



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών

Αντισεισμικός σχεδιασμός χαλύβδινων κατασκευών με συνδέσεις FREEDAM



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ειρήνη Ι. Βουγιουκαλάκη

Επιβλέπων: Ιωάννης Βάγιας

Αθήνα, Φεβρουάριος 2021

EMK ΔΕ 2021/08

Βουγιουκαλάκη Ε. (2021).
Αντισεισμικός σχεδιασμός χαλύβδινων κατασκευών με συνδέσεις FREEDAM
Διπλωματική Εργασία ΕΜΚ ΔΕ 2021/08
Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Vougioukalaki E. (2021).
Seismic Design of Steel Structures with FREE from DAMage joints
Diploma Thesis ΕΜΚ ΔΕ 2021/08
Institute of Steel Structures, National Technical University of Athens, Greece

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
Ευχαριστίες	5
1 Έξυπνες συνδέσεις για αντισεισμικούς πλαισιακούς φορείς: Σύντομη Επισκόπηση.....	7
1.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών.....	7
1.2 Πίνακας Συμβόλων.....	7
1.3 Εισαγωγή.....	8
1.4 Μειονεκτήματα παραδοσιακών συνδέσεων	13
1.5 Έξυπνες συνδέσεις	17
1.5.1 Έξυπνες συνδέσεις με υστερητικούς αποσβεστήρες.....	18
1.5.2 Έξυπνες συνδέσεις με συνδέσμους δυσκαμψίας με εξασφάλιση έναντι λυγισμού	21
1.5.3 Έξυπνες συνδέσεις με αποσβεστήρες τριβής.....	25
1.5.4 Συνδέσεις με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση	31
1.6 Βιβλιογραφία.....	33
2 Αποσβεστήρες τριβής FREEDAM.....	37
2.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών.....	37
2.2 Πίνακας Συμβόλων.....	37
2.3 Παθητικά συστήματα βασισμένα στη χρήση αποσβεστήρων τριβής.....	38
2.4 Επιλογή υλικών για το σχεδιασμό των πλακών τριβής.....	43
2.4.1 Βασικές θεωρίες τριβής.....	43
2.4.2 Υλικά τριβής που δοκιμάστηκαν κατά το ερευνητικό έργο FREEDAM.....	45
2.5 Συμπεριφορά υπό ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης.....	49
2.5.1 Πειραματικές διατάξεις.....	49
2.5.2 Περίληψη των αποτελεσμάτων των δοκιμών	52
2.6 Απώλειες προέντασης κατά την ωφέλιμη διάρκεια ζωής.....	68
2.6.1 Εισαγωγή.....	68
2.6.2 Βραχυπρόθεσμη απώλεια προέντασης.....	71
2.6.3 Μεσοπρόθεσμη απώλεια προέντασης.....	74
2.6.4 Μακροπρόθεσμη απώλεια προέντασης.....	75
2.7 Σχεδιασμός και προηγμένη προσομοίωση των αποσβεστήρων τριβής.....	77
2.7.1 Τιμές σχεδιασμού του συντελεστή τριβής και του μοντέλου παλινδρόμησης.....	77
2.8 Βιβλιογραφία.....	80
3 Πειραματικές δοκιμές σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων FREEDAM	84
3.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών.....	84
3.2 Πίνακας Συμβόλων.....	84
3.3 Εισαγωγή.....	84
3.4 Πειραματικές δοκιμές σε εξωτερικούς κόμβους	87
3.4.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	87
3.4.2 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών	93
3.5 Πειραματικές δοκιμές σε εσωτερικούς κόμβους.....	99
3.5.1 Διάταξη δοκιμών και πειραματικό πρόγραμμα.....	99
3.5.2 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών	102
3.6 Συμπεράσματα.....	105
3.7 Βιβλιογραφία.....	106
4 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων των αποσβεστήρων και συνδέσεων FREEDAM	109
4.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών.....	109

4.2	Πίνακας Συμβόλων.....	109
4.3	Εισαγωγή.....	110
4.4	Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων των αποσβεστήρων FREEDAM	111
4.4.1	Παραδοχές προσομοίωσης.....	111
4.4.2	Επαλήθευση και ανάλυση των αποτελεσμάτων.....	115
4.5	Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων των συνδέσεων FREEDAM.....	120
4.5.1	Παραδοχές προσομοίωσης.....	121
4.5.2	Επαλήθευση και ανάλυση αποτελεσμάτων: εξωτερικοί κόμβοι.....	123
4.5.3	Επαλήθευση και συζήτηση των αποτελεσμάτων: εσωτερικοί κόμβοι.....	125
4.6	Περίληψη νέων δεδομένων για τις διατάξεις σχεδιασμού.....	127
4.6.1	Δύναμη διάτμησης στις συνδέσεις με T και L	127
4.6.2	Επιρροή της δύναμης σύσφιξης	130
4.6.3	Επιρροή του συντελεστή τριβής.....	133
4.7	Βιβλιογραφία.....	134
5	Συμπεριφορά σε φόρτιση κρούσης.....	136
5.1	Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών.....	136
5.2	Πίνακας Συμβόλων.....	136
5.3	Εισαγωγή.....	137
5.4	Αποσβεστήρες FREEDAM υπό φόρτιση κρούσης.....	138
5.4.1	Περιγραφή των πειραματικών δοκιμών και του πειραματικού προγράμματος	138
5.4.2	Περιγραφή της πειραματικής διάταξης.....	140
5.4.3	Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών	141
5.4.4	Προσομοίωση των αποτελεσμάτων των δοκιμών.....	143
5.5	Συνδέσεις FREEDAM υπό φόρτιση κρούσης.....	145
5.5.1	Δοκιμασμένοι τύποι	145
5.5.2	Μελέτες σε εξωτερικές συνδέσεις.....	146
5.5.3	Μελέτες σε εσωτερικές συνδέσεις	150
5.6	Σύνοψη νέων δεδομένων για τις διατάξεις σχεδιασμού.....	160
5.7	Βιβλιογραφία.....	161
6	Συμπεριφορά κατασκευών με συνδέσεις RBS και συνδέσεις FREEDAM	164
6.1	Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών.....	164
6.2	Πίνακας Συμβόλων.....	164
6.3	Εισαγωγή.....	164
6.4	Πρότυπο κτίριο.....	165
6.5	Ψευδο-δυναμική δοκιμή του προτύπου κτιρίου με συνδέσεις RBS.....	168
6.5.1	Σεισμός Imperial Valley (PGA = 1.10g).....	169
6.5.2	Σεισμός Spitak (PGA = 0.80g).....	170
6.5.3	Τεχνητός σεισμός (PGA = 0.50g)	171
6.5.4	Σεισμός Santa Barbara (PGA = 0.80g).....	172
6.5.5	Σεισμός Coalinga (PGA = 0.80g).....	172
6.6	Ψευδο-δυναμική δοκιμή του προτύπου κτιρίου με συνδέσεις FREEDAM	175
6.6.1	Σεισμός Imperial Valley (PGA = 1.10g).....	175
6.6.2	Σεισμός Spitak (PGA = 0.80g).....	176
6.6.3	Τεχνητός σεισμός (PGA = 0.50g)	177
6.6.4	Σεισμός Santa Barbara (PGA = 0.80g).....	178
6.6.5	Σεισμός Coalinga (PGA = 0.80g).....	179
6.7	Αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης.....	181
6.7.1	Κατασκευή με συνδέσεις RBS.....	181
6.7.2	Κατασκευή με συνδέσεις FREEDAM	186
6.8	Σύγκριση σεισμικών συμπεριφορών	191
6.9	Βιβλιογραφία.....	193

**Αντισεισμικός σχεδιασμός χαλύβδινων κατασκευών
με συνδέσεις FREEDAM**

Βουγιουκαλάκη Ε. (Επιβλέπων: Βάγιας Ι.)

Περίληψη

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μετάφραση κειμένου σχετικά με την ανάπτυξη έξυπνων συνδέσεων με αποσβεστήρες τριβής FREEDAM για κατασκευές από χάλυβα που υπόκεινται σε σεισμικά φορτία.

Με δεδομένα τα μειονεκτήματα της παραδοσιακής φιλοσοφίας αντισεισμικού σχεδιασμού σε χαλύβδινες κατασκευές όσον αφορά την επισκευασιμότητα και τις παραμένουσες παραμορφώσεις, γίνεται μία προσπάθεια ανάπτυξης μίας νέας στρατηγικής σχεδιασμού συνδέσεων που δεν θα υπόκεινται σε βλάβες μετά από έντονα σεισμικά φαινόμενα.

Για το σχεδιασμό των αποσβεστήρων τριβής FREEDAM εξετάστηκαν τα τριβολογικά χαρακτηριστικά 8 υλικών τριβής για τις πλάκες τριβής, και πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε δοκίμια αποσβεστήρων υπό ανακυκλικές φορτίσεις που εξέτασαν: i) τον τύπο του υλικού τριβής, ii) την επίδραση της δύναμης σύσφιξης και της διάταξης του συστήματος των κοχλιών, iii) την τυχαία μεταβλητότητα του υλικού ως προς τον συντελεστή τριβής και iv) την ταχύτητα εφαρμογής των φορτίων. Οι απώλειες προέντασης των κοχλιών εκτιμήθηκαν πειραματικά, ενώ οι τιμές σχεδιασμού των συντελεστών τριβής των υλικών υπολογίστηκαν με μελέτη παλινδρόμησης.

