



DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING
MSC IN STRUCTURAL ROBUSTNESS FOR EXTREME
LOADING CONDITIONS

Neapolis
University
Pafos

Μεταπτυχιακή Διατριβή:

**«ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΔΟΜΙΚΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΣΕ
ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ ΜΕΣΩ ΜΗ- ΓΡΑΜΜΙΚΗΣ
ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ»**

Ευαγγελία Κ. Φαϊτάκη

Επιβλέπων Καθηγητής:
Δρ. Στυλιανίδης Παναγιώτης

Πάφος, Μάιος, 2026

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η διπλωματική εργασία μου στο προπτυχιακό πρόγραμμα των Πολιτικών Μηχανικών του πανεπιστημίου Νεάπολης της Πάφου αφορούσε την «Μελέτη Δομικής Συμπεριφοράς Διαφορετικών Τύπων Επίπεδων Πλαισιακών Συστημάτων Από Δομικό Χάλυβα» μέσω του στατικού λογισμικού προγράμματος SAP2000. Σκοπός της συγκεκριμένης μεταπτυχιακής εργασίας ήταν να εμβαθύνω ερευνητικά την ανάλυση των μεταλλικών επίπεδων πλαισίων ως προς την προοδευτική κατάρρευση, μέσω μη – γραμμικής στατικής ανάλυσης.

Θερμά ευχαριστώ τον επιβλέποντα της μεταπτυχιακής μου εργασίας Δρ. Παναγιώτη Στυλιανίδη για την ανεκτίμητη παραγωγική καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της.

Ευχαριστώ όλους τους καθηγητές του τμήματος που ήταν πάντα πρόθυμοι και συνεργάσιμοι τόσο στο προπτυχιακό αλλά και στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών μου.

Τέλος, εκφράζω τη βαθύτατη ευγνωμοσύνη μου στον πατέρα μου και στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράστασή της. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον σύζυγό μου που με την πίστη του σε εμένα δυνάμωσε την προσπάθειά μου.

Ηράκλειο Κρήτης, Μάιος 2026

Φαϊτάκη Ευαγγελία

Περιεχόμενα

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ:	8
----------------------------	---

Μελέτη συμπεριφοράς επίπεδων πλαισίων δομικού χάλυβα σε συνθήκες προοδευτικής κατάρρευσης μέσω μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης.	8
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	8
1.1 Το Πρόβλημα της Προοδευτικής Κατάρρευσης των Κατασκευών.....	9
1.2 Μέθοδοι Αξιολόγησης Δομικής Συμπεριφοράς.....	10
1.2.1 Συγκριτική Αξιολόγηση και Επιλογή Μεθόδου Ανάλυσης.....	12
1.2.2 Παράμετροι που Καθορίζουν τη Δομική Συμπεριφορά	12
1.3 Μέθοδοι Λήψης Δυναμικών Φαινομένων.....	13
Κανονιστικές Προδιαγραφές	13
1.3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση – Πρόσφατες Ερευνητικές Μελέτες	14
1.3.2 Μη-γραμμική Στατική Ανάλυση και Δυναμικός Συντελεστής Αύξησης (DIF)	14
1.4 Χαλύβδινα Πλαίσια Ροπής – Επίδραση Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Γεωμετρίας 14	
1.4.1 Χαλύβδινα Πλαίσια με Συνδέσμους Δυσκαμψίας.....	15
1.4.2 Μελέτες σε Υπαρκτά Κτίρια Πλήρους Κλίμακας.....	16
1.4.3 Επίδραση Αλληλεπίδρασης Εδάφους-Κατασκευής.....	16
1.4.4 Συμπεράσματα Βιβλιογραφικής Ανασκόπησης.....	16
1.4.5 Σκοπός και Στόχοι της Παρούσας Εργασίας.....	16
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	17
2.1 Γεωμετρία Πλαισίων	18
2.1.1 Χαρακτηριστικά Υλικού – Χάλυβας S355.....	20
2.1.2 Επιλογή Διατομών.....	20
2.1.3 Φορτία Σχεδιασμού	21
2.1.4 Φορτίο στις δοκούς.....	21
2.1.5 Συνδυασμός φορτίσεων για την ανάλυση	21
2.1.6 Σενάρια Αφαίρεσης Υποστυλώματος.....	22
2.1.7 Μοντελοποίηση Συνδέσεων	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	25

