



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΑΠΟ ΣΤΑΥΡΩΤΗ ΕΠΙΚΟΛΜΗΤΗ ΞΥΛΕΙΑ (CLT)



Διπλωματική εργασία | Μάρτιος 2018
Στράτος Φεζάν

Επιβλέπων: Χαράλαμπος Μουζάκης
Επίκουρος καθηγητής Ε.Μ.Π.

Περίληψη

Σκοπός αυτής της διπλωματική εργασίας ήταν η διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών από πάνελ σταυρωτής επικολλητής ξυλείας (Cross Laminated Timber, CLT). Συγκεκριμένα εξετάστηκε η επιρροή των δυνάμεων τριβής στην εν λόγω συμπεριφορά, μέσω μη γραμμικών αναλύσεων με χρονοϊστορίες καθώς και η διαφορά των αποτελεσμάτων με αυτά που προκύπτουν από εναλλακτικές μεθόδους ανάλυσης. Η προσομοίωση όλων των μεταλλικών συνδέσμων (hold-downs, angle brackets και κοχλίες) πραγματοποιήθηκε με μη γραμμικά υστερητικά ελατήρια δύο βαθμών ελευθερίας, μέσω κώδικα που αναπτύχθηκε και κατάλληλα στοιχεία χρήστη συμβατά με το λογισμικό ABAQUS. Στοιχεία χρήστη αναπτύχθηκαν και για την προσομοίωση της επαφής των πάνελ και της τριβής των διεπιφανειών. Η συμπεριφορά των στοιχείων χρήστη επικυρώθηκε μέσω σύγκρισης με τα αποτελέσματα οκτώ πειραμάτων σε μεταλλικούς συνδέσμους και πέντε πειραμάτων σε μεμονωμένα πάνελ CLT. Η προσομοίωση του CLT πραγματοποιήθηκε με πλήρως ελαστικά επιφανειακά στοιχεία. Κατά τις μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις επιβλήθηκαν 7 σεισμικές διεγέρσεις σε 2 προσομοιώματα πεπερασμένων στοιχείων (ένα οκταώροφο κι ένα διώροφο) με δύο τρόπους προσομοίωσης (με τριβή στις διεπιφάνειες και χωρίς). Στη συνέχεια στο οκταώροφο προσομοίωμα έγινε ψευδοστατική ανάλυση (με μη γραμμικά ελατήρια) και ανάλυση φάσματος απόκρισης (σε «ισοδύναμο» ελαστικό σύστημα), με συντελεστή συμπεριφοράς $q = 2.0$.

Τα αποτελέσματα της εργασίας δείχνουν, μεταξύ άλλων, πως η τριβή αυξάνει τη λικνιστική απόκριση των πάνελ και μειώνει την ολίσθηση, επηρεάζοντας τις εντάσεις στους μεταλλικούς συνδέσμους. Η τριβή αυξάνει τις εφελκυστικές δυνάμεις των hold-downs, κατά μέσο όρο 53.8% στο οκταώροφο προσομοίωμα και 48.2% στο διώροφο και κατά συνέπεια η παράλειψή της κατά την προσομοίωση δεν είναι υπέρ της ασφαλείας. Από τις δύο εναλλακτικές μεθόδους, η ανάλυση φάσματος απόκρισης δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα, υπερεκτιμώντας τις μετατοπίσεις σε ποσοστό 21% κατά μέσο όρο. Οι δύο μέθοδοι φαίνονται επαρκείς για χρήση κατά την προδιαστασιολόγηση φορέων από CLT στα αρχικά στάδια μιας μελέτης.

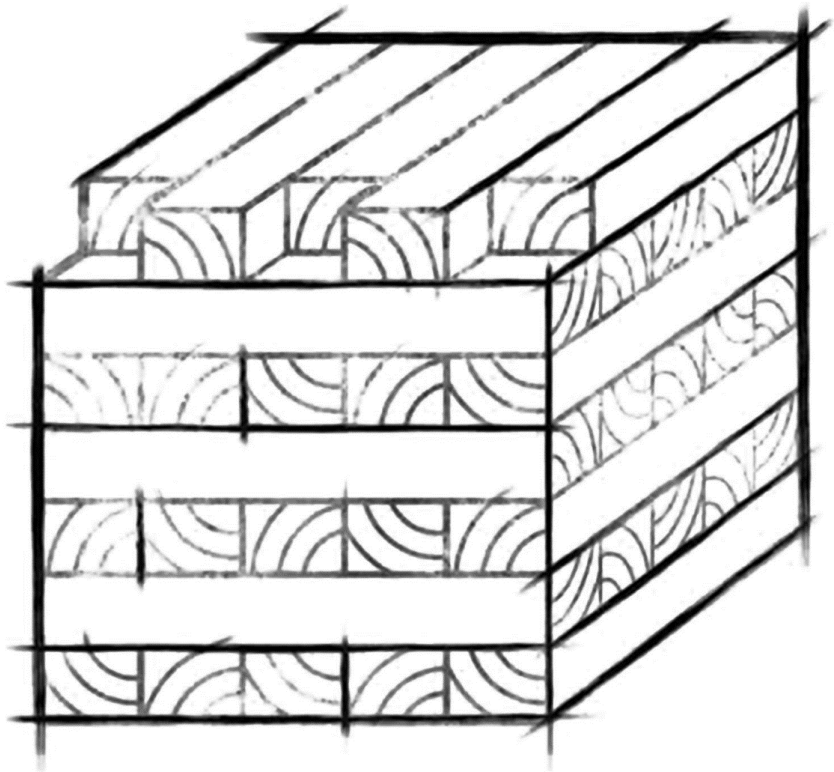
Περιεχόμενα

Περίληψη	2
1. Εισαγωγή στο δομικό σύστημα με πάνελ από CLT	8
1.1. Το CLT ως δομικό υλικό	10
1.2. Οι κατασκευές από CLT	11
1.2.1. Από την κατοικία στις πολυώροφες κατασκευές	11
1.2.2. Τα διαφορετικά είδη κατασκευών από CLT	14
1.3. Οι ιδιαιτερότητες της συμπεριφοράς των κατασκευών από CLT υπό πλευρικά φορτία – εισαγωγή στα μη γραμμικά φαινόμενα	15
1.3.1. Εισαγωγή στη συμπεριφορά ενός μεμονωμένου πάνελ	15
1.3.2. Επεξήγηση της γεωμετρικής μη γραμμικότητας του δομικού συστήματος.	17
1.3.3. Εισαγωγή στο λικνισμό	19
1.4. Κίνητρο, σκοπός και περιεχόμενο της εργασίας	20
2. Χαρακτηριστικά και προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων	22
2.1. Περιγραφή των μεταλλικών συνδέσμων στις κατασκευές από CLT	24
2.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των υστερητικών προσομοιωμάτων για CLT	25
2.3. Ανάπτυξη υστερητικών προσομοιωμάτων για τη συμπεριφορά των μεταλλικών συνδέσμων	31
2.3.1. Το προσομοίωμα SAWS όπως περιγράφεται από τους Folz και Filiatrault [2004]	32
2.3.2. Τα υστερητικά προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν: εισαγωγή	33
2.3.3. Το υστερητικό προσομοίωμα για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση	34
2.3.4. Το υστερητικό προσομοίωμα για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό	41
2.4. Προσομοίωση των συνδέσμων με στοιχεία χρήστη και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα	45
2.4.1. Χαρακτηριστικά συνδεσμολογίας και παρουσίαση πειραμάτων	45
2.4.2. Δεδομένα εισόδου και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα	48
2.4.3. Επιλογή της σχετικής μετατόπισης αστοχίας	56
2.5. Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των στοιχείων χρήστη (user elements)	58
3. Προσομοίωση της υστερητικής συμπεριφοράς μεμονωμένων πάνελ	60
3.1. Τα πειράματα στα πάνελ που μελετώνται	62
3.2. Προσομοίωση των πάνελ από CLT και χαρακτηριστικά ανάλυσης	63
3.2.1. Τα προσομοιώματα των πάνελ στο λογισμικό	63
3.2.2. Επιλογή χρονικού βήματος, και παραμέτρων ανάλυσης	65
3.3. Σύγκριση της συμπεριφοράς των προσομοιωμάτων των πάνελ με πειραματικά αποτελέσματα	67
3.4. Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των προσομοιωμάτων των πάνελ	70
4. Μη γραμμική ανάλυση κτιρίων από CLT με χρονοϊστορίες	72
4.1. Ανάπτυξη των χωρικών προσομοιωμάτων	74
4.1.1. Περιγραφή των κτιρίων αναφοράς	74
4.1.2. Κατακόρυφα φορτία και μάζες	75

4.1.3. Προμελέτη και προδιαστασιολόγηση	76
4.1.4. Προσομοίωση των φορέων	77
4.2. Μη-γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες	81
4.2.1. Φάσμα σχεδιασμού και καταγραφές που επιλέχθηκαν.	81
4.2.2. Παράμετροι ανάλυσης	83
4.3. Αποτελέσματα των αναλύσεων – προσομοίωμα 8 ορόφων	85
4.3.1. Καθολικά χαρακτηριστικά	85
4.3.2. Διαγράμματα F-δ	89
4.3.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις	92
4.3.4. Οριζόντιες μετατοπίσεις ορόφων - Drifts	95
4.3.5. Εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs	98
4.3.6. Διατμητικές δυνάμεις στα angle brackets	100
4.3.7. Βλάβες στο φορέα	102
4.4. Αποτελέσματα των αναλύσεων – προσομοίωμα 2 ορόφων	103
4.4.1. Καθολικά χαρακτηριστικά	103
4.4.2. Διαγράμματα F-δ	104
4.4.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις	107
4.4.4. Οριζόντιες μετατοπίσεις ορόφων - Drifts	109
4.4.5. Εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs	110
4.4.6. Διατμητικές δυνάμεις στα angle brackets	112
4.4.7. Βλάβες στο φορέα	113
4.5. Περαιτέρω διερευνήσεις προσομοίωσης	114
4.5.1. Επιρροή τριβής στις διεπιφάνειες τοίχων-οροφής	114
4.5.2. Επιρροή της επιλογής συντελεστή απόσβεσης ζ	114
5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	116
<hr/>	
5.1. Συμπεράσματα και παρατηρήσεις από τα αποτελέσματα των αναλύσεων της διπλωματικής εργασίας	118
5.1.1. Τέμνουσα βάση	118
5.1.2. Επιτάχυνση του ανώτερου διαφράγματος	118
5.1.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις και drifts	119
5.1.4. Εσωτερικές δυνάμεις στους μεταλλικούς συνδέσμους	119
5.1.5. Συμπεράσματα	120
5.2. Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση	120
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με κλασσικές μεθόδους ανάλυσης	122
<hr/>	
A.1. Μεθοδολογία	124
A.1.1. Εισαγωγή	124
A.2.1. Το πρόβλημα κατά τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των συνδέσμων	125
A.2.2. Στροφική δυσκαμψία ως συνάρτηση του σημείου λειτουργίας (N, M)	126
A.2.3. Ισοδύναμη κατανομημένη δυσκαμψία	128
A.2.4. Διαδικασία προδιαστασιολόγησης	130
A.2. Αποτελέσματα των αναλύσεων – προσομοίωμα 8 ορόφων	132
A.2.1. Εισαγωγή	132
A.2.2. Εκτίμηση των κανονικών μορφών ταλάντωσης	132

A.2.3. Αποτελέσματα : Μετατοπίσεις	135
A.2.4. Αποτελέσματα : Διατμητικές δυνάμεις στους συνδέσμους	136
A.2.5. Αποτελέσματα : Εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs	137
A.3. Συμπεράσματα	137
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Χρονοϊστορίες	140
<hr/>	
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις	146
Γ.1. Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στα προσομοιώματα των συνδέσμων	148
Γ.2. Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στα προσομοιώματα των τοίχων	149
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ : Εκτίμηση σημαντικότερων περιόδων ταλάντωσης	152
<hr/>	
Βιβλιογραφία	162
<hr/>	

1. Εισαγωγή στο δομικό σύστημα με πάνελ από CLT



1.1. Το CLT ως δομικό υλικό

Οι κατασκευές με σταυρωτή επικολλητή ξυλεία (Cross-Laminated Timber – CLT, X-Lam) διαμορφώνουν ένα καινοτόμο δομικό σύστημα, που αναπτύχθηκε αρχικά στην Αυστρία και τη Γερμανία και έκτοτε αυξάνεται σε δημοτικότητα λόγω των πολλαπλών εφαρμογών του.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1990, η Αυστρία ξεκίνησε μια κοινή ερευνητική προσπάθεια, με τη συνεργασία της βιομηχανίας και των εκπαιδευτικών ιδρυμάτων, που οδήγησε στον πρωταρχικό σχεδιασμό του CLT. Η πρόοδος της έρευνας και η ένταξη του νέου υλικού στην αγορά για αρκετά χρόνια ήταν αργή, αλλά στις αρχές της δεκαετίας του 2000, η χρήση του CLT αυξήθηκε σημαντικά, χάρις, εν μέρει, στον ενθουσιασμό για τα «πράσινα» κτίρια, αλλά και λόγω αύξησης της προώθησης και διανομής του υλικού από κατασκευαστικές εταιρίες (Εικόνα 1.1).



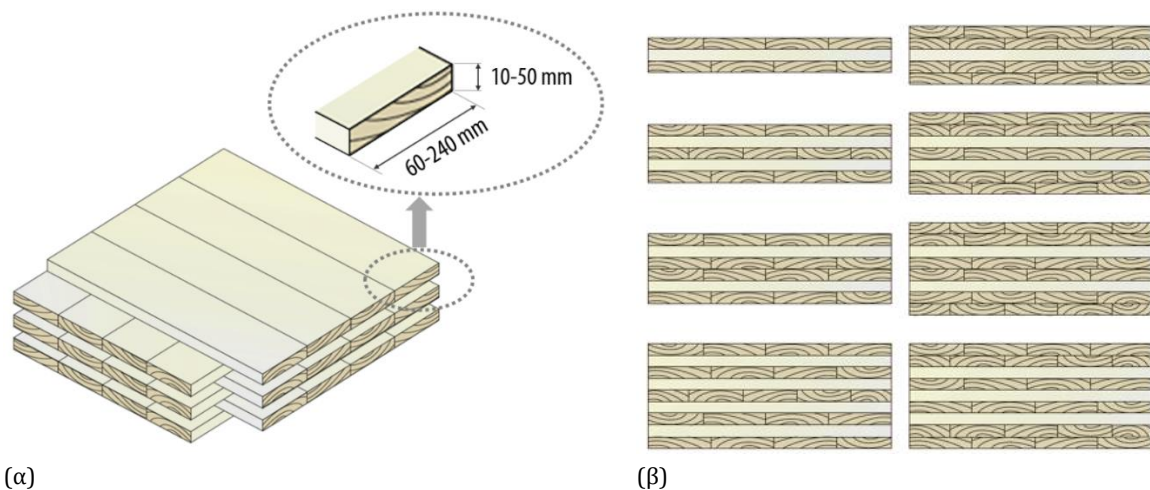
Η συνολική Ευρωπαϊκή παραγωγή CLT του περασμένου έτους έφθασε περίπου τα 670.000 m³. Ο ετήσιος ρυθμός αύξησης της παραγωγής ανέρχεται στο 15% και έτσι η προβλεπόμενη παραγωγή το 2020 φθάνει τα 1.250.000 m³/έτος.

Εικόνα 1.1: Πάνελ από CLT με 5 στρώσεις

Τα πάνελ από CLT αποτελούνται από πολλαπλές στρώσεις ξυλείας και η κάθε στρώση αποτελείται με τη σειρά της από ξύλινες σανίδες (Εικόνα 1.2α).

Το πάχος κάθε σανίδας κυμαίνεται μεταξύ 10 mm και 50 mm, το δε πλάτος της από 60 mm έως 240 mm (Εικόνα 1.2α). Οι σανίδες αυτές τοποθετούνται η μία δίπλα στην άλλη, σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα συγκολλούνται και πλευρικά, και δημιουργούν έτσι μια στρώση ξυλείας. Οι στρώσεις συγκολλούνται μεταξύ τους με τη χρήση ειδικής πρέσας και με τέτοιο τρόπο, ούτως ώστε η διεύθυνση των ινών του ξύλου κάθε στρώσης να σχηματίζει γωνία 90° με τη διεύθυνση των ινών της προηγούμενης στρώσης. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται υψηλή δυσκαμψία και αντοχή και κατά τις δύο διευθύνσεις, σε αντίθεση με την κοινή ξυλεία, όπου η αντοχή και η δυσκαμψία είναι μεγαλύτερη στη διεύθυνση παράλληλα με τις ίνες. Η εγκάρσια διατομή ενός στοιχείου CLT έχει συνήθως από τρεις έως επτά στρώσεις. Η σύνθεση των στρώσεων εξαρτάται από την τελική χρήση. Για συγκεκριμένες διαμορφώσεις, οι στρώσεις μπορεί να είναι περισσότερες ή και να τοποθετηθούν «διπλές» προς την ίδια κατεύθυνση (Εικόνα 1.2, β).

Πρόκειται για ένα δομικό σύστημα, στο οποίο μεγάλα ορθόστρωτα ξύλινα πάνελ αποτελούν τον φέροντα οργανισμό ενός κτιρίου.

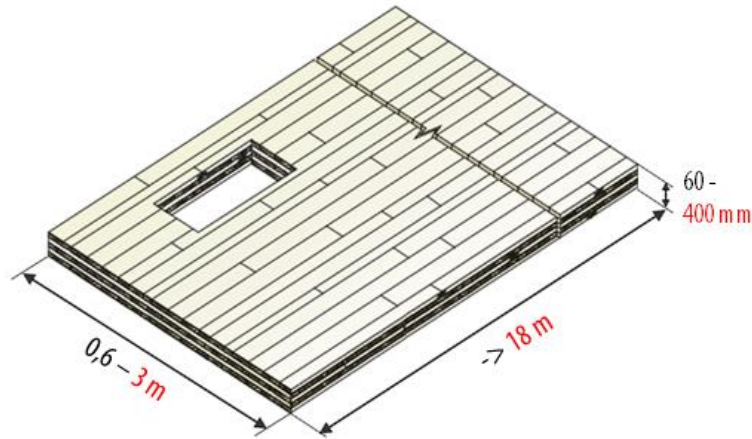


Εικόνα 1.2: (α) Διαμόρφωση ενός πάνελ από CLT

(β) Παραδείγματα δυνατοτήτων διαμόρφωσης εγκάρσιων διατομών ενός πάνελ από CLT

Οι διαστάσεις των πάνελ διαφέρουν ανάλογα με τους κατασκευαστές. Τα τυπικά πλάτη είναι 0,6, 1,2 και 3,0 m (έως και 5,0 m σε ορισμένες περιπτώσεις), ενώ το μήκος μπορεί να φτάσει τα 18 m και το πάχος τα 400 mm. Ως επί το πλείστον, οι περιορισμοί των διαστάσεων επιβάλλονται από τους κανόνες μεταφοράς.

Τα φύλλα ξύλου των εξωτερικών στρώσεων των πάνελ CLT, που χρησιμοποιούνται ως τοιχώματα, είναι συνήθως προσανατολισμένα παράλληλα με τα κατακόρυφα φορτία ώστε να μεγιστοποιηθεί η αντοχή του τοίχου. Στο ίδιο πνεύμα, οι εξωτερικές στρώσεις είναι διατεταγμένες κατά τη διεύθυνση του μεγάλου ανοίγματος σε δάπεδα και οροφές.



Εικόνα 1.3: Τυπικές διαστάσεις πάνελ από CLT

1.2. Οι κατασκευές από CLT

1.2.1. Από την κατοικία στις πολύωρφες κατασκευές

Οι πολυάριθμες κατασκευές από CLT, που έχουν χτιστεί τα τελευταία χρόνια σε όλο τον κόσμο, μαρτυρούν την ύπαρξη των ποικίλων πλεονεκτημάτων που προσφέρει, ως δομικό υλικό, στον κατασκευαστικό τομέα. Το χαμηλό ειδικό του βάρος σε σύγκριση με άλλα υλικά, καθώς και το υψηλό επίπεδο προκατασκευασμένων στοιχείων, που διευκολύνει την ταχεία ανέγερση των δομημάτων, είναι μόνο μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του, ειδικά για κατασκευές μέσου ύψους. Το συμπαγές των πάνελ προσφέρει θερμική και ακουστική μόνωση, αλλά και καλή συμπεριφορά σε περίπτωση πυρκαγιάς. Η μεταβλητότητα του σχεδίου, η ενεργειακή αποδοτικότητα, η χαμηλότερη εκπομπή αερίων θερμοκηπίου κατά την παραγωγή καθώς και ηχορύπανση κατά την κατασκευή, προστίθενται στα οφέλη των κτιρίων από CLT.

Το CLT χρησιμοποιείται πλέον πολύ συχνά, τόσο για ιδιωτικές κατοικίες όσο και για κτίρια μέσου ύψους και γίνεται ολοένα και δημοφιλέστερο ανά τον κόσμο (π.χ. [Markström et al., 2018]). Τα τελευταία χρόνια, η χρήση CLT είτε σε συνδυασμό με άλλα υλικά είτε όχι, προτείνεται για όλο και περισσότερο φιλόδοξα ύψη, που φτάνουν τους 20 ορόφους (μια λίστα των κατασκευών υπό μελέτη βρίσκεται στο www.skyscrapercenter.com). Οι παρακάτω εικόνες δείχνουν παραδείγματα χρήσης του CLT.



Εικόνα 1.4: Κατοικία (Πηγή / Αρχιτέκτονες: TRACE Architects, Lannilis, Γαλλία)



Εικόνα 1.5: Κατοικία (Πηγή / Αρχιτέκτονες: KARAWITZ Architects, Pas de Calais, Γαλλία)



Εικόνα 1.6: Κτίριο κατοικιών (Πηγή / Αρχιτέκτονες: Anssi Lassila, ΟΟΡΕΑΑ, φωτογραφία: Mikko Auerniitty)



Εικόνα 1.7: Δημόσιο κτίριο (Πηγή / Αρχιτέκτονες: ASP Architects, Saint Die des Vosges, Γαλλία)



Εικόνα 1.8: Κτίριο γραφείων
(Πηγή / Αρχιτέκτονες: Hønefoss, Νορβηγία)



Εικόνα 1.9: Οκταώροφο κτίριο CLT (Πηγή / Αρχιτέκτονες: Strandparken – Stockholm, Σουηδία)



Εικόνα 1.10: Κτίριο κατοικιών (ύψους 53m)
(Αρχιτέκτονες Acton Ostry Architects Inc., Καναδάς)



Εικόνα 1.11: Κτίριο κατοικιών (Αρχιτέκτονες : Waugh Thistleton , Λονδίνο)



Εικόνα 1.12: Κατασκευή εννέα ορόφων από CLT στο Λονδίνο
(Πηγή / Αρχιτέκτονες: Waugh Thistleton Architects, Λονδίνο)



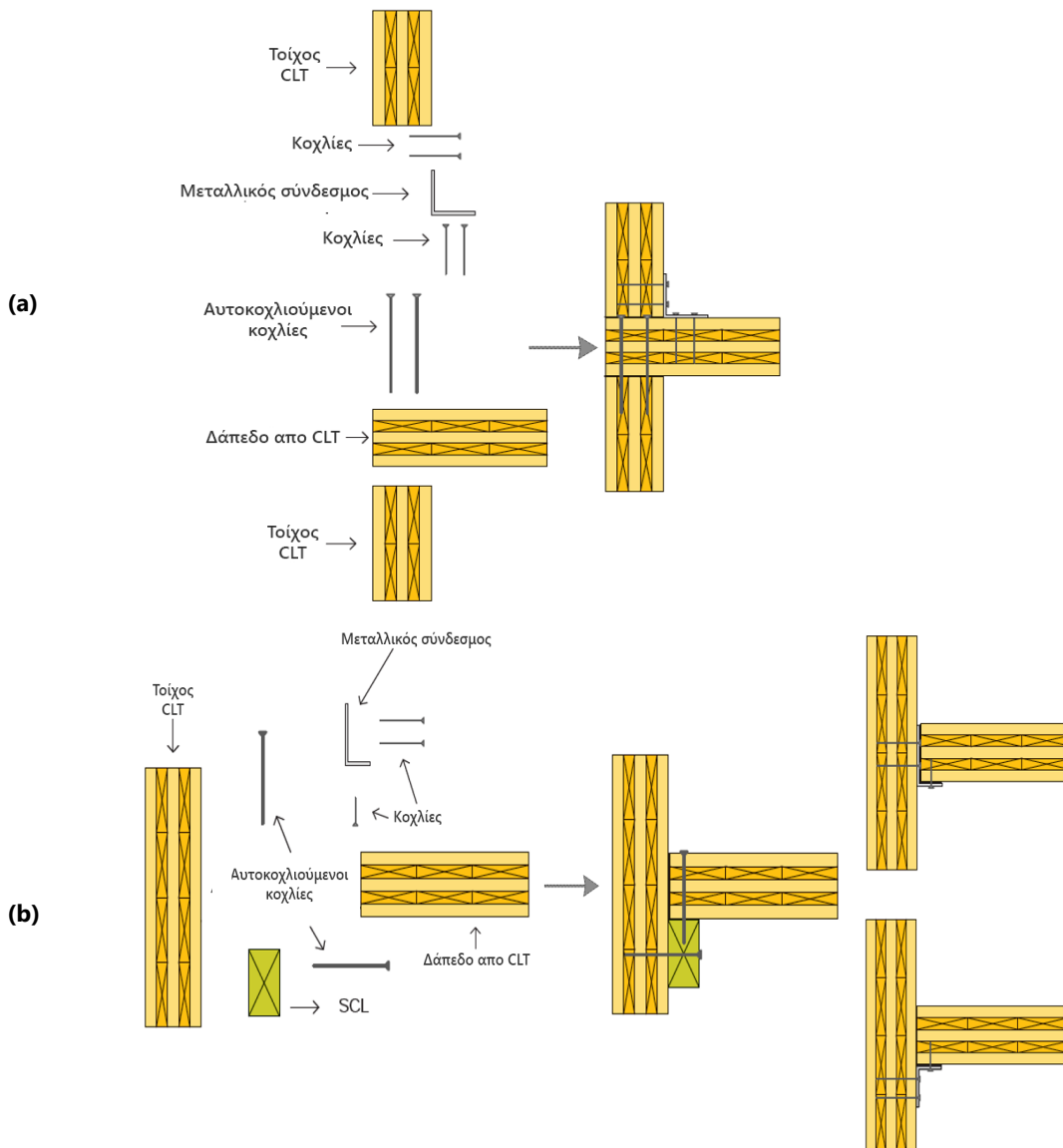
Εικόνα 1.13: Project Hyperion - Κτίριο κατοικιών 18 ορόφων, βρίσκεται σε φάση μελέτης. (Αρχιτέκτονας: Jean Paul Viguier , Bordeaux)

1.2.2. Τα διαφορετικά είδη κατασκευών από CLT

Οι κατασκευές από CLT διαχωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Η διάκριση γίνεται με βάση τη σύνδεση των οριζόντιων διαφραγμάτων με τους εξωτερικούς φέροντες τοίχους, δηλαδή με το τρόπο κατασκευής. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι κατασκευές τύπου «πλατφόρμας» (platform type) και οι κατασκευές με το «σύστημα του κλωβού» (balloon type).

Με το «σύστημα της πλατφόρμας» το δάπεδο εκτείνεται ως τις εξωτερικές παρειές του κτίσματος, εξασφαλίζοντας στα πρώτα στάδια της κατασκευής μια «πλατφόρμα», πάνω στην οποία στηρίζονται οι εξωτερικοί τοίχοι, καθώς και τα εσωτερικά χωρίσματα ανά όροφο. Αντίθετα, με το «σύστημα κλωβού» οι τοίχοι δεν διακόπτονται σε κάθε όροφο, αλλά είναι συνεχείς από την επιφάνεια θεμελίωσης μέχρι το γείσο της στέγης, ενώ τα δάπεδα συνδέονται επάνω τους είτε με μεταλλικές συνδέσεις (όπως στο «σύστημα πλατφόρμας») είτε με τη χρήση οριζόντιων ξύλινων στοιχείων. Στην Ευρώπη το «σύστημα κλωβού» έχει πλέον αντικατασταθεί σχεδόν πλήρως με το «σύστημα πλατφόρμας», το οποίο υπερτερεί στο σχεδιασμό, στην ανέγερση, καθώς και στη φέρουσα ικανότητα. Δάπεδα «balloon type» συναντώνται πλέον μόνο σε μη κατοικήσιμες κατασκευές (αγροτικές, βιομηχανικές..) συνήθως με σκοπό την κατασκευή ημιωρόφων.

Στην εργασία αυτή, θα μας απασχολήσουν μόνον κατασκευές τύπου «πλατφόρμας». Οι διαφορές στη συνδεσμολογία φαίνονται στην Εικόνα 1.14.

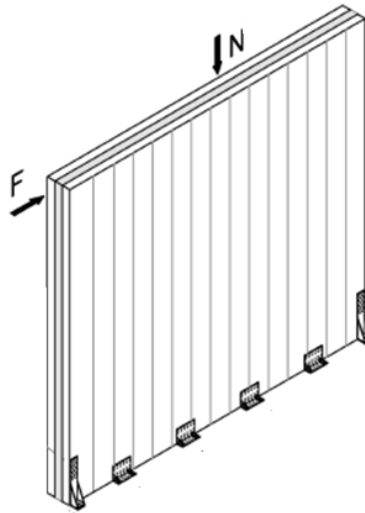


Εικόνα 1.14: Οι δύο βασικοί τρόποι στήριξης ενδιάμεσων πατωμάτων : (a) platform type (b) balloon type

1.3. Οι ιδιαιτερότητες της συμπεριφοράς των κατασκευών από CLT υπό πλευρικά φορτία – εισαγωγή στα μη γραμμικά φαινόμενα

Η παράγραφος αυτή αποτελεί μια εισαγωγή στα επόμενα κεφάλαια. Αντιλαμβάνεται κανείς εύκολα πως το δομικό σύστημα με πάνελ CLT ξεφεύγει από τις συνήθεις πρακτικές του πολιτικού μηχανικού και διαφέρει για πολλούς λόγους από τους φορείς με πλαίσια και στοιχεία τύπου δοκού. Εδώ, οι ξύλινοι τοίχοι αποτελούν το φέροντα οργανισμό και αναλαμβάνουν τα φορτία βαρύτητας, αλλά και τις οριζόντιες φορτίσεις, όπως ο άνεμος και ο σεισμός. Η διαφορετική γεωμετρία, σε συνδυασμό με τη συνήθη συνδεσμολογία που την ακολουθεί, έχει ως αποτέλεσμα ένα εκ φύσεως μη γραμμικό σύστημα, όπως θα δούμε παρακάτω.

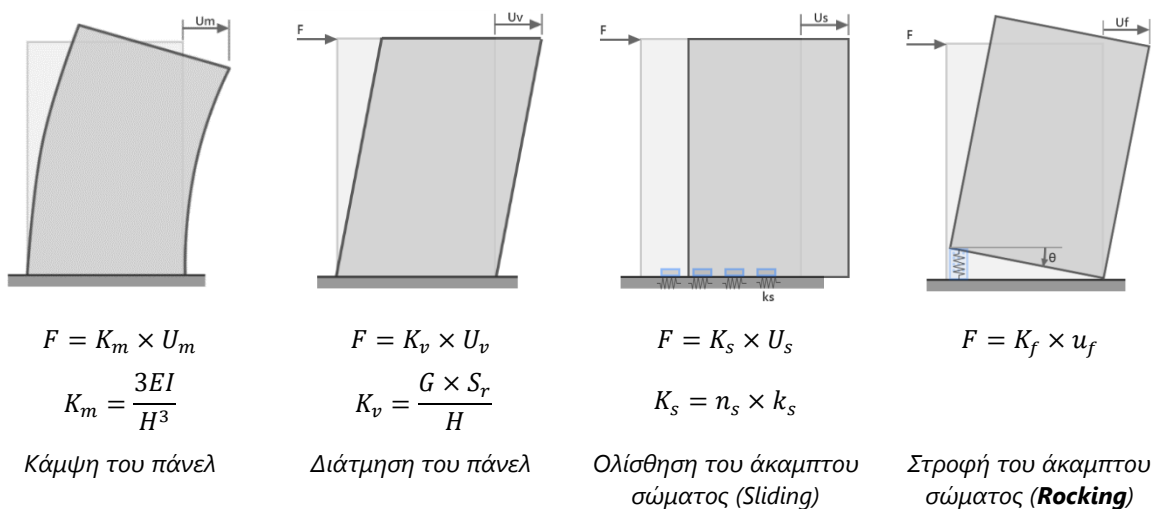
1.3.1. Εισαγωγή στη συμπεριφορά ενός μεμονωμένου πάνελ



Εικόνα 1.15: Ένα μεμονωμένο πάνελ από CLT και οι μεταλλικοί σύνδεσμοι που το στηρίζουν

Για να επεξηγηθεί η καθολική απόκριση μιας κατασκευής, είναι ενδιαφέρον να εξεταστεί σχηματικά η συμπεριφορά ενός μεμονωμένου πάνελ υποβαλλόμενου σε μια οριζόντια δύναμη F και μια κατακόρυφη δύναμη N , όπως φαίνεται στην εικόνα 1.15. Στην εν λόγω εικόνα φαίνονται και οι μεταλλικές γωνιακές στηρίξεις που ενώνουν συνήθως τα πάνελ CLT με τα δάπεδα.

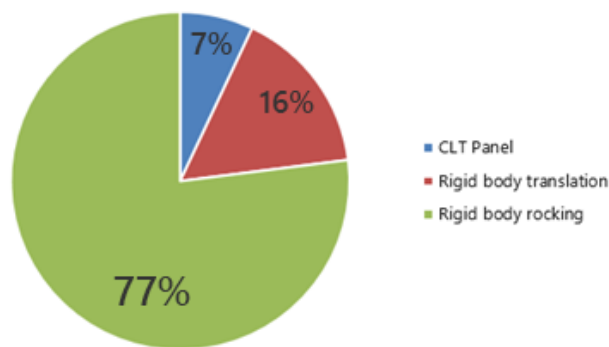
Υπό αυτή τη φόρτιση, η συνολική οριζόντια μετατόπιση Δ του πάνελ υπολογίζεται μέσω της υπέρθεσης τεσσάρων μηχανισμών παραμόρφωσης, που φαίνονται στην εικόνα 1.16.



Εικόνα 1.16: Οι τέσσερις μηχανισμοί παραμόρφωσης ενός πάνελ υπό μια οριζόντια φόρτιση

Οι δύο πρώτες μετατοπίσεις U_m και U_s σχετίζονται με την καμπτική και τη διατμητική παραμόρφωση αντίστοιχα του ίδιου του πάνελ και υπολογίζονται εύκολα. Οι δύο τελευταίοι μηχανισμοί σχετίζονται άμεσα με την παραμόρφωση των μεταλλικών συνδέσμων στη βάση του πάνελ. Στο τρίτο εικονίδιο, φαίνεται η ολίσθηση του πάνελ, ως άκαμπτου σώματος, το μέγεθος της οποίας καθορίζεται από τη δυσκαμψία k_s των διατμητικών συνδέσμων. Στο τέταρτο εικονίδιο, φαίνεται η περιστροφή του πάνελ περί την ακμή του, ως άκαμπτου σώματος, το μέγεθος της οποίας καθορίζεται από τη δυσκαμψία των συνδέσμων σε εφελκυσμό, καθώς όμως και από άλλες παραμέτρους, όπως το μέγεθος του πάνελ. Οι δύο τελευταίες παραμορφώσεις οφείλονται στο γεγονός ότι τα πάνελ είναι πρακτικά μερικώς συνδεδεμένα με τα δάπεδα και όχι πλήρως, συνεπώς οι τάσεις δεν μεταφέρονται όπως στην κλασική δομική μηχανική.

Πολλά άρθρα αναλύουν τη συμμετοχή καθενός εξ' αυτών των τεσσάρων τρόπων παραμόρφωσης στη συνολική μετατόπιση του πάνελ. Παρόλο που η συμμετοχή αυτή εξαρτάται από πολλές παραμέτρους, όπως η φόρτιση, η συνδεσμολογία και οι διαστάσεις του πάνελ, όλοι οι συγγραφείς αναδεικνύουν την ουσιώδη σημασία της παραμόρφωσης των συνδέσμων. Η εικόνα 1.17, για παράδειγμα, αναπαριστά τα αποτελέσματα των Casagrande et al. [2015].



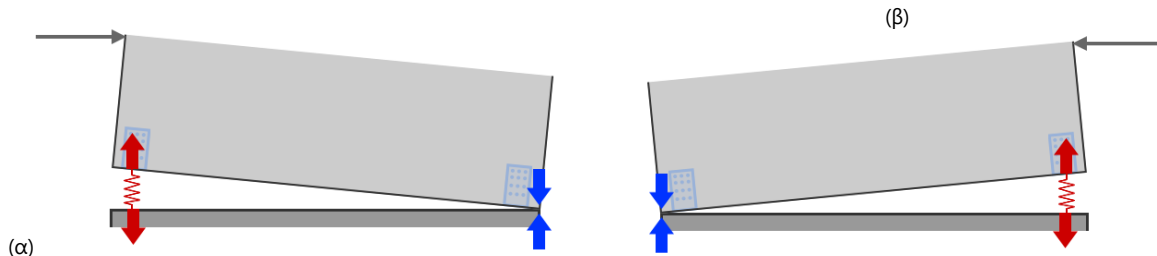
Εικόνα 1.17: Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε τρόπου παραμόρφωσης σύμφωνα με [Casagrande et al., 2015]

Στο παραπάνω διάγραμμα (Εικόνα 1.17) παρατηρούμε πως η καμπτική και η διατμητική παραμόρφωση του ίδιου του πάνελ αποτελεί ένα πολύ μικρό ποσοστό της συνολικής μετατόπισης (7%). Το μεγαλύτερο ποσοστό οφείλεται στις παραμορφώσεις των μεταλλικών συνδέσμων και συνεπώς στην κίνηση του πάνελ ως στερεό σώμα σε ολίσθηση και κυρίως σε στροφή.

Η στροφή του πάνελ υπό δυναμική φόρτιση οδηγεί σε λικνιστική απόκριση (rocking), που αποτελεί τη βασική ιδιαιτερότητα της συμπεριφοράς των κατασκευών από CLT. Το ανασήκωμα του πάνελ καθιστά το σύστημα, όπως θα δούμε παρακάτω, γεωμετρικά μη γραμμικό.

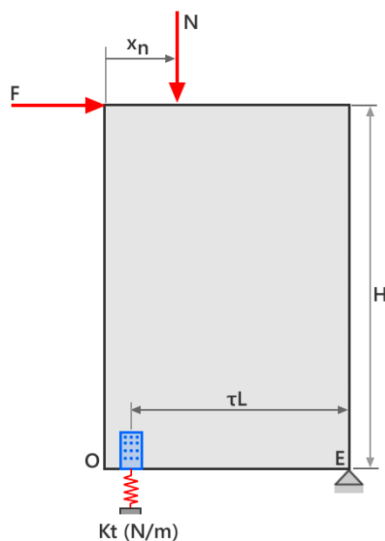
1.3.2. Επεξήγηση της γεωμετρικής μη γραμμικότητας του δομικού συστήματος.

Με σκοπό την επεξήγηση της γεωμετρικής μη γραμμικότητας, κάνουμε εδώ κάποιες απλοποιητικές παραδοχές για τη φόρτιση και το προσομοίωμα. Για την ανάδειξη του μη γραμμικού φαινομένου αρκεί να υποθέσουμε ένα άκαμπτο πάνελ στηριζόμενο σε δύο ελατήρια στις άκρες του και υποβαλλόμενο σε μια οριζόντια δύναμη F και μια κατακόρυφη δύναμη N . Τα ελατήρια αυτά υπό εφελκυστικές δυνάμεις έχουν τη δυσκαμψία του μεταλλικού συνδέσμου K_t , ενώ υπό θλιπτικές δυνάμεις προσομοιώνουν την επαφή και είναι άκαμπτα (δυσκαμψία που τείνει στο άπειρο).



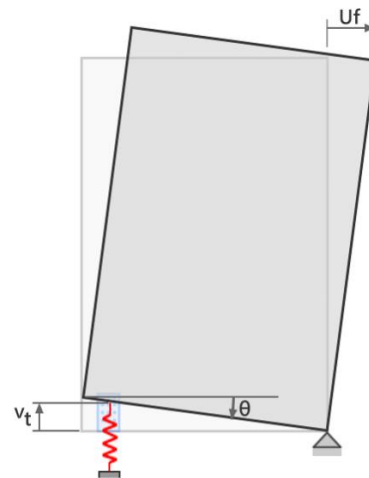
Εικόνα 1.18: (α) Θλίψη δεξιά, εφελκυσμός αριστερά, (β) Θλίψη αριστερά, εφελκυσμός δεξιά

Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.18, η δυσκαμψία του ελατηρίου που «ενεργοποιείται» εξαρτάται από τη φορά της φόρτισης. Συνεπώς, υπό μια δυναμική φόρτιση που αλλάζει συνεχώς φορά το μητρώο δυσκαμψίας του προσομοιώματος θα μεταβαλλόταν συνεχώς.



$$F_t \times \tau L + N(L - x_N) - FH = 0$$

Εικόνα 1.19: Ισορροπία γύρω από το σημείο E



$$F_t = K_t \cdot v_t = K_t \cdot \tau L \cdot \theta$$

Εικόνα 1.20: Εφελκυστική αντίδραση του συνδέσμου

Κάνοντας την παραδοχή άκαμπτης βάσης, μπορούμε με απλό τρόπο να αναδείξουμε, χρησιμοποιώντας την ισορροπία γύρω από το σημείο E και την εφελκυστική αντίδραση του συνδέσμου, πως η οριζόντια μετατόπιση που οφείλεται στο ανασήκωμα του πάνελ μπορεί να εκφραστεί ως :

$$F = K_f \cdot u_f + N \frac{(L - x_N)}{H}$$

Όπου :

$$K_f = K_t \cdot \frac{(\tau L)^2}{H^2}$$

Η παραμόρφωση του συνδέσμου όμως θα πραγματοποιηθεί μόνον εάν το πάνελ ανασηκωθεί, δηλαδή εάν ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$F > F_q = \frac{N(L - x_N)}{H}$$

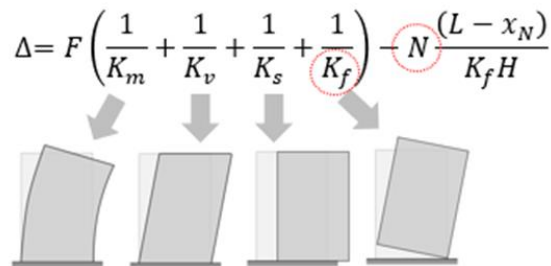
Η συνολική οριζόντια μετατόπιση Δ του πάνελ υπό την εν λόγω καταπόνηση ορίζεται ως εξής :

Αν $F < F_q$:

$$\Delta = F \left(\frac{1}{K_m} + \frac{1}{K_v} + \frac{1}{K_s} \right)$$

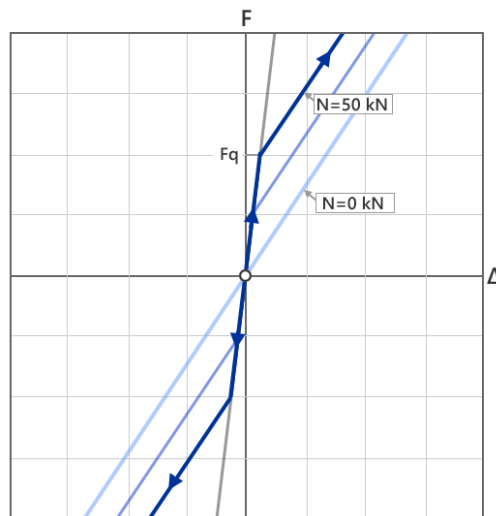
Αν $F > F_q$:

$$\Delta = F \left(\frac{1}{K_m} + \frac{1}{K_v} + \frac{1}{K_s} + \frac{1}{K_f} \right) - N \frac{(L - x_N)}{K_f H}$$



Εικόνα 1.21: Υπέρθση τεσσάρων μηχανισμών παραμόρφωσης

Η συμπεριφορά αυτή φαίνεται για συνδυασμούς δυνάμεων στο διάγραμμα της εικόνας 1.22:



Εικόνα 1.22: Διαγράμματα δύναμης-σχετικής μετατόπισης που προκύπτουν από στατικές επιλύσεις με σταδιακή αύξηση του οριζόντιου φορτίου

Το διάγραμμα 1.22 φανερώνει τη μη γραμμική συμπεριφορά στο απλό αυτό σύστημα πάνελ-δαπέδου, που έχουμε υποθέσει εδώ, αλλά και ταυτόχρονα τη γενικότερη γεωμετρική μη γραμμικότητα της λικνιστικής απόκρισης των τοίχων από CLT. Παρατηρούμε την απότομη αλλαγή της δυσκαμψίας του συστήματος μόλις η οριζόντια φόρτιση ξεπεράσει την ελάχιστη τιμή ανασηκώματος F_q . Το διάγραμμα δείχνει συνεπώς και τη σημαντική επιρροή των κατακόρυφων φορτίων (όπου εδώ προσομοιώνονται απλοποιητικά μέσω της σημειακής φόρτισης N) στο καθολικό μητρώο δυσκαμψίας.

1.3.3. Εισαγωγή στο λικνισμό

Στο παραπάνω κεφάλαιο (§1.3.2) δείξαμε με στατικές φορτίσεις, πως το ανασήκωμα του πάνελ συνεπάγεται μη γραμμική συμπεριφορά του συστήματος. Όμως, η λικνιστική απόκριση (rocking) σωμάτων, αποτελεί στην πραγματικότητα ένα περίπλοκο δυναμικό φαινόμενο, που πέραν της συμπεριφοράς των στηρίξεων εξαρτάται από την επιτάχυνση του παλμού, τη συχνότητα διέγερσης, τη ακολουθία των παλμών, τη λυγηρότητα του σώματος, τα υλικά και άλλες παραμέτρους.

Η μελέτη του λικνισμού παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον και βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς της μηχανικής. Ενδεικτικά αναφέρονται εδώ οι εξής :

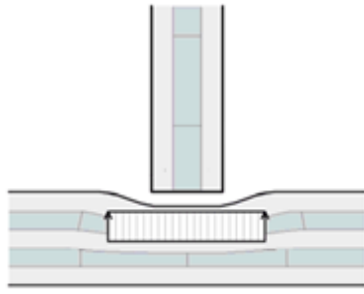
- Μελέτη λικνιστικής απόκρισης άκαμπτων σωμάτων σε άκαμπτη βάση [Yim et al. 1980][Taniguchi, 2001], [Dimitrakopoulos et al., 2012] [Voyagaki, 2013] [Voyagaki et al., 2014][Bachmann et al., 2017]. Η μελέτη αυτή βρίσκει εφαρμογή σε ρωμαϊκά και αρχαιοελληνικά μνημεία, σε κολώνες, σε εκθέματα, έπιπλα κτλ.
- Μελέτη λικνιστικής απόκρισης άκαμπτων σωμάτων σε ενδόσιμη βάση [Housner, 1963], [Psycharis et al., 1983], [Apostolou et al., 2007], [Spanos et al., 2017], [Ther, 2017]. Η βάση μπορεί να θεωρηθεί ελαστική ή ανελαστική. Η μελέτη βρίσκει εφαρμογή στον αντισεισμικό σχεδιασμό κτιρίων, που αποκολλώνται από τη βάση τους και ευρέως στην εδαφομηχανική στον σχεδιασμό επιφανειακών θεμελιώσεων.
- Μελέτη λικνιστικής απόκρισης καμπτόμενων σωμάτων σε ενδόσιμη ή ανένδοτη βάση [Vassiliou et al., 2017] [Avgenakis et al., 2017]. Η μελέτη αυτή βρίσκει εφαρμογή σε πλασιωτούς φορείς και τμήματα φορέων, σχεδιασμένων, ούτως ώστε να ανασηκώνονται.
- Μελέτη λικνιστικής απόκρισης ειδικά σχεδιασμένων αποσβεστήρων και μηχανισμών. Εδώ ο λικνισμός είναι επιθυμητός και ελεγχόμενος. Συχνά επιβάλλονται επιπλέον δυνάμεις, που σε συνδυασμό με το βάρος αντιτίθενται στην ανατροπή. Οι δυνάμεις επιβάλλονται μέσω ειδικών στηρίξεων ή προέκτασης. Η απόσβεση μέσω ελεγχόμενου λικνισμού συχνά συναντάται στη βιβλιογραφία ως controlled rocking και βρίσκει εφαρμογή σε τοίχους, αλλά και σε γέφυρες και πλαίσια [Palermo et al., 2004], [Wiebe et al. 2012], [Kovacs et al. 2017] [Sarti et al., 2017].

Η αναφορές στη βιβλιογραφία περί λικνισμού εδώ είναι ενδεικτικές, καθώς στην πραγματικότητα υπάρχουν πολύ περισσότερα άρθρα και μελετητές που έχουν ασχοληθεί με το φαινόμενο, είτε μέσω της ανάπτυξης αναλυτικών λύσεων, είτε μέσω διεξαγωγής πειραμάτων, είτε μέσω αριθμητικής προσομοίωσης σε λογισμικά. Περισσότερες αναφορές μπορούν να βρεθούν στις διατριβές [Voyagaki, 2013] και [Ther, 2017]. Τα πειράματα σε κατασκευές από CLT, που θα αναφερθούν στα επόμενα κεφάλαια αποτελούν κι αυτά ένα είδος διερεύνησης φαινομένων rocking.

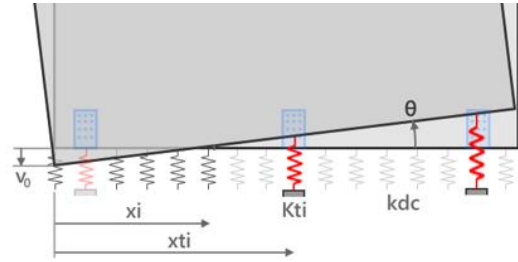
Όπως προαναφέρθηκε, κάποιοι φορείς είναι σχεδιασμένοι ούτως ώστε να ανασηκώνονται. Αυτό οφείλεται στο ότι, ο λικνισμός, παρόλη την περιπλοκότητα του, αποτελεί ένα είδος μόνωσης και αποσβένει ενέργεια κατά τη σεισμική διέγερση, όπως και η διαρροή μελών. Παρομοίως με την περίπτωση της διαρροής, η λικνιστική απόκριση αλλάζει την ιδιοπερίοδο της κατασκευής και επομένως γίνεται εμπόδιο σε φαινόμενα συντονισμού. Ένα από τα περιπλοκότερα ζητήματα στη διερεύνηση της λικνιστικής απόκρισης σωμάτων είναι η απορρόφηση ενέργειας μέσω πρόσκρουσης (impact).

Η περίπτωση των πάνελ από CLT είναι ένας συνδυασμός ελεγχόμενου λικνισμού καμπτόμενων σωμάτων σε ενδόσιμη βάση. Ο λικνισμός ελέγχεται και περιορίζεται σε πολύ μεγάλο βαθμό κατά τη σχεδίαση των κατασκευών, μέσω της επιλογής των μεταλλικών συνδέσμων που ενώνουν τα πάνελ. Η κίνηση μάλιστα των πάνελ περιορίζεται περαιτέρω με την ύπαρξη των διαφραγμάτων. Η βάση είναι ενδόσιμη και θεωρείται συχνά ελαστική. Τα φαινόμενα πρόσκρουσης δεν προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία και συχνά αμελούνται στις αναλύσεις κατασκευών από CLT, καθώς τα πάνελ αποσβένουν ενέργεια κατά κύριο λόγο μέσω των πλάστιμων συνδέσεων τους.

Δεδομένου ότι οι τοίχοι από CLT στηρίζονται σε δάπεδα αποτελούμενα κι αυτά από CLT (κατασκευές τύπου «πλατφόρμας»), η ενδοσιμότητα της βάσης δεν μπορεί να αγνοηθεί (όπως έγινε στο παράδειγμα της παραγράφου 1.3.2) και η επαφή των πάνελ στις διεπιφάνειες (contact) προσομοιώνεται στη παρούσα εργασία μέσω μιας πληθώρας ελατηρίων μηδενικής εφελκυστικής αντοχής.



Εικόνα 1.23: Τομή επαφής τοίχου με δάπεδο από CLT



Εικόνα 1.24: Μήκος θλιβόμενης ζώνης x_i

Η ενδοσιμότητα της βάσης εισάγει πρόσθετους βαθμούς ελευθερίας, σε σχέση με την περίπτωση της άκαμπτης βάσης. Ένας τοίχος επί ενδόσιμου δαπέδου μπορεί να υποστεί περιστροφική κίνηση μικρών στρωφών χωρίς να χάσει την επαφή με το δάπεδο. Η λικνιστική απόκριση χαρακτηρίζεται πλέον, κατά κανόνα από ανασήκωμα στη μία άκρη του τοίχου και βύθιση στην άλλη. Όπως φαίνεται στην εικόνα 1.24 το μήκος της θλιβόμενης ζώνης x_i αποτελεί μια επιπλέον άγνωστη μεταβλητή. Κατά το λικνισμό των τοίχων διακρίνονται συνεπώς δύο φάσεις: (α) φάση πλήρους επαφής τοίχου-δαπέδου, κατά την οποία ο πόλος περιστροφής είναι το κέντρο του τοίχου και (β) μη γραμμική φάση για γωνίες στρώφης μεγαλύτερες από την κρίσιμη γωνία ανασήκωματος, κατά την οποία ο πόλος περιστροφής είναι μεταβαλλόμενος και είναι το κέντρο της εκάστοτε επιφάνειας επαφής.

1.4. Κίνητρο, σκοπός και περιεχόμενο της εργασίας

Από την συνοπτική παρουσίαση του δομικού συστήματος με πάνελ από CLT (υποκεφάλαια 1.1 και 1.2) φαίνεται ότι, το νέο αυτό υλικό αποτελεί ένα πολλά υποσχόμενο προϊόν κατεργασμένης ξυλίας, ακόμη και για κατασκευές μεγάλου ύψους. Ο λόγος πίσω από το ακμάζον ενδιαφέρον για τις ξύλινες πολυώροφες κατασκευές δεν είναι μόνον η ανάγκη για τέτοιου μεγέθους βιώσιμα κτίρια, αλλά, ειδικά στην περίπτωση του CLT, και η εξαιρετική τους απόδοση και φέρουσα ικανότητα. Επιπλέον, οι κατασκευές από CLT διαθέτουν κάποια εγγενή χαρακτηριστικά που τις καθιστούν κατάλληλες για χρήση σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα. Τόσο λόγω των ιδιοτήτων του υλικού (μικρό ειδικό βάρος, υψηλή φέρουσα ικανότητα), όσο και λόγω των ιδιοτήτων των μεταλλικών συνδέσμων (πλαστικότητα και ικανότητα απορρόφησης ενέργειας), οι κατασκευές από CLT συμπεριφέρονται καλά υπό σεισμική διέγερση [Cecotti et al., 2006a].

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολυάριθμες πειραματικές και αριθμητικές διερευνήσεις, εκ των οποίων εντυπωσιακά παραδείγματα είναι τα πειράματα σε σεισμική τράπεζα ενός επταώροφου κι ενός τριώροφου κτιρίου από CLT [Cecotti et al., 2013]. Δεν είναι δυνατόν βέβαια να εξαχθούν μαθηματικές σχέσεις απευθείας από τέτοια περίπλοκα πειράματα, επιβεβαιώνεται όμως η καλή «φυσική» συμπεριφορά των κτιρίων αυτών υπό σεισμική καταπόνηση. Το γεγονός αυτό ενθαρρύνει την έρευνα της σεισμικής συμπεριφοράς τέτοιων κατασκευών με στόχο τη χρήση του CLT ακόμη και σε έντονα σεισμογενείς περιοχές.

Ωστόσο, οι κατασκευές από CLT δεν είναι α priori αντισεισμικές. Απαιτείται ο κατάλληλος σχεδιασμός των δομικών στοιχείων για να εξασφαλιστεί η επάρκεια της μηχανικής συμπεριφοράς κατά τη διάρκεια ενός σειμού. Όπως μάλιστα προαναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο 1.3, όταν ο φέρων οργανισμός αποτελείται από πάνελ, το σύστημα παρουσιάζει μια εγγενή γεωμετρική μη γραμμικότητα. Το μητρώο δυσκαμψίας του συστήματος εξαρτάται από τις εξωτερικές φορτίσεις, συνεπώς η εύρεση των ιδιομορφών και ο υπολογισμός των ιδιοπεριόδων, που αποτελούν προαπαιτούμενο των περισσότερων αντισεισμικών μεθόδων ανάλυσης, είναι αδύνατη εξαρχής.

Στο πλαίσιο αυτό, στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μη γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες σε ένα δώροφο και ένα οκτώροφο προσομοίωμα κτιρίου από CLT. Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης, λήφθηκαν υπόψιν οι μη γραμμικότητες των υλικών, μέσω κατάλληλων υστερητικών προσομοιωμάτων για την πλαστική συμπεριφορά των μεταλλικών συνδέσμων, καθώς και για τα φαινόμενα τριβής στις διεπιφάνειες. Η γεωμετρική μη γραμμικότητα λήφθηκε υπόψιν μέσω της προσομοίωσης της επαφής και της ενδοσιμότητας των πάνελ. Για την προσομοίωση της υστέρησης, της επαφής (contact) και της τριβής αναπτύχθηκε κώδικας, που ελέγχει τη συμπεριφορά επιλεγμένων στοιχείων στους φορείς.

Η διπλωματική αυτή εργασία ακολουθεί έως ένα σημείο την διδακτορική διατριβή του Hummel [2017] επιλέγοντας να προσομοιώσει τους ίδιους μεταλλικούς συνδέσμους, τους ίδιους τοίχους και κτίρια ίδιας κάτοψης με σκοπό την συνεχή σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της διατριβής. Ενώ στη διατριβή [Hummel, 2017]

το επίκεντρο μελέτης αποτελεί η μη γραμμική στατική ανάλυση (pushover), στην εργασία αυτή αποτελεί η ανάλυση με χρονοϊστορίες. Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι η εξαγωγή περισσότερων αποτελεσμάτων για την καθολική συμπεριφορά, καθώς και για τις εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στους συνδέσμους. Κεντρικό θέμα της εργασίας, αποτελεί επίσης η σύγκριση των αποτελεσμάτων προσομοίωσης με και χωρίς τριβή, ενώ δευτερεύον θέμα αποτελεί η σύγκριση με κλασσικές μεθόδους ανάλυσης. Τα φαινόμενα τριβής, ενώ, όπως θα παρουσιασθεί, επηρεάζουν αισθητά την συμπεριφορά των κατασκευών από CLT, πολύ συχνά παραλείπονται κατά την προσομοίωση. Η σημασία της τριβής έχει σημειωθεί από τους Hummel [2017] και Follesa et al. [2013], όμως δεν υπάρχει στη βιβλιογραφία μια συστηματική αριθμητική ή πειραματική μελέτη της επιρροής της σε πολύωροφες κατασκευές από CLT.

Ειδικότερα, μετά από αυτό το πρώτο κεφάλαιο εισαγωγής στο δομικό σύστημα με πάνελ από CLT, συνοπτικής παρουσίασης των ιδιαιτεροτήτων του, αλλά και του ενδιαφέροντος που παρουσιάζει η περαιτέρω διερεύνηση της συμπεριφοράς του υπό σεισμικές δράσεις, η εργασία αναπτύσσεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των μεταλλικών συνδέσμων, που θα χρησιμοποιηθούν στην προσομοίωση των φορέων, και της υστερητικής τους συμπεριφοράς. Περιγράφεται επίσης η διαδικασία ανάπτυξης κατάλληλου υστερητικού προσομοιώματος και στη συνέχεια στοιχείων χρήστη (user elements) συμβατά με το λογισμικό ABAQUS για την προσομοίωση τόσο των μεταλλικών συνδέσμων, όσο και της επαφής και της τριβής στις διεπιφάνειες. Τέλος, συγκρίνονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών προσομοιώσεων των επιμέρους στοιχείων με πειραματικά αποτελέσματα.

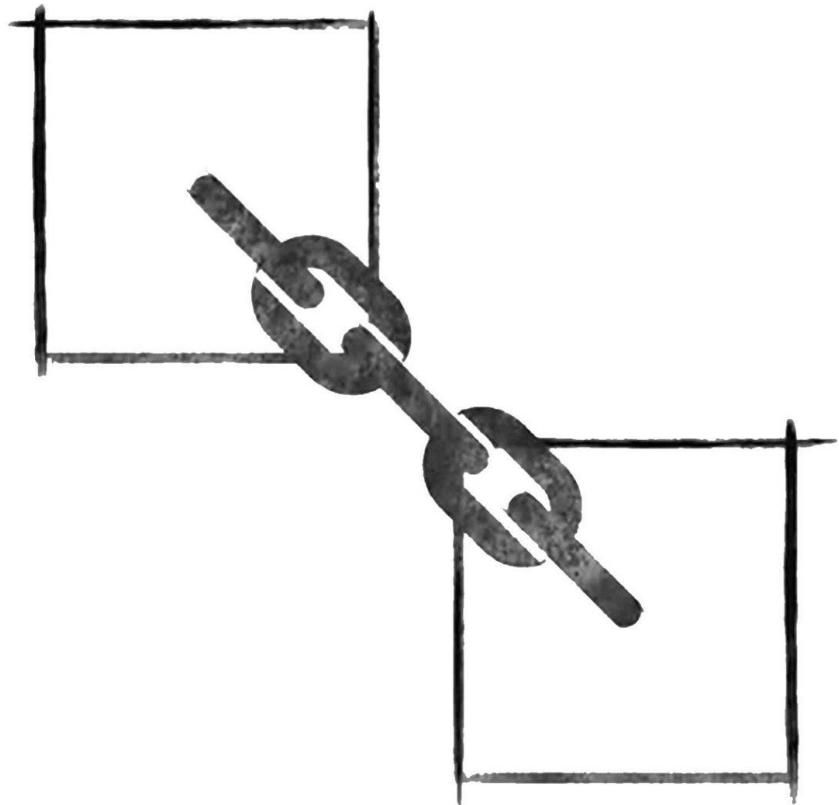
Στο Κεφάλαιο 3 αναπαράγονται πειράματα ανακυκλικών φορτίσεων σε πάνελ από CLT με κατάλληλα προσομοιώματα στο ABAQUS και με τη χρήση των user elements. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με πειραματικά αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται η διαδικασία μη γραμμικής ανάλυσης με χρονοϊστορίες σε δύο προσομοιώματα κτιρίων από CLT. Αρχικά παρουσιάζονται τα προσομοιώματα, οι παράμετροι ανάλυσης και οι επτά σεισμικές διεγέρσεις που επιλέχτηκαν. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα 30 δυναμικών αναλύσεων. Ακολουθεί η σύγκριση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με και χωρίς τριβή, καθώς και η σύγκρισή τους με τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων του Hummel [2017].

Η συνοπτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με εφαρμογή κλασσικών μεθόδων ανάλυσης (στατική ανάλυση με ισοδύναμες οριζόντιες φορτίσεις και ιδιομορφική φασματική μέθοδο) για ισοδύναμη σεισμική καταπόνηση, καθώς και η σύγκριση τους με τα αποτελέσματα του κεφαλαίου 4, βρίσκεται στο παράρτημα Α. Η επιλογή αυτή έγινε κυρίως για λόγους δομής κειμένου, καθώς οι κλασσικές μέθοδοι ανάλυσης πραγματοποιήθηκαν σε διαφορετικό λογισμικό και τα αποτελέσματα τους δεν επηρεάζουν τη μη γραμμική μέθοδο ανάλυσης με χρονοϊστορίες.

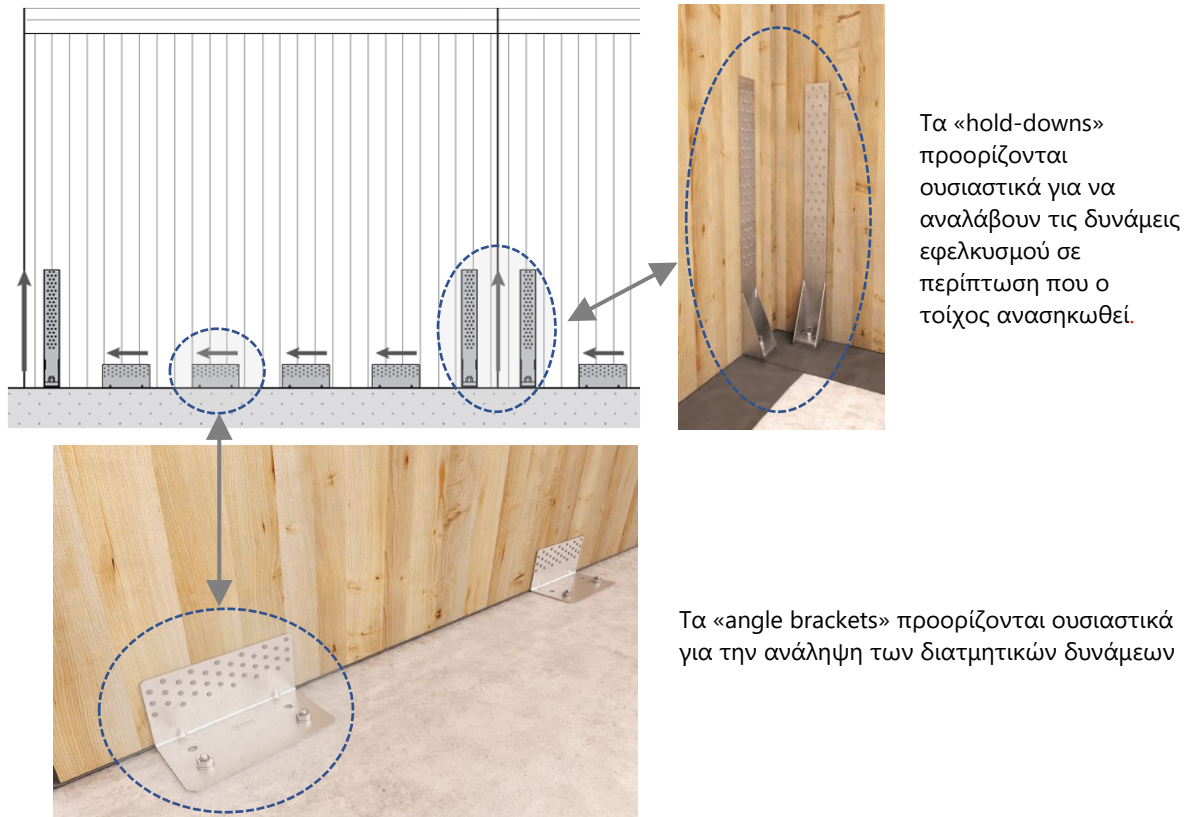
Η συνθετική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των επί μέρους συγκρίσεων, καθώς και η σύνοψη των κυριότερων συμπερασμάτων αποτελούν το τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας (Κεφάλαιο 5).

2. Χαρακτηριστικά και προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων



2.1. Περιγραφή των μεταλλικών συνδέσμων στις κατασκευές από CLT

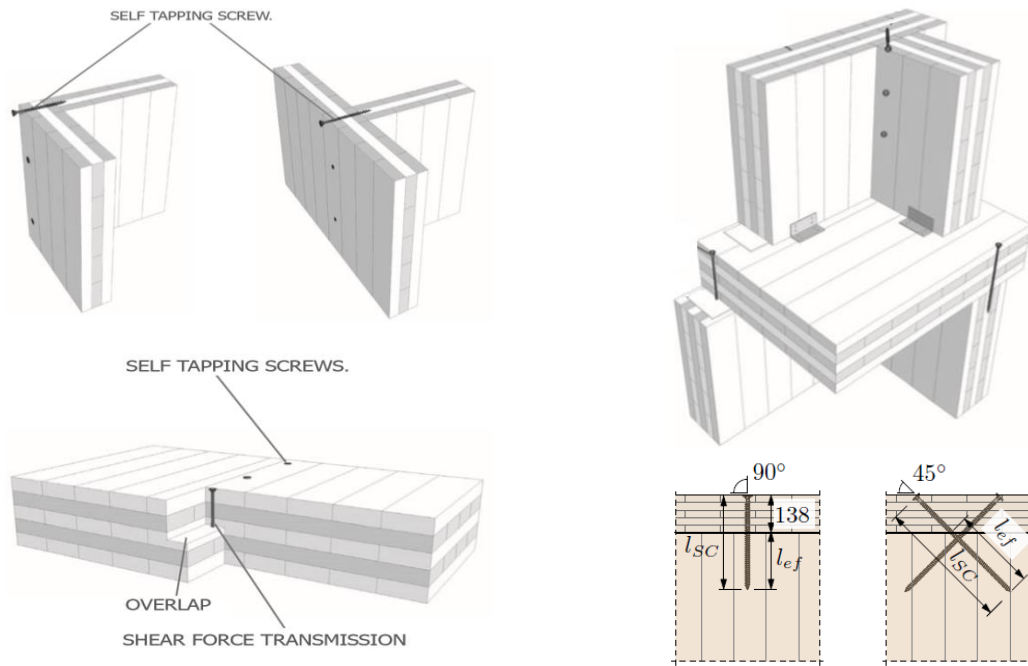
Στην πράξη, στις κατασκευές από CLT χρησιμοποιούνται πάνελ συνδεδεμένα μεταξύ τους με διάφορους τύπους μεταλλικών συνδέσμων. Οι τοίχοι συνδέονται συνήθως με τη θεμελίωση και τα δάπεδα με δύο τύπους μεταλλικών γωνιακών στηριγμάτων: τα hold-downs και τα angle brackets (ή sliding brackets). Οι μεταλλικές πλάκες των δύο αυτών στηρίξεων συνδέονται στους τοίχους με ήλους και στα δάπεδα με βλήτρα ή κοχλίες (Εικόνα 2.1).



Εικόνα 2.1: Η θέση των μεταλλικών συνδέσμων: angle brackets και hold-downs

Τα hold-downs τοποθετούνται στις άκρες των τοίχων με σκοπό να παραλάβουν τις εφελκυστικές δυνάμεις, που τείνουν να ανασηκώσουν τα πάνελ, ενώ τα angle brackets τοποθετούνται κατά μήκος, σε σταθερές αποστάσεις μεταξύ τους και παραλαμβάνουν ως επί το πλείστον τις διατμητικές δυνάμεις.

Για τη κατασκευή τοίχων μεγαλύτερου μήκους, συναρμολογούνται περισσότερα του ενός πάνελ, τα οποία ενώνονται μεταξύ τους με κοχλίες. Κοχλίες χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον και για την σύνδεση τοίχου-οροφής, καθώς και των κάθετων μεταξύ τους τοίχων. Οι κοχλίες αυτοί είναι συνήθως αυτοκοχλιούμενοι (self tapping screws) και τοποθετούνται είτε κάθετα, είτε υπό γωνία, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2 (από Cross laminated timber design guide της Structurlam).

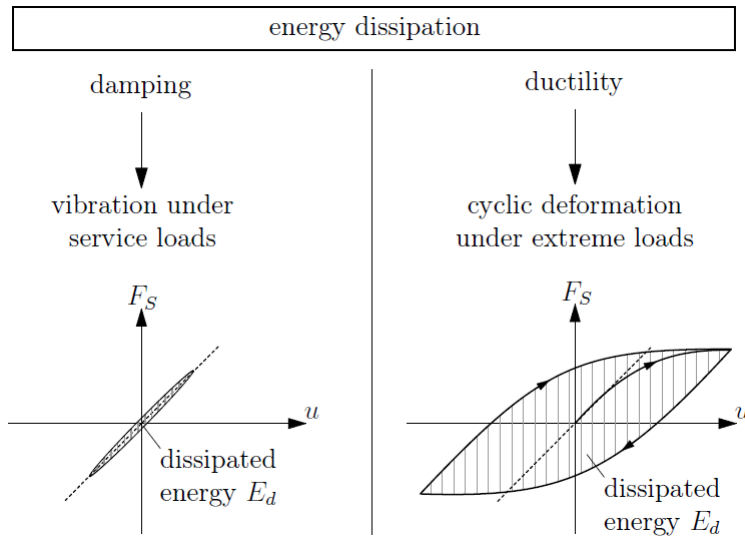


Εικόνα 2.2: Οι θέσεις των αυτοκοχλιούμενων κοχλιών

2.2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση των υστερητικών προσομοιωμάτων για CLT

Ένα σημαντικό μη γραμμικό φαινόμενο, το οποίο παρατηρείται σε δομικά συστήματα τα οποία έχουν ένα είδος "μνήμης" σε προγενέστερες φορτίσεις, είναι η υστέρηση. Λόγω της επίδρασης ενός ισχυρού σεισμού, οι κατασκευές υπόκεινται σε δυναμική φόρτιση, κατά την οποία συνήθως παρουσιάζουν υστερητική συμπεριφορά. Τα μέλη και οι συνδέσεις σε μία κατασκευή σχεδιάζονται έτσι ώστε να αποσβένουν ενέργεια μέσω της υστέρησης και να αυξάνεται ο συντελεστής ασφαλείας έναντι των σεισμικών καταπονήσεων [Mazzolani and Piluso, 1996] [Sivaselvan et al., 1999]. Για το σκοπό αυτό, έχουν κατασκευαστεί διάφορες συσκευές αποσβεστήρων. Η απόσβεση ενέργειας στις κατασκευές επιτυγχάνεται μέσω διαφόρων μηχανισμών, όπως η ανελαστική συμπεριφορά του υλικού, η τριβή μεταξύ διεπιφανειών κτλ. Όμως, όταν υπάρχει επαναλαμβανόμενη κυκλική παραμόρφωση υπάρχει μια μη αναστρέψιμη υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού, η οποία φανερώνεται μέσω των αλλαγών στους υστερητικούς κύκλους και είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη στην ανάλυση και τον σχεδιασμό των δομικών συστημάτων. Για να πετύχουν μία πιο σχολαστική, αλλά και ρεαλιστική, ανάλυση της σεισμικής απόκρισης οποιασδήποτε κατασκευής, οι μηχανικοί στρέφονται στην ανάλυση τρωτότητας, αλλά και σε προσεγγίσεις βασισμένες στην πραγματική ικανότητα των μελών της κατασκευής και σε αποδεκτά επίπεδα ζημιών. Ο σωστός σχεδιασμός μέσω προσομοιωμάτων και η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της υστερητικής συμπεριφοράς είναι ένα βήμα προς αυτήν την κατεύθυνση.

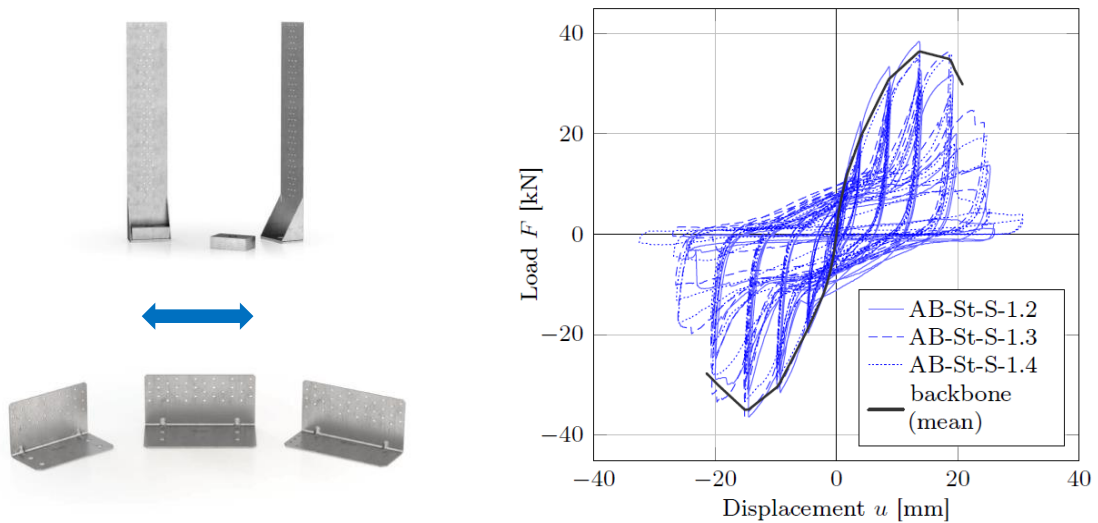
Η σεισμική δράση και η αντίστοιχη ενέργεια, σε ένα ξύλινο κτίριο από CLT, απορροφάται κυρίως από τις συνδέσεις των πάνελ, λόγω της πλαστικής συμπεριφοράς τους, καθώς και από την τριβή των διεπιφανειών. Η δυνατότητα απορρόφησης (ανάλωσης) ενέργειας από τις μεταλλικές συνδέσεις οφείλεται στην ολκιμότητα των υλικών τους. Οι σύνδεσμοι έχουν επίσης πρωταγωνιστικό ρόλο στα μη γραμμικά φαινόμενα, που εμφανίζονται στο εν λόγω δομικό σύστημα, όπως η λικνιστική απόκριση των πάνελ (rocking), στην οποία οφείλεται το μεγαλύτερο ποσοστό των μετακινήσεων αυτών των κατασκευών. Επομένως, απαραίτητη προϋπόθεση για τη ρεαλιστικότερη σεισμική απόκριση ενός υπολογιστικού μοντέλου ανάλυσης κατασκευών από CLT είναι ο σωστός σχεδιασμός, κυρίως των περιοχών σύνδεσης των μελών.