Η απόκριση των κόμβων τριβής FREEDAM αξιολογήθηκε πειραματικά με δοκίμια που αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά εσωτερικών και εξωτερικών κόμβων σε πραγματικά πλαίσια ροπής, τα αποτελέσματα των οποίων επαλήθευσαν τα κριτήρια σχεδιασμού που αναπτύχθηκαν και επέτρεψαν τη βαθμονόμηση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων.

Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων για τη περιγραφή και την ανάλυση της τοπικής συμπεριφοράς των αποσβεστήρων FREEDAM και της σεισμικής απόκρισης των συνδέσεων FREEDAM, από τις οποίες λήφθηκε ότι κρίσιμος είναι ο έλεγχος σε διάτμηση και επισημάνθηκε η σημαντική επιρροή της δύναμης σύσφιξης των κοχλιών και του συντελεστή τριβής.

Οι αποσβεστήρες και οι συνδέσεις FREEDAM ελέγχθηκαν σε φόρτιση κρούσης τόσο με πειραματικές δοκιμές όσο και με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων και η συμπεριφορά τους αξιολογήθηκε ως καλή και πλάσιμη με σημαντική δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν ψευδο-δυναμικές δοκιμές σε πρότυπα κτίρια, τόσο με συνδέσεις απομείωσης διατομής δοκού, όσο και με συνδέσεις FREEDAM και αναπτύχθηκαν μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων για τη περιγραφή της συμπεριφοράς τους σε 5 επιταχυνσιογραφήματα, που έδειξαν ότι η κατασκευή με συνδέσεις FREEDAM παρουσιάζει πάντα χαμηλότερη τέμνουσα βάση και μειωμένο εύρος μετατόπισης, καθώς οι συνδέσεις FREEDAM επαναφέρουν τη συμπεριφορά της κατασκευής στην ελαστική περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών μέγιστων της χρονοϊστορίας.

DIPLOMA THESIS
EMK ΔE 2021/08

Seismic Design of Steel Structures with FREE from DAMage joints

Vougioukalaki E. (supervised by Vayas I.)

Abstract

The subject of this thesis is the translation of the informative documents concerning the development of smart connections equipped with FREEDAM friction dampers for steel structures under seismic loads.

Keeping in mind the drawbacks of the traditional seismic design strategies concerning the repairability and the permanent deformations, FREEDAM project aims at the development of a new design strategy for connections able to withstand severe seismic events without any damage.

The tribological characteristics of 8 friction materials for the friction pads were evaluated for the design of the FREEDAM friction dampers, and an experimental work was carried out that considered: i) the type of friction material employed; ii) the effect of the bolts clamping force and the typology of adopted bolt assembly; iii) the random material variability evaluated in terms of friction coefficient; iv) the speed of application of the loads. The bolts' preloading losses were investigated with experimental tests, and the design values of the friction coefficients were evaluated with a regression analysis.

The experimental response of friction joints was assessed with a wide experimental campaign on sub-assemblages able to represent the behaviour of internal joints and external joints in actual moment-resisting frames, and the results allowed the validation of the design criteria for friction joints developed during the project and the calibration of the Finite Elements models.

Finite Elements Models were developed aiming at the description and discussion of the local behaviour of FREEDAM dampers and the seismic response of FREEDAM beam-to-column joints, which confirmed the importance of the shear check, the clamping force applied to the bolts and the friction coefficient between the sliding surfaces.

The behaviour under impact loading of FREEDAM dampers and FREEDAM connections was evaluated by means of experimental tests and Finite Elements Modeling and found that they exhibit a good and ductile behaviour with significant energy dissipation.

Lastly, the pseudo-dynamic testing performed in mock-up buildings equipped with Reduced Beam Section (RBS) connections and FREEDAM connections, and the Finite element models developed in order to assess their behaviour using 5 accelerograms, showed that the structure equipped with FREEDAM connections always exhibits lower base shear actions and reduced displacement range, since FREEDAM connections make the structural behaviour elastic between two following peaks of the input motion.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Ιωάννη Βάγια, καθηγητή της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. για την ευκαιρία που μου έδωσε να κάνω διπλωματική εργασία στον τομέα των Μεταλλικών Κατασκευών και παράλληλα με αυτό τον τρόπο να εμβαθύνω τις γνώσεις μου στο αντικείμενο αυτό.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την υποψήφια διδάκτορα κ. Σοφία Αντωνοδημητράκη για τη καθοδήγηση και τις υποδείξεις της οι οποίες ήταν απαραίτητες για να εκπονήσω αυτή την εργασία.

Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου και σε φίλους για τη συνεχή υποστήριξή τους.

1 Έξυπνες συνδέσεις για αντισεισμικούς πλαισιακούς φορείς: Σύντομη Επισκόπηση

1.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών

AFC	: Asymmetric Friction Connection – ασύμμετρη σύνδεση τριβής
BRB	: Buckling Restrained Braces – σύνδεσμοι δυσκαμψίας ανθεκτικοί σε λυγισμό
CR	: Center of Rotation – κέντρο περιστροφής
DST	: Double split tee – διπλά συνδετικά T
MRF	: Moment Resisting Frames – πλαίσια ροπής
PT	: Post-tensioning – προένταση με τάνυση του χάλυβα μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος
RBS	: Reduced Beam Section – απομειωμένη διατομή δοκού
SC-DC	: Self-Centering Dissipative Connections – συνδέσεις με δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική θέση και με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας
SFC	: Symmetric Friction Connection – συμμετρική σύνδεση τριβής
SMA	: Shape Memory Alloy – κράμα μνήμης σχήματος

1.2 Πίνακας Συμβόλων

Πεζοί λατινικοί χαρακτήρες

d_b	: ύψος διατομής δοκού
d_x	: ύψος διατομής στοιχείου x
f_u	: τάση ατοχίας
f_y	: όριο διαρροής
h	: ύψος ορόφου
l	: μήκος
n_x	: πλήθος στοιχείων x
t	: πάχος

Κεφαλαίοι λατινικοί χαρακτήρες

A_x	: εμβαδόν διατομής στοιχείου x
B	: πλάτος
E	: μέτρο ελαστικότητας
F	: δύναμη
H	: οριζόντια δύναμη
H'	: ισοδύναμο ύψος
H_x	: ύψος στοιχείου x
M	: ροπή κάμψης
M_{Cd}	: ροπή ικανότητας σχεδιασμού
M_{Rd}	: ροπή αντίστασης σχεδιασμού
N_x	: αξονική δύναμη στοιχείου x
N_y	: αξονική δύναμη διαρροής
P_u	: αντίσταση ατοχίας
P_y	: αντίσταση διαρροής
Q	: δύναμη

V : κατακόρυφη δύναμη

Ελληνικοί χαρακτήρες

α : γωνία
θ : γωνιακή παραμόρφωση ορόφου
μ : συντελεστής τριβής
ξ : λόγος ιξώδους απόσβεσης

1.3 Εισαγωγή

Η πρόσφατη πειραματική έρευνα σχετικά με τις συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων για αντισεισμικές χαλύβδινες κατασκευές εστιάζει όλο και περισσότερο στις έξυπνες συνδέσεις με στόχο τη μείωση των δομικών βλαβών σε καταστροφικούς σεισμούς. Για το λόγο αυτό, η προσοχή πολλών ερευνητών έχει στραφεί σε συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων με σεισμικούς αποσβεστήρες. Αυτοί οι αποσβεστήρες επιτρέπουν την απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας και, ως εκ τούτου, αντικαθιστούν πρακτικά τις ζώνες απορρόφησης ενέργειας των παραδοσιακών πλαισίων ροπής, δηλ. τα άκρα των δοκών, όπου τυπικά αναμένεται η ανάπτυξη πλαστικών αρθρώσεων. Κατ' αρχήν, μπορεί να εφαρμοστεί οποιοσδήποτε τύπος σεισμικού αποσβεστήρα: αποσβεστήρες με υστερητική συμπεριφορά, σύνδεσμοι δυσκαμψίας με εξασφάλιση έναντι λυγισμού, αποσβεστήρες εξώθησης μολύβδου, αποσβεστήρες από κράμα μνήμης σχήματος, ιξώδεις αποσβεστήρες, αποσβεστήρες τριβής. Τέτοιοι αποσβεστήρες όχι μόνο μπορούν να παρέχουν ευρύ και σταθερό βρόχο υστέρησης, αλλά μπορούν επίσης να αντικατασταθούν πολύ εύκολα μετά από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα. Για το λόγο αυτό, οι συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων με σεισμικούς αποσβεστήρες μπορούν να αναφέρονται ως «έξυπνες συνδέσεις».