3.1	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΕΣ ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΧΑΛΥΒΔΙΝΩΝ ΠΛΑΙΣΙΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΠΡΟΟΔΕΥΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΡΡΕΥΣΗΣ - ΑΡΧΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	25
3.1.1	Πλαίσιο 2 Ορόφων × 6 Ανοιγμάτων με μήκος ανοιγμάτων $L = 4 \text{ m}$, Μοντέλο 1. 25	
3.1.2	Αποτελέσματα Μοντέλου 1, Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta).....	28
3.1.3	Αποτελέσματα Μοντέλου 1, Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacements) 33	
3.1.4	Αποτελέσματα Μοντέλου 1, Ημιάκαμπτες Συνδέσεις(P-Delta & Large Displacements).....	37
3.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 2, μετά την Αφαίρεση του Κεντρικού Υποστυλώματος, (Κόμβος 11), Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta)	42
3.3	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 2, μετά την Αφαίρεση του Κεντρικού Υποστυλώματος, Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta plus Large Displacements)	47
3.4	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλο 2, μετά την Αφαίρεση του Κεντρικού Υποστυλώματος, Ημιάκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta plus Large Displacements)	52
3.5	Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων Άκαμπτων (P-Delta), Άκαμπτων και Ημιάκαμπτων Συνδέσεων (P-Delta plus Large Displacement) υπό την Αφαίρεσης Κεντρικού Υποστυλώματος.....	57
3.6	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 3, μετά την Αφαίρεση του Πλευρικού Υποστυλώματος, (Κόμβος 5), Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta).	63
3.7	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 3, μετά την Αφαίρεση του Πλευρικού Υποστυλώματος, (Κόμβος 5), Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta plus Large Displacements)..	67
3.8	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 3, μετά την Αφαίρεση του Πλευρικού Υποστυλώματος, (Κόμβος 5), Ημιάκαμπτες Συνδέσεις(P-Delta + Large Displacements) .	71
3.9	Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων Άκαμπτων (P-Delta), Άκαμπτων και Ημιάκαμπτων (P-Delta plus Large Displacements) Συνδέσεων υπό την Αφαίρεση Πλευρικού Υποστυλώματος.....	75
3.9.1	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 4, μετά την Αφαίρεση του Γωνιακού Υποστυλώματος, (Κόμβος 20), Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta).....	82
3.9.2	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 4, μετά την Αφαίρεση του Γωνιακού Υποστυλώματος, (Κόμβος 20), Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta plus Large Displacements)	

3.9.3	Ανάλυση Αποτελεσμάτων Μοντέλου 4, μετά την Αφαίρεση του Γωνιακού Υποστυλώματος, (Κόμβος 20), Ημιάκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta plus Large Displacements).....	92
3.9.4	Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων Άκαμπτων (P-Delta), Άκαμπτων και Ημιάκαμπτων Συνδέσεων (P-Delta plus Large Displacements) υπό την Αφαίρεση Γωνιακού Υποστυλώματος	97
3.9.5	Συγκριτική Αξιολόγηση Μοντέλων Άκαμπτων (P-Delta), Άκαμπτων και Ημιάκαμπτων Συνδέσεων (P-Delta plus Large Displacements) των Τριών Σεναρίων Αφαίρεσης Υποστυλώματος	105
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....		119
4.1	Παρουσίαση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	119
4.2	Παρουσίαση και Ανάλυση της Μέγιστης Κατακόρυφης Βύθισης U3 στο σημείο Αφαίρεσης των Υποστυλωμάτων - Άκαμπτες (P-Delta & Large Displacement).....	120
4.2.1	Μέγιστη Κατακόρυφη Βύθιση U3 – Άκαμπτης Σύνδεσης (P-Delta & Large Displ.) Κεντρικού Υποστυλώματος.....	120
4.2.2	Μέγιστη Κατακόρυφη Βύθιση U3 – Άκαμπτης Σύνδεσης (P-Delta & Large Displ.) Πλευρικού Υποστυλώματος.....	123
4.2.3	Μέγιστη Κατακόρυφη Βύθιση U3 – Άκαμπτης Σύνδεσης (P-Delta & Large Displ.) Γωνιακού Υποστυλώματος	126
4.3	Συγκριτική Αξιολόγηση Κατακόρυφης Βύθισης U3 και Οριζόντιας Μετατόπισης U1 για τα Τρία Σενάρια Αφαίρεσης Υποστυλώματος — Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement).....	129
4.4	Παρουσίαση και Ανάλυση της Μέγιστης Κατακόρυφης Βύθισης U3 στο σημείο Αφαίρεσης των Υποστυλωμάτων - Ημιάκαμπτες Συνδέσεις(P-Delta & Large Displ.).....	129
4.4.1	Μέγιστη Κατακόρυφη Βύθιση U3 – Ημιάκαμπτης Σύνδεσης (P-Delta & Large Displ.) Κεντρικού Υποστυλώματος.....	130
4.4.2	Μέγιστη Κατακόρυφη Βύθιση U3 – Ημιάκαμπτης Σύνδεσης (P-Delta & Large Displ.) Πλευρικού Υποστυλώματος.....	131
4.4.3	Μέγιστη Κατακόρυφη Βύθιση U3 – Ημιάκαμπτης Σύνδεσης (P-Delta & Large Displ.) Γωνιακού Υποστυλώματος	134