Εικόνα 2.3: Σύγκριση απορρόφησης ενέργειας λόγω βισκοϊξώδους απόσβεσης και ανελαστικής υστερητικής [Petersen, 1996]

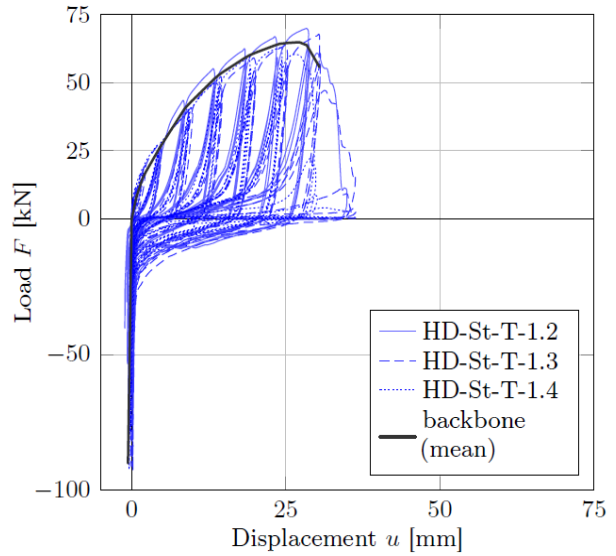
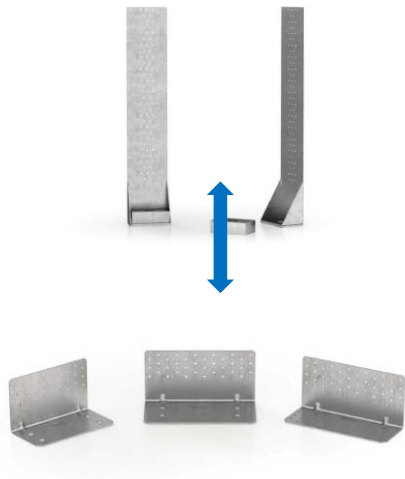
Στην Εικόνα 2.3 φαίνεται σχηματικά, ότι η ικανότητα ανάλωσης ενέργειας είναι πολύ μεγαλύτερη για ανελαστική υστερητική συμπεριφορά σε σύγκριση με τον συνδυασμό ελαστικής και βισκοϊξώδους απόσβεσης.

Η χαρακτηριστική υστερητική συμπεριφορά των συνδέσμων υπό ανακυκλική φόρτιση φαίνεται στις Εικόνες 2.4 έως 2.6 . Ενδεικτικά παρατίθεται εδώ και η συμπεριφορά ενός μεμονωμένου πάνελ συνδεδεμένου στη βάση του με hold-downs και angle brackets (Εικόνα 2.7).

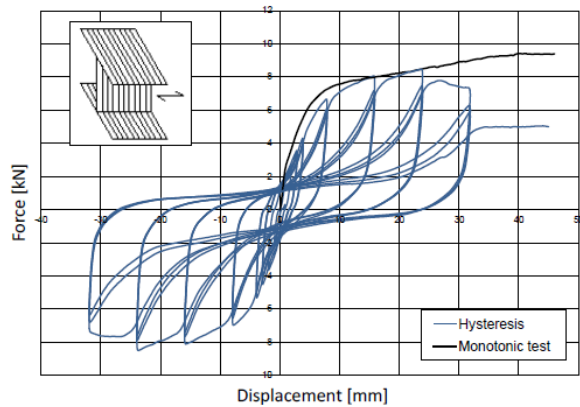
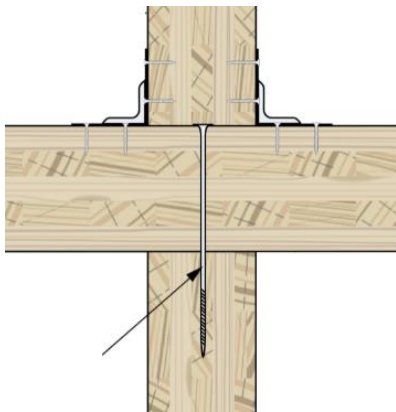


Εικόνα 2.4: Τυπική υστερητική συμπεριφορά συνδέσεων τύπου hold-down και angle bracket (σε διάτμηση).

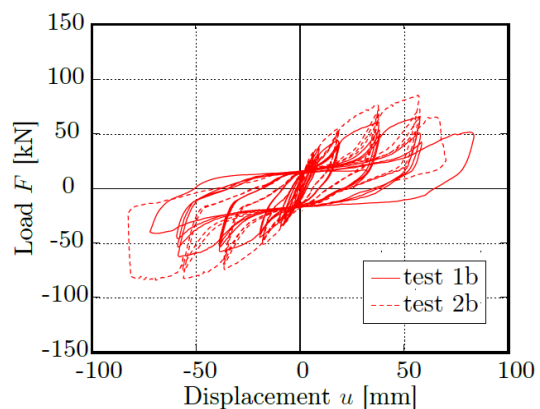
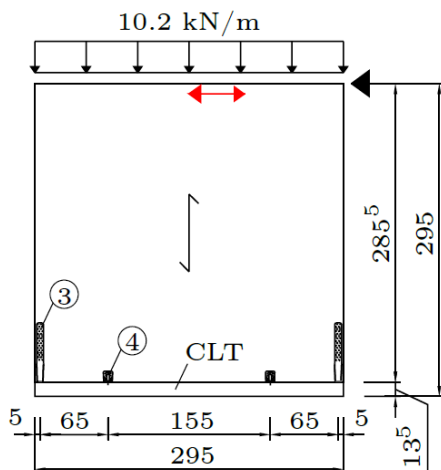
[Seim et al., 2013b]



Εικόνα 2.5: Τυπική υστερητική συμπεριφορά συνδέσεων τύπου hold-down και angle bracket (σε θλίψη-εφελκυσμό). [Seim et al., 2013b]



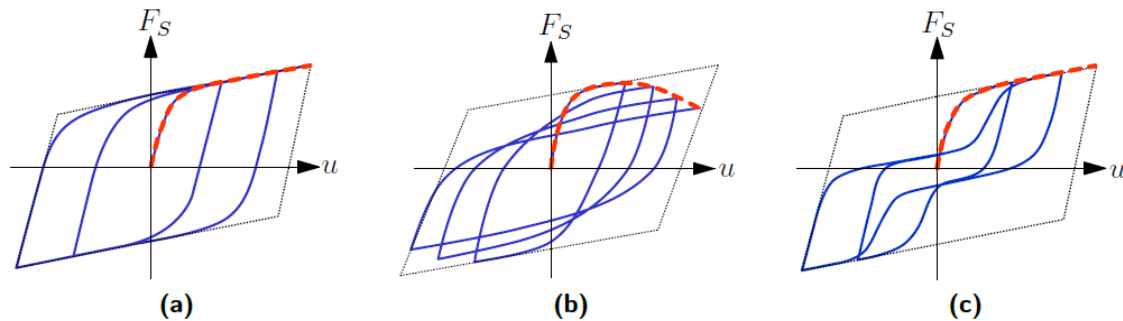
Εικόνα 2.6: Υστερητική συμπεριφορά και μονοτονική καμπύλη σύνδεσης με αυτοκοχλιούμενους κοχλίες (self-tapping screws 10.9) ενός πάνελ με την οροφή (σε διάτμηση). [Gavric, 2013]



Εικόνα 2.7: Υστερητική συμπεριφορά και μονοτονική καμπύλη πάνελ CLT. SOFIE – Construction System Fiemme, [Cecotti et al., 2006b]

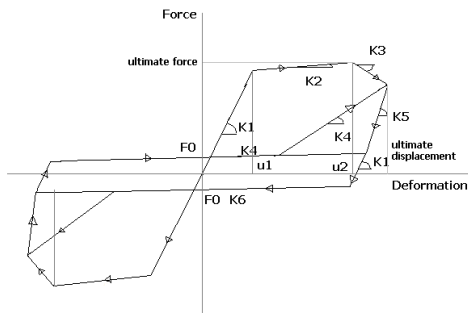
Εύκολα παρατηρεί κανείς, πως οι καμπύλες που προκύπτουν υπό μονοτονική φόρτιση και οι σπονδυλωτές καμπύλες της υστερητικής συμπεριφοράς (backbone curves) είναι μη γραμμικές με μεταελαστικούς κλάδους. Επιπλέον, η υστέρηση έχει κοινά χαρακτηριστικά σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις. Τα χαρακτηριστικά αυτά

είναι η υποβάθμιση της αντοχής (strength degradation) και της δυσκαμψίας (stiffness degradation), αλλά και τα φαινόμενα ολίσθησης (χαλάρωσης) ή «τσιμπήματος» (sliding ή αλλιώς pinching) (Εικόνα 2.8). Η συμπεριφορά των διατμητικών τοίχων (τοιχωμάτων) είναι ποιοτικά πανομοιότυπη με αυτή των επιμέρους συνδετικών μελών [Folz and Filiatrault, 2001a].

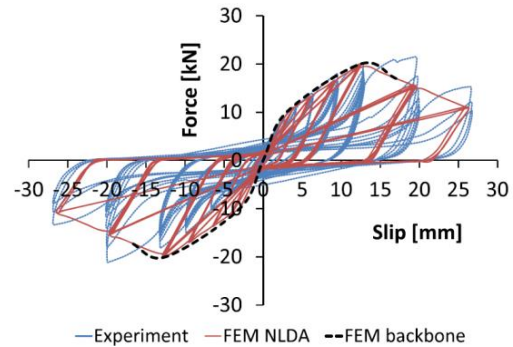


Εικόνα 2.8: Χαρακτηριστικά υστέρησης: (a) ελαστοπλαστική, (b) υποβάθμιση αντοχής και δυσκαμψίας, (c) ολίσθηση [Hummel, 2017]

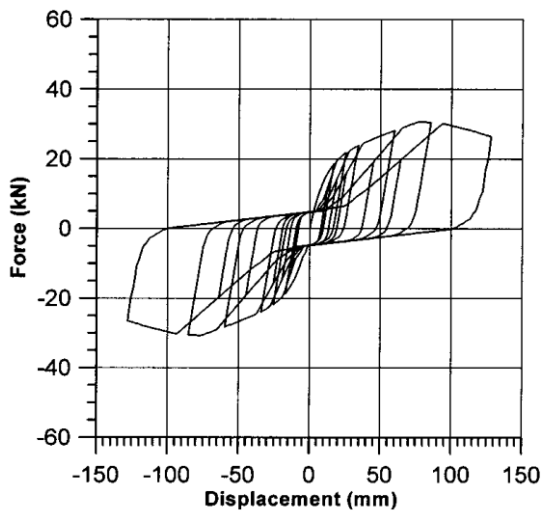
Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκαν τα υστερητικά προσομοιώματα, που χρησιμοποιούνται σήμερα ή έχουν χρησιμοποιηθεί για την αποτίμηση της συμπεριφοράς ξύλινων κτιρίων και κατά κύριο λόγο ξύλινων πάνελ και της αντίστοιχης συνδεσμολογίας. Στην πραγματικότητα έχουν αναπτυχθεί αρκετά προσομοιώματα, το καθένα εκ των οποίων είναι συνδεδεμένο, συνήθως, με ερευνητικά προγράμματα ή συγκεκριμένο λογισμικό ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία (FE software). Τις προηγούμενες δεκαετίες, ένα από τα προσομοιώματα, τα πιο χρησιμοποιημένα από την ερευνητική κοινότητα, ήταν το προσομοίωμα 9 παραμέτρων, που σχεδιάστηκε από τους [Ceccotti et al., 1989] και εφαρμόστηκε στο λογισμικό Drain 2D και αργότερα Drain 3D (λογισμικό από NISEE, PEER, University of California, Berkeley) (Εικόνα 2.9). Το προσομοίωμα αυτό οδηγεί σε αποδεκτά αποτελέσματα, όσον αφορά στην συνολική απόκριση, αλλά δεν θα μπορούσε να προσομοιώσει πιστά την υστέρηση των εν λόγω συνδέσμων, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη του την υποβάθμιση αντοχής. Υστερητικά προσομοιώματα, που αρχικά αναπτύχθηκαν για την εφαρμογή τους στην τοιχοποιία [Zarnic et al., 1997], έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και για μεταλλικούς συνδέσμους ξυλείας, καθώς προσομοιώνουν παρόμοιους υστερητικούς κύκλους. Μία άλλη εναλλακτική προσέγγιση της υστέρησης είναι ο συνδυασμός έτοιμων προσομοιωμάτων και συμπεριφορών (όπως pinching και postpeak softening behavior, pivot type) στο λογισμικό SAP 2000 [Sustersic et al., 2015], όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.10. Το μειονέκτημα της επιλογής αυτής είναι πως δεν σου επιτρέπει ποικιλομορφία συμπεριφορών, χαρακτηρισμό δηλαδή της υστέρησης αναλυτικότερα ανά κύκλο και ανά στοιχείο. Εδώ, θα μπορούσαν να γίνουν πολλές επιπλέον αναφορές σε μη γραμμικά υστερητικά προσομοιώματα, που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία, επιλέχθηκε όμως η παρουσίαση δύο εξ αυτών που χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια και θεωρούνται ως πιο σύγχρονα και ακριβέστερα. Πρόκειται για το προσομοίωμα SAWS των Folz και Filiatrault [2001] (Εικόνα 2.11) και το πολυγωνικό υστερητικό προσομοίωμα των Rinaldin, Amadio και Fragiaco [2013] (Εικόνα 2.12).



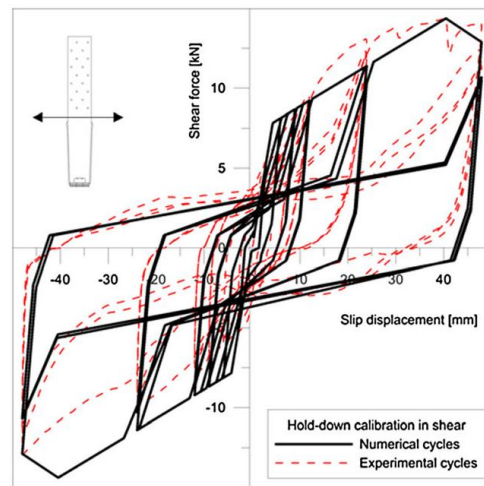
Εικόνα 2.9: Υστερητικό μοντέλο 9 παραμέτρων στο Drain 3D.



Εικόνα 2.10: Υστερητικό μοντέλο στο SAP 2000.



Εικόνα 2.11: Υστερητικό μοντέλο SAWS



Εικόνα 2.12: Υστερητικό μοντέλο [Rinaldin et al., 2013]

Το SAWS model (Seismic Analysis of Woodframe Structures) σχεδιάστηκε αρχικά για την εφαρμογή του στο ομώνυμο λογισμικό στο πλαίσιο του CUREE-Caltech Woodframe Project (Consortium of Universities for Earthquake Engineering) [Folz and Filiatrault, 2002]. Στο πλαίσιο του ίδιου ερευνητικού προγράμματος σχεδιάστηκε από τους Folz και Filiatrault [2000] και το λογισμικό CASHEW (cyclic analysis of shear walls program), για διατμητικούς τοίχους από ξυλόπλακες OSB. Στο CASHEW ο χρήστης καθορίζει διαστάσεις και στηρίξεις και το λογισμικό επιβάλλει κυκλική φόρτιση στο πάνελ, βασισμένη στο πρωτόκολλο του CUREE, και επιστρέφει τις κατάλληλες τιμές εισόδου για το ελατήριο τριών βαθμών ελευθερίας και υστερητική συμπεριφορά του προσομοιώματος SAWS, που θα προσομοιώσει ολόκληρο τον τοίχο. Με αυτήν την πιο απλή προσέγγιση το προσομοίωμα ελέγχθηκε αρχικά με τη βοήθεια πειραμάτων σε διώροφο κτίριο από OSB πάνελ (μοριοσανίδες) με ελαφρύ ξύλινο σκελετό, που έγιναν στο CUREE-Caltech Woodframe Project σε σεισμική τράπεζα. Τα αποτελέσματα είχαν επαρκή ακρίβεια και πολύ μικρό χρονικό υπολογιστικό κόστος, χάρις στις απλοποιήσεις, και έκτοτε το προσομοίωμα αυτό χρησιμοποιείται από διάφορους μελετητές. Το SAWS αρχικά σχεδιάστηκε ως ένα απλοποιητικό υστερητικό προσομοίωμα, καθαρά φαινομενολογικού χαρακτήρα, με σκοπό την μοντελοποίηση κάθε διαφράγματος ή τοίχου με τρεις βαθμούς ελευθερίας [Folz and Filiatrault, 2004b]. Έκτοτε όμως έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία και για πιο λεπτομερή αριθμητικά προσομοιώματα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι και η διατριβή του Hummel [2017], όπου χρησιμοποιείται μια πληθώρα ελατηρίων «τύπου SAWS» για την αριθμητική προσομοίωση.

Το υστερητικό μοντέλο των Rinaldin et al. [2013], αναπτύχθηκε πιο πρόσφατα και έγινε γνωστό όταν χρησιμοποιήθηκε από τους Rinaldin και Fragiaco για να αναπαραγάγουν τα αποτελέσματα των πειραμάτων, που έγιναν σε σεισμική τράπεζα της Ιαπωνίας, στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος SOFIE, από το Ιταλικό Ινστιτούτο Έρευνας «The Trees and Timber Institute of the National Research Council of Italy (CNR-IVALSA)». Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε κτίρια τριών και επτά ορόφων από CLT (Εικόνες 2.13 και 2.14). Η προσομοίωση έγινε στο λογισμικό ABAQUS και κάθε σύνδεσμος εισήχθη ως ελατήριο τριών βαθμών ελευθερίας

με μη γραμμική υστερητική συμπεριφορά. Οι απαραίτητοι παράμετροι κάθε ελατηρίου βρέθηκαν με δοκιμές, μέσω σχεδίασης ειδικού λογισμικού [Rinaldin software]. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων είχαν μικρή απόκλιση από την πραγματικότητα των πειραμάτων. Το προσομοίωμα έχει αναπτυχθεί από τους ίδιους ερευνητές και για λογισμικά όπως το OOFEM και το OpenSees.



Εικόνα 2.13: Κτίριο επτά ορόφων από CLT σε σεισμική τράπεζα. [Ceccotti et al., 2013]



Εικόνα 2.14: Κτίριο τριών ορόφων από CLT σε σεισμική τράπεζα. [Ceccotti et al., 2013]

2.3. Ανάπτυξη υστερητικών προσομοιωμάτων για τη συμπεριφορά των μεταλλικών συνδέσμων

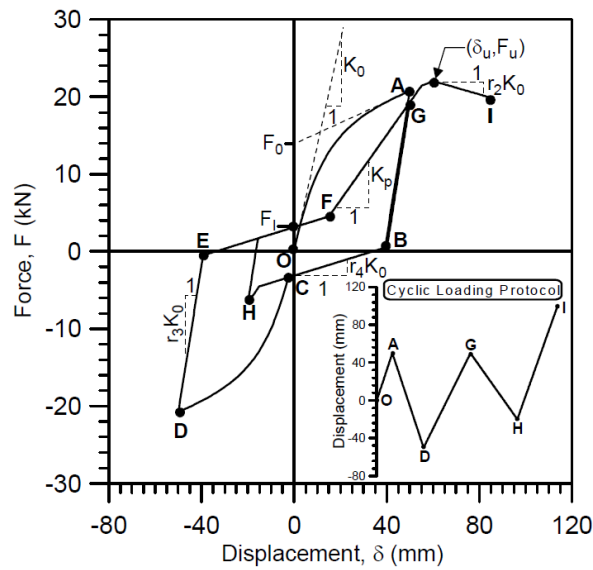
Τα υστερητικά προσομοιώματα που αναφέρθηκαν παραπάνω, αναπτύχθηκαν κυρίως στο πλαίσιο ερευνητικών προγραμμάτων και δεν είναι διαθέσιμα στα εμπορικά λογισμικά, όπως το ABAQUS, εξαιτίας συμφωνιών μη κοινολόγησης. Συνεπώς, ο κώδικας που τους αντιστοιχεί και εν γένει η χρήση τους περιορίζεται, προς το παρόν, στους μελετητές που τα ανέπτυξαν. Συγκεκριμένα το προσομοίωμα υστέρησης SAWS μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνον ως ιδιότητα υλικού μέσω του λογισμικού OpenSees.

Στο πλαίσιο επομένως της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκαν προσομοίωμα υστερητικής συμπεριφοράς και στη συνέχεια τα κατάλληλα «στοιχεία χρήστη» (user elements) για την προσομοίωση των μεταλλικών συνδέσμων σε μια κατασκευή CLT. Το προσομοίωμα υστερητικής συμπεριφοράς που αναπτύχθηκε στηρίζεται στις αρχές του μοντέλου SAWS, όπως αυτό περιγράφεται από τους Folz and Filiatrault [2004a], διατηρώντας στα πλαίσια του εφικτού τις ίδιες παραμέτρους εισόδου (inputs). Η επιλογή ανάπτυξης υστερητικού προσομοιώματος στα στοιχεία χρήστη που λειτουργούν μέσω εξωτερικής υπορουτίνας έγινε με σκοπό την εξαγωγή περισσότερων αποτελεσμάτων όσον αναφορά τις εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στους συνδέσμους. Κάτι τέτοιο δεν θα ήταν δυνατό στην περίπτωση που η προσομοίωση γινόταν μέσω του λογισμικού OpenSees. Το SAWS model επιλέχθηκε, ως βάση του προσομοιώματος, κυρίως για τους εξής λόγους:

- Τα δύο προσομοιώματα (δηλαδή το SAWS και το προσομοίωμα των Rinaldin et al. [2013]) δίνουν μορφολογικά πανομοιότυπες καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, με βασική διαφορά ότι η σπονδυλωτή καμπύλη (backbone curve) στο SAWS είναι εκθετική, ενώ στο προσομοίωμα των Rinaldin et al. [2013] πολυγωνική. Το προσομοίωμα SAWS όμως, είναι απλούστερο και ευνοϊκότερο για τον χρήστη, έχοντας 10 παραμέτρους (inputs) έναντι 20 (11 βασικές και 9 επιπλέον, που καθορίζουν την υποβάθμιση, την τριβή κτλ..).
- Τα δύο προσομοιώματα ανταποκρίνονται ενεργειακά εξίσου καλά, έχοντας παρόμοιους βρόγχους υστέρησης.
- Το προσομοίωμα SAWS χρησιμοποιήθηκε από τον Hummel [2017], μέσω του λογισμικού OpenSees. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων και των αριθμητικών αναλύσεων της διατριβής αυτής αποτελούν την κύρια αναφορά της παρούσας εργασίας και συνεπώς θεωρήθηκε σκόπιμο τα υστερητικά προσομοιώματα να είναι όσο τον δυνατόν ανάλογα, για λόγους σύγκρισης των τελικών αποτελεσμάτων.

Στα επόμενα υποκεφάλαια γίνεται σχολιασμός του προσομοιώματος SAWS, όπως περιγράφεται από τους Folz και Filiatrault [2004], καθώς και παρουσίαση των υστερητικών προσομοιωμάτων και των user elements που αναπτύχθηκαν για το λογισμικό ABAQUS. Για τα υστερητικά προσομοιώματα πραγματοποιήθηκαν οι απαραίτητες αλλαγές στο SAWS, ειδικά στην περίπτωση του υστερητικού προσομοιώματος θλίψης-εφελκυσμού, καθώς και υποθέσεις για κλάδους που δεν περιγράφονται στα άρθρα. Όπως σημειώνεται (§ 2.4), τα user elements που αναπτύχθηκαν προσομοιώνουν, πέρα από τους μεταλλικούς συνδέσμους, και τα φαινόμενα επαφής (contact) και τριβής των πάνελ.

2.3.1. Το προσομοίωμα SAWS όπως περιγράφεται από τους Folz και Filiatrault [2004]



Εικόνα 2.15: Το προσομοίωμα Saws [Folz and Filiatrault, 2004a]

Στο σχήμα της Εικόνας 2.15 παρουσιάζεται η διαμόρφωση του προσομοιώματος από τους Folz και Filiatrault [2004a]. Εδώ φαίνεται η σπονδυλωτή καμπύλη στη θετική κατεύθυνση ακολουθώντας τα σημεία O-A-I. Η σπονδυλωτή καμπύλη δίνεται από την παρακάτω εξίσωση και για τις δύο κατευθύνσεις :

$$F = \begin{cases} \operatorname{sgn}(\delta) \cdot (F_0 + R_1 K_0 |\delta|) \cdot [1 - \exp(-K_0 |\delta| / F_0)], & |\delta| \leq |D_{ult}| & (a) \\ \operatorname{sgn}(\delta) \cdot F_{ult} + R_2 K_0 [\delta - \operatorname{sgn}(\delta) \cdot D_{ult}], & |D_{ult}| < |\delta| \leq |D_F| & (b) \\ 0, & |\delta| > |D_F| & (c) \end{cases}$$

Παρατηρούμε πως η σπονδυλωτή καμπύλη F-δ ορίζεται με τις 6 παραμέτρους: F_0 , K_0 , R_1 , R_2 , D_{ult} και D_F . Οι τιμές των παραμέτρων προσαρμόζονται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα για τη συμπεριφορά κάθε συνδέσμου.

Ο κλάδος (a) (branch) είναι μη-γραμμικός και προσομοιώνει, σε αντιστοιχία με μια διγραμμική καμπύλη, την ελαστική και μετελαστική συμπεριφορά της σύνδεσης, δηλαδή την πλαστικοποίηση του μετάλλου και του ξύλου.

Ο κλάδος (b) υποβαθμίζει την αντοχή του στοιχείου, αφού αυτό έχει προσφέρει τη μέγιστη δύναμη (αποτελώντας post-peak softening branch) και η μετατόπιση D_F ορίζει το σημείο αστοχίας, επάνω στη σπονδυλωτή καμπύλη.

Στην Εικόνα 2.15 φαίνεται επίσης η βασική «διαδρομή», που ακολουθεί η καμπύλη F-δ υπό ανακυκλική φόρτιση. Πρόκειται για ένα υστερητικό προσομοίωμα, που είναι προσανατολισμένο στο μέγιστο σημείο (vertex oriented). Όλοι οι κλάδοι φόρτισης-αποφόρτισης, πέραν της σπονδυλωτής καμπύλης, είναι γραμμικοί. Η αποφόρτιση από τη σπονδυλωτή καμπύλη γίνεται μέσω κλάδων, όπως ο AB, με δυσκαμψία $R_3 K_0$. Στον κλάδο αυτό πρακτικά η σύνδεση αποφορτίζεται ελαστικά. Υπό συνεχή αποφόρτιση, η διαδρομή περνά στον κλάδο BC με μειωμένη κατά πολύ δυσκαμψία $R_4 K_0$. Εδώ ο σύνδεσμος χάνει μερικώς την επαφή του με το ξύλο που τον περιβάλλει, εξαιτίας μόνιμων παραμορφώσεων, που υπέστη κατά τη φόρτιση (διαδρομή OA). Αυτή η χαμηλής δυσκαμψίας ανταπόκριση αποτελεί πρακτικά φαινόμενο ολίσθησης/χαλάρωσης (pinching) και είναι χαρακτηριστική σε συνδέσμους ξυλείας με ήλους και βλήτρα. Καθώς φορτίζεται ο σύνδεσμος πρώτη φορά προς την αντίθετη (στο σχήμα αρνητική) κατεύθυνση ακολουθεί τη σπονδυλωτή καμπύλη από το σημείο C στο D, ύστερα, αποφορτίζεται πρακτικώς ελαστικά έως το E, με δυσκαμψία $R_3 K_0$ και ολισθαίνει έως το F. Υπό συνεχή φόρτιση, η διαδρομή ακολουθεί τον κλάδο FG με υποβαθμισμένη δυσκαμψία K_p . Η δυσκαμψία K_p ορίζεται ως εξής:

$$K_p = K_0 \left(\frac{\delta_0}{\delta_{max}} \right)^a$$

Όπου,

$$\delta_0 = \frac{F_0}{K_0}$$

$$\delta_{max} = b\delta_{un}$$

Και,

a : Υστερητική παράμετρος του προσομοιώματος, υπεύθυνη κυρίως για την υποβάθμιση της δυσκαμψίας.

b : Υστερητική παράμετρος του προσομοιώματος, υπεύθυνη κυρίως για την υποβάθμιση της αντοχής.

Παρατηρούμε ότι η δυσκαμψία K_p είναι μεταβλητή και εξαρτάται από τους προηγούμενους βρόγχους, μέσω της έως τώρα μέγιστης σχετικής μετατόπισης του στοιχείου δ_{un} , η τιμή της οποίας μεταβάλλεται με το χρόνο. Ορίζουμε λοιπόν το K_p^+ , που αντιστοιχεί στη μέγιστη θετική σχετική μετατόπιση δ_{un}^+ , που στο σχήμα αντιστοιχεί στο σημείο A και K_p^- αντίστοιχα για δ_{un}^- , που στο σχήμα αντιστοιχεί στο σημείο D. Αξίζει επίσης εδώ να επισημανθεί, πως μέσω της δυσκαμψίας K_p ορίζεται και η υποβάθμιση της αντοχής, καθώς, εάν σε έναν άλλο κύκλο η σχετική μετατόπιση γίνει ίση με δ_{un} , τότε η απόκριση θα είναι μικρότερη από F_{un} . Αυτό γίνεται πιο ξεκάθαρο αν συγκρίνει κανείς τα σημεία A και G. Γίνεται επομένως αντιληπτό, ότι, στο προσομοίωμα SAWS, υπό συνεχή ανακυκλική φόρτιση με την ίδια μέγιστη σχετική μετατόπιση, η μέγιστη δύναμη και η ενέργεια που αποσβέννεται σταθεροποιούνται. Το γεγονός αυτό μάλιστα συνάδει με την πραγματικότητα που έχει παρατηρηθεί στα πειράματα [Dolan et al., 1992], έως ότου εμφανιστούν φαινόμενα κόπωσης των ήλων.

2.3.2. Τα υστερητικά προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν: εισαγωγή

Γνωρίζοντας τα παραπάνω, για το προσομοίωμα SAWS έγινε προσπάθεια ανάπτυξης αντίστοιχου προσομοιώματος και κατάλληλων user elements τύπου VUEL, με χρήση γλώσσας Fortran και ενσωμάτωσής του σε explicit αναλύσεις στο λογισμικό ABAQUS.

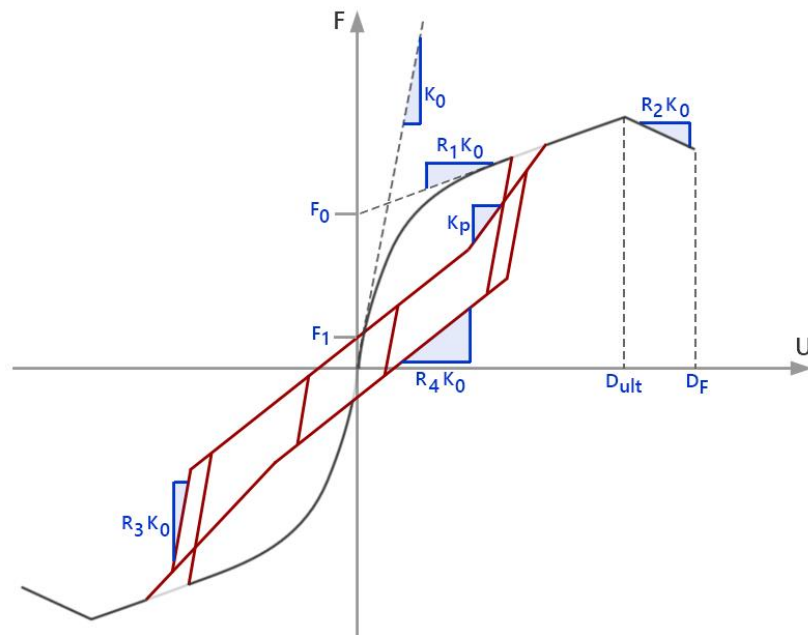
Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι το SAWS model είναι πρακτικώς πλήρως συμμετρικό. Η παράμετρος F_1 ορίζει τα σημεία $(0, F_1)$, καθώς και $(0, -F_1)$, που καθορίζουν με την σειρά τους την ολίσθηση σε θετική, αλλά και αρνητική κατεύθυνση. Αντιστοίχως, τα ποσοστά R_1, R_2, R_3 και R_4 της αρχικής εφαπτομενικής δυσκαμψίας K_0 ορίζουν την κλίση κλάδων του πρώτου, καθώς και του τρίτου τεταρτημόριου.

Η συμμετρία αυτή ταιριάζει με την υστέρηση των angle brackets, των hold-downs και των κοχλιών σε διάτμηση. Όμως, και τα τρία στοιχεία έχουν, όπως έχει προαναφερθεί (βλέπε κεφάλαιο 1), ασύμμετρη δυσκαμψία σε θλίψη και εφελκυσμό, που δεν θα μπορούσε να αναπτυχθεί από το παρόν προσομοίωμα υστέρησης. Έγιναν λοιπόν οι κατάλληλες τροποποιήσεις με σκοπό να συμπεριληφθεί η υστέρηση των angle brackets και hold-downs υπό εφελκυσμό. Γνωρίζοντας, ότι η συνθήκη μερικής επαφής (contact) των πάνελ πρέπει να προσομοιωθεί, όσο πιο πιστά προς την πραγματικότητα γίνεται, προκειμένου να παρθούν υπόψιν τα λικνιστικά φαινόμενα του συστήματος, αναπτύχθηκε δεύτερο υστερητικό προσομοίωμα, που σε εφελκυσμό ακολουθεί αντίστοιχους βρόγχους με το μοντέλο SAWS, ενώ σε θλίψη έχει ελαστική συμπεριφορά με πολύ μεγάλες δυσκαμψίες (συμπεριφορά contact). Για τις φορτίσεις και αποφορτίσεις από κλάδους που δεν περιγράφονται πλήρως από τη βιβλιογραφία για το μοντέλο SAWS, ακολουθήθηκαν βασικοί κανόνες υστερητικών μοντέλων [Sivaselvan et al., 1999], καθώς και στοιχεία του προσομοιώματος των Rinaldin et al. [2013]. Όπως προαναφέρθηκε, τα user elements αναπτύχθηκαν για explicit ανάλυση, με χρήση τελεστή κεντρικών διαφορών, συνεπώς τα υστερητικά προσομοιώματα είναι βασισμένα στις μετατοπίσεις. Δίνεται μία μικρή μετατόπιση των κόμβων για το βήμα i και ο κώδικας του user element επιστρέφει την αντίστοιχη αλλαγή της εσωτερικής δύναμης (I) για κάθε βαθμό ελευθερίας.

$$[M] \cdot \{\ddot{U}_i\} = \{F_i\} - \{I_i\}$$

Τα σημεία και οι κλάδοι που ορίζουν τους βρόγχους των δύο υστερητικών προσομοιωμάτων, καθώς και οι όποιες περαιτέρω αλλαγές πραγματοποιήθηκαν, περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω για κάθε διεύθυνση φόρτισης ξεχωριστά.

2.3.3. Το υστερητικό προσομοίωμα για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση



Εικόνα 2.16: Οι παράμετροι του υστερητικού προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

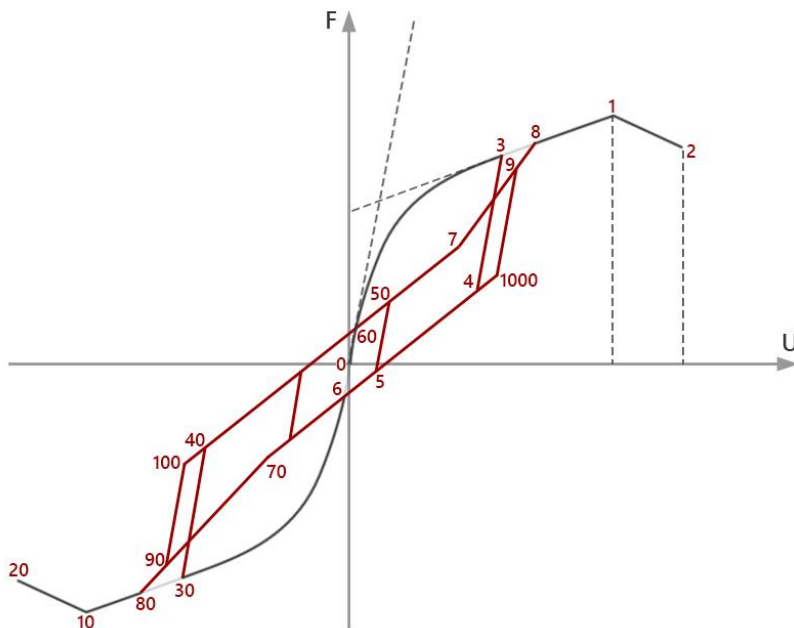
Για την προσομοίωση των συνδέσεων (angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση), ακολουθήθηκε όσο το δυνατόν πιο πιστά η περιγραφή του προσομοιώματος SAWS. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.16, στους περισσότερους κλάδους η αλλαγή κατεύθυνσης σημαίνει είσοδος σε νέο κλάδο δυσκαμψίας R_3K_0 , είτε «ανοδικό», όπου η εσωτερική δύναμη δηλαδή αυξάνεται, είτε «καθοδικό», όπου η δύναμη μειώνεται, ώσπου να συναντηθεί κλάδος διαφορετικής δυσκαμψίας. Σε κλάδους δυσκαμψίας R_3K_0 , αλλαγή κατεύθυνσης σημαίνει παραμονή στον «ίδιο κλάδο», όπου πλέον το σημείο αρχής γίνεται σημείο τέλους και ούτω καθεξής. Κάποια από τα σημεία είναι εμφανώς σταθερά (όπως αυτά που ορίζουν τη σπονδυλωτή καμπύλη) και κάποια ανανεώνονται και επαναπροσδιορίζονται συνεχώς από τον κώδικα του εκάστοτε user element. Η βασική αλλαγή που πραγματοποιήθηκε εδώ είναι η πρόσθεση μιας επιπλέον παραμέτρου εισόδου (D_F) που επεξηγείται στο υποκεφάλαιο §2.4.3. Παρακάτω παρατίθενται πίνακες (2.1 έως 2.4) και διαγράμματα (Εικόνες 2.16 έως 2.18) με τις βασικές παραμέτρους και μεταβλητές, τα σημεία αρχής και τέλους κάθε κλάδου (με τις συντεταγμένες τους) και τέλος τους διαφορετικούς κλάδους και τις πιθανές μεταπηδήσεις τους σε άλλους κλάδους (Εικόνα 2.18).

Οι ακριβείς συνθήκες, που καθορίζουν τις εναλλαγές των κλάδων και την παραμονή σε αυτούς, αποτελούν περισσότερο προγραμματιστικό κομμάτι της παρούσας εργασίας και για λόγους ευκρίνειας και αποφυγής σύγχυσης θα παραλειφθούν. Το ίδιο ισχύει και για επιπλέον μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν και σημεία που δεν αποτελούν αρχή ή τέλος κάποιου κλάδου. Αντιθέτως, παρατίθενται οι συνθήκες κατεύθυνσης με σκοπό την αποσαφήνιση των βρόγχων.

Η λογική πίσω από την ονομασία των σημείων και των κλάδων που αναπτύχθηκαν είναι ότι, οι μονάδες αποτελούν στοιχεία του πρώτου τεταρτημόριου στο διάγραμμα F-δ, ενώ οι δεκάδες, τα συμμετρικώς αντίστοιχα στοιχεία του τρίτου τεταρτημόριου. Οι κλάδοι με τονισμό είναι οι αντίστοιχοι των κλάδων χωρίς τονισμό, όπου το σημείο αρχής έχει γίνει σημείο τέλους και ούτω καθεξής (βλέπε 3 και 3').

Πίνακας 2.1: Αξιοσημείωτες παράμετροι αλλά και μεταβλητές προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

Σύμβολο	Ερμηνεία
K_0	Αρχική επαπτομενική δυσκαμψία (κλίση επαπτομένης στην αρχή της καμπύλης ικανότητας)
R_1	Παράμετρος που καθορίζει τη κλίση της επαπτομένης στη σπονδυλωτή καμπύλη, στον εκθετικό κλάδο, από τα σημεία $(0, F_0)$ και $(0, -F_0)$, συνεπώς και τη μορφή της
R_2	Παράμετρος που καθορίζει τη δυσκαμψία του δεύτερου κλάδου της σπονδυλωτής καμπύλης
R_3	Παράμετρος που καθορίζει την δυσκαμψία αποφόρτισης από τη σπονδυλωτή καμπύλη
R_4	Παράμετρος που καθορίζει την δυσκαμψία των κλάδων ολίσθησης
F_0	Δύναμη που ορίζει τα σημεία $(0, F_0)$ και $(0, -F_0)$, συνεπώς τη μορφή του εκθετικού κλάδου
F_1	Δύναμη που ορίζει τα σημεία $(0, F_1)$ και $(0, -F_1)$, συνεπώς και τη θέση των κλάδων ολίσθησης
D_{ult}	Σχετική μετατόπιση, που ορίζει την μέγιστη δύναμη, καθώς και την αλλαγή από εκθετικό σε αρνητικής δυσκαμψίας ελαστικό κλάδο της σπονδυλωτής καμπύλης
D_F	Σχετική μετατόπιση που ορίζει την αστοχία του στοιχείου και στις δύο κατευθύνσεις
a	Παράμετρος υποβάθμισης της δυσκαμψίας
b	Παράμετρος υποβάθμισης της αντοχής
F_{un}^+	Η έως τώρα μέγιστη θετική δύναμη του ελατηρίου
F_{un}^-	Η έως τώρα μέγιστη αρνητική δύναμη του στοιχείου
K_{p^+}	Υποβαθμισμένη δυσκαμψία στη θετική κατεύθυνση
K_{p^-}	Υποβαθμισμένη δυσκαμψία στην αρνητική κατεύθυνση
δ_{un}^+	Η έως τώρα μέγιστη θετική σχετική μετατόπιση του στοιχείου
δ_{un}^-	Η έως τώρα μέγιστη αρνητική σχετική μετατόπιση του ελατηρίου
F_{cur}	Η τρέχουσα δύναμη του στοιχείου
δ_{cur}	Η τρέχουσα σχετική μετατόπιση του στοιχείου
F_{prev}	Η δύναμη του στοιχείου στο προηγούμενο βήμα της ανάλυσης (step).
δ_{prev}	Η σχετική μετατόπιση του στοιχείου στο προηγούμενο βήμα της ανάλυσης (step).



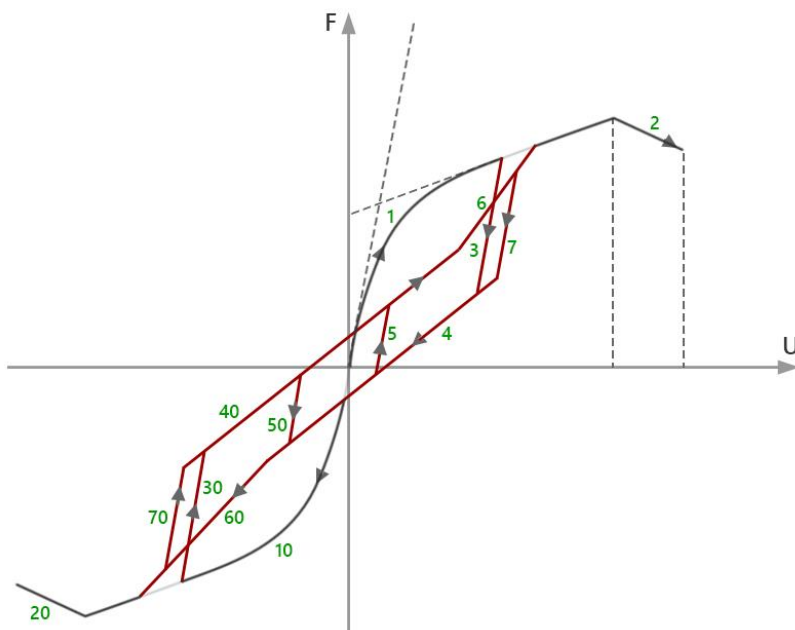
Εικόνα 2.17: Τα σημεία του υστερητικού προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

Πίνακας 2.2: Τα σημεία του προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

Σημείο	Δ	F
0	0	0
1	D_{ult}	$R_1 * K_0 * D_{ult} + F_0$
10	$-D_{ult}$	$-R_1 * K_0 * D_{ult} - F_0$
2	D_F	$R_1 * K_0 * D_{ult} + F_0 + R_2 * K_0 * (D_F - D_{ult})$
20	$-D_F$	$-R_1 * K_0 * D_{ult} - F_0 + R_2 * K_0 * (-D_F + D_{ult})$
3	δ_{un^+}	<ul style="list-style-type: none"> $F_3 = (F_0 + R_1 * K_0 * \delta_{un^+}) * \left[1 - \exp\left(\frac{-K_0 * \delta_{un^+}}{F_0}\right) \right]$, για $\delta_{un^+} \leq D_{ult}$ $F_3 = R_1 * K_0 * D_{ult} + F_0 + R_2 * K_0 * (\delta_{un^+} - D_{ult})$, για $\delta_{un^+} > D_{ult}$
30	δ_{un^-}	<ul style="list-style-type: none"> $F_{30} = -(F_0 + R_1 * K_0 * \delta_{un^-}) * \left[1 - \exp\left(\frac{-K_0 * \delta_{un^-} }{F_0}\right) \right]$, για $\delta_{un^-} \geq -D_{ult}$ $F_{30} = -R_1 * K_0 * D_{ult} - F_0 + R_2 * K_0 * (\delta_{un^-} + D_{ult})$, για $\delta_{un^-} < -D_{ult}$
4	$\frac{R_3 * K_0 * \delta_{un^+} - F_3 - F_1}{K_0 * (R_3 - R_4)}$	$R_4 * \frac{R_3 * K_0 * \delta_{un^+} - F_3 - F_1}{(R_3 - R_4)} - F_1$
40	$\frac{R_3 * K_0 * \delta_{un^-} - F_{30} + F_1}{K_0 * (R_3 - R_4)}$	$R_4 * \frac{R_3 * K_0 * \delta_{un^-} - F_{30} + F_1}{(R_3 - R_4)} + F_1$

5	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * U - F_1$ • Της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο (δ_{cur}, F_{cur}) και έχει κλίση $R_3 * K_0$ $\frac{F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev} + F_1}{K_0 * (R_4 - R_3)}$ $R_4 * \frac{F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev} + F_1}{K_0 * (R_4 - R_3)} - F_1$	
50	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * U + F_1$ • Της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο (δ_{cur}, F_{cur}) και έχει κλίση $R_3 * K_0$ $\frac{F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev} - F_1}{K_0 * (R_4 - R_3)}$ $R_4 * \frac{F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev} - F_1}{K_0 * (R_4 - R_3)} + F_1$	
6 – σταθερό με (δ_6, F_6)	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * \Delta - F_1$ • Της καμπύλης $F = (F_0 + R_1 * K_0 * \Delta) * [1 - \exp(\frac{-K_0 * \Delta}{F_0})]$ <p>Για την εύρεση του σημείου 6 η λύση της παρακάτω εξίσωσης προσεγγίζεται μέσα στον κώδικα των user elements με επαναληπτική μέθοδο Newton–Raphson και ανοχή 10^{-7}:</p> $R_4 * K_0 * \delta_6 - F_1 + (F_0 + R_1 * K_0 * \delta_6) * [1 - \exp(\frac{-K_0 * \delta_6 }{F_0})] = 0$ <p>Ενδεικτικά παρατίθεται εδώ και η πρώτη παράγωγος:</p> $K_0 * \exp(\frac{K_0 * \delta_6}{F_0}) * (\frac{R_1 * K_0 * \delta_6}{F_0} - 1 + R_1) - R_1 + R_4$	
60 – σταθερό με (δ_{60}, F_{60})	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * \Delta + F_1$ • Της καμπύλης $F = -(F_0 + R_1 * K_0 * \Delta) * [1 - \exp(\frac{-K_0 * \Delta }{F_0})]$ <p>Σε αντιστοιχία με το σημείο 6, η εξίσωση:</p> $R_4 * K_0 * \delta_{60} + F_1 - (\frac{F_0 + R_1 * K_0 * \delta_{60} }{ \delta_{60} }) * [1 - \exp(\frac{-K_0 * \delta_{60} }{F_0})] = 0$ <p>Και η πρώτη παράγωγος:</p> $K_0 * \exp(\frac{-K_0 * \delta_{60}}{F_0}) * (\frac{R_1 * K_0 * \delta_{60}}{F_0} - 1 + R_1) - R_1 + R_4$	
8	$\delta_{max} = b * \delta_{un+}$	<ul style="list-style-type: none"> • $F_8 = (F_0 + R_1 * K_0 * b * \delta_{un+}) * [1 - \exp(\frac{-K_0 * b * \delta_{un+}}{F_0})]$, για $b * \delta_{un+} \leq D_{ult}$ • $F_8 = R_1 * K_0 * D_{ult} + F_0 + R_2 * K_0 * (b * \delta_{un+} - D_{ult})$, για $b * \delta_{un+} > D_{ult}$
80	$\delta_{min} = b * \delta_{un-}$	<ul style="list-style-type: none"> • $F_{80} = -(F_0 + R_1 * K_0 * b * \delta_{un-}) * [1 - \exp(\frac{-K_0 * b * \delta_{un-} }{F_0})]$, για $b * \delta_{un-} \geq -D_{ult}$ • $F_{80} = -R_1 * K_0 * D_{ult} - F_0 + R_2 * K_0 * (b * \delta_{un-} + D_{ult})$, για $b * \delta_{un-} < -D_{ult}$
7	$\frac{-K_{p+} * b * \delta_{un+} + F_8 - F_1}{R_4 * K_0 - K_{p+}}$	$R_4 * K_0 * \frac{-K_{p+} * b * \delta_{un+} + F_8 - F_1}{R_4 * K_0 - K_{p+}} + F_1$
70	$\frac{-K_{p-} * b * \delta_{un-} + F_{80} + F_1}{R_4 * K_0 - K_{p-}}$	$R_4 * K_0 * \frac{-K_{p-} * b * \delta_{un-} + F_{80} + F_1}{R_4 * K_0 - K_{p-}} - F_1$

9	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> Της ευθείας $F = K_{p^+} * (\Delta - b * \delta_{un^+}) + F_8$ Της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο (δ_{cur}, F_{cur}) και έχει κλίση $R_3 * K_0$ 	
	$\delta_9 = \frac{K_{p^+} * b * \delta_{un^+} - F_8 + F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev}}{K_{p^+} - R_3 * K_0}$	$F_9 = K_{p^+} * \delta_9 - b * \delta_{un^+} + F_8$
90	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> Της ευθείας $F = K_{p^-} * (\Delta - b * \delta_{un^-}) + F_{80}$ Της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο (δ_{cur}, F_{cur}) και έχει κλίση $R_3 * K_0$ 	
	$\delta_{90} = \frac{K_{p^-} * b * \delta_{un^-} - F_{80} + F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev}}{K_{p^-} - R_3 * K_0}$	$F_{90} = K_{p^-} * \delta_{90} - b * \delta_{un^-} + F_{80}$
1000	<p>Το σημείο τομής:</p> <p>Της ευθείας που περνά από το σημείο 9 και έχει κλίση $R_3 * K_0$</p> <p>Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * \Delta - F_1$</p>	
	$\frac{F_1 + F_9 - R_3 * K_0 * \delta_9}{K_0 * (R_4 - R_3)}$	$R_4 * K_0 * \frac{F_1 + F_9 - R_3 * K_0 * \delta_9}{K_0 * (R_4 - R_3)} - F_1$
100	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> Της ευθείας που περνά από το σημείο 90 και έχει κλίση $R_3 * K_0$ Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * \Delta + F_1$ 	
	$\frac{-F_1 + F_{90} - R_3 * K_0 * \delta_{90}}{K_0 * (R_4 - R_3)}$	$R_4 * K_0 * \frac{-F_1 + F_{90} - R_3 * K_0 * \delta_{90}}{K_0 * (R_4 - R_3)} + F_1$



Εικόνα 2.18: Οι κλάδοι του υστερητικού προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

Πίνακας 2.3: Τα σημεία αρχής και τέλους των κλάδων του προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

Κλάδος	Σημείο αρχής	Σημείο τέλους
1	0	1
2	1	2
3	3	4
3'	4	3
4	4	70
5	5	50
5'	50	5
6	7	8
7	9	1000
7'	1000	9
10	0	10
20	10	20
30	30	40
30'	40	30
40	40	7
60	70	80
70	90	100
70'	100	90

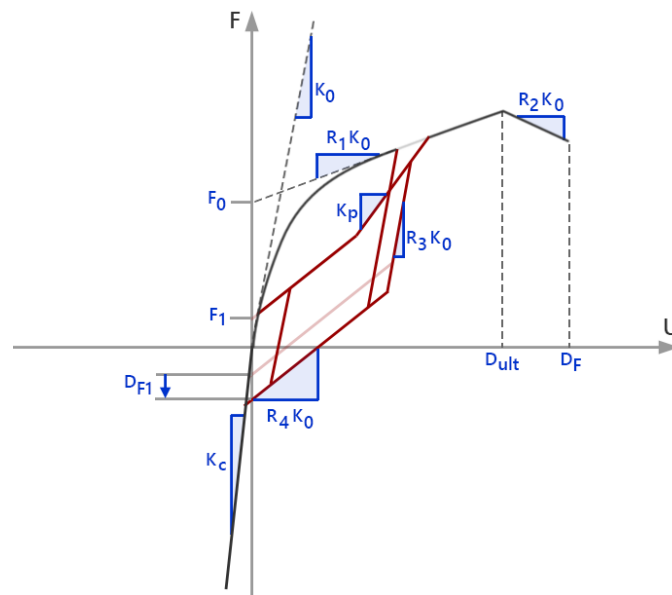
Στον Πίνακα 2.4 φαίνονται οι πιθανές εναλλαγές κλάδων. Ο χρωματισμός του Πίνακα 2.4 διακρίνει τους κλάδους σε ανοδικούς, όπου η εσωτερική δύναμη αυξάνεται, και καθοδικούς, όπου μειώνεται. Ο καθορισμός αυτός επιλέχθηκε για λόγους ευκρίνειας και δεν πρέπει να συγχέεται με τις έννοιες των κλάδων φόρτισης και αποφόρτισης που εξαρτώνται από τη φορά της σχετικής μετατόπισης.

Πίνακας 2.4: Κατεύθυνση κλάδων του προσομοιώματος για angle brackets, hold-downs και κοχλίες σε διάτμηση

Τρέχων κλάδος	Επόμενος κλάδος	Συνθήκη κατεύθυνσης
Ανοδικός Κλάδος↑ Καθοδικός Κλάδος↓		
1	2	$\Delta\delta > 0$
	3	$\Delta\delta < 0$
2	αστοχία	$\Delta\delta > 0$
	3	$\Delta\delta < 0$
3	4	$\Delta\delta < 0$
	3'	$\Delta\delta > 0$

3'	1	$\Delta\delta > 0$, και $\delta_{un^+} \leq D_{ult}$
	2	$\Delta\delta > 0$, και $\delta_{un^+} > D_{ult}$
	3	$\Delta\delta < 0$
4	10	$\Delta\delta < 0$, και $F_{cur} \cong F_6 = F_{un^+}$
	60	$\Delta\delta < 0$, και $F_{cur} \neq F_6$
	5	$\Delta\delta > 0$
5	40	$\Delta\delta > 0$, και $F_{cur} < F_7$
	6	$\Delta\delta > 0$, και $F_{cur} > F_7$
	5'	$\Delta\delta < 0$
5'	4	$\Delta\delta < 0$, και $F_{cur} > F_{70}$
	60	$\Delta\delta < 0$, και $F_{cur} < F_{70}$
	5	$\Delta\delta > 0$
6	1	$\Delta\delta > 0$, και $b * \delta_{un^+} \leq D_{ult}$
	2	$\Delta\delta > 0$, και $b * \delta_{un^+} > D_{ult}$
	7	$\Delta\delta < 0$
7	4	$\Delta\delta < 0$
	7'	$\Delta\delta > 0$
7'	6	$\Delta\delta > 0$
	7	$\Delta\delta < 0$
10	20	$\Delta\delta < 0$
	30	$\Delta\delta > 0$
20	αστοχία	$\Delta\delta < 0$
	3	$\Delta\delta > 0$
30	40	$\Delta\delta > 0$
	30'	$\Delta\delta < 0$
30'	10	$\Delta\delta < 0$, και $\delta_{un^-} \geq -D_{ult}$
	20	$\Delta\delta < 0$, και $\delta_{un^-} < -D_{ult}$
	30	$\Delta\delta > 0$
40	1	$\Delta\delta > 0$, $F_{cur} \cong F_{60} = F_{un^-}$
	6	$\Delta\delta > 0$
	5'	$\Delta\delta < 0$
60	10	$\Delta\delta < 0$, και $b * \delta_{un^-} \geq -D_{ult}$
	20	$\Delta\delta < 0$, και $b * \delta_{un^-} < -D_{ult}$
	70	$\Delta\delta > 0$
70	40	$\Delta\delta > 0$
	70'	$\Delta\delta < 0$
70'	60	$\Delta\delta < 0$
	70	$\Delta\delta > 0$

2.3.4. Το υστερητικό προσομοίωμα για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό

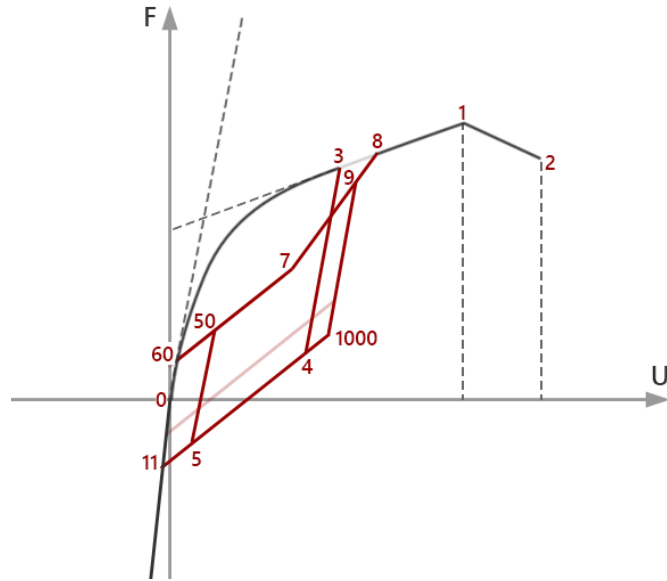


Εικόνα 2.19: Οι παράμετροι του υστερητικού προσομοιώματος για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό

Όπως προαναφέρθηκε στη παράγραφο §2.3.2, η λογική του δεύτερου αυτού προσομοιώματος που αναπτύχθηκε είναι να αποδώσει την ασύμμετρη συμπεριφορά των δύο συνδέσμων σε θλίψη και εφελκυσμό. Μόνον ένα σημείο είναι καινούργιο πρακτικά εδώ (σημείο 11) και ένας κλάδος (κλάδος 8), ενώ τα σημεία 0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 60 και 50 υπεισέρχονται διατηρώντας τις συντεταγμένες τους. Δύο επιπλέον παράμετροι που καθορίζονται από τον χρήστη του user element, σε συνδυασμό με τις 11 προηγούμενες, απαιτούνται για να παραχθεί το μοντέλο. Η πρώτη επιπλέον παράμετρος είναι η θλιπτική δυσκαμψία επαφής με το εκάστοτε υλικό K_c . Η δεύτερη συμβολίζεται ως DF_1 και θεωρήθηκε απαραίτητη, όταν παρατηρήθηκε στα πειραματικά αποτελέσματα, πως, λόγω και πάλι ασυμμετρίας, η παράμετρος F_1 , που όριζε τα συμμετρικά σημεία $(0, F_1)$ και $(0, -F_1)$ στον άξονα των δυνάμεων, δεν επαρκούσε πλέον για να αναπαράγει τους πραγματικούς βρόγχους. Η παράμετρος DF_1 μετατοπίζει το σημείο $(0, -F_1)$ στο $(0, -F_1 - DF_1)$, υποβιβάζοντας τον κλάδο 4 (καθοδικός κλάδος ολίσθησης/χαλάρωσης) και όλα τα σημεία αρχής ή τέλους, που ανήκουν σε αυτόν. Τα σημεία 4, 5 και 1000 είναι δηλαδή τα ίδια σημεία με πριν με μοναδική αλλαγή στις συντεταγμένες τους την μείωση λόγω του DF_1 , και για το λόγο αυτό επιλέχτηκε να παρουσιαστούν με κοινή αρίθμηση.

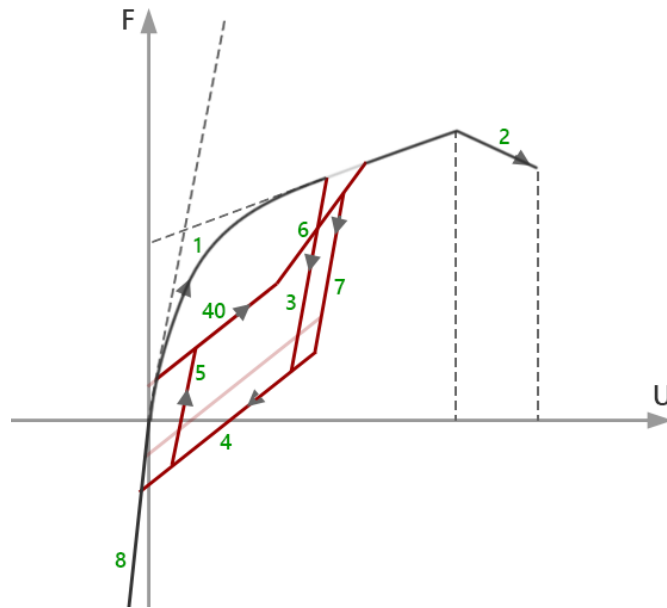
Όπως και στην παράγραφο §2.3.3, παρατίθενται ακολούθως οι ανάλογοι πίνακες (Πίνακας 2.5-Πίνακας 2.8) με πληροφορίες για το προσομοίωμα. Στον Πίνακα 2.6 των σημείων, αναγράφονται μόνο οι συντεταγμένες των σημείων που υπέστησαν αλλαγές.

Πίνακας 2.5: Σύμβολα που χρησιμοποιούνται στο προσομοίωμα για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό	
Σύμβολο	Ερμηνεία
K_c	Θλιπτική δυσκαμψία επαφής με το εκάστοτε υλικό (contact)
DF_1	Παράμετρος που καθορίζει την υποβίβαση του κλάδου 4



Εικόνα 2.20: Τα σημεία του υστερητικού προσομοιώματος για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό

Πίνακας 2.6: Σημεία του προσομοιώματος για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό		
Σημείο	Δ	F
4	$\frac{R_3 * K_0 * \delta_{un^+} - F_3 - F_1}{K_0 * (R_3 - R_4)} - \frac{D_{F1}}{R_3 * K_0}$	$R_4 * \frac{R_3 * K_0 * \delta_{un^+} - F_3 - F_1}{(R_3 - R_4)} - F_1 - D_{F1}$
5	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * U - F_1 - D_{F1}$ • Της ευθείας που περνά από το τρέχον σημείο (δ_{cur}, F_{cur}) και έχει κλίση $R_3 * K_0$ 	
	$\frac{F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev} + F_1}{K_0 * (R_4 - R_3)} - \frac{D_{F1}}{R_3 * K_0}$	$\frac{F_{prev} - R_3 * K_0 * \delta_{prev} + F_1}{K_0 * (R_4 - R_3)} - D_{F1}$
11	$\frac{-F_1 - D_{F1}/R_3 * K_0}{K_c - R_4 * K_0}$	$\frac{-K_c * (F_1 + D_{F1})}{K_c - R_4 * K_0}$
1000	<p>Το σημείο τομής:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Της ευθείας που περνά από το σημείο 9 και έχει κλίση $R_3 * K_0$ • Της ευθείας $F = R_4 * K_0 * \Delta - F_1 - D_{F1}$ 	
	$\frac{F_1 + F_9 - R_3 * K_0 * \delta_9}{K_0 * (R_4 - R_3)} - \frac{D_{F1}}{R_3 * K_0}$	$\frac{F_1 + F_9 - R_3 * K_0 * \delta_9}{K_0 * (R_4 - R_3)} - D_{F1}$



Εικόνα 2.21: Οι κλάδοι του υστερητικού προσομοιώματος για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό

Πίνακας 2.7: Τα σημεία αρχής και τέλους των κλάδων του προσομοιώματος για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό

Κλάδος	Σημείο αρχής	Σημείο τέλους
1	0	1
2	1	2
3	3	4
3'	4	3
4	4	11
5	5	50
5'	50	5
6	7	8
7	9	1000
7'	1000	9
8	-	0
8'	0	-
40	60	7

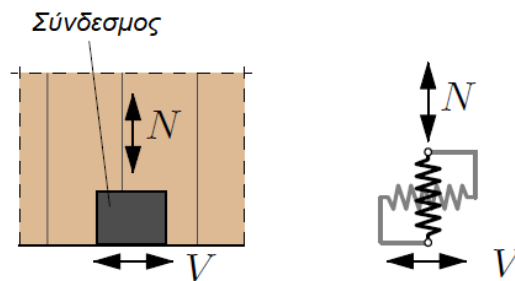
Πίνακας 2.8: Κατεύθυνση κλάδων για angle brackets και hold-downs σε θλίψη και εφελκυσμό

Τρέχον κλάδος	Επόμενος Κλάδος	Συνθήκη κατεύθυνσης
Ανοδικός Κλάδος↑		
Καθοδικός Κλάδος↓		
1	2	$\Delta\delta > 0$
	40	$\Delta\delta > 0$, και $F_{cur} \cong F_{60} = F_{un+}$
	3	$\Delta\delta < 0$
2	αστοχία	$\Delta\delta > 0$
	3	$\Delta\delta < 0$
3	4	$\Delta\delta < 0$
	3'	$\Delta\delta > 0$
3'	1	$\Delta\delta > 0$, και $\delta_{un+} \leq D_{ult}$
	2	$\Delta\delta > 0$, και $\delta_{un+} > D_{ult}$
	3	$\Delta\delta < 0$
4	8	$\Delta\delta < 0$
	5	$\Delta\delta > 0$
5	40	$\Delta\delta > 0$, και $F_{cur} < F_7$
	6	$\Delta\delta > 0$, και $F_{cur} > F_7$
	5'	$\Delta\delta < 0$
5'	4	$\Delta\delta < 0$, και $F_{cur} > F_{70}$
	5	$\Delta\delta > 0$
6	1	$\Delta\delta > 0$, και $b * \delta_{un+} \leq D_{ult}$
	2	$\Delta\delta > 0$, και $b * \delta_{un+} > D_{ult}$
	7	$\Delta\delta < 0$
7	4	$\Delta\delta < 0$
	7'	$\Delta\delta > 0$
7'	6	$\Delta\delta > 0$
	7	$\Delta\delta < 0$
8	8	$\Delta\delta < 0$
	8'	$\Delta\delta > 0$
8'	1	$\Delta\delta > 0$
	8	$\Delta\delta < 0$
40	6	$\Delta\delta > 0$
	5'	$\Delta\delta < 0$

2.4. Προσομοίωση των συνδέσεων με στοιχεία χρήστη και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Οι μεταλλικοί σύνδεσμοι, που χρησιμοποιήθηκαν στην αριθμητική προσομοίωση κτιρίων και πάνελ από CLT, διαχωρίζονται σε τρεις τύπους: angle brackets, hold-downs και αυτοκοχλιούμενοι κοχλίες. Οι κοχλίες συνδέουν τους τοίχους με τις οροφές, ενώ τα angle brackets και hold-downs τους τοίχους με το δάπεδα.

Αξίζει εδώ να επισημανθεί ότι, στην πράξη, οι μηχανικοί συχνά κάνουν την απλοποιητική παραδοχή, ότι τα hold-downs μεταφέρουν αποκλειστικά και μόνο τις εφελκυστικές δυνάμεις (λόγω ροπών και ανύψωσης του πάνελ), ενώ τα angle brackets αναλαμβάνουν τη δύναμη διάτμησης. Παρόλα αυτά, τα πειραματικά δεδομένα δείχνουν πως η ικανότητα παραλαβής φορτίων των δύο συνδέσμων στη δευτερεύουσα διεύθυνση και ειδικά στην περίπτωση των angle brackets, δεν είναι διόλου αμελητέα. Το γεγονός αυτό έχει επισημανθεί επανειλημμένα στη βιβλιογραφία [Gavrić et al., 2014] [Gavrić et al., 2015] και είναι εύκολο να γίνει κατανοητό, πως οι απλουστεύσεις αυτές οδηγούν σε συντηρητικό σχεδιασμό. Στην εργασία αυτή, θεωρήθηκε απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η συνεισφορά των συνδέσμων και στις δύο βασικές διευθύνσεις, με σκοπό την ορθότερη αποτίμηση της αντισεισμικής ικανότητας, της καθολικής υστερητικής συμπεριφοράς και της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας των κατασκευών.

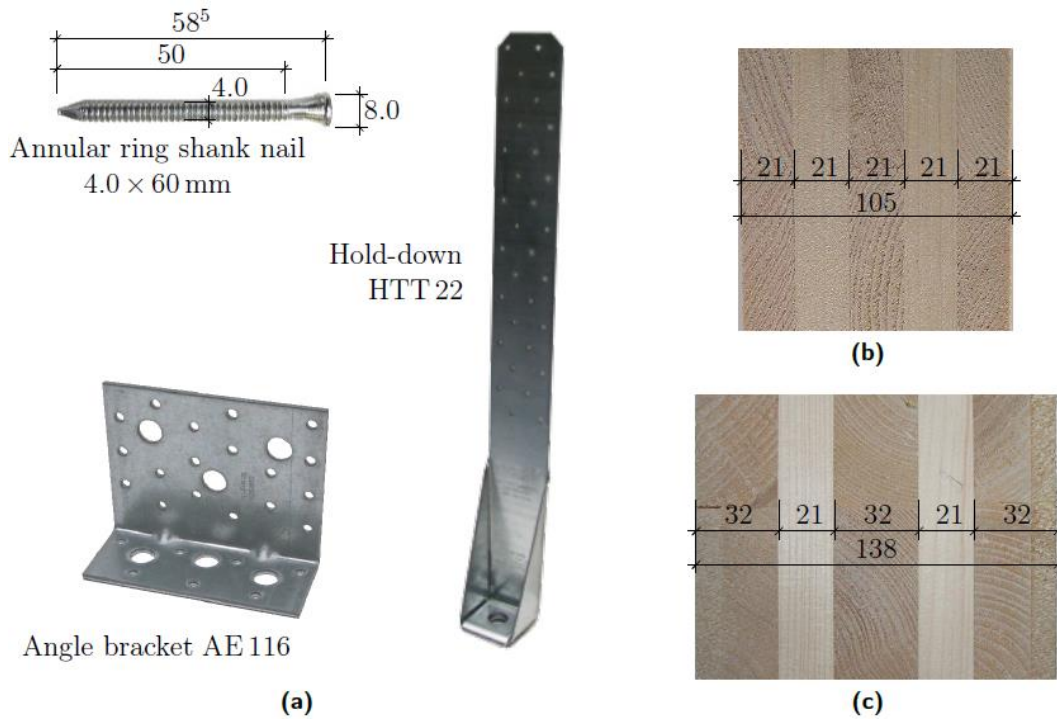


Εικόνα 2.22: Προσομοίωση των συνδέσμων με μη γραμμικά υστερητικά ελατήρια δύο βαθμών ελευθερίας

Κάθε σύνδεση έχει διαφορετική συμπεριφορά στις δύο διευθύνσεις, που προσομοιώνεται από ένα ελατήριο σε κάθε διεύθυνση. Η υστερητική συμπεριφορά των ελατηρίων ακολουθεί τα δύο προσομοιώματα που περιγράφονται στο κεφάλαιο §2.3. Πέραν των τριών αυτών συνδέσμων όμως, χρησιμοποιήθηκε και ένα στοιχείο για την προσομοίωση της επαφής (contact) των πάνελ με τα δάπεδα, τη θεμελίωση και τις οροφές, καθώς και ένα στοιχείο για την προσομοίωση της τριβής. Η συμπεριφορά των στοιχείων επαφής και τριβής καθορίζεται και αυτή μέσω του κώδικα και κατάλληλων user elements (VUEL) που αναπτύχθηκαν. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στο ABAQUS για κάθε στήριξη στις δύο διευθύνσεις και για την επαφή (contact) είχαν μήκος 1mm στην κατακόρυφη διεύθυνση που προστέθηκε για χρηστικούς λόγους, χωρίς να επηρεάζει κάπως τα αποτελέσματα. Ο κώδικας που προέκυψε είναι γραμμένος σε 3500 γραμμές γλώσσας Fortran και ορίζει τη συμπεριφορά των διαφορετικών ελατηρίων που απαρτίζουν κάθε στοιχείο χρήστη.

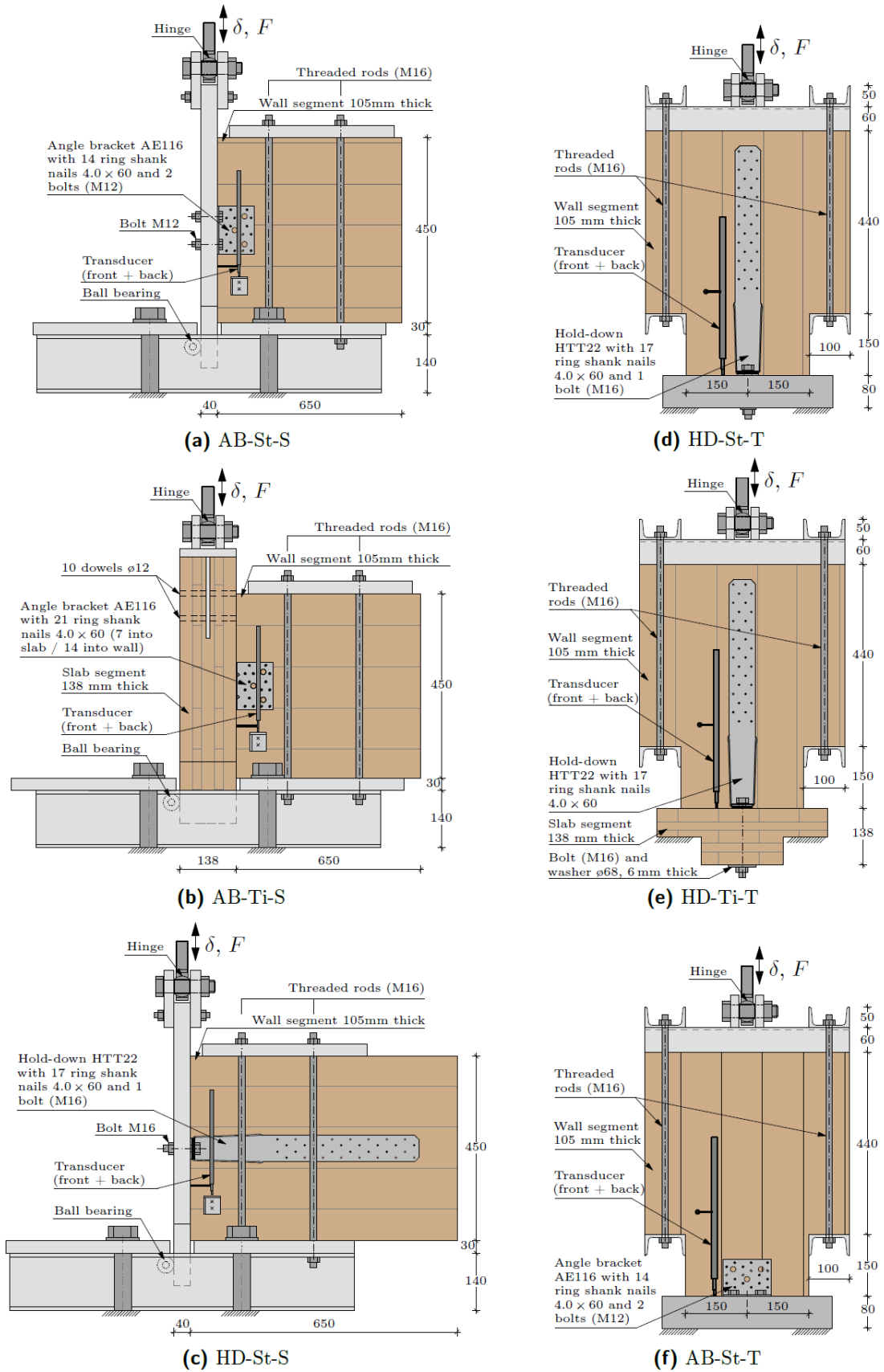
2.4.1. Χαρακτηριστικά συνδεσμολογίας και παρουσίαση πειραμάτων

Ο μεγαλύτερος αριθμός των πειραματικών αποτελεσμάτων, που παρουσιάζονται στην παρούσα παράγραφο και ακολούθως στο κεφάλαιο 3, πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος Optimberquake [Seim et al., 2013b] και περιέχονται στη διατριβή του Hummel J. [2017]. Στο πλαίσιο του προγράμματος αυτού, έγιναν πειράματα σε μεταλλικές συνδέσεις (90 δείγματα), αλλά και σε πάνελ τοίχων από CLT (βλέπε Κεφάλαιο 3). Οι συνδέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ως δείγματα, και συνεπώς προσομοιώθηκαν στην παρούσα εργασία, αλλά και στη βιβλιογραφία [Hummel, 2017], ήταν angle brackets AE116 και hold-downs HTT22 (Εικόνα 2.23a) της εταιρίας «Simpson». Οι δύο αυτοί σύνδεσμοι συναντώνται συχνά στον κατασκευαστικό τομέα.