Επιπλέον, η επισκευή των κατασκευών μετά από σοβαρές κινήσεις εδάφους σχετίζεται κυρίως με το εύρος των μόνιμων παραμορφώσεων. Γι' αυτό το λόγο, ένα σύγχρονο θέμα στην ερευνητική δραστηριότητα σχετικά με τις έξυπνες συνδέσεις σχετίζεται με τη δημιουργία συνδέσεων με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική τους κατάσταση (επανακέντρωση), αποφεύγοντας έτσι τη κλίση της κατασκευής μετά από μεγάλα σεισμικά γεγονότα.

Αυτό το κεφάλαιο παρέχει μια σύντομη επισκόπηση σχετικά με τις έξυπνες συνδέσεις, πιστοποιώντας τη ζωτικότητα της ερευνητικής δραστηριότητας σε αντισεισμικές χαλύβδινες κατασκευές, που μεταμορφώνεται όλο και περισσότερο σε μια τέχνη δομικής λεπτομέρειας, με ένα μεγάλο αριθμό έξυπνων λύσεων, τις οποίες οι κατασκευές από σκυρόδεμα δεν μπορούν δώσουν.

Είναι γνωστό ότι οι διάφορες στρατηγικές για το σχεδιασμό αντισεισμικών κατασκευών μπορούν να διαμορφωθούν ενόψει της ενεργειακής ισορροπίας. Σύμφωνα με την παραδοσιακή προσέγγιση για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών [1-4], σε περίπτωση συχνών και περιστασιακών σεισμών, των οποίων η περίοδος επαναφοράς είναι συγκρίσιμη με τη διάρκεια ζωής των κατασκευών, η εισαγόμενη σεισμική ενέργεια πρέπει να απορροφηθεί εξ ολοκλήρου μέσω ιξώδων αποσβεστήρων. Επομένως, η υστερητική ενέργεια είναι ίση με το μηδέν καθώς, για τέτοιους σεισμούς, η κατασκευή πρέπει να σχεδιαστεί ώστε να παραμείνει στην ελαστική περιοχή. Αντίθετα, σε περίπτωση σπάνιων και πολύ σπάνιων σεισμών των οποίων η περίοδος επαναφοράς είναι άνω των 500 ετών, το μεγαλύτερο μέρος της εισαγόμενης σεισμικής ενέργειας απορροφάται με υστέρηση, αλλά οδηγεί σε σοβαρές πλαστικές διαρροές και σχετιζόμενες δομικές βλάβες. Τέτοιες δομικές

βλάβες πρέπει να είναι συμβατές με την πλαστιμότητα και την ικανότητα απορρόφησης ενέργειας των κατασκευών, επειδή, παρόλο που οι δομικές βλάβες είναι αποδεκτές, πρέπει να διασφαλιστεί η μη κατάρρευση και η προστασία της ανθρώπινης ζωής.

Στο παραπάνω πλαίσιο, αναφορικά με τα χαλύβδινα πλαίσια ροπής (Moment Resisting Frames - MRF), η κατασκευή πρέπει να διαθέτει επαρκή πλευρική αντοχή και ακαμψία, ώστε να παραμένει στην ελαστική περιοχή σε συχνούς και περιστασιακούς σεισμούς. Συγκεκριμένα, απαιτείται επαρκής πλευρική ακαμψία για τη μείωση της βλάβης στα μη φέροντα στοιχεία, κάτι το οποίο αποτελεί θεμελιώδη απαίτηση στον έλεγχο οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας. Αντίθετα, σε περίπτωση καταστροφικών σεισμών, τα πλαίσια ροπής πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να απορροφούν την σεισμική ενέργεια στα άκρα των δοκών όπου πρέπει να πραγματοποιηθεί ανακυκλική πλαστική κάμψη. Για το σκοπό αυτό, συνιστάται οι συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων να σχεδιάζονται με επαρκή υπεραντοχή [5-7] σε σχέση με τις συνδεδεμένες δοκούς, λαμβάνοντας υπόψη την τυχαία μεταβλητότητα του υλικού [6] και την εμφάνιση κράτνωσης, ώστε να διασφαλιστεί η ανάπτυξη της καμπτικής αντοχής αστοχίας των πλαστικών αρθρώσεων [7]. Επιπλέον, στοχεύοντας στην προώθηση της πλαστικοποίησης του μεγαλύτερου πλήθους ζωνών απορρόφησης ενέργειας μέσω του σωστού ελέγχου του μηχανισμού αστοχίας, οι σύγχρονοι αντισεισμικοί κανονισμοί, όπως ο Ευρωκώδικας 8, απαιτούν την εφαρμογή ιεραρχικών κριτηρίων για την προώθηση της διαρροής στα άκρα των δοκών και όχι στα άκρα των υποστυλωμάτων. Μέχρι σήμερα, η κλασική φιλοσοφία σχεδιασμού που βασίζεται στην ιεραρχία «ασθενής δοκός» - «ισχυρή σύνδεση» - «ισχυρό υποστύλωμα» έχει εφαρμοστεί ευρέως στον πρακτικό σεισμικό σχεδιασμό [1-4] και σίγουρα παρέχει ορισμένα πλεονεκτήματα, όπως η ανάπτυξη αρκετά σταθερού βρόχου υστέρησης στις ζώνες απορρόφησης ενέργειας και την πρόληψη του σχηματισμού μαλακού ορόφου που, όπως είναι γνωστό, πρέπει να αποφεύγεται πλήρως λόγω της ανεπαρκούς τους ικανότητας απορρόφησης ενέργειας. Ωστόσο από την άλλη πλευρά, η παραδοσιακή προσέγγιση σχεδιασμού παρέχει επίσης πολλά μειονεκτήματα [8-10].

Σε μεγάλους σεισμούς, το κύριο μειονέκτημα της παραδοσιακής στρατηγικής είναι εγγενές στην ίδια τη στρατηγική. Οι δομικές βλάβες, που είναι απαραίτητες για την απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας, είναι επίσης και η κύρια πηγή άμεσων και έμμεσων απωλειών που καθίστανται όλο και περισσότερο ανεπίτρεπτες σε βιομηχανικές χώρες, όπως αποδεικνύει το μέγεθος των οικονομικών απωλειών που σημειώθηκαν σε πρόσφατους σεισμούς.

Ένα άλλο μειονέκτημα, συγκεκριμένα για τα πλαίσια ροπής από χάλυβα, είναι ότι η χρήση κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων πλήρους αντοχής με την απαιτούμενη από τον κώδικα υπεραντοχή, δεν είναι οικονομικά αποδοτική και καθίσταται σημαντικό βάρος στην περίπτωση ύπαρξης ανταγωνισμού με δομικές λύσεις που χρησιμοποιούν άλλα υλικά όπως οπλισμένο σκυρόδεμα. Στην πραγματικότητα, για να διασφαλιστεί το επιθυμητό επίπεδο απόδοσης του κόμβου, απαιτείται σημαντική υπερδιαστασιολόγηση, η οποία οδηγεί στη χρήση ενισχύσεων του κόμβου, επιπρόσθετων νευρώσεων ή ενισχυτικών ελασμάτων ή, ακόμη και δοκών με τοπική ενίσχυση στη περιοχή του κόμβου.

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν προταθεί διάφορες στρατηγικές προκειμένου να μειωθούν οι δομικές βλάβες που αποτελούν το κύριο μειονέκτημα της παραδοσιακής στρατηγικής σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, μια στρατηγική κατάλληλη για εφαρμογή σε χαλύβδινες κατασκευές είναι η λεγόμενη στρατηγική συμπληρωματικής ενεργειακής απορρόφησης ή παθητικού ελέγχου [11-15], όπου η σεισμική ενέργεια απορροφάται με ιξώδη απόσβεση ή υστερητική απόσβεση μέσω διατάξεων απορρόφησης ενέργειας που βρίσκονται γενικά ανάμεσα σε σημεία της κατασκευής όπου αναμένονται υψηλές σχετικές μετατοπίσεις ή ταχύτητες [12]. Μεταξύ των διαφορετικών στρατηγικών που περιλαμβάνονται στο πλαίσιο των συστημάτων παθητικού ελέγχου, έχει επίσης προταθεί

από ερευνητές η χρήση αποσβεστήρων τριβής που στοχεύουν στη μείωση των πλευρικών μετατοπίσεων για τις απαιτήσεις οριακής κατάστασης λειτουργικότητας και στη μείωση των δομικών βλαβών για την εκπλήρωση των απαιτήσεων της οριακής κατάστασης αστοχίας.

Οι αποσβεστήρες τριβής παρουσιάζουν υψηλές δυνατότητες με χαμηλό κόστος καθώς και ευκολία στην εγκατάσταση και συντήρησή τους. Γι' αυτό, πολλές συσκευές που βασίζονται στην απόσβεση τριβής έχουν δοκιμαστεί πειραματικά [16-18] και μερικές από αυτές έχουν χρησιμοποιηθεί σε κτίρια παγκοσμίως. Ο πλέον διαδεδομένος τρόπος για την εγκατάσταση των αποσβεστήρων τριβής συνίσταται στην εισαγωγή συστήματος συνδέσμων δυσκαμψίας με ενσωματωμένους αποσβεστήρες τριβής [16, 19, 20]. Αρκετοί ερευνητές έχουν εργασθεί σε αυτήν τη διάταξη κατασκευής προτείνοντας διαδικασίες σχεδιασμού για τη βελτιστοποίηση της δύναμης ολίσθησης του συστήματος συνδέσμων δυσκαμψίας.

