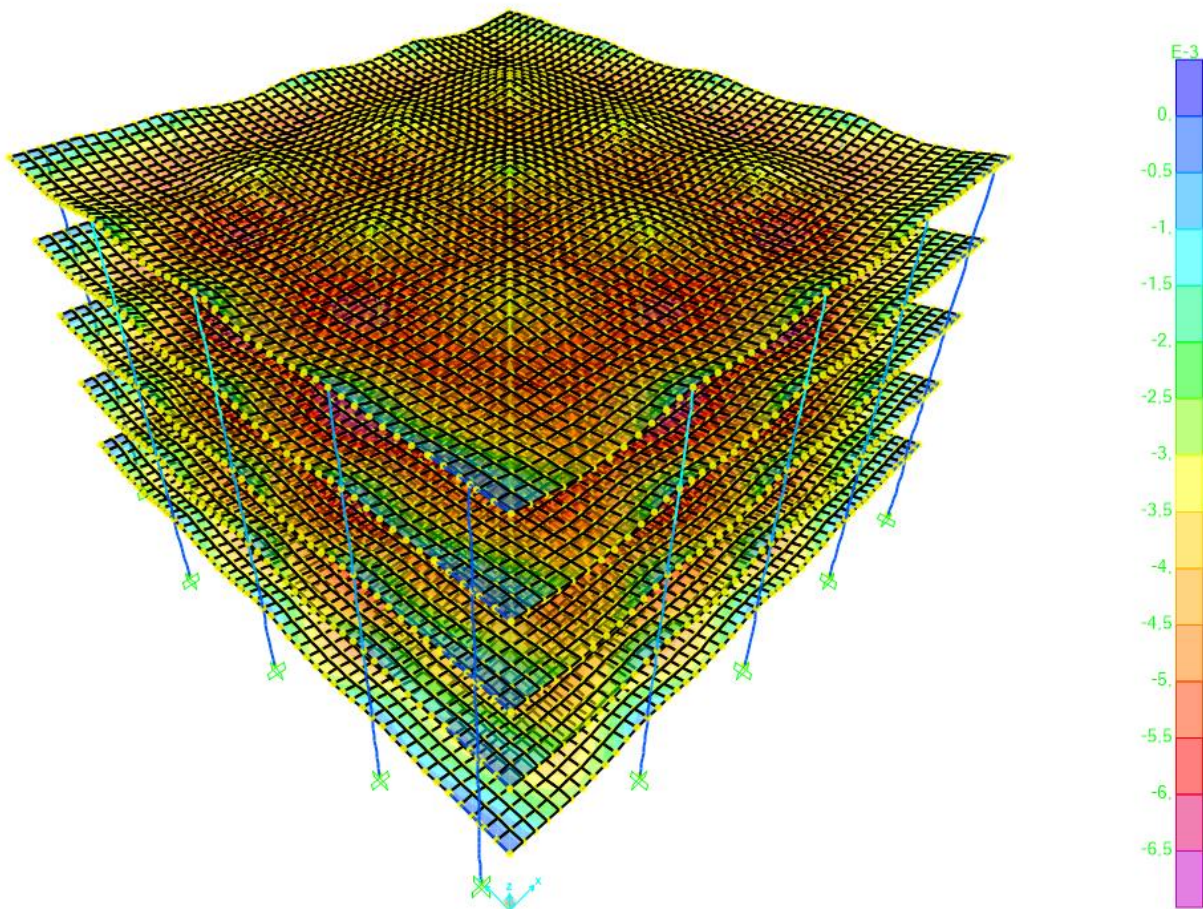
18. Εργαστήριο Ω.Σ. (2020). “Τυπολόγιο υπολογισμού στοιχείων από Ω.Σ. σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες EC2 και EC8.1.” Ε.Μ.Π., Αθήνα.
19. Καραγιάννης Χ.Γ. (2019). “Σχεδιασμός Κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα και Σεισμικές Δράσεις”. Εκδόσεις Σοφία, Θεσσαλονίκη.
20. Κίρτας Ε., Παναγόπουλος Γ. (2015). “Προσομοίωση Κατασκευών σε Προγράμματα Η/Υ”. Κάλλιπος Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις, Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/1607>
21. Μαλακάτας Ν., Τρέζος Κ. (2011). “Σημειώσεις για τη χρήση των Ευρωκωδίκων EN 1990 και EN 1991.” ΙΕΚΕΜ-ΤΕΕ, Αθήνα.