4.5	Συγκριτική Αξιολόγηση Κατακόρυφης Βύθισης U3 και Οριζόντιας Μετατόπισης U1 για τα Τρία Σενάρια Αφαίρεσης Υποστυλώματος - Ημιάκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement).....	137
4.6	Παρουσίαση και Ανάλυση Βήματος Κατάρρευσης, Μέγιστης Τέμνουσας Βάσης και Τέμνουσας Κατάρρευσης - Άκαμπτες και Ημιάκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement).....	137
4.6.1	Βήμα Κατάρρευσης — Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement) .	138
4.6.2	Βήμα Κατάρρευσης — Ημιάκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement)	142
4.6.3	Συγκριτική Ανάλυση Θέσεων Αφαίρεσης Βήματος Κατάρρευσης, Άκαμπτων και Ημιάκαμπτων συνδέσεων.....	147
4.6.4	Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης & Τέμνουσα Κατάρρευσης — Άκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement).....	148
4.6.5	Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης & Τέμνουσα Κατάρρευσης — Ημιάκαμπτες Συνδέσεις (P-Delta & Large Displacement)	155
4.6.6	Συγκριτική Ανάλυση Θέσεων Αφαίρεσης Μέγιστη Τέμνουσα Βάσης -Τέμνουσα Κατάρρευσης, Άκαμπτων και Ημιάκαμπτων συνδέσεων.....	162
4.7	Παρουσίαση και Ανάλυση Άκαμπτων Πλαισίων – Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη	163
4.7.1	Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη, Άκαμπτη Σύνδεση Κεντρικού Υποστυλώματος	163
4.7.2	Μέγιστη Αξονική Δύναμη Άκαμπτη Σύνδεση Πλευρικό Υποστυλώματος	165
4.7.3	Μέγιστη Αξονική Δύναμη, Άκαμπτη Σύνδεση Γωνιακού Υποστυλώματος.....	167
4.7.4	Συγκριτική Ανάλυση Θέσεων Αφαίρεσης Μοντέλου Άκαμπτων συνδέσεων – Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη	169
4.8	Παρουσίαση και Ανάλυση Ημιάκαμπτων Πλαισίων – Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη	170
4.8.1	Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη, Ημιάκαμπτη Σύνδεση Κεντρικού Υποστυλώματος	171
4.8.2	Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη, Ημιάκαμπτη Σύνδεση Πλευρικού Υποστυλώματος	173

4.8.3	Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη, Ημιάκαμπτη Σύνδεση Γωνιακού Υποστυλώματος	175
4.8.4	Συγκριτική Ανάλυση Θέσεων Αφαίρεσης Μοντέλου Ημιάκαμπτων Συνδέσεων – Μέγιστη Απόλυτη Αξονική Δύναμη	178
4.9	Παρουσίαση και Ανάλυση Άκαμπτων Πλαισίων – Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή	179
4.9.1	Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή, Άκαμπτη Σύνδεση Κεντρικού Υποστυλώματος	179
4.9.2	Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή, Άκαμπτη Σύνδεση Πλευρικού Υποστυλώματος	181
4.9.3	Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή, Άκαμπτη Σύνδεση Γωνιακού Υποστυλώματος	183
4.9.4	Συγκριτική Ανάλυση Θέσεων Αφαίρεσης Μοντέλου Άκαμπτων Συνδέσεων - Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή	185
4.9.5	Παρουσίαση και Ανάλυση Ημιάκαμπτων Πλαισίων – Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή	186
4.9.6	Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή, Ημιάκαμπτη Σύνδεση Κεντρικού Υποστυλώματος	186
4.9.7	Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή, Ημιάκαμπτη Σύνδεση Πλευρικού Υποστυλώματος	188
4.9.8	Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή, Ημιάκαμπτη Σύνδεση Γωνιακού Υποστυλώματος	190
4.9.9	Συγκριτική Ανάλυση Θέσεων Αφαίρεσης Μοντέλου Ημιάκαμπτων Συνδέσεων – Μέγιστη Απόλυτη Καμπτική Ροπή	192
4.10	Αξιολόγηση Δείκτη Βελτίωσης R και Αντιστάθμισης Προοδευτικής Κατάρρευσης	193
4.10.1	Ορισμός και Χρησιμότητα του Δείκτη R	193
4.10.2	Ερμηνεία και Μεθοδολογία Σύγκρισης	194
4.10.3	Παρουσίαση και Σχολιασμός Αποτελεσμάτων	194
4.11	Ανακεφαλαίωση και Συμπεράσματα Κεφαλαίου	197
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5		199
5.1	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ	199