Αναφορικά με τα μειονεκτήματα της παραδοσιακής στρατηγικής σχεδιασμού που απορρέουν από την ανάγκη σχεδιασμού κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με υψηλή υπεραντοχή σε σχέση με τις συνδεδεμένες δοκούς, έχει προταθεί μια εναλλακτική λύση για τη προσέγγιση «ασθενής δοκός» - «ισχυρή σύνδεση» - «ισχυρό υποστύλωμα». Μπορεί να εφαρμοστεί η εναλλακτική φιλοσοφία «ισχυρό υποστύλωμα» - «ασθενής σύνδεση» - «ισχυρή δοκός», διότι ο Ευρωκώδικας 8 άνοιξε το δρόμο για τη χρήση συνδέσεων μερικής αντοχής, υπό την προϋπόθεση ότι είναι σε θέση να παρέχουν επαρκή ικανότητα πλαστικής στροφής (συνήθως 0.035 rad για ζώνες υψηλής σεισμικότητας) που ελέγχεται μέσω πειραματικών δοκιμών. Με μια τέτοια προσέγγιση σχεδιασμού, ακόμη και σε τμήματα μεγάλων δοκών, όπως σε περιπτώσεις μεγάλων ανοιγμάτων ή μεγάλων φορτίων, η χρήση συνδέσεων μερικής αντοχής επιτρέπει τον έλεγχο της ροπής κάμψης που μεταφέρεται στο υποστύλωμα. Έτσι το υποστύλωμα δεν χρειάζεται να υπερδιαστασιοποιηθεί για την πλήρωση του κριτηρίου της ιεραρχίας δοκού-υποστυλώματος. Επιπλέον, η δομική λεπτομέρεια των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων μπορεί να απλουστευθεί σημαντικά βελτιώνοντας τη συνολική σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας του συστήματος της κατασκευής, ξεπερνώντας τα οικονομικά μειονεκτήματα που οδηγούν στο σχεδιασμό συνδέσεων με υψηλή υπεραντοχή.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας για το σχεδιασμό ημισυνεχών πλαισίων με συνδέσεις μερικής αντοχής με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας [5, 21-27] σε πλαίσια ροπής αντικατοπτρίζεται ακόμα στην τελευταία έκδοση του Ευρωκώδικα 8, αλλά η εφαρμογή αυτής της τεχνικής παραμένει πολύ περιορισμένη στην πράξη, καθώς η πραγματική δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας των συνδέσεων πρέπει να αποδεικνύεται μέσω πειραματικών δοκιμών που είναι γενικά εκτός των δυνατοτήτων των κοινών σχεδιαστών. Επιπλέον, παρόλο που η εφαρμογή συνδέσεων μερικής αντοχής μπορεί να οδηγήσει σε έναν πιο οικονομικό σχεδιασμό, μπορεί επίσης να έχει ορισμένα μειονεκτήματα όπως τη μείωση της πλευρικής ακαμψίας του πλαισίου και γενικά της ικανότητας απόσβεσης ενέργειας στο άκρο της δοκού.

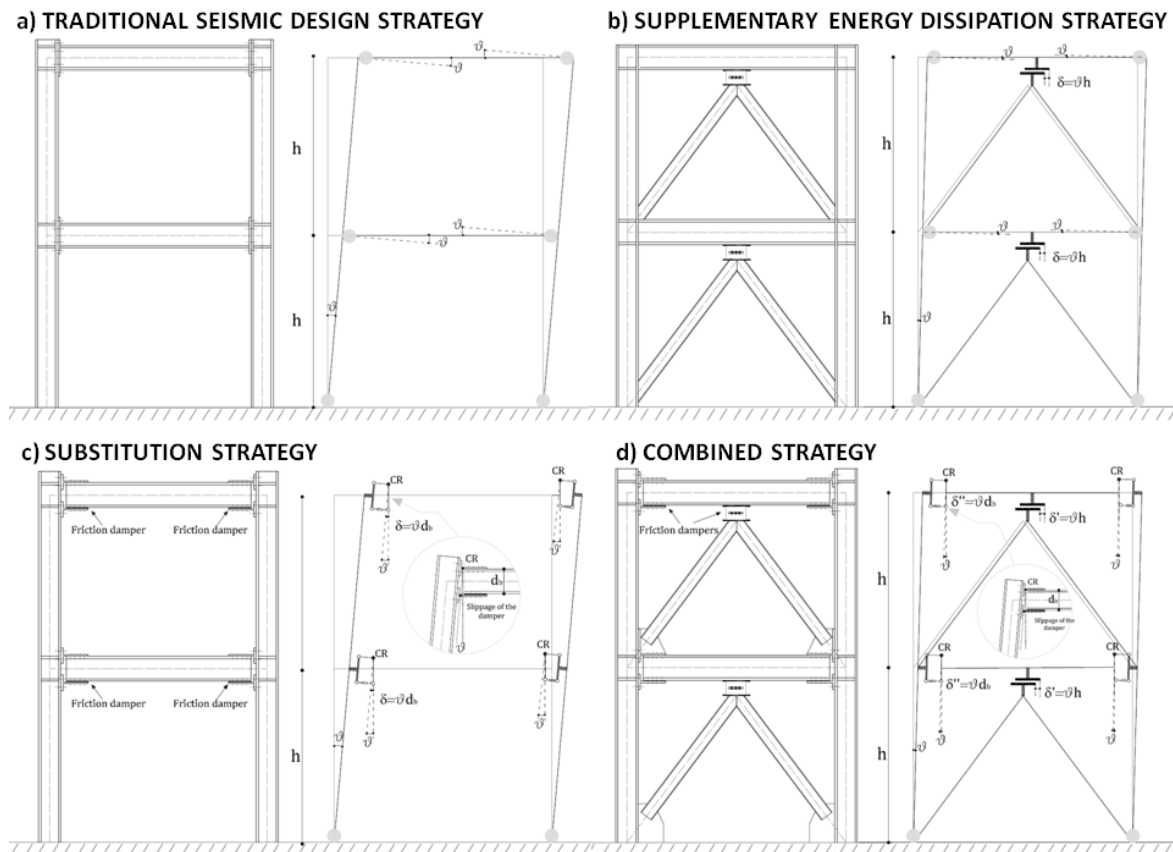
Ξεκινώντας από το υπόβαθρο που συνοψίστηκε παραπάνω, προκειμένου να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των περιγραφόμενων στρατηγικών σχεδιασμού, πολλοί ερευνητές έχουν επικεντρώσει τις προσπάθειές τους στη δυνατότητα σχεδίασης «έξυπνων συνδέσεων» που είναι σε θέση να συγκεντρώσουν την απόσβεση της σεισμικής ενέργειας σε ειδικά σχεδιασμένους αποσβεστήρες, δηλαδή σε συσκευές απόσβεσης που έχουν έξυπνα τοποθετηθεί εντός των συστατικών μερών της ίδιας της σύνδεσης. Στόχος επομένως είναι ο σχεδιασμός συνδέσεων ικανών να αντέχουν σχεδόν χωρίς καμία βλάβη όχι μόνο σε συχνά και περιστασιακά σεισμικά γεγονότα, αλλά και σε καταστροφικούς σεισμούς όπως εκείνους που αντιστοιχούν σε σπάνια και πολύ σπάνια γεγονότα.

Η βασική ιδέα αυτών των ερευνητικών έργων εμπνέεται από τη στρατηγική της συμπληρωματικής απόσβεσης ενέργειας, αλλά βασίζεται στη χρήση των συσκευών απόσβεσης υπό μια νέα οπτική. Στην πραγματικότητα, ενώ οι στρατηγικές παθητικού

ελέγχου βασίζονται συνήθως στην ενσωμάτωση της ικανότητας απόσβεσης ενέργειας της κύριας κατασκευής μέσω μιας συμπληρωματικής απόσβεσης που προέρχεται από συσκευές απόσβεσης, η νέα στρατηγική σχεδιασμού, αντίθετα, η οποία θα μπορούσε να ονομαστεί «Στρατηγική Αντικατάστασης», βασίζεται στη χρήση αποσβεστήρων που έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να υποκαθιστούν τις παραδοσιακές ζώνες απορρόφησης ενέργειας των πλαισίων ροπής, δηλαδή τα άκρα της δοκού.

Από τεχνολογική άποψη, η καινοτομία αφορά τη σύλληψη συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων που είναι εξοπλισμένοι με αποσβεστήρες. Αυτοί οι αποσβεστήρες μπορούν να τοποθετηθούν είτε στο επίπεδο του κάτω πέλματος είτε στα επίπεδα των δύο πελμάτων, και επιπλέον μπορούν να είναι διαφορετικών τύπων: ιξώδεις αποσβεστήρες, αποσβεστήρες εξώθησης μολύβδου, αποσβεστήρες με υστερητική συμπεριφορά, αποσβεστήρες τριβής, αποσβεστήρες από κράμα μνήμης σχήματος (shape memory alloy - SMA), σύνδεσμοι δυσκαμψίας ανθεκτικοί σε λυγισμό (Buckling Restrained Braces - BRB).