22. Σπηλιόπουλος Κ.Δ., Λυκίδης Γ.Χ. (2007). “Καταστατικά προσομοιώματα Ω.Σ. για πεπερασμένα στοιχεία με θεώρηση διανεμημένης ρωγμής.” Ψηφιακό Αποθετήριο Ε.Μ.Π., Αθήνα.
23. Τρέζος Κ.Γ. (2020). “Ωπλισμένο Σκυρόδεμα με βάση τον Ευρωκώδικα 2”. Εκδόσεις DaVinci, Αθήνα.
24. Ψάρρας Κ.Θ. (2015). “Αποτίμηση της Ασφάλειας των Πολυωρόφων Χωρικών Συστημάτων Χωρίς Δοκούς.” Διδακτορική Διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
25. Ψυχάρης Ι.Ν. (2016). “Σημειώσεις Αντισεισμικής Τεχνολογίας.” Σημειώσεις Μαθήματος Αντισεισμικών, Αθήνα.

Παράρτημα

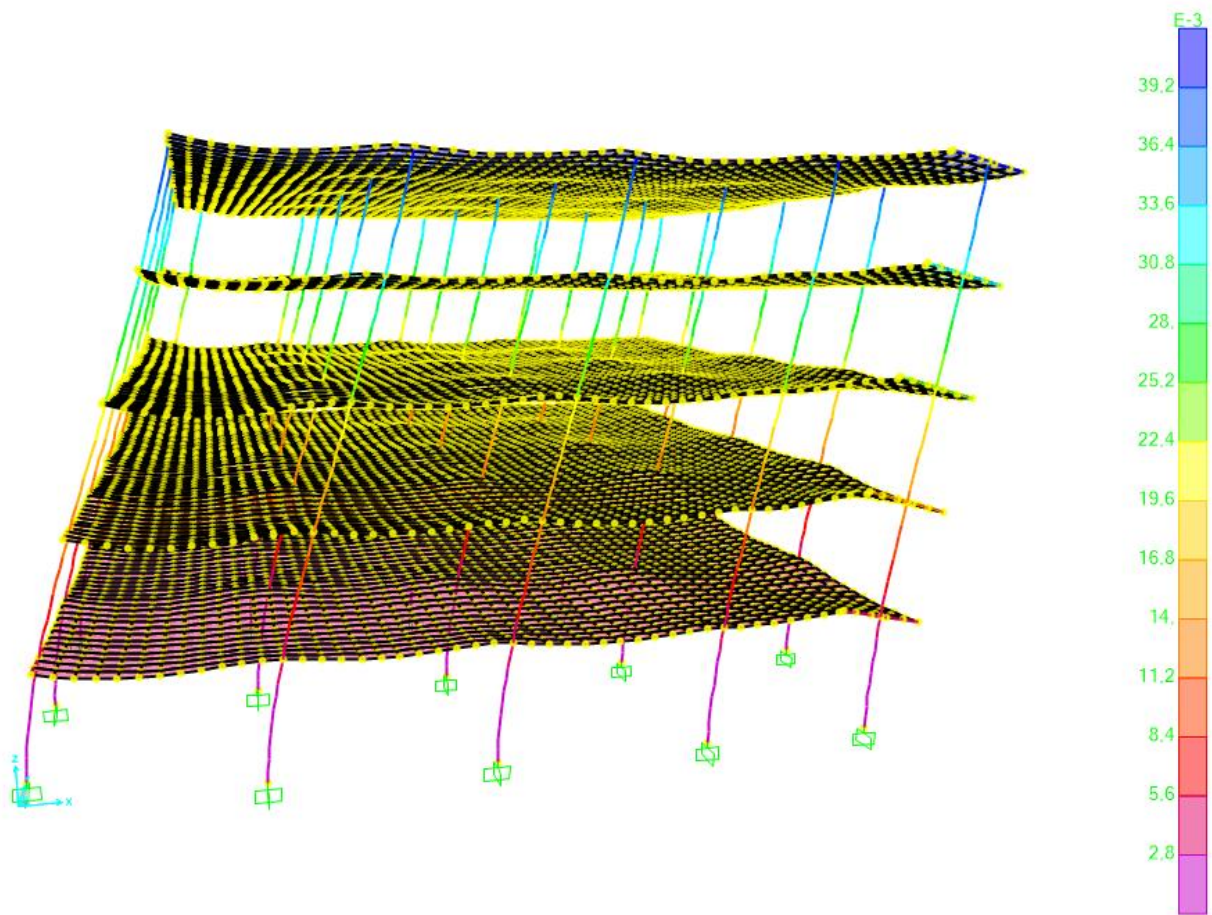
Στο παρόν παράρτημα παρουσιάζονται κάποιες επιπρόσθετες εικόνες που αφορούν το Κεφάλαιο 5 και έχουν ληφθεί από το λογισμικό SAP2000. Απεικονίζονται ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα της ανάλυσης των δύο προσομοιωμάτων (με και χωρίς τοιχώματα). Συγκεκριμένα, παρατίθενται, για λόγους πληρότητας, εικόνες με τα αναπτυσσόμενα εντατικά μεγέθη και την παραμορφωσιακή κατάσταση του φορέα.