Εικόνα 2.23: (a) Angle bracket, hold-down και ήλοι, (b) διατομή τοίχων (c) διατομή δαπέδων, που χρησιμοποιήθηκαν στις πειραματικές διατάξεις

Τα πειράματα έγιναν με τους συνδέσμους να ενώνουν πάνελ πάχους 105mm (διατομή τοίχου, Εικόνα 2.23b) είτε με χαλύβδινη βάση (με σκοπό την προσομοίωση της θεμελίωσης σε σπλισμένο σκυρόδεμα), είτε με βάση CLT πάχους 138mm (διατομή δαπέδου, Εικόνα 2.23c). Το CLT ήταν ερυθρελάτη ποιότητας C24. Η συναρμολόγηση έγινε με σταθερό αριθμό, ανά περίπτωση, δακτυλιοφόρων ηλών, διαμέτρου 4.0mm, μήκους 60mm και μέσης αντοχής σε εφελκυσμό, που υπολογίστηκε ίση με $763N/mm^2$.



Εικόνα 2.24: Πειραματικές διατάξεις ερευνητικού προγράμματος Optimberquake και οι ονομασίες τους [Seim et al., 2013b]. Πηγή: [Hummel, 2017].

Η Εικόνα 2.24 παρουσιάζει αναλυτικά τις πειραματικές διατάξεις. Τα σύμβολα που χρησιμοποιούνται στην ονομασία του κάθε τοίχου προέρχονται επίσης από το εν λόγω ερευνητικό πρόγραμμα [Seim et al., 2013b]. Στον Πίνακα 2.9 γίνεται η επεξήγηση των βασικών συμβόλων που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση της ονομασίας των πειραμάτων.

Πίνακας 2.9: Βασικά σύμβολα κωδικοποίησης της ονομασίας των πειραμάτων					
HD	AB	St	Ti	S	T
Hold-down	Angle bracket	Χάλυβας (steel)	CLT (timber)	Διάτμηση (sliding)	Εφελκυσμός (traction)

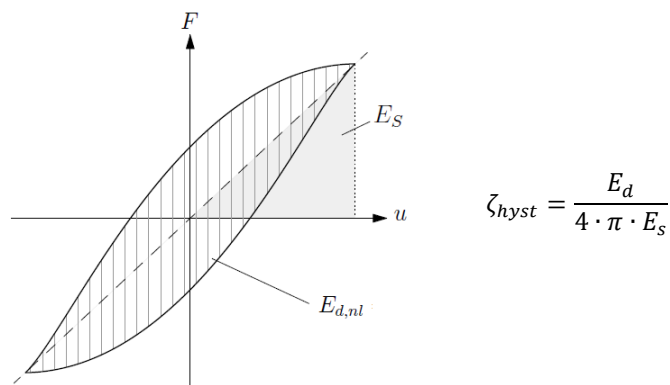
Για τους κατακόρυφα αυτοκοχλιούμενους κοχλίες, που συνδέουν τα πάνελ με την οροφή, τα αποτελέσματα των πειραμάτων και τα στοιχεία που παρουσιάζονται παρακάτω προέρχονται από τη διδακτορική διατριβή του Igor Gavníc [2013], ενώ σχεδόν όλες οι παράμετροι, που χρησιμοποιούνται στα προσομοιώματα (ως inputs) και παρουσιάζονται παρακάτω, πάρθηκαν απευθείας από βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε από τον Hummel [2017] (με ελάχιστες εξαιρέσεις όπως οι επιπλέον παράμετροι των προσομοιωμάτων της εργασίας).

Στα πειράματα πραγματοποιήθηκαν μονοτονικές και ανακυκλιζόμενες φορτίσεις. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ανακυκλιζόμενες φορτίσεις, καθώς με βάση αυτές προσομοιώθηκε η εκάστοτε σπονδυλωτή καμπύλη και με βάση αυτές γίνεται η προσομοίωση. Η φόρτιση (επιβαλλόμενες μετατοπίσεις) στο ερευνητικό πρόγραμμα Optimberquake έγινε με βάση το διεθνές πρότυπο [ISO 16670], ενώ στα πειράματα του Gavníc με βάση το πρότυπο [EN12512, 2001].

Στο υποκεφάλαιο §2.4.2 παρουσιάζονται όλα τα ελατήρια που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιώματα των επόμενων κεφαλαίων (§3, §4), ανεξαρτήτως του αν παρουσιάζουν ή όχι υστερητική συμπεριφορά.

2.4.2. Δεδομένα εισόδου και σύγκριση με πειραματικά αποτελέσματα

Πέραν της καμπύλης δύναμης-σχετικής μετατόπισης, η σύγκριση με τα πειραματικά αποτελέσματα έγινε με βάση την ενέργεια που απορροφάται απ' το σύνδεσμο κατά την ανακυκλική φόρτιση (ανά συνολική σχετική μετατόπιση), αλλά και με την υστερητική απόσβεση. Η υστερητική απόσβεση συγκρίνεται στο επίπεδο της τάξης μεγέθους, καθώς εξαρτάται άμεσα από τη φόρτιση, η οποία «προσεγγίστηκε» για κάθε πείραμα. Η απόσβεση υστέρησης για τις συνδέσεις, υπολογίστηκε με βάση τη σχέση του Chopra [1995], για κάθε βρόγχο:



Εικόνα 2.25: Η ενέργεια που αποσβένει ένας βρόγχος υστέρησης

Όπου:

E_d : ενέργεια που αποσβένεται ανά βρόγχο,

E_s : ελαστική ενέργεια του ισοδύναμου ελαστικού συστήματος $E_s = \frac{1}{2} \cdot \kappa \cdot u^2 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot u$

Παρακάτω παρουσιάζεται κάθε ελατήριο που ελέγχει ο κώδικας του εκάστοτε user element ξεχωριστά. Τα περισσότερα στοιχεία αποτελούνται από δύο ελατήρια (Εικόνα 2.22), με εξαίρεση το contact και την τριβή. Ο συνδυασμός κάθε στοιχείου με το στοιχείο της τριβής, που πρακτικώς αποτελεί ένα επιπλέον ανεξάρτητο

ελατήριο στη διατμητική διεύθυνση, επεξηγείτε στο κεφάλαιο §3. Στους πίνακες 2.11 έως 2.21 φαίνονται οι παράμετροι εισόδου, καθώς και η σύγκριση των ενεργών αποσβέσεων υστέρησης.

Πίνακας 2.10: Αντιστοιχία χρωματισμού και εκάστοτε καμπύλης στα δύο διαγράμματα			
Διάγραμμα	Χρώμα Καμπύλης		
	User element διπλωματικής	Πείραμα [Seim et al., 2013b]	Στοιχείο από Hummel J., [2016]
Διαγράμματα $F - u$	Μαύρο	Μπλε	-
Διαγράμματα $E_{cum} - u_{cum}$	Μαύρο	Γκρι	Μπλε

Στον Πίνακα 2.10 παρουσιάζεται η αντιστοιχία χρωματισμού γραμμών καμπύλης με διαγράμματα πειραμάτων ή αναλύσεων. Στα διαγράμματα δύναμης-σχετικής μετατόπισης, η συμπεριφορά των user elements που αναπτύχθηκαν φαίνεται με μαύρο χρώμα, ενώ από πίσω με μπλε χρώμα φαίνονται οι καμπύλες των πειραμάτων. Στα διαγράμματα ενέργειας, η ενέργεια που αναλώνεται από το user element φαίνεται και πάλι με μαύρο χρώμα, ενώ το πειραματικό αποτέλεσμα με γκρι χρώμα. Η επιπλέον καμπύλη ενέργειας (μπλε) είναι η συμπεριφορά του element σύμφωνα με τον Hummel [2017] και παρουσιάζεται ως ένα επιπλέον μέτρο σύγκρισης και αναφοράς. Οι χρωματισμοί επεξηγούνται και στο κάθε διάγραμμα σε υπόμνημα.

Οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν κατά την προσομοίωση βρίσκονται στο Παράρτημα Γ.

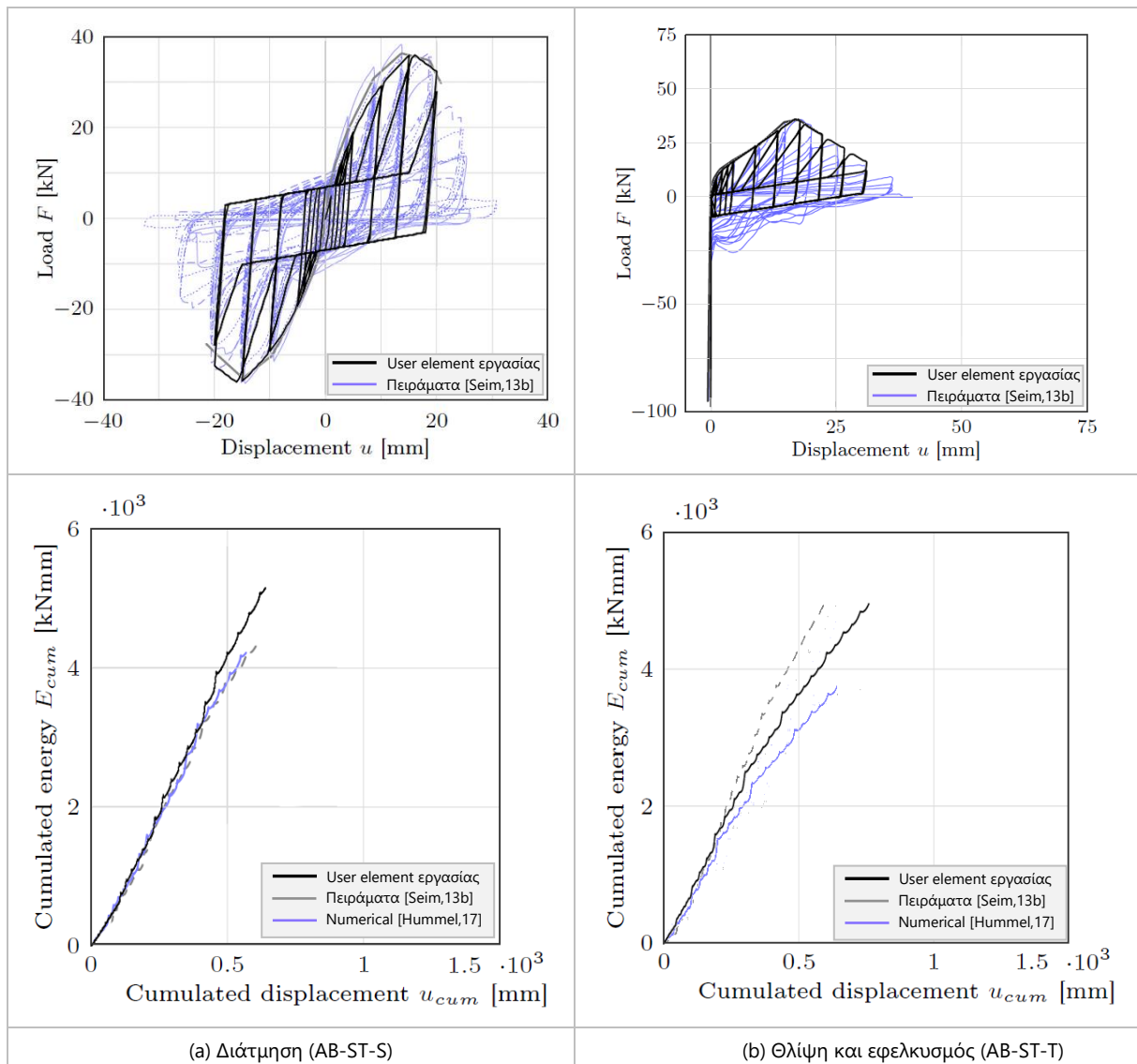
Angle brackets που συνδέουν τοίχο από CLT με θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα

Πίνακας 2.11: Παράμετροι εισόδου για το στοιχείο προσομοίωσης ενός angle bracket που συνδέει τοίχο από CLT με θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα

	K_0 [kN/mm]	F_0 [kN]	F_1 [kN]	Du [mm]	r1	r2	r3	r4	a	b	DF [mm]	Kc [kN/m/m]
Διάτμηση	5.36	23.2	6.9	15	0.17	-0.17	3	0.04	0.25	1.05	21	-
Θλίψη-Εφελκυσμός	14.29	9.3	0.8	16.8	0.112	-0.1	3	0.025	0.45	1.05	31	3333333

Πίνακας 2.12: Η υστερητική απόσβεση του στοιχείου προσομοίωσης ενός angle bracket που συνδέει τοίχο από CLT με θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα και των αντίστοιχων πειραμάτων

Σε διάτμηση		Σε θλίψη-εφελκυσμό	
ζ_{hyst} , user element	ζ_{hyst} , πειραματικό	ζ_{hyst} , user element	ζ_{hyst} , πειραματικό
0.1886	0.190	0.1241	0.136



Εικόνα 2.26: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης και διαγράμματα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας κατά τη ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για τις διατάξεις AB-ST-S και AB-ST-T, κατά τα πειράματα και την αριθμητική προσομοίωσή τους

Angle brackets που συνδέουν τοίχο από CLT με δάπεδο από CLT

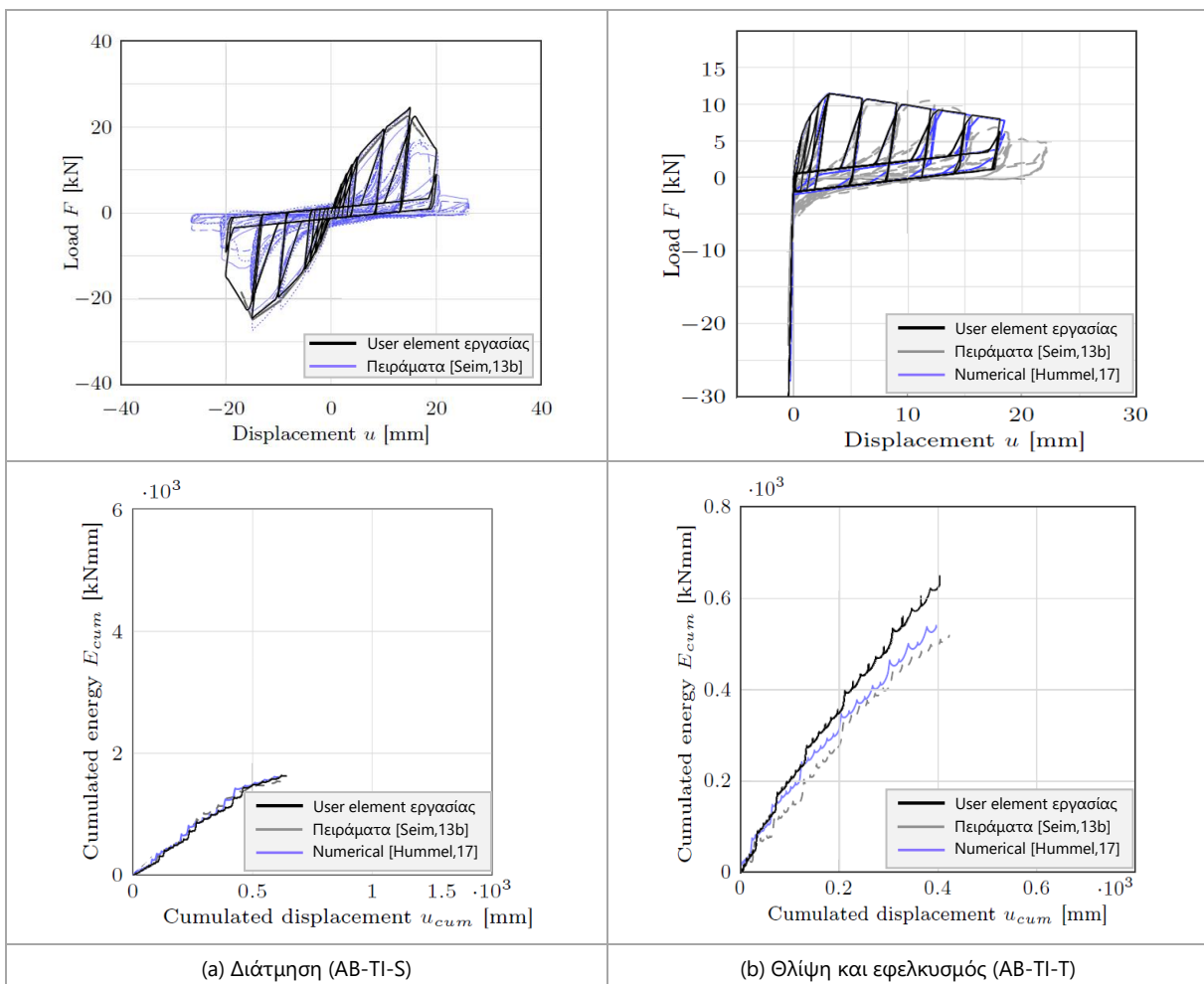
Εδώ, τα αποτελέσματα του πειράματος σε θλίψη και εφελκυσμό δεν προέρχονται από το πρόγραμμα Ortimberquake αλλά από άλλη βιβλιογραφία [Flatscher et al., 2011]. Συνεπώς, η καμπύλη αυτού του πειράματος φαίνεται με γκρι χρώμα, ενώ η επιπλέον καμπύλη (μπλε) είναι η συμπεριφορά του element όπως προσδιορίζεται από τον Hummel J. [2016].

Πίνακας 2.13: Παράμετροι εισόδου για το στοιχείο προσομοίωσης ενός angle bracket που συνδέει τοίχο από CLT με δάπεδο από CLT

	K_0 [kN/mm]	F_0 [kN]	F_1 [kN]	Du [mm]	r1	r2	r3	r4	a	b	DF [mm]	Kc [kN/m/m]
Διάτμηση	3.99	10.7	1.2	15	0.23	-0.5	3	0.03	0.05	1.05	20.5	-
Θλίψη-Εφελκυσμός	11.79	6.9	0.5	3	0.13	-0.02	1	0.015	0.4	1.03	18	233333

Πίνακας 2.14: Η υστερητική απόσβεση του στοιχείου προσομοίωσης ενός angle bracket που συνδέει τοίχο από CLT με δάπεδο από CLT

Σε διάτμηση		Σε θλίψη-εφελκυσμό	
ζ_{hyst} , user element	ζ_{hyst} , πειραματικό	ζ_{hyst} , user element	ζ_{hyst} , πειραματικό
0.1328	0.17	0.0771	Δεν βρέθηκε



Εικόνα 2.27: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης και διαγράμματα συνολική απορροφούμενης ενέργειας κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για τις διατάξεις AB-Ti-S και AB-Ti-T, κατά τα πειράματα και την αριθμητική προσομοίωσή τους

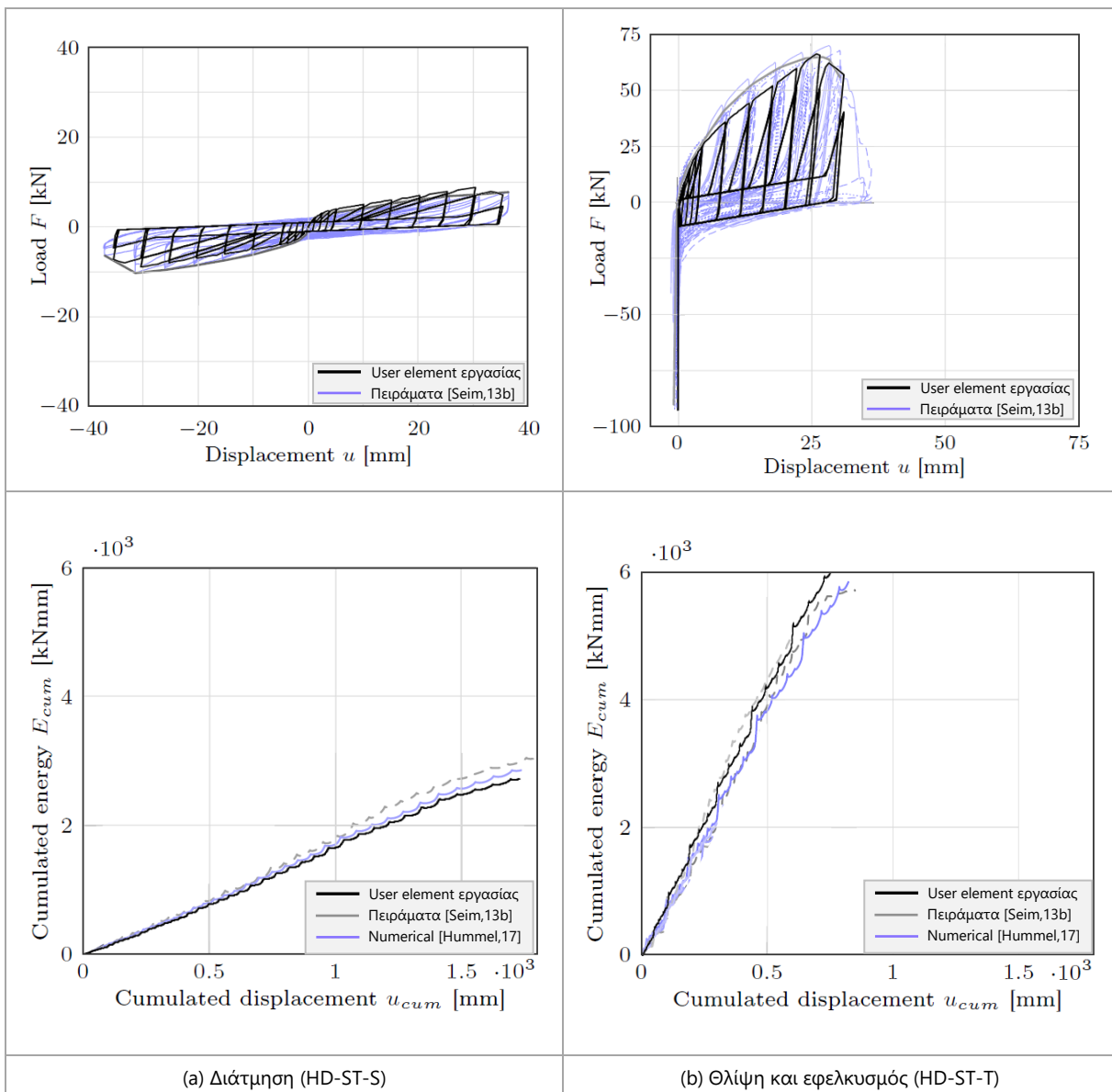
Hold-downs που συνδέου τοίχους από CLT με θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα

Πίνακας 2.15: Παράμετροι εισόδου για το στοιχείο προσομοίωσης ενός hold-down που συνδέει τοίχους από CLT με θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα

	K_0 [kN/mm]	F_0 [kN]	F_1 [kN]	D_u [mm]	r1	r2	r3	r4	a	b	DF [mm]	K_c [kN/m/m]
Διάτμηση	2.38	3.1	1	31	0.08	-0.17	3	0.02	0.6	1.1	35.45	-
Θλίψη-Εφελκυσμός	2.023	2.635	0.85	31	0.08	-0.17	3	0.02	0.6	1.05	37	3333333

Πίνακας 2.16: Η υστερητική απόσβεση του στοιχείου προσομοίωσης ενός hold-down που συνδέει τοίχους από CLT με θεμελίωση από οπλισμένο σκυρόδεμα

Σε διάτμηση		Σε θλίψη-εφελκυσμό	
$\zeta_{hyst, user\ element}$	$\zeta_{hyst, πειραματικό}$	$\zeta_{hyst, user\ element}$	$\zeta_{hyst, πειραματικό}$
0.2475	0.274	0.0727	0.071



Εικόνα 2.28: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης και διαγράμματα συνολική απορροφούμενης ενέργειας κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για τις διατάξεις HD-ST-S και HD-ST-T, κατά τα πειράματα και την αριθμητική προσομοίωσή τους

Hold-downs που συνδέουν τοίχους από CLT με δάπεδο από CLT

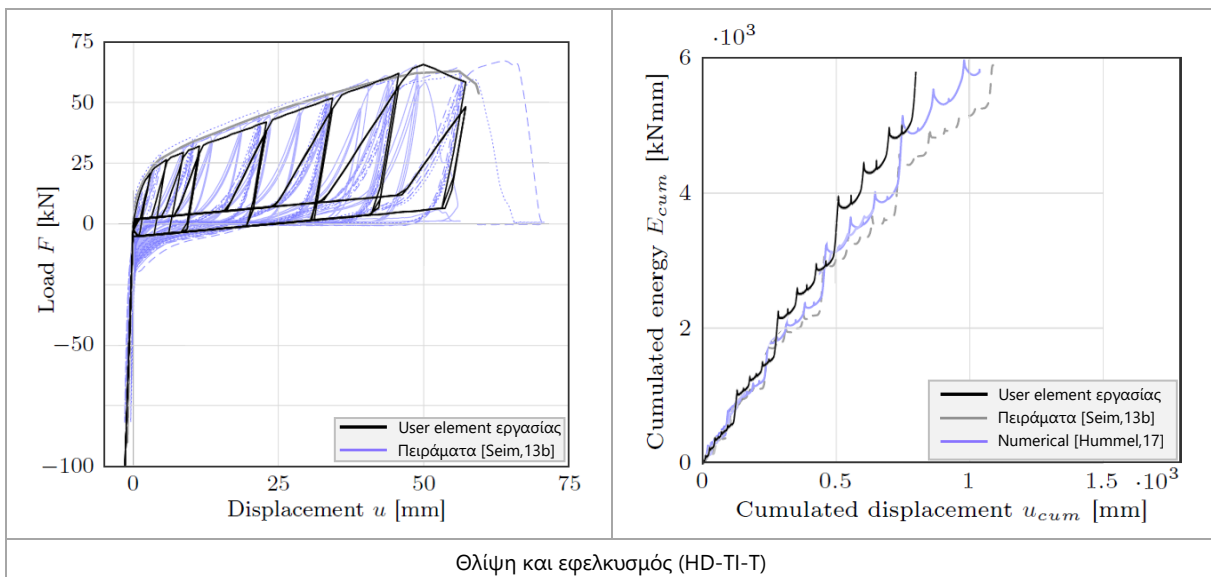
Τα hold-downs, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, παρουσιάζουν την ίδια υστερητική συμπεριφορά σε διάτμηση ανεξαρτήτως του υλικού αγκύρωσής τους. Συνεπώς, εδώ παρουσιάζεται μόνο η υστέρηση σε εφελκυσμό, δεδομένου ότι σε διάτμηση χρησιμοποιήθηκε το ίδιο ελατήριο (HD-ST-S).

Πίνακας 2.17: Παράμετροι εισόδου για το στοιχείο προσομοίωσης ενός hold-down που συνδέει τοίχους από CLT με δάπεδο από CLT

	K_0 [kN/mm]	F_0 [kN]	F_1 [kN]	Du [mm]	r1	r2	r3	r4	a	b	DF [mm]	Kc [kN/m/m]
Διάτμηση	2.38	3.1	1	31	0.08	-0.17	3	0.02	0.6	1.1	35.45	-
Θλίψη-Εφελκυσμός	14.52	22	1.8	50	0.06	-0.071	1	0.015	0.4	1.04	57.2	233333

Πίνακας 2.18: Η υστερητική απόσβεση του στοιχείου προσομοίωσης ενός hold-down που συνδέει τοίχους από CLT με δάπεδο από CLT

Σε διάτμηση		Σε θλίψη-εφελκυσμό	
ζ_{hyst} , user element	ζ_{hyst} , πειραματικό	ζ_{hyst} , user element	ζ_{hyst} , πειραματικό
Ίδια συμπεριφορά με σύνδεση σε σκυρόδεμα		0.0631	0.0620



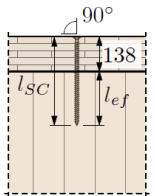
Εικόνα 2.29: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης και διαγράμματα συνολική απορροφούμενης ενέργειας κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για τη διάταξη HD-Ti-T, κατά τα πειράματα και την αριθμητική προσομοίωσή τους

Αυτοκοχλιούμενοι κοχλίες

Η υστερητική απόκριση των κοχλιών λήφθηκε υπόψιν για τη διάτμηση, ενώ στη κατακόρυφη διεύθυνση πέραν του contact με το CLT, ο εφελκυσμός παραλαμβάνονταν από ένα διγραμμικό ελατήριο. Η απορρόφηση ενέργειας σύμφωνα με [Ganric, 2013] δεν είναι μεγάλη για τους κοχλίες σε εφελκυσμό και οι μετατοπίσεις των κοχλιών στη διεύθυνση αυτή ήταν όντως πολύ μικρές κατά την ανάλυση των κτιρίων με χρονοϊστορίες. Η δυσκαμψία σε εφελκυστικές δυνάμεις προκύπτει από τον παρακάτω τύπο και οι σχετικές μετατοπίσεις διαρροής και αστοχίας πάρθηκαν από τα πειραματικά αποτελέσματα [Ganric, 2013].

$$K_{ax} = 234 \cdot (\rho \cdot d)^{0.2} \cdot l_{eff}^{0.4}$$

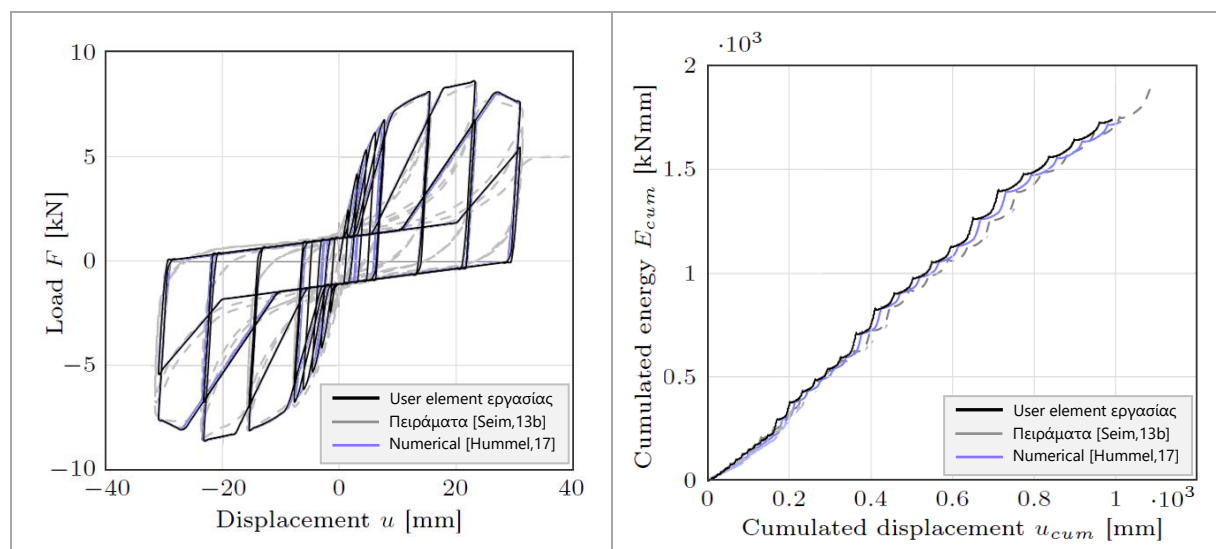
Πίνακας 2.19: Χαρακτηριστικά των αυτοκοχλιούμενων κοχλιών

	l_{sc} [mm]	l_{eff} [mm]	d [mm]	ρ (CLT) [kg/m ³]
	260	122	10	420

Πίνακας 2.20: Παράμετροι εισόδου για το στοιχείο προσομοίωσης ενός αυτοκοχλιούμενου κοχλία που συνδέει τοίχους από CLT με οροφή από CLT

	K_0, K_{ax} [kN/mm]	F_0 [kN]	F_1 [kN]	Du [mm]	r1	r2	r3	r4	a	b	DF [mm]	Kc [kN/m/m]
Διάτμηση	1.83	7.6	1.1	23.3	0.024	-0.075	2.5	0.02	0.8	1.15	32	-
Θλίψη-Εφελκυσμός	8.48	-	-	1.2	-	-	-	-	-	-	30	233333

Εδώ, τα αποτελέσματα του πειράματος σε διάτμηση δεν βρέθηκαν από το πρόγραμμα Optimberquake αλλά από τον Ganric [2013]. Συνεπώς, η καμπύλη αυτού του πειράματος φαίνεται με γκρι χρώμα ενώ η επιπλέον καμπύλη (μπλε) είναι η συμπεριφορά του element από [Hummel, 2017].



Εικόνα 2.30: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης και διαγράμματα συνολική απορροφούμενης ενέργειας κατά την ανακυκλιζόμενη φόρτιση, για τους κοχλίες σε διάτμηση, κατά τα πειράματα και την αριθμητική προσομοίωσή τους

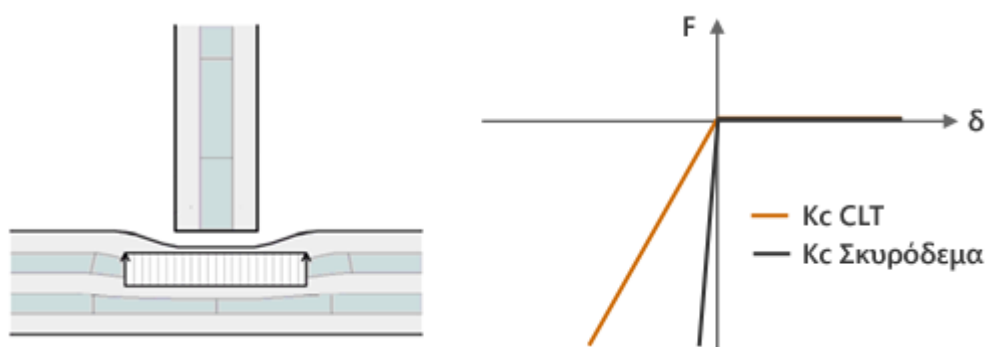
Μετά την ολοκλήρωση της σύγκρισης με τα πειράματα, παρουσιάζονται ακολούθως τα δυο επιπλέον στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιώματα των κεφαλαίων 4 και 5.

Στοιχείο επαφής (contact)

Τα στοιχεία αυτά προστέθηκαν στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (mesh) στις διεπιφάνειες και προσομοιώνουν την επαφή των τοίχων, είτε με τα δάπεδα (και οροφές), είτε με τη θεμελίωση. Έτσι πρακτικώς κάθε πεπερασμένο στοιχείο των διεπιφανειών είχε είτε ένα contact στοιχείο, είτε έναν contact κλάδο στην περίπτωση των θέσεων μεταλλικών συνδέσμων. Δημιουργείται κατ' αυτόν τον τρόπο ένα προσομοίωμα τοίχου CLT, που στη βάση του, εκτός των μη γραμμικών υστερητικών στοιχείων, υπάρχουν και στοιχεία επαφής για την προσομοίωση της ενδοσιμότητας της βάσης. Οι δυσκαμψίες πάρθηκαν από τα πειράματα του ερευνητικού προγράμματος Optimberquake και συμφωνούν εν γένει με τη βιβλιογραφία. Τα στοιχεία αυτά έχουν φυσικά μηδενική αντοχή σε εφελκυσμό. Ο ρόλος τους είναι όμως πολύ σημαντικός, καθώς:

- Επιτρέπουν στο μοντέλο να συμπεριλάβει δύο διαφορετικούς τύπους επαφής, με το σπλισμένο σκυροδέμα να είναι πρακτικώς άκαμπτο, ενώ το CLT να επιτρέπει την βύθιση.
- Επιτρέπουν την προσομοίωση φαινομένων, όπως ο λικνισμός των σωμάτων, αλλά και η εξάρτηση της δυσκαμψίας του προσομοιώματος από την εξωτερική φόρτιση, προσομοιώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο τη γεωμετρική μη-γραμμικότητα του συστήματος.
- Επιτρέπουν να ληφθούν υπόψη φαινόμενα τριβής στο μοντέλο, μοιράζοντας σωστά τις θλιπτικές δυνάμεις στη βάση των πάνελ κατά το ανασήκωμά του.

Οι δυσκαμψίες των στοιχείων επαφής σε θλίψη φαίνονται στην Εικόνα 2.31 και υπολογίζονται με βάση το μήκος επιρροής του στο δίκτυο των πεπερασμένων στοιχείων (mesh), με τα ακριανά στοιχεία των πάνελ να έχουν συνεπώς τη μισή δυσκαμψία κ.ο.κ.



Εικόνα 2.31: Ενδεικτικό διάγραμμα των δυσκαμψιών σπλισμένου σκυροδέματος και CLT σε θλίψη

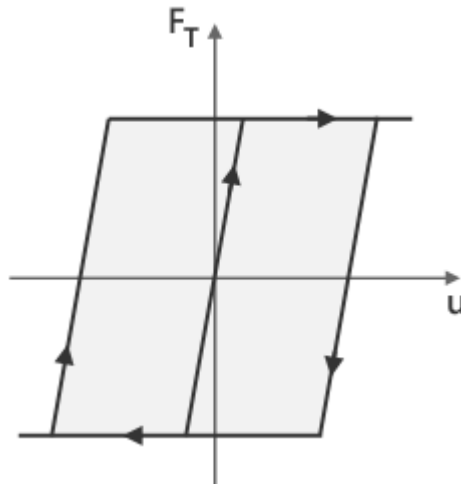
Πίνακας 2.20: Οι δυσκαμψίες των στοιχείων επαφής σε θλίψη	
$K_{c,CLT} [kN/m/m]$	$K_{c,concrete} [kN/m/m]$
233333	333333

Στοιχείο τριβής

Αν και η έννοια της τριβής γίνεται εύκολα κατανοητή, είναι γνωστό πως η προσομοίωσή της δεν είναι απλή. Η τριβή αποτελεί στην πραγματικότητα ένα πολύ περίπλοκο φαινόμενο, που αναπτύσσεται από την επαφή των επιφανειών. Πειράματα που διερευνούν το φαινόμενο έχουν δείξει στην πράξη μια λειτουργική εξάρτησή του από μεγάλη ποικιλία παραμέτρων (ταχύτητα ολίσθησης, επιτάχυνση, κρίσιμη απόσταση ολίσθησης, θερμοκρασία, κανονικό φορτίο, συνδυασμό υλικών κτλ.). Σε πολλές εφαρμογές μηχανικής, η επιτυχία των προσομοιωμάτων στην πρόβλεψη πειραματικών αποτελεσμάτων παραμένει έντονα ευαίσθητη στο μοντέλο της τριβής. Μια πληθώρα κλάδων της μηχανικής και της φυσικής έχουν αναδείξει διαφορετικά μεταξύ τους και εξίσου επιτυχημένα προσομοιώματα. Η καταλληλότερη επιλογή έγκειται στο παράδοξο γεγονός, πως το προσομοίωμα πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος και το προσομοίωμα τριβής είναι θεμελιωδώς συζευγμένα και η επιλογή τους δεν είναι ανεξάρτητη [Bergier EJ, 2002].

Για τα δυναμικά προβλήματα πολιτικού μηχανικού υπάρχουν διάφορα προσομοιώματα που έχουν προταθεί και μπορούν να χρησιμοποιηθούν [Ying, 1992] [Ba Do, 2005]. Η προσομοίωση της τριβής επηρεάζει τη δυσκαμψία

και την ιδιοπερίοδο της κατασκευής και συνήθως ενέχει μη γραμμικά χαρακτηριστικά, όπως ασυνέχειες, υστέρηση και εσωτερική δυναμική. Στην εργασία αυτή επιλέχθηκε τελικώς μια σχετικώς απλή προσέγγιση τριβής κατά Coulomb (dry friction) μεταξύ των κόμβων στις διεπιφάνειες με επίπεδη επιφάνεια ολίσθησης. Η κινητική τριβή (τριβή ολίσθησης) πάρθηκε υπόψιν μέσω ενός επιπλέον ελατηρίου στη διεύθυνση της διάτμησης, του οποίου η συμπεριφορά καθορίζεται από τον κώδικα των user elements. Η στατική τριβή αγνοήθηκε (sticking). Ο συντελεστής κινητικής τριβής του Coulomb προτάθηκε αρχικά από τον Petersen [1996], στη δε εργασία αυτή λήφθηκε, όπως χρησιμοποιείται στη διατριβή του Hummel [2017]. Ο συντελεστής εξαρτάται από τις επιφάνειες τριβής και καθορίζει τη μέγιστη δύναμη τριβής $F_{T,max}$. Η $F_{T,max}$ υπολογίζεται, ανά πάσα στιγμή, για κάθε στοιχείο ως ένα ποσοστό της κατακόρυφης αρνητικής δύναμης F_V που δέχεται. Η F_V μπορεί εύκολα να υπολογιστεί, καθώς είναι ίση και αντίθετη με την αντίδραση που προκύπτει στο στοιχείο contact (ή στον contact κλάδο αντίστοιχα). Η υστερητική συμπεριφορά του στοιχείου τριβής φαίνεται στην Εικόνα 2.32. Παρόλο που η τριβή εμφανίζει κανονικά πλήρως πλαστική υστέρηση, εδώ υιοθετήθηκε ένα στοιχειώδες γραμμικό τμήμα δυσκαμψίας $10^6 kN/m$.



Εικόνα 2.32: Υστερητική συμπεριφορά στοιχείου τριβής

Πίνακας 2.21: Οι τιμές του συντελεστή κινητικής τριβής για τα διάφορα υλικά των διεπιφανειών

$F_{T,max} = -\mu_i \cdot F_V$	CLT / CLT	CLT / σκυρόδεμα	CLT / λείο χάλυβα	CLT/CLT με κοχλία
	$\mu_t = 0.38$	$\mu_c = 0.3$	$\mu_{st} = 0.1$	$\mu_{sc} = 0.2$

Το ελατήριο της τριβής είναι ανεξάρτητο των υπολοίπων και εξαρτάται μόνον από την αντίδραση του στοιχείου contact. Η δύναμη του ελατηρίου τριβής σχετίζεται με την σχετική μετατόπιση ανά χρονικό βήμα du και όχι με την απόσταση των δύο κόμβων και είναι συνεπώς αντίρροπη της ταχύτητας. Αξίζει εδώ να σημειωθεί, ότι οι συντελεστές μ_i επιλέχθηκαν ως το κατώτερο όριο του φάσματος τιμών από [Petersen, 1996] και συγκεκριμένα ο συντελεστής CLT/CLT έχει χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία με τη τιμή 0.6 από [Rinaldin et al., 2016], γεγονός που αναδεικνύει την ανάγκη επιπλέον πειραματικών διαδικασιών για τη διερεύνηση των τιμών αυτών. Ο συντελεστής μ_{sc} είναι μικρότερος του μ_t καθώς στην πράξη ένα ποσοστό της κατακόρυφης δύναμης μεταφέρετε μέσω του κοχλία.

2.4.3. Επιλογή της σχετικής μετατόπισης αστοχίας

Το προσομοίωμα SAWS σχεδιάστηκε από τους Folz και Filiatrault για την περιγραφή της συμπεριφοράς τοίχων από OSB πάνελ και ελαφρύ ξύλινο σκελετό (light timber frames). Στη παρούσα εργασία, επιχειρήθηκε η προσομοίωση μεταλλικών συνδέσμων σε πάνελ από CLT, βασισμένη στο ίδιο υστερητικό μοντέλο. Το πέρασμα σε διαφορετικό υλικό, διαφορετικό σύστημα δομής, αλλά κι από τον τοίχο σε στοιχείο σύνδεσης δεν είναι μικρό. Το SAWS σχεδιάστηκε πρακτικά για μια φαινομενολογική προσέγγιση, ενώ εδώ χρησιμοποιείτε για προσομοίωση του κάθε επιμέρους εξαρτήματος. Μια ενδιαφέρουσα μελέτη σχετικά με τις διάφορες προσεγγίσεις

προσομοίωσης για κατασκευές CLT [Rozza et al., 2017] κατέληξε στο συμπέρασμα, ότι η ακριβέστερη μέθοδος είναι η προσομοίωση των επιμέρους εξαρτημάτων (component approach), ειδικά για τα φαινόμενα rocking. Παρ' όλα αυτά, το προσομοίωμα που αναπτύχθηκε, όπως είδαμε, ανταποκρίνεται πολύ καλά στη προσομοίωση συνδέσμων με την επιλογή κατάλληλων παραμέτρων, αλλά και τροποποιήσεων. Μια επιπλέον μικρή τροποποίησή στο προσομοίωμα SAWS πραγματοποιήθηκε, όσον αναφορά τη σχετική μετατόπιση αστοχίας, η οποία αξίζει να σημειωθεί.

Το SAWS ονομάστηκε μοντέλο 10 παραμέτρων από τους Folz και Filiatrault [2004a], επειδή η σχετική μετατόπιση αστοχίας D_F , αν και αναφέρεται από τους ίδιους στην περιγραφή της σπονδυλωτής καμπύλης, δεν αποτελούσε δεδομένο εισόδου. Αυτό γίνεται αντιληπτό από το CASHEW program [Folz and Filiatrault, 2000], που υπολογίζει αυτόματα το σημείο αστοχίας, ως σημείο τομής του καθοδικού γραμμικού κλάδου της σπονδυλωτής καμπύλης με τον αντίστοιχο κλάδο ολίσθησης. Ο υπολογισμός αυτός, αν και αποτελεί σωστή προσομοίωση των τοίχων με ξύλινο σκελετό (μάλιστα θεωρείται και συντηρητική [Pang et al., 2007]), που συνεχίζουν να αποσβένουν ενέργεια σε πολύ μεγάλες σχετικές μετατοπίσεις χάρις στην πληθώρα πλάστιμων ήλων, δεν είναι απαραίτητα αληθής για τους μεταλλικούς συνδέσμους στο CLT, οι οποίοι μπορούν να αστοχήσουν ψαθυρά (Εικόνα 2.34).

Από τη βιβλιογραφία παρατηρήθηκε πως, αν και συνήθως χρησιμοποιείται αυτούσιο το μοντέλο, όπως από τον Hummel [2017], ο κάθε μελετητής στην πράξη κάνει τη δική του εκτίμηση που εξαρτάται από τη χρήση.

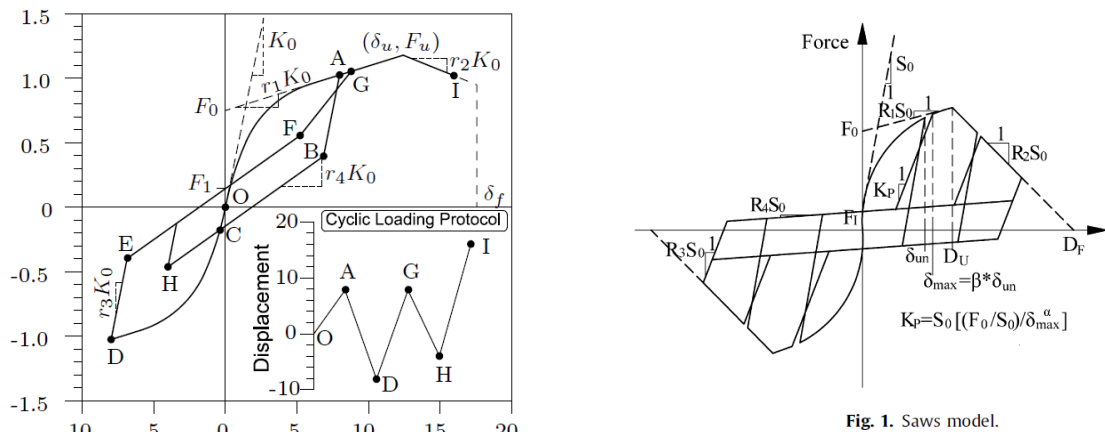
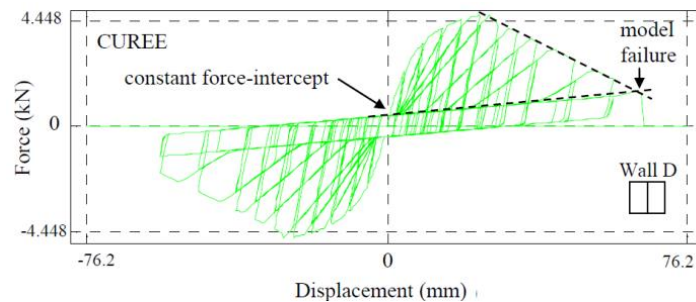
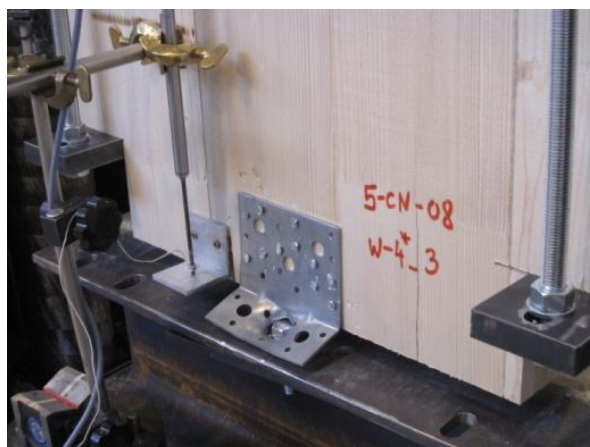


Fig. 1. Saws model.



Εικόνα 2.33: Παραδείγματα διαφορετικών προσεγγίσεων της μετατόπισης αστοχίας στη βιβλιογραφία

Η μετατόπιση αστοχίας σε μονοτονική φόρτιση, που ορίζουν οι διατάξεις (EN12512, 2001) για τις διγραμμικές καμπύλες F-δ στο 80% της μέγιστης δύναμης, δεν θα μπορούσε να εφαρμοστεί εδώ ως D_F , καθώς πέραν του ότι απευθύνεται σε διαφορετική καμπύλη (η καμπύλη της μονοτονικής φτάνει σε μεγαλύτερες δυνάμεις κτλ.), δεν εκπροσωπεί επαρκώς την υστερητική συμπεριφορά πλάστιμων συνδέσεων.



Εικόνα 2.34: Ψαθυρή αστοχία ενός angle bracket υπό εφελκυστική φόρτιση [Gavric, 2013]

Το επιθυμητό θα ήταν να υπάρχουν περισσότερα βιβλιογραφικά αποτελέσματα πειραμάτων με φορτίσεις βασισμένες σε πρωτόκολλα, που μελετούν την αστοχία υπό «ακραίες» συνθήκες (βλέπε ίσως CUREE testing protocols [Krawinkler et al., 2001]). Τα πρωτόκολλά ISO για τα ξύλινα πάνελ και τις συνδέσεις τους, αν και έχουν το προτέρημα πως είναι παγκόσμια και ανεξάρτητα της μετατόπισης διαρροής (συνεπώς και της μεθόδου διγραμμικοποίησης), ίσως δεν τηρούν πάντοτε την προδιαγραφή αυτή για σεισμική αποτίμηση και μελέτη.

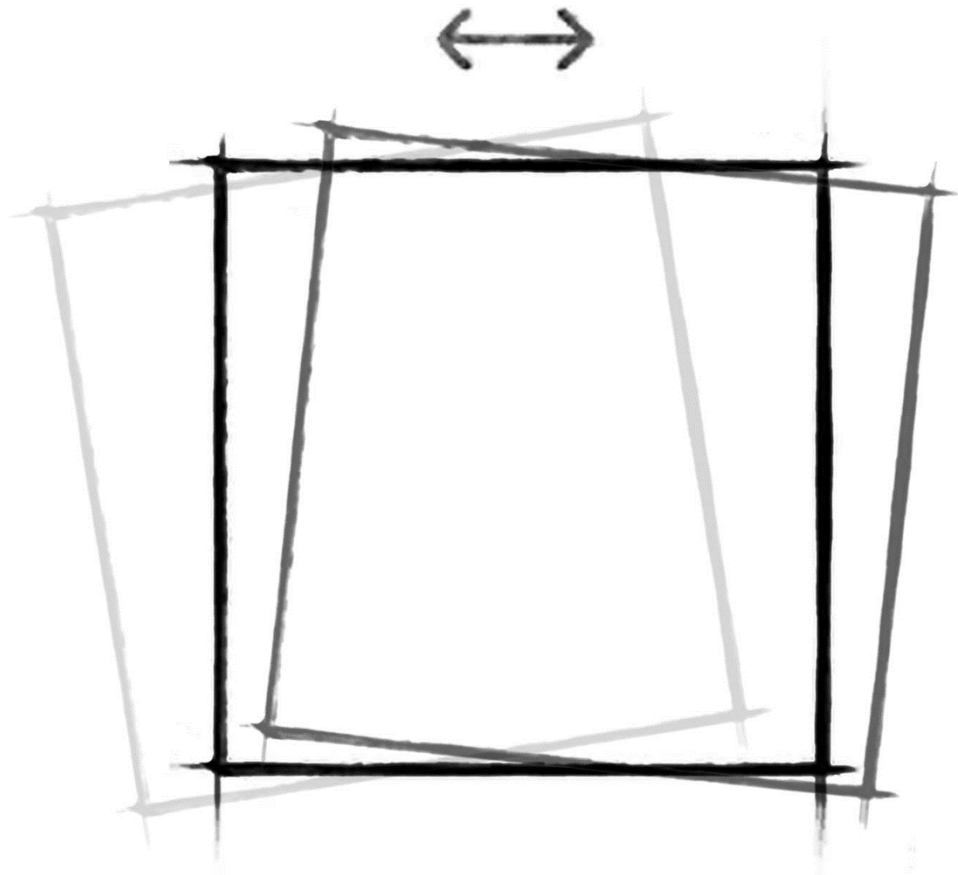
Στην παρούσα εργασία έγινε μια σχετικά αυστηρή επιλογή του D_F , που πολύ πιθανόν να αδικεί τη δυνατότητα κάποιας σύνδεσης. Η επιλογή είναι βασισμένη στα πειράματα που παρουσιάστηκαν, καθορίζοντας το σημείο έως το οποίο θεωρήθηκε πως το υστερητικό μοντέλο εκπροσωπεί την πραγματική συμπεριφορά. Με τον τρόπο αυτό, αποφεύχθηκε και η υποψία τυχόν ψαθυρών αστοχιών που δεν λήφθηκαν υπόψιν.

2.5. Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των στοιχείων χρήστη (user elements)

Η σύγκριση της υστερητικής συμπεριφοράς των οκτώ ελατηρίων, που συνιστούν τα user elements, με τα πειραματικά αποτελέσματα είναι πολύ ικανοποιητική. Οι δέκα βασικές παράμετροι, που χρησιμοποιούνται στα προσομοιώματα (ως inputs), και λήφθηκαν από τον Hummel [2017] (με μικρές μόνο αλλαγές), σε συνδυασμό με τον κώδικα που αναπτύχθηκε, φαίνεται να οδηγούν σε μια αποτελεσματική για κάθε ελατήριο αναπαραγωγή των βρόγχων της υστέρησης. Η σπονδυλωτή καμπύλη είναι σχεδόν ίδια στα προσομοιώματα και στα πειράματα, ενώ η συνολική ενέργεια, που απορροφάται απ' το σύνδεσμο κατά την ανακυκλική φόρτιση, είναι επίσης ικανοποιητική. Οι μεγαλύτερες διαφορές σε επίπεδο ενέργειας βρίσκονται στα πειράματα HD-Ti-T και AB-Ti-T. Στην περίπτωση του HD-Ti-T η ενέργεια που αναλώνεται είναι ισάξια με αυτή του πειράματος, αλλά για μικρότερη συνολική μετατόπιση. Συνεπώς, επιλέχθηκε το hold-down να αστοχεί για σχετική μετατόπιση μεγαλύτερη των 57.2mm. Στην περίπτωση του AB-Ti-T η διαφορά έγκειται στο ότι η δεύτερη και η τρίτη επανάληψη κάθε μετατόπισης που επιβάλλεται (βλέπε παράρτημα Γ) έχουν το ίδιο εμβαδό κατά την προσομοίωση, ενώ διαφορετικό κατά το πείραμα (όπου στη τρίτη το εμβαδόν είναι λίγο μικρότερο), γεγονός που οδηγεί σε μέγιστη απόκλιση 23%. Στο πείραμα η συνολική μετατόπιση είναι στην πραγματικότητα μεγαλύτερη και το διάγραμμα ενέργειας συνεχίζεται, η συνέχεια όμως δεν βρέθηκε στη βιβλιογραφία καθώς τα διαγράμματα πάρθηκαν από τη διατριβή του Hummel όπου παρουσιάζονται έως το σημείο που φτάνει η δική του προσομοίωση. Παρόλα αυτά, κατά μέσο όρο, η μέγιστη απόκλιση ενέργειας στα σημεία όπου τα σφάλματα μεγιστοποιούνται σε κάθε πείραμα, με τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας για υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση των τιμών, είναι μικρότερη του 10%.

Η συμπεριφορά των ελατηρίων επικυρώνεται περαιτέρω στο επόμενο κεφάλαιο, όπου συνδυάζονται με τα στοιχεία επαφής και τριβής στα προσομοιώματα των μεμονωμένων πάνελ.

3. Προσομοίωση της υστερητικής συμπεριφοράς μεμονωμένων πάνελ

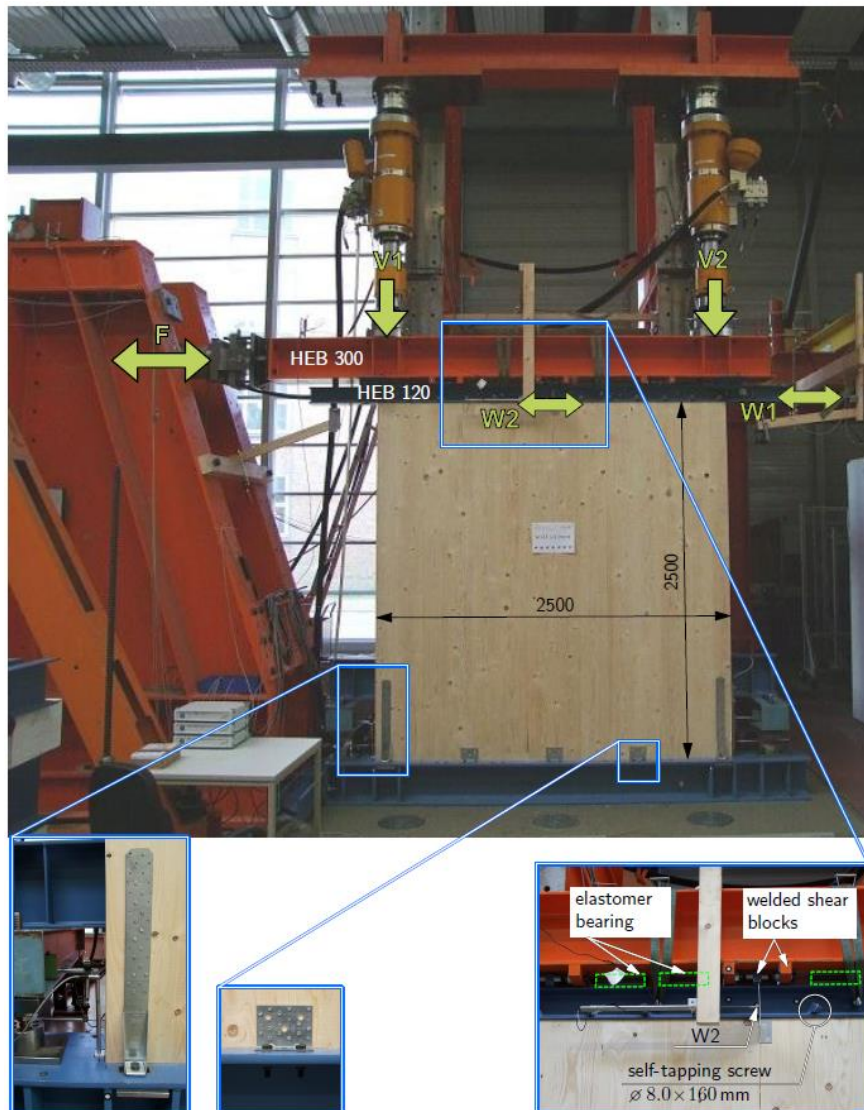


Η προσομοίωση των πάνελ, οι διαστάσεις και η συνδεσμολογία τους, είναι βασισμένες στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος Ortimberquake [Seim et al., 2013a]. Το πρόγραμμα αυτό ξεκίνησε το 2011 και διήρκεσε 2 χρόνια. Στο πρόγραμμα συμμετείχαν το πανεπιστήμιο του Kassel (UoK, Γερμανία) και το ερευνητικό ινστιτούτο BBRI (Belgian Building Research Institute). Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται πρώτα τα πειράματα, ύστερα τα προσομοιώματα και τέλος πραγματοποιείται η σύγκριση της υστερητικής συμπεριφοράς των πάνελ υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Τα βήματα αυτά, δηλαδή, η εύρεση πειραματικών αποτελεσμάτων και η σύγκρισή τους με αριθμητικά αποτελέσματα μέσω προσομοίωσης των πάνελ, στοχεύουν σε μια επιπλέον επικύρωση της ορθής λειτουργίας των user elements, πριν αυτά χρησιμοποιηθούν στα περιπλοκότερα κτιριακά προσομοιώματα με τελικό σκοπό την μη-γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες. Βασικός στόχος ήταν και η επικύρωση της συμπεριφοράς των στοιχείων επαφής και τριβής.

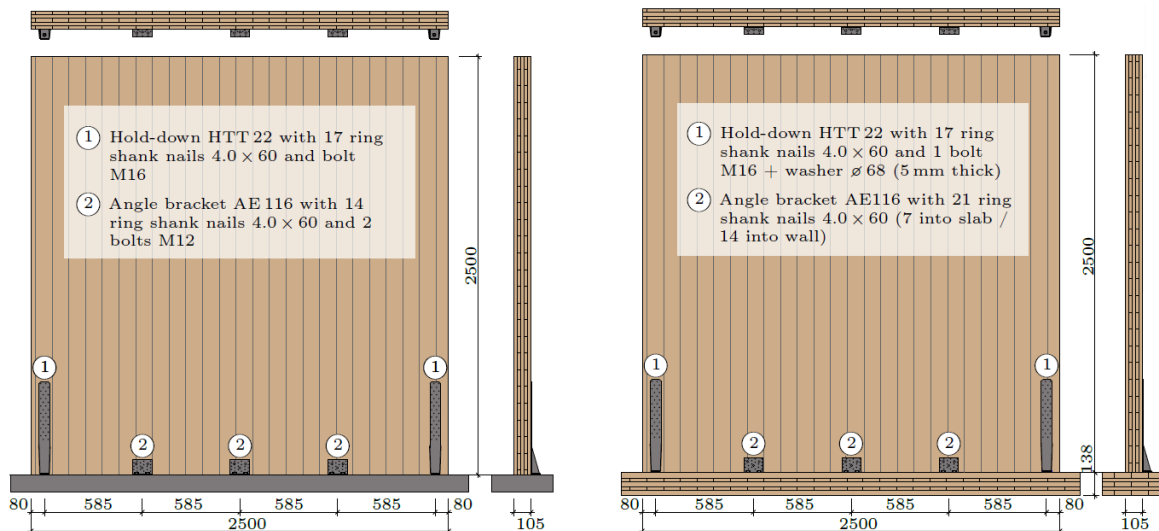
3.1. Τα πειράματα στα πάνελ που μελετώνται

Όλα τα πειράματα έγιναν σε πάνελ διαστάσεων 2.5m×2.5m και πάχους 105mm. Όσον αναφορά τη βάση, οι δύο διαμορφώσεις που παρουσιάζονται είναι οι ίδιες με τα πειράματα για τη μελέτη των συνδέσεων (κεφάλαιο 2). Οι σύνδεσμοι είναι επίσης ίδιοι με αυτούς του κεφαλαίου 2 (AE116 και HTT22). Σε όλες τις περιπτώσεις, δύο hold-downs τοποθετήθηκαν στις άκρες του πάνελ και τρία angle brackets κατά το μήκος του, σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.1 και 3.2.



Εικόνα 3.1: Φωτογραφία ενός πάνελ CLT των πειραματικών διατάξεων

Οι κύριοι στόχοι του προγράμματος ήταν η βελτίωση των μεθόδων σχεδιασμού και κατασκευής πολυώροφων κτιρίων ξυλείας σε περιοχές με σεισμική δραστηριότητα και η ανάπτυξη προτύπων βασισμένων στην επικαιροποιημένη έρευνα. Συνεπώς, οι κατακόρυφες φορτίσεις που εφαρμόστηκαν στα πάνελ εκτιμήθηκαν ούτως ώστε να προσομοιώνουν τα πραγματικά κατακόρυφα φορτία που δέχεται ένας τοίχος CLT στο ισόγειο ενός κτιρίου κατά τη σεισμική διέγερση (για κτίρια 2, 4 και 8 ορόφων). Η κατακόρυφη φόρτιση έγινε μέσω επιβολής δυνάμεων, ενώ η οριζόντια μέσω επιβολής μετατοπίσεων. Η ανακυκλική φόρτιση ήταν βασισμένη στο πρότυπο [ISO 21581].



Εικόνα 3.2: Η θέση των μεταλλικών συνδέσμων και οι διαστάσεις ενός πάνελ CLT των πειραματικών διατάξεων

Στον Πίνακα 3.1 συνοψίζονται τα πειράματα και οι αντίστοιχες κατακόρυφες φορτίσεις:

Πίνακας 3.1: Βασικά χαρακτηριστικά των πέντε πειραμάτων			
Πείραμα*	Σύνδεσμοι	Υλικό αγκύρωσης (δηλ. της βάσης)	Κατακόρυφα φορτία
W-CLT-St-10	2 HD, 3AB	χάλυβας	10 kN/m
W-CLT-St-50	2 HD, 3AB	χάλυβας	50 kN/m
W-CLT-St-100	2 HD, 3AB	χάλυβας	100 kN/m
W-CLT-Ti-10	2 HD, 3AB	CLT	10 kN/m
W-CLT-Ti-50	2 HD, 3AB	CLT	50 kN/m

HD-Hold-down, AB-Angle bracket, St-Steel, Ti-Timber

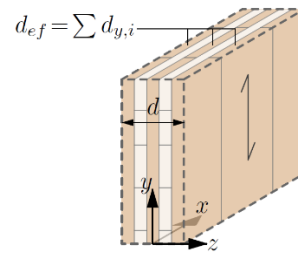
*Ονομασίες κατά [Hummel, 2017]

3.2. Προσομοίωση των πάνελ από CLT και χαρακτηριστικά ανάλυσης

3.2.1. Τα προσομοιώματα των πάνελ στο λογισμικό

Τα πάνελ των πειραμάτων προσομοιώθηκαν στο λογισμικό ABAQUS με σκοπό την εξοικείωση με το περιβάλλον του προγράμματος, αλλά κυρίως την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας των στοιχείων χρήστη και των ελατηρίων που τα συνιστούν. Τα στοιχεία του CLT θεωρήθηκαν πλήρως ελαστικά. Η σύνθετη στρωτή διατομή του πάνελ, συνυπολογίζεται μέσω ισοδύναμων ιδιοτήτων του υλικού. Το υλικό που επιλέχτηκε για τα στοιχεία είναι ισότροπο. Ένα ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας υπολογίστηκε μέσω της παρακάτω σχέσης για πάνελ υπό εντός επιπέδου φόρτιση.

$$E_{ef} = E_{0,mean,CLT} \cdot \frac{d_{ef}}{d} = 11000 \cdot \frac{3 \cdot 21}{105} = 6600 \text{ N/mm}^2$$

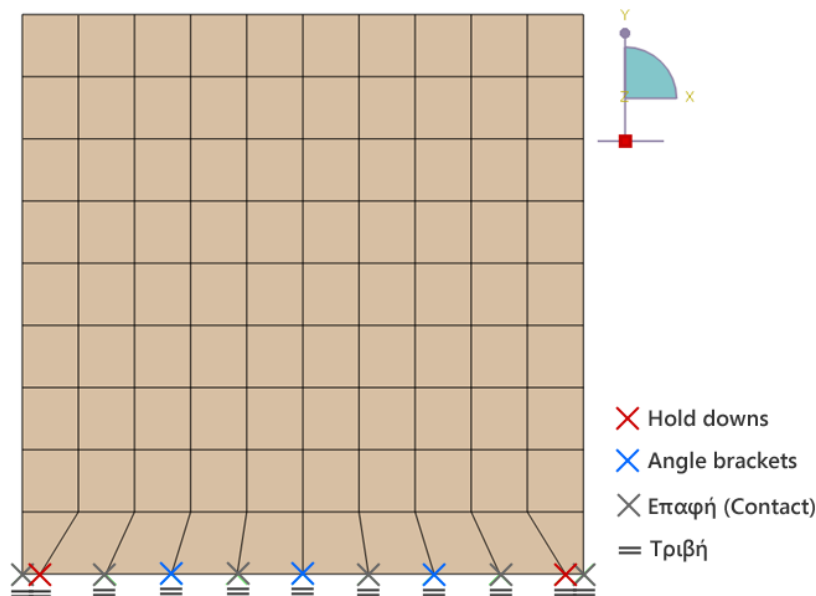


Εικόνα 3.3: Το πάχος d_{ef} των πάνελ

Στο ισοδύναμο πάχος d_{ef} λήφθηκαν υπόψιν μόνο οι τρεις κατακόρυφες στρώσεις που έχουν μέτρο ελαστικότητας 11000 N/mm^2 παράλληλα στις ίνες τους, ενώ οι οριζόντιες στρώσεις παραλείφθηκαν (Εικόνα 3.3). Ο λόγος του Poisson πάρηκε ίσος με 0.3 (μια εύλογη τιμή για ξυλεία).

Αξίζει να αναφερθεί, πως στην υστερητική συμπεριφορά των τοίχων από CLT κυριαρχούν τα χαρακτηριστικά δύναμης-μετατόπισης των συνδέσεων [Dolan et al., 1992] [Folz and Filiatrault, 2001a]. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, οι καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις των πάνελ αποτελούν μικρό ποσοστό των συνολικών σχετικών μετατοπίσεων ενός κτιρίου (ή και μεμονωμένου πάνελ) υπό πλευρική φόρτιση. Συνεπώς, η καθολική συμπεριφορά κατά τη σεισμική διέγερση στα κτίρια από CLT, που απασχολεί την εργασία αυτή, δεν σχετίζεται τόσο με τις ιδιότητες του ίδιου του υλικού και τη φέρουσα ικανότητά του, αλλά με τη συνδεσμολογία και τα εγγενή χαρακτηριστικά του τρόπου δόμησης. Αντίστοιχα επομένως, η σωστή προσομοίωση των φορέων δεν εξαρτάται εν προκειμένω από την επιλογή ορθότροπου ή ισότροπου υλικού. Η επιλογή ισότροπων χαρακτηριστικών έγινε με σκοπό την απλούστευση του μοντέλου, που θα μειώσει το υπολογιστικό κόστος, αλλά και θα διευκολύνει ίσως την κατανόηση των ιδιαιτεροτήτων του δομικού συστήματος.

Με την ίδια πορεία σκέψης επιλέχθηκε και το mesh. Το mesh στα μοντέλα είναι σχετικά αραιό $250\text{mm} \times 250\text{mm}$. Για τη προσομοίωση του πάνελ χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία M3D4R (membrane) του ABAQUS, διότι η εκτός επιπέδου αντοχή δεν επηρεάζει τη αριθμητική αναπαράγωγή των ανακυκλικών φορτίσεων και των πειραμάτων.



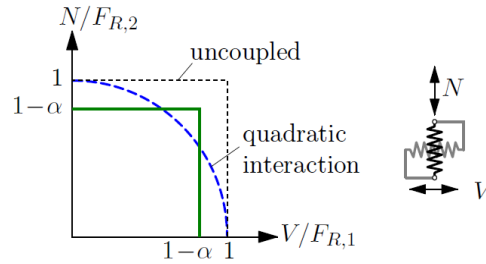
Εικόνα 3.4: Η προσομοίωση των πάνελ στο λογισμικό και οι θέσεις των στοιχείων χρήστη

Στην Εικόνα 3.4 φαίνεται το πάνελ στο λογισμικό και η θέση των user elements στο mesh.

Οι παράμετροι εισόδου των user elements προέκυψαν από τα πειράματα του κεφαλαίου §2 που αφορά τη συνδεσμολογία, κατά τα οποία όμως επιβλήθηκε φόρτιση σε μία διεύθυνση. Τα πειράματα σε πάνελ [Ganric et al., 2015] έχουν όμως δείξει πως οι μεταλλικοί σύνδεσμοι παρουσιάζουν μείωση της αντοχής τους όταν φορτίζονται ταυτόχρονα σε περισσότερες διευθύνσεις. Σύμφωνα με τους Rinaldin et al. [2016] μια δευτεροβάθμια

αλληλεπίδραση μέσω της παρακάτω ανίσωσης περιγράφει επαρκώς τη μείωση αυτή και συνάδει με τα πειραματικά αποτελέσματα.

$$\left(\frac{V}{F_{R,1}}\right)^2 + \left(\frac{N}{F_{R,2}}\right)^2 \leq 1$$



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα που επεξηγεί τη μείωση των αντοχών στους δύο βαθμούς ελευθερίας

Στην παρούσα εργασία, ακολουθήθηκε η ίδια προσέγγιση με αυτή του Hummel [2017], κυρίως για λόγους σύγκλισης των τελικών μοντέλων και σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Στην απλή αυτή προσέγγιση η αντοχή μειώνεται και στις δύο διευθύνσεις εξ' αρχής με ένα σταθερό συντελεστή $\alpha = 0.15$ (Εικόνα 3.5). Συνεπώς, οι τιμές K_0 , F_0 , F_1 και DF όλων των ελατηρίων (όχι όμως η K_{ax} που προέκυψε από εμπειρική σχέση και οι θλιπτικές δυσκαμψίες K_c) μειώθηκαν κατά 15% σε σχέση με αυτές που δίνονται στο κεφάλαιο 2, πριν προσομοιωθεί ο τοίχος και τα κτίρια των επόμενων κεφαλαίων.

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το στοιχείο της τριβής. Αποδείχτηκε γρήγορα πως χωρίς αυτό δεν θα ήταν δυνατή η αριθμητική αναπαραγωγή της πραγματικής συμπεριφοράς. Η τριβή αυξάνει την αντοχή, τη δυνατότητα μετατόπισης, καθώς και την ενέργεια που αναλώνει κατά την κίνησή του το πάνελ. Η τριβή χρησιμοποιήθηκε στο παρόν κεφάλαιο με τους αντίστοιχους συντελεστές για επιφάνειες CLT-CLT και CLT-λείος χάλυβας που αναφέρονται στο 2.4.2.

3.2.2. Επιλογή χρονικού βήματος, και παραμέτρων ανάλυσης

Η ικανότητα του ABAQUS / Explicit να χειρίζεται και να επιλύει αποτελεσματικά μη γραμμικά συστήματα, ήταν ένας από τους βασικούς λόγους για την επιλογή του λογισμικού αυτού. Όμως η explicit επίλυση είναι μόνο υπό όρους σταθερή και κρύβει συχνά κινδύνους. Γι' αυτό το λόγο έπρεπε να δοθεί η απαραίτητη προσοχή στην επιλογή χρονικού βήματος (time step). Η σχέση (1) δίνει ένα ανώτατο όριο για το χρονικό βήμα. Στην περίπτωση όμως των πάνελ CLT, όπου ο υπολογισμός ή ακόμη και η προσέγγιση της μέγιστης συχνότητας του συστήματος είναι δύσκολη και επίφοβη η ίδια σχέση δεν μπορούσε εύκολα να χρησιμοποιηθεί.

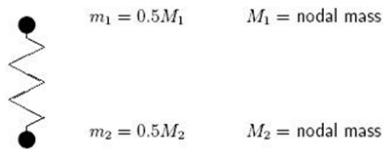
$$\text{Όριο σταθερότητας του τελεστή κεντρικών διαφορών} : \Delta_t \leq \frac{2}{\omega_{max}} \cdot (\sqrt{1 + \xi_{max}^2} - \xi_{max}) \quad (1)$$

$$\text{Προσέγγιση του ορίου σταθερότητας μέσω του λογισμικού} : \Delta_t \approx \frac{L_{min}}{c_d} \quad (2)$$

Όπου, L_{min} : η μικρότερη διάσταση στοιχείου στο mesh

$$\text{Και } c_d: \text{ η διασταλτική ταχύτητα κύματος} = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}}, \text{ για ελαστικά ισότροπα υλικά.}$$

Στην περίπτωση του πάνελ, το Abaqus μέσω της εξίσωσης (2) (automatic time incrementation, global) υπολόγιζε χρονικό βήμα $3.3E - 05 \text{ sec}$. Η διαδικασία του λογισμικού αγνοεί την ύπαρξη των user elements. Το βήμα αυτό είναι όμως επαρκώς μικρό για τα ελατήρια που χρησιμοποιούνται, καθώς με έναν πρόχειρο υπολογισμό για την δυσμενέστερη εν προκειμένω περίπτωση του ελατηρίου contact με $K_{c,steel}$ μέσω της (3) το $\Delta_t \approx 4.5E - 05 \text{ sec}$. Τελικώς χρησιμοποιήθηκε χρονικό βήμα $1.0E - 05 \text{ sec}$ υπέρ της ασφαλείας.