Προκειμένου να διευκρινιστούν καλά οι διαφορές σε σχέση με τον παραδοσιακό σεισμικό σχεδιασμό και τη στρατηγική συμπληρωματικής απόσβεσης ενέργειας, οι διάφορες στρατηγικές αναλύονται στο Σχήμα 1.1 όπου προτείνεται η χρήση αποσβεστήρων τριβής [10]. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 1.1a επισημαίνει ότι οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας των παραδοσιακών πλαισίων ροπής βρίσκονται στα άκρα των δοκών όπου πρέπει να αναπτυχθούν πλαστικές αρθρώσεις. Η σεισμική απαίτηση εκφράζεται συνήθως με τη μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (θ στο σχήμα) που διέπει την αναμενόμενη πλαστική στροφή στις ζώνες απορρόφησης ενέργειας. Η στρατηγική συμπληρωματικής απόσβεσης ενέργειας (Σχήμα 1.1b) στοχεύει στη μείωση της σεισμικής απαίτησης με την εισαγωγή σεισμικών αποσβεστήρων που για να είναι αποτελεσματικοί πρέπει να βρίσκονται μεταξύ δύο σημείων που υπόκεινται σε υψηλές σχετικές μετατοπίσεις. Η συμπληρωματική απόσβεση ενέργειας που παρέχεται από τέτοιες συσκευές επιτρέπει τη μείωση της γωνιακής παραμόρφωσης θ και κατά συνέπεια, τη μείωση των δομικών βλαβών στα άκρα των δοκών. Αντίθετα, η στρατηγική αντικατάστασης (Σχήμα 1.1c) επιτρέπει την πρόληψη δομικών βλαβών, επειδή όλες οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας αντικαθίστανται μέσω συνδέσεων εξοπλισμένων με αποσβεστήρες τριβής. Η αναμενόμενη απαίτηση σε γωνιακή παραμόρφωση δεν μειώνεται σε σύγκριση με παραδοσιακές κατασκευές (Σχήμα 1.1a), αλλά οδηγεί σε πολύ περιορισμένη δομική βλάβη σε μερικά στοιχεία των συνδέσεων, επειδή η περιστροφή των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος προσαρμόζεται, μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης της κίνησης των αποσβεστήρων τριβής (Σχήμα 1.1c). Η μέγιστη επιτρεπόμενη στροφή δίδεται πρακτικά από την αναλογία μεταξύ της κίνησης του αποσβεστήρα και του μοχλοβραχίονα, δηλ. την απόσταση από το κέντρο περιστροφής (center of rotation - CR). Ωστόσο, είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι η σχετική μετακίνηση μεταξύ των άκρων του αποσβεστήρα τριβής ($\delta = \theta d_b$, όπου d_b το ύψος της διατομής της δοκού) είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή ($\delta = \theta h$, όπου h το ύψος του ορόφου) που επέρχεται όταν εφαρμόζεται η στρατηγική συμπληρωματικής απόσβεσης ενέργειας (Σχήμα 1.1b). Αυτός είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο οι περιπτώσεις a) και c) αναμένεται να έχουν παρεμφερείς απαιτήσεις σε γωνιακή παραμόρφωση. Τέλος, επιτυγχάνεται περαιτέρω βελτίωση της αντισεισμικής απόδοσης συνδυάζοντας τη στρατηγική αντικατάστασης με τη στρατηγική συμπληρωματικής απόσβεσης ενέργειας. Αυτή η συνδυασμένη στρατηγική (Σχήμα 1.1d) οδηγεί τόσο στη μείωση των απαιτήσεων σε γωνιακή παραμόρφωση που αναμένονται σε περίπτωση καταστροφικών σεισμών και, επιπλέον, στην πρόληψη σημαντικών βλαβών στις συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος. Προφανώς, η μείωση της γωνιακής παραμόρφωσης είναι επίσης ένα σημαντικό όφελος για τη μείωση των βλαβών στα μη φέροντα στοιχεία του κτιρίου.



Σχήμα 1.1: Σύγκριση μεταξύ διαφορετικών στρατηγικών σχεδιασμού

Η χρήση συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος εξοπλισμένων με αποσβεστήρες είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για τη μείωση των βλαβών στα συστατικά μέρη της κατασκευής, αναθέτοντας την απορρόφηση ενέργειας σε ειδικά σχεδιασμένα στοιχεία, τα οποία, εάν χρειαστεί, μπορούν να αντικατασταθούν μετά από ένα ή περισσότερα σεισμικά γεγονότα. Ωστόσο, ένα σημαντικό μειονέκτημα που είναι κοινό στις παραδοσιακές στρατηγικές σχεδιασμού παραμένει. Στην πραγματικότητα, τόσο στην περίπτωση παραδοσιακών συνδέσεων όσο και στην περίπτωση συνδέσεων εξοπλισμένων με σεισμικούς αποσβεστήρες, μετά από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα, η κατασκευή υπόκειται σε μόνιμες συνολικές παραμορφώσεις που οδηγούν σε κλίση της κατασκευής, της οποίας το μέγεθος διέπει τη δυνατότητα αποτελεσματικής επισκευής του κτιρίου. Για το λόγο αυτό, οι ερευνητικές προσπάθειες αφιερώνονται επίσης και στη δυνατότητα εξοπλισμού των συνδέσεων με συσκευές που επαναφέρουν τη κατασκευή στην αρχική της θέση, οι οποίες συχνά αποτελούνται από ένα σύστημα προέντασης.

Οι ενότητες που ακολουθούν παρέχουν μια σύντομη επισκόπηση για τις «έξυπνες συνδέσεις» εξοπλισμένες με σεισμικούς αποσβεστήρες διαφορετικών τύπων. Τα κύρια αποτελέσματα που προέρχονται από την τεχνική βιβλιογραφία και τα ερευνητικά έργα που βρίσκονται σε εξέλιξη παρουσιάζονται εν συντομία και γίνεται μία προσπάθεια ταξινόμησης. Γίνεται επίσης μια σύντομη παρουσίαση των συνδέσεων που είναι εξοπλισμένες με συστήματα που επαναφέρουν τη κατασκευή στην αρχική της θέση.

Η ευκρίνεια της έρευνας σε αυτά τα θέματα δείχνει ότι το μέλλον των χαλύβδινων κατασκευών μπορεί να είναι πραγματικά λαμπερό λόγω της ποικιλίας των κατασκευαστικών λύσεων και του τεράστιου πλεονεκτήματος που μπορούν να παρέχουν οι τεχνολογίες κατασκευής χάλυβα, σε σύγκριση με τις κατασκευές από οπλισμένο

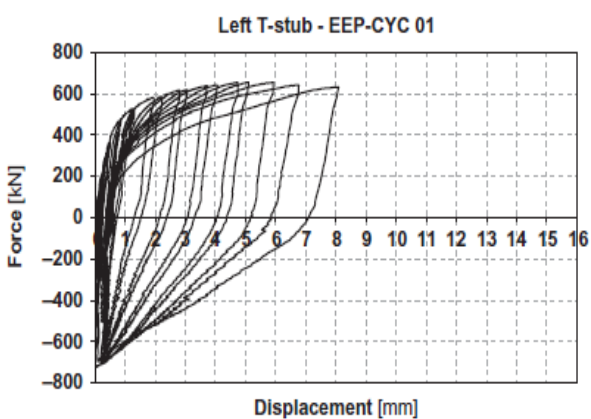
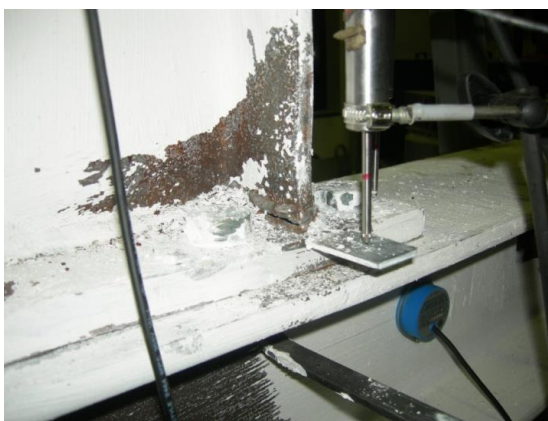
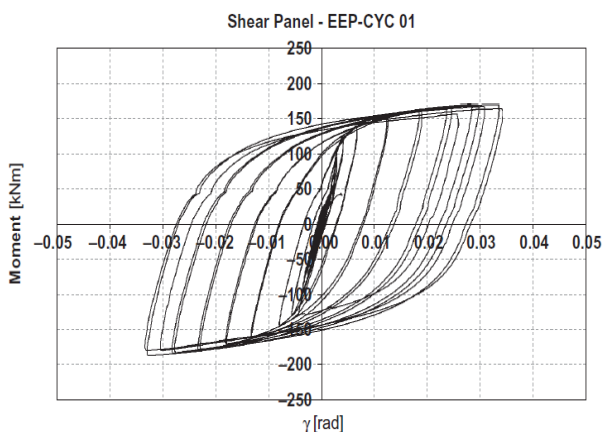
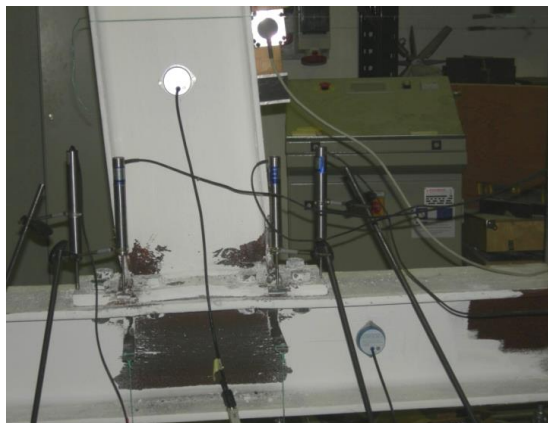
σκυρόδεμα, όταν πρέπει να αντιμετωπιστεί το τεράστιο έργο της σεισμικής ασφάλειας. Αποτελεί ευθύνη της βιομηχανίας χάλυβα να είναι σε θέση να προωθήσει τη χρήση χάλυβα σε χώρες υψηλού σεισμικού κινδύνου, γνωστοποιώντας στους σχεδιαστές και τους πελάτες τις δυνατότητες του χάλυβα για τη μείωση των άμεσων και έμμεσων απωλειών που συμβαίνουν συνήθως μετά από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα.