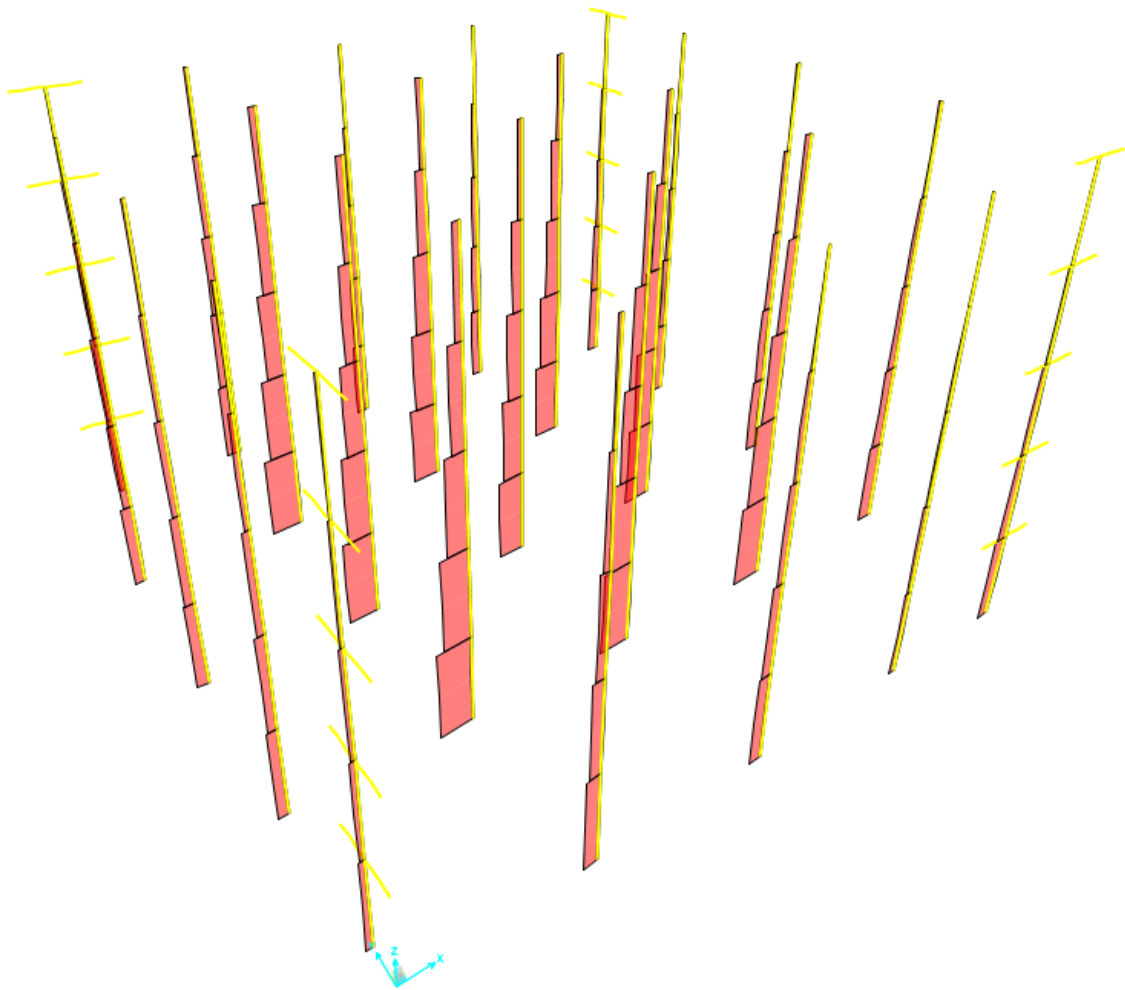
Εικόνα Π.1: Καμπτικές ροπές περί τον άξονα y για το συνδυασμό φόρτισης 1,35G+1,5Q (προσομοίωμα με τοιχώματα)



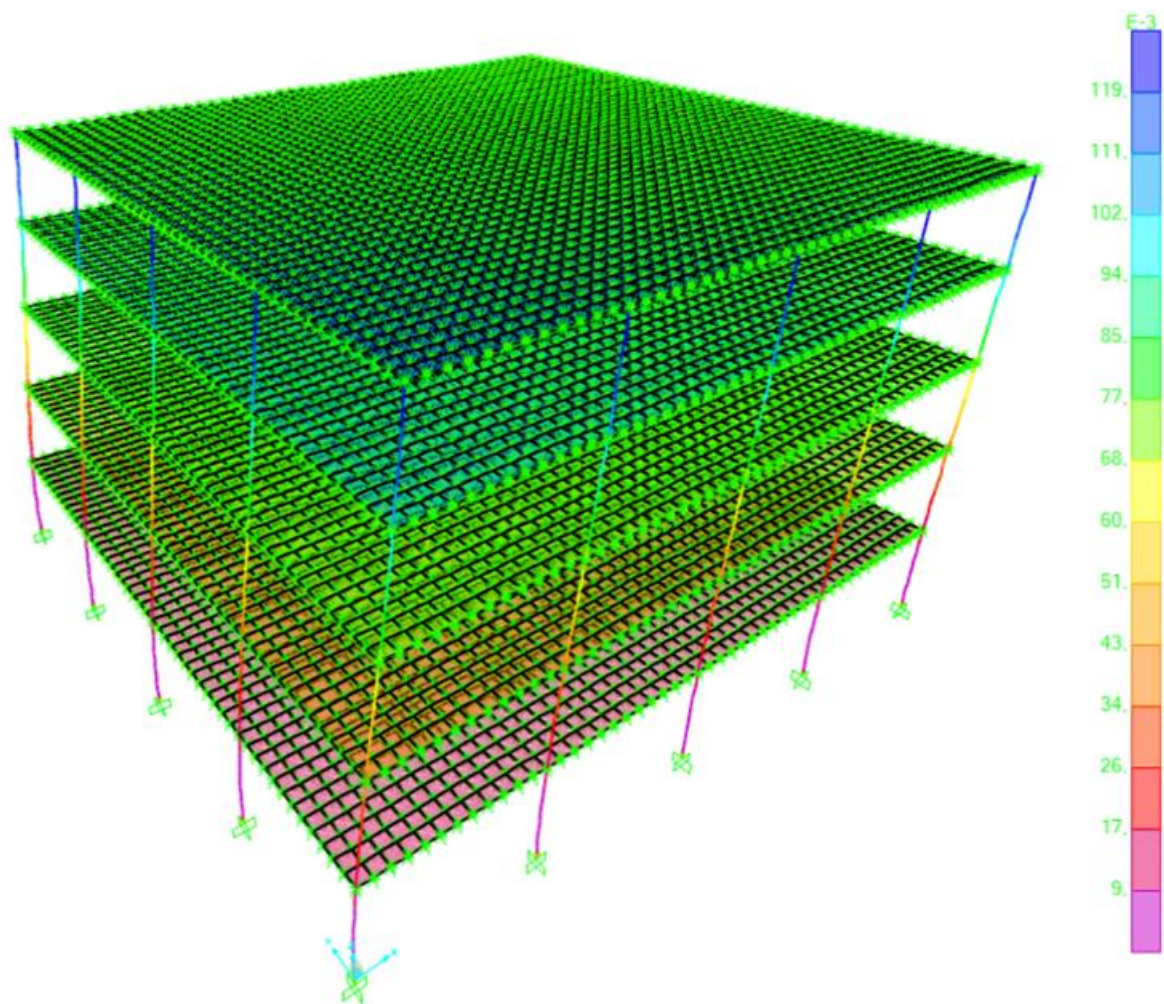
Εικόνα Π.2: Παραμόρφωση του φορέα κατά τον άξονα z για το συνδυασμό φόρτισης $1,35G+1,5Q$