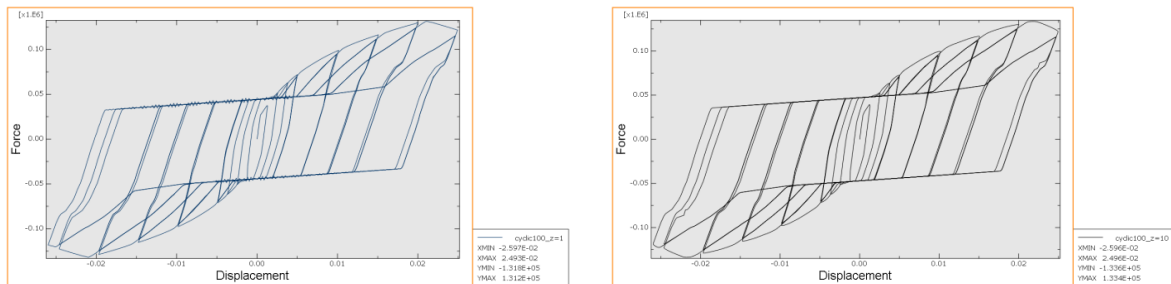
$$\Delta t \approx \sqrt{\frac{2M_1M_2}{M_1 + M_2} \frac{1}{k}} \quad (3)$$

Εικόνα 3.6: Ελατήριο με σημειακές μάζες

Δυσκολίες αντιμετωπίστηκαν και στην αριθμητική αναπαραγωγή των πειραμάτων μέσω explicit αναλύσεων. Η επίλυση explicit είναι εκ φύσεως δυναμική και τα user elements τύπου VUEL λειτουργούν μονάχα σε explicit αναλύσεις. Στα πειράματα (βλέπε ISO 21581) η οριζόντια ανακυκλική φόρτιση γίνεται μέσω επιβολής οριζόντιων μετατοπίσεων με σταθερές ταχύτητες της τάξεως των 2mm/s (συνολική διάρκεια από 1 έως 30 λεπτά). Για μια τόσο βραδεία φόρτιση επομένως, καταλληλότερη θα ήταν μια Quasi-Static τύπου ανάλυση. Για παράδειγμα, σε ένα πείραμα όπου ο τοίχος, μέσω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, θα διανύσει συνολικά 2.0m, ο χρόνος της ανάλυσης, ακολουθώντας πιστά το πείραμα θα ήταν 16.6min≈1000sec. Με ένα βήμα όμως τόσο μικρό κάτι τέτοιο θα ήταν παράλογο χρονοβόρο. Για την αποφυγή ανεπιθύμητων δυναμικών φαινομένων, σε μια διαδικασία όπου βασικός σκοπός ήταν ο περαιτέρω έλεγχος των user elements, πάρθηκαν τα παρακάτω μέτρα:

- Μειώθηκε η μάζα του πάνελ, μέσω της μείωσης της πυκνότητας από 420 kg/m³ σε 50 kg/m³
- Μέσω του κώδικα των user elements εισήχθη βισκοϊξώδης απόσβεση στο σύστημα

Το πρώτο μέτρο μειώνει αυτόματα την ορμή και τις αδρανειακές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο πάνελ όταν του επιβάλλονται μετατοπίσεις. Η μείωση της πυκνότητας είχε ως συνέπεια και τη μείωση του βήματος που υπολογίζει αυτόματα το λογισμικό, το οποίο όμως παρέμεινε μεγαλύτερο από το 1.0E – 05 sec, που είχε οριστεί. Το δεύτερο μέτρο πάρθηκε για υπολογιστικούς/αριθμητικούς λόγους. Η ιξώδης απόσβεση εξαρτάται από τη σχετική ταχύτητα που αναπτύσσεται στο κάθε user element. Επομένως, χωρίς να έχει επίπτωση στα αποτελέσματα (μορφή βρόγχων, μέγιστη δύναμη, μέγιστη μετατόπιση κτλ.) εξάλειψε κυματισμούς (ταλαντώσεις), που εμφανίζονταν στις υστερητικές καμπύλες και οφείλονταν στον ρυθμό επιβολής της φόρτισης. Η Εικόνα 3.7 αναδεικνύει το φαινόμενο:



Καμπύλη F-δ με $\xi = 1\%$

Καμπύλη F-δ με $\xi = 10\%$

Εικόνα 3.7: Η μείωση των κυματισμών στις υστερητικές καμπύλες των προσομοιωμάτων με τη βισκοϊξώδη απόσβεση

Η βισκοϊξώδης απόσβεση επηρέαζε μόνο τα user elements και υπολογιζόταν μέσω του παρακάτω τύπου για $\xi = 10\%$.

$$F_D = c \cdot \dot{u}(t)$$

$$c = 2 \cdot \xi \cdot \omega \cdot m = 2 \cdot \xi \cdot \sqrt{k_{branch} \cdot m}$$

Όπου το k_{branch} υπολογιζόταν από τον κώδικα ως η δυσκαμψία του εκάστοτε κλάδου στον οποίο βρισκόταν η καμπύλη F-δ του συνδέσμου.

Τα μέτρα αυτά υλοποιήθηκαν προσωρινά για την προσομοίωση των πειραμάτων και όχι για την ανάλυση με χρονοϊστορίες (βλέπε κεφάλαιο §5).

3.3. Σύγκριση της συμπεριφοράς των προσομοιωμάτων των πάνελ με πειραματικά αποτελέσματα

Πριν επιβληθούν οι ανακυκλικές φορτίσεις, πραγματοποιήθηκαν πρώτα μονοτονικές φορτίσεις στα προσομοιώματα των πάνελ. Παρατηρήθηκε λοιπόν, πως τα προσομοιώματα «αστοχούν» σε μικρότερες σχετικές μετατοπίσεις από τους τοίχους των πειραμάτων για όλες σχεδόν τις διαμορφώσεις. Αυτό οφείλεται κατά κύριο λόγο στη συντηρητική επιλογή της μετατόπισης αστοχίας των συνδέσμων, ειδικά των angle brackets στη διατμητική διεύθυνση. Αποφασίστηκε η μετατόπιση αστοχίας να μην αλλάξει στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Οι λόγοι συνοπτικά ήταν οι εξής :

- Η αρχική επιλογή, βλέπε υποκεφάλαιο §2.4, έγινε υπέρ της ασφαλείας με σκοπό την αποφυγή πιθανών ψαθυρών αστοχιών
- Η γενική υστερητική συμπεριφορά των πάνελ, προσομοιώνεται επιτυχώς. Δηλαδή η μέγιστη αντίδραση και η αντίστοιχη σχετική μετατόπιση, η σχετική μετατόπιση «διαρροής», η μορφή των βρόγχων και η ενέργεια που αναλώνει το σύστημα συνάδουν με τα πειράματα. Η διαφορά έγκειται μονάχα στο μήκος του τελικού καθοδικού κλάδου (post-failure branch)
- Τα πάνελ και τα user elements προορίζονται για προσομοιώματα αξιολόγησης της σεισμικής απόκρισης κτιρίων, και τα drifts που επιτυγχάνονται με τις υπάρχουσες μετατοπίσεις αστοχίας ξεπερνούν ήδη τα όρια που επιτρέπουν οι κανονισμοί

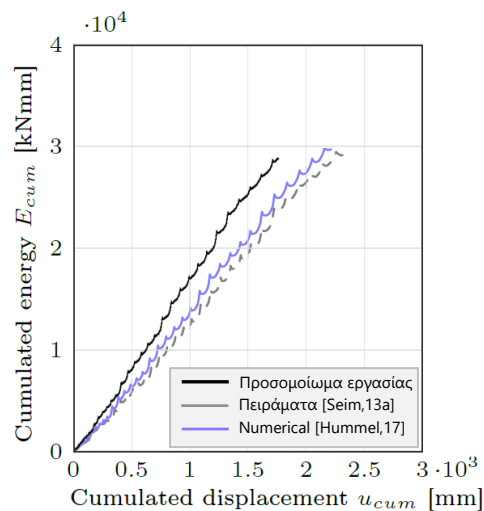
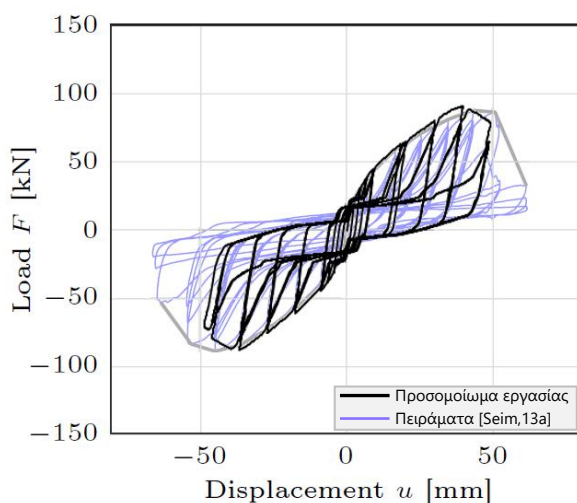
Οι δύο τελευταίοι λόγοι είναι και οι πιο σημαντικοί, εφόσον η επιθυμητή συμπεριφορά για τη παρούσα εργασία δεν ξεπερνά σχετικές μετατοπίσεις άνω του 1% του ύψους του ορόφου (βλέπε [EN1998] και [FEMA 356]).

Συνεπώς, έχοντας τις μονοτονικές καμπύλες, επιβλήθηκαν μετατοπίσεις «τύπου» [ISO 21581] (ίδιος αριθμός κύκλων), μόνο που ως Δ_{ult} στους τελευταίους κύκλους τέθηκε μετατόπιση για την οποία οριακά δεν αστοχούν τα πάνελς. Θα μπορούσε να τεθεί παντού η μετατόπιση που ορίζει ο κανονισμός (στο 80% του F_{max}), αλλά κατά αυτόν τον τρόπο θεωρήθηκε πως ελέγχονται καλύτερα και οι τελευταίοι βρόγχοι της υστέρησης. Οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν βρίσκονται στο παράρτημα Γ. Στις τελικές αναλύσεις τα κατακόρυφα φορτία επιβλήθηκαν σε χρονικό διάστημα 40sec για την αποφυγή δυναμικών φαινομένων. Η οριζόντια μετατόπιση των διαγραμμάτων μετρήθηκε σε αναλογία με τα πειράματα στη μέση της κορυφής των τοίχων. Τα αποτελέσματα προκύπτουν από την αποθήκευση 5000 στιγμιότυπων (frames).

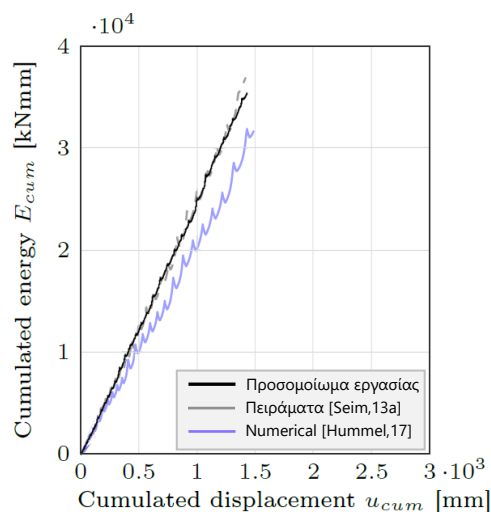
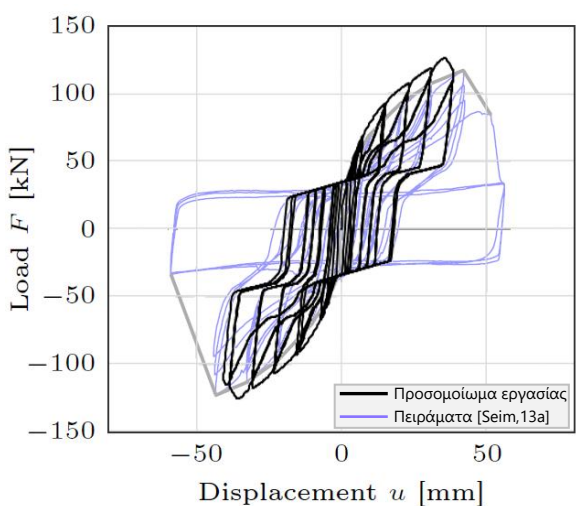
Ο Πίνακας 3.2, καθώς και το υπόμνημα του κάθε διαγράμματος επεξηγούν τους χρωματισμούς που είναι αντίστοιχοι με αυτούς στο κεφάλαιο §2.4.2.

Πίνακας 3.2: Αντιστοιχία χρωματισμού και εκάστοτε καμπύλης στα δύο διαγράμματα			
Διάγραμμα	Χρώμα Καμπύλης		
	Προσομοίωμα πάνελ διπλωματικής	Πείραμα	Στοιχείο από Hummel J., [2016]
Διαγράμματα $F - u$	Μαύρο	Μπλε	-
Διαγράμματα $E_{cum} - u_{cum}$	Μαύρο	Γκρι	Μπλε

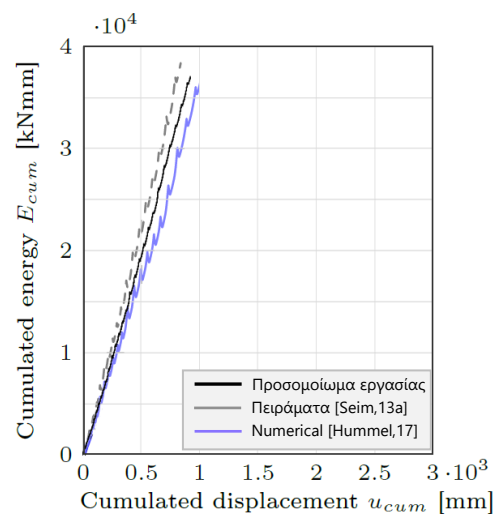
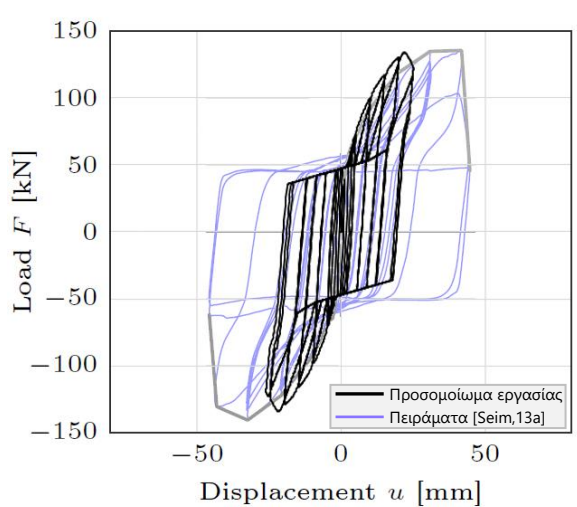
Στις Εικόνες 3.8 έως 3.12 φαίνονται οι καμπύλες δύναμης-σχετικής μετατόπισης, καθώς και τα διαγράμματα ενέργειας, των προσομοιωμάτων και των αντίστοιχων πειραμάτων. Στις καμπύλες $F - u$ φαίνεται η κίνηση ολόκληρου του πάνελ. Η οριζόντια μετατόπιση u μετρήθηκε στη μέση της πάνω πλευράς τω πάνελ.



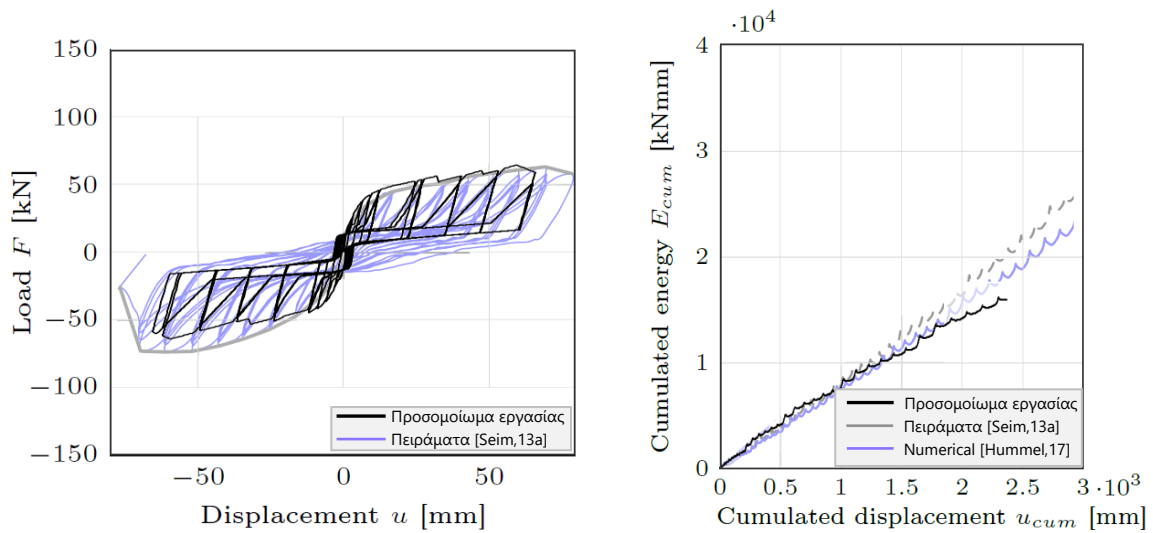
Εικόνα 3.8: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-σχετικής μετατόπισης και διαγράμματα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας-συνολικής μετατόπισης του πειράματος Wall-CLT-St-10 και της προσομοίωσής του



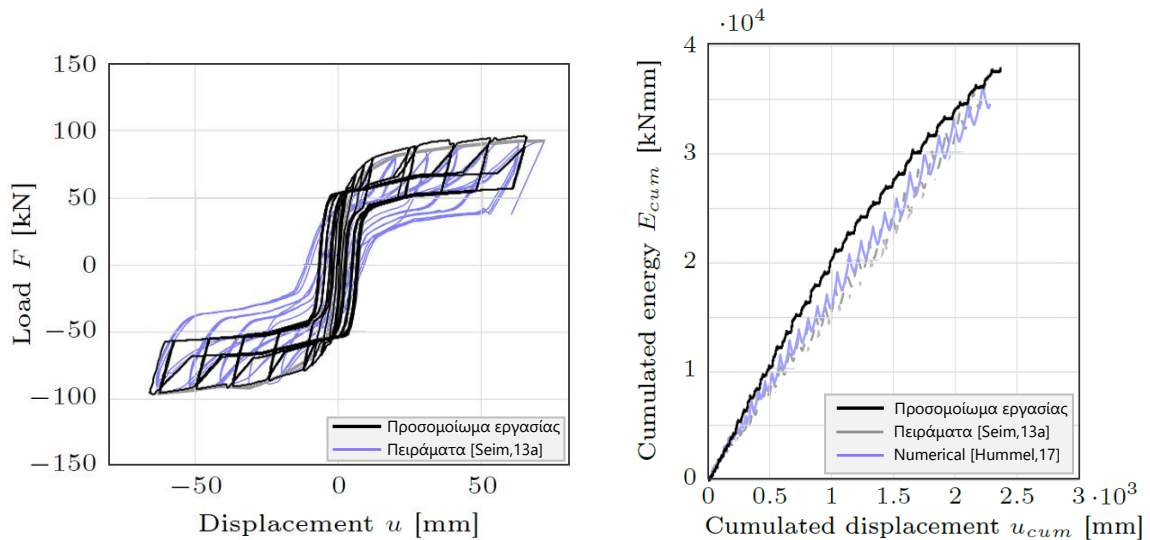
Εικόνα 3.9: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-σχετικής μετατόπισης και διαγράμματα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας-συνολικής μετατόπισης του πειράματος Wall-CLT-St-50 και της προσομοίωσής του



Εικόνα 3.10: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-σχετικής μετατόπισης και διαγράμματα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας-συνολικής μετατόπισης του πειράματος Wall-CLT-St-100 και της προσομοίωσής του



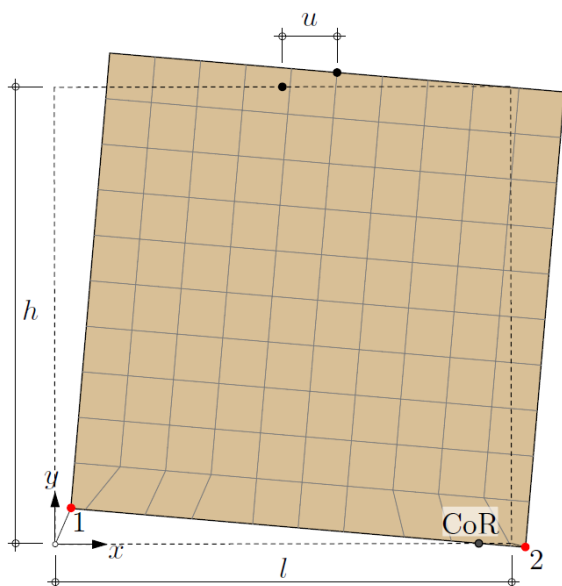
Εικόνα 3.11: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-σχετικής μετατόπισης και διαγράμματα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας-συνολικής μετατόπισης του πειράματος Wall-CLT-Ti-10 και της προσομοίωσής του



Εικόνα 3.12: Υστερητικές καμπύλες δύναμης-σχετικής μετατόπισης και διαγράμματα συνολικής απορροφούμενης ενέργειας-συνολικής μετατόπισης του πειράματος Wall-CLT-Ti-50 και της προσομοίωσής του

Παρατηρούμε εδώ την μεγάλη επιρροή των κατακόρυφων φορτίων στην καθολική συμπεριφορά των πάνελ από CLT και κατ' επέκταση των κατασκευών. Τα κατακόρυφα φορτία αυξάνουν αισθητά την αντοχή και μειώνουν τη μέγιστη σχετική μετατόπιση των πάνελ προτού αστοχήσουν ενώ επηρεάζουν και τη μορφή των υστερητικών βρόγχων.

Στην υστερητική συμπεριφορά των τοίχων επικρατούν δύο είδη κίνησης: η ολίσθηση και ο λικνισμός (rocking). Για την περαιτέρω επικύρωση των προσομοιωμάτων, η υστερητική τους συμπεριφορά συγκρίθηκε με τα δεδομένα των πειραμάτων αλλά και με τα προσομοιώματα στη διατριβή του Hummel [2017], στο πλαίσιο της συνεισφοράς κάθε είδους κίνησης στην συνολική μετατόπιση. Οι συνεισφορές υπολογίστηκαν με τις παρακάτω σχέσεις και στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζεται ο μέσος όρος τους κατά τη διάρκεια τις κάθε φόρτισης, ως ποσοστό επί της συνολικής μετατόπισης. Εδώ το u_{CLT} συμπεριλαμβάνει τη διατμητική και την καμπτική παραμόρφωση των τοίχων.



$$\text{Rocking : } u_{\varphi} = \frac{(U_{1,y} - U_{2,y})h}{l}$$

$$\text{Ολίσθηση : } u_s = \frac{U_{1,x} + U_{2,x}}{2}$$

$$\text{CLT : } u_{CLT} = u - u_s - u_{\varphi}$$

Εικόνα 3.13: Το πάνελ της προσομοίωσης και τα σημεία στα οποία μετρήθηκαν οι μετατοπίσεις

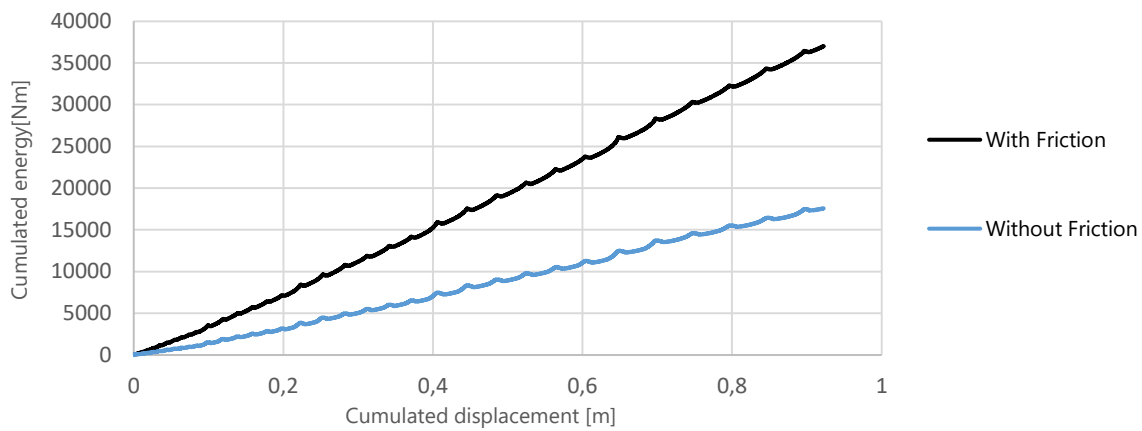
Πίνακας 3.3: Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε είδους κίνησης στη συνολική μετατόπιση									
Πείραμα	Προσομοιώματα διπλωματικής			Προσομοιώματα [Hummel, 2017]			Πειράματα [Seim et al., 2013a]		
	Rocking	Ολίσθηση	CLT	Rocking	Ολίσθηση	CLT	Rocking	Ολίσθηση	CLT
W-CLT-St-10	69.3%	25.6%	5.1%	67%	28%	4%	64%	30%	6%
W-CLT-St-50	43.4%	50%	6.6%	47%	47%	6%	45%	44%	11%
W-CLT-St-100	15.9%	75.1%	9%	16%	78%	6%	35%	48%	17%
W-CLT-Ti-10	81%	17.7%	1.3%	72%	24%	4%	75%	21%	4%
W-CLT-Ti-50	65.8%	28.8%	5.4%	55%	39%	6%	74%	17%	9%

3.4. Αξιολόγηση της συμπεριφοράς των προσομοιωμάτων των πάνελ

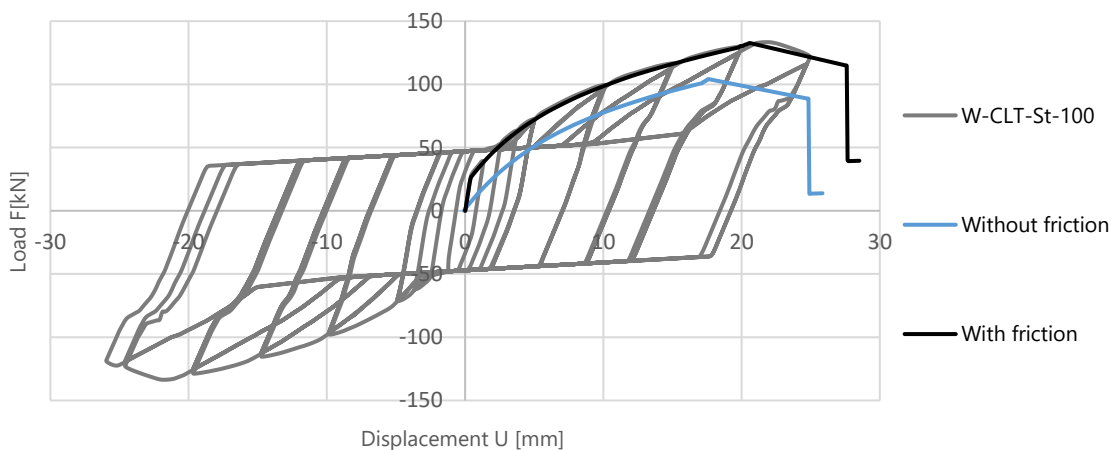
Από τη σύγκριση των αριθμητικών αποτελεσμάτων με αυτά των 5 πειραμάτων, προκύπτει ότι η συμπεριφορά των προσομοιωμάτων των πάνελ είναι αρκετά ικανοποιητική. Όπως προαναφέρθηκε τα πάνελ των προσομοιώσεων «αστοχούν» σε λίγο μικρότερες μετατοπίσεις από αυτές των πειραμάτων. Συνεπώς, οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν στα προσομοιώματα δεν είναι αυτούσιες αυτές των πειραμάτων (βλέπε παράρτημα Γ). Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές ιδιαίτερα στα πειράματα W-CLT-Ti-10 και W-CLT-Ti-50 όπου φαίνεται πως στη πειραματική διαδικασία πιθανόν να πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω βασικοί «κύκλοι» μετατοπίσεων από τους 5 που απαιτεί το παγκόσμιο πρότυπο. Παρόλα αυτά, οι βρόγχοι υστέρησης αναπαράγονται έως τη μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση με πολύ μικρές διαφορές. Οι σπονδυλωτές καμπύλες έχουν μέγιστη απόκλιση της τάξεως του 8% στο πείραμα Wall-CLT-St-50, και μέγιστη κατά μέσο όρο απόκλιση 3.0%. Επίσης, η συνολική ενέργεια που απορροφάται παρουσιάζει κι αυτή πολύ μικρές διαφορές με τις μετρήσεις των πειραμάτων, με το μέσο όρο μέγιστης απόκλισης στα σημεία όπου τα σφάλματα μεγιστοποιούνται για κάθε πείραμα, με τον ίδιο συντελεστή βαρύτητας για υποεκτίμηση και υπερεκτίμηση των τιμών, να είναι 13%.

Στο πλαίσιο της συνεισφοράς κάθε είδους κίνησης στην συνολική μετατόπιση (κατά μέσο όρο) παρατηρούμε πως οι διαφορές είναι κι εκεί μικρής τάξεως μεγέθους. Όπως προκύπτει από τον Πίνακα 3.3, οι μεγαλύτερες διαφορές βρίσκονται στα πειράματα W-CLT-St-100 και W-CLT-Ti-50, με τη μεγαλύτερη να είναι 27% ενώ κατά μέσο όρο και κατά απόλυτη τιμή οι αποκλίσεις να έχουν τάξη μεγέθους: στο rocking 8%, στην ολίσθηση 10.5% και 3.7% στο CLT. Οι διαφορές αυτές, οφείλονται κατά κύριο λόγο στη προσομοίωση των φαινομένων τριβής και υποδεικνύουν πως πιθανότατα οι συντελεστές τριβής υποεκτιμήθηκαν, ειδικά στη περίπτωση του λείου

χάλυβα, καθώς στα πειράματα η συνεισφορά του rocking ήταν ακόμη μεγαλύτερη, ακόμη και για φορτίο 100kN/m. Αξίζει εδώ να σημειωθεί ότι η προσομοίωση της τριβής ήταν αναγκαία προϋπόθεση για την αναπαραγωγή όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων.



Εικόνα 3.14: Υστερητική ενέργεια που αναλώνεται, με και χωρίς προσομοίωση της τριβής στο πείραμα W-CLT-St-100



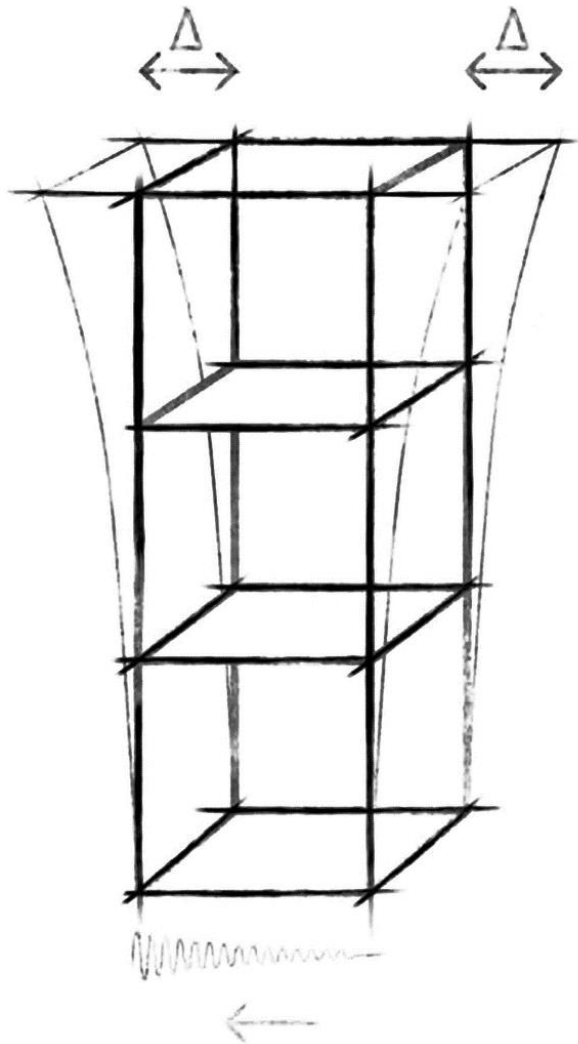
Εικόνα 3.15: Σύγκριση καμπύλης ικανότητας, με και χωρίς προσομοίωση της τριβής στο πείραμα W-CLT-St-100

Τα διαγράμματα των εικόνων 3.14 και 3.15 αναδεικνύουν την επιρροή αυτή στην περίπτωση του πειράματος W-CLT-St-100 με συντελεστή τριβής 0.1. Με γαλάζιο χρώμα φαίνεται η ενέργεια που αναλώνεται, καθώς και η καμπύλη δύναμης-μετατόπισης για μονοτονική φόρτιση, σε περίπτωση που αγνοηθεί η τριβή στην προσομοίωση.

Ο συντελεστής τριβής 0.1 δεν χρησιμοποιείται στο επόμενο κεφάλαιο (καθώς αντικαθίσταται από τον συντελεστή CLT/σκυροδέματος), η επιρροή όμως της τριβής στη συμπεριφορά των κατασκευών από CLT εξετάζεται περαιτέρω, μέσω μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων με χρονοϊστορίες.

Επομένως μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα, ότι οι διαφορές είναι μικρές και περιστασιακές και ότι η προσομοίωση των πάνελ είναι επαρκώς ικανοποιητική με τη χρήση των user elements που αναπτύχθηκαν, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί ως μέρος πολυπλοκότερων προσομοιωμάτων. Συγκεκριμένα το προσομοίωμα του πάνελ που χρησιμοποιείται φαίνεται να αποδίδει ικανοποιητικά την πραγματικότητα ανεξαρτήτως υλικού της βάσης και εξωτερικής φόρτισης.

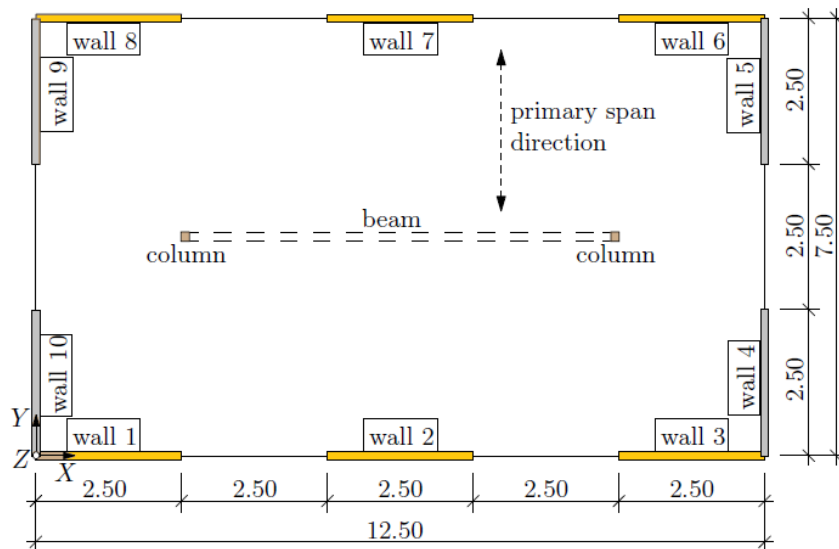
4. Μη γραμμική ανάλυση κτιρίων από CLT με χρονοϊστορίες



4.1. Ανάπτυξη των χωρικών προσομοιωμάτων

4.1.1. Περιγραφή των κτιρίων αναφοράς

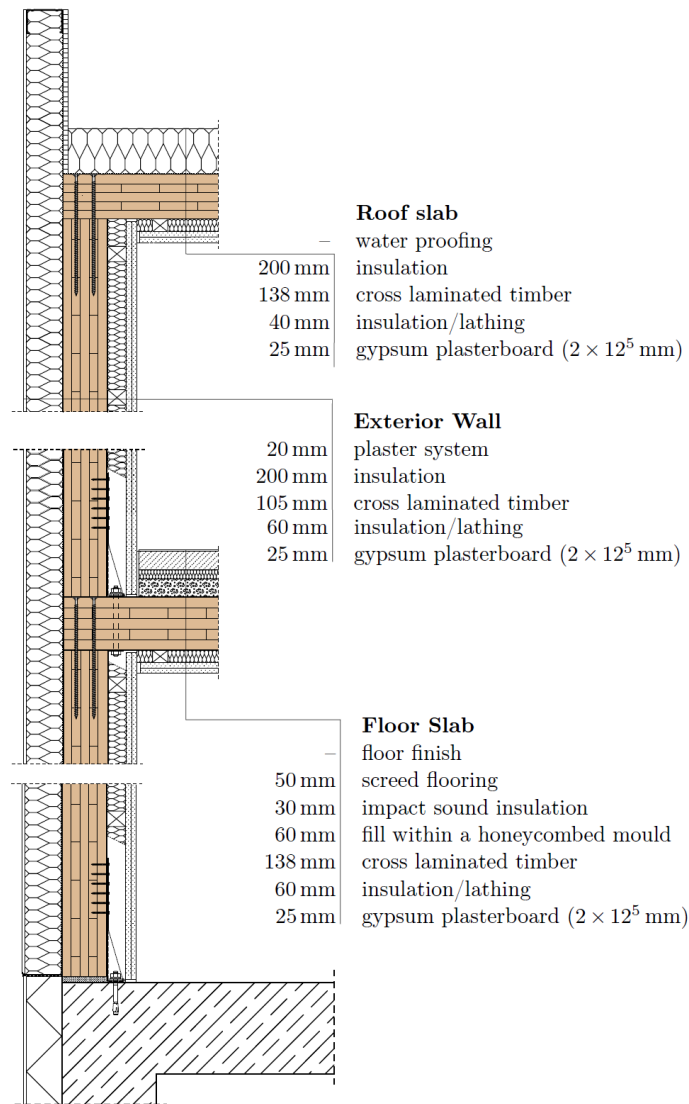
Τα χαρακτηριστικά των υποθετικών κτιρίων πάρθηκαν από τον Hummel J. [2017]. Η κάτοψη σχεδιάστηκε με διαστάσεις χαρακτηριστικές για μία κατοικία ή έναν χώρο γραφείων στην Ευρώπη, και ακολουθεί τις βασικές προδιαγραφές σχεδίασης, σύμφωνα με τα οριζόμενα από τη FEMA [P695], όσον αφορά τη πυρασφάλεια και τον ορθό καταμερισμό των φορτίων βαρύτητας. Οι διαστάσεις και η θέση των τοίχων φαίνονται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Κάτοψη κτιρίων αναφοράς [Hummel, 2017]

Στις κατασκευές που εξετάζονται, ο ρόλος των υποστυλωμάτων και των δοκών είναι η μεταφορά και παραλαβή μέρους των κατακόρυφων δυνάμεων και δεν συνυπολογίζονται στη παραλαβή οριζόντιων σεισμικών φορτίσεων. Στην παρούσα εργασία, εξετάστηκε μόνο η συμπεριφορά των κτιρίων κατά τη διεύθυνση του κύριου άξονα X (του συστήματος αναφοράς, που σημειώνεται στην εικόνα 4.1). Μόνο οι "χρωματισμένοι" τοίχοι, του παραπάνω σχήματος, είχαν λοιπόν ενεργό ρόλο στις αναλύσεις.

Στην εργασία αυτή μελετήθηκαν δύο κτίρια, ένα διώροφο και ένα οκταώροφο, βασισμένα στην κάτοψη της Εικόνας 4.1.



Εικόνα 4.2: Λεπτομέρειες και σύνδεσμοι που χρησιμοποιούνται στα κτίρια αναφοράς, από [Hummel J., 2017]

Στην Εικόνα 4.2 φαίνονται οι λεπτομέρειες χαρακτηριστικών τομών στα δάπεδα, τους τοίχους και το δώμα των εν λόγω κατασκευών, αλλά και ο τρόπος σύνδεσης των τοίχων με τη θεμελίωση και τα δάπεδα. Στα κτίρια θεωρούνται σύνδεσμοι των ίδιων χαρακτηριστικών με αυτούς που μελετήθηκαν και στους μεμονωμένους τοίχους, δηλαδή hold-downs HTT22, angle brackets AE 116 και αυτοκοχλιούμενοι κοχλίες $\Phi 10$ μήκους 260mm (για τη σύνδεση των πάνελ με την οροφή).

Στα κτίρια που μελετήθηκαν, το πάχος των πάνελ στους τοίχους ήταν ίσο με 105mm , ενώ στα δάπεδα και στην οροφή ήταν 138mm , όπως και στα πειράματα των κεφαλαίων §2 και §3.

4.1.2. Κατακόρυφα φορτία και μάζες

Τα μόνιμα και τα κινητά φορτία υπολογίστηκαν για κτίρια κατοικιών (κατηγορία A, [EN 1991-1-1]) όπως φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

	Πίνακας 4.1: Κατακόρυφα επιφανειακά φορτία (kN/m^2)		
	Δώμα	Δάπεδα	Τοίχοι
Μόνιμα φορτία G	1,0	3,0	1,5
Κινητά φορτία Q		1,5	

Λαμβάνοντας υπόψιν την παρουσία των υποστυλωμάτων και δοκών, για τον υπολογισμό των κατακόρυφων φορτίων που αντιστοιχούν στους τοίχους κατά τη σεισμική διέγερση, κάνουμε τη θεώρηση του ενεργού πλάτους d_{eff} :

$$d_{eff} = \frac{7,5}{4} = 1,875m$$

Κατά τον Ευρωκώδικα 8, για τον σεισμικό συνδυασμό δράσεων λαμβάνεται υπόψιν, ο συντελεστής για οιονεί μόνιμη τιμή μεταβλητής δράσης ψ_2 (κατηγορία A):

$$G + \psi_2 Q = G + 0,3Q$$

Για τα αδρανειακά φορτία λαμβάνονται υπόψιν οι μάζες ([EN 1998-1] και [EN 1990]), που αντιστοιχούν στα φορτία βαρύτητας που περιλαμβάνονται στον ακόλουθο συνδυασμό δράσεων:

$$G + \psi_E Q = G + \varphi \psi_2 Q = G + 0,24Q$$

Οι μάζες που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα φαίνονται στους παρακάτω Πίνακες :

Πίνακας 4.2: Μάζα ανά όροφο (kg)		
Δώμα	Δάπεδα	Τοίχοι
9557	32110	10512

Πίνακας 4.3: Συνολική μάζα (kg)	
2 όροφοι	8 όροφοι
62691	318245

4.1.3. Προμελέτη και προδιαστασιολόγηση

Η προμελέτη, αποτελεί ένα πολύ σημαντικό αρχικό βήμα προτού κανείς προβεί σε μη-γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες. Αποτέλεσμα της προμελέτης, σε κατασκευές από CLT, είναι το είδος και κυρίως ο αριθμός των μεταλλικών συνδέσμων που θα χρησιμοποιηθούν αρχικά στα μοντέλα, ανά όροφο, ούτως ώστε να επιτευχθεί σωστή κατανομή αντοχών και δυσκαμψιών.

Στις κατασκευές από CLT, η προμελέτη αυτή, είναι περιπλοκότερη και πιο χρονοβόρα σε σύγκριση με άλλα δομικά συστήματα, όμως εξίσου σημαντική. Το πρόβλημα έγκειται, όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 1, στο ότι η δυσκαμψία του συστήματος δεν είναι ανεξάρτητη της εξωτερικής φόρτισης, συνεπώς η εύρεση ιδιομορφών και ιδιοπεριόδων γίνεται μόνον μέσω εκτιμήσεων, επαναληπτικών προσεγγίσεων και για συγκεκριμένο εύρος φορτίσεων.

Στη παρούσα εργασία, χρησιμοποιήθηκαν αυτούσια τα αποτελέσματα της προδιαστασιολόγησης από τη διατριβή του Hummel [2017]. Και αυτό διότι θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί ο ίδιος αριθμός συνδέσμων, με σκοπό την σύγκριση των τελικών αποτελεσμάτων (ως προς τη τάξη μεγέθους).

Το ζήτημα της προδιαστασιολόγησης και των διαφορετικών επιλογών στα χέρια του εκάστοτε μελετητή παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Στην παρούσα εργασία εξετάστηκαν εναλλακτικές προσεγγίσεις προμελέτης και ανάλυσης, όπως η στατική ανάλυση με ισοδύναμες οριζόντιες φορτίσεις και η ιδιομορφική φασματική μέθοδος σε ισοδύναμο γραμμικό σύστημα. Καθώς όμως τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής δεν επηρεάζουν

τις μη γραμμικές αναλύσεις με χρονιόστορίες, βρίσκονται στο Παράρτημα Α, όπου και συγκρίνονται με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του κεφαλαίου αυτού.

Στους Πίνακες 4.4 και 4.5 φαίνεται ο αριθμός των συνδέσμων που χρησιμοποιήθηκαν στα προσομοιώματα ανά όροφο, που ήταν ίδιος για κάθε τοίχο. Οι σύνδεσμοι είναι ίδιου τύπου με αυτούς των προηγούμενων κεφαλαίων.

Πίνακας 4.4: Διαστασιολόγηση του προσομοιώματος δύο ορόφων			
Όροφος, i^*	n_{HD}	n_{AB}	n_{sc}
2	1	0	3
1	1	1	9

Πίνακας 4.5: Διαστασιολόγηση του προσομοιώματος οκτώ ορόφων			
Όροφος, i^*	n_{HD}	n_{AB}	n_{sc}
8	1	0	3
7	1	1	7
6	1	1	7
5	2	1	10
4	2	1	10
3	3	1	13
2	4	1	15
1	4	1	17

$*$, η αρίθμηση των ορόφων κατά την αρχιτεκτονική μελέτη θα ήταν 7, εφόσον όπου 1 θα ήταν το ισόγειο. Στην παρούσα εργασία ακολουθείται η αρίθμηση όπως στον πίνακα για χρηστικούς λόγους.

Όπου,

n_{HD} : Ο αριθμός των hold-downs σε κάθε γωνία του πάνελ.

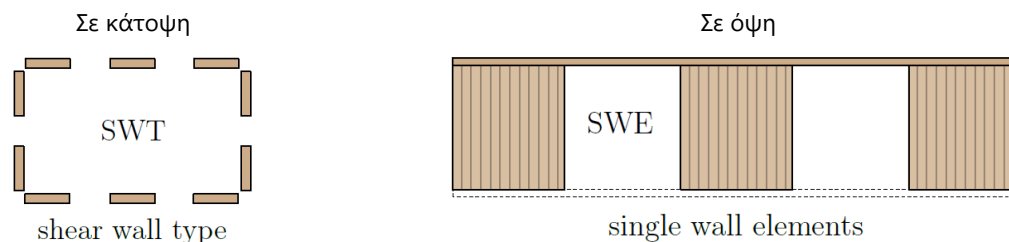
n_{AB} : Ο αριθμός των angle brackets κατανεμημένα σε ίσες μεταξύ τους αποστάσεις (εν προκειμένω δηλαδή στη μέση).

n_{sc} : Ο αριθμός των κοχλιών σε κάθε τοίχο που τον συνδέει με την οροφή.

4.1.4. Προσομοίωση των φορέων

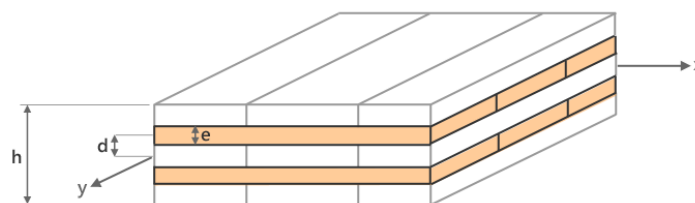
Με βάση το ως άνω σχέδιο κάτοψης, αναπτύχθηκαν προσομοιώματα στο λογισμικό ABAQUS δύο και οκτώ ορόφων. Κάθε όροφος είχε ύψος 2.75m, χωρίς να συνυπολογίζεται το πάχος του δαπέδου.

Στην διατριβή του ο Hummel [2017], εξέτασε τέσσερεις διαφορετικούς συνδυασμούς τύπων προσομοίωσης όσον αναφορά τους τοίχους στα μοντέλα. Ένας μονάχα εξ' αυτών εξετάζεται στην παρούσα εργασία και συγκεκριμένα ο συνδυασμός SWT-SWE (κωδική ονομασία κατά Hummel [2017]). Ο τύπος προσομοίωσης που θεωρήθηκε είναι ιδεατός και απλοποιητικός, αλλά υπέρ της ασφαλείας. SWT (shear wall type) σημαίνει πως οι κάθετοι μεταξύ τους τοίχοι θεωρούνται και ασύζευκτοι μεταξύ τους, ενώ SWE (single wall element) πως τα τμήματα του τοίχου πάνω και κάτω από τα ανοίγματα δεν λαμβάνονται υπόψιν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Ο συνδυασμός αυτός (SWT-SWE) έδωσε τα δυσμενέστερα αποτελέσματα στις αναλύσεις με χρονιόστορίες της διατριβής Hummel, [2017] επιλέχθηκε όμως λόγω της απλότητάς του και της συχνής του εμφάνισης στη βιβλιογραφία.



Εικόνα 4.3: Προσομοίωση της ένωσης των τοίχων στα χωρικά προσομοιώματα

Η χρήση ισότροπου υλικού στους τοίχους έδειξε στο κεφάλαιο 3 ότι προσομοιώνει ικανοποιητικά τις καμπτικές και διατμητικές παραμορφώσεις του CLT εντός επιπέδου. Επομένως το υλικό στους τοίχους αφέθηκε το ίδιο. Η ίδια λογική ακολουθήθηκε όσον αναφορά τα δάπεδα. Τα δεδομένα δίνονται στον πίνακα της Εικόνας 4.4 :



e	d	h	$E_{0,mean}$
21mm	$\frac{21 + 32}{2} = 26.5mm$	138mm	11000MPa

Εικόνα 4.4: Τα χαρακτηριστικά των δαπέδων και οι στρώσεις που λήφθηκαν υπόψιν στα χωρικά προσομοιώματα

Κατά τον υπολογισμό της ροπής αδρανείας της πλάκας περί τον άξονα Y, λαμβάνονται υπόψη μόνο οι στρώσεις προσανατολισμένες κατά μήκος του X. Η ροπή αδρανείας των δύο αυτών στρώσεων υπολογίζεται ως εξής :

$$I_{y,eff} = 2 \left(\frac{e^3}{12} + e \cdot d^2 \right) = 32596.1mm^4/m$$

Δεδομένου ότι στα προσομοιώματα λαμβάνεται υπόψιν το πραγματικό πάχος h της πλάκας, χρησιμοποιήθηκε κι ένα ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας που καθορίζεται από τη παρακάτω σχέση:

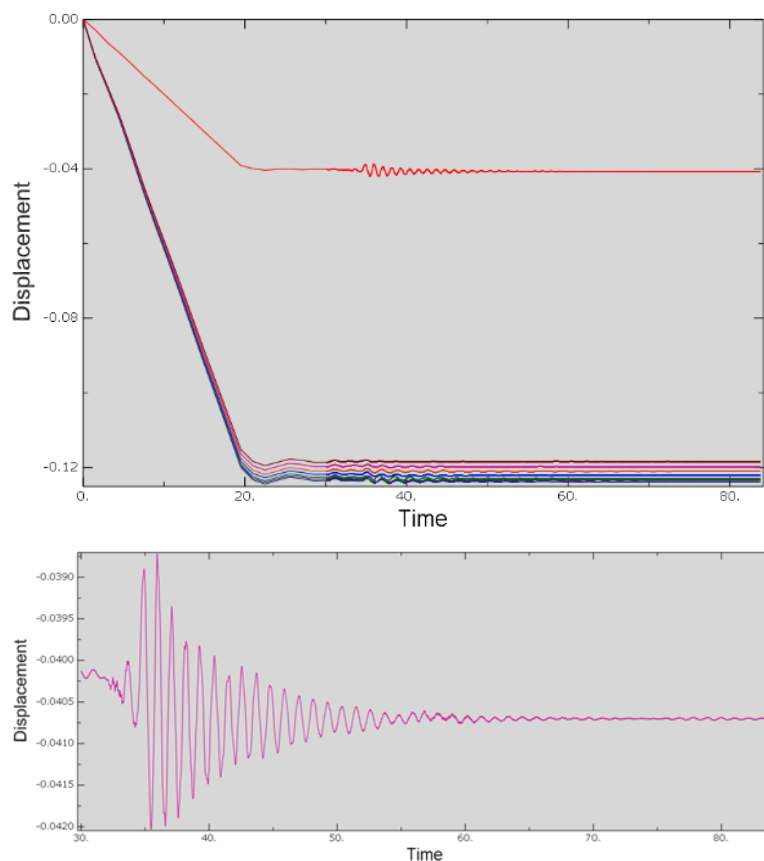
$$E_{eq} \times I_y = E_{eq} \frac{h^3}{12} = E \times I_{y,eff}$$

Συνεπώς,

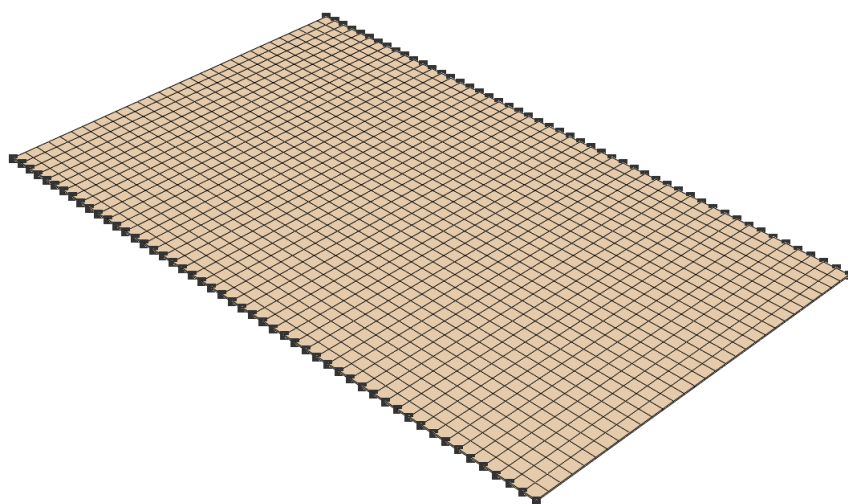
$$E_{eq} = \frac{12 \times E \times I_{y,eff}}{h^3} = 1637.2MPa$$

Το πεπερασμένο στοιχείο για το CLT που επιλέχθηκε ήταν το S4R του ABAQUS, που είναι και το πιο κοντινό στο MITC4 που χρησιμοποιείται από τον Hummel [2017]. Το δίκτυο (mesh) είχε διαστάσεις 250 x 250 mm.

Η πυκνότητα του υλικού τέθηκε $420 kg/m^3$ σε τοίχους και δάπεδα, ενώ ο λόγος του Poisson θεωρήθηκε 0.3. Οι μάζες των κτιρίων εισήχθησαν στα μοντέλα μέσω της πυκνότητας των υλικών, καθώς και μέσω συγκεντρωμένων σημειακών μαζών. Η διατήρηση της πυκνότητας σε ρεαλιστικές τιμές ήταν απαραίτητη λόγω επιλογής explicit ανάλυσης. Για την υπόλοιπη μάζα, χρησιμοποιήθηκαν σημειακές μάζες στις άκρες των δαπέδων, όπως στην Εικόνα 4.6. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύχθηκαν φαινόμενα ταλάντωσης της πλάκας (Εικόνα 4.5) κατά τη σεισμική διέγερση και ιδιομορφές που δεν απασχολούν την παρούσα εργασία.



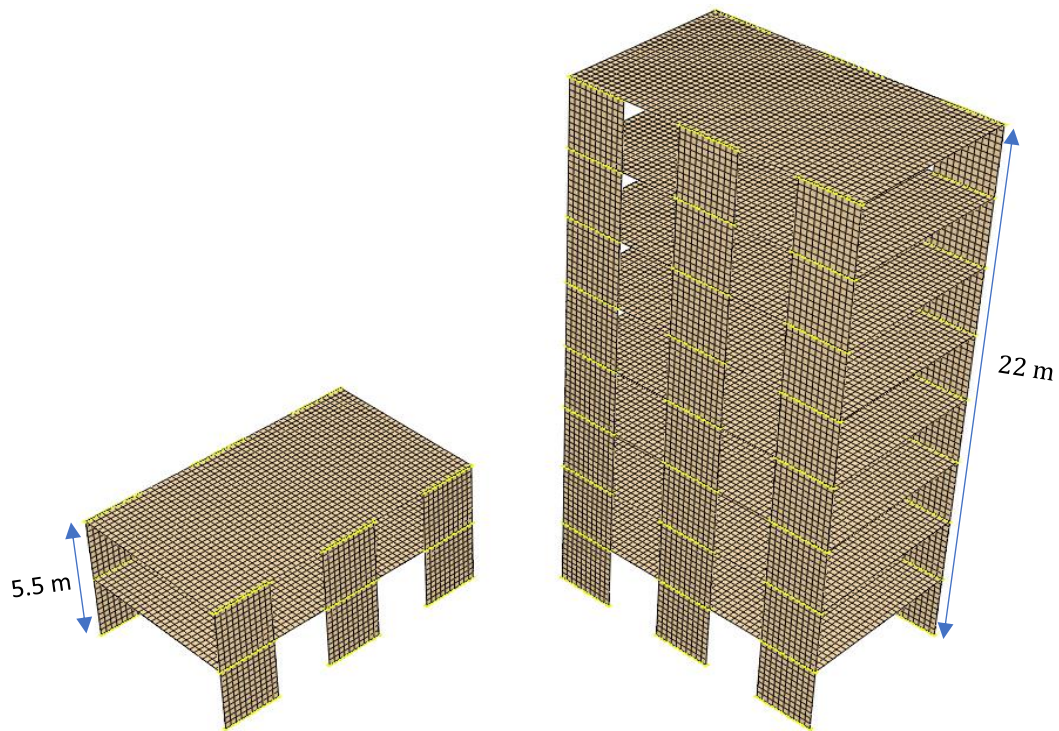
Εικόνα 4.5: Διαγράμματα μετατόπισης που φανερώνουν την ταλάντωση των διαφραγμάτων με σημειακή μάζα στο κέντρο τους



Εικόνα 4.6: Τελική τοποθέτηση των μαζών στις άκρες των διαφραγμάτων

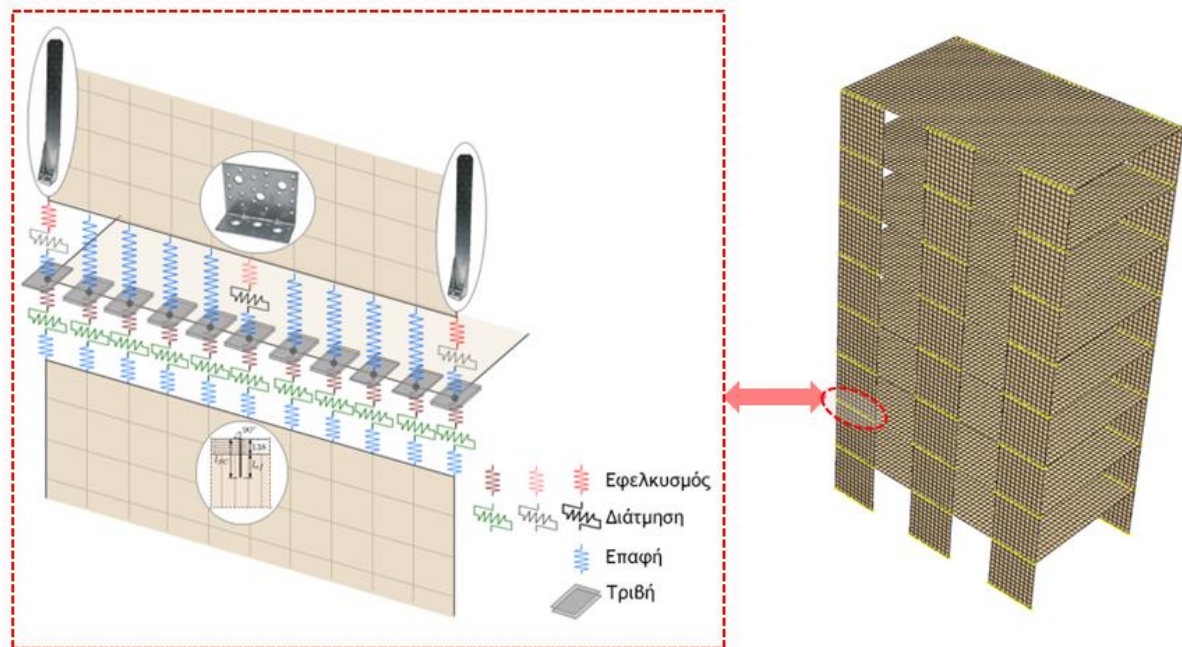
Τα κατακόρυφα φορτία πάρθηκαν υπόψιν με τις κατάλληλες επιφανειακές φορτίσεις σε τοίχους και δάπεδα (σε πλάτος d_{eff}).

Η μελέτη της στροφής της πλάκας γύρω από τους καθολικούς άξονες Z και X (βλέπε κάτοψη) δεν απασχόλησε την παρούσα εργασία, καθώς είναι ανεξάρτητη της κίνησης των σωμάτων στο επίπεδο κάθετο στον Y που μελετάται. Για το λόγο αυτό, δύο συμμετρικές στηρίξεις στις ακμές κάθε δαπέδου, εμποδίζουν τη στροφή αυτή. Μια παραμετρική μελέτη έδειξε εξάλλου [Hummel J., 2017], πως εάν παρθεί υπόψιν η δυσκαμψία των κοχλιών εκτός επιπέδου, τότε η δυσκαμψία των ελατηρίων στη θεμελίωση, που εμποδίζουν την εκτός επιπέδου κίνηση δεν επηρεάζει τη συμπεριφορά εντός επιπέδου (με τιμές από 1 έως 100 kN/mm).



Εικόνα 4.7: Προσομοιώματα των φορέων στο λογισμικό ABAQUS

Στην Εικόνα 4.7 φαίνονται τα προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν με το λογισμικό ABAQUS. Με ανοιχτό πράσινο φαίνονται οι θέσεις των user elements. Η Εικόνα 4.8 εξηγεί αναλυτικότερα, τα user elements και τα επιμέρους ελατήρια που τα απαρτίζουν στο προσομοίωμα, καθώς και τη θέση τους. Κάθε όροφος είχε τον δικό του αριθμό συνδέσμων που φαίνεται στους Πίνακες διαστασιολόγησης 4.4 και 4.5.



Εικόνα 4.8: Η θέση των user elements στα προσομοιώματα των κτιρίων

Συνολικά στο οκτώωρο προσομοίωμα χρησιμοποιήθηκαν 1056 user elements κάθε ένα εκ των οποίων αποτελούνταν από 2 ή 3 διαφορετικά ελατήρια.

4.2. Μη-γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες

4.2.1. Φάσμα σχεδιασμού και καταγραφές που επιλέχθηκαν.

Ως ελαστικό φάσμα σχεδιασμού χρησιμοποιήθηκε το ίδιο με αυτό που χρησιμοποίησε ο Hummel [2017]. Το φάσμα τυγχάνει να είναι σύμφωνο με το ελληνικό εθνικό προσάρτημα, καθώς είναι τύπου 1 και υπολογίστηκε για $a_g = 0.25g$ (αντίστοιχο της σεισμικής ζώνης Z 2). Η κατηγορία εδάφους ορίστηκε Β. Οι τιμές χαρακτηριστικών περιόδων και συντελεστή εδάφους για την οριζόντια συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης φαίνονται στο πίνακα 4.6:

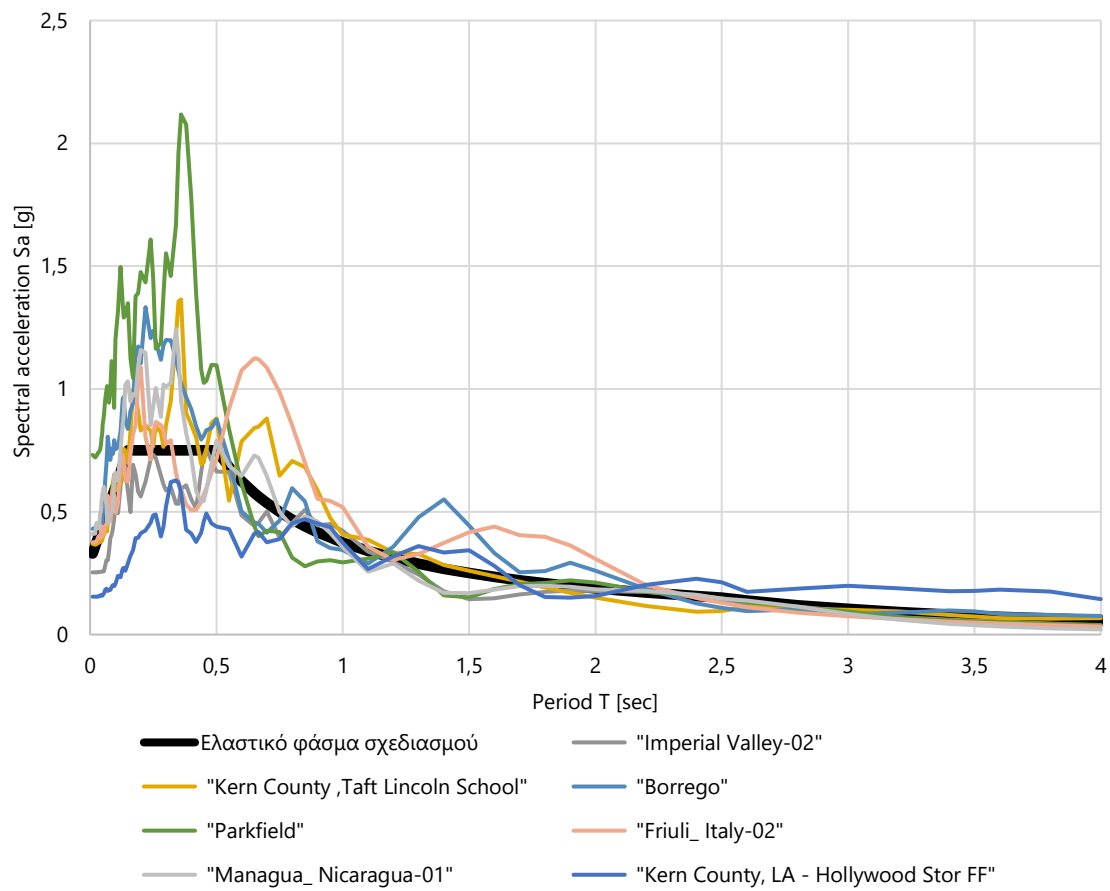
S	T_B	T_C	T_D
1.2	0.15sec	0.5sec	2.5sec

Θεωρήθηκε σκόπιμο να χρησιμοποιηθούν κοινές χρονοϊστορίες για τα δύο κτίρια. Οι καταγραφές και οι συντελεστές κλίμακας επιλέχθηκαν με τα εξής κριτήρια:

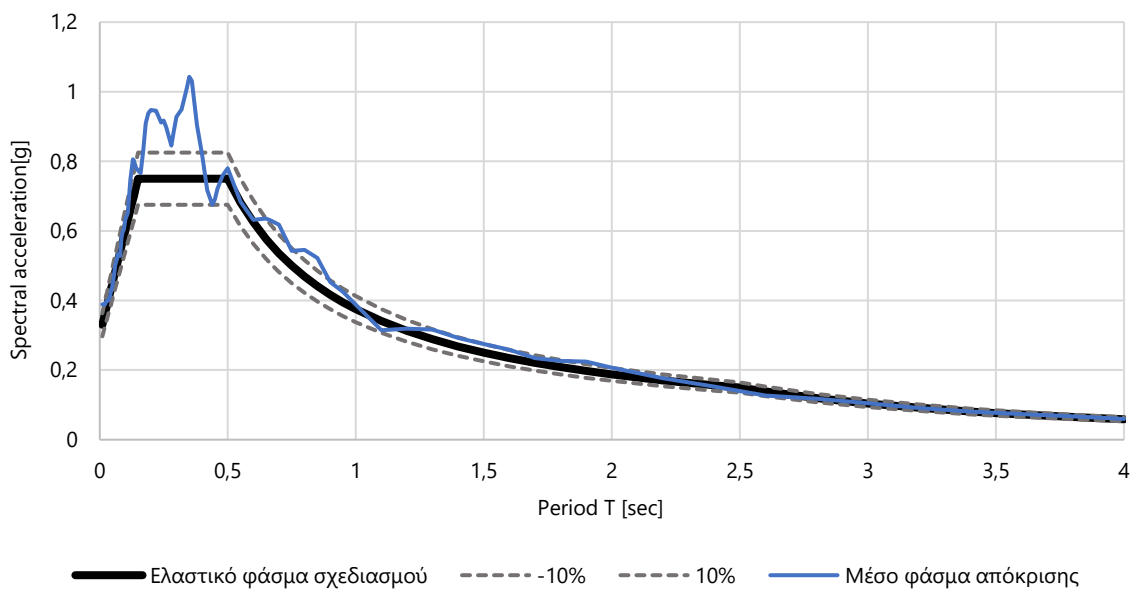
- Να έχουν μέσο όρο επιταχύνσεων (για $T = 0.01sec$) μεγαλύτερο από $0.33g$ που αντιστοιχεί για $S \cdot a_g = 0.3g$
- Η τιμή του μέσου φάσματος απόκρισης των διεγέρσεων για απόσβεση 5% να είναι μεγαλύτερη από το 90% της αντίστοιχης τιμής του ελαστικού φάσματος απόκρισης του EC8, για κάθε τιμή της ιδιοπεριόδου, εφόσον δεν είναι σαφής η τιμή της πρώτης ιδιοπεριόδου για κανένα από τα δύο κτίρια
- Να υπάρχει ποικιλία διαφορετικών σεισμών (διαφορετικό συμβάν, διαφορετική ένταση κ.τ.λ.), με απώτερο σκοπό την παρατήρηση των μορφών ταλάντωσης και της εξάρτησής τους από τη διέγερση
- Οι συντελεστές κλίμακας που θα χρησιμοποιηθούν να είναι κατά το δυνατόν μικρότεροι, εφόσον εξασφαλιστούν τα παραπάνω κριτήρια

Για την επίτευξη των παραπάνω κριτηρίων επιλέχθηκαν 7 καταγραφές. Τα φάσματα των σεισμών που τελικώς επιλέχθηκαν για να παρουσιαστούν με τους αντίστοιχους συντελεστές κλίμακας και περαιτέρω πληροφορίες φαίνονται στον Πίνακα 4.7 και στην Εικόνα 4.9.

Όνομασία σεισμού	Σεισμολογικός σταθμός	Συνομημύσεις διαγραμμάτων	Χρονολογία	Συντελεστής κλίμακας
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	Imperial	1940	0.9
Kern County	Taft Lincoln School	Kern	1952	2.3
Borrego	El Centro Array #9	Borrego	1942	6.5
Parkfield	Cholame-Shandon Array #5	Parkfield	1966	1.61
Friuli_Italy-02	Buia	Friuli	1976	3.4
Managua_Nicaragua-01	Managua_ ESSO	Managua	1972	1.1
Kern County	LA - Hollywood Stor FF	Kern-LA	1952	3.65



Εικόνα 4.9: Τα φάσματα των διεγέρσεων πολλαπλασιασμένα με τους συντελεστές κλίμακας και το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού



Εικόνα 4.10: Το μέσο φάσμα απόκρισης και το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.10 φαίνεται το μέσο φάσμα και τα όρια $\pm 10\%$. Όλες οι χρονοϊστορίες και οι πληροφορίες για τους σεισμούς βρέθηκαν στην διαδικτυακή βάση δεδομένων PEER Ground Motion Database NGA-West2 (Berkeley, [Ancheta et al., 2014]). Επιπλέον πληροφορίες για τους σεισμούς, καθώς και οι ίδιες οι χρονοϊστορίες βρίσκονται στο παράρτημα Β.

Είναι γνωστό πως το συχνотικό περιεχόμενο των διεγέρσεων σε μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις μπορεί να αλλάξει την απόκριση των κατασκευών. Η μέση περίοδος (T_m) της κίνησης του εδάφους παρουσιάζεται εδώ ως ενδεικτική παράμετρος περιεχομένου συχνότητας των διεγέρσεων που επιλέχτηκαν και ως μέσο σύγκρισης με άρθρα της βιβλιογραφίας όπως [Demirci et al., 2017]. Η μέση περίοδος προτάθηκε αρχικά από την Rathje [Rathje et al., 1988, 1998] και αποτελεί πρακτικά τον σταθμισμένο μέσο όρο των συχνотήτων του φάσματος Fourier σε προκαθορισμένα αντιπροσωπευτικά όρια. Ορίζεται ως :

$$T_m = \frac{\sum_i c_i^2 \cdot \frac{1}{f_i}}{\sum_i c_i^2}, \text{ για } 0.25\text{Hz} \leq f_i \leq 20\text{Hz} \text{ με } \Delta f_{max} \leq 0.05\text{Hz}$$

Όπου, f_i : διακριτές συχνότητες μετασχηματισμού Fourier

C_i : πλάτος του κύματος i του φάσματος Fourier

Πίνακας 4.8: Η τιμή της μέσης περιόδου κάθε διεγέρσης							
Σεισμός	Imperial	Kern	Borrego	Parkfield	Friuli	Managua	Kern-LA
$T_m(sec)$	0.579	0.540	0.583	0.212	0.71	0.456	1.005

4.2.2. Παράμετροι ανάλυσης

Στις τελικές αναλύσεις τα κατακόρυφα φορτία επιβλήθηκαν στα προσομοιώματα του κεφαλαίου §5 σταδιακά σε χρονικό διάστημα 40sec ή 50sec στο οκταώροφο και 35sec στο διώροφο και διατηρούνταν σταθερά για 10sec πριν την επιβολή της σεισμικής διεγέρσης. Οι σεισμικές διεγέρσεις επιβλήθηκαν σε όλες τις αναλύσεις μόνον κατά την διεύθυνση X (βλέπε κάτοψη κεφάλαιο 3).

Για το μητρώο απόσβεσης υιοθετήθηκε η θεώρηση ισοδύναμου βισκοϊξώδους ρευστού κατά Rayleigh. Λόγω explicit ανάλυσης, και για λόγους υπολογιστικού κόστους, χρησιμοποιήθηκε μόνο ο συντελεστής βισκοϊξώδους απόσβεσης που σχετίζεται με τη μάζα. Για συντελεστή απόσβεσης $\zeta = 5\%$, ίδιο με αυτό των φασμάτων, η απόσβεση προσεγγίστηκε από τις παρακάτω σχέσεις:

$$C = a \cdot [M]$$

$$a = \frac{4 \cdot \pi \cdot \zeta}{T_1}$$

Οι ιδιοπερίοδοι της δεσπόζουσας ιδιομορφής στη X διεύθυνση πάρθηκαν για την παραπάνω σχέση ίσες με $T_1 = 1.68sec$ για το οκταώροφο κτίριο και $T_1 = 0.36sec$ για το διώροφο από [Hummel, 2017], για λόγους σύγκλισης των τελικών προσομοιωμάτων και σύγκρισης των αποτελεσμάτων. Μια διαφορετική μέθοδος προσέγγισης των «ισοδύναμων» ιδιοπεριόδων βρίσκεται στο Παράρτημα Α.

Όλες οι αναλύσεις έγιναν με χρονικό βήμα $4.5E - 05 sec$ και διαδικασία επίλυσης explicit. Σε κάθε ανάλυση, κατά την επιβολή των σεισμικών διεγέρσεων, και ανεξαρτήτως της διάρκειας της χρονοϊστορίας, τα αποτελέσματα προκύπτουν από την αποθήκευση 10000 στιγμιότυπων (frames). Ο μεγάλος αυτός αριθμός επιλέχτηκε για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη προσέγγιση των περιόδων ταλάντωσης με αποσύνθεση Fourier.