1.4 Μειονεκτήματα παραδοσιακών συνδέσεων

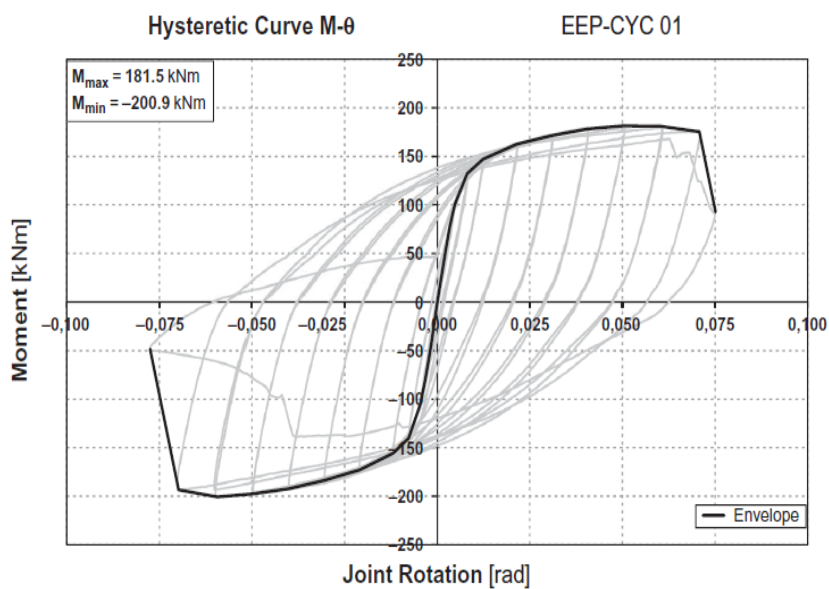
Μια γρήγορη επισκόπηση της στροφικής απόκρισης των παραδοσιακών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος μπορεί να ληφθεί από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο [25] όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ενός πειραματικού προγράμματος που ασχολείται με την συμπεριφορά αστοχίας των κοχλιωτών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος υπό ανακυκλικές δράσεις. Συγκεκριμένα, σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν διαφορετικές συνδέσεις που αποτελούνται από την ίδια δοκό και το ίδιο υποστυλώμα. Ο σχεδιασμός είχε ως στόχο να εξασφαλίσει στις συνδέσεις την ίδια αντοχή σε κάμψη, αλλάζοντας όμως σε κάθε σύνδεση το πιο αδύναμο στοιχείο. Ως εκ τούτου, επισημάνθηκε πώς η συμπεριφορά αστοχίας μπορεί να ρυθμιστεί με την κατάλληλη ενίσχυση των στοιχείων των οποίων η διαρροή πρέπει να αποφευχθεί. Σε αυτό το πλαίσιο, η στοιχειακή προσέγγιση υιοθετήθηκε ως εργαλείο σχεδιασμού για τα κριτήρια ιεραρχίας των στοιχείων. Επιπλέον, παρουσιάστηκε η πραγματική δυνατότητα επέκτασης της στοιχειακής προσέγγισης στην πρόβλεψη της στροφικής απόκρισης των συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος, με τα αποτελέσματα που προέκυψαν να μαρτυρούν ότι η προσέγγιση των συστατικών μερών μπορεί να είναι ένα ισχυρό εργαλείο και για τον αντισεισμικό σχεδιασμό των συνδέσεων.

Στο Σχήμα 1.2 [25] φαίνεται η συμπεριφορά μιας σύνδεσης με προέχουσα μεταλλική πλάκα, που έχει σχεδιαστεί για να λάβει το εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου σε διάτμηση ως το πιο αδύναμο συστατικό μέρος. Συγκεκριμένα, επισημαίνεται η ανακυκλική απόκριση των κύριων μερών της σύνδεσης. Η χρήση της μεθόδου συστατικών μερών επέτρεψε τον έλεγχο του συστατικού μέρους που αποτελεί την κύρια πηγή απορρόφησης ενέργειας, η οποία στην πραγματικότητα ήταν το εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου σε διάτμηση, όπως είναι εμφανές από τη την ανακυκλική απόκριση ροπής έναντι διατμητικής παραμόρφωσης του εσωτερικού φανώματος του κόμβου. Ωστόσο, λόγω της σημαντικής κράτνσης του φανώματος, η προκύπτουσα υπεραντοχή προκαλεί επίσης την διαρροή της μεταλλικής πλάκας σε κάμψη, με αποτέλεσμα η θραύση της συγκόλλησης που συνδέει την μεταλλική πλάκα με το πέλαμα της δοκού να διέπει την αστοχία της σύνδεσης.

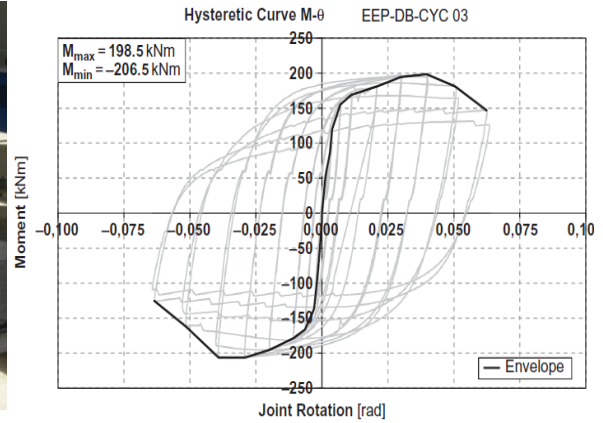
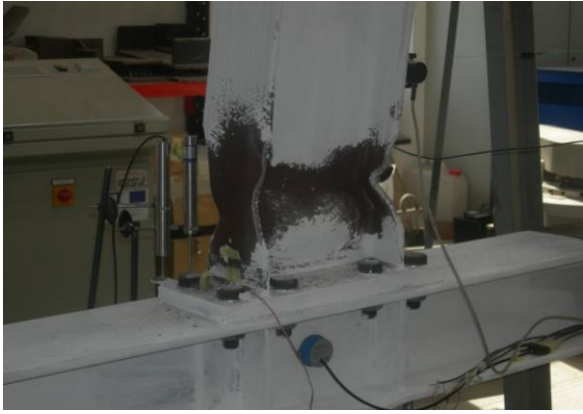
Η ανακυκλική απόκριση ροπής-στροφής της σύνδεσης φαίνεται στο Σχήμα 1.3 [25]. Επισημαίνει ότι, όταν η διαρροή της σύνδεσης περιλαμβάνει κυρίως το εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου σε διάτμηση, λαμβάνονται ευρείς και σταθεροί βρόχοι υστέρησης. Συγκεκριμένα, η ικανότητα πλαστικής στροφής της σύνδεσης είναι πολύ μεγαλύτερη από τις τιμές που συνήθως απαιτούνται σε καταστροφικά σεισμικά γεγονότα. Ωστόσο, παρόλο που η συγκέντρωση της διαρροής στο εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου είναι ικανή να διασφαλίσει επαρκή ικανότητα πλαστικής στροφής και δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, η δομική βλάβη είναι δύσκολο να επιδιορθωθεί. Επιπλέον, η μη γραμμική στατική ανάλυση που στοχεύει στην αξιολόγηση της αντισεισμικής απόδοσης θα πρέπει να πραγματοποιείται με κατάλληλη μοντελοποίηση του εσωτερικού φανώματος του κόμβου. Επιπλέον, μπορεί να εμφανιστούν σημαντικά φαινόμενα 2ας τάξεως στη πλαστική περιοχή. Για το λόγο αυτό, παρά την υψηλή ενεργειακή απορρόφηση που παρέχεται, οι συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος με διαρροή του εσωτερικού φανώματος του κόμβου πρέπει να αποφεύγονται.