5.1.1	Ανασκόπηση Φιλοσοφίας και Στόχων της Έρευνας.....	199
5.1.2	Μεθοδολογία και Αριθμητική Προσομοίωση	199
5.1.3	Ανάλυση και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων Παραμετρικής Μελέτης	201
5.1.4	Συμπεράσματα ως προς τη Θέση Αφαίρεσης Υποστυλώματος	202
5.1.5	Συμπεράσματα ως προς τον Τύπο Σύνδεσης.....	202
5.1.6	Περιορισμοί της Έρευνας	203
5.1.7	Οικονομική Αποδοτικότητα του Σχεδιασμού έναντι Προοδευτικής Κατάρρευσης 203	
5.2	Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	204
5.3	Τελικό Συμπέρασμα	205
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	206

ΤΙΤΛΟΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ:

Μελέτη συμπεριφοράς επίπεδων πλαισίων δομικού χάλυβα σε συνθήκες προοδευτικής κατάρρευσης μέσω μη-γραμμικής στατικής ανάλυσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία επικεντρώνεται στη μελέτη της δομικής συμπεριφοράς επίπεδων πλαισίων (plane frames) δομικού χάλυβα σε συνθήκες προοδευτικής κατάρρευσης. Για τον σκοπό αυτό, εφαρμόζεται η μέθοδος της **νοητής αφαίρεσης/αστοχίας υποστυλώματος (column removal idealization)**, η οποία θεωρείται η πλέον διαδεδομένη προσέγγιση για την αξιολόγηση της ανθεκτικότητας των κτιριακών κατασκευών (GSA, 2016). Η μέθοδος αυτή εξετάζει την ικανότητα του φορέα να ενεργοποιεί **εναλλακτικές οδούς μεταφοράς φορτίων (alternative load paths)** προς ένα νέο σημείο ευσταθούς ισορροπίας, αποτρέποντας τη διάδοση της τοπικής αστοχίας.

Για την ανάλυση χρησιμοποιείται η **Μη-Γραμμική Στατική Ανάλυση (Pushover/Pushdown Analysis)**, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη **μη-γραμμικότητα των υλικών (material nonlinearity)** όσο και τα **γεωμετρικά φαινόμενα δευτέρας τάξης (second order effects)**. Η προοδευτική κατάρρευση επηρεάζεται από κρίσιμες παραμέτρους, όπως η θέση του αστοχήσαντος

υποστυλώματος, οι γεωμετρικές διαστάσεις του πλαισίου, ο αριθμός των ορόφων, η ικανότητα σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων και η στροφική ικανότητα των συνδέσεων (Stylianidis & Nethercot, 2015). Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση των περιπτώσεων κατάρρευσης, όπως αυτές που ιστορικά καταγράφηκαν στο Ηνωμένο Βασίλειο και στις ΗΠΑ, μέσω ενός σχεδιασμού βασισμένου στις διατάξεις των British Standards, του ASCE 7 και των Ευρωκωδίκων (EN 1991-1-7).

1.1 Το Πρόβλημα της Προοδευτικής Κατάρρευσης των Κατασκευών

Η προοδευτική κατάρρευση συμβαίνει όταν η τοπική αστοχία ενός φέροντος στοιχείου οδηγεί σε αλυσιδωτή αστοχία γειτονικών στοιχείων. Εάν ο φορέας στερείται επαρκούς δομικού πλεονασμού (redundancy) και ολκιμότητας (ductility), η αστοχία διαδίδεται προκαλώντας μερική ή ολική κατάρρευση (UFC 4-023-03, 2013). Τα αίτια μιας τέτοιας αστοχίας μπορεί να είναι τυχηματικά φορτία όπως εκρήξεις, προσκρούσεις, πυρκαγιές ή ακραία φυσικά φαινόμενα.

Η ιστορική αφετηρία για τη θεσμοθέτηση κανονισμών προοδευτικής κατάρρευσης υπήρξε η κατάρρευση του **Ronan Point** το 1968 (Σχήμα 1.1) (Pearson & Delatte, 2005). Το γεγονός αυτό οδήγησε το 1970 στην εισαγωγή απαιτήσεων για **δομικούς δεσμούς (structural ties)** στους βρετανικούς κανονισμούς, προκειμένου να διασφαλιστεί η συνέχεια του οπλισμού και η ενεργοποίηση της μεθόδου εναλλακτικής διαδρομής μεταφοράς φορτίου (Alternate Path Method - APM), ιδιαίτερα σε κτίρια με προκατασκευασμένα στοιχεία (GSA, 2016).



Σχήμα 1.1 Η κατάρρευση του Ronan Point Tower (1968, Λονδίνο, ΗΒ)