Οι σεισμικές διεγέρσεις επιβλήθηκαν στα προσομοιώματα των δύο κτιρίων, για προσομοίωση με και χωρίς τριβή στις διεπιφάνειες τοίχου-δαπέδου. Στις επιλύσεις με τριβή, χρησιμοποιήθηκαν οι αντίστοιχοι συντελεστές για επιφάνειες CLT-CLT και CLT-σκυροδέματος. Κάποιες από τις επιλύσεις με τριβή επαναλήφθηκαν για $\zeta = 1\%$, για λόγους σύγκρισης. Επιπλέον, διερευνήθηκε η επίδραση της τριβής στις διεπιφάνειες τοίχου οροφής χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο συντελεστή τριβής 0.2 (βλέπε υποκεφάλαιο §2.4.2). Συνολικά θα

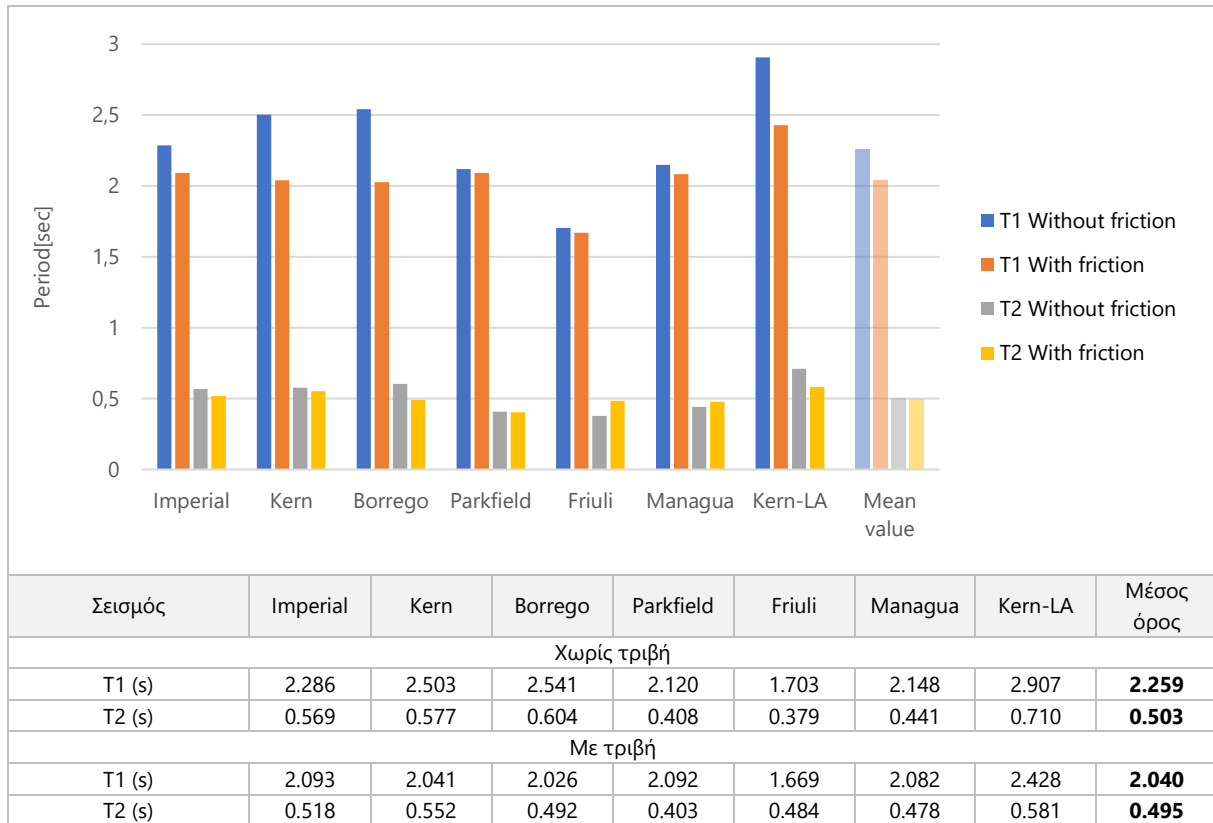
παρουσιαστούν παρακάτω αναλυτικά (§4.3, §4.4) τα αποτελέσματα 28 αναλύσεων με χρονοϊστορίες, καθώς και τα αποτελέσματα μιας περαιτέρω διερεύνησης (§4.5).

Υπενθυμίζεται εδώ πως τα αποτελέσματα που αναφέρονται στον όγδοο όροφο αντιστοιχούν στο όγδοο διάφραγμα και ούτω καθεξής.

4.3. Αποτελέσματα των αναλύσεων – προσομοίωμα 8 ορόφων

4.3.1. Καθολικά χαρακτηριστικά

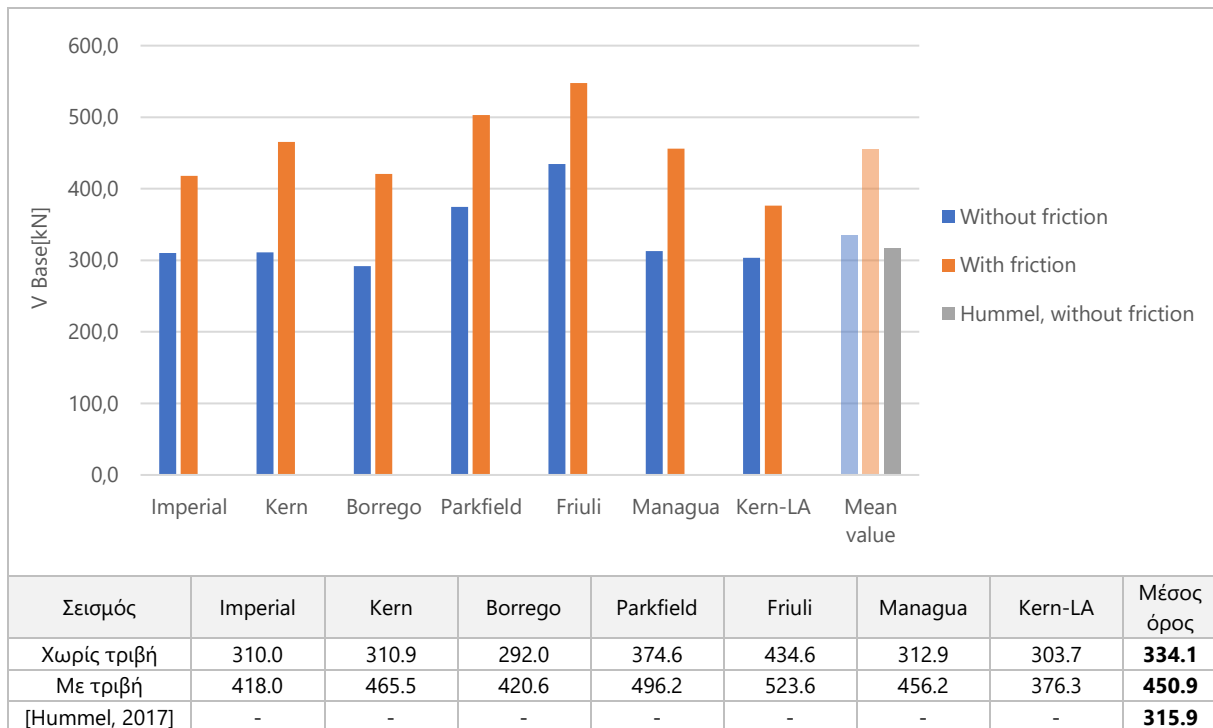
a) Περίοδοι ταλάντωσης



Εικόνα 4.11: Οι δύο σημαντικότερες περίοδοι ταλάντωσης, των οκτώροφων προσομοιωμάτων για κάθε διέγερση, με και χωρίς τριβή

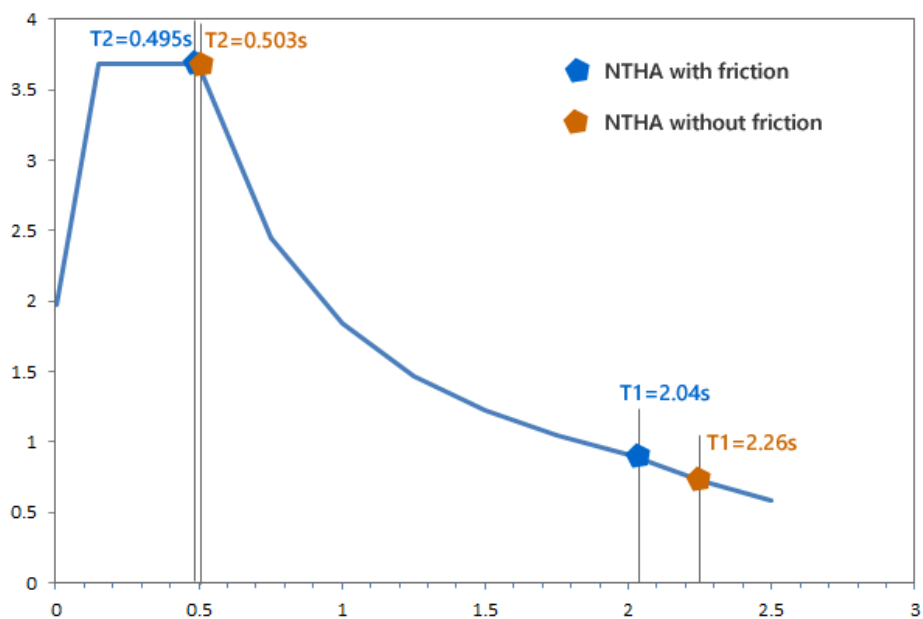
Οι δύο σημαντικότερες περίοδοι ταλάντωσης του προσομοιώματος για κάθε σεισμική διέγερση προσεγγίστηκαν από φάσματα. Τα φάσματα προέκυψαν με γρήγορο μετασχηματισμό Fourier (FFT) και αυτοπαλινδρομική μέθοδο (AR) στις συναρτήσεις μετατόπισης και επιτάχυνσης του σημείου κορυφής. Οι περίοδοι δεν αποτελούν ιδιοπεριόδους του συστήματος, καθώς είναι μη γραμμικό και το μητρώο δυσκαμψίας του μεταβάλλεται. Παρόλ' αυτά χαρακτηρίζουν μερικώς την ταλάντωσή του και την επιρροή της τριβής στο συχνοτικό περιεχόμενο της απόκρισης. Περισσότερες πληροφορίες για τη διαδικασία βρίσκονται στο Παράρτημα Δ.

b) Τέμνουσα βάση



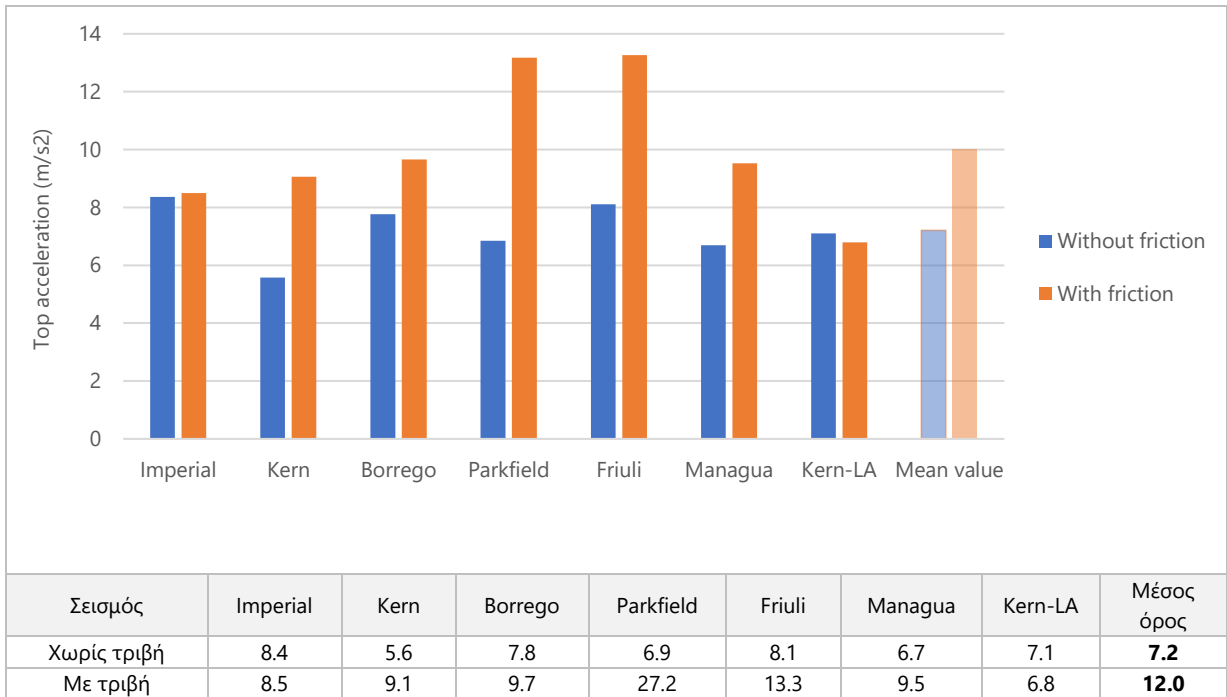
Εικόνα 4.12: Η τέμνουσα δύναμη βάσης, του οκταώροφου προσομοιώματος, για κάθε διέγερση, με και χωρίς τριβή

Στο ιστόγραμμα της εικόνας 4.12 φαίνεται πως ενώ επιλέχθηκαν επτά διαφορετικές διεγέρσεις, ο μέσος όρος των τεμνουσών βάσης (χωρίς τριβή) συνάδει με την τιμή που δίνεται από τον Hummel [2017]. Παρατηρούμε στο γράφημα ότι, όταν λαμβάνεται υπόψη η τριβή, κατά γενικό κανόνα η τέμνουσα βάση (V_{Base}) αυξάνεται. Η αύξηση αυτή μπορεί πιθανώς να οφείλεται εν μέρει στο ότι η κατασκευή γίνεται πιο δύσκαμπτη και κατά συνέπεια οι περίοδοι ταλάντωσής της είναι μικρότερες, ενώ η σεισμική καταπόνηση γίνεται μεγαλύτερη.



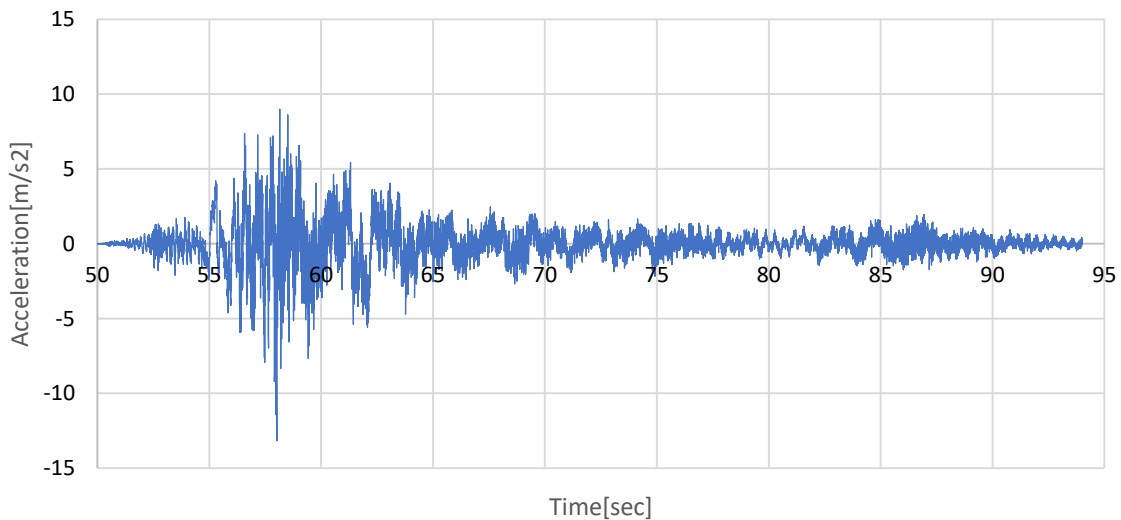
Εικόνα 4.13: Η θέση των δύο σημαντικότερων περιόδων (μέσοι όροι), στο φάσμα σχεδιασμού

c) Επιτάχυνση της κορυφής



Εικόνα 4.14: Η μέγιστη σχετική επιτάχυνση κορυφής, στο οκτώροφο προσομοίωμα, για κάθε διεγερση, με και χωρίς τριβή

Στο ιστόγραμμα 4.14 φαίνονται οι μέγιστες τιμές των σχετικών επιταχύνσεων του σημείου αναφοράς, το οποίο έχει ληφθεί στο κεντρικό σημείο του υψηλότερου διαφράγματος (κορυφή).

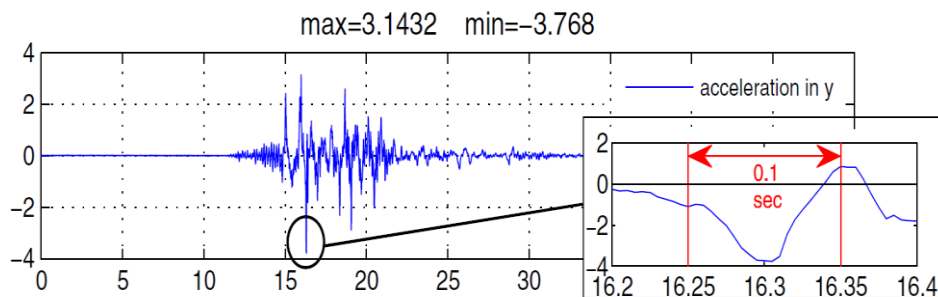


Εικόνα 4.15: Σχετική επιτάχυνση κορυφής για προσομοίωση με τριβή κατά τη σεισμική διεγερση Parkfield

Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως οι μέγιστες αυτές τιμές, οφείλονται σε κορυφές των διαγραμμάτων της επιτάχυνσης με πολύ μικρή χρονική διάρκεια. Τα επιταχυνσιογραφήματα είναι πολύ ευαίσθητα στην οποιαδήποτε αλλαγή στο αριθμητικό προσομοίωμα και η μέγιστη τιμή δεν αντιπροσωπεύει συνήθως ικανοποιητικά το διάγραμμα συναρτήσε του χρόνου. Αυτό διαπιστώθηκε στην πράξη στη παρούσα εργασία, όταν παρατηρήθηκε αύξηση των μέγιστων τιμών των επιταχύνσεων σε προσομοιώσεις με μικρότερους συντελεστές βισκοϊξώδους απόσβεσης (π.χ. 1 ή 5%) και σχεδόν διπλασιασμός της τιμής των αιχμών (spikes) σε προσομοιώσεις με τριβή στις

διεπιφάνειες τοίχου-οροφής, ενώ μεγέθη όπως οι μετατοπίσεις και η τέμνουσα βάσης παρέμεναν πρακτικώς αναλλοίωτα.

Οι αιχμές στα επιταχυνσιογραφήματα παρατηρούνται συχνά σε προσομοιώσεις με υστερητική συμπεριφορά με γραμμικούς κλάδους που συναντώνται σε γωνίες και οφείλονται στην απότομη αλλαγή δυσκαμψίας του συστήματος. Αντίστοιχη απότομη αλλαγή δημιουργούν τα στοιχεία contact για την προσομοίωση του rocking, καθώς και τα στοιχεία τριβής. Το φαινόμενο μπορεί να απαλειφθεί εν μέρει με την προσομοίωση των γωνιών αυτών μέσω κατάλληλων καμπυλών Bézier [Wiebe et al. 2010] ή μέσω πλήρους προσομοίωσης των βρόγχων με εκθετικούς κλάδους [Pang et al., 2007]. Οι προσομοιώσεις αυτές έχουν όμως υπολογιστικό κόστος και προτείνονται μόνον όταν επιδιώκεται η ακριβής αποτίμηση της μέγιστης τιμής της επιτάχυνσης, καθώς οι μετατοπίσεις και οι δυνάμεις δεν επηρεάζονται ουσιαστικά [Wiebe et al. 2010]. Οι αιχμές στα επιταχυνσιογραφήματα δεν προκαλούνται όμως μόνο από αριθμητικές απλοποιήσεις, αλλά και από φυσικά φαινόμενα, συνεπώς η αποτίμηση της προσομοίωσης της επιτάχυνσης είναι δύσκολη χωρίς πειραματικά αποτελέσματα.

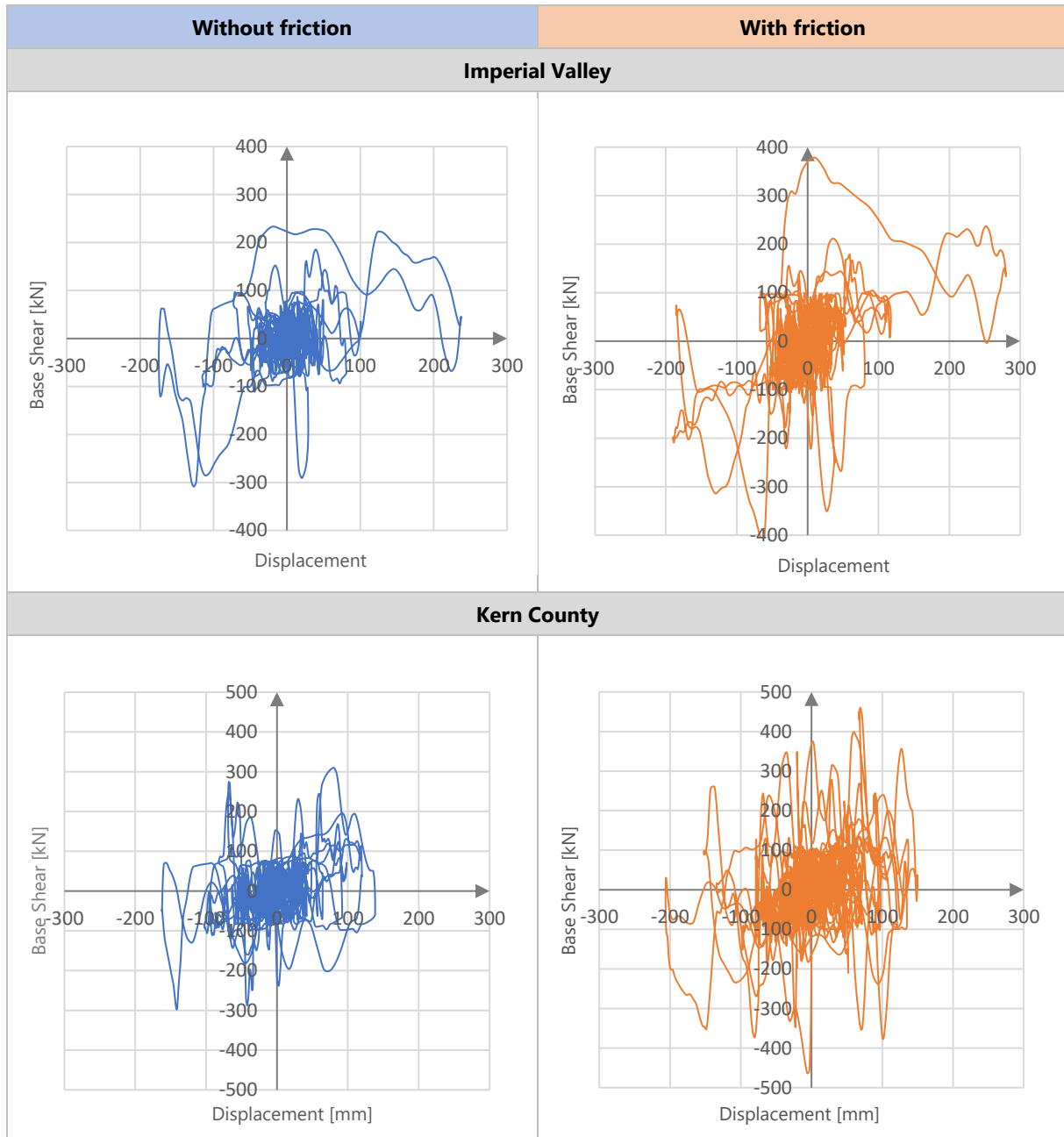


Εικόνα 4.16: Επιτάχυνση κορυφής επταώροφου κτιρίου CLT από πείραμα σε σεισμική τράπεζα [Ceccotti et al. 2013]

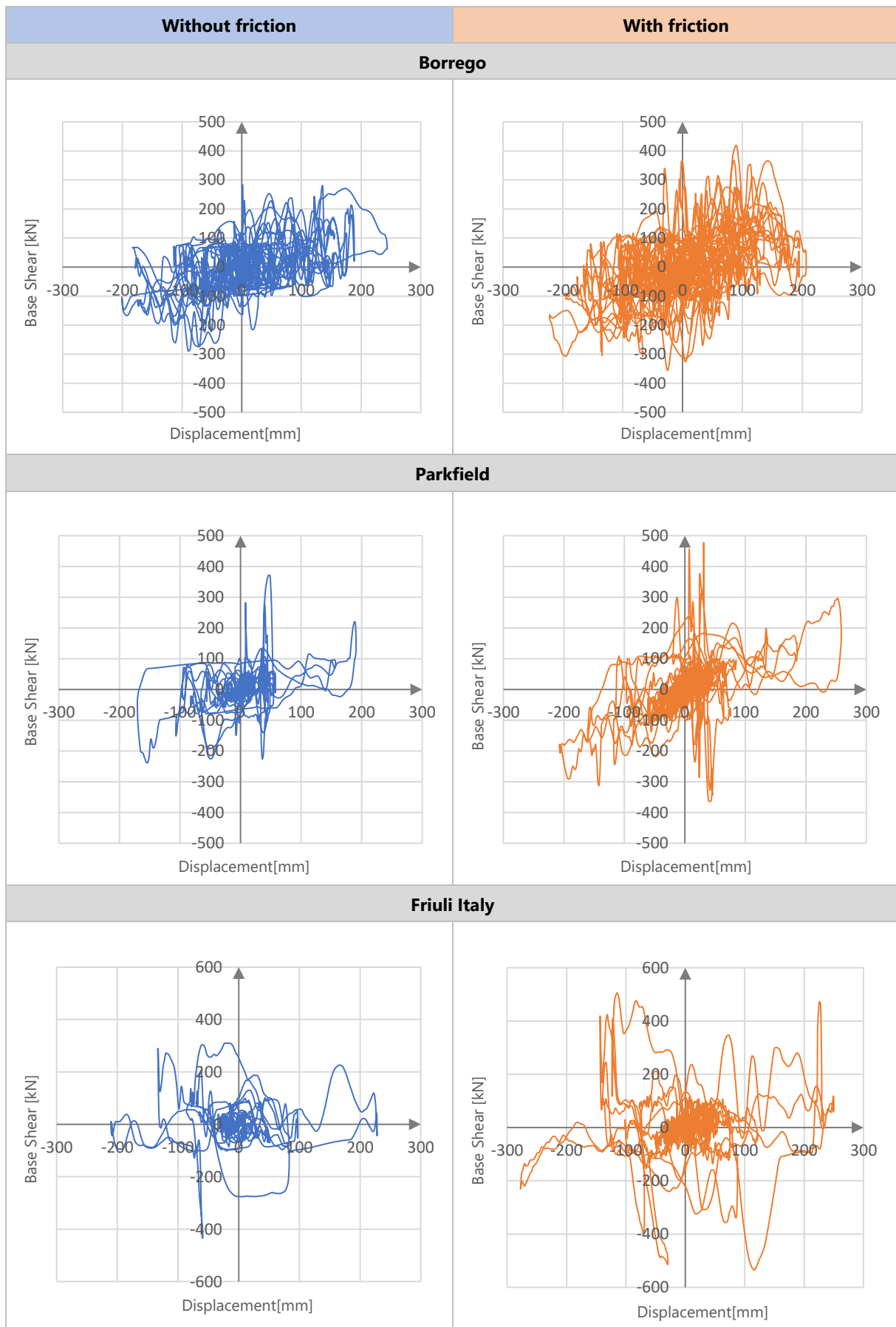
Στην εικόνα 4.16 φαίνεται το επιταχυνσιογράφημα της κορυφής του επταώροφου κτιρίου CLT υπό σεισμική διέγερση, κατά το πειραματικό πρόγραμμα S.O.F.I.E. [Ceccotti et al., 2013]. Στο πείραμα η μέγιστη επιτάχυνση υπολογίσθηκε ίση με $3.8g$, ενώ η μέση επιτάχυνση σε χρονικό διάστημα $0.1sec$ βρέθηκε ίση με $1.7g$.

4.3.2. Διαγράμματα F-δ

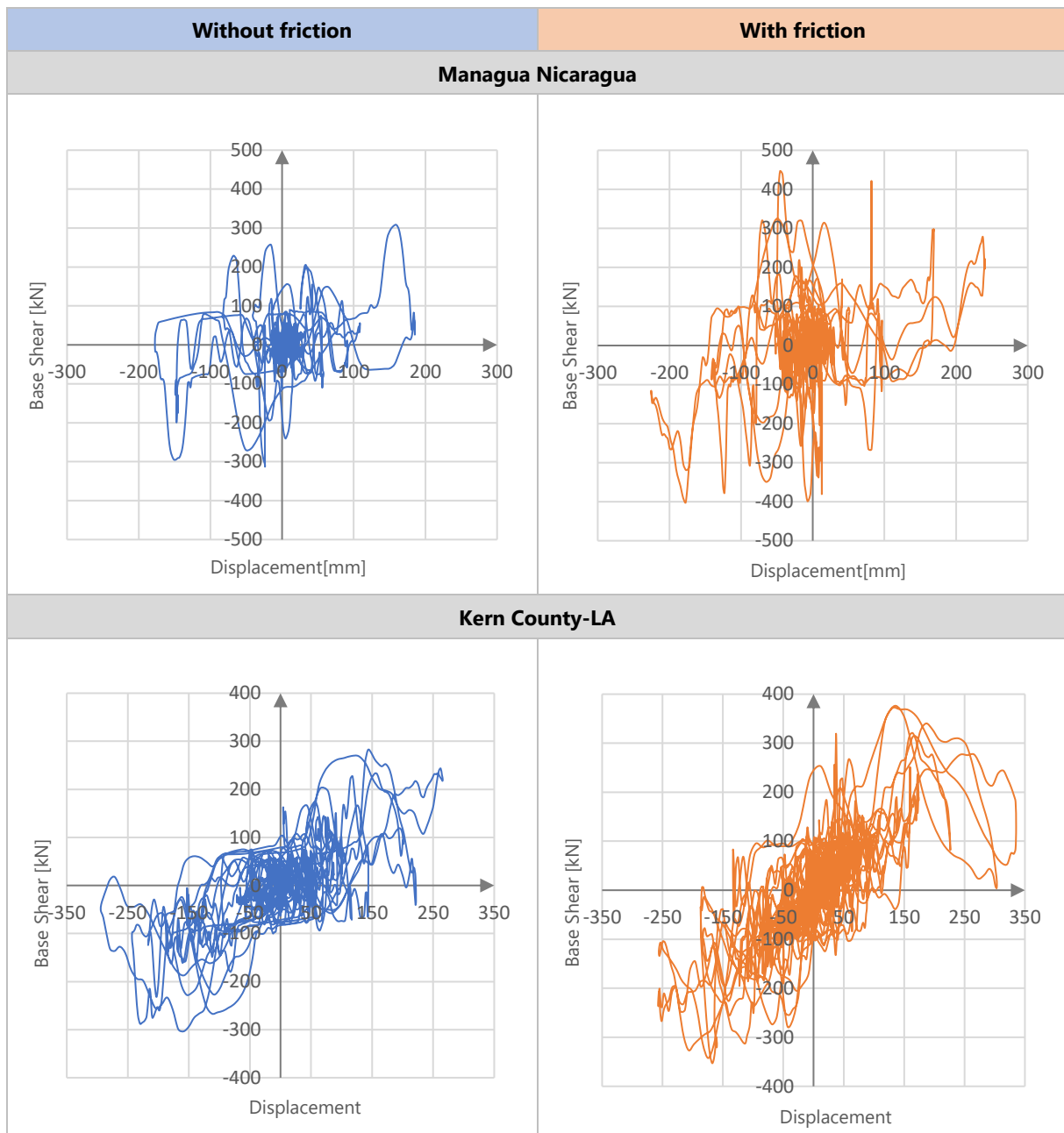
Στις Εικόνες 4.17, 4.18 και 4.19 παρουσιάζονται οι καμπύλες F-δ του οκταώροφου προσομοιώματος. Οι υστερητικές καμπύλες παρουσιάζουν τη σχέση μεταξύ τέμνουσας βάσης και σχετικής μετατόπισης κορυφής. Για τη δημιουργία τους χρησιμοποιήθηκαν ένα στα τρία στιγμιότυπα (frames). Με μπλε χρώμα φαίνονται οι καμπύλες που προέκυψαν από τα προσομοιώματα χωρίς τριβή, ενώ με πορτοκαλί, από αυτά με τριβή.



Εικόνα 4.17: Διαγράμματα F-δ που προκύπτουν από τη τέμνουσα βάσης και τη σχετική μετατόπιση του σημείου κορυφής του οκταώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, για τις διεγέρσεις Kern County και Imperial Valley

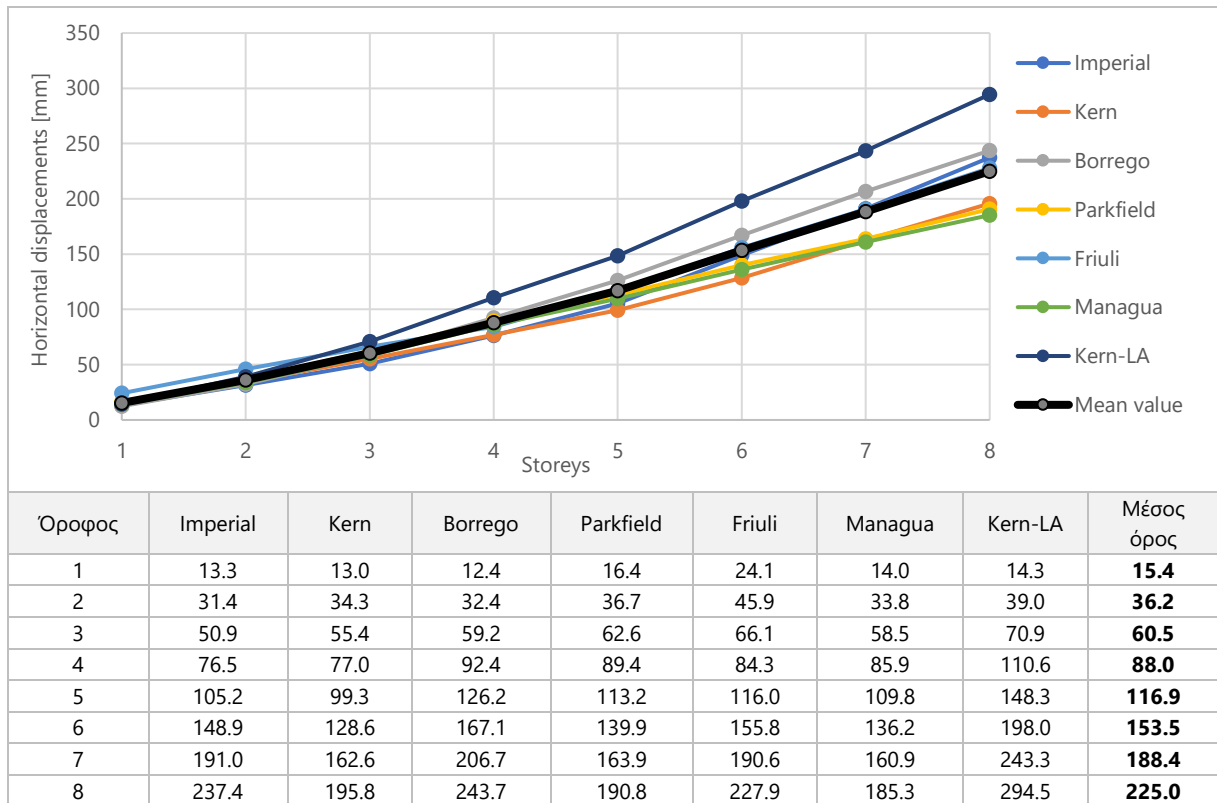


Εικόνα 4.18: Διαγράμματα F-δ που προκύπτουν από τη τέμνουσα βάσης και τη σχετική μετατόπιση του σημείου κορυφής του οκτώροφου προσομιώματος, με και χωρίς τριβή, για τις διεγέρσεις Borrego, Parkfield και Friuli

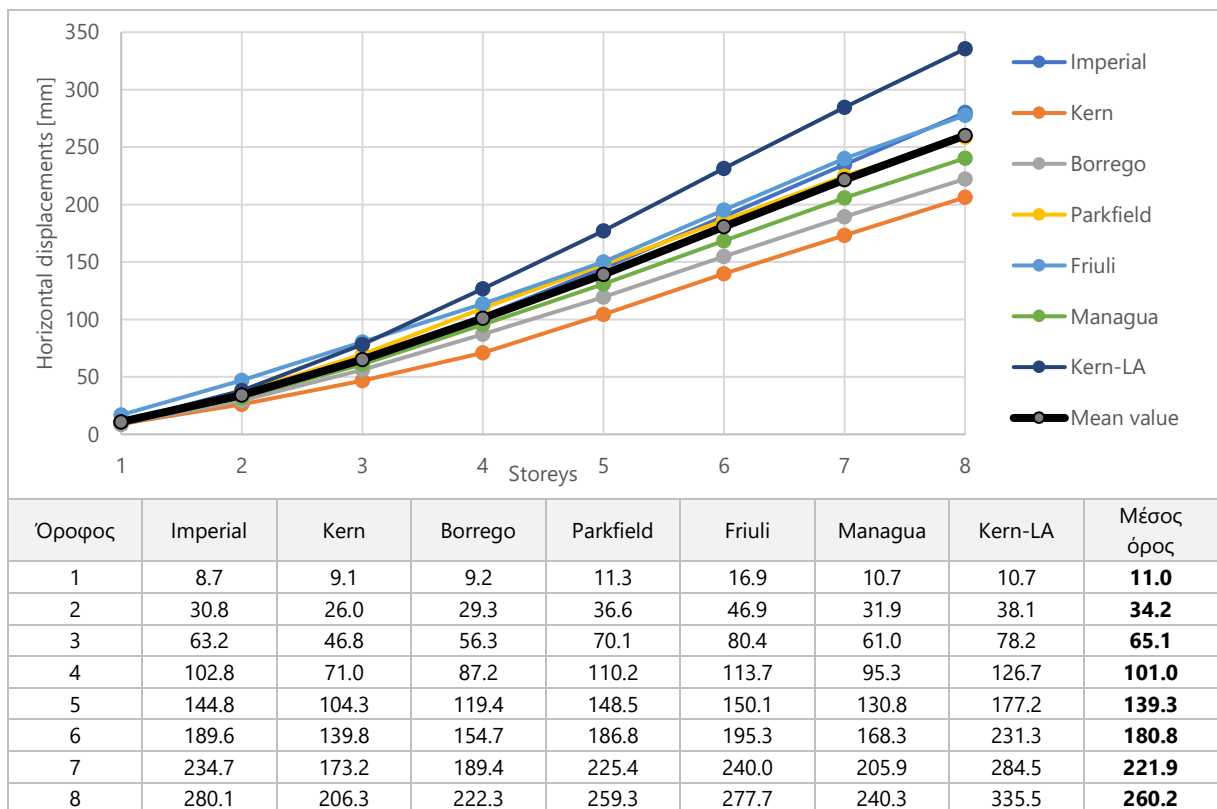


Εικόνα 4.19: Διαγράμματα F-δ που προκύπτουν από τη τέμνουσα βάσης και τη σχετική μετατόπιση του σημείου κορυφής του οκτώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, για τις διεγέρσεις Managua Nicaragua και Kern County-LA

4.3.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις



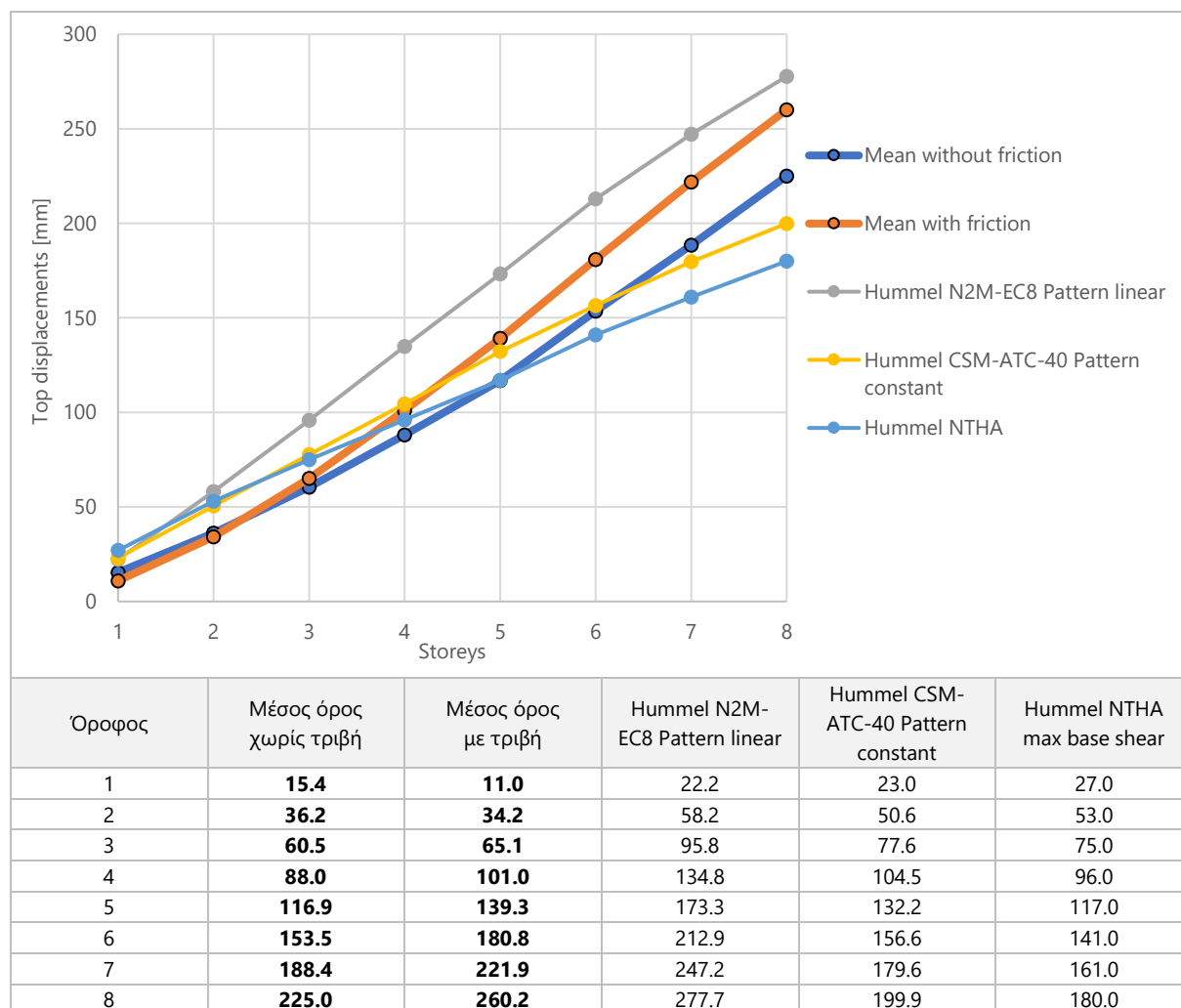
Εικόνα 4.20: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκτώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση



Εικόνα 4.21: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκτώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση

Στα διαγράμματα 4.19 και 4.20, φαίνονται οι τιμές της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης για κάθε σεισμική διέγερση και για τις δύο προσομοιώσεις με και χωρίς τριβή. Με μαύρη παχιά γραμμή φαίνονται οι μέσοι όροι. Παρατηρούμε ότι η προσομοίωση της τριβής αυξάνει τη μετατόπιση των υψηλότερων ορόφων, γεγονός που, όπως τονίζεται στα παρακάτω κεφάλαια, οφείλεται στην αύξηση του rocking.

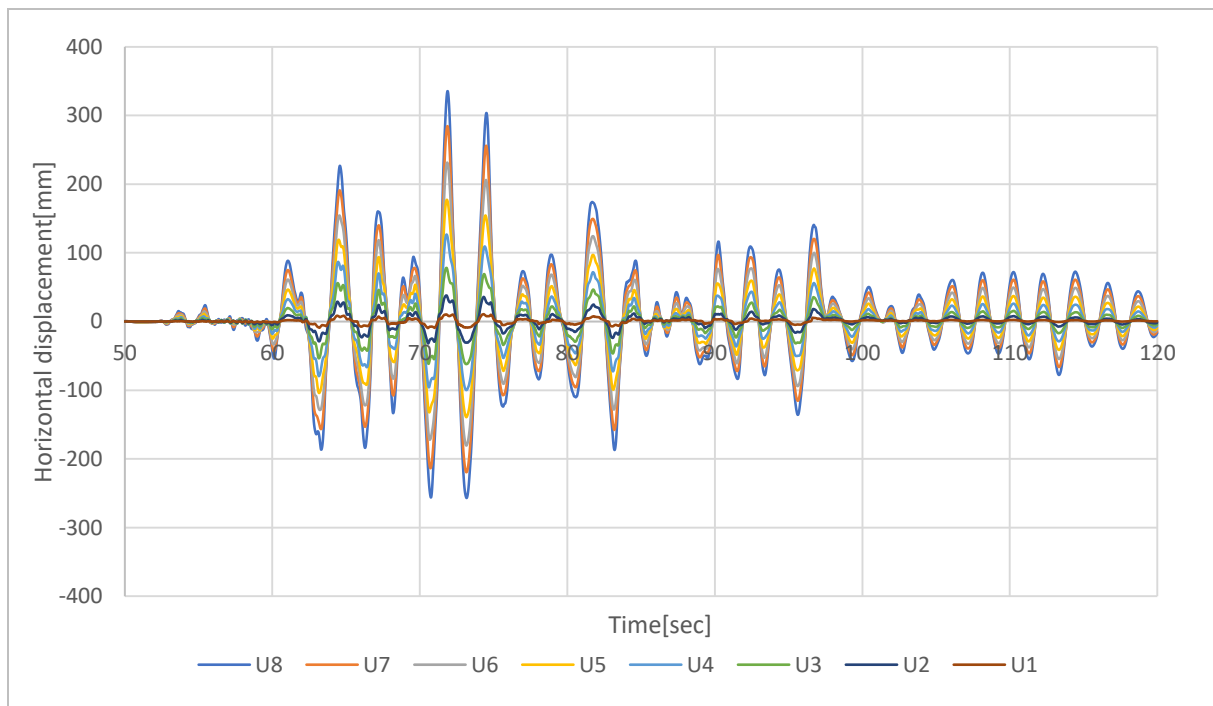
Στην Εικόνα 4.22, παρουσιάζεται η σύγκριση του μέσου όρου των τιμών της μετατόπισης, με και χωρίς τριβή, με τις τιμές που δίνονται από τον Hummel [2017]. Η τιμές που παρουσιάζονται στη διατριβή έχουν προκύψει από αναλύσεις με χρονοϊστορίες και με δύο διαφορετικές μεθόδους μη γραμμικής ανάλυσης push-over.



Εικόνα 4.22: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκταώροφου προσομοιώματος, κατά μέσο όρο για όλες τις διεγέρσεις – σύγκριση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Hummel [2017]

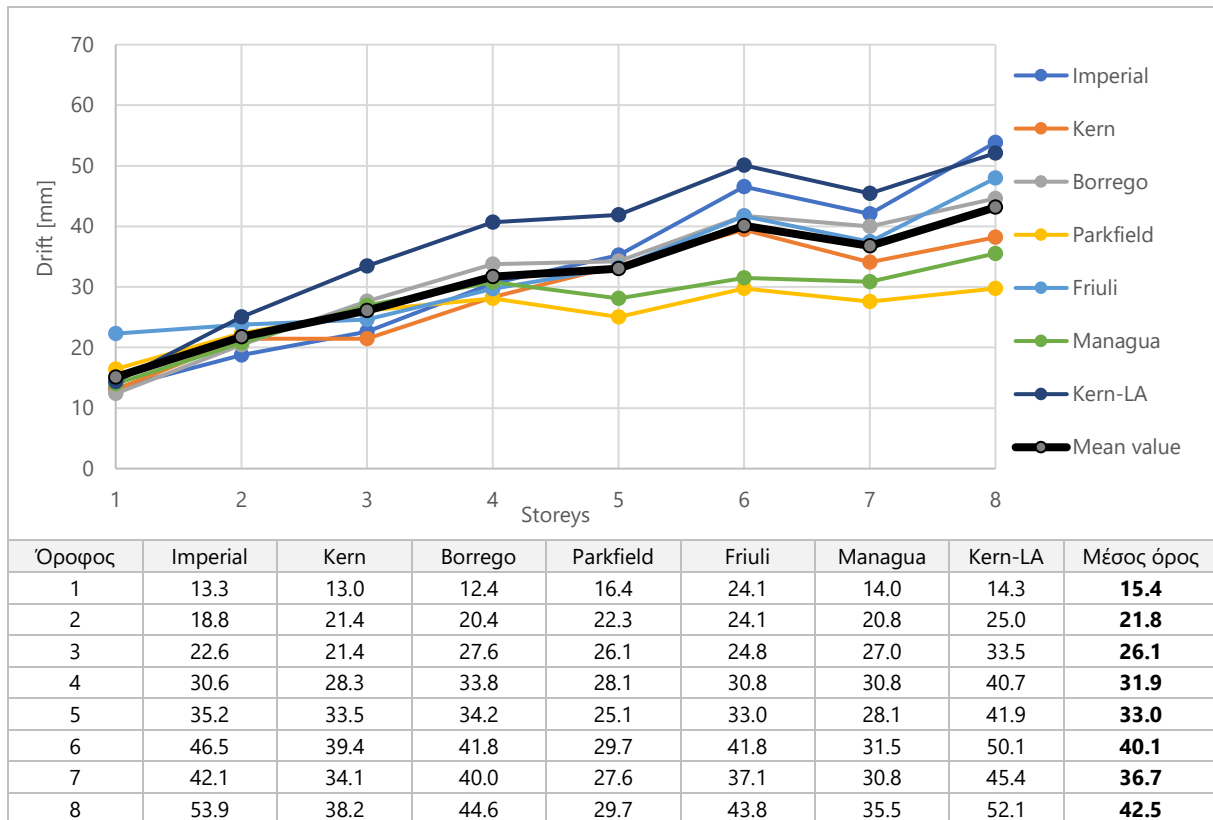
Παρατηρούμε στην Εικόνα 4.22 ότι οι τιμές που προέκυψαν από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας είναι συγκρίσιμες και ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές της διατριβής του Hummel J. [2017]. Φαίνεται παρόλα αυτά πως οι διεγέρσεις που επιλέχτηκαν καταπονούν περισσότερο την κατασκευή. Η ουσιαστικότερη σύγκριση γίνεται ανάμεσα στη μπλε παχιά γραμμή και στη γαλάζια που προκύπτουν από μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις σε προσομοιώματα χωρίς τριβή.

Παρακάτω παρατίθενται ενδεικτικά, στην Εικόνα 4.23, οι μετατοπίσεις των σημείων αναφοράς των διαφραγμάτων συναρτήσει του χρόνου για τη διέγερση Kern County – LA (προσομοίωση με τριβή).

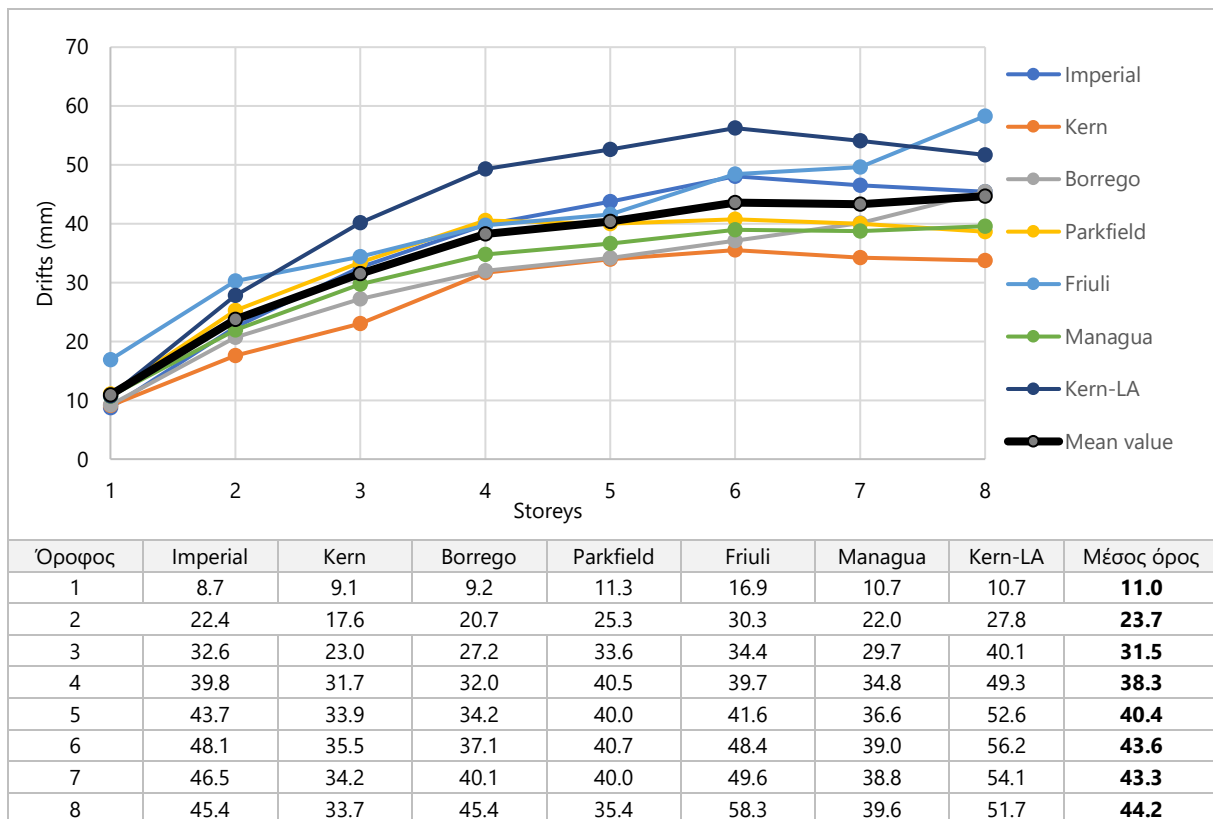


Εικόνα 4.23: Οριζόντιες σχετικές μετατοπίσεις των διαφραγμάτων του οκτώροφου προσομιώματος, με τριβή, συνατήσει του χρόνου, κατά τη διέγερση Kern County – LA

4.3.4. Οριζόντιες μετατοπίσεις ορόφων - Drifts



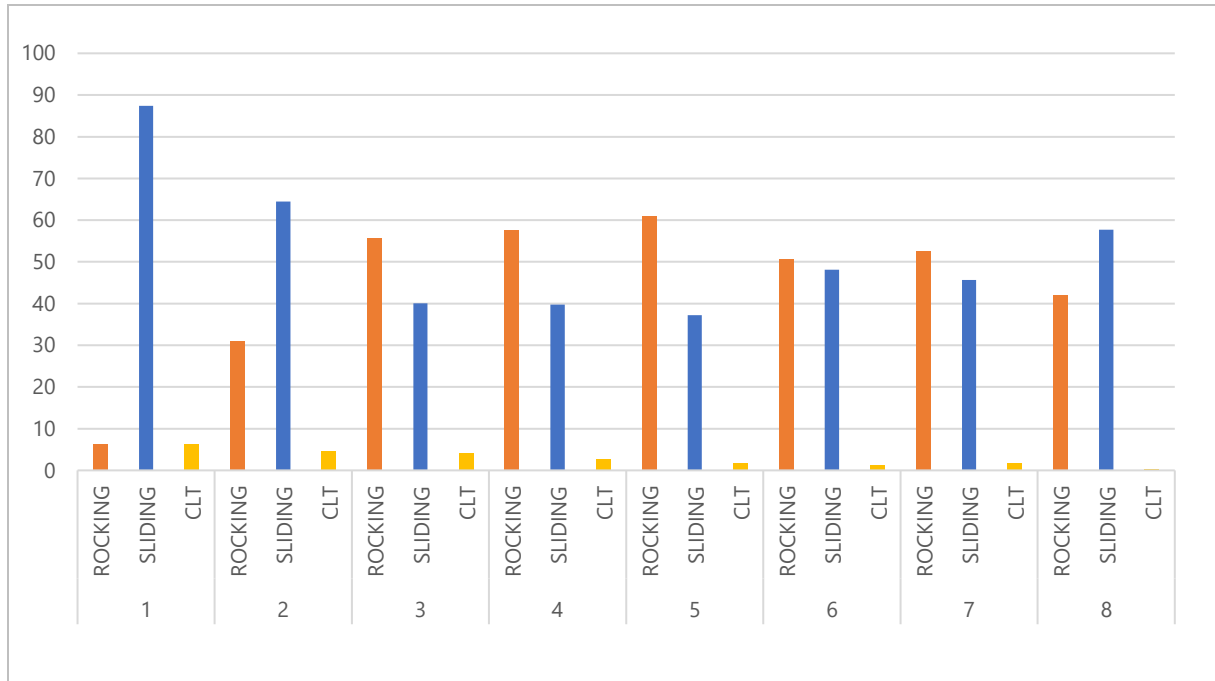
Εικόνα 4.24: Μέγιστες τιμές των drifts του οκταώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση



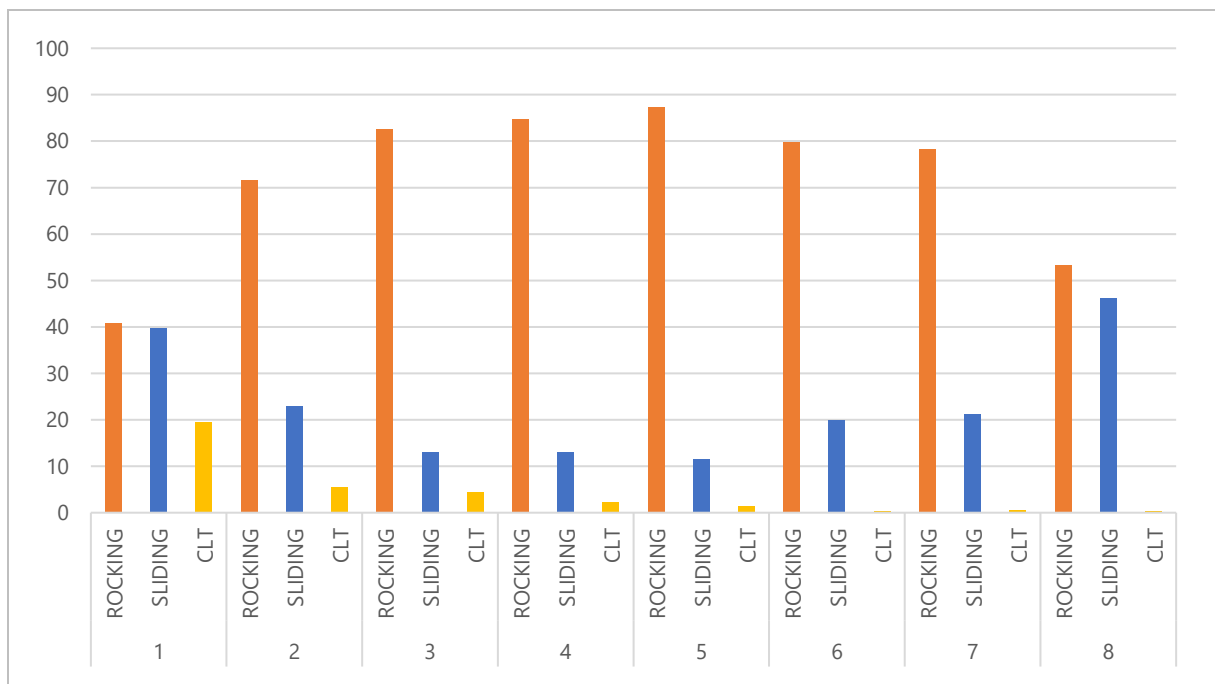
Εικόνα 4.25: Μέγιστες τιμές των drifts του οκταώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση

Στις εικόνες 4.24 και 4.25 παρουσιάζονται σε μορφή διαγραμμάτων και πινάκων οι μέγιστες τιμές των drifts που προέκυψαν για κάθε σεισμική διέγερση, για τις δύο προσομοιώσεις με και χωρίς τριβή. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, οι δύο προσομοιώσεις δίνουν τιμές ίδιας τάξης μεγέθους ως προς τα drifts.

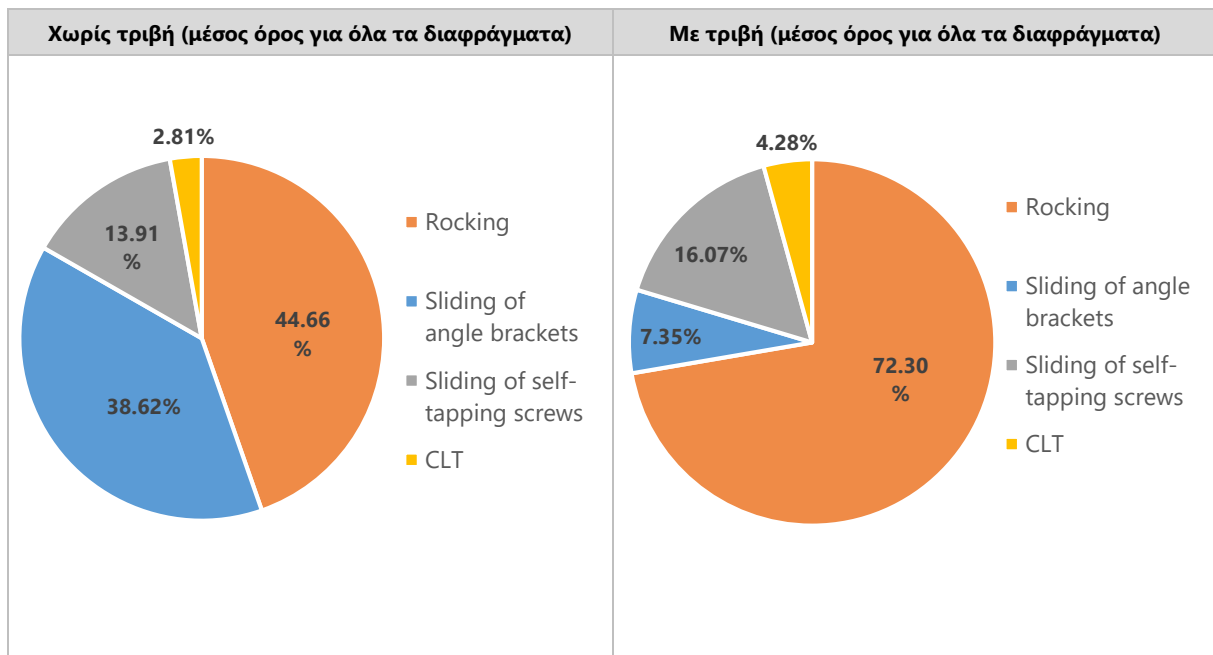
Είναι όμως σημαντικό να σημειωθεί εδώ, ότι, όπως παρουσιάζεται ακολούθως, οι μετατοπίσεις και κατά συνέπεια τα drifts στις δύο προσομοιώσεις έχουν «διαφορετική» προέλευση.



Εικόνα 4.26: Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε είδους κίνησης στην συνολική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκταώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, κατά μέσο όρο για όλες τις διεγέρσεις



Εικόνα 4.27: Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε είδους κίνησης στην συνολική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκταώροφου προσομοιώματος, με τριβή, κατά μέσο όρο για όλες τις διεγέρσεις



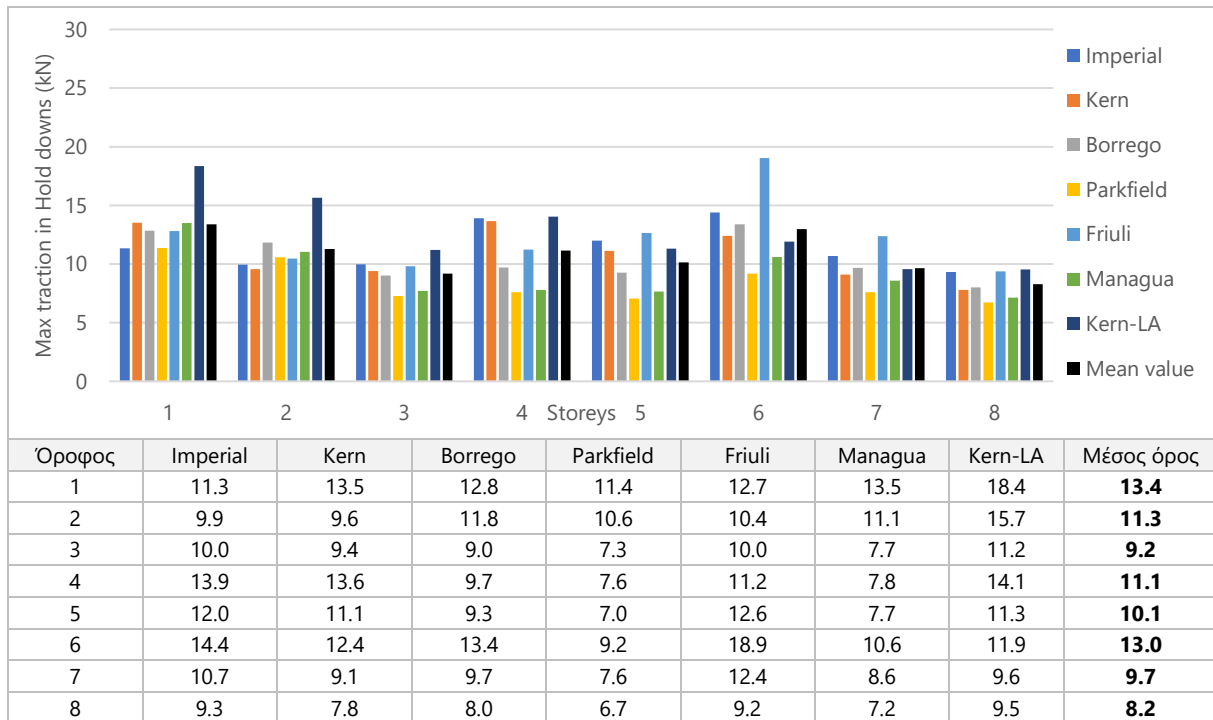
Εικόνα 4.28: Ποσοστιαία συνεισφορά κάθε είδους κίνησης στην συνολική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκταώροφου προσομοιώματος, κατά μέσο όρο για όλες τις διεγέρσεις και για όλα τα διαφράγματα

Η προέλευση αυτή διερευνήθηκε και τα αποτελέσματα, φαίνονται κατά μέσο όρο, στα διαγράμματα της Εικόνας 4.26. Παρατηρείται ότι, η μετατόπιση λόγω ολίσθησης του ορόφου εξ' αιτίας των διατμητικών παραμορφώσεων στους μεταλλικούς συνδέσμους είναι πολύ μικρότερη στην περίπτωση κατά την οποία λαμβάνεται υπόψη η τριβή. Αντιθέτως, η μετατόπιση λόγω λικνιστικών φαινομένων (τύπου rocking) αυξάνεται αισθητά με την προσομοίωση της τριβής και πλησιάζει τις τιμές που συναντώνται στα πειραματικά αποτελέσματα. Παρατηρείται επίσης πως η ολίσθηση αυξάνεται στους κοχλίες (68% της συνολικής), καθώς στις διεπιφάνειες αυτές δεν συνυπολογίστηκε η τριβή. Η επιρροή της τριβής στις διεπιφάνειες τοίχου οροφής εξετάζεται παρακάτω (§4.5).

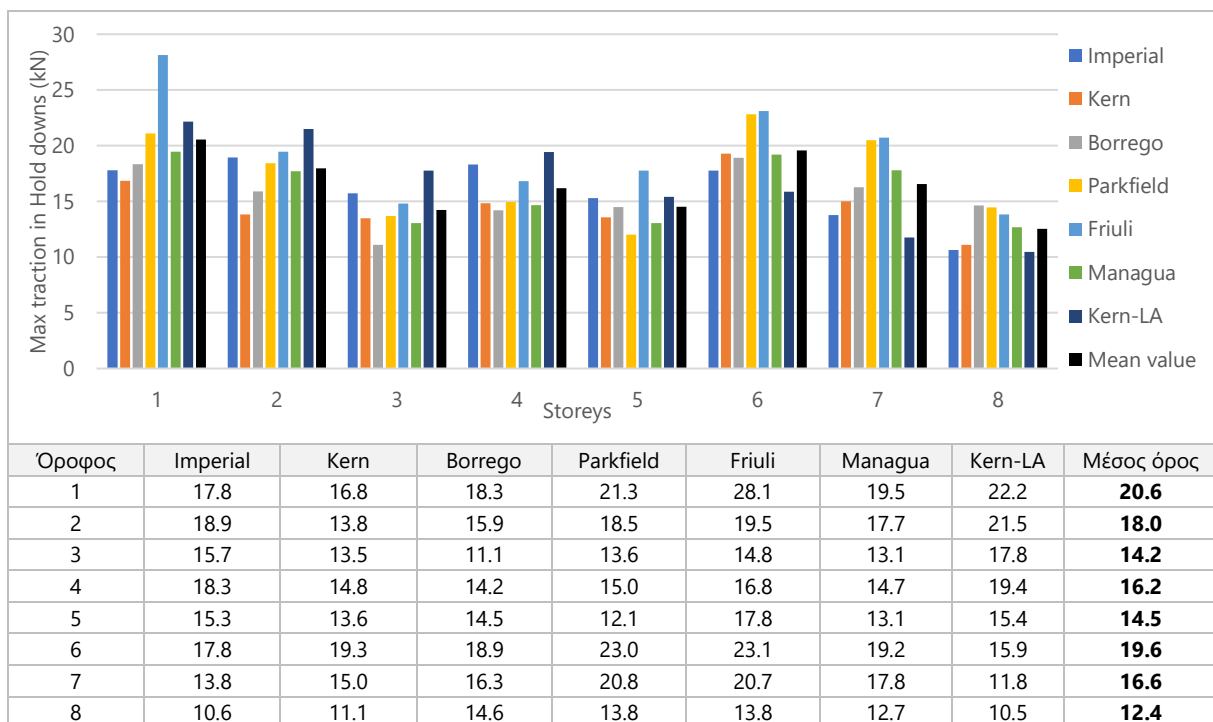
Η παράλληλη αύξηση του rocking και η μείωση της ολίσθησης, που προκαλεί η τριβή, γίνεται φανερό και στα μέγιστα εντατικά μεγέθη των συνδέσμων, που παρουσιάζονται στα επόμενα υποκεφάλαια (§4.3.5, §4.3.6).

4.3.5. Εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs

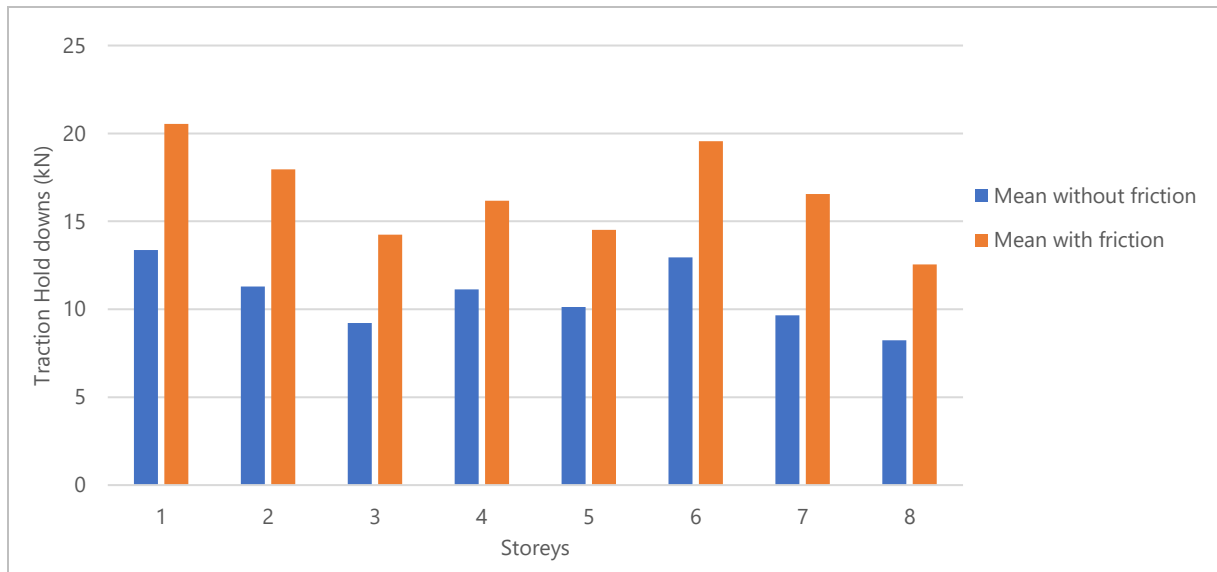
Τα μέγιστα εντατικά μεγέθη που θα παρουσιαστούν είναι οι εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs (εικόνες 4.29-4.31), και οι διατμητικές δυνάμεις στα angle brackets (εικόνες 4.32-4.34). Οι δυνάμεις αυτές παρουσιάζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, όσον αναφορά τη σύγκριση των προσομοιώσεων, αλλά και τη διαστασιολόγηση του φορέα. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν ισχύουν και για τη δευτερεύουσα διεύθυνση κάθε συνδέσμου (διάτμηση στα hold-downs και εφελκυσμός στα angle brackets). Όλα τα εντατικά μεγέθη βρέθηκαν μέσω κατάλληλων εντολών στον κώδικα των user elements.



Εικόνα 4.29: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στα hold-downs ανά διάφραγμα του οκταώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση



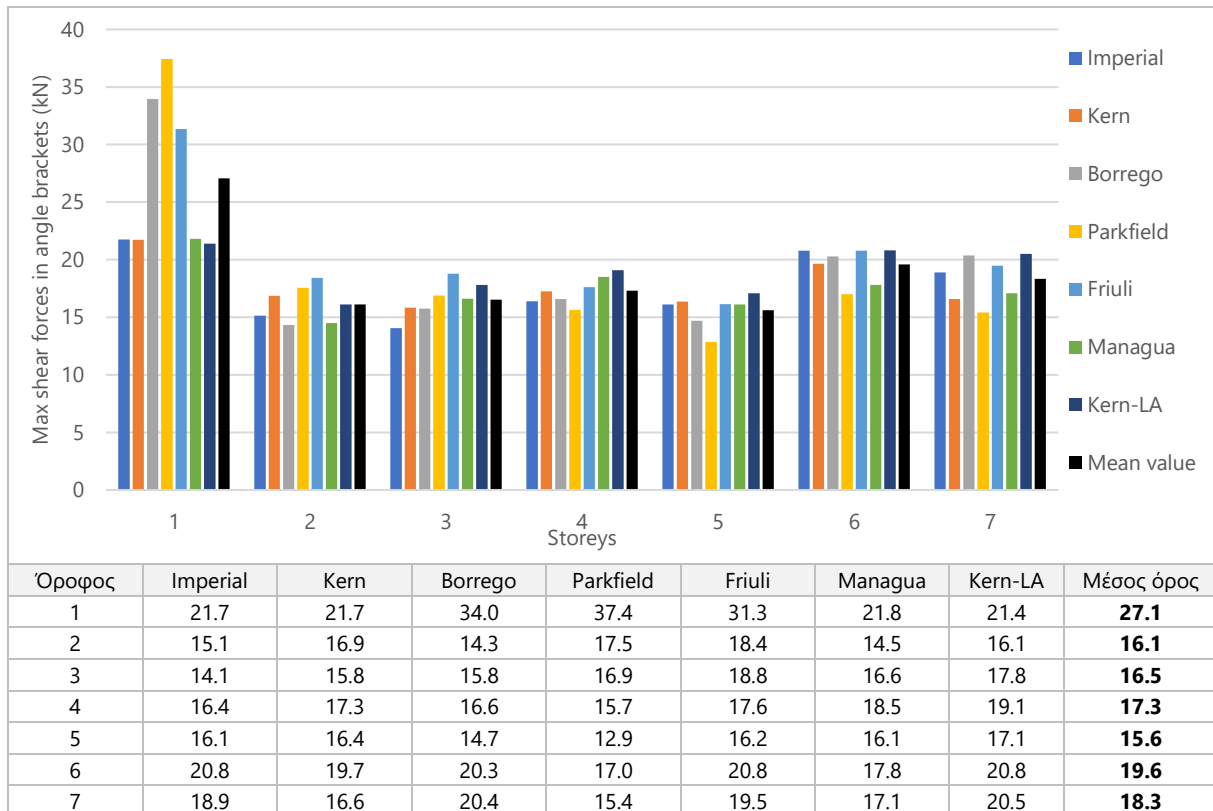
Εικόνα 4.30: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στα hold-downs ανά διάφραγμα του οκταώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση



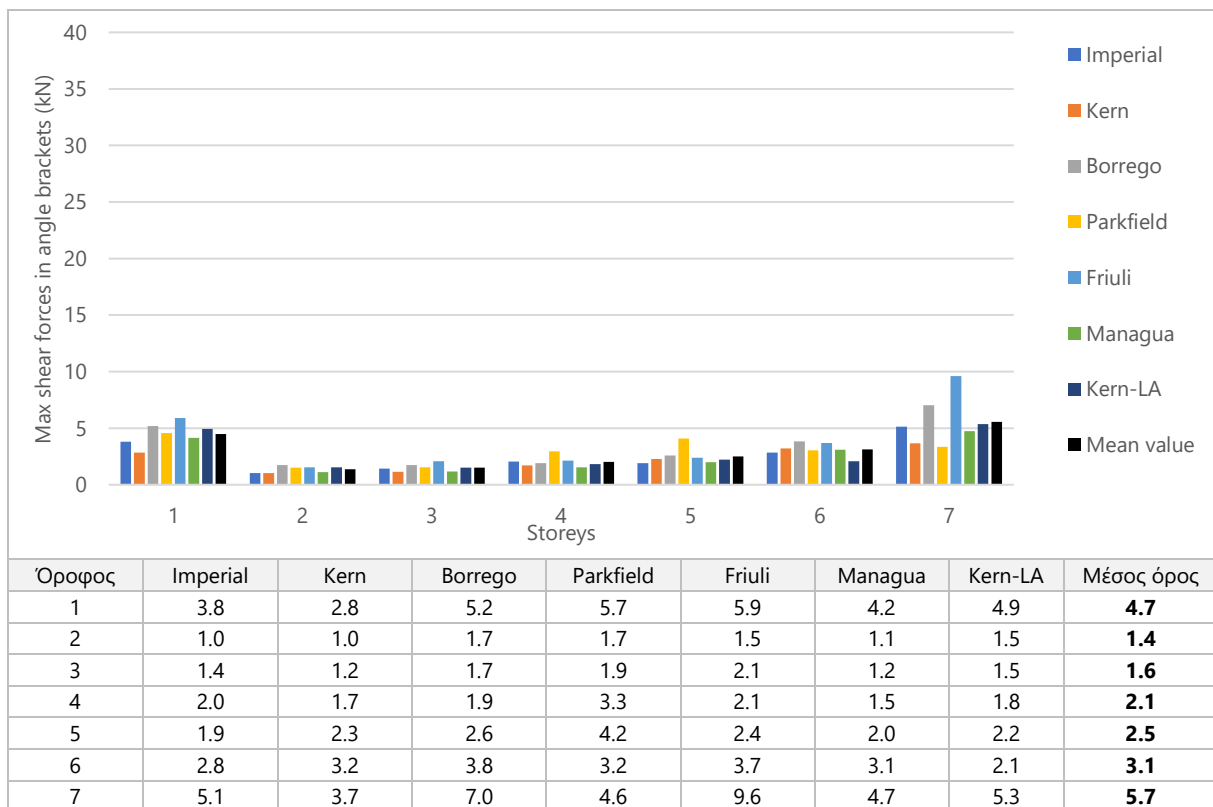
Εικόνα 4.31: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στα hold-downs ανά διάφραγμα του οκταώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, κατά μέσον όρο για όλες τις διεγέρσεις

Παρατηρούμε μια αισθητή αύξηση των εφελκυστικών δυνάμεων με την προσομοίωση της τριβής (Εικόνα 4.31). Το προσομοίωμα γίνεται πιο δύσκαμπτο, ολισθαίνει λιγότερο και κατά συνέπεια η λικνιστική του απόκριση είναι εντονότερη.