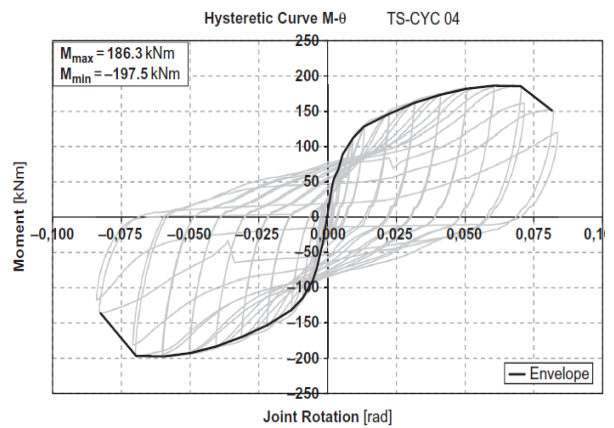
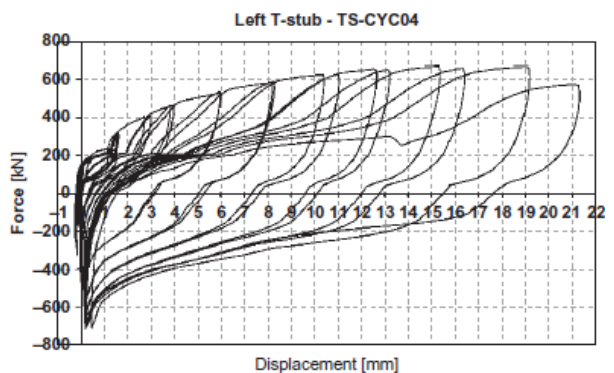
Σχήμα 1.2: Συμπεριφορά των συστατικών μερών της σύνδεσης, σχεδιασμένης με το εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου σε διάτμηση ως το πιο αδύναμο μέρος της σύνδεσης [25]



Σχήμα 1.3: Ανακυκλική απόκριση ροπής-στροφής της σύνδεσης, σχεδιασμένης με το εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου σε διάτμηση ως το πιο αδύναμο μέρος της σύνδεσης [25]



Σχήμα 1.4: Κυκλική απόκριση ροπής-στροφής σύνδεσης RBS [25]



Σχήμα 1.5: Ανακυκλική απόκριση ροπής-στροφής μιας σύνδεσης DST, σχεδιασμένης με τα βραχέα T ως το πιο αδύναμο μέρος της σύνδεσης [25]

Η συμπεριφορά της σύνδεσης πλήρους αντοχής δοκού-υποστυλώματος διέπεται από την διαρροή του άκρου της δοκού. Επομένως, η αντίστοιχη ανακυκλική συμπεριφορά διέπεται από το τοπικό λυγισμό των επιμέρους μερών που αποτελούν τη διατομή. Ο τοπικός λυγισμός πελμάτων και κορμού ρυθμίζει, ανάλογα με τις αναλογίες πλάτους προς ύψους, την υποβάθμιση της αντοχής που συμβαίνει υπό ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης. Αυτό ισχύει επίσης συνήθως για τις συνδέσεις RBS (reduced beam section - απομειωμένη διατομή δοκού). Το Σχήμα 1.4 [25] δείχνει την ανακυκλική απόκριση ροπής-στροφής μιας σύνδεσης με προέχουσα μεταλλική πλάκα τύπου RBS. Η σύνδεση έχει το ίδιο υποστύλωμα και την

ίδια δοκό του Σχήματος 1.2 και το RBS βαθμονομήθηκε για να έχει σχεδόν την ίδια αντοχή σε κάμψη.

Η πραγματική διαμόρφωση της πλαστικής άρθρωσης είναι προφανώς το αποτέλεσμα τοπικού λυγισμού που περιλαμβάνει ανακυκλικά τα δύο πέλματα και, λόγω των απαιτήσεων κινηματικής συμβατότητας, τον κορμό. Επίσης και σε αυτήν την περίπτωση, η ικανότητα πλαστικής στροφής είναι πολύ παραπάνω από τις τιμές που συνήθως απαιτούνται για καταστροφικά σεισμικά γεγονότα, αλλά πάλι το κύριο μειονέκτημα της παραδοσιακής φιλοσοφίας σχεδιασμού είναι προφανές. Το αντίτιμο της απορρόφησης ενέργειας είναι η δομική βλάβη που συμβαίνει στα άκρα της δοκού. Η πλαστική παραμόρφωση δημιουργεί μια μόνιμη γωνιακή παραμόρφωση κτιρίου της οποίας το μέγεθος διέπει τη δυνατότητα να επιδιορθωθεί αποτελεσματικά το κτίριο μετά από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα.

Το Σχήμα 1.5 δείχνει την ανακυκλική απόκριση μιας σύνδεσης διπλών συνδετικών T [25]. Οι διατομές της δοκού και του υποστυλώματος είναι οι ίδιες με τις συνδέσεις που εξετάστηκαν στα σχήματα 1.2 και 1.4. Τα κοχλιωτά T σύνδεσης σχεδιάστηκαν ως το πιο αδύναμο μέρος της σύνδεσης, και επιπλέον έτσι ώστε να αποκτηθεί σύνδεση δοκού-υποστυλώματος που να έχει σχεδόν την ίδια αντοχή κάμψης με τις συνδέσεις που εξετάστηκαν προηγουμένως. Ως εκ τούτου, επισημαίνεται η επίδραση της επιλογής του ασθενέστερου συστατικού μέρους. Η δύναμη έναντι της μετατόπισης του πιο αδύναμου μέρους της σύνδεσης, δηλ. του συνδετικού T, απεικονίζεται επίσης στο Σχήμα 1.5 (για το αριστερό T). Όπως ήταν αναμενόμενο, η αστοχία της σύνδεσης διέπεται από το συνδετικό T με το σχηματισμό γραμμών διαρροής στο πέλμα του T. Συγκεκριμένα, σημειώθηκε ρωγμή στη γραμμή διαρροής κοντά στον κορμό του T, αρχικά στο κεντρικό τμήμα του, και προοδευτικά αναπτύχθηκε μέχρι τη πλήρη θραύση του πέλματος. Τα σωστά σχεδιασμένα [25] συνδετικά T είναι σε θέση να παρέχουν μια ικανότητα πλαστικής στροφής πολύ πέρα από την τιμή που απαιτείται για σοβαρά σεισμικά γεγονότα. Ωστόσο, οι βρόχοι υστέρησης δεν είναι σταθεροί καθώς χαρακτηρίζονται από στένωση του βρόχου υστέρησης (pinching effect) που αυξάνεται προοδευτικά. Το κύριο πλεονέκτημα ενός τέτοιου παραδοσιακού τύπου σύνδεσης είναι ότι τα συνδετικά T μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν, έτσι ώστε να μπορούν να θεωρηθούν ως υστερητικοί αποσβεστήρες που εξοπλίζουν τη σύνδεση. Από την άλλη πλευρά, η παραμόρφωση κάμψης της σύνδεσης μπορεί να είναι σημαντική, ώστε να πρέπει να ληφθεί υπόψη στον στατικό σχεδιασμό. Κατά συνέπεια, η πλευρική παραμόρφωση της κατασκευής πρέπει να ελέγχεται κατάλληλα.

Ξεκινώντας από τη σύντομη επισκόπηση της ανακυκλικής στροφικής απόκρισης των παραδοσιακών συνδέσεων δοκού-υποστυλώματος που δίνονται παραπάνω, μπορούν να εξαχθούν οι ακόλουθες σκέψεις σχετικά με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των παραδοσιακών συνδέσεων.

Οι παραδοσιακές συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος πλήρους αντοχής εμφανίζουν γενικά τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας αποτελούνται από τα άκρα των δοκών που είναι ικανά να παρέχουν επαρκείς τιμές ικανότητας πλαστικής στροφής, πολύ παραπάνω από την τιμή αναφοράς, ίση με $0,035 \text{ rad}$, που συνήθως απαιτείται για κατασκευές υψηλής πλαστιμότητας. Αυτό διασφαλίζεται περιορίζοντας τις αναλογίες πλάτους προς πάχος των στοιχείων της διατομής,
- οι βρόχοι υστέρησης είναι ευρείς, ενώ η σταθερότητά τους σχετίζεται με την υποβάθμιση της αντοχής, όπως επηρεάζεται από την αναλογία πλάτους προς πάχος των στοιχείων της διατομής.

Τα κύρια μειονεκτήματα μπορούν να αναγνωριστούν ως εξής:

- οι ζώνες απορρόφησης ενέργειας ανήκουν στο κύριο δομικό σύστημα το οποίο, ως συνέπεια, υπόκειται σε βλάβη μετά από σοβαρά σεισμικά γεγονότα και, ως εκ τούτου, πρέπει να επιδιορθωθούν.
- η επισκευή των άκρων της δοκού δεν είναι εύκολη συγκριτικά με άλλα στοιχεία της σύνδεσης (όπως συνδετικά T).
- μετά από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα, η κατασκευή υπόκειται σε μόνιμες παραμορφώσεις. Επομένως, η επαναφορά στην αρχική της θέση είναι ένα μείζον μέλημα για την αποκατάσταση.
- άμεσες και έμμεσες απώλειες συμβαίνουν σε σοβαρά σεισμικά γεγονότα.