(προσομοίωμα με τοιχώματα)



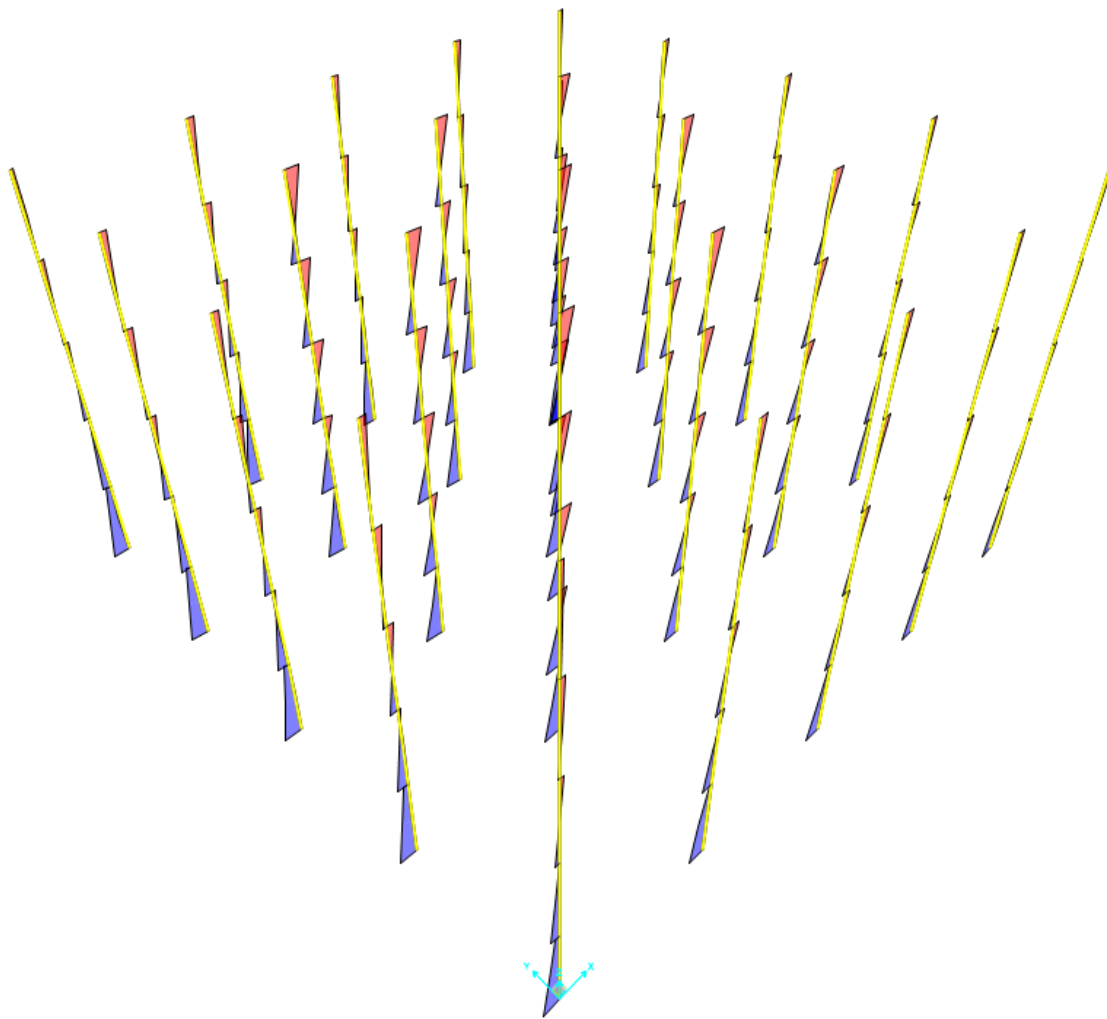
Εικόνα Π.3: Παραμόρφωση του φορέα κατά τον άξονα x για το συνδυασμό φόρτισης $G+0,6Q+Ex+Mx+0,3Ey$ (προσομοίωμα με τοιχώματα)



Εικόνα Π.4: Δράσεις αξονικές δυνάμεις για το συνδυασμό φόρτισης $G+0,6Q+Ex+Mx+0,3Ey$
(προσομοίωμα με τοιχώματα)



Εικόνα Π.5: Παραμόρφωση του φορέα κατά τον άξονα x για τη φόρτιση $Displ_x$ (προσομοίωμα χωρίς τοιχώματα)



Εικόνα Π.6: Δρώσες καμπτικές ροπές περί τον άξονα y για το συνδυασμό φόρτισης $G+0,6Q+Displ_x+0,3Displ_y$ (προσομοίωμα χωρίς τοιχώματα)