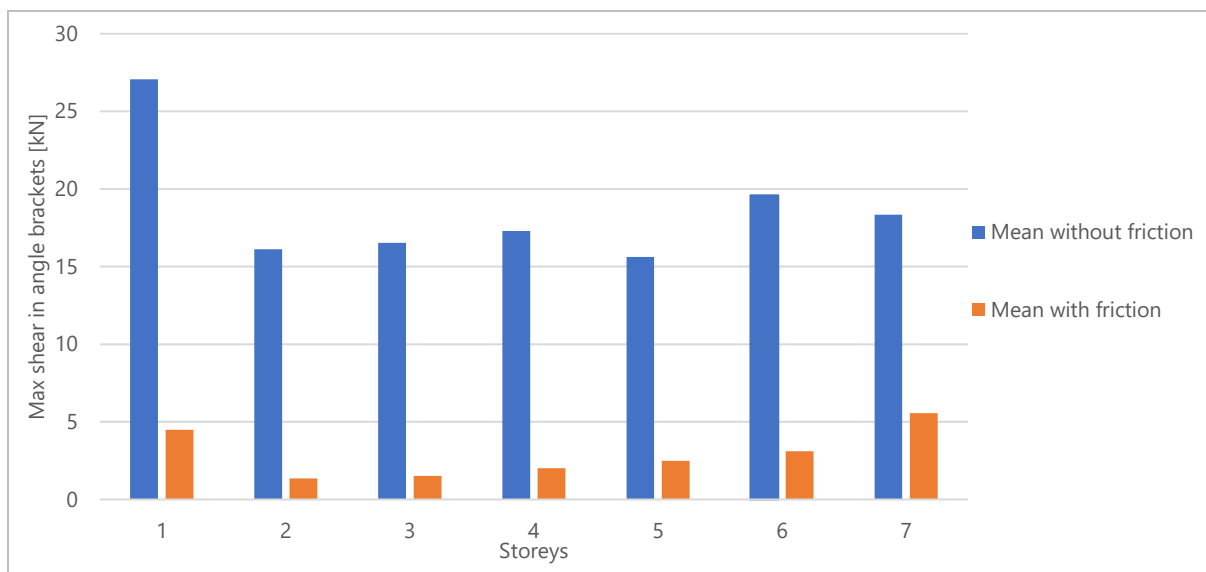
4.3.6. Διατμητικές δυνάμεις στα angle brackets



Εικόνα 4.32: Μέγιστη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στα angle brackets ανά διάφραγμα του οκταώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση

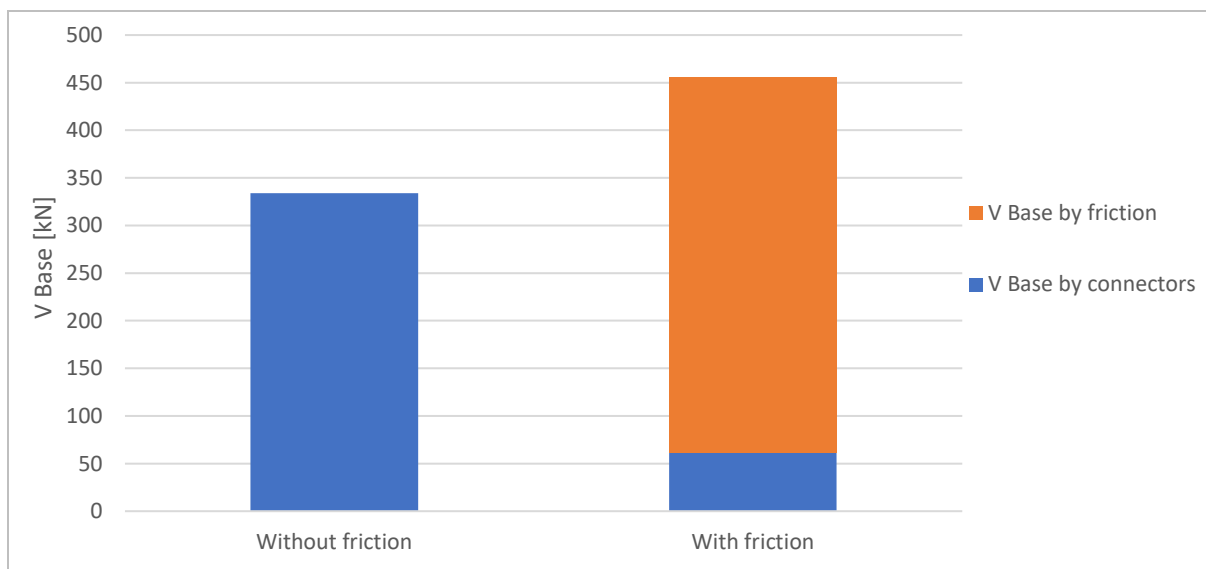


Εικόνα 4.33: Μέγιστη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στα angle brackets ανά διάφραγμα του οκταώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση



Εικόνα 4.34: Μέγιστη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στα angle brackets ανά διάφραγμα του οκταώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, κατά μέσον όρο για όλες τις διεγέρσεις

Παρατηρούμε μια αισθητή μείωση των διατμητικών δυνάμεων με την προσομοίωση της τριβής που παραλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της διάτμησης (Εικόνα 4.34). Το ιστόγραμμα της Εικόνας 4.35 φανερώνει πως ειδικά στην περίπτωση του οκταώροφου που μελετάται, παρόλο που η τέμνουσα βάσης αυξάνεται με την προσομοίωση της τριβής, πολύ μικρό ποσοστό της διανέμεται τελικώς στους μεταλλικούς συνδέσμους των πάνελ (angle brackets και hold-downs) οι οποίοι τελικώς «ανακουφίζονται» στη διατμητική διεύθυνση.



Εικόνα 4.35: Συνεισφορά των δυνάμεων τριβής και των διατμητικών δυνάμεων που αναπτύσσονται σε hold-downs και angle brackets στη συνολική κατά μέσο όρο τιμή της τέμνουσας βάσης

4.3.7. Βλάβες στο φορέα

Σε καμία διέγερση δεν αστόχησε πλήρως κάποιος μεταλλικός σύνδεσμος. Κατά τη διάρκεια των διεγέρσεων όμως υπήρξαν διαρροές και σε κάποιες περιπτώσεις οι σύνδεσμοι προσέφεραν τη μέγιστη δύναμη που τους αντιστοιχεί στο σύστημα και ξεκίνησαν να αστοχούν (ξεπέρασαν το D_{ult} και βρέσκονταν στον post-failure κλάδο). Όλες οι βλάβες έγιναν στους βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με τη διάτμηση. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι αριθμοί των συνδέσμων που ξεπέρασαν την μετατόπιση διαρροής ή και τη σχετική μετατόπιση, που ορίζει την μέγιστη δύναμη (D_{ult}) στις προσομοιώσεις χωρίς τριβή. Ως μετατόπιση διαρροής τέθηκε η αντίστοιχη μετατόπιση του διγραμμικού μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε από τον Hummel [2017] σε αναλύσεις push-over.

Πίνακας 4.9: Βλάβες που προέκυψαν στα angle brackets σε διάτμηση στο οκταώροφο προσομοίωμα (χωρίς τριβή)

Όροφος	Imperial		Kern		Borrego		Parkfield		Friuli		Managua		Kern-LA	
	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}
1	4	-	6	-	-	-	6	-	6	6	6	-	4	-
2	4	-	6	-	-	-	6	-	6	-	-	-	4	-
3	-	-	2	-	4	-	4	-	6	-	6	-	6	-
4	4	-	6	-	6	-	4	-	6	-	6	-	6	-
5	4	-	4	-	-	-	-	-	4	-	4	-	6	-
6	6	4	6	-	6	-	4	-	6	6	6	-	6	2
7	6	-	4	-	6	-	2	-	6	-	4	-	6	-

Πίνακας 4.10: Βλάβες που προέκυψαν στα hold-downs σε διάτμηση στο οκταώροφο προσομοίωμα (χωρίς τριβή)

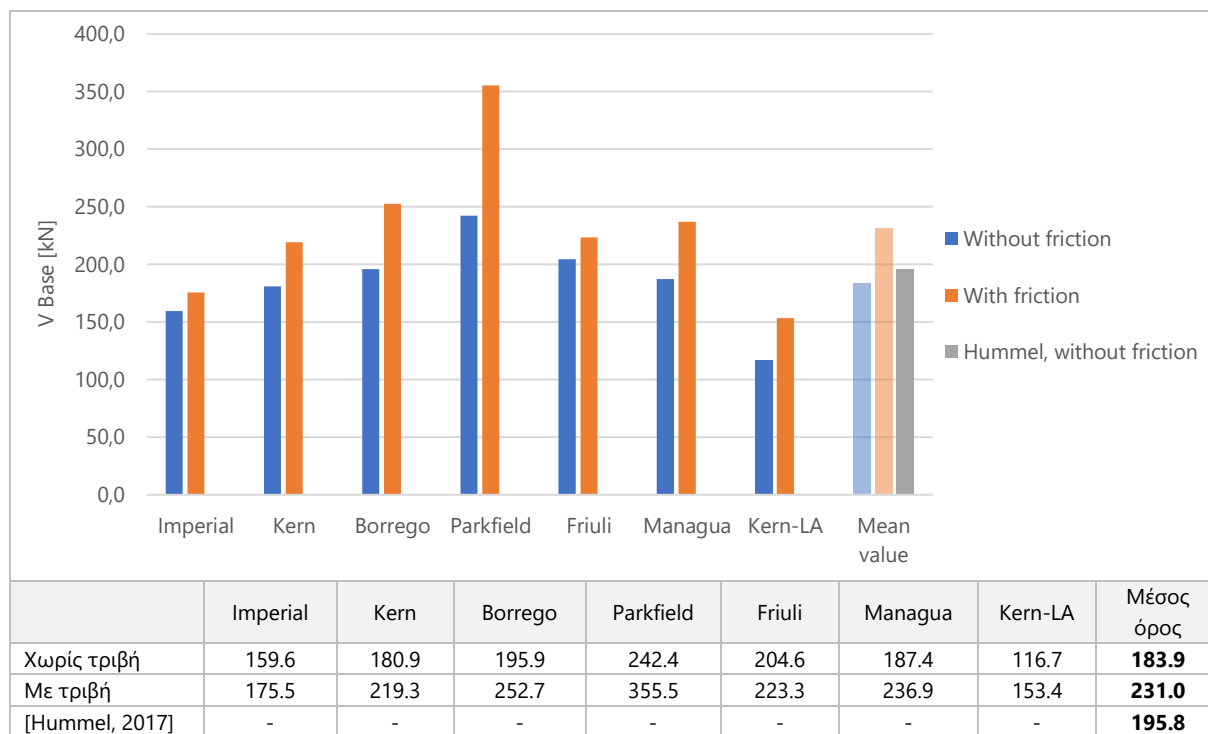
Όροφος	Imperial		Kern		Borrego		Parkfield		Friuli		Managua		Kern-LA	
	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}
1	-	-	-	-	-	-	16	-	24	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-	-	-	16	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	8	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	12	-	8	-	12	-	-	-	12	-	4	-	12	-
7	8	-	-	-	12	-	-	-	12	-	-	-	12	-
8	12	-	12	-	12	-	8	-	12	-	12	-	12	-

Οι Πίνακες 4.9 και 4.10 επεξηγούν και τη κατανομή των drifts καθ' ύψος για κάθε διέγερση όπως για παράδειγμα τα αυξημένα drifts στον πρώτο όροφο για τη διέγερση Friuli. Οι βλάβες στις προσομοιώσεις με τριβή ήταν πολύ λιγότερες. Συγκεκριμένα διέρρευσαν 8 hold-downs στον όγδοο όροφο κατά τη διέγερση Friuli και 4 κατά τη διέγερση Managua.

4.4. Αποτελέσματα των αναλύσεων – προσομοίωμα 2 ορόφων

4.4.1. Καθολικά χαρακτηριστικά

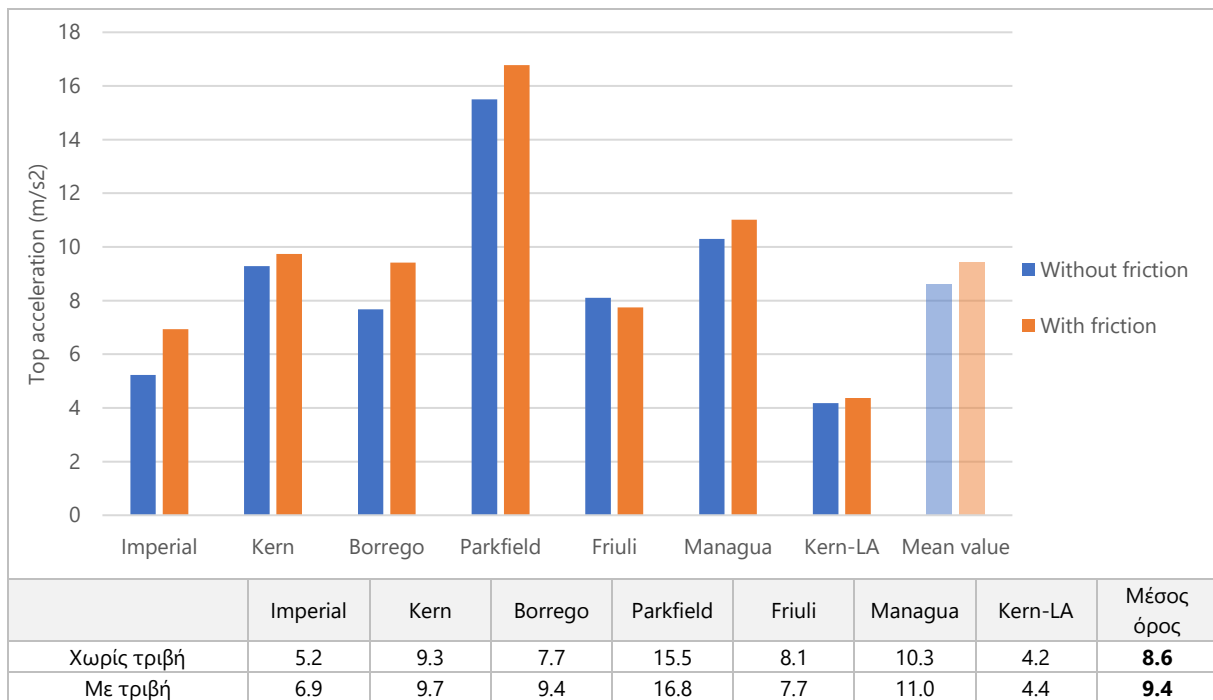
a) Τέμνουσα βάση



Εικόνα 4.36: Η τέμνουσα δύναμη βάσης, του διώροφου προσομοιώματος, για κάθε διέγερση, με και χωρίς τριβή

Παρατηρούμε πως και στο διώροφο προσομοίωμα ότι ο μέσος όρος των τεμνουσών βάσης που προκύπτει από τις επτά διεγέρσεις για προσομοίωση χωρίς τριβή είναι πολύ κοντά στην τιμή που δίνεται στη διατριβή του Hummel [2017]. Παρατηρούμε μια απότομη αύξηση στη τέμνουσα βάση κατά το σεισμό Parkfield για προσομοίωση με τριβή.

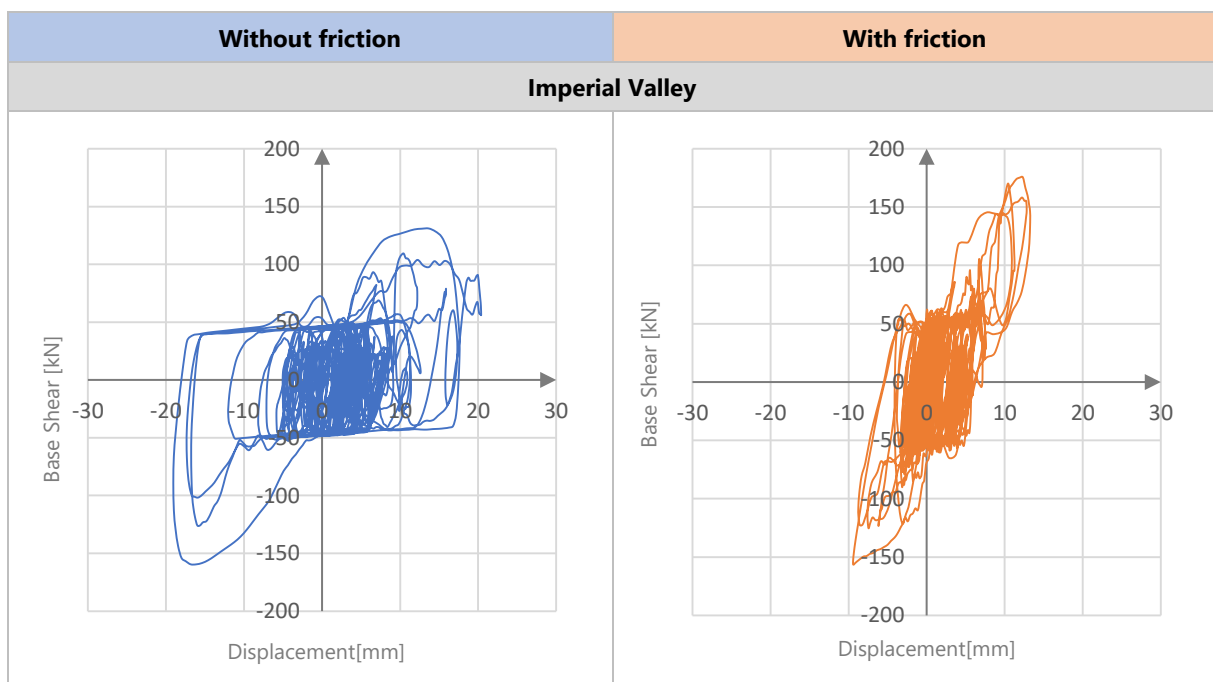
b) Επιτάχυνση της κορυφής



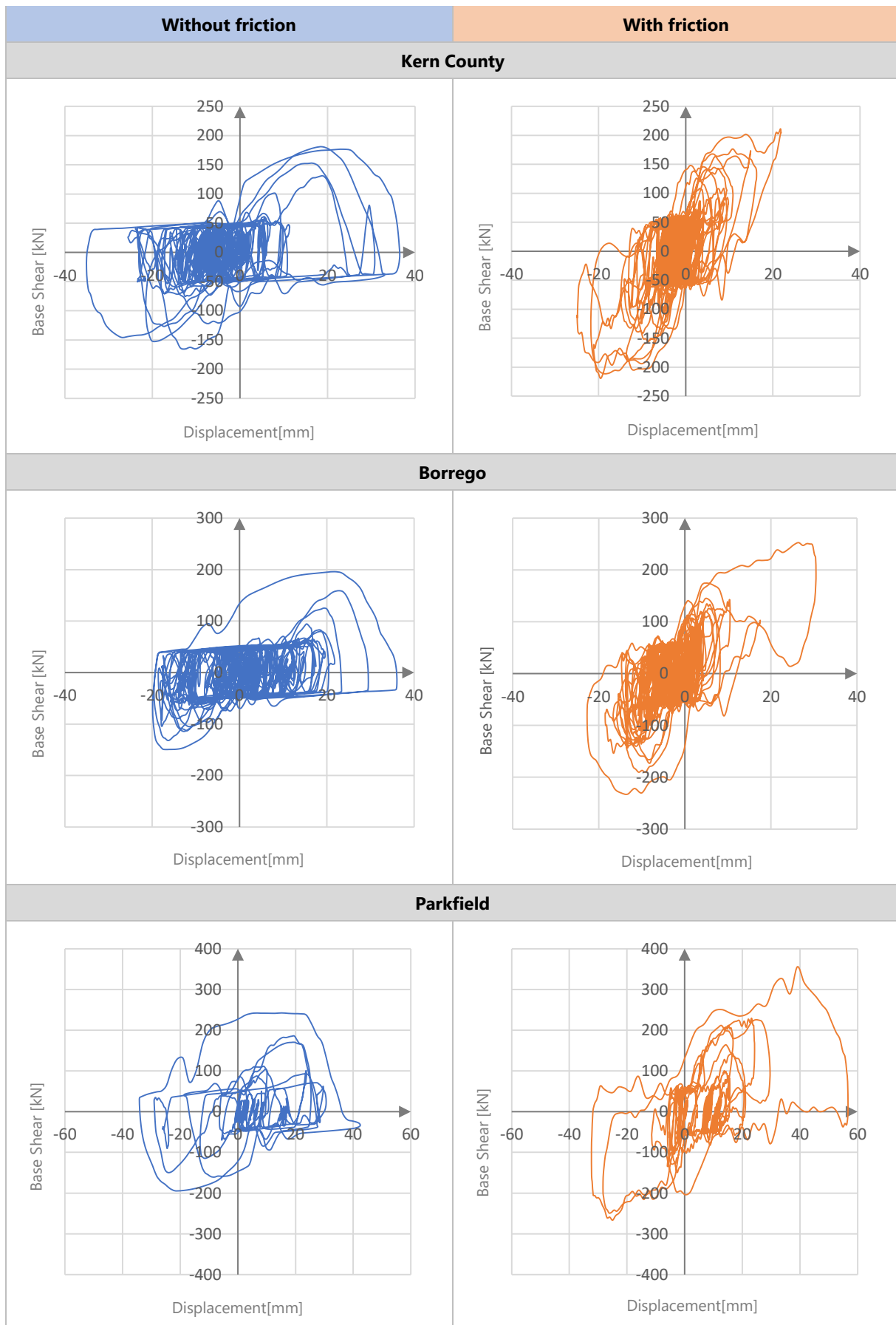
Εικόνα 4.37: Η μέγιστη σχετική επιτάχυνση κορυφής, στο διώροφο προσομοίωμα, για κάθε διέγερση, με και χωρίς τριβή

4.4.2. Διαγράμματα F-δ

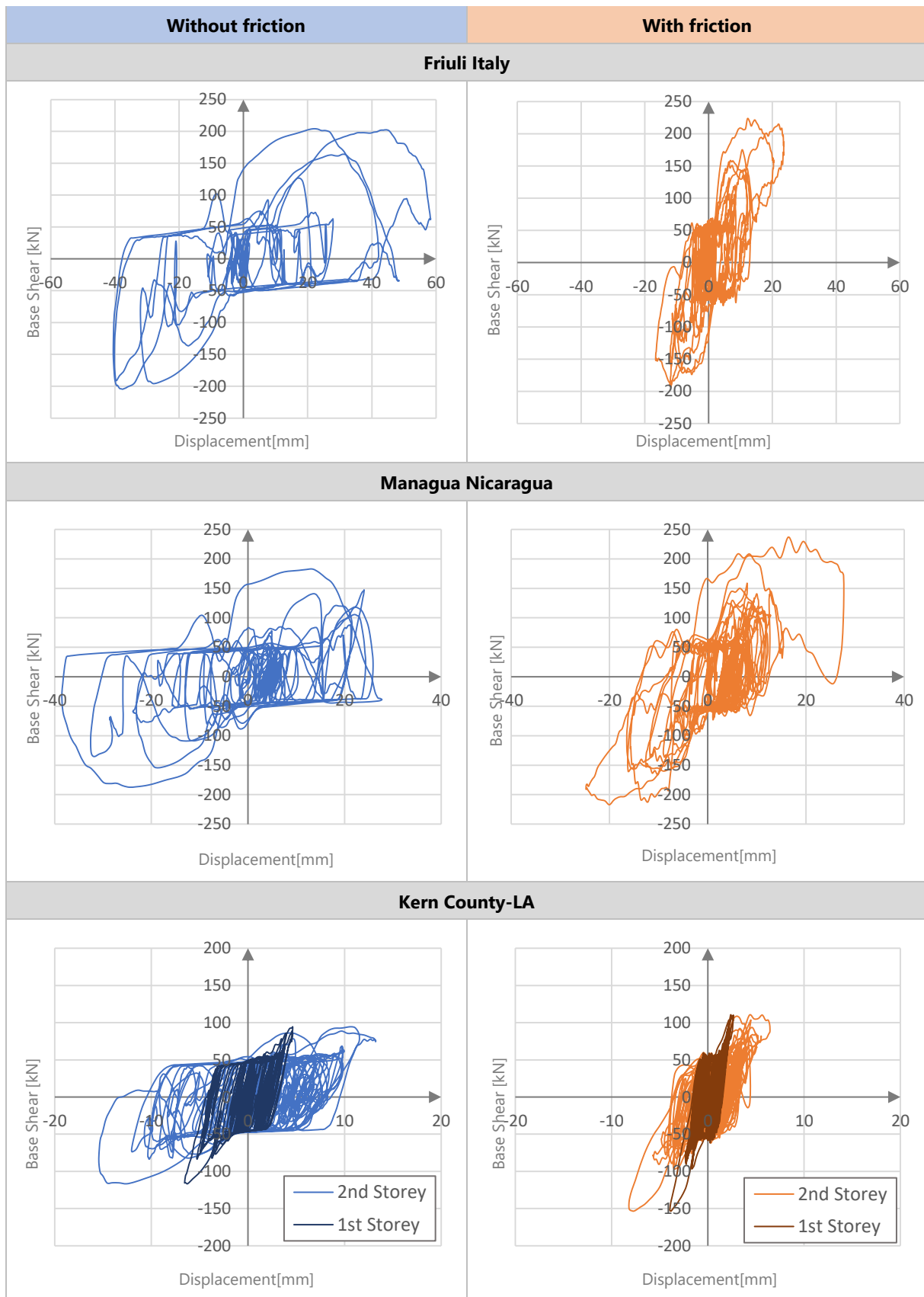
Στις Εικόνες 4.38 έως 4.40 παρουσιάζονται τα διαγράμματα F-δ του διώροφου προσομοιώματος. Τα διαγράμματα προκύπτουν από την τέμνουσα βάσης και τη συνολική μετατόπιση κορυφής. Για τη δημιουργία τους χρησιμοποιήθηκαν όλα τα στιγμιότυπα (frames). Με μπλε χρώμα φαίνονται οι καμπύλες που προέκυψαν χωρίς τριβή, ενώ με πορτοκαλί, με τριβή.



Εικόνα 4.38: Διαγράμματα F-δ που προκύπτουν από τη τέμνουσα βάσης και τη σχετική μετατόπιση του σημείου κορυφής του διώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, για τη διέγερση Imperial Valley



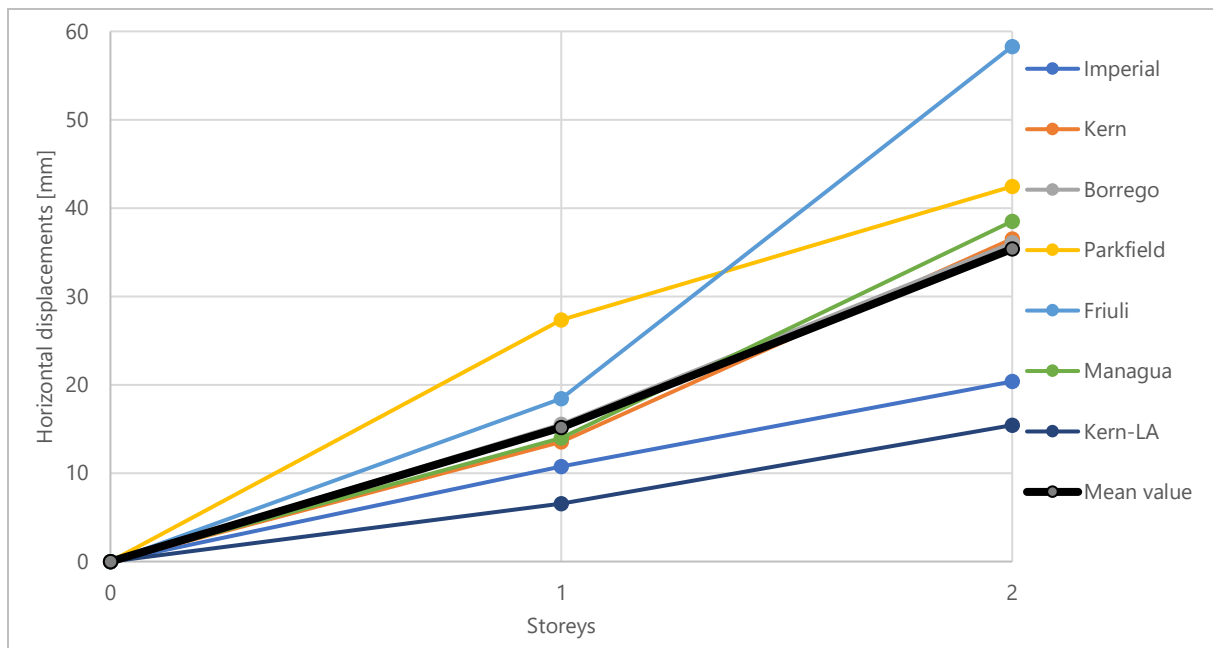
Εικόνα 4.39: Διαγράμματα F-δ που προκύπτουν από τη τέμνουσα βάση και τη σχετική μετατόπιση του σημείου κορυφής του διώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, για τις διεγέρσεις Kern County, και Borrego Parkfield



Εικόνα 4.40: Διαγράμματα F-δ που προκύπτουν από τη τέμνουσα βάσης και τη σχετική μετατόπιση του σημείου κορυφής του δώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, για τις διεγέρσεις Friuli, Managua και Kern County-LA

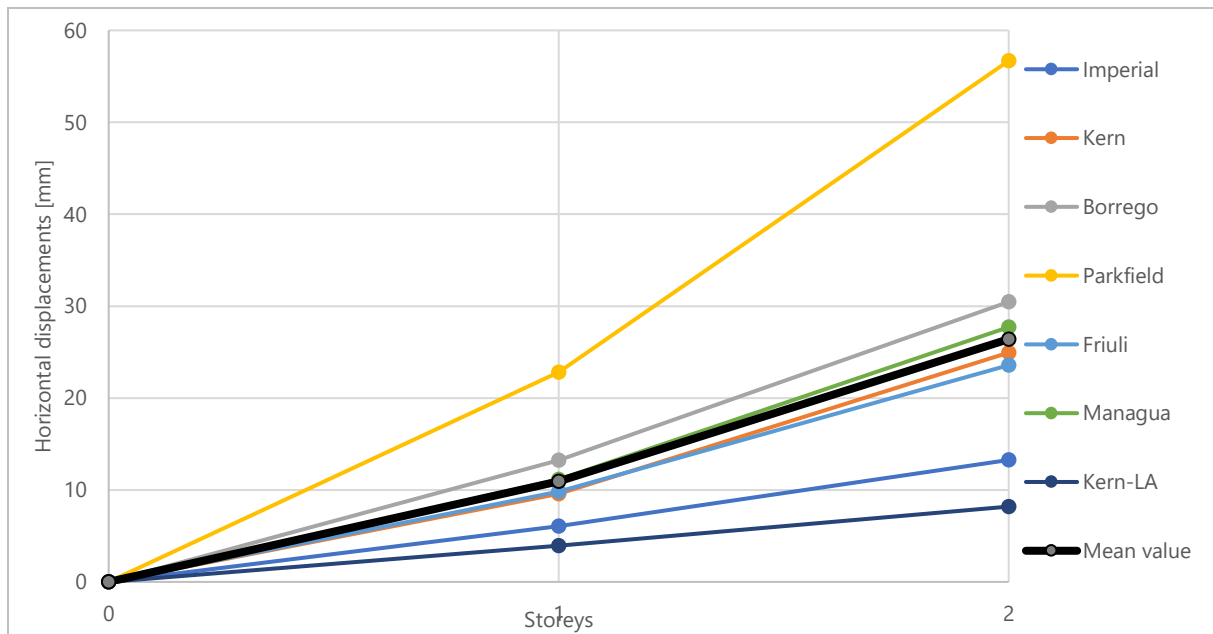
Στις καμπύλες της διέγερσης Kern County-LA φαίνεται ενδεικτικά και η αντίστοιχη κίνηση του πρώτου διαφράγματος, ως προς την τέμνουσα βάσης (με σκούρο χρώμα).

4.4.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις



Όροφος	Imperial	Kern	Borrego	Parkfield	Friuli	Managua	Kern-LA	Μέσος όρος
1	10.8	13.5	15.5	27.4	18.4	14.0	6.6	15.2
2	20.4	36.5	36.1	42.5	58.3	38.5	15.4	35.4

Εικόνα 4.41: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του δώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση

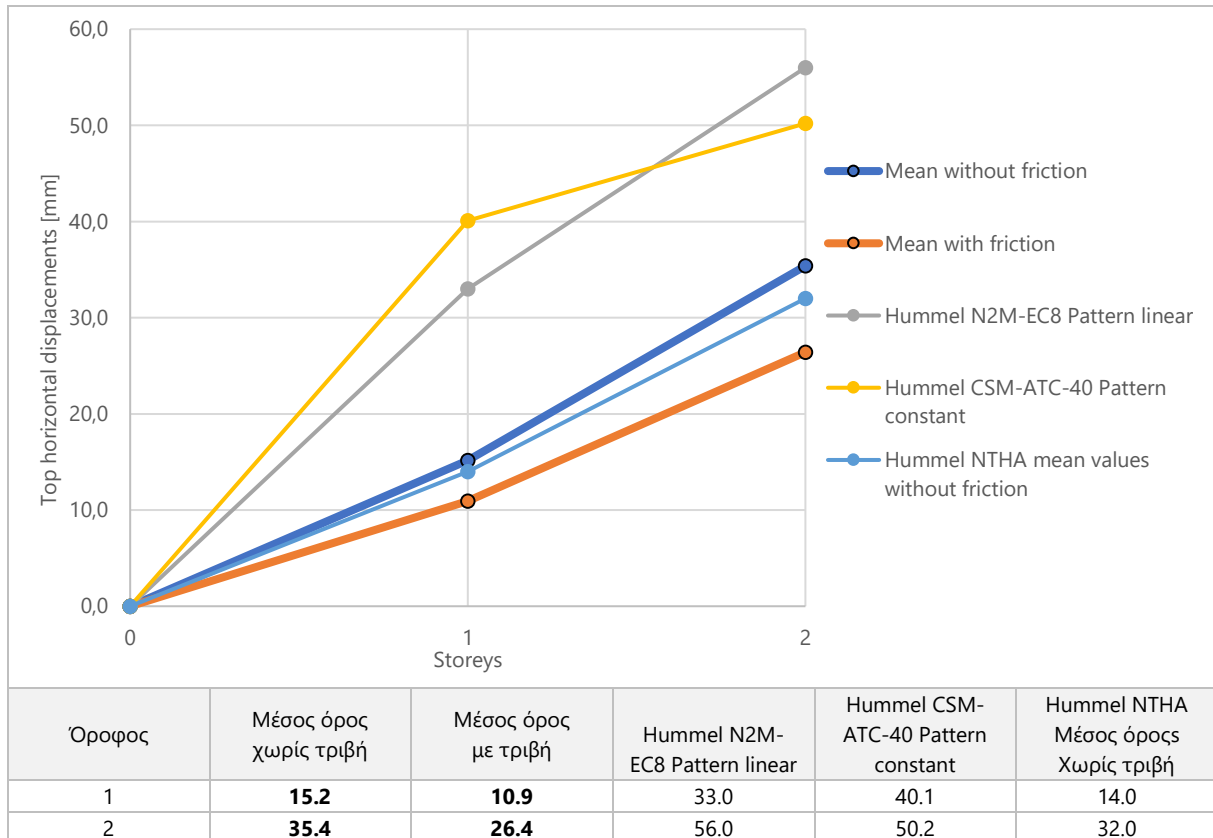


Όροφος	Imperial	Kern	Borrego	Parkfield	Friuli	Managua	Kern-LA	Μέσος όρος
1	6.1	9.6	13.2	22.8	9.8	11.1	4.0	10.9
2	13.3	24.9	30.5	56.7	23.6	27.7	8.2	26.4

Εικόνα 4.42: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του δώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση

Στους πίνακες και τα διαγράμματα των Εικόνων 4.41 και 4.42, φαίνονται οι τιμές της μέγιστης οριζόντιας μετατόπισης για κάθε σεισμική διέγερση και για τις δύο προσομοιώσεις, με και χωρίς τριβή. Παρατηρούμε εδώ πως σε αντίθεση με το οκταώροφο προσομοίωμα, η προσομοίωση της τριβής μειώνει τις μετατοπίσεις. Αυτό είναι λογικό, επειδή εδώ το rocking δεν είναι τόσο σημαντικό, καθώς κυριαρχεί η ολίσθηση.

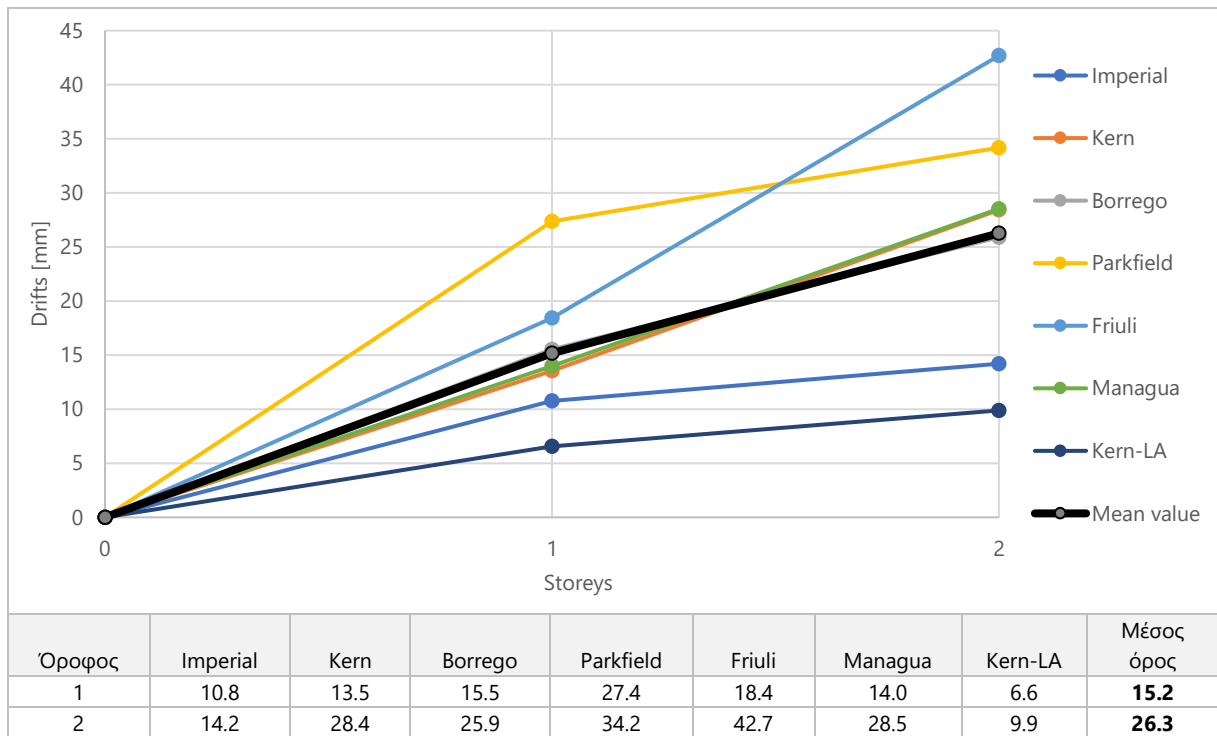
Στην Εικόνα 4.43, σε αντιστοιχία με το οκταώροφο προσομοίωμα φαίνεται η σύγκριση του μέσου όρου των τιμών της μετατόπισης, με και χωρίς τριβή, με τις τιμές που δίνονται από τον Hummel [2017].



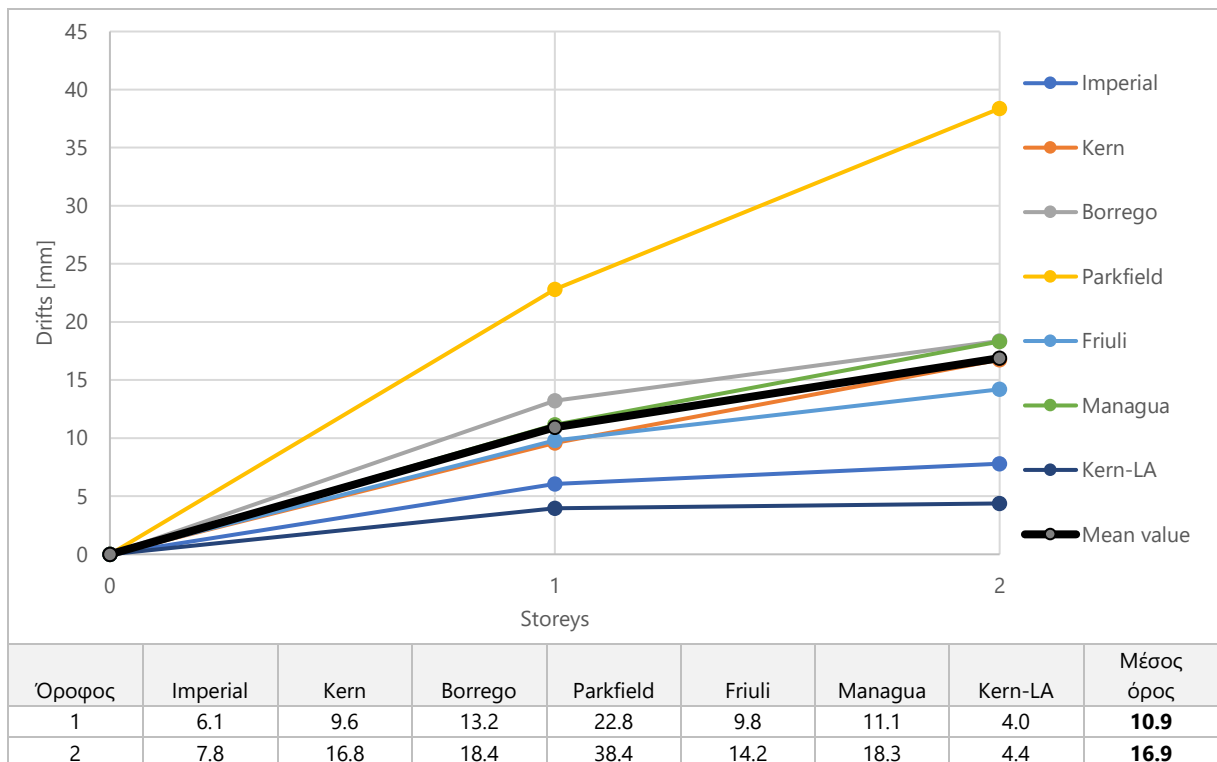
Εικόνα 4.43: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του δώροφου προσομοιώματος, κατά μέσο όρο για όλες τις διεγέρσεις – σύγκριση με τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Hummel [2017]

Οι τιμές που προέκυψαν από τις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, όπως και στο οκταώροφο είναι συγκρίσιμες και της ίδιας τάξης μεγέθους με αυτές που παρουσιάζονται στην διατριβή του Hummel [2017]. Στην περίπτωση του δώροφου προσομοιώματος παρατηρείται μάλιστα ακόμη μεγαλύτερη σύγκλιση των τιμών.

4.4.4. Οριζόντιες μετατοπίσεις ορόφων - Drifts

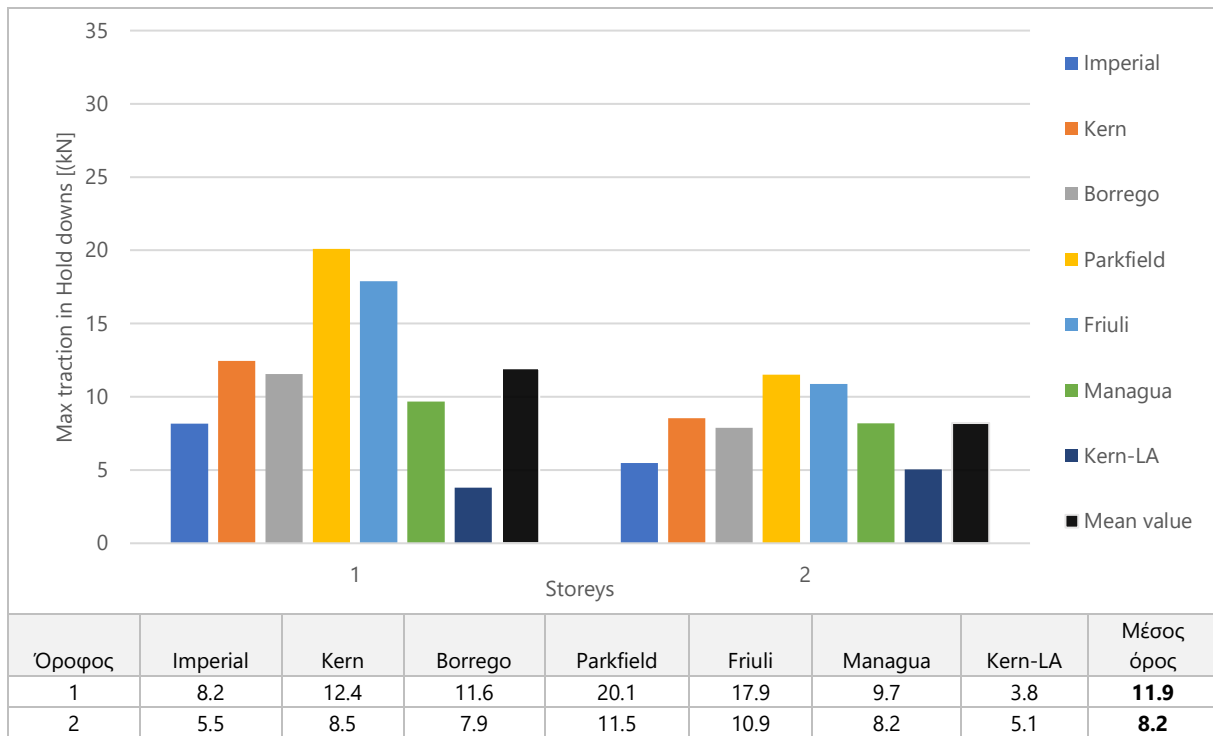


Εικόνα 4.44: Μέγιστες τιμές των drifts του δώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διεύθυνση

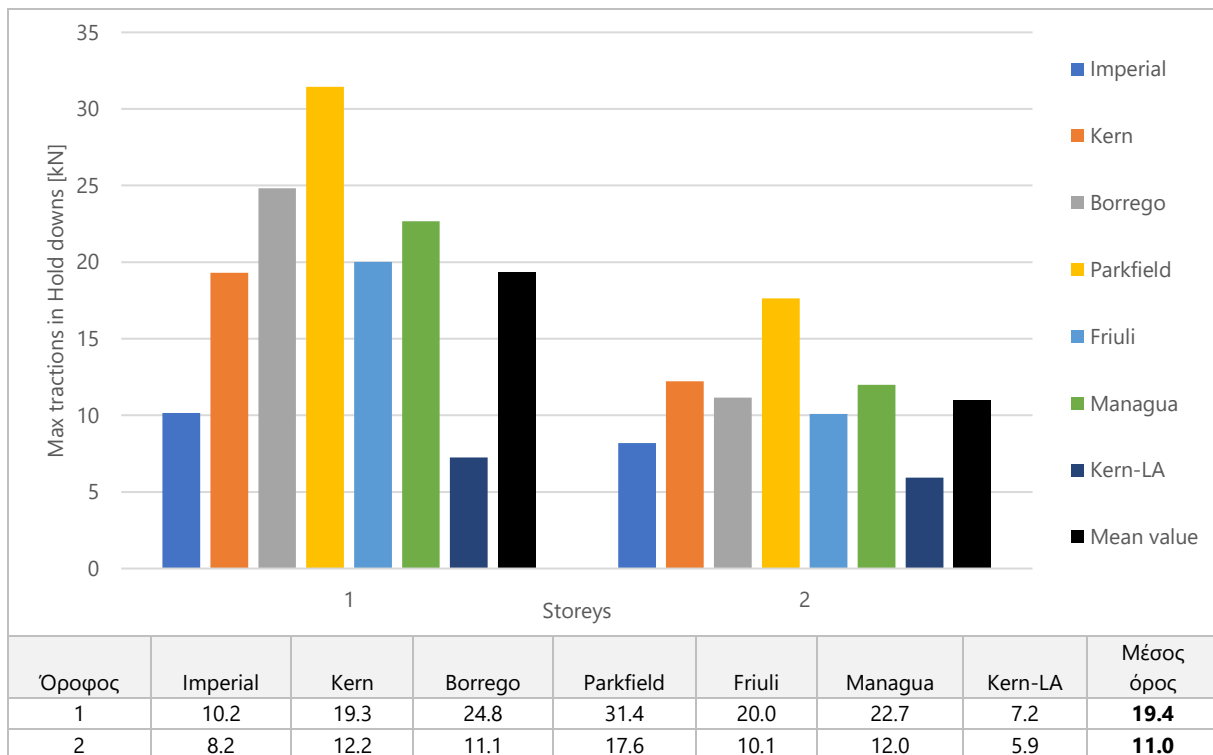


Εικόνα 4.45: Μέγιστες τιμές των drifts του δώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διεύθυνση

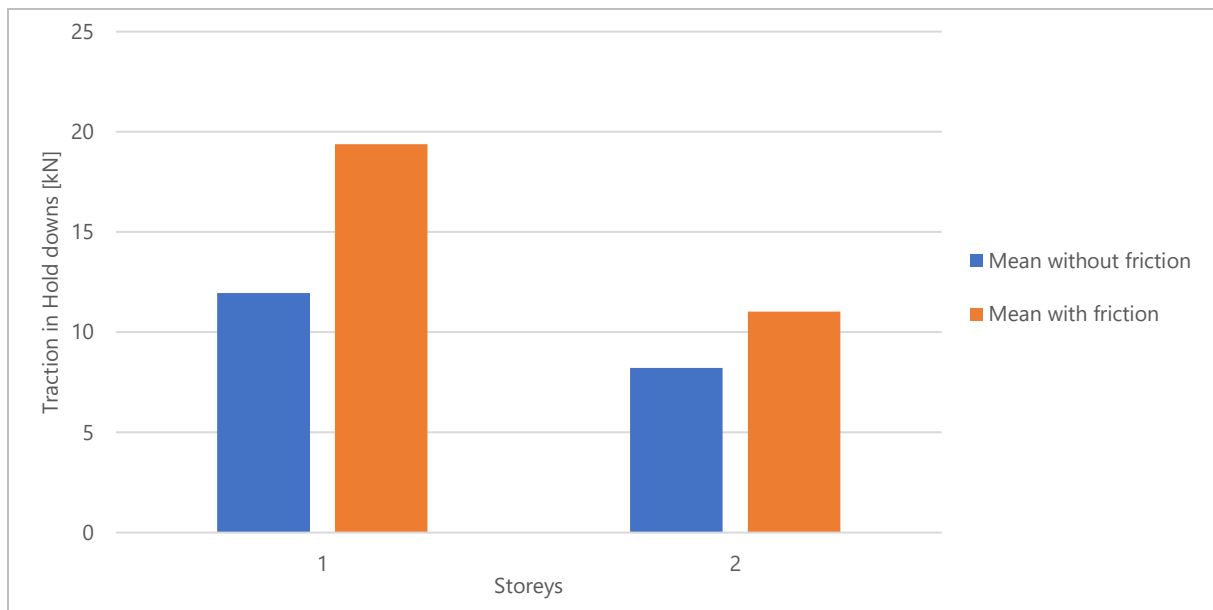
4.4.5. Εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs



Εικόνα 4.46: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στα hold-downs ανά διάφραγμα του διώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση



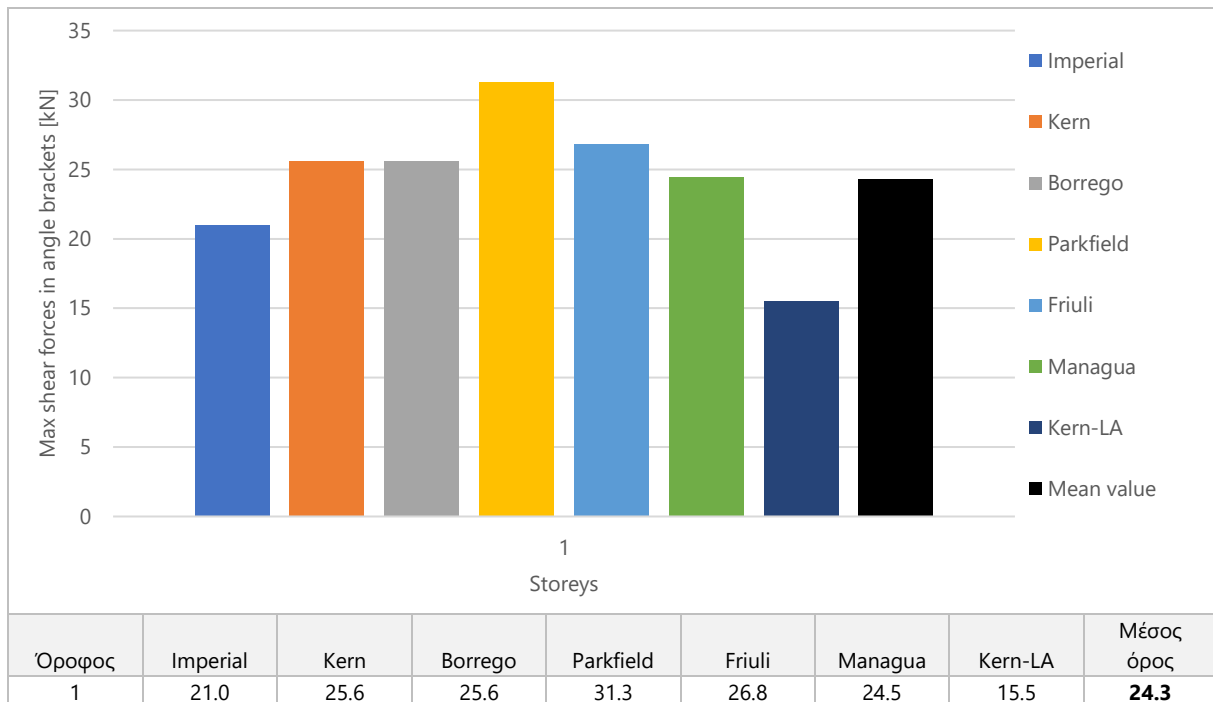
Εικόνα 4.47: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στα hold-downs ανά διάφραγμα του διώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση



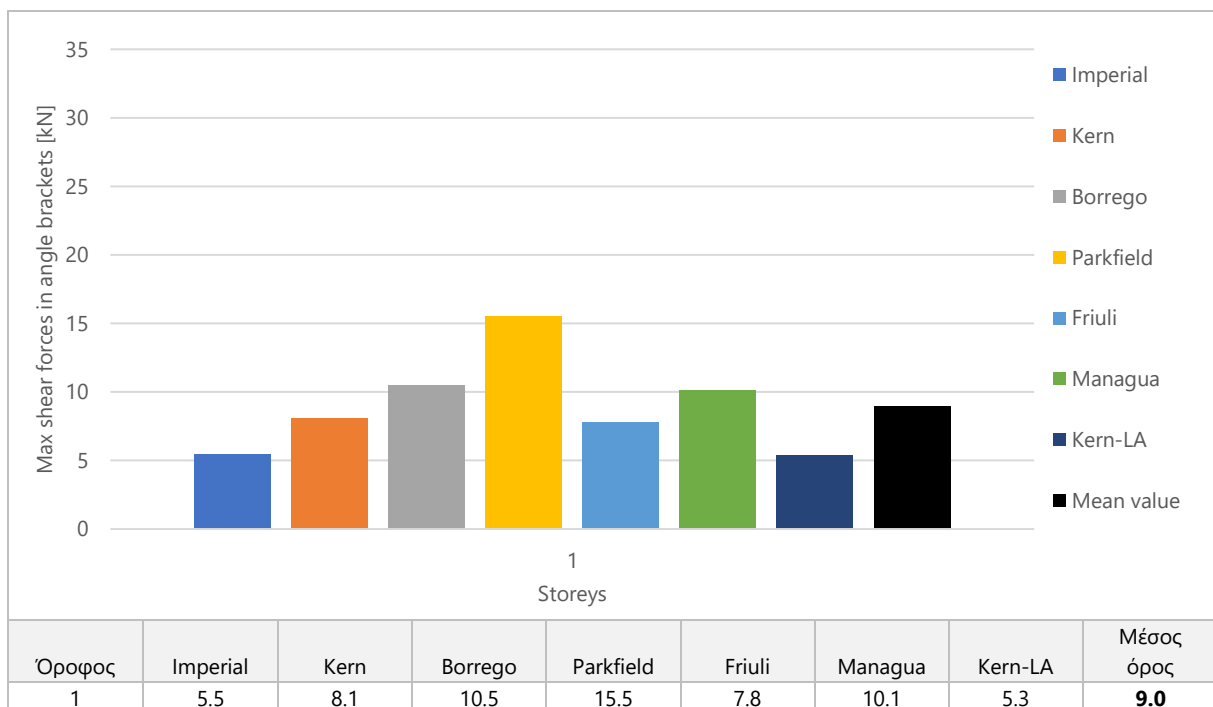
Εικόνα 4.48: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που αναπτύσσεται στα hold-downs ανά διάφραγμα του δώροφου προσομοιώματος, με και χωρίς τριβή, κατά μέσον όρο για όλες τις διεγέρσεις

Παρατηρούμε και στο δώροφο προσομοίωμα μια αύξηση των εφελκυστικών δυνάμεων με την προσομοίωση της τριβής. Η αύξηση είναι ποσοστιαία λίγο μικρότερη πιθανόν εξαιτίας της διαφοράς ύψους των δύο προσομοιωμάτων.

4.4.6. Διατμητικές δυνάμεις στα angle brackets



Εικόνα 4.49: Μέγιστη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στα angle brackets ανά διάφραγμα του διώροφου προσομοιώματος, χωρίς τριβή, για κάθε διέγερση



Εικόνα 4.50: Μέγιστη διατμητική δύναμη που αναπτύσσεται στα angle brackets ανά διάφραγμα του διώροφου προσομοιώματος, με τριβή, για κάθε διέγερση

Όπως και στα οκτάωροφα προσομοιώματα έτσι κι εδώ, παρατηρούμε πολύ μεγάλη μείωση των διατμητικών δυνάμεων προσομοιώνοντας την τριβή.

4.4.7. Βλάβες στο φορέα

Όπως και στο οκταώροφο προσομοίωμα έτσι και στο διώροφο, σε καμία διέγερση δεν αστόχησε πλήρως κάποιος μεταλλικός σύνδεσμος. Όλες οι βλάβες έγιναν, όπως και στο οκταώροφο, στους βαθμούς ελευθερίας που σχετίζονται με τη διάτμηση. Οι βλάβες περιορίστηκαν στο διώροφο μόνο στα hold-downs. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά οι βλάβες με τον ίδιο τρόπο που παρουσιάστηκαν και στο οκταώροφο.

Πίνακας 4.11: Βλάβες που προέκυψαν στα hold-downs σε διάτμηση στο διώροφο προσομοίωμα (χωρίς τριβή)

Όροφος	Imperial		Kern		Borrego		Parkfield		Friuli		Managua		Kern-LA	
	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}	Διαρ.	D_{ult}
1	-	-	-	-	-	-	6	-	4	-	-	-	-	-
2	-	-	12	-	12	-	12	-	12	-	-	-	-	-

Ο Πίνακας 4.11 επεξηγεί και τις μεγάλες τιμές των drifts για τις διεγέρσεις όπως Friuli και Parkfield. Οι βλάβες στις προσομοιώσεις με τριβή ήταν πάλι λιγότερες. Συγκεκριμένα διέρρευσαν όλα τα hold-downs στον δεύτερο όροφο κατά τη διέγερση Parkfield.

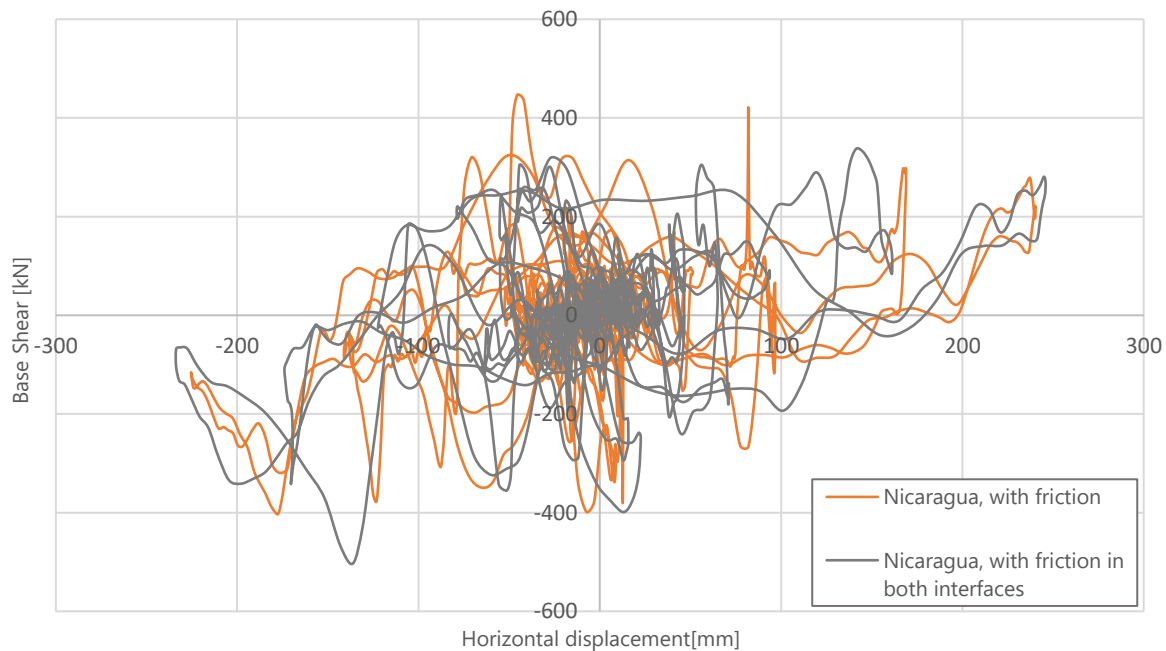
4.5. Περαιτέρω διερευνήσεις προσομοίωσης

Στο κεφάλαιο αυτό διερευνάται η επιρροή αλλαγών στις παραμέτρους ανάλυσης και παρουσιάζονται συνοπτικά οι διαφορές που παρατηρήθηκαν συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των 28 βασικών αναλύσεων με κάποιες επιπλέον. Συγκεκριμένα εξετάζεται η επιρροή τριβής στις διεπιφάνειες τοίχων-οροφής και η επιρροή της επιλογής συντελεστή απόσβεσης ζ . Πολλές από τις αναλύσεις στις τέσσερις προσομοιώσεις των προηγούμενων κεφαλαίων επαναλήφθηκαν με τις νέες αυτές παραμέτρους. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο εξ αυτών των επιπλέον αναλύσεων, καθώς και οι παρατηρήσεις που έγιναν.

4.5.1. Επιρροή τριβής στις διεπιφάνειες τοίχων-οροφής

Η επιρροή της προσομοίωσης της τριβής στις διεπιφάνειες αυτές αποδείχτηκε μικρή. Παρατηρήθηκε μια αύξηση στη τέμνουσα βάση της τάξεως του 8 με 10%, γεγονός λογικό, καθώς το κτίριο γίνεται λίγο πιο δύσκαμπτο και μια αμελητέα αύξηση των μετατοπίσεων της τάξεως του 1%. Οι εσωτερικές δυνάμεις των συνδέσμων παρέμειναν κι αυτές πρακτικώς αμετάβλητες, με τους κοχλίες να φορτίζονται ακόμη λιγότερο από ότι πριν. Η κυριότερη διαφορά βρέθηκε στις επιταχύνσεις, όπου τα διαγράμματα ήταν πολύ πιο «θορυβώδη» με αποτέλεσμα η μέγιστη επιτάχυνση σε κάποιες περιπτώσεις να διπλασιάζεται.

Στην Εικόνα 4.51 που ακολουθεί, φαίνονται οι καμπύλες F-δ για τη σεισμική διέγερση Managua στο οκταώροφο προσομοίωμα, στο οποίο έχει ληφθεί υπόψη η τριβή στις διεπιφάνειες τοίχου-δαπέδου (πορτοκαλί χρώμα) και σε όλες τις διεπιφάνειες (γκρι χρώμα).



Εικόνα 4.51: Καμπύλες F-δ για τη σεισμική διέγερση Managua, στο οκταώροφο προσομοίωμα - σύγκριση διαφορετικών προσομοιώσεων τριβής

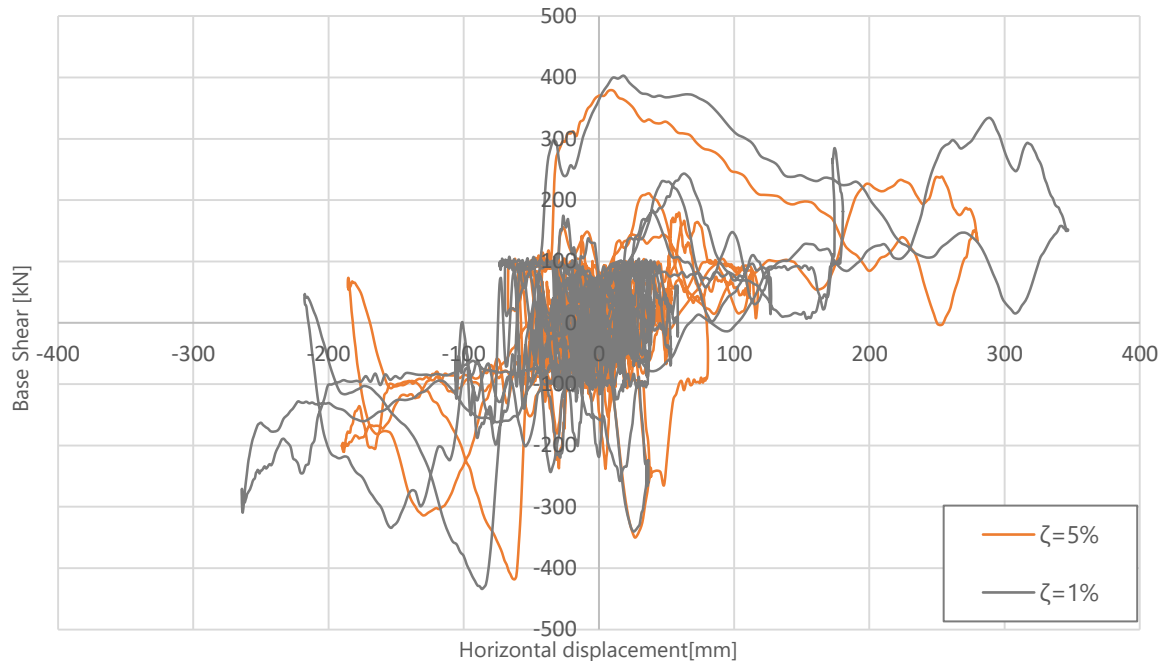
Παρατηρούμε πως οι δύο καμπύλες της Εικόνας 4.51 μοιάζουν αρκετά σχηματικά.

4.5.2. Επιρροή της επιλογής συντελεστή απόσβεσης ζ

Στην διπλωματική αυτή εργασία, τα προσομοιώματα δεν διαστασιολογήθηκαν. Συνεπώς, ο σκοπός των αποτελεσμάτων, όπως τα drifts και τα εντατικά μεγέθη, είναι περισσότερο η εξαγωγή συμπερασμάτων για το σύστημα δόμησης με πάνελ CLT, καθώς και η σύγκριση διαφορετικών προσομοιώσεων (για παράδειγμα με και χωρίς τριβή). Η επιλογή συντελεστή απόσβεσης εν προκειμένω δεν έχει την ίδια βαρύτητα, αρκεί ο ίδιος συντελεστής να χρησιμοποιείται σε όλες τις αναλύσεις.

Παρόλα αυτά, καθώς ο συντελεστής συναντάται στη βιβλιογραφία με διαφορετικές τιμές (1, 3 ή 5%), κάποιες από τις αναλύσεις επαναλήφθηκαν με συντελεστή απόσβεσης $\zeta = 1\%$ για να γίνει μια ποιοτική σύγκριση σε επίπεδο τάξης μεγέθους της επιρροής του στα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκε μείωση της τάξεως του 4-5% στη τέμνουσα βάσης και αύξηση των μετατοπίσεων από 15 έως 20%. Οι δύο αλλαγές αυτές ήταν κατά μια έννοια αναμενόμενες. Οι εσωτερικές δυνάμεις των συνδέσμων παρέμειναν κι εδώ σε κοντινές τιμές με αυτές των προσομοιώσεων με 5% απόσβεση.

Στην Εικόνα 4.52 φαίνονται οι καμπύλες F-δ για τη σεισμική διέγερση Imperial Valley στο οκταώροφο προσομοίωμα (με τριβή), για συντελεστές βισκοειδούς απόσβεσης 1 και 5%.



Εικόνα 4.52: Καμπύλες F-δ για τη σεισμική διέγερση Imperial Valley, στο οκταώροφο προσομοίωμα - σύγκριση διαφορετικών συντελεστών απόσβεσης

Παρατηρούμε πως οι μετατοπίσεις αυξάνονται αλλά η μορφή ταλάντωσης είναι παρόμοια.

5. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω έρευνα



5.1. Συμπεράσματα και παρατηρήσεις από τα αποτελέσματα των αναλύσεων της διπλωματικής εργασίας

Οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν οι εξής :

- Διερεύνηση της σεισμικής συμπεριφοράς κατασκευών από πάνελ CLT, λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιαιτερότητές της, όπως rocking και πλαστιμότητα των μεταλλικών συνδέσμων, με τη χρήση μη γραμμικών αναλύσεων με χρονοϊστορίες και παρουσίαση όσο το δυνατόν περισσότερων αποτελεσμάτων.
- Διερεύνηση της επιρροής των δυνάμεων τριβής στην εν λόγω συμπεριφορά.
- Δευτερεύων στόχος της εργασίας ήταν η χρήση των αποτελεσμάτων των μη γραμμικών αναλύσεων με χρονοϊστορίες ως μέτρο σύγκρισης με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από διαφορετικές μεθόδους ανάλυσης όπως : στατική ανάλυση με ισοδύναμες οριζόντιες φορτίσεις (σε προσομοίωμα με μη γραμμικά ελατήρια) και ιδιομορφική φασματική μέθοδο (σε ισοδύναμο ελαστικό σύστημα).

Στο πλαίσιο αυτό, αναπτύχθηκαν τα κατάλληλα προσομοιώματα και πραγματοποιήθηκαν 28 βασικές αναλύσεις με χρονοϊστορίες, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάστηκαν εκτενώς στο κεφάλαιο §4, μαζί και με τα συμπεράσματα μιας περαιτέρω συμπληρωματικής διερεύνησης (βλ. §4.5). Οι βασικές αναλύσεις αυτές προέκυψαν από 7 διεγέρσεις σε 2 προσομοιώματα (ένα προσομοίωμα δώροφου και ένα προσομοίωμα οκταώροφου κτιρίου) με 2 τρόπους προσομοίωσης (με και χωρίς τριβή στις διεπιφάνειες). Πραγματοποιήθηκαν, τέλος, στο προσομοίωμα του οκταώροφου κτιρίου (χωρίς τριβή) αναλύσεις και με κλασικές μεθόδους (Παράρτημα Α).

Οι παράμετροι που καθορίζουν τη συμπεριφορά των προσομοιωμάτων και κατ' επέκταση τα αποτελέσματα των αναλύσεων είναι πολλές. Τα χαρακτηριστικά των προσομοιωμάτων, οι παράμετροι προσομοίωσης, η μέθοδος ανάλυσης, καθώς και οι ίδιες οι διεγέρσεις δημιουργούν ένα σύνθετο πρόβλημα και συνεπώς η εξαγωγή συμπερασμάτων προϋποθέτει μεγαλύτερο αριθμό αναλύσεων για να είναι αξιόπιστη.

Παρόλα αυτά, με βάση τις αναλύσεις και την εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, προέκυψε σειρά παρατηρήσεων, που παρουσιάζονται στις επόμενες παραγράφους. Οι παρατηρήσεις εστιάζουν αφενός στη διερεύνηση της επιρροής των φαινομένων τριβής και αφετέρου στη σύγκριση των αποτελεσμάτων των κλασικών μεθόδων με τα αποτελέσματα των μη γραμμικών αναλύσεων με χρονοϊστορίες (στο οκταώροφο προσομοίωμα χωρίς τριβή). Τα αποτελέσματα των κλασικών μεθόδων είναι άμεσα εξαρτημένα από την εκτίμηση των ιδιοπεριόδων (με τη χρήση ισοδύναμου ελαστικού συστήματος) και από την επιλογή του συντελεστή συμπεριφοράς q . Στις αναλύσεις που παρατίθενται στο παράρτημα Α επιλέχτηκε $q = 2.0$. Συνεπώς, η σύγκριση των αποτελεσμάτων αποτελεί και ταυτόχρονη διερεύνηση της ορθότητας της επιλογής αυτής.

5.1.1. Τέμνουσα βάσης

Πίνακας 5.1: Ποσοστιαία επιρροή της τριβής στη τέμνουσα βάσης		
	Δώροφο	Οκταώροφο
Επιρροή τριβής	+25.58%	+36.31%

Η τέμνουσα βάσης αυξάνεται με την προσομοίωση της τριβής. Όπως προαναφέρθηκε η αύξηση αυτή πιθανώς οφείλεται στο ότι η κατασκευή γίνεται πιο δύσκαμπτη και κατά συνέπεια η σεισμική καταπόνηση αυξάνεται κατά μέσο όρο.

Οι κλασικές μέθοδοι, για τις ιδιοπεριόδους που εκτιμήθηκαν και τον συντελεστή συμπεριφοράς $q = 2.0$, που επιλέχτηκε, υπολογίζουν την τέμνουσα βάσης με πολύ ικανοποιητική ακρίβεια. Ειδικότερα, η ψευδοστατική μέθοδος υπερεκτιμά την τέμνουσα βάσης σε ποσοστό +11.1%, ενώ η φασματική ανάλυση σε ποσοστό 9.7%.

5.1.2. Επιτάχυνση του ανώτερου διαφράγματος

Για τις μέγιστες επιταχύνσεις είναι δύσκολο να γίνουν παρατηρήσεις. Η μέγιστη επιτάχυνση φαίνεται να αυξάνεται με την προσομοίωση της τριβής κατά 9.5% στο δώροφο προσομοίωμα και 37.5% στο οκταώροφο. Ίσως κάποιος υπολογισμός «μέσης» επιτάχυνσης θα οδηγούσε σε πιο διαφορετικά συμπεράσματα.

5.1.3. Οριζόντιες μετατοπίσεις και drifts

Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία επιρροή της τριβής στις μετατοπίσεις και τα drifts των διαφραγμάτων του οκταώροφου προσομοιώματος.									
Όροφος :		1 ^{ος}	2 ^{ος}	3 ^{ος}	4 ^{ος}	5 ^{ος}	6 ^{ος}	7 ^{ος}	8 ^{ος}
Επιρροή τριβής	Μετατόπιση	-28.99%	-5.61%	+7.49%	+14.66%	+19.15%	+17.78%	+17.70%	+15.57%
	Drift	-28.99%	+8.63%	+20.51%	+20.10%	+22.34%	+8.67%	+17.96%	+5.11%

Στον Πίνακα 5.2 φαίνεται η επιρροή της τριβής στη μετακίνηση του οκταώροφου προσομοιώματος. Παρατηρείται ότι η τριβή αυξάνει τις μετατοπίσεις, με εξαίρεση αυτές των δύο πρώτων ορόφων. Η επιρροή της τριβής στη μετακίνηση προκύπτει κυρίως λόγω ταυτόχρονης αύξησης του rocking και μείωσης της ολίσθησης. Όπως προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το rocking συμβάλλει κατά 44.6% στη συνολική μετακίνηση στην περίπτωση της προσομοίωσης χωρίς τριβή, ενώ, στην περίπτωση που η τριβή ληφθεί υπόψιν, η συμβολή του στη συνολική μετακίνηση φτάνει το 72.3%. Το ανασήκωμα των πάνελ όμως, λειτουργεί αθροιστικά όσο αυξάνεται το ύψος. Αυτό γίνεται αισθητό μελετώντας την επιρροή της τριβής στη μετακίνηση του διώροφου προσομοιώματος.