Αντίθετα, αναφορικά με τις παραδοσιακές συνδέσεις σχεδιασμένες ως συνδέσεις μερικής αντοχής, μπορούν να επισημανθούν τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- εάν αποκλείεται η διαρροή του εσωτερικού φατνώματος του κόμβου σε διάτμηση, τα στοιχεία με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας συνίστανται συνήθως από τα μεταλλικά στοιχεία που αποτελούν τα συνδετικά στοιχεία τα οποία σε πολλές περιπτώσεις μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν (όπως συνδετικά T και γωνιακά).
- οι δοκοί, δηλαδή τα στοιχεία που ανήκουν στο κύριο δομικό σύστημα, παραμένουν στην ελαστική περιοχή.

Από την άλλη πλευρά, εμφανίζονται τα ακόλουθα μειονεκτήματα:

- ο στατικός σχεδιασμός είναι ιδιαίτερα περίπλοκος όταν χρησιμοποιούνται συνδέσεις μερικής αντοχής, επειδή ο σχεδιαστής πρέπει να είναι σε θέση να λαμβάνει υπόψη και να ελέγχει όχι μόνο την αντοχή σε κάμψη της σύνδεσης αλλά και την στροφική δυσκαμψία και την ικανότητα πλαστικής στροφής.
- τα συνδετικά μέρη που υπόκεινται σε διαρροή πρέπει να επισκευαστούν ή να αντικατασταθούν.
- μετά από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα, η κατασκευή υπόκειται σε μόνιμες παραμορφώσεις. Επομένως, η επαναφορά στην αρχική της θέση είναι ένα μείζον μέλημα για την αποκατάσταση.
- άμεσες και έμμεσες απώλειες συμβαίνουν σε σοβαρά σεισμικά γεγονότα.

1.5 Έξυπνες συνδέσεις

Οι έξυπνες συνδέσεις αποτελούν απάντηση σε πολλά από τα μειονεκτήματα που παρουσιάζουν οι παραδοσιακές συνδέσεις, τόσο σε συνδέσεις πλήρους αντοχής όσο και μερικής αντοχής, σε περιπτώσεις κτιρίων που υπόκεινται σε καταστροφικά σεισμικά γεγονότα. Οι έξυπνες συνδέσεις μπορούν να σχεδιαστούν προκειμένου να επιτευχθεί ένας ή περισσότεροι από τους ακόλουθους στόχους:

- να διασφαλιστεί ότι το κύριο δομικό σύστημα παραμένει στην ελαστική περιοχή (όπως στην περίπτωση συνδέσεων μερικής αντοχής όπου οι δοκοί παραμένουν άθικτες).
- να απορροφήσει την ενέργεια που εισάγεται στο φορέα κατά το σεισμό μέσω ειδικά σχεδιασμένων συσκευών που μπορούν εύκολα να αντικατασταθούν από καταστροφικά σεισμικά γεγονότα.
- να μειώσει τις μόνιμες συνολικές παραμορφώσεις, που συμβαίνουν μετά από καταστροφικά σεισμικά συμβάντα.

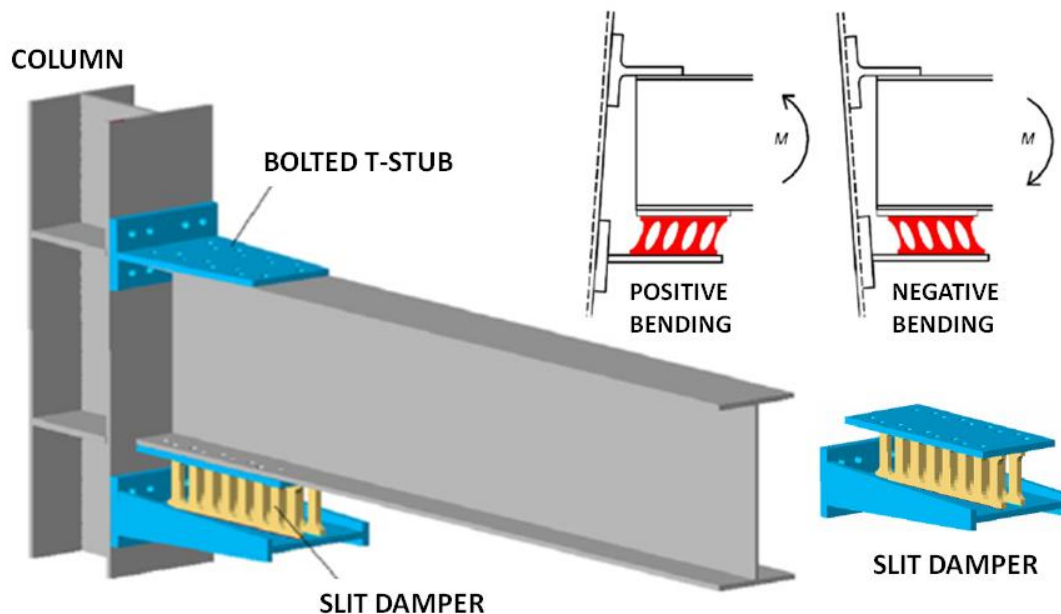
Προκειμένου να επιτευχθεί ένας ή περισσότεροι από τους παραπάνω στόχους, οι έξυπνες συνδέσεις μπορούν να σχεδιαστούν σύμφωνα με τις ακόλουθες στρατηγικές:

- εξοπλίζοντας τις συνδέσεις με σεισμικούς αποσβεστήρες που μπορούν να ανήκουν σε διαφορετικούς τύπους (υστερητικοί αποσβεστήρες, αποσβεστήρες εξώθησης μολύβδου, αποσβεστήρες αποτελούμενοι από συνδέσμους δυσκαμψίας με εξασφάλιση έναντι λυγισμού, αποσβεστήρες τριβής, αποσβεστήρες βασιζόμενοι από κράμα μνήμης σχήματος).
- εξοπλίζοντας τις συνδέσεις με συστήματα επαναφοράς στην αρχική θέση.
- εξοπλίζοντας τις συνδέσεις με σεισμικούς αποσβεστήρες και συστήματα επαναφοράς στην αρχική θέση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται εν συντομία ορισμένες προτάσεις συστημάτων έξυπνων συνδέσεων που ανήκουν σε διαφορετικούς τύπους.

1.5.1 Έξυπνες συνδέσεις με υστερητικούς αποσβεστήρες

Ένα καινοτόμο σύστημα σύνδεσης με αποσβεστήρες με σχισμές αναπτύχθηκε από τους Oh et al. [28], το οποίο όχι μόνο θα μπορούσε να προσφέρει καλή σεισμική απόδοση, αλλά θα μπορούσε επίσης να επισκευαστεί γρήγορα μετά από έναν ισχυρό σεισμό. Η σύνδεση δοκού-υποστυλώματος είναι εξοπλισμένη με αποσβεστήρα σχισμής που βρίσκεται στο κάτω πέλμα (Σχήμα 1.6) όπου συγκεντρώνονται οι πλαστικές παραμορφώσεις. Το κέντρο περιστροφής είναι σταθερό στο επίπεδο του άνω πέλματος, χρησιμοποιώντας ένα συνδετικό T. Η θέση του κέντρου περιστροφής έχει ως στόχο την πρόληψη της βλάβης της πλάκας από σκυρόδεμα που βρίσκεται συνήθως στο άνω πέλμα της δοκού. Η καμπτική αντοχή διαρροής και η καμπτική αντοχή αστοχίας της σύνδεσης διέπονται από τις τιμές διαρροής και αστοχίας της αντίστασης του αποσβεστήρα με σχισμές και από τον μοχλοβραχίονα.



Σχήμα 1.6: Σύνδεση δοκού-υποστυλώματος εξοπλισμένη με αποσβεστήρα με σχισμές [28]

Σύμφωνα με το συμβολισμό που δίνεται στο Σχήμα 1.7, η αντοχή διαρροής του αποσβεστήρα με σχισμές δίνεται από:

$$P_y = \min \left\{ n \frac{f_y t B^2}{2H'} ; n \frac{2f_y t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad (1.1)$$

όπου n είναι το πλήθος των κατακόρυφων στοιχείων του αποσβεστήρα με σχισμές, t είναι το πάχος, B είναι το πλάτος των στηριγμάτων, H' είναι το ισοδύναμο ύψος και f_y είναι το όριο διαρροής.

Η αντοχή αστοχίας δίνεται από:

$$P_u = \min \left\{ n \frac{f_u t B^2}{2H'} ; n \frac{2f_u t B}{3\sqrt{3}} \right\} \quad \text{με} \quad H' = H + 2 \frac{r^2}{H_T} \quad (1.2)$$

όπου H_T είναι το συνολικό ύψος των κατακόρυφων στοιχείων του αποσβεστήρα με σχισμές και f