Πίνακας 5.2: Ποσοστιαία επιρροή της τριβής στις μετατοπίσεις και τα drifts των διαφραγμάτων του διώροφου προσομοιώματος.			
Όροφος :		1 ^{ος}	2 ^{ος}
Επιρροή τριβής	Μετατόπιση	-38.66%	-33.98%
	Drift	-38.66%	-55.49%

Στο διώροφο προσομοίωμα ενώ το rocking αυξάνεται, πιο αισθητή λόγω του μικρότερου ύψους είναι η μείωση της ολίσθησης και συνεπώς η συνολική μετατόπιση μειώνεται.

Η εκτίμηση των μετατοπίσεων με τη ψευδοστατική μέθοδο, οδηγεί σε τιμές που έχουν πολύ μεγάλη απόκλιση από αυτές των αναλύσεων με απευθείας ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης. Η απόκλιση αυξάνεται με το ύψος και επομένως έχουμε υπερεκτίμηση των μετατοπίσεων σε ποσοστό 48% κατά μέσο όρο. Μεγάλο ποσοστό της διαφοράς οφείλεται στην προσομοίωση των κοχλιών κατά τη ψευδοστατική μέθοδο η οποία οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων της κορυφής του οκταώροφου προσομοιώματος σχεδόν 100mm. Η φασματική ανάλυση δίνει καλύτερα αποτελέσματα υπερεκτιμώντας τις μετατοπίσεις σε ποσοστό 21% κατά μέσο όρο. Οι μετατοπίσεις που προκύπτουν με τη φασματική ανάλυση είναι συνεπώς λίγο μεγαλύτερες από τις μετατοπίσεις του οκταώροφου προσομοιώματος, που προκύπτουν από την ανάλυσή του με μη γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες, όταν ληφθεί υπόψιν η τριβή.

5.1.4. Εσωτερικές δυνάμεις στους μεταλλικούς συνδέσμους

Οι αλλαγές της συμπεριφοράς των κατασκευών με την προσομοίωση της τριβής γίνονται εμφανέστερες παρατηρώντας τις εντάσεις που αναπτύσσονται στους μεταλλικούς συνδέσμους. Η επιρροή της τριβής στις εφελκυστικές δυνάμεις των hold-downs οδηγεί σε μια μέση αύξηση 53.8% στο οκταώροφο προσομοίωμα και κατά 48.2% στο διώροφο. Αντιθέτως, η προσομοίωση της τριβής συνεπάγεται μια ραγδαία μείωση 84.5% κατά μέσο όρο στις διατμητικές δυνάμεις των angle brackets του οκταώροφου προσομοιώματος και 63.1% σε αυτές των angle brackets του ισογείου στο διώροφο προσομοίωμα. Αντίστοιχη μείωση παρατηρήθηκε και στις διατμητικές δυνάμεις των hold-downs. Από τα αποτελέσματα αυτά, γίνεται άμεσα αντιληπτή η μεγάλη σημασία της προσομοίωσης της τριβής στις διεπιφάνειες, ειδικά κατά την διαστασιολόγηση των μεταλλικών συνδέσμων σε εφελκυστική αντοχή.

Οι δυνάμεις στους αυτοκοχλιούμενους κοχλίες δεν παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, καθώς, κατά μέσο όρο, ήταν πολύ μικρές και δεν θα βοηθούσαν στην εξαγωγή συμπερασμάτων για την επιρροή της τριβής και τη συμπεριφορά της κατασκευής. Παρόλα αυτά, αξίζει να αναφερθεί εδώ, ότι η μέγιστη εφελκυστική δύναμη

υπολογίστηκε σε 5kN (μετατόπιση 0.5mm), ενώ η μέγιστη διατμητική έφτασε τα 7kN (μετατόπιση 9mm). Οι δυνάμεις ήταν εν γένει μεγαλύτερες κατά μέσο όρο στις προσομοιώσεις με τριβή.

Η σύγκριση των εσωτερικών δυνάμεων, και ειδικότερα των εφελκυστικών, που αναπτύσσονται στους μεταλλικούς συνδέσμους με τις διάφορες μεθόδους ανάλυσης αποτελεί δυσκολότερη διαδικασία από την σύγκριση των υπόλοιπων μεγεθών. Η σύνθετη κίνηση των πάνελ αποτελεί ολίσθηση με ανασήκωμα (slip-rock) και είναι άμεσα εξαρτημένη από το χρόνο. Όπως φαίνεται στα πειράματα του 3^{ου} κεφαλαίου, τα πάνελ αρχικά ολισθαίνουν και χρειάζεται να παρέλθει ένα χρονικό διάστημα για να «αναπτυχθούν» οι ροπές και να ανασηκωθούν τα πάνελ. Το γεγονός αυτό γίνεται εμφανές και στη μελέτη επιρροής των δυνάμεων της τριβής, όπου τα πάνελ ανασηκώνονται ταχύτερα. Η φασματική μέθοδος είναι μια δυναμική ανάλυση ανεξάρτητη του χρόνου, συνεπώς δεν έχει τη δυνατότητα να προσομοιώσει πλήρως το φαινόμενο αυτό. Όπως παρατηρείται από τα αποτελέσματα στο παράρτημα Α, οι δύο κλασικές μέθοδοι ανάλυσης τείνουν να υπερεκτιμούν τις εσωτερικές εφελκυστικές δυνάμεις των συνδέσμων στους πρώτους ορόφους, ενώ τείνουν να τις υποεκτιμούν στους δύο τελευταίους. Παρόλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί ότι η τάξη μεγέθους παραμένει συγκρίσιμη. Αντιθέτως, οι διατμητικές δυνάμεις υπολογίζονται με τις κλασικές μεθόδους με μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο υπολογισμός των τεμνουσών δυνάμεων ανά διάφραγμα έχει μέση απόκλιση 29% με την ψευδοστατική μέθοδο η οποία υπερεκτιμά τις δυνάμεις στους χαμηλότερους ορόφους, ενώ τις υποεκτιμά στους υψηλότερους. Αντιθέτως η φασματική ανάλυση έχει εντυπωσιακά μικρά σφάλματα και μέση απόκλιση 4.1% από τη μη γραμμική ανάλυση με χρονοϊστορίες.

5.1.5. Συμπεράσματα

Τα κυριότερα συμπεράσματα για την σεισμική απόκριση κατασκευών από πάνελ CLT καθώς και για την προσομοίωσή τους που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία συνοψίζονται ως εξής :

- Τα φαινόμενα τριβής αποτελούν ένα σημαντικό είδος «μόνωσης», η οποία εξαιτίας των υψηλών συντελεστών τριβής και της συνεχούς ολίσθησης των πάνελ αυξάνει αισθητά την απορρόφηση ενέργειας και μειώνει τις περιόδους ταλάντωσης των προσομοιωμάτων. Ταυτόχρονα, αλλάζει και αισθητά τη ταλάντωση των κατασκευών αυτών υπό σεισμική διέγερση, ειδικά στην περίπτωση όπου η αρχική δυσκαμψία στη διατμητική διεύθυνση είναι μικρή (επιλογή μικρού αριθμού angle brackets). Με την τριβή, η λικνιστική απόκριση των τοίχων γίνεται εντονότερη, οι εφελκυστικές εσωτερικές δυνάμεις των συνδέσμων αυξάνονται και συνεπώς, ειδικά σε πολυώροφα προσομοιώματα, η παράλειψη της προσομοίωσής της δεν είναι υπέρ της ασφαλείας.
- Οι τιμές των πρώτων δύο ιδιοπεριόδων με τη μέθοδο της ισοδύναμης δυσκαμψίας, για το οκτώροφο προσομοίωμα ήταν επαρκώς κοντά στις δύο σημαντικότερες περιόδους ταλάντωσης κατά τις διεγέρσεις με χρονοϊστορίες. Ικανοποιητική ακρίβεια είχαν και τα αποτελέσματα των δύο κλασικών μεθόδων ανάλυσης με την κατάλληλη προσομοίωση των φορέων (Παράρτημα Α) και την επιλογή συντελεστή συμπεριφοράς $q = 2.0$. Αυτό ισχύει όμως μόνον για τα προσομοιώματα που μελετήθηκαν, τα οποία ήταν κανονικά σε όψη και σε κάτοψη και είχαν μόνον εξωτερικούς τοίχους από CLT. σημειώνεται ότι, εξ' αιτίας της μη γραμμικότητας του συστήματος, είναι επίσης πιθανό να μην υπάρχει σύγκλιση αποτελεσμάτων με την επιλογή διαφορετικών σεισμικών διεγέρσεων. Συνεπώς, για να βρεθούν οι προϋποθέσεις εφαρμογής τους και ο κατάλληλος συντελεστής συμπεριφοράς, και να αποδειχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων τους, είναι απαραίτητη η περαιτέρω αριθμητική διερεύνησή τους. Παρόλα αυτά, οι ενδείξεις των αναλύσεων της εργασίας αυτής είναι ενθαρρυντικές και οι δύο μέθοδοι μπορούν ίσως να χρησιμοποιηθούν για την προδιαστασιολόγηση προσομοιωμάτων στα αρχικά στάδια μιας μελέτης.

5.2. Θέματα για περαιτέρω διερεύνηση

Η μελέτη της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών αποτελεί εν γένει μια περίπλοκη διαδικασία. Οι ιδιαιτερότητες του συστήματος δόμησης με πάνελ από CLT προστίθενται ως ενδιαφέρουσες αντιξοότητες στη διαδικασία αυτή. Στο πλαίσιο μιας διπλωματικής εργασίας είναι συνεπώς δύσκολο/ακατόρθωτο να διερευνηθεί πλήρως ένα τόσο σύνθετο πρόβλημα. Επομένως, κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής εντοπίστηκαν διάφορα ενδιαφέροντα θέματα, που θα μπορούσαν να αποτελέσουν επέκτασή της, τα οποία συνοψίζονται ακολούθως::

- Ανάπτυξη ενός αυτοματοποιημένου τρόπου υπολογισμού των παραμέτρων εισόδου (inputs) για χρήση σε υστερητικά προσομοιώματα, βασισμένου στα στοιχεία που δίνουν οι κατασκευαστές μεταλλικών συνδέσμων.
- Διερεύνηση της επιρροής της παράλληλης σύνδεσης περισσότερων του ενός πάνελ με κοχλίες και απώτερο σκοπό την απορρόφηση περισσότερης ενέργειας (βλέπε [Demirci et al., 2017]). Διερεύνηση της επιρροής της τριβής των διεπιφανειών αυτών στη λικνιστική απόκριση των πάνελ.
- Εκπόνηση μη γραμμικών αναλύσεων με διαφορετικές ιστορίες με σκοπό την παραμετρική διερεύνηση των μορφών ταλάντωσης και των αλλαγών στις περιόδους ταλάντωσης του συστήματος.
- Εκπόνηση μη γραμμικών αναλύσεων με ιστορίες σε ένα ολοκληρωμένο τρισδιάστατο προσομοίωμα με ταυτόχρονη διέγερση στις τρεις διαστάσεις. Διερεύνηση της επιρροής των κατακόρυφων συνιστωσών σεισμικής φόρτισης στη λικνιστική απόκριση κατασκευών από CLT.
- Μελέτη της σεισμικής απόκρισης κατασκευών από CLT μη κανονικών κατόψεων, με εσωτερικούς τοίχους και ασυμμετρία αντοχών σε οριζόντια φόρτιση.
- Διερεύνηση των επιρροών του συχνотικού περιεχομένου των διεγέρσεων σε μη γραμμικές αναλύσεις. Διέγερση κατασκευών από πάνελ CLT με παλμικές καταγραφές.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με κλασσικές μεθόδους ανάλυσης

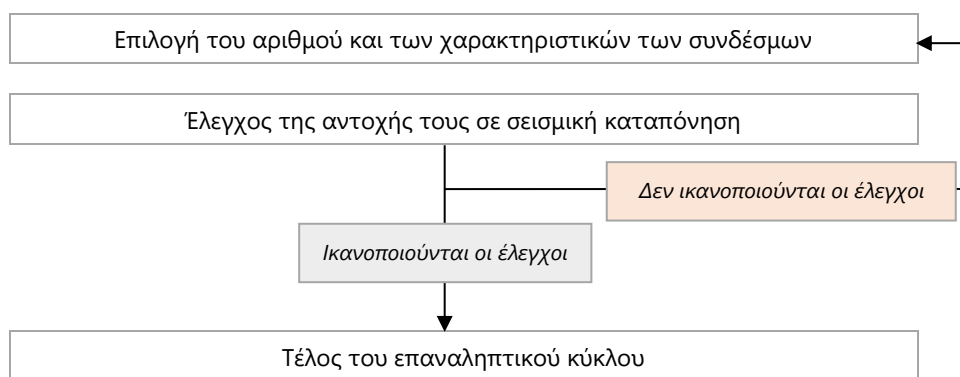
A.1. Μεθοδολογία

A.1.1. Εισαγωγή

Αν και δεν αποτελεί το κύριο αντικείμενο της διπλωματικής αυτής, στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων που υπολογίστηκαν με τη βοήθεια της μη γραμμικής ανάλυσης με απευθείας ολοκλήρωση των εξισώσεων κίνησης, με τα αποτελέσματα που μπορούν να εκτιμηθούν με απλούστερες μεθόδους, όπως είναι : η στατική ανάλυση με ισοδύναμες οριζόντιες φορτίσεις και η ιδιομορφική φασματική μέθοδος.

Η σύγκριση αυτή έχει μεγάλο πρακτικό ενδιαφέρον, καθώς οι απλούστερες αυτές μέθοδοι ανάλυσης αποτελούν πρακτικώς σχεδόν υποχρεωτικό σημείο αναφοράς για τους μηχανικούς κατά την προδιαστασιολόγηση των κατασκευών από CLT.

Το πρώτο ερώτημα που τίθεται στα μελετητικά γραφεία είναι ο «προκαθορισμός» του αριθμού και των χαρακτηριστικών των συνδέσμων (τοιχίου-δαπέδου), ικανών να παραλάβουν τα σεισμικά φορτία. Ο προκαθορισμός αυτός προϋποθέτει έναν "επαναληπτικό κύκλο" υπολογισμών, που οδηγούν στο επιθυμητό αποτέλεσμα.



Αν και θεωρητικά δυνατόν, πρακτικά είναι δύσκολο να συμπεριλάβει κανείς δυναμικές μη-γραμμικές αναλύσεις εντός αυτού του κύκλου προδιαστασιολόγησης, για τον υπολογισμό των απαραίτητων εντατικών μεγεθών.

Από την άλλη, η δυσκολία που συναντάται κατά τη χρήση των ελαστικών μεθόδων είναι ότι αναγκαστική προϋπόθεση για την επίτευξη αξιόπιστων αποτελεσμάτων αποτελεί η ικανότητα εκτίμησης της θεμελιώδους (πρώτης) ιδιοπεριόδου (για τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης) ή ορισμένων πρώτων ιδιομορφών (για τη φασματική μέθοδο) σε μια κατασκευή, που εκ φύσεως έχει μη-γραμμικές συμπεριφορές.

Αν και το ζήτημα έχει αναφερθεί από πλήθος μελετητών τα τελευταία χρόνια [Sustersic et al., 2015] [Polastri et al., 2016] [Tamagnone et al., 2017], η ανάπτυξη μιας μεθοδολογίας που να μπορεί να εφαρμοστεί στην πράξη από τους πολιτικούς μηχανικούς δεν υπάρχει απ' όσο γνωρίζουμε στη βιβλιογραφία, και το θέμα αποτελεί ακόμη πεδίο έρευνας.

Η εκτίμηση των ιδιομορφών προϋποθέτει τον ορισμό ενός προσομοιώματος, του οποίου η "γραμμικοποιημένη" συμπεριφορά είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτική της πραγματικής συμπεριφοράς της εξεταζόμενης δομής, στην θεωρηθείσα σεισμική περιοχή. Στην συγκεκριμένη περίπτωση των κατασκευών από CLT, η δυναμική συμπεριφορά και η μορφή ταλάντωσης, κάνοντας μια φαινομενολογική προσέγγιση, εξαρτώνται άμεσα από τη δυσκαμψία των μεταλλικών συνδέσμων του συστήματος τοίχου-δαπέδου. Δύο βασικές δυσκολίες εμφανίζονται:

- Η πραγματική δυσκαμψία του κάθε συνδέσμου (hold-down, angle bracket κτλ.) τίθεται συχνά ως ζήτημα υπό συζήτηση και υπό αμφισβήτηση (δυσκαμψία των κανονισμών από Ευρωκώδικα 5, δυσκαμψία που δίδεται από τον κατασκευαστή, αρχική κλίση εφαιπτομένης στην σπονδυλωτή καμπύλη, αρχική δυσκαμψία ενός διγραμμικού μοντέλου...).
- Η στροφική δυσκαμψία του συστήματος τοίχος-δάπεδο εξαρτάται πολύ έντονα από το «σημείο λειτουργίας» του (συνδυασμός κατακόρυφου φορτίου N και ροπής M).

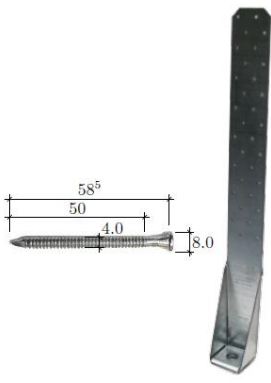
Στο παράρτημα αυτό αρχικά, στις επόμενες δύο παραγράφους, επεξηγούνται οι δύο αυτές δυσκολίες. Στη συνέχεια, περιγράφεται η έννοια της "ισοδύναμης δυσκαμψίας" και προτείνεται μια μεθοδολογία, με την οποία

θα μπορούσε να υπολογιστεί η τιμή της και να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των ιδιομορφών της κατασκευής. Τέλος, εφαρμόζεται η μεθοδολογία και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων.

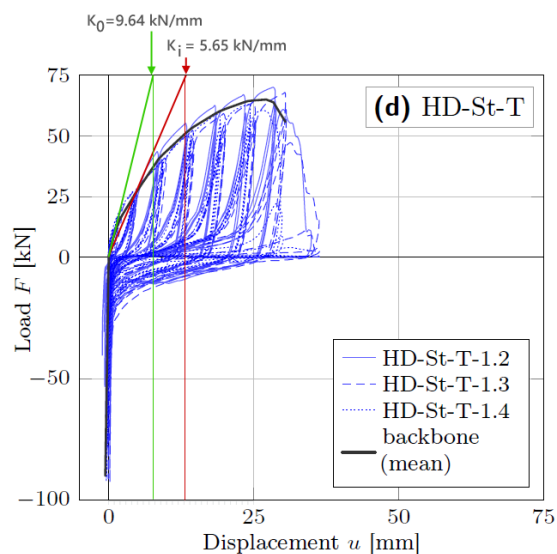
A.2.1. Το πρόβλημα κατά τον υπολογισμό της δυσκαμψίας των συνδέσμων

Η καταλληλότερη δυσκαμψία που πρέπει να ληφθεί υπόψη για κάθε σύνδεσμο, ανεξαρτήτως ανάλυσης, είναι ένα ζήτημα που επίσης διερευνάται συχνά στην βιβλιογραφία [Vogt, 2012] [Polastri et al., 2016]. Οι τύποι που βρίσκονται στον Ευρωκώδικα 5, επειδή δεν κατορθώνουν να πάρουν υπόψιν τους σωστά την ολκιμότητα των μεταλλικών πλακών, που συνθέτουν τους συνδέσμους, επιτρέπουν τον υπολογισμό της δυσκαμψίας της συνδεσμολογίας μέσω της δυσκαμψίας διαρροής των κοχλιών (ή των καρφιών αντίστοιχα). Με τον τρόπο αυτό όμως, καταλήγουν σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από εκείνες που μετρούνται μέσω πειραμάτων. Αυτή η διαφορά γίνεται διπλά σημαντική και προβληματική όταν μελετάται μια κατασκευή από CLT, με διαδικασίες ευαίσθητες σε αλλαγές, όπως η εύρεση "ισοδύναμης δυσκαμψίας" (K_{eq}), που απαιτούν ακρίβεια.

Στον παρακάτω πίνακα δίδονται επί παραδείγματι οι διαφορετικές τιμές δυσκαμψίας, που θα μπορούσαν να χαρακτηρίσουν το hold-down, που χρησιμοποιείται στη διπλωματική αυτή (HTT22 της εταιρίας Simpson).

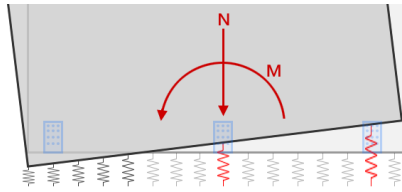
 <p>Εικόνα A.1: HTT22 - Simpson 17 Ring shank nails</p>	<p>Η τιμή του K_{ser} που δίδεται στον Ευρωκώδικα 5</p>
	$k_{ser,EC5} = 2 \cdot n_{nail} \cdot k_{ser,nail} = 2 \times 17 \times \frac{1}{30} \rho_k^{1.5} \times d^{0.8} = 29.5 \text{ kN/mm}$
	<p>Η τιμή του K_{ser} που δίδεται από την κατασκευάστρια εταιρία Simpson</p>
	$k_{ser,Simpson} = 4.29 + (n_{nail} - 15) \times 0.374 = 5.04 \text{ kN/mm}$
	<p>Η τιμή του K_{ini} (Αρχική δυσκαμψία του διγραμμικού μοντέλου) – Μέση τιμή που δίδεται από τον Hummel [2017], με χρήση δύο διγραμμικοποιήσεων</p>
	$k_{ini} = 5.65 \text{ kN/mm}$
<p>Η τιμή του k_0 (αρχική δυσκαμψία εφαπτόμενη στη σπονδυλωτή καμπύλη) – Τιμή δοσμένη από τον Hummel, [2016] για το μοντέλο SAWS.</p>	
$k_0 = 14.5 \text{ kN/mm}$	

Στο παρόν παράρτημα για την προδιαστασιολόγηση, θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές k_{ini} και k_0 που προκύπτουν από πειραματικά αποτελέσματα. Σημειώνεται εδώ, επί των συμβόλων, πως η τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής k_{ini} πολλές φορές συναντάται και ως K_e , ενώ η αρχική δυσκαμψία K_0 (κλίση εφαπτομένης στην αρχή της καμπύλης ικανότητας) συχνά συναντάται και ως K_i .



Εικόνα A.2: Οι δυσκαμψίες K_{ini} και K_0 σε μία υστερητική καμπύλη F-δ

A.2.2. Στροφική δυσκαμψία ως συνάρτηση του σημείου λειτουργίας (N, M)

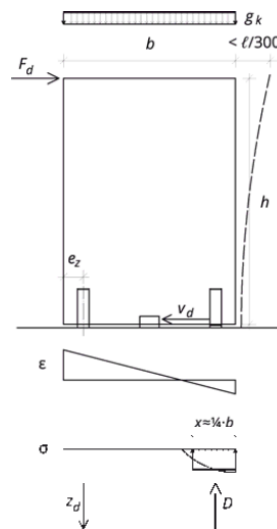


$$k_{\theta} = \frac{M}{\theta} = f(K_{dc} \cdot K_{ti} \cdot N, M)$$

Εικόνα A.3: Η βάση ενός πάνελ που περιστρέφεται

Για την επεξήγηση της σημασίας του σημείου λειτουργίας (N, M), είναι εδώ σκόπιμο να εκφράσουμε τη συνολική στροφική δυσκαμψία του συνδυασμού τοίχου-δαπέδου, συναρτήσει: α) των παραμέτρων της δυσκαμψίας των μεταλλικών συνδέσμων, β) της θλιπτικής δυσκαμψίας επαφής και γ) των φορτίσεων N και M, που χαρακτηρίζουν το «σημείο λειτουργίας».

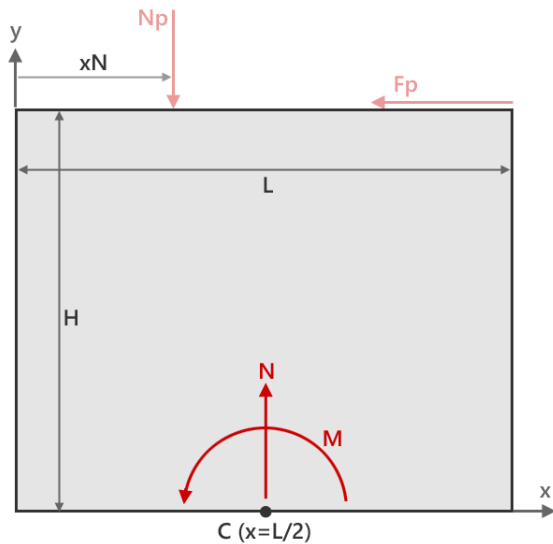
Πολλοί ερευνητές πρότειναν αναλυτικές εμπειρικές σχέσεις για την ευκολότερη προσομοίωση της συμπεριφοράς του συστήματος τοίχος-δάπεδο από CLT, μια σύγκριση των οποίων υπάρχει στην εργασία των Reynolds et al. [2017]. Μια από της πιο κλασσικές είναι αυτή που προτείνεται από τους Wallner-Novak et al. [2013].



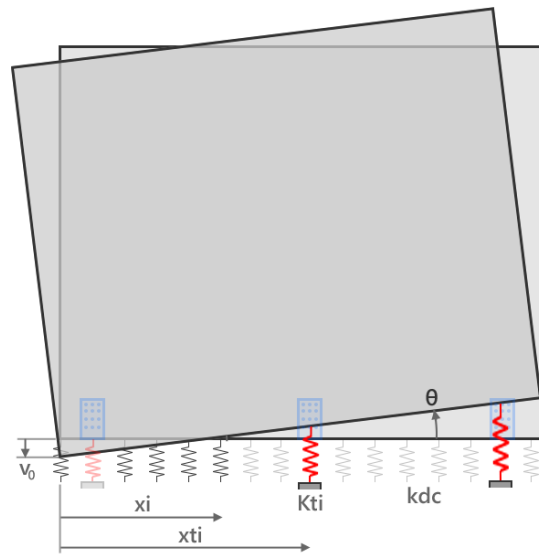
Εικόνα A.4: Πρόταση από τους Wallner-Novak et al. [2013] για τον υπολογισμό της θλιβόμενης ζώνης

Σε αυτό το μοντέλο, η στροφική δυσκαμψία υπολογίζεται εύκολα, κάνοντας την παραδοχή πως το θλιβόμενο μήκος στη βάση του τοίχου ισούται με το ένα τέταρτο του συνολικού μήκους.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα υπολογίσουμε τη στροφική δυσκαμψία εισάγοντας έναν επιπλέον άγνωστο « xί » που χαρακτηρίζει το θλιβόμενο μήκος. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται τα γραφικά σύμβολα που χρησιμοποιούνται.



Εικόνα A.5: Η φόρτιση στο σημείο C, δηλαδή : $N = -N_p$ και $M = F_p H + N_p \left(\frac{L}{2} - x_N\right)$



Εικόνα A.6: Παρουσίαση των συμβόλων που θα χρησιμοποιηθούν στο παράρτημα A

Πίνακας A1: Κινηματικές εξισώσεις των εξεταζόμενων σημείων

Τυχαιο σημείο M	Σημείο (x, 0)	Σημείο Ti	Σημείο C
$\begin{Bmatrix} u_m \\ v_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ v_o \end{Bmatrix} + \theta \begin{Bmatrix} -y \\ x \end{Bmatrix}$	$v(x) = v_o + \theta x$	$v_{ti} = v_o + \theta x_{ti}$	$v_c = v_o + \theta \frac{L}{2}$

Όπου :

M, N : Η ένταση που προκαλείται στο κεντρικό σημείο C από της εξωτερικές δυνάμεις

K_{ti} (N/m) : Δυσκαμψία σε εφελκυσμό του συνδέσμου (είτε hold-down είτε angle bracket) με τετμημένη x_{ti} .

K_{dc} (N/m/m) : Θλιπτική δυσκαμψία (λόγω της επαφής τοίχου-δαπέδου)

x_i : Το σημείο που οριοθετεί τη θλιπτική ζώνη.

Η κατακόρυφη μετατόπιση ενός σημείου με τετμημένη x στη βάση OE εκφράζεται ως εξής :

$$v(x) = v_o + \theta x$$

Η μετατόπιση αυτή είναι μηδενική για το σημείο τομής I με τετμημένη x_i , τέτοια ώστε :

$$x_i = -\frac{v_o}{\theta}$$

Η ισορροπία του συστήματος μπορεί να εκφραστεί με τη βοήθεια της αρχής των δυνατών έργων, ως εξής:

$$M\theta^* + Nv_c^* = \sum_{x_{ti} > x_i} (K_{ti}v_{ti})v_{ti}^* + \int_0^{x_j} k_{dc}v(x)v^*(x)dx$$

Όπου :

$$x_j = \text{Min}(x_i, L)$$

Εκφράζοντας τη σχέση αυτή ως προς τις παραμέτρους v_0 και θ , έχουμε:

$$M\theta^* + N\left(v_0^* + \frac{L}{2}\theta^*\right) = \sum_{x_{ti} > x_i} K_{ti}(v_0 + \theta x_{ti})(v_0^* + \theta^* x_{ti}) + \int_0^{x_j} k_{dc}(v_0 + \theta x)(v_0^* + \theta^* x) dx$$

Η αρχή των δυνατών έργων πρέπει να ισχύει για κάθε δυνατή μετατόπιση. Συνεπώς οι παράμετροι της μετατόπισης v_0 και θ μπορούν να προκύψουν από το παρακάτω μη γραμμικό σύστημα εξισώσεων :

$$\begin{bmatrix} \sum_{x_{ti} > x_i} K_{ti} + k_{dc}x_j & \sum_{x_{ti} > x_i} K_{ti}x_{ti} + \frac{1}{2}k_{dc}x_j^2 \\ \sum_{x_{ti} > x_i} K_{ti}x_{ti} + \frac{1}{2}k_{dc}x_j^2 & \sum_{x_{ti} > x_i} K_{ti}x_{ti}^2 + \frac{1}{3}k_{dc}x_j^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} v_0 \\ \theta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} N \\ M + N\frac{L}{2} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Με :

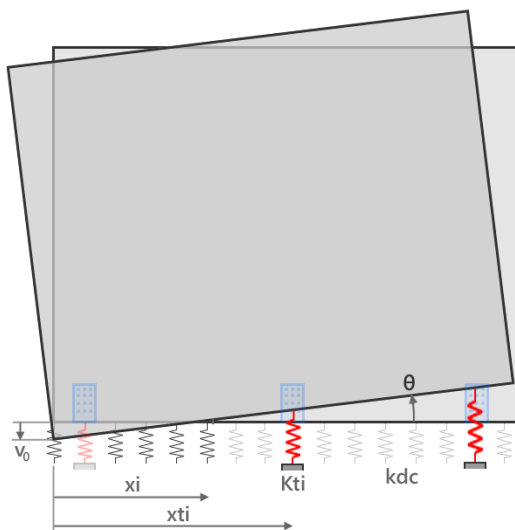
$$x_i = -\frac{v_0}{\theta}$$

Οι παράμετροι v_0 και θ υπολογίζονται εύκολα επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση με επαναληπτική αριθμητική μέθοδο. Είναι λοιπόν δυνατό να εκφραστεί η στρωτική δυσκαμψία, που αναλογεί στο σημείο λειτουργίας που εξετάζεται, ως εξής:

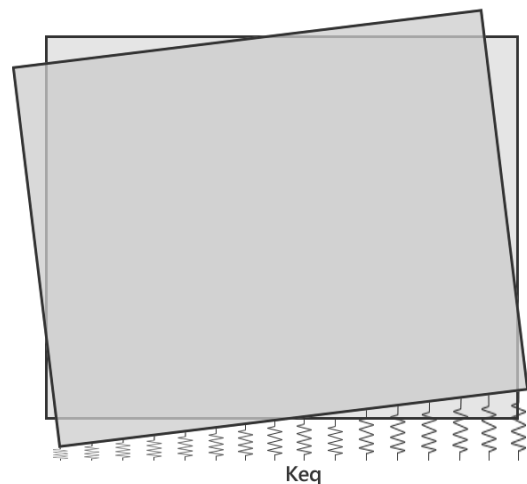
$$k_\theta = \frac{M}{\theta}$$

Όπου θ η στρόφη που υπολογίστηκε από την επίλυση του συστήματος (1).

A.2.3. Ισοδύναμη κατανεμημένη δυσκαμψία



Εικόνα A.7: Αρχικό μη γραμμικό σύστημα



Εικόνα A.8: Ισοδύναμη κατανεμημένη δυσκαμψία από την οποία προκύπτει η ίδια στρόφη θ υπό ροπή M

Είναι συνεπώς δυνατόν να υπολογιστεί για προκαθορισμένο σημείου λειτουργίας (N, M) μια «ισοδύναμη καταναμεμένη δυσκαμψία» k_{eq} (όπως αυτή παρουσιάζεται στην Εικόνα Α.8). Αυτή η δυσκαμψία υπολογίζεται ούτως ώστε να προκύπτει η ίδια στροφή θ υπό ισοδύναμη φόρτιση αξονικής δύναμης N και ροπής M. Για συγκεκριμένη ροπή M, είναι εύκολο να αποδειχθεί ότι, η στροφή ενός πάνελ συνδεδεμένο με το δάπεδο με μια σταθερή καταναμεμένη δυσκαμψία μπορεί να εκφραστεί ως εξής :

$$M = \frac{k_{eq} L^3}{12} \theta$$

Η ισοδύναμη λοιπόν δυσκαμψία που αναζητείται εκφράζεται ως εξής :

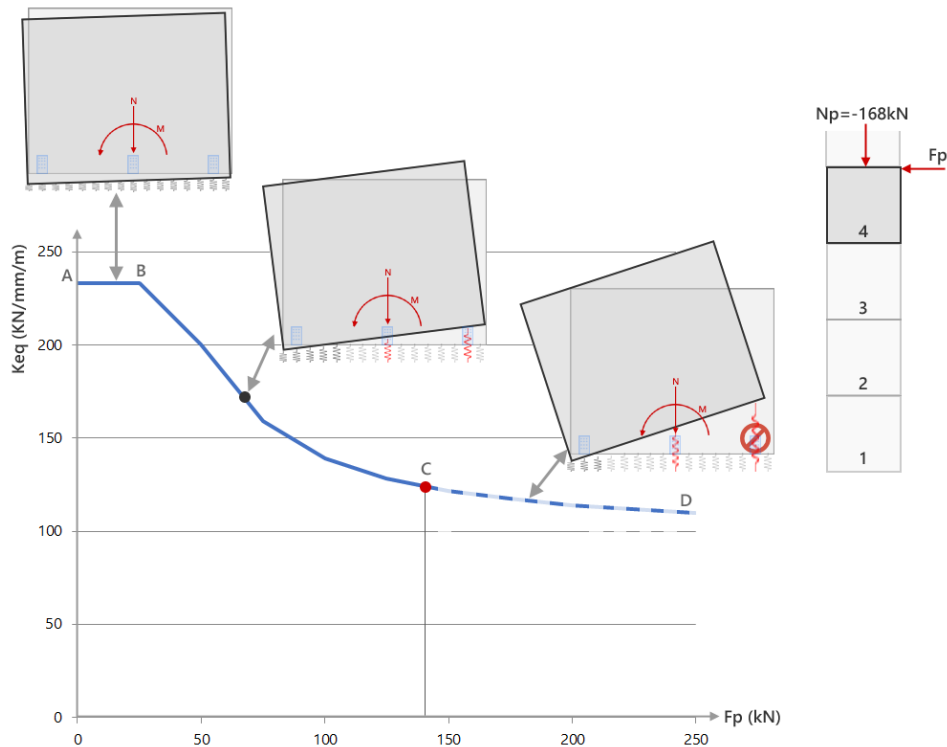
$$k_{eq} = \frac{12}{L^3} k_{\theta}$$

Η ισοδύναμη αυτή δυσκαμψία μπορεί εύκολα να υπολογιστεί σε ένα υπολογιστικό φύλλο τύπου EXCEL. Η Εικόνα Α.9 δείχνει ένα τέτοιο φύλλο υπολογισμού, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής.

Data				Linear system			
Panel							
L		2.5 m		xi		0.48409899 m	
H		2.75 m		xj		0.48409899 m	
Stiffnesses							
Kt1		5650 kN/m		Matrix			
xt1		2.5		102469.7981		37560.18326	
Kt2		0		37560.18326		42875.79904	
xt2		1.25		Inverse matrix			
Kdc		200000 kN/m/m				F	U
ks		5700 kN/m		1.43748E-05	-1.25926E-05	-150	-0.00602846 m
Exterior forces						307.5	0.01245295 rad
				-1.25926E-05	3.43546E-05		
xN		1.25 m		Verification xi			
Np		-150 kN				0.48409899 m	
Fp		180 kN		Difference			
N		-150 kN				0	
M		495 kNm		Equivalent stiffness			
				Non linear rotation stiffness			
				Mc			
				495 kNm			
				Theta			
				0.012452946 rad			
				Ktheta nl			
				39749.63043 kNm/rad			
				Equivalent stiffness			
				keq			
				30528 kN/m/m			

Εικόνα Α.9: Πίνακας EXCEL που επιτρέπει τον υπολογισμό ισοδύναμων καταναμεμένων δυσκαμψιών

Είναι ενδιαφέρον εδώ να παρατηρήσουμε την εξέλιξη των τιμών της ισοδύναμης δυσκαμψίας (που προσομοιώνει την πραγματική δυσκαμψία της συνδεσμολογίας), συναρτήσει των εξωτερικών δυνάμεων N_p και F_p .



Εικόνα A.10: Εξέλιξη των τιμών της ισοδύναμης δυσκαμψίας συναρτήσει της οριζόντιας δύναμης

Το διάγραμμα της Εικόνας A.10 δείχνει τις ισοδύναμες δυσκαμψίες για έναν τοίχο του τετάρτου ορόφου για σταθερό κατακόρυφο φορτίο N_p . Παρατηρούμε εδώ, ότι η ισοδύναμη δυσκαμψία, που εναντιώνεται πρακτικά στη στροφή, κυμαίνεται ανάμεσα στη θλιπτική δυσκαμψία K_{dc} (μεταξύ των σημείων A και B, όπου δεν υπάρχει ανασήκωμα) και την ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της θλιβόμενης ζώνης x_i . Στην πράξη, η δύναμη F_p περιορίζεται στην πραγματικότητα από την αντοχή των μεταλλικών συνδέσμων που αναλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις (σημείο C). Για σταθερή λοιπόν κατακόρυφη δύναμη N_p , η ισοδύναμη δυσκαμψία μπορεί να πάρει τιμές ανάμεσα στα σημεία A και C.

A.2.4. Διαδικασία προδιαστασιολόγησης

Λαμβάνοντας υπόψιν τα προηγούμενα υποκεφάλαια, μια διαδικασία προδιαστασιολόγησης που θα μπορούσε πιθανώς να χρησιμοποιηθεί, χαρακτηρίζεται από τα βήματα που φαίνονται στο παρακάτω σχεδιάγραμμα. Το βήμα 4, χρησιμοποιεί την έννοια της ισοδύναμης δυσκαμψίας, που αναλύθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στη βιβλιογραφία προτείνονται κι άλλες εκδοχές της ισοδύναμης δυσκαμψίας [Sustersic et al., 2011], [Sustersic et al., 2015].

Προετοιμασία

Ορισμός του φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στη σεισμική ζώνη που μελετάται

Αρχική εκτίμηση της περιόδου (π.χ. τύπος του ΕΚ8 : $T_1 = 0,05 H^{3/4}$)

Επιλογή μιας αρχικής κατανομής των συνδέσμων.

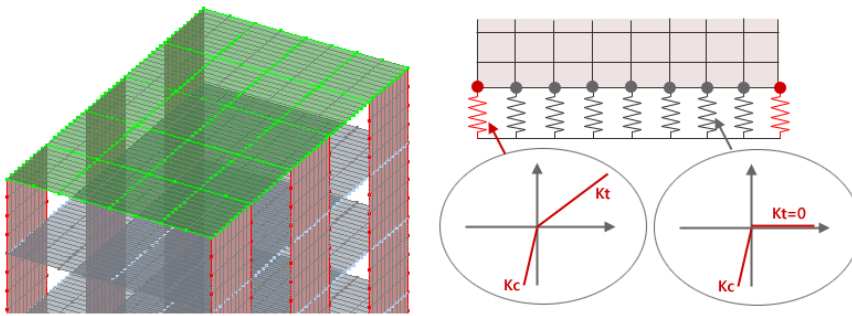
Επαναληπτική Διαδικασία

1) Προσδιορισμός των δυνάμεων με τη μέθοδο ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης

$$F_i = F_b \frac{z_i m_i}{\sum_{i=1}^n z_i m_i}$$

2) Υπολογισμός απόκρισης της κατασκευής (Στατική ανάλυση με μη-γραμμικά ελατήρια)

$$G + \psi_2 Q + E_d$$



3) Έλεγχος αντοχής των συνδέσμων

Ικανοποιούνται οι έλεγχοι;

Όχι : Νέα κατανομή συνδέσμων

Ναι

4) Υπολογισμός θεμελιώδους ιδιοπεριόδου (Με τη χρήση των γραμμικών ισοδύναμων δυσκαμψιών – Το σημείο λειτουργίας δίδεται από την ψευδοστατική με μη-γραμμικά ελατήρια)

Επιβεβαιώνεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος;

Όχι

Ναι

Τέλος της διαδικασίας προμελέτης

A.2. Αποτελέσματα των αναλύσεων – προσομοίωμα 8 ορόφων

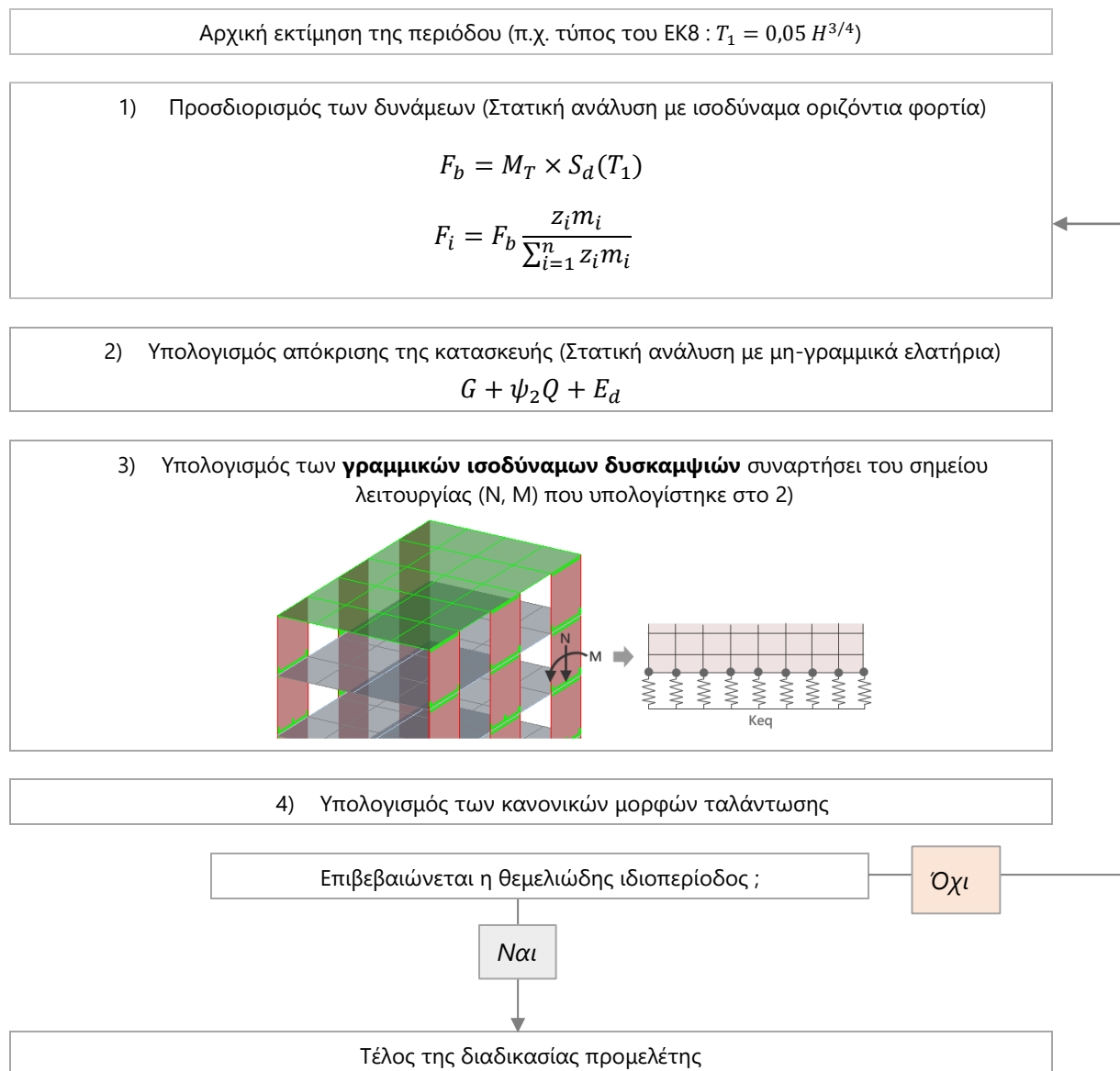
A.2.1. Εισαγωγή

Προκειμένου να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 4 με τη μη γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας με τις μεθόδους ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης και φασματικής ανάλυσης που εξετάζονται εδώ, διατηρήθηκαν αυτούσια τόσο ο τύπος, όσο και η κατανομή των συνδέσμων. Στα νέα προσομοιώματα λήφθηκε υπόψιν και η διατμητική δυσκαμψία των αυτοκοχλιούμενων κοχλιών.

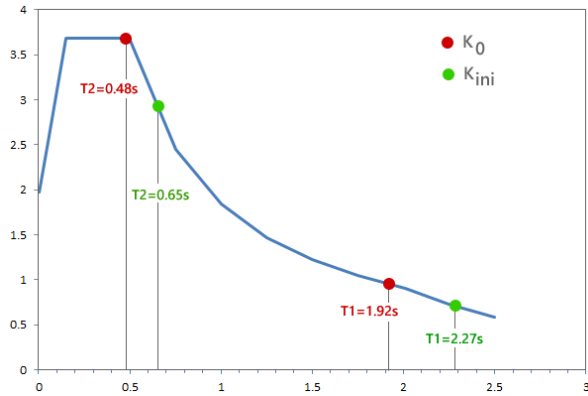
Τα αποτελέσματα της στατικής ανάλυσης με ισοδύναμα οριζόντια φορτία και της ιδιομορφικής φασματικής μεθόδου που παρουσιάζονται στο παρόν κεφάλαιο υπολογίστηκαν με χρήση του λογισμικού ACORD-Bat της εταιρίας Ittech.

A.2.2. Εκτίμηση των κανονικών μορφών ταλάντωσης

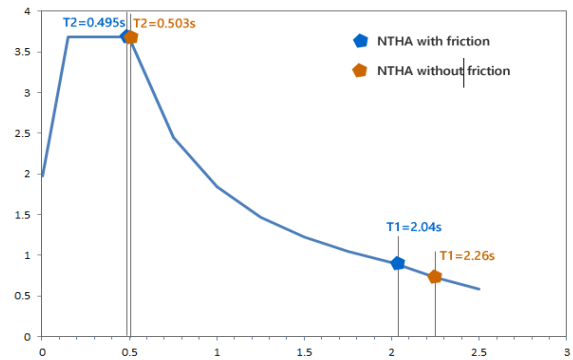
Οι ιδιομορφές της κατασκευής στην διεύθυνση Χ εκτιμήθηκαν χρησιμοποιώντας τον επαναληπτικό κύκλο, όπως ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Η διαδικασία εδώ ήταν κάπως απλούστερη, καθώς ο αριθμός και το είδος των συνδέσμων θεωρήθηκαν γνωστά, συνεπώς μετατράπηκε, ως ακολούθως:



Με την παραπάνω επαναληπτική διαδικασία υπολογίστηκαν οι πρώτες δύο ιδιομορφές του οκταώροφου κτιρίου, για δύο διαφορετικές προσομοιώσεις. Το πρώτο προσομοίωμα είχε συνδέσεις με δυσκαμψία K_0 (αρχική δυσκαμψία εφαπτόμενη στη σπονδυλωτή καμπύλη), ενώ η δυσκαμψία των συνδέσεων στο δεύτερο ήταν K_{ini} (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής).



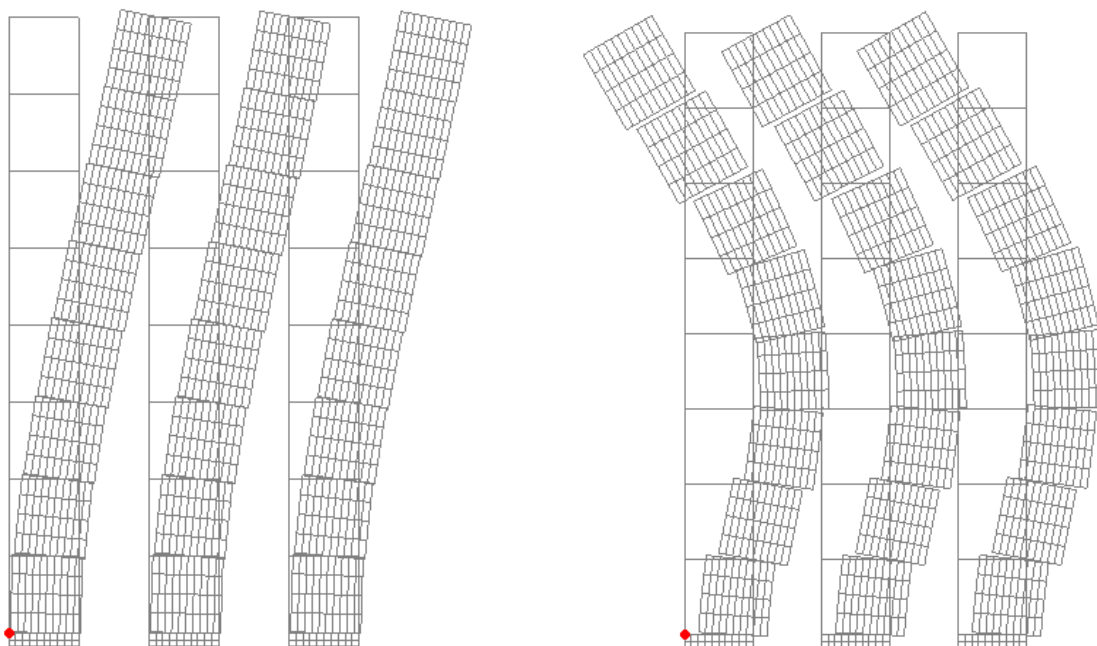
Εικόνα A.11: Ιδιοπερίοδοι που υπολογίστηκαν μέσω ισοδύναμων δυσκαμψιών



Εικόνα A.12: Οι κυριότερες περίοδοι ταλάντωσης για διεγερση με χρονίστοριες

Οι Εικόνες A.11 και A.12 δείχνουν τις ιδιοπερίόδους που προέκυψαν από την επαναληπτική διαδικασία και τη μέση τιμή των σημαντικών περιόδων ταλάντωσης που υπολογίστηκαν μέσω μη γραμμικών αναλύσεων με απευθείας ολοκλήρωση στο χρόνο (NTHA). Παρατηρούμε αρχικά μια καλή συμφωνία των τιμών, ειδικά στην περίπτωση του K_0 και της ανάλυσης με τριβή.

Στην Εικόνα 4.13 παρουσιάζεται το σχήμα της παραμορφωμένης κατασκευής στις δύο πρώτες ιδιομορφές (προσομοίωμα με συνδέσεις με δυσκαμψίες K_0). Στις λεζάντες αναγράφονται και οι αντίστοιχες τιμές ιδιοπεριόδων και ενεργών ιδιομορφικών μαζών.



1^η Ιδιοπερίοδος : $T_1=1.92s$ με $m_1^*=68.9\%M$

2^η Ιδιοπερίοδος : $T_2=0.48s$ με $m_2^*=20.6\%M$

Εικόνα A.13: Παραμόρφωση κατασκευής για της δύο πρώτες ιδιομορφές

Επιδιώκοντας μια πιο ασφαλή προσέγγιση, για τη μελέτη των κτιρίων και την εκτίμηση των εντατικών μεγεθών με τις κλασσικές μεθόδους χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές των ιδιοπεριόδων που προκύπτουν από τα K_0 .

Και στις δύο αυτές αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε συντελεστής συμπεριφοράς $q = 2.0$. Για τη μέθοδο « στατική ανάλυση με ισοδύναμα οριζόντια σεισμικά φορτία » λήφθηκε υπόψιν:

$$S_d(T_1) = S_d(1.92s) = 0.96 \text{ m/s}^2$$

Επισημαίνεται, ότι για το κτίριο ικανοποιούνται τα κριτήρια κανονικότητας σε όψη και εν προκειμένω ισχύει $T_1 \leq 2.0\text{sec}$, συνεπώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ψευδοστατική μέθοδος.

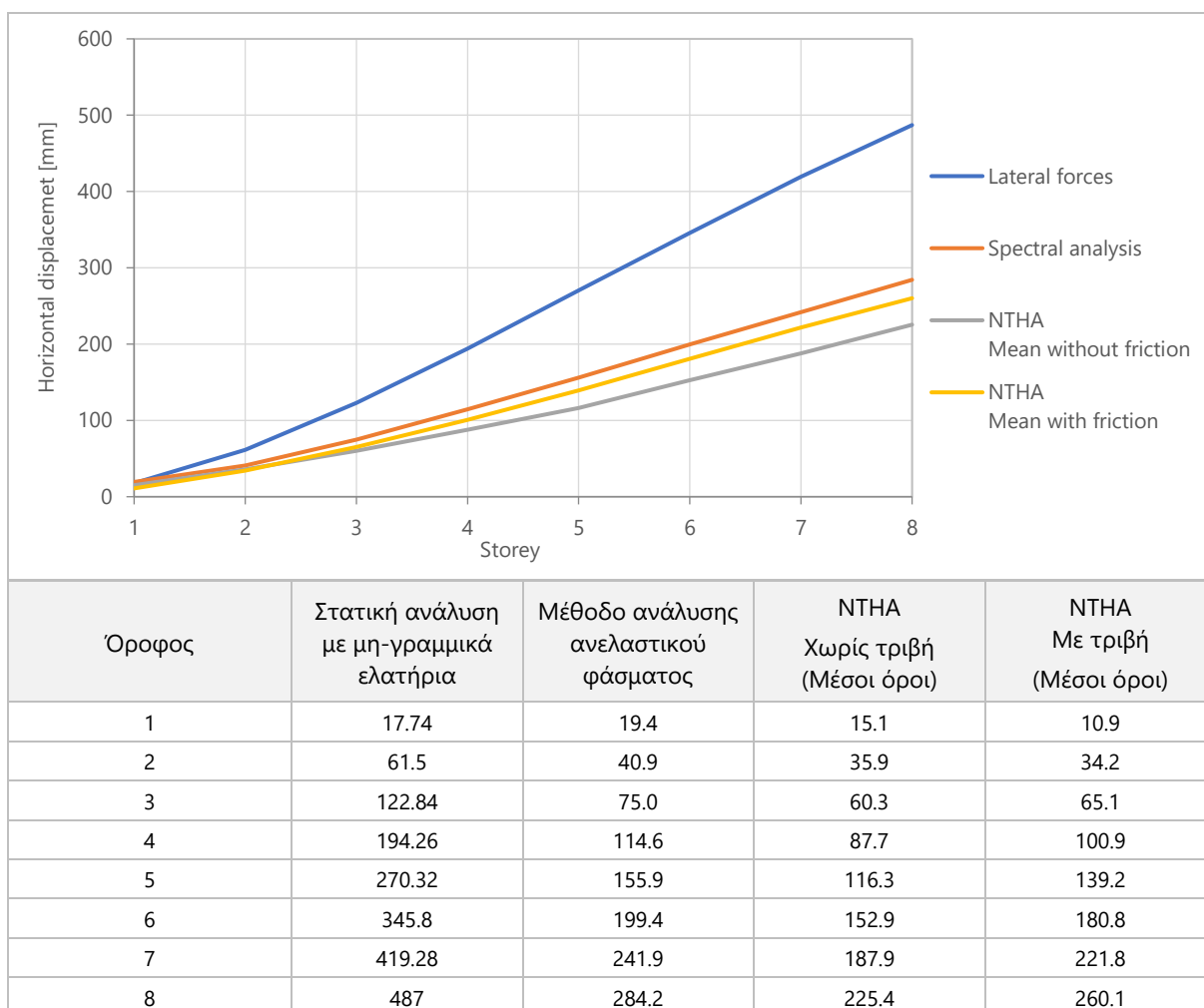
Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των δύο μεθόδων ανάλυσης για την επίλυση του γραμμικού συνδυασμού :

$$G + \psi_2 Q + E_d$$

Όσον αναφορά τα ταυτόχρονα μεγέθη, για τη φασματική ανάλυση παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το δυσμενέστερο συνδυασμό των ακραίων τιμών, ανά περίπτωση (ελάχιστη κατακόρυφη δύναμη N, μέγιστη ροπή M). Δεν χρησιμοποιήθηκαν δηλαδή οι τύποι των προσεγγιστικών δυσμενών συνδυασμών από ΕΑΚ για τον υπολογισμό ταυτόχρονων τιμών. Λόγω ανεξάρτητων ιδιομορφών ο συνδυασμός των μέγιστων τιμών έγινε με τη μέθοδο SRSS.

A.2.3. Αποτελέσματα : Μετατοπίσεις

Ο παρακάτω πίνακας, της Εικόνας A.14, συγκρίνει τις τιμές των οριζόντιων μετατοπίσεων των διαφραγμάτων για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής.

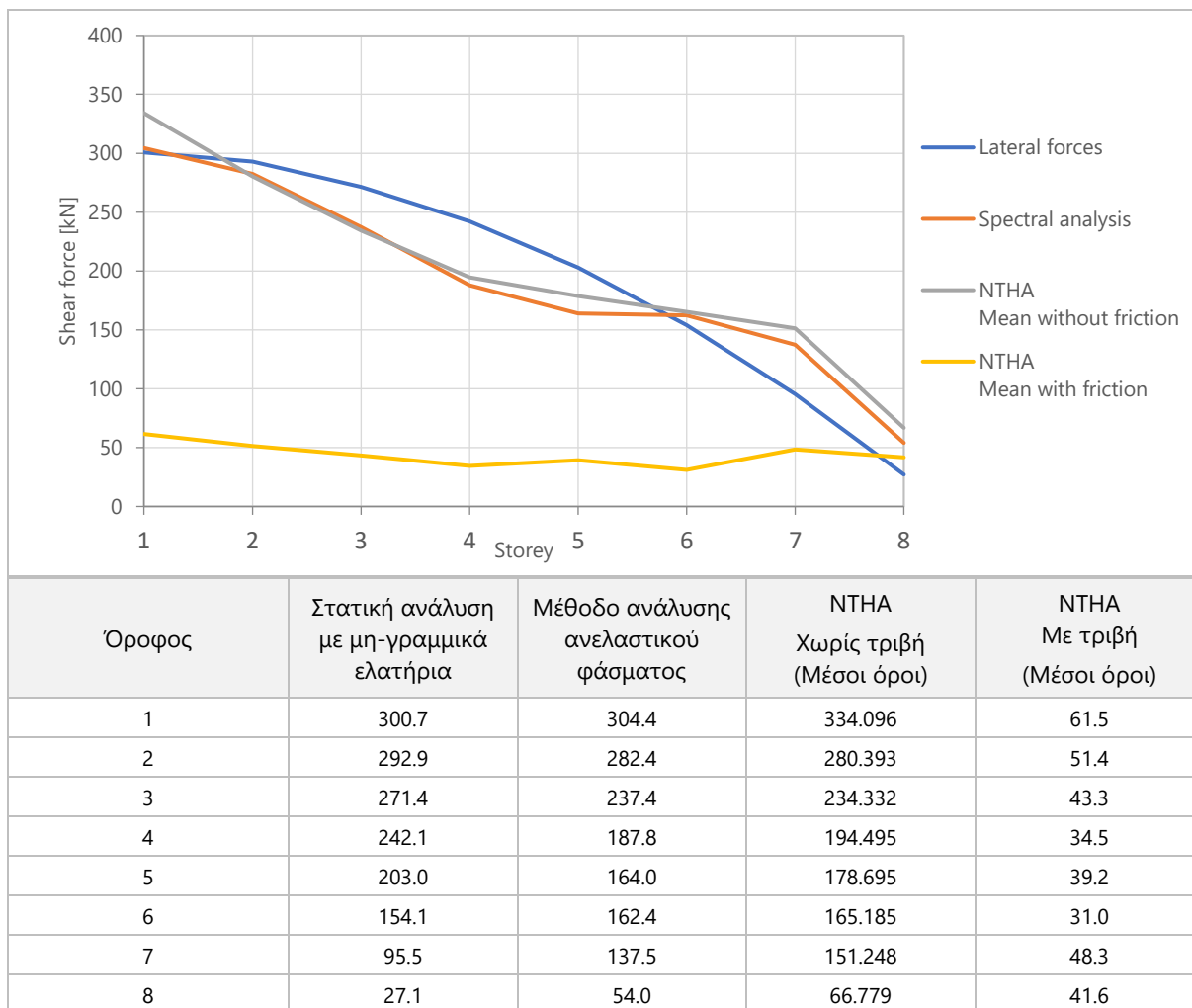


Εικόνα A.14: Μέγιστη οριζόντια σχετική μετατόπιση των διαφραγμάτων του οκταώροφου προσομοιώματος, που προκύπτει από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής

Παρατηρούμε στο διάγραμμα της Εικόνας A.14, πως με τη ψευδοστατική μέθοδο υπολογίζονται μετατοπίσεις πολύ μεγαλύτερες από τις μετατοπίσεις αναφοράς που λαμβάνονται από τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση (NTHA). Μεγάλο ποσοστό της διαφοράς οφείλεται στην προσομοίωση των κοχλιών κατά τη ψευδοστατική μέθοδο η οποία οδηγεί σε αύξηση των μετατοπίσεων της κορυφής του οκταώροφου προσομοιώματος σχεδόν 100mm. Οι μετατοπίσεις που υπολογίζονται με φασματική ανάλυση είναι αντιθέτως, σε συμφωνία με τα αποτελέσματα αναφοράς.

A.2.4. Αποτελέσματα : Διατμητικές δυνάμεις στους συνδέσμους

Ο παρακάτω πίνακας, της Εικόνας A.15 συγκρίνει τις τιμές των συνολικών διατμητικών δυνάμεων που παραλαμβάνονται από τους μεταλλικούς συνδέσμους ανά όροφο, για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής.



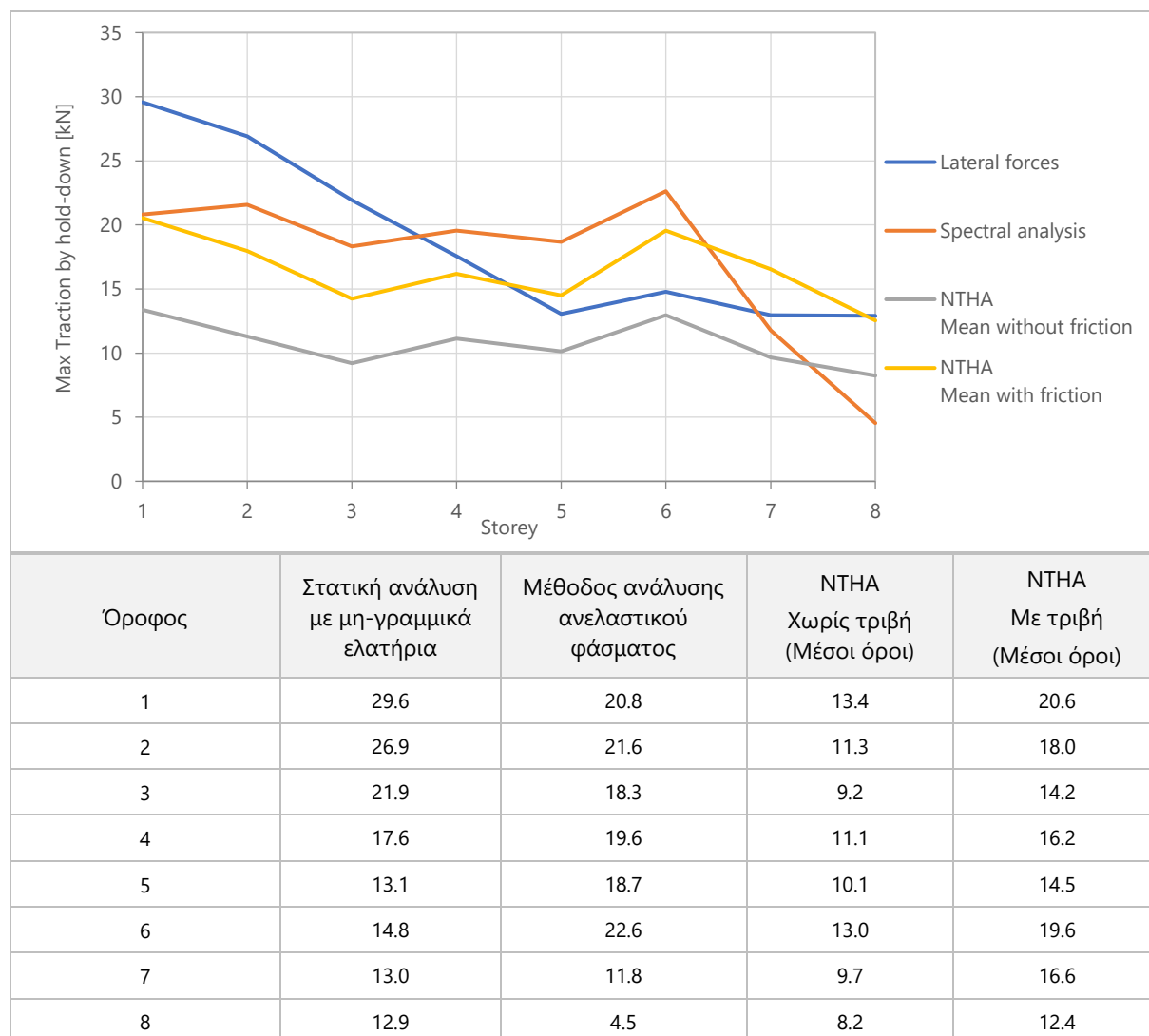
Εικόνα A.15: Διατμητικές δυνάμεις που παραλαμβάνονται από τους μεταλλικούς συνδέσμους ανά όροφο στο οκταώροφο προσομοίωμα όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής

Παρατηρούμε, στο διάγραμμα της Εικόνας A.15, πως οι δύο κλασσικές μέθοδοι δίνουν αντίστοιχης τάξης μεγέθους αποτελέσματα με τη μη γραμμική δυναμική ανάλυση με χρονοϊστορίες χωρίς τριβή. Μάλιστα η φασματική ανάλυση δίνει εντυπωσιακά ακριβή μεγέθη με εξαίρεση τον πρώτο όροφο. Το διάγραμμα φανερώνει επίσης πως ο συντελεστής συμπεριφοράς $q=2.0$ είναι υπερεκτιμημένος. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει στην περίπτωση προσομοίωσης της τριβής οι διατμητικές δυνάμεις στους συνδέσμους μειώνονται ραγδαία.

Παρόλα αυτά, όσον αναφορά τις διατμητικές δυνάμεις κατά το σχεδιασμό, σε αντίθεση με τις εφελκυστικές, η προσομοίωση χωρίς τριβή είναι αυτή που παραμένει υπέρ της ασφαλείας και αποτελεί εδώ σημείο αναφοράς.

A.2.5. Αποτελέσματα : Εφελκυστικές δυνάμεις στα hold-downs

Ο πίνακας της Εικόνας A.16 συγκρίνει τις τιμές των μέγιστων εφελκυστικών δυνάμεων (που αντιστοιχούν σε ένα από τα hold-downs) ανά όροφο, για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής.



Εικόνα A.16: Μέγιστη εφελκυστική δύναμη που παραλαμβάνουν τα hold-downs ανά όροφο στο οκταώροφο προσομοίωμα όπως προκύπτουν από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στο πλαίσιο της διπλωματικής

Παρατηρείται από το διάγραμμα της Εικόνας A.16 πως οι δύο κλασικές μέθοδοι ανάλυσης τείνουν να υπερεκτιμούν τις εσωτερικές εφελκυστικές δυνάμεις των συνδέσμων στους πρώτους ορόφους, ενώ τις υποεκτιμούν στους δύο τελευταίους. Ωστόσο, με εξαίρεση τον όγδοο όροφο, η τάξη μεγέθους παραμένει συγκρίσιμη.

A.3. Συμπεράσματα

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάστηκε η έννοια της ισοδύναμης δυσκαμψίας σε κατασκευές από CLT και πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις σε προσομοίωμα οκτώ ορόφων, αντίστοιχο με αυτό του κεφαλαίου 4, με τις μεθόδους: στατική ανάλυση με ισοδύναμες οριζόντιες φορτίσεις και ιδιομορφική φασματική μέθοδος. Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν για δυσμενείς τιμές (ως προς τη φόρτιση που προκύπτει από το φάσμα σχεδιασμού) επιμέρους δυσκαμψιών (επιλογή του K_0) αλλά για ευμενή γραμμικοποίηση του ανασηκώματος των τοίχων (γραμμικοποίηση τύπου secant stiffness μέσω της ισοδύναμης κατανεμημένης δυσκαμψίας).

Οι αναλύσεις του παραρτήματος αυτού, λόγω του περιορισμένου πλήθους των προσομοιωμάτων και των συνθηκών προσομοίωσης, δεν θα μπορούσαν να αποτελέσουν κριτήριο, ούτε των προϋποθέσεων εφαρμογής, ούτε και της εγκυρότητας των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και της ισοδύναμης δυσκαμψίας. Για να

επιτευχθεί κάτι τέτοιο, είναι απαραίτητη η μελέτη πολύ περισσότερων προσομοιωμάτων και συνθηκών προσομοίωσης.

Μπορεί παρόλα αυτά να υποστηριχθεί ότι, για την κατασκευή που μελετάται, οι εν λόγω μέθοδοι, δίνουν αποτελέσματα συγκρίσιμα με τη δυναμική μέθοδο ανάλυσης με χρονοϊστορίες, και θα μπορούσαν κάλλιστα να χρησιμοποιηθούν για την προδιαστασιολόγηση στα αρχικά στάδια μιας μελέτης.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β : Χρονοϊστορίες

Στο παράρτημα αυτό παρουσιάζονται περαιτέρω πληροφορίες για τις σεισμικές διεγέρσεις, καθώς και τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν στη μη-γραμμική δυναμική ανάλυση. Όλες οι χρονοϊστορίες και οι πληροφορίες για τους σεισμούς βρέθηκαν στην διαδικτυακή βάση δεδομένων PEER Ground Motion Database NGA-West2 (Next Generation Attenuation) [Ancheta et al., 2014]. Οι πληροφορίες δίνονται στον πίνακα Β.1:

Πίνακας Β.1: Επιπρόσθετα χαρακτηριστικά των διεγέρσεων που επιλέχτηκαν									
Όνομασία σεισμού	Σεισμολογικός σταθμός	PGA unscaled για $T = 0.01s$ [g]	5 – 95%D [sec]	Ένταση Arias [m/sec]	M_w	R_{rup} [km]	$V_{s,30}$ [m/sec]	Lowest Useable Frequency [Hz]	Mechanism (Τύπος ρήγματος)
Imperial Valley-02	El Centro Array #9	0.2817	24.2	1.6	6.95	6.09	213.44	0.25	strike slip
Kern County	Taft Lincoln School	0.1603	30.3	0.6	7.36	38.89	385.43	0.125	Reverse
Borrego	El Centro Array #9	0.0662	37.2	0.1	6.5	56.88	213.44	0.125	strike slip
Parkfield	Cholame-Shandon Array #5	0.4541	7.5	0.9	6.19	9.58	289.56	0.1625	strike slip
Friuli_Italy-02	Buia	0.1103	10.2	0.2	5.91	11.03	310.68	0.25	Reverse
Managua_Nicaragua-01	Managua_ESSO	0.3720	10.6	2	6.24	4.06	288.77	0.375	strike slip
Kern County	LA - Hollywood Stor FF	0.0422	33.5	0.1	7.36	117.7	316.46	0.125	Reverse

Όπου,

Magnitude : Μέγεθος της ροπής.

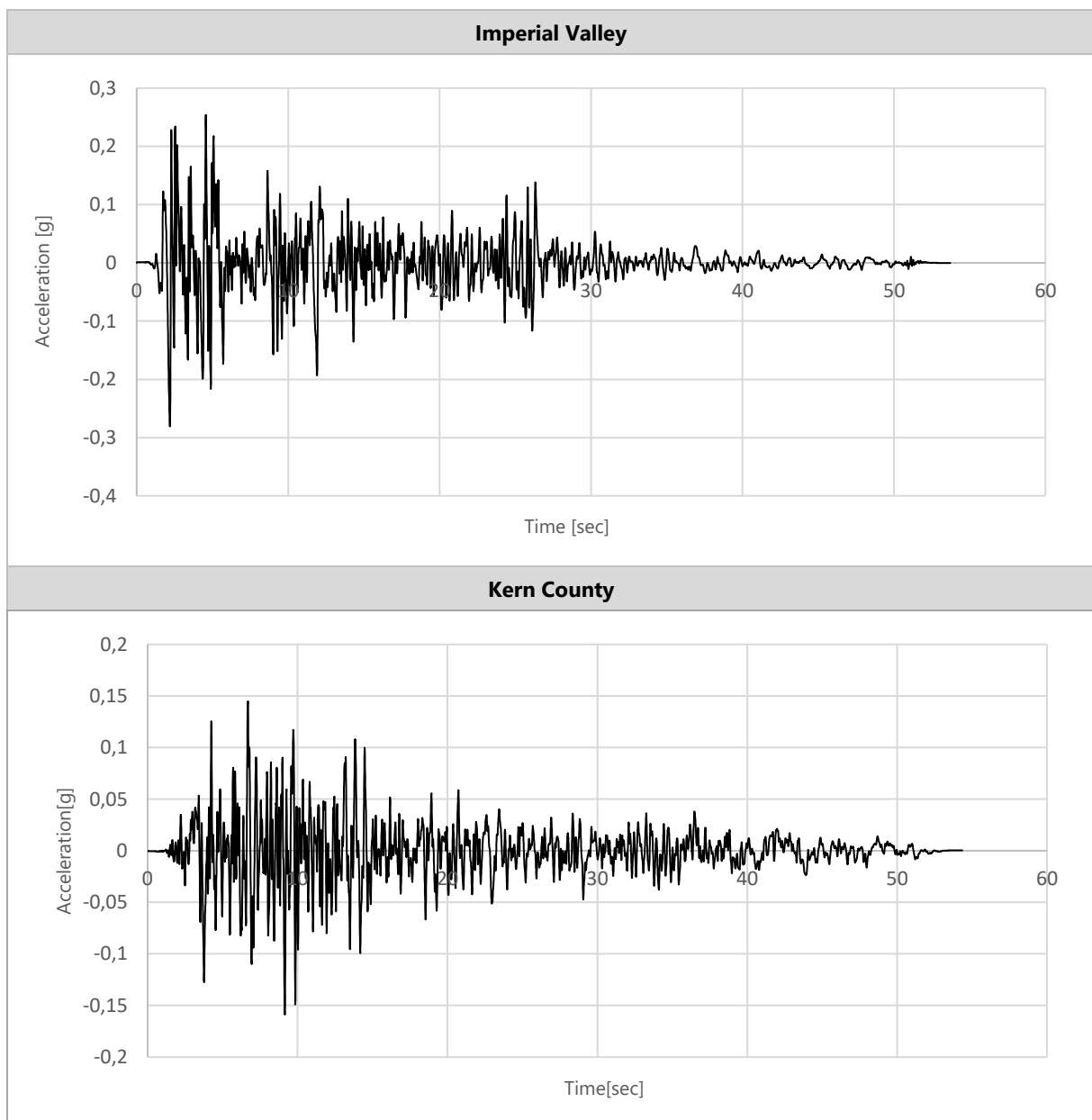
R_{rup} : Κοντινότερη απόσταση του καταγραφικού σταθμού από την επιφάνεια διάρρηξης.

V_{s30} : Η μέση ταχύτητα διάδοσης των διατμητικών κυμάτων στα ανώτερα 30 m του εδάφους.

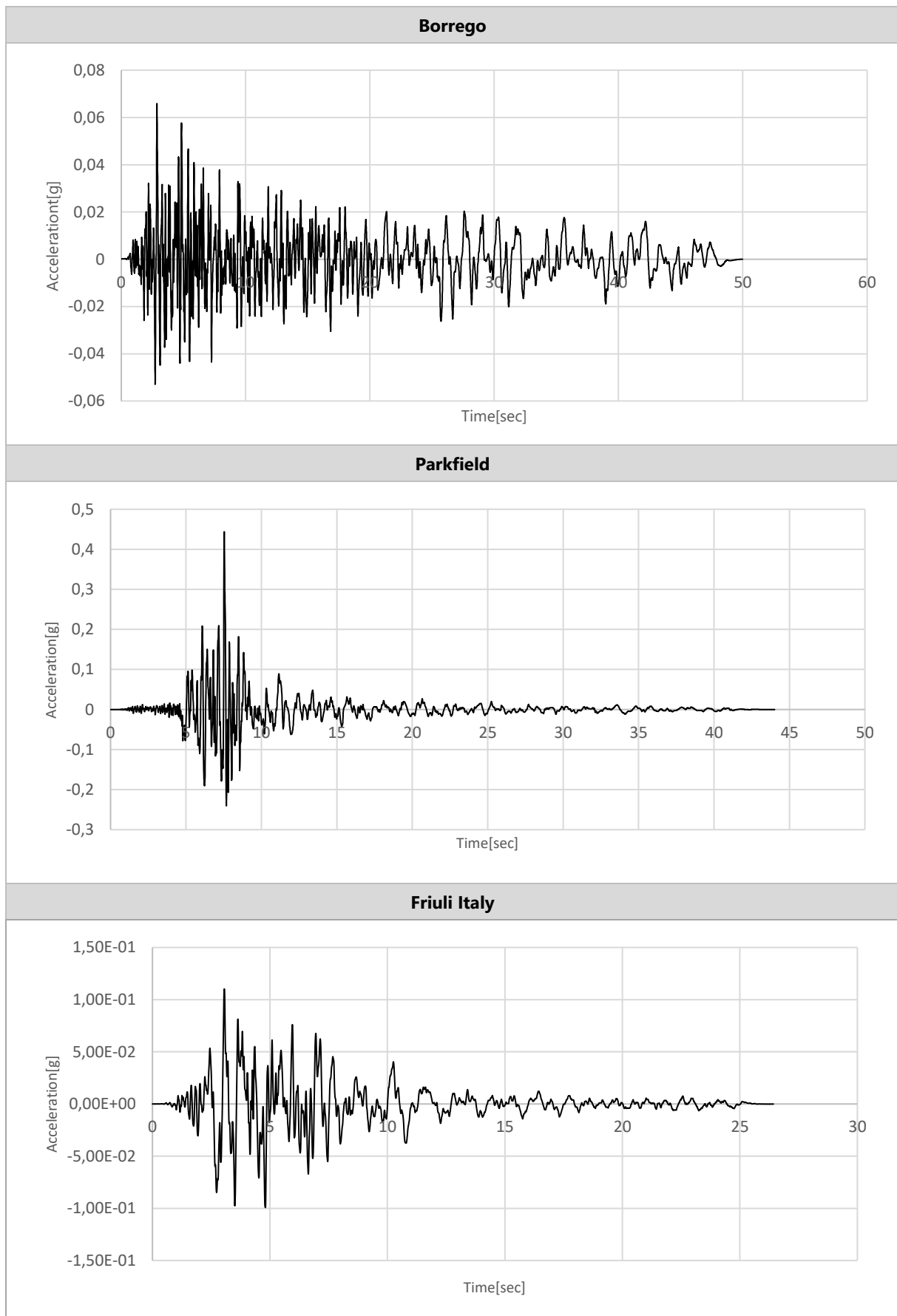
Lowest Useable Frequency : Η συνιστώμενη προς χρήση χαμηλότερη συχνότητα της καταγραφής.

5-95%D : Σημαντική διάρκεια. Ο χρόνος που απαιτείται για τη δημιουργία μεταξύ 5% και 95% της συνολικής έντασης Arias.

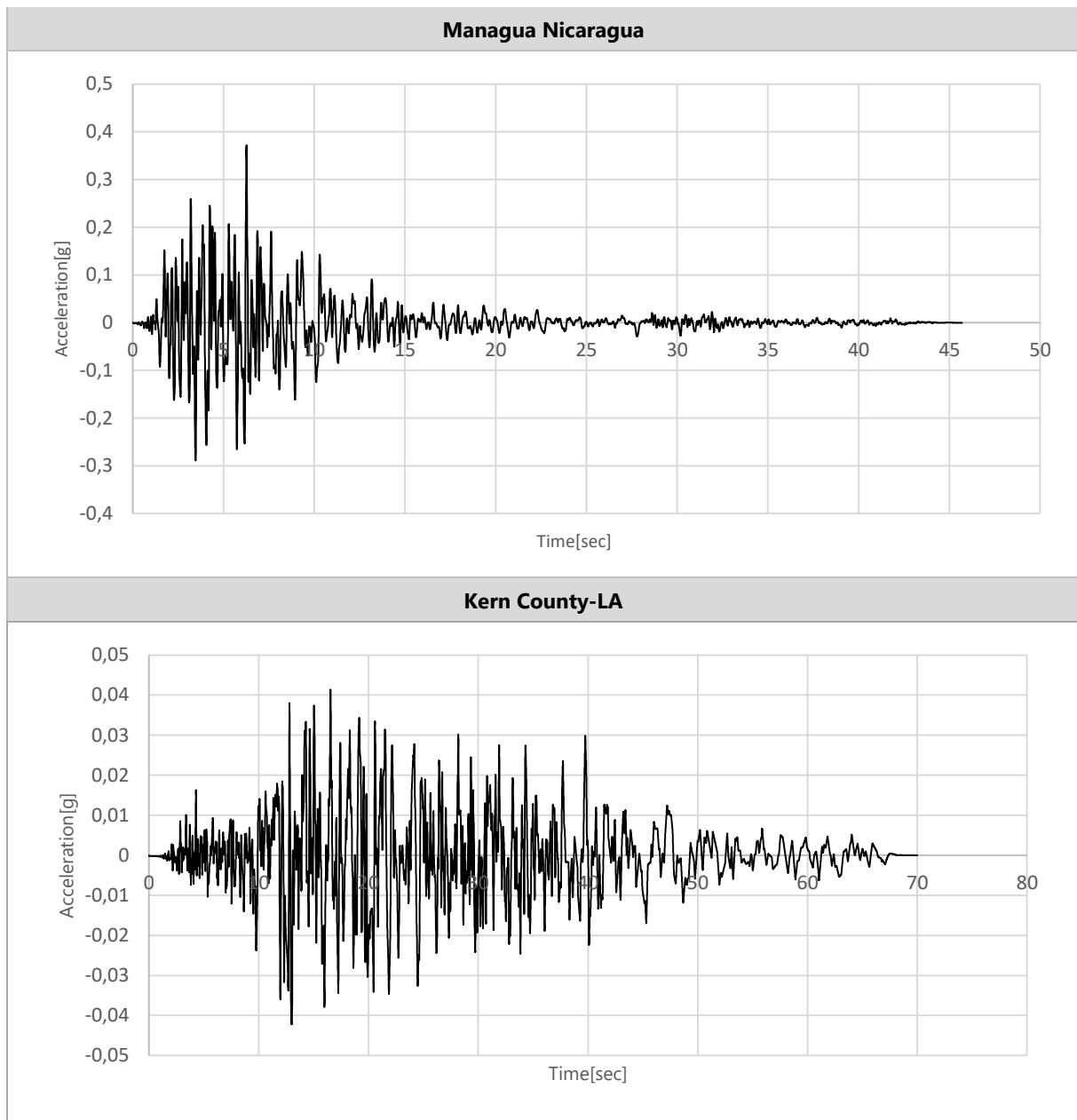
Παρακάτω φαίνονται τα επιταχυνσιογραφήματα των σεισμών που επιλέχθηκαν:



Εικόνα Β.1: Χρονοϊστορίες των διεγέρσεων Imperial Valley και Kern County πριν πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές κλίμακας



Εικόνα Β.2: Χρονοϊστορίες των διεγέρσεων Borrego, Parkfield και Friuli πριν πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές κλίμακας



Εικόνα Β.3: Χρονοϊστορίες των διεγέρσεων Managua και Kern County-LA πριν πολλαπλασιαστούν με τους συντελεστές κλίμακας

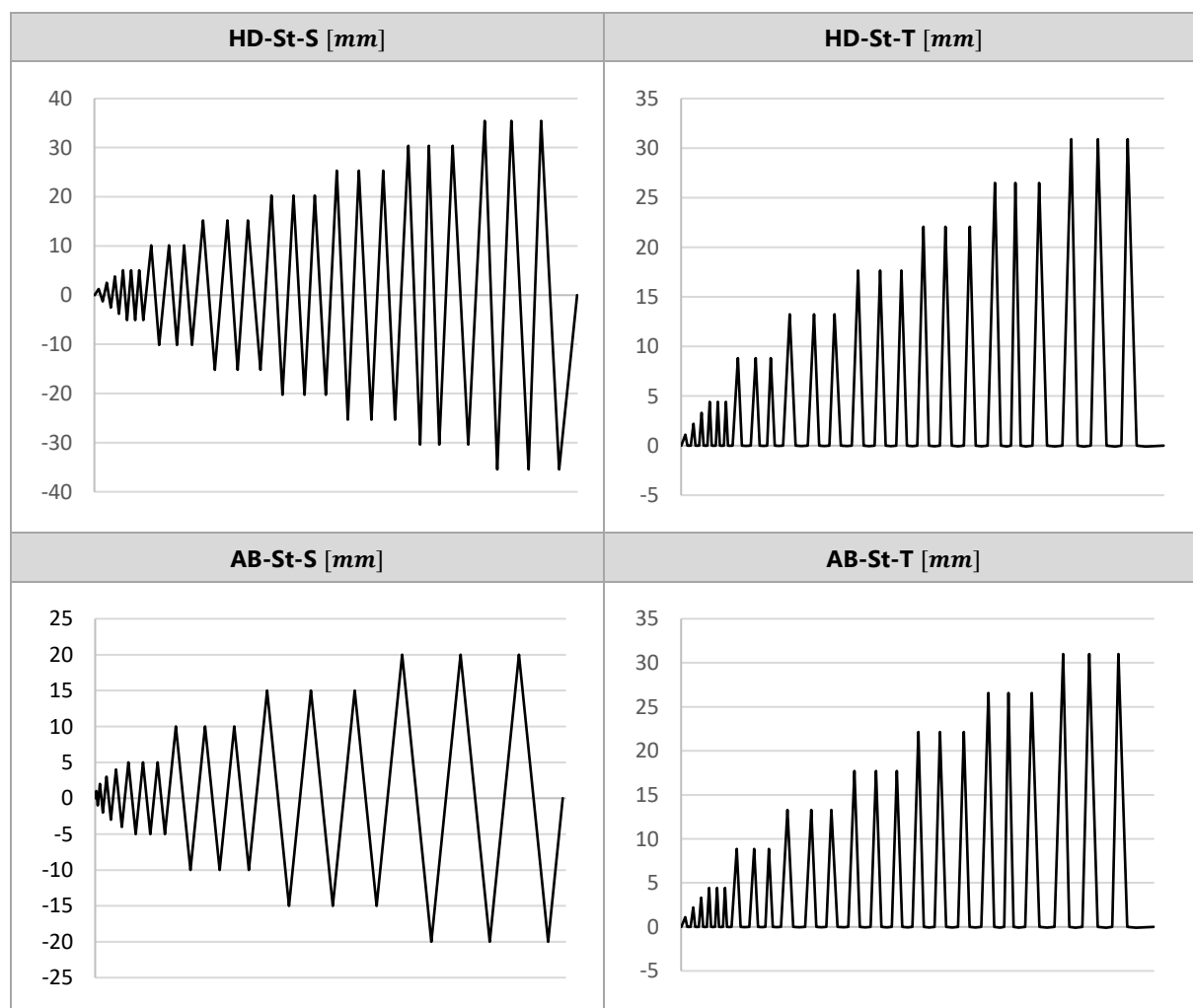
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ : Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις

Γ.1. Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στα προσομοιώματα των συνδέσμων

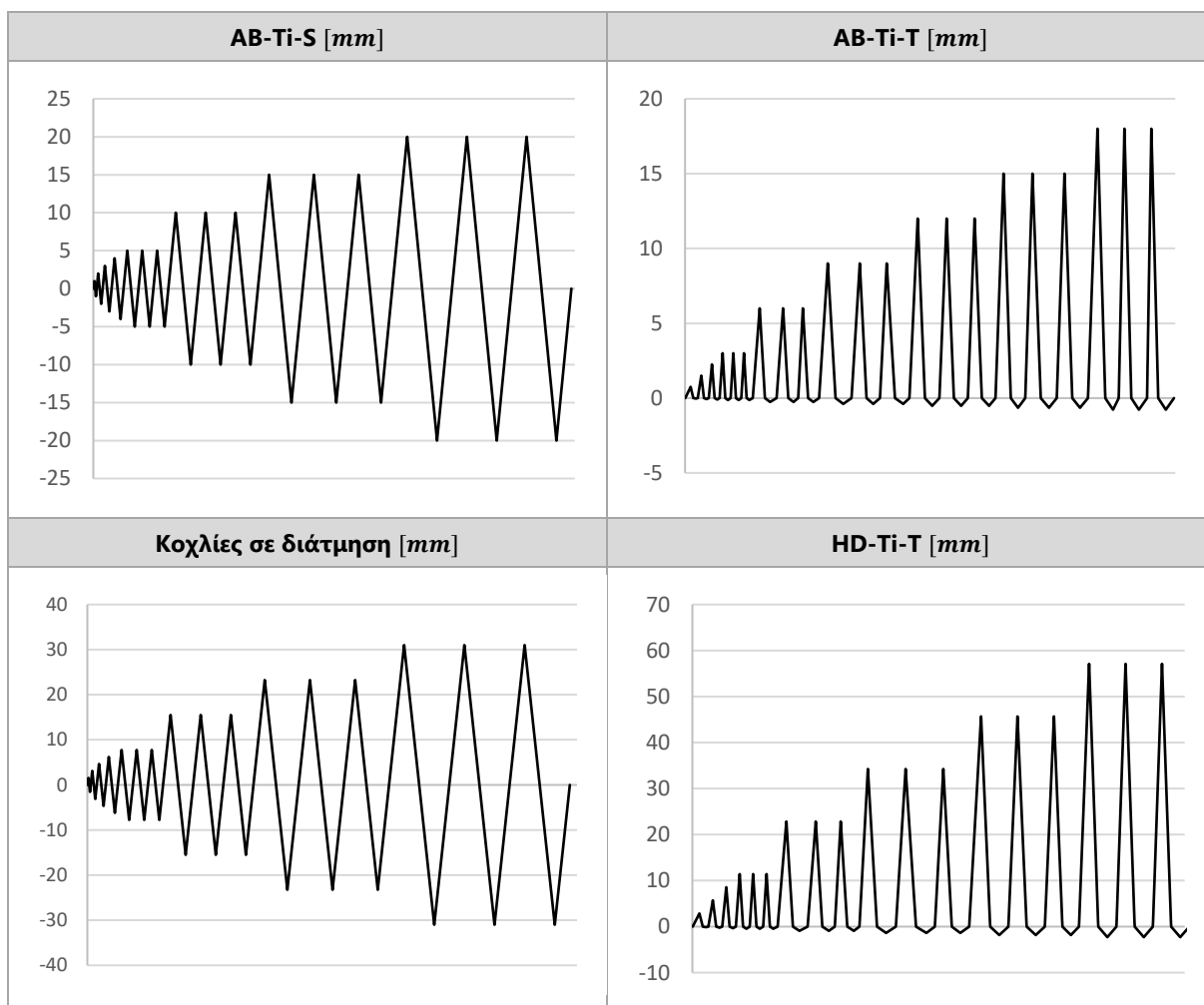
Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν κατά την αναπαραγωγή των πειραμάτων στους μεταλλικούς συνδέσμους. Οι μετατοπίσεις των πειραμάτων ήταν βασισμένες είτε στο διεθνές πρωτόκολλο [ISO 16670], είτε στο [EN12512, 2001]. Οι κωδικοί ονομασίας έχουν ληφθεί από το σχετικό ερευνητικό πρόγραμμα Optimberquake [Seim et al., 2013a], όπου :

Πίνακας Γ.1: Βασικά σύμβολα κωδικοποίησης της ονομασίας των πειραμάτων					
HD	AB	St	Ti	S	T
Hold-down	Angle bracket	Χάλυβας (steel)	CLT (timber)	Διάτμηση (sliding)	Εφελκυσμός (traction)

Στα ελατήρια θλίψης-εφελκυσμού (T) επιβλήθηκαν μικρές θλιπτικές μετατοπίσεις, καθώς η συμπεριφορά του στοιχείου σε θλίψη είναι ελαστική με πολύ μεγάλες δυσκαμψίες. Οι θλιπτικές μετατοπίσεις ισούνταν με το 0.3% και το 4% της μετατόπισης κατά το πρωτόκολλο, για χαλύβδινη και ξύλινη βάση αντίστοιχα. Εδώ η ταχύτητα φόρτισης δεν είχε πρακτική σημασία, γιατί κατά την προσομοίωση τα στοιχεία δεν είχαν μάζα.



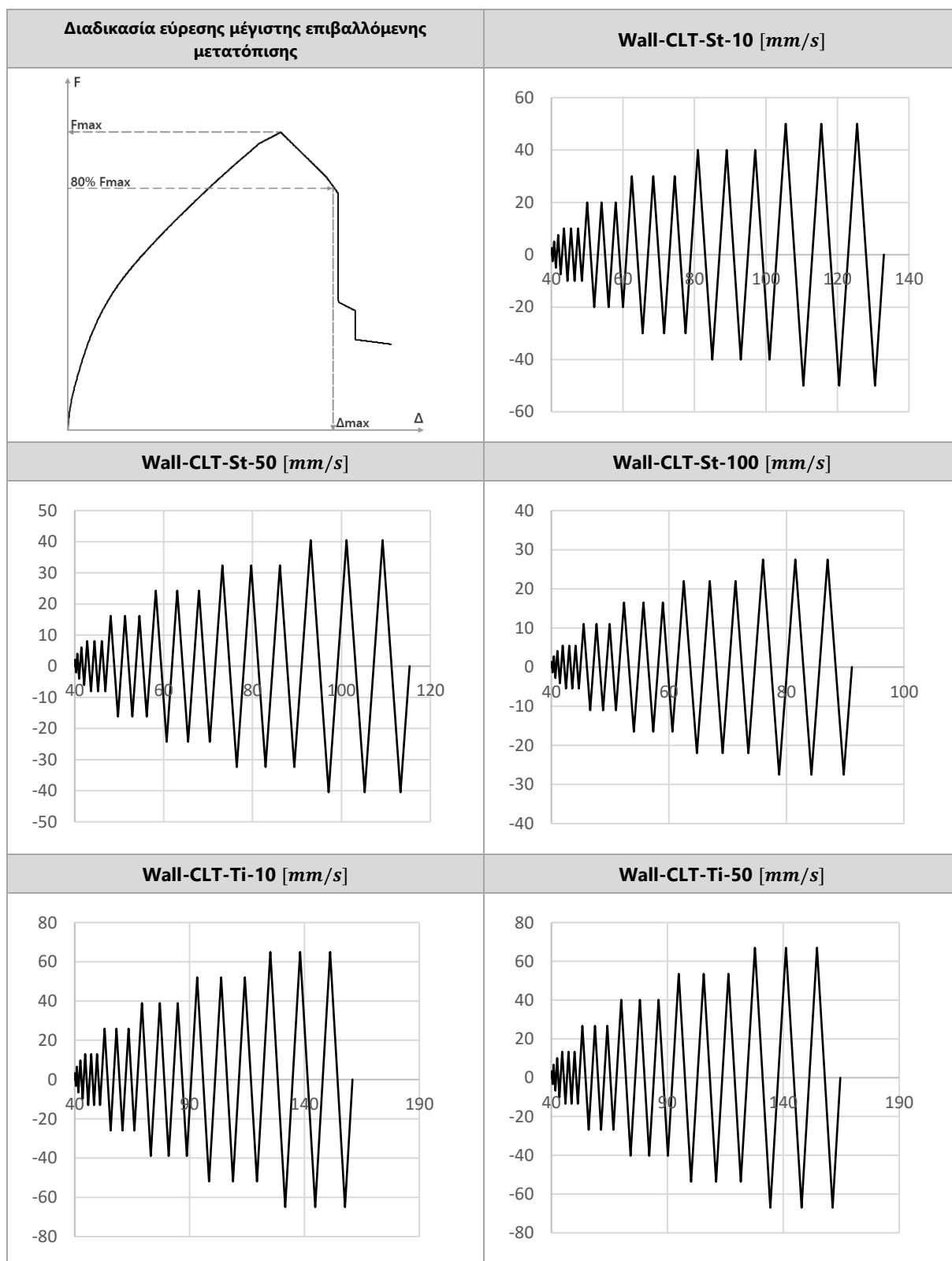
Εικόνα Γ.1: Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις κατά την προσομοίωση των πειραμάτων στους συνδέσμους, με διατάξεις HD-St-S, HD-St-T, AB-St-S και AB-St-T



Εικόνα Γ.2: Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις κατά την προσομοίωση των πειραμάτων στους συνδέσμους, με διατάξεις AB-Ti-S, AB-Ti-T, HD-Ti-T και αυτοκοχλιούμενων κοχλιών σε διάτμηση

Γ.2. Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις στα προσομοιώματα των τοίχων

Παρακάτω παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις που επιβλήθηκαν κατά την αναπαραγωγή των πειραμάτων στους τοίχους από CLT. Οι μετατοπίσεις των πειραμάτων ήταν βασισμένες στο διεθνές πρωτόκολλο [ISO 21581]. Καθώς τα προσομοιώματα «αστοχούσαν» για μικρότερη σχετική μετατόπιση από αυτή που μετρήθηκε στους τοίχους των πειραμάτων, η μέγιστη επιβαλλόμενη μετατόπιση των ανακυκλικών φορτίσεων στα προσομοιώματα ήταν της τάξεως του 80% της μετατόπισης αστοχίας από μονοτονική φόρτιση. Τα κατακόρυφα φορτία επιβάλλονταν πάντα σε χρονική διάρκεια 40sec και στη συνέχεια η επιβολή των μετατοπίσεων γίνονταν με ταχύτητα 20 mm/sec.

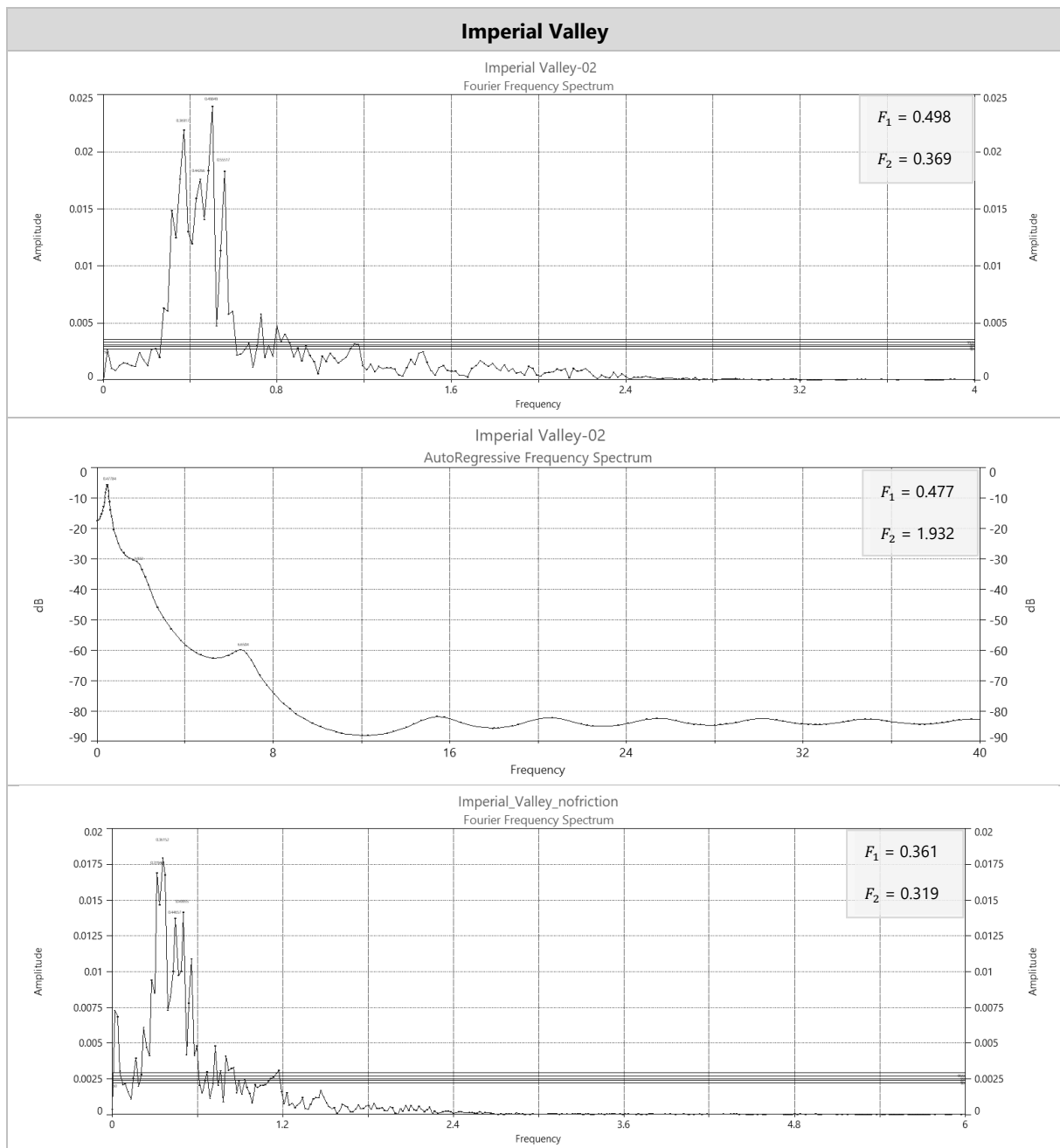


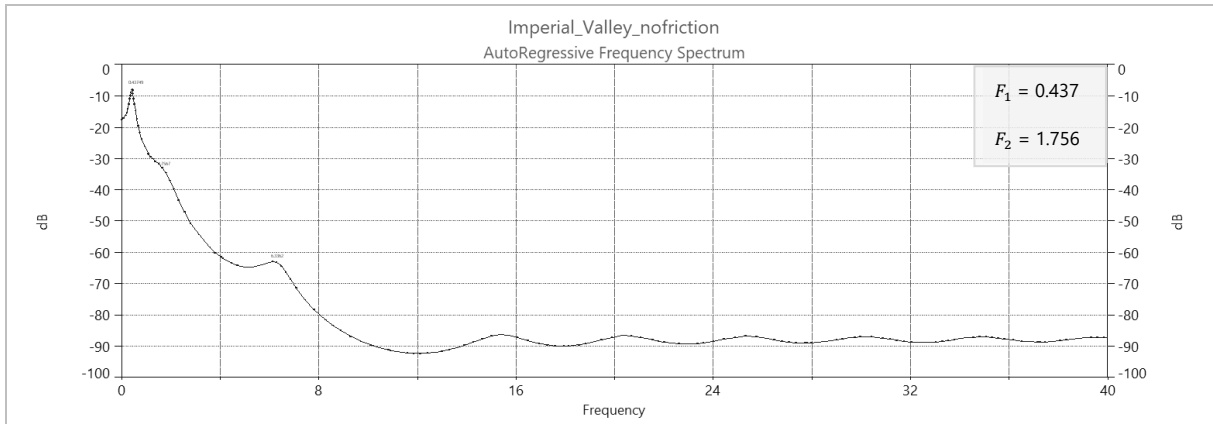
Εικόνα Γ.3: Επιβαλλόμενες μετατοπίσεις κατά την προσομοίωση των πειραμάτων στα πάνελ με διατάξεις Wall-CLT-Ti-10, Wall-CLT-Ti-50, Wall-CLT-St-10, Wall-CLT-St-50 και Wall-CLT-St-100

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ : Εκτίμηση σημαντικότερων περιόδων ταλάντωσης

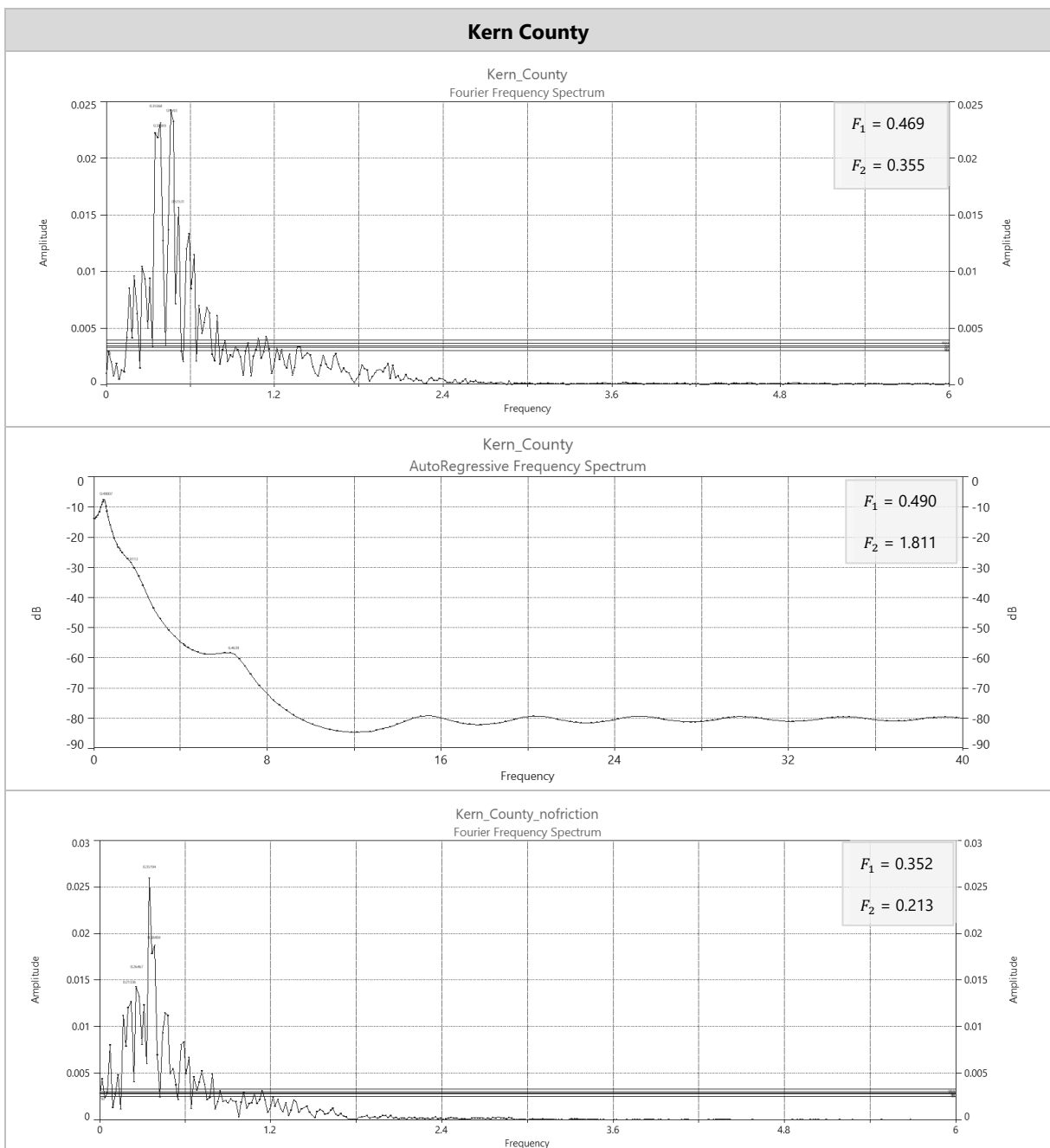
Οι περίοδοι ταλάντωσης του οκταώροφου προσομοιώματος για κάθε σεισμική διέγερση προσεγγίστηκαν από φάσματα. Η μέθοδος αυτή είναι απλή και πολύ πιθανό να υπάρχουν ακριβέστερες, αποτελεί όμως έναν δείκτη επιρροής των δυνάμεων τριβής στην καθολική απόκριση. Τα φάσματα προέκυψαν με διακριτό μετασχηματισμό Fourier (DFT) και αυτοπαλινδρομική μέθοδο (AR) στις συναρτήσεις σχετικής μετατόπισης και της επιτάχυνσης του σημείου κορυφής, του οκταώροφου προσομοιώματος, για τα αποτελέσματα με και χωρίς τριβή. Η ανάλυση Fourier έγινε με γρήγορο μετασχηματισμό (Fast Fourier Transform). Το φάσμα που γεννάται με αυτοπαλινδρομική μέθοδο είναι μια εξομαλυμένη εκδοχή του συχνοτικού περιεχομένου της κίνησης. Το φάσμα AR μοντελοποιεί μία δεδομένη τιμή με ένα γραμμικό συνδυασμό προηγούμενων και επακόλουθων τιμών. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε είναι ο SVD FB (Singular value decomposition, forward and backward predictions). Ο αλγόριθμος μοιάζει με αυτοπαλινδρομική μέθοδο και ανάλυση κύριων συνιστωσών (PCAR). Η τάξη του αυτοπαλινδρομικού μοντέλου επιλέχθηκε να είναι 40. Οι αναλύσεις έγιναν με το λογισμικό AutoSignal.

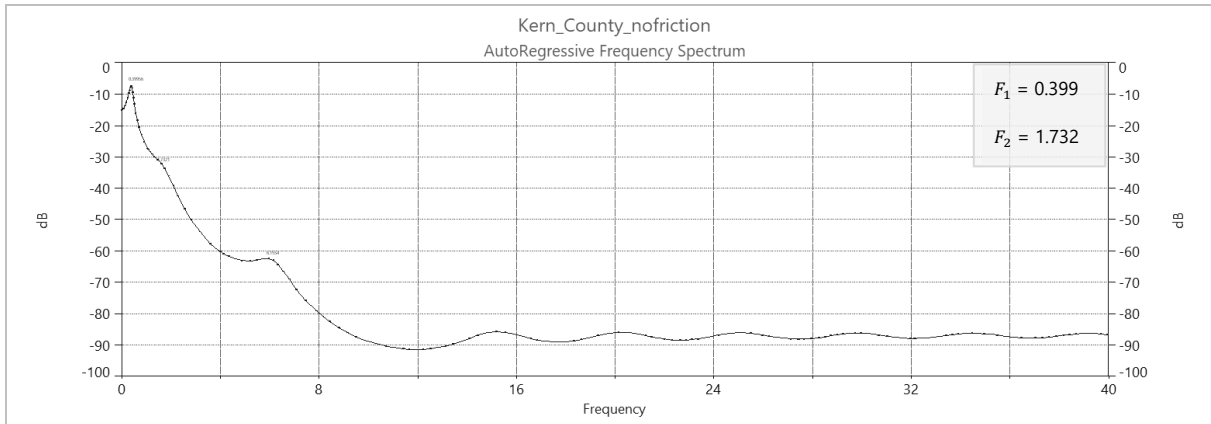
Παρακάτω παρουσιάζονται τα φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής των επτά διεγέρσεων στο οκταώροφο προσομοίωμα για αναλύσεις με και χωρίς τριβή. Σημειώνονται οι κορυφές των φασμάτων.



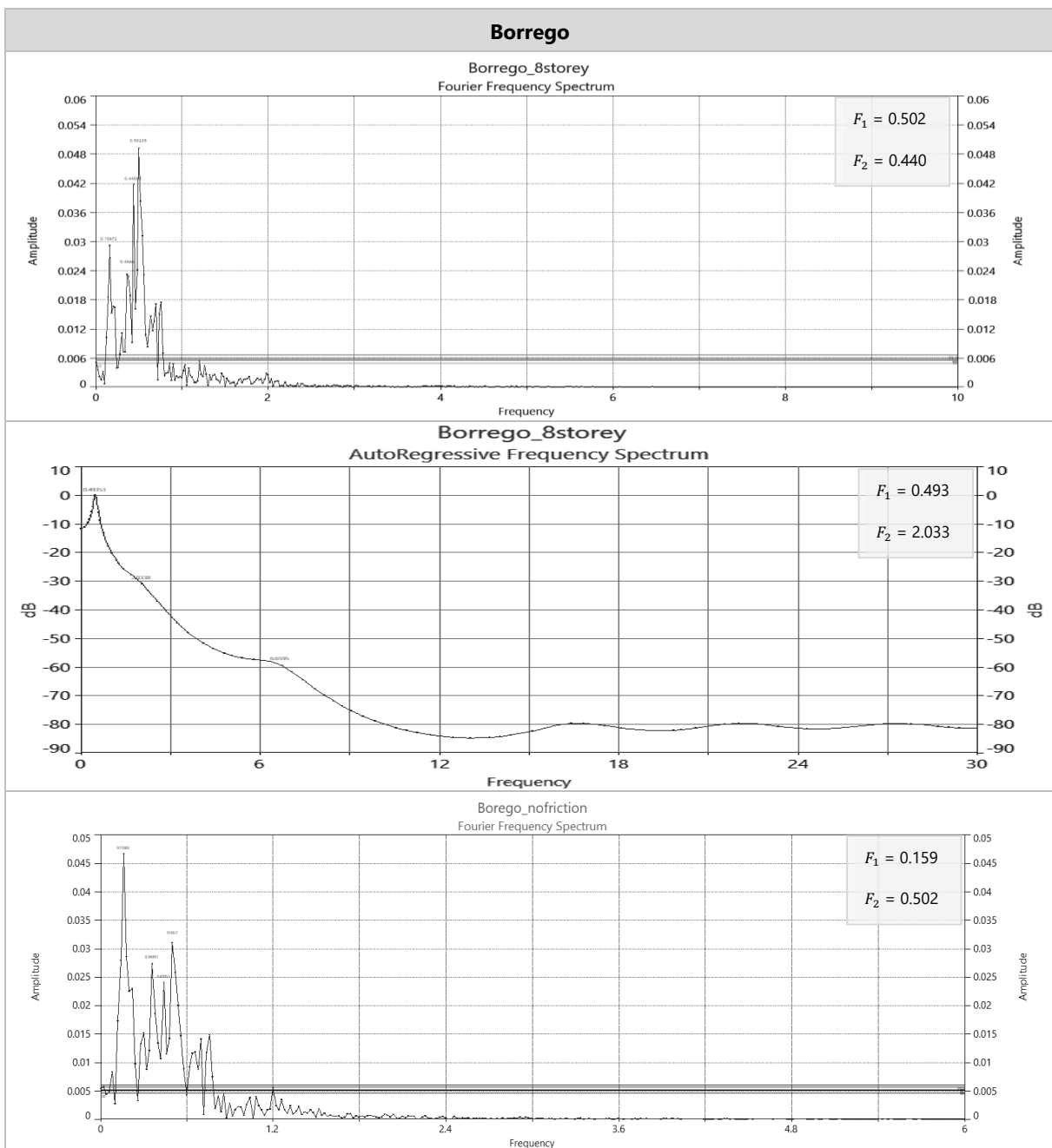


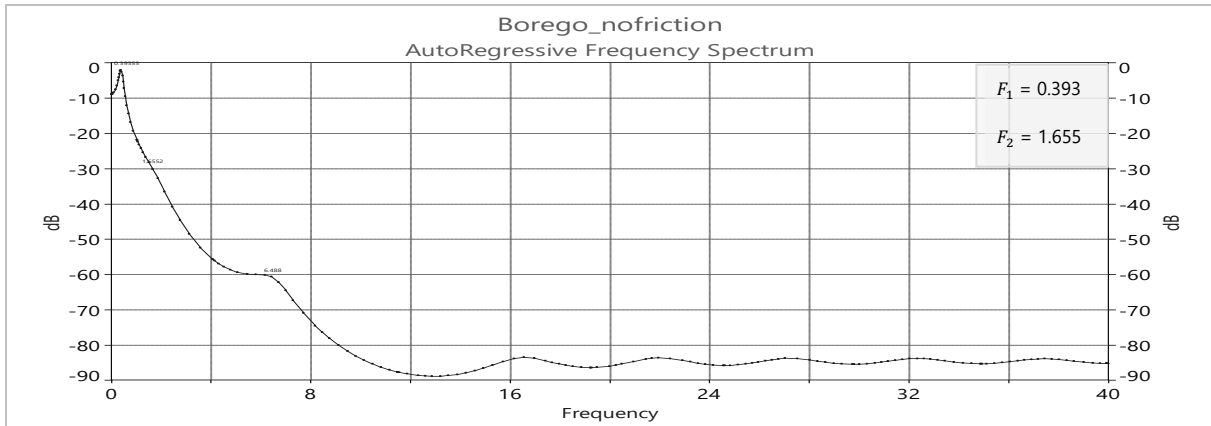
Εικόνα Δ.1: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Imperial Valley στο οκτώροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)



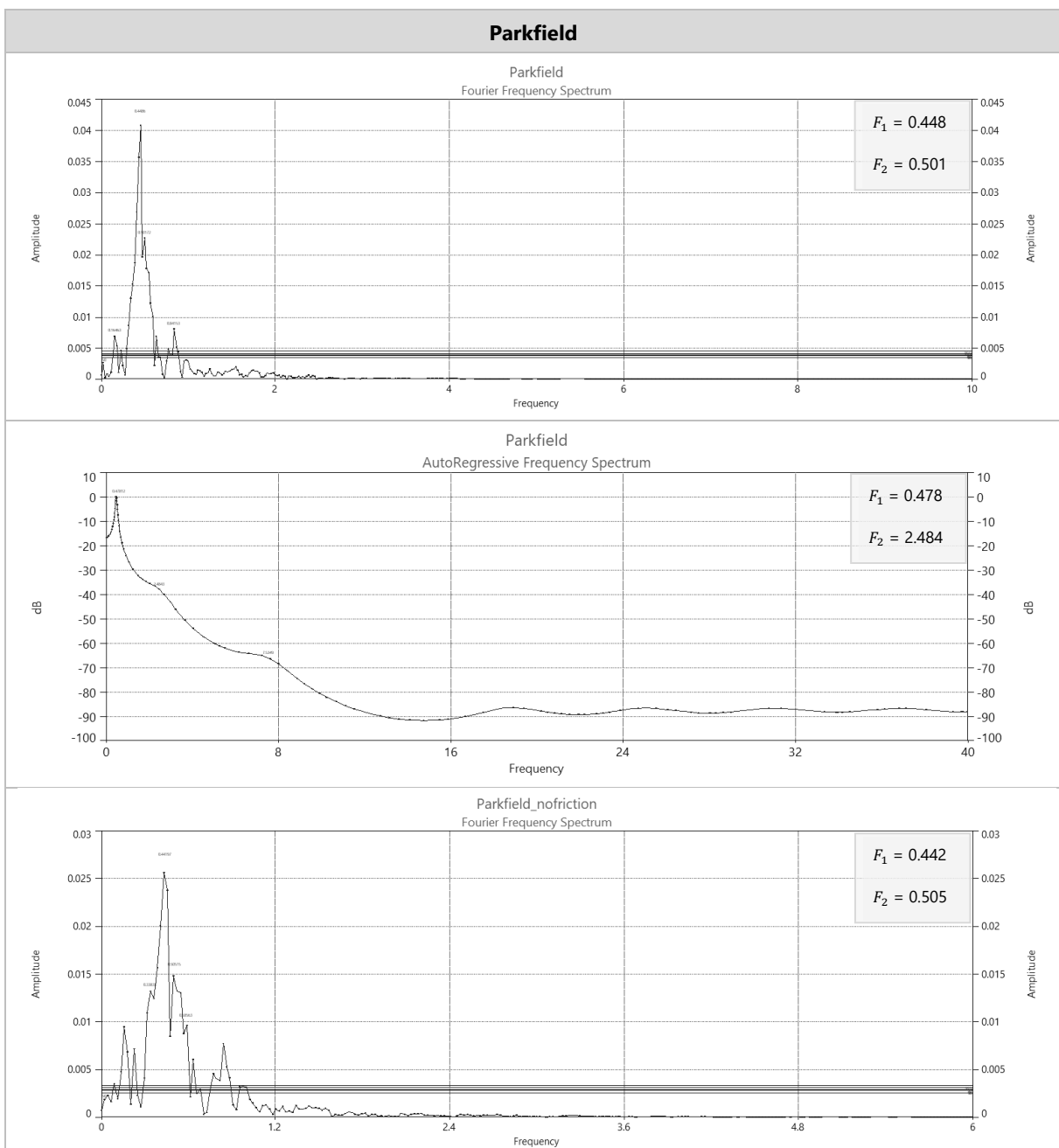


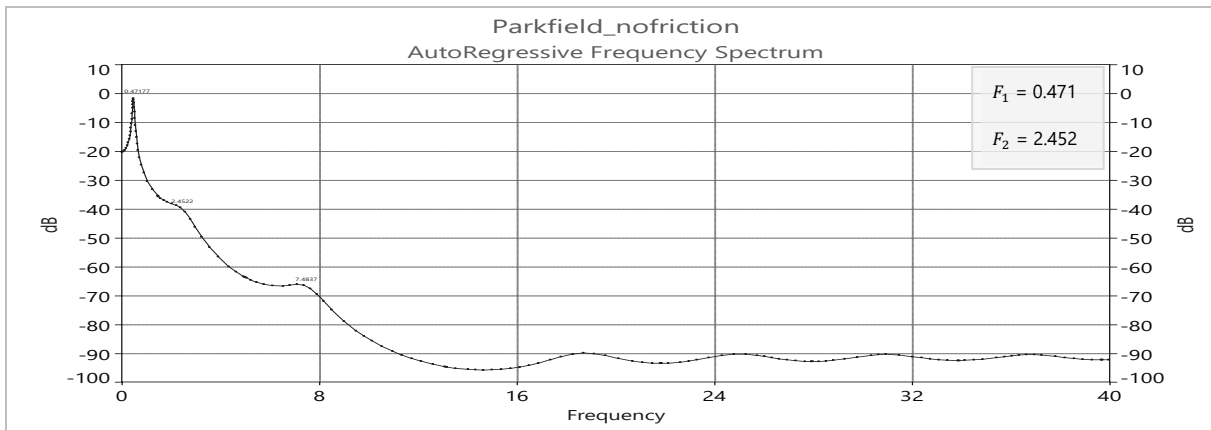
Εικόνα Δ.2: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Kern County στο οκταώροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)



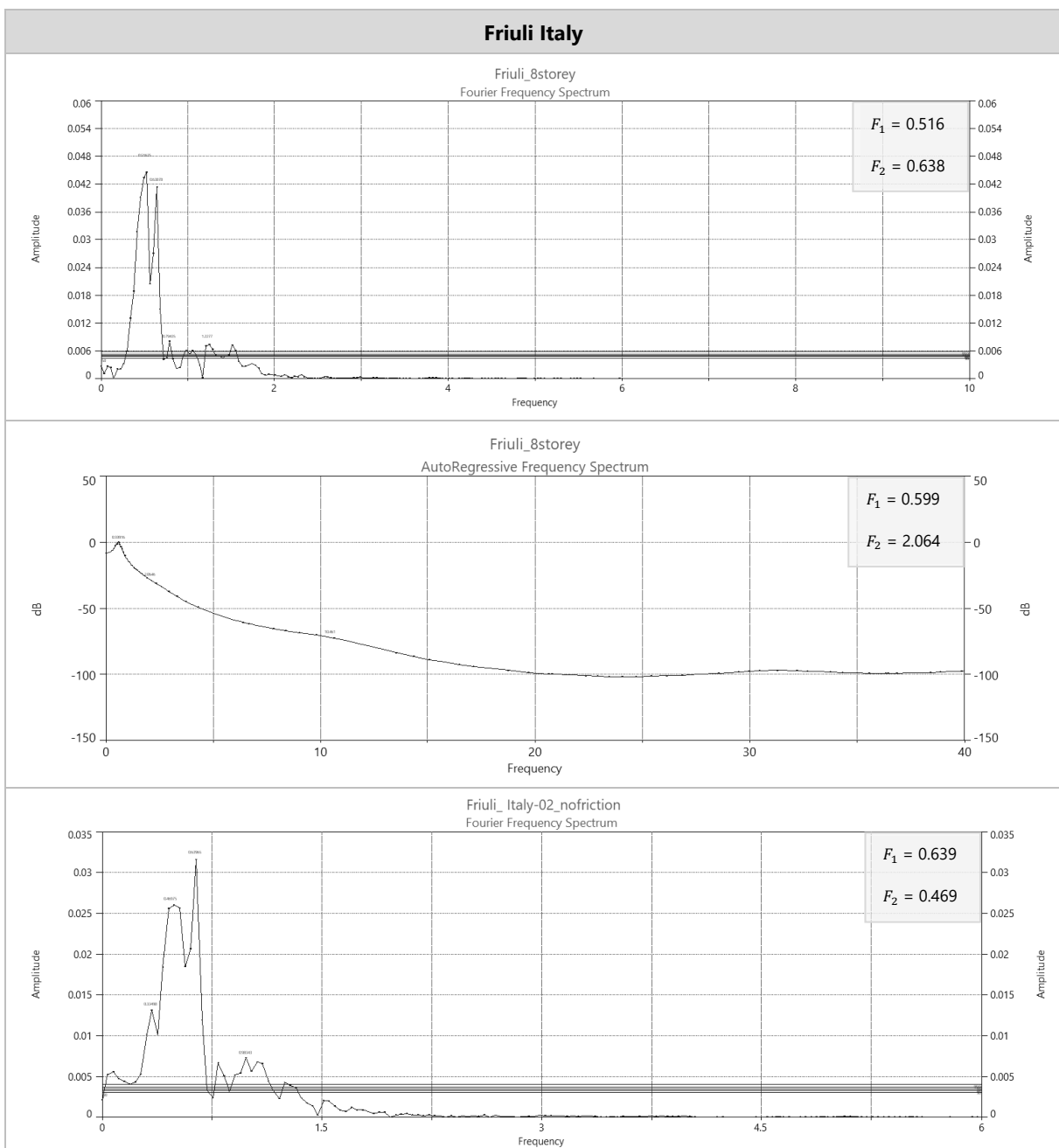


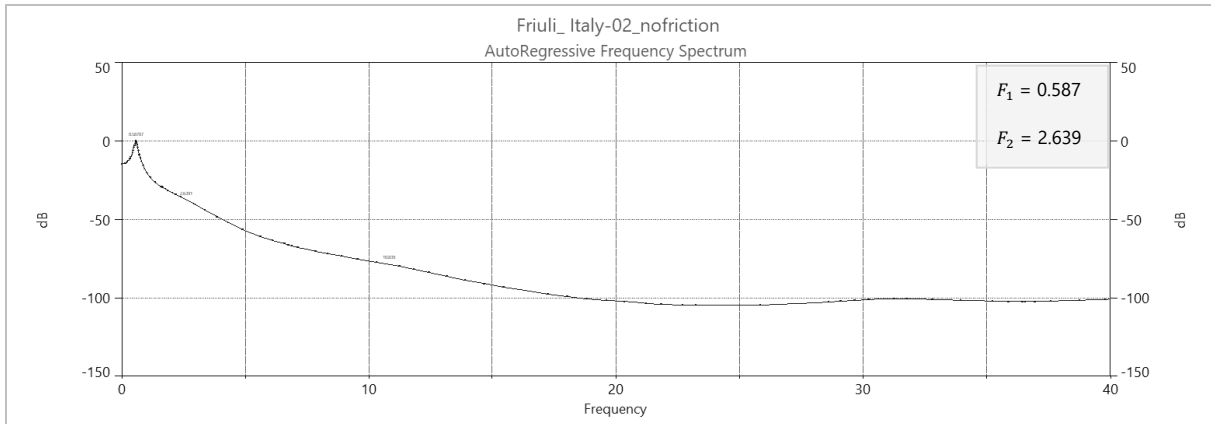
Εικόνα Δ.3: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Borego στο οκταώροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)



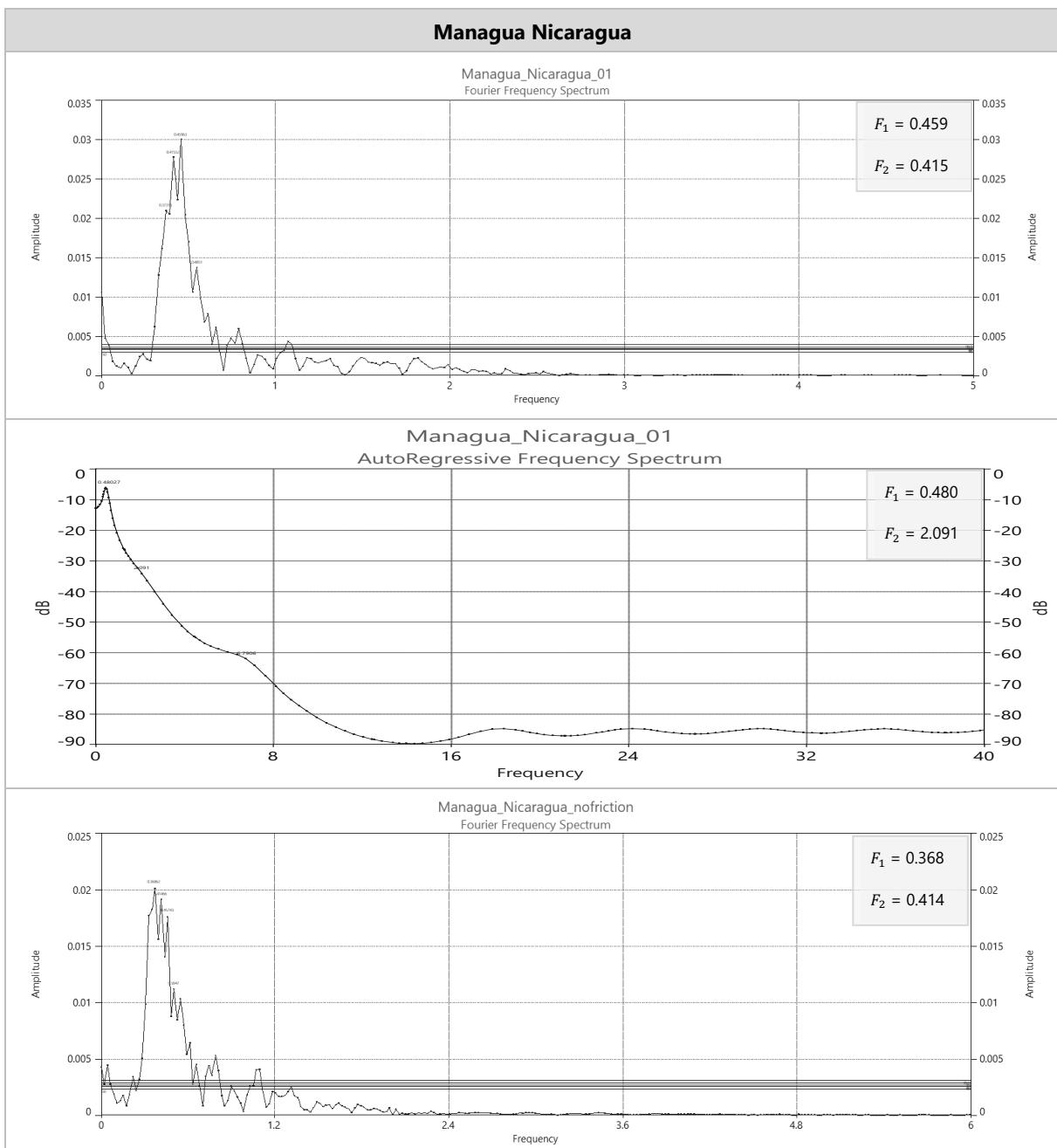


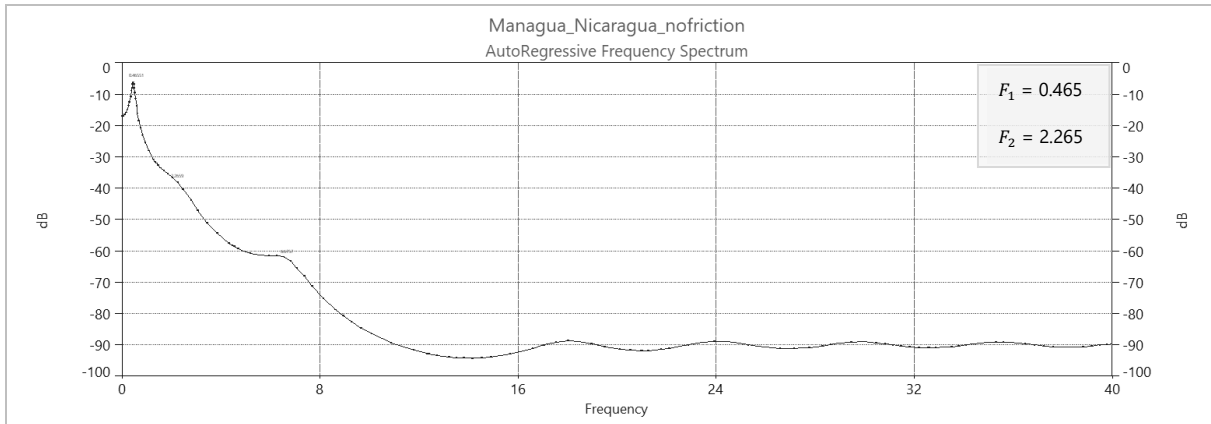
Εικόνα Δ.4: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Parkfield στο οκταώροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)



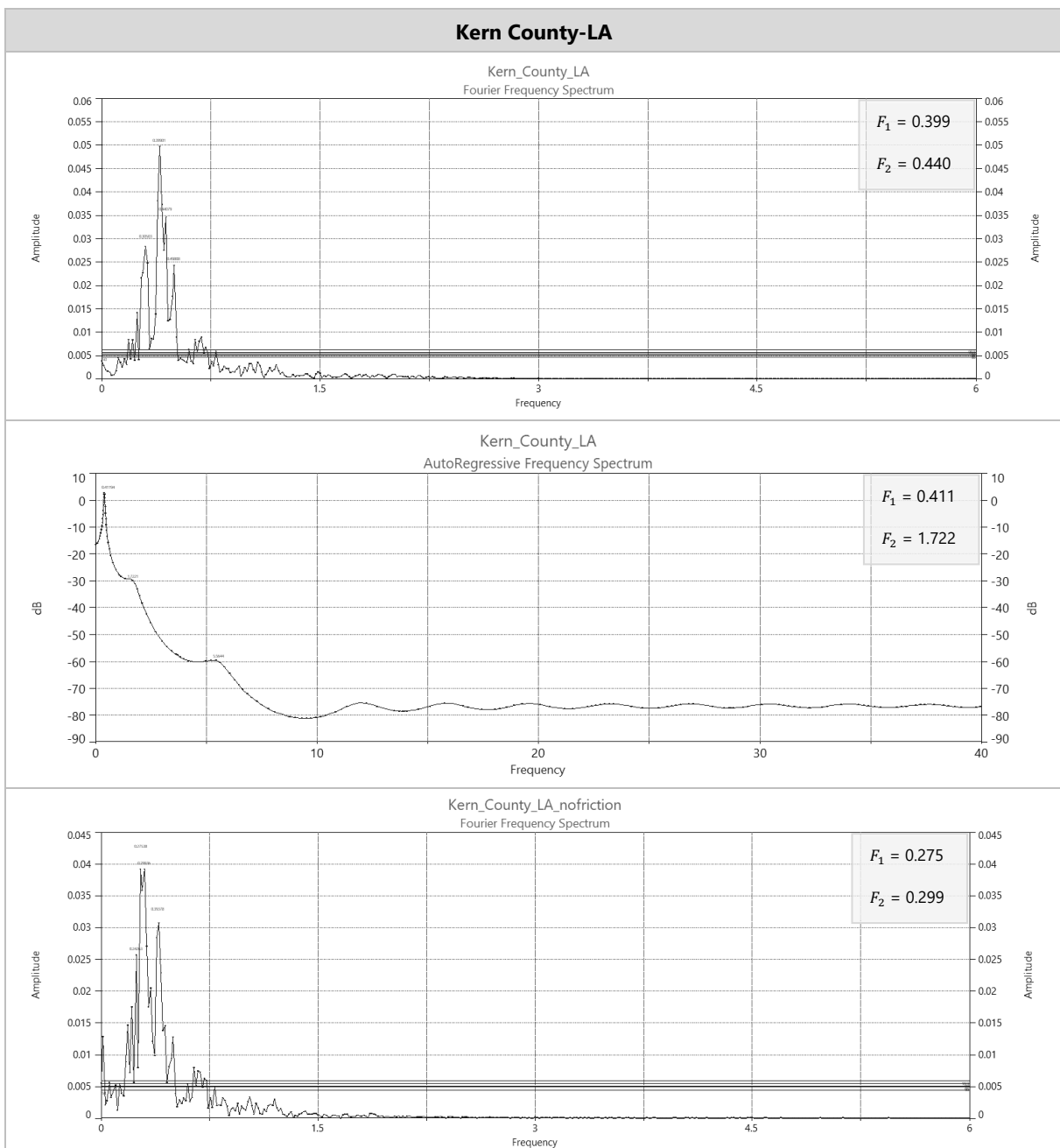


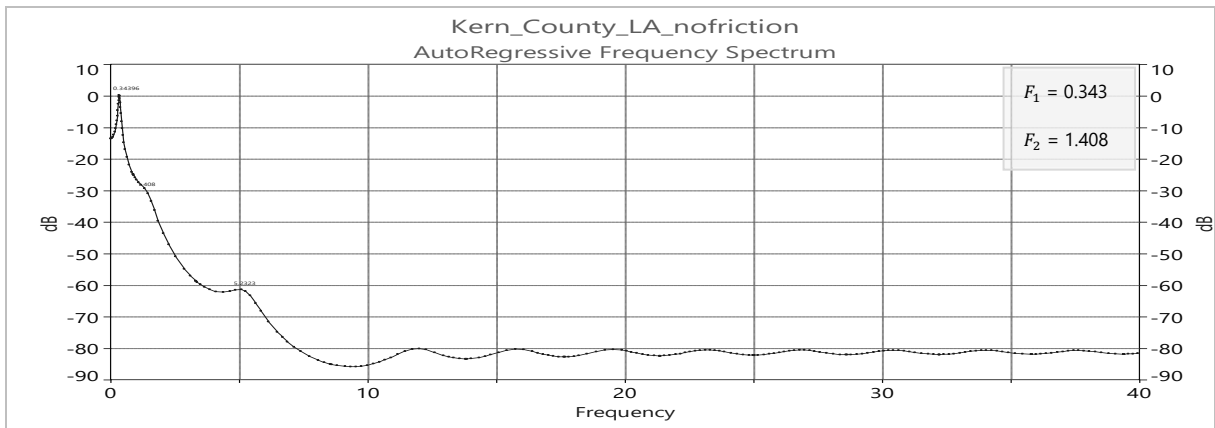
Εικόνα Δ.5: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Friuli στο οκτώροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)





Εικόνα Δ.6: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Managua στο οκτάωροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)





Εικόνα Δ.7: Φάσματα σχετικής μετατόπισης κορυφής για τη διέγερση Kern County-LA στο οκτώροφο προσομοίωμα: Fourier (με τριβή), AR (με τριβή), Fourier (χωρίς τριβή), AR (χωρίς τριβή)

Βιβλιογραφία

- [Ancheta et al., 2014] Ancheta, T. D.; Darragh, R. B.; Stewart, J. P.; Seyhan, E.; Silva, W. J.; Chiou, B. S.; Wooddell, K. E.; Graves, R. W.; Kottke, A. R.; Boore, D. M.; Kishida, T. and Donahue, J. L. (2014). PEER Ground Motion Database. Edited by S. Mazzoni; J. Way. url: http://peer.berkeley.edu/products/strong_ground_motion_db.html.
- [Apostolou et al. 2007] Apostolou, M. ; Gazetas, G. and Garini, E. (2007). Seismic response of slender rigid structures with foundation uplift. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. 27. 642-654. 10.1016/j.soildyn.2006.12.002.
- [Avgenakis et al. 2017] Avgenakis, E. and Psycharis, I. (2017). Modeling of Rocking Elastic Flexible Bodies under Static Loading Considering the Nonlinear Stress Distribution at Their Base. *Journal of Structural Engineering*. 143. 04017051. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001783.
- [Ba Do, 2005] Ba Do, N. (2005). Modeling of Frictional Contact Conditions in Structures. Georgia Institute of Technology, August, 2005
- [Bachmann et al. 2017] Bachmann, J.; Strand, M.; Vassiliou, M.; Broccardo, M. and Stojadinovic, B. (2017). Is rocking motion predictable?. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 47. 10.1002/eqe.2978.
- [EJ Berger, 2002] Berger, Ej. (2002). Friction modeling for dynamic system simulation. *Applied Mechanics Reviews - APPL MECH REV*. 55. 10.1115/1.1501080.
- [Casagrande et al, 2015] Casagrande, D.; Rossi, S.; Sartori, T. and Tomasi, R. (2015). Proposal of an analytical procedure and a simplified numerical model for elastic response of single-storey timber shear-walls. *Construction and Building Materials*. 102. 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.114.
- [Ceccotti et al., 1989] Ceccotti, A., and Vignoli, A. (1989). "A Pinching Hysteretic Model for Semirigid Joints" *European Earthquake Engineering Journal*, Bologna, Italy
- [Cecotti et all, 2006a] Ceccotti, A. and Follesa, M. (2006). Seismic behaviour of multi-storey X-lam buildings. COST E29 International Workshop on Earthquake Engineering on Timber Structures., pages 81–95.
- [Cecotti et all, 2006b] Ceccotti, A.; Follesa, M.; Lauriola, M. and Sandhaas, C. (2006). Sofie Project – Test results on the lateral resistance of cross-laminated wooden panels. *Proceedings of the First European Conference on Earthquake Engineering and Seismicity*. Volume 3.
- [Ceccotti et al., 2013] Ceccotti, A.; Sandhaas, C.; Okabe, M.; Yasumura, M.; Minowa, C.; and Kawai, N.; (2013). SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 42. 10.1002/eqe.2309.
- [Chopra, 1995] Chopra, A. K. (1995). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Edited by W. J. Hall. Prentice hall international series in civil engineering and engineering mechanics. Prentice Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [Demirci et al., 2017] Demirci, C.; Málaga-Chuquitaype, C. and Macorini, L. (2017). Seismic drift demands in multi-storey cross-laminated timber buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 10.1002/eqe.3003.

- [Dimitrakopoulos et al., 2012] Dimitrakopoulos, E.; Dejong, M.; (2012). Revisiting the rocking block: Closed-form solutions and similarity laws. Royal Society of London Proceedings Series A. 468. 2294-2318. 10.1098/rspa.2012.0026.
- [Dolan et al., 1992] Dolan, J. D., and Madsen, B. (1992). "Monotonic and cyclic nail connection tests." *Can. J. Civ. Engrg.*, Ottawa, 19(1), 97–104.
- [Flatscher et al., 2011] Flatscher, G. and Schickhofer, G. (2011). Verbindungstechnik in BSP bei monotoner und zyklischer Beanspruchung – Statusbericht TUGraz. 9.Grazer Holzbau- Fachtagung, TU Graz, Austria
- [Follesa et al., 2013] Follesa, M.; Christovasilis, I.; Vassallo, D.; Fragiaco, M. and Ceccotti, A. (2013). Seismic design of multi-storey cross laminated timber buildings according to Eurocode 8. *Ingegneria Sismica*. 30. 27-53.
- [Folz and Filiatrault, 2000] Folz, B., and Filiatrault, A. (2000). "CASHEW—Version 1.0: A computer program for cyclic analysis of wood shear walls." Rep. No. SSRP- 2000/10, Structural Systems Research Project, Dept. of Structural Engineering, Univ. of California, San Diego, La Jolla, Calif.
- [Folz and Filiatrault, 2001a] Folz, B., and Filiatrault, A. (2001). "Cyclic analysis of wood shear walls." *J. Struct. Eng.*, 127~4!, 433–441
- [Folz and Filiatrault, 2001b] Folz, B., and Filiatrault, A. (2001). SAWS - Version 1.0, A Computer Program for the Seismic Analysis of Woodframe Structures. Structural Systems Research Project Report No. SSRP-2001/09. Department of Structural Engineering, UCSD, La Jolla, CA.
- [Folz and Filiatrault, 2002] Folz, B., and Filiatrault, A. (2002). A computer program for seismic analysis of woodframe structures. Richmond, Calif.: Consortium of Universities for Research in Earthquake Engineering.
- [Folz and Filiatrault, 2004a] Folz, B. and Filiatrault, A. (2004). Seismic analysis of woodframe structures. I: Model formulation. *Journal of Structural Engineering* 130.9, pages 1353–1360.
- [Folz and Filiatrault, 2004b] Folz, B. and Filiatrault, A. (2004). Seismic analysis of woodframe structures. II: Model implementation and verification. *Journal of Structural Engineering* 130.9, pages 1361–1370.
- [Gavric, 2013] Gavric, I. (2013). Seismic behaviour of cross-laminated timber buildings. Ph.D. Thesis. University of Trieste, Italy.
- [Gavric et al., 2014] Gavric I.; Fragiaco M. and Ceccotti A. (2014). Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. *RILEM Mater Struct*; 48 (6):1841–57. doi : 10.1617/s11527-014-0278-7.
- [Gavric et al., 2015] Gavric I.; Fragiaco M. and Ceccotti A. (2015). Cyclic Behavior of CLT Wall Systems: Experimental Tests and Analytical Prediction Models. *Journal of Structural Engineering*. 141. 04015034. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001246.
- [Housner, 1963] Housner G. (1963). The behavior of inverted pendulum structures during Earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 53(2): 404-417.
- [Hummel, 2017] Hummel, J. (2017). Displacement-based seismic design for multi-storey cross laminated timber buildings. 10.19211/KUP9783737602891

- [Kovacs et al. 2017] Kovacs M.A. and Wiebe L. (2017). Controlled Rocking CLT Walls for Buildings in Regions of Moderate Seismicity: Design Procedure and Numerical Collapse Assessment, *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1080/13632469.2017.1326421
- [Krawinkler et al., 2001] Krawinkler, H.; Parisi, F.; Ibarra, L.; Ayoub, A. and Medina, R. (2001). Development of a Testing Protocol for Woodframe Structures. Technical report. CUREE Publication No. W-02.
- [Mazzolani and Piluso, 1996] Mazzolani, F. and Piluso, V. (1996). Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames, Chapman & Hall, New York.
- [Markström et al., 2018] Markström E., Manja Kitek Kuzman, Bystedt A., Sandberg D., Fredriksson M. (2018). Swedish architects view of engineered wood products in buildings, *Journal of Cleaner Production*, Volume 181, Pages 33-41, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.216>.
- [Palermo et al., 2004] Palermo, A.; Pampanin, S.; and Calvi, G. (2004). Use of "Controlled Rocking" in the Seismic Design of Bridges.
- [Pang et al., 2007] Pang, W.; V. Rosowsky, D.; Asce, M.; Pei, S. and Lindt, J. (2007). Evolutionary Parameter Hysteretic Model for Wood Shear Walls. *Journal of Structural Engineering-asce - J STRUCT ENG-ASCE*. 133. 10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:8(1118).
- [Petersen, 1996] Petersen, C. (1996). *Dynamik der Baukonstruktionen*. 1. Auflage, korrigierter Nachdruck. Vieweg Verlagsgesellschaft, 1996.
- [Polastri et al., 2016] Polastri, A.; Pozza, Luca. (2016). Proposal for a standardized design and modeling procedure of tall CLT buildings. 10. 607-624. 10.18421/IJQR10.03-12.
- [Pozza et al., 2017] Pozza, L.; Savoia, M.; Franco, L.; Saetta, A. and Talledo, D. (2017). Effect of different modelling approaches on the prediction of the seismic response of multi-storey CLT buildings. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 5. 953-965. 10.2495/CMEM-V5-N6-953-965.
- [Psycharis et al., 1983] Psycharis, I. N. and Jennings, P. C. (1983). Rocking of slender rigid bodies allowed to uplift. *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 11: 57-76. doi:10.1002/eqe.4290110106
- [Rathje et al., 1988] Rathje, E.; Abrahamson, N. (1988). Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions. *J Geotech Geoenviron Eng*. 91. 150-159.
- [Rathje et al., 1998] Rathje, E.; A. Abrahamson, N. and D. Bray, J.; (1998). Simplified Frequency Content Estimates of Earthquake Ground Motions. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering - J GEOTECH GEOENVIRON ENG*. 124. 10.1061/(ASCE)1090-0241(1998)124:2(150).
- [Reynolds et al., 2017] Reynolds, T.; Foster, R.; Bregulla, J.; Chang, W-S.; Harris, R. and Ramage, M. (2017). Lateral Load Resistance of Cross-laminated Timber Shear Walls. *Journal of Structural Engineering*, 143(12). DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001912
- [Rinaldin et al., 2013] Rinaldin, G.; Amadio, C. and Fragiaco, M. (2013). A component approach for the hysteretic behaviour of connections in cross-laminated wooden structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 42. 10.1002/eqe.2310.

- [Rinaldin software] Rinaldin G. So.ph.i. – Software for Phenomenological Implementations, free software, Internet site: <<http://giovanni.rinaldin.org>>.
- [Sarti et al., 2017] Sarti, F.; Palermo, A.; Pampanin, S.; and Berman J. (2017). Determination of the seismic performance factors for post-tensioned rocking timber wall systems. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 46: 181–200. doi: 10.1002/eqe.2784.
- [Seim et al., 2013a] Seim, W.; Hummel, J. (2013). Optimberquake: Deliverable 2D: CLT wall elements – monotonic and cyclic testing. Technical report. University of Kassel.
- [Seim et al., 2013b] Seim, W.; Hummel, J.; Vogt, T. (2013). Optimberquake: Deliverable 2C: Anchoring units – monotonic and cyclic testing. Technical report. University of Kassel.
- [Sivaselvan et al., 1999] Sivaselvan, M. and Reinhorn, A. (1999). Hysteretic Models for Cyclic Behavior of Deteriorating Inelastic Structures.
- [Spanos et al. 2017] Spanos, P.-T.; Di Matteo, A.; Pirrotta, A. and Di Paola, M. (2017). Nonlinear rocking of rigid blocks on flexible foundation: analysis and experiments. *Procedia Engineering*. 199. 284-289. 10.1016/j.proeng.2017.09.032.
- [Sustersic et al., 2011] Sustersic, I.; Fragiacomio, M. and Dujic, B. (2011). Influence of connection properties on the ductility and seismic resistance of multi-storey cross-lam buildings.
- [Sustersic et al., 2015] Sustersic, I.; Fragiacomio, M. and Dujic, B. (2015). Seismic Analysis of Cross-Laminated Multistory Timber Buildings Using Code-Prescribed Methods: Influence of Panel Size, Connection Ductility, and Schematization. *Journal of Structural Engineering*. 142. E4015012. 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001344.
- [Tamagnone et al., 2017] Tamagnone, G.; Rinaldin, G.; Fragiacomio, M. (2017). A novel method for non-linear design of CLT wall systems. *Engineering Structures*. 10.1016/j.engstruct.2017.09.010.
- [Taniguchi, 2001] Taniguchi, T. (2001). Non-linear response analyses of rectangular rigid bodies subjected to horizontal and vertical ground motion. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 31. 1481 - 1500. 10.1002/eqe.170.
- [Ther, 2017] Ther, T. (2017). Analysis and Design of Rocking Mechanisms.
- [Vogt, 2012] Vogt, T.; Hummel, J. and Seim, W. (2012). Timber framed wall elements under cyclic loading. *Proceedings of the 12th World Conference on Timber Engineering*, Auckland, New Zealand.
- [Vassiliou et al., 2017] Vassiliou, M. F.; Mackie, K. R.; and Stojadinović, B. (2017) A finite element model for seismic response analysis of deformable rocking frames. *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 46: 447–466. doi: 10.1002/eqe.2799.
- [Voyagaki, 2013] Voyagaki, E. (2012). Contributions to dynamic analysis of yielding systems to near-fault earthquake motions. 10.13140/2.1.2021.6646.
- [Voyagaki et al. 2014] Voyagaki, E.; Psycharis, I. and Mylonakis, G. (2014). Complex Response of a Rocking Block to a Full-Cycle Pulse. *Journal of Engineering Mechanics*. 140. 10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000712.

[Wallner-Novak et al., 2013] Wallner-Novak, M.; Koppelhuber, J.; and Pock, K. (2013). Information Brettsperrholz Bemessung Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode. proHolz Austria.

[Wiebe et al. 2010] Wiebe, L. and Christopoulos, C. (2010). Accelerations in Systems with Abrupt Stiffness Changes.

[Wiebe et al. 2012] Wiebe, L.; Christopoulos, C.; Tremblay, R.; Leclerc, M. (2013). Mechanisms to limit higher mode effects in a controlled rocking steel frame. 2: Large-amplitude shake table testing. Earthquake Engineering & Structural Dynamics. 42. 10.1002/eqe.2258.

[Yim et al. 1980] Yim, C.-S., Chopra, A. K. and Penzien, J. (1980), Rocking response of rigid blocks to earthquakes. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 8: 565–587. doi:10.1002/eqe.4290080606

[Ying, 1992] Ying, R. (1992). The analysis and identification of friction joint parameters in the dynamic response of structures. (A thesis submitted to the University of London for the degree of Doctor of Philosophy).

[Zarnic et al., 1997] Zarnic R, Gostic S (1997). Masonry infilled frames as an effective structural sub-assembly. In: International workshop, Bled, Slovenia.

Κάποιες από τις διατάξεις που αναφέρονται στην διπλωματική εργασία :

[EN 12512] Timber structures – test methods – cyclic testing of joints made with mechanical fasteners. 2001.

[FEMA P695] Quantification of Building Seismic Performance Factors. Federal Emergency Management Agency, Washington DC. 2009.

[ISO 16670] Timber structures – Joints made with mechanical fasteners - Quasistatic reversed-cyclic test method. December 2003. 2003.

[ISO 21581] Timber structures – Static and cyclic lateral load test method for shear walls. June 2010. 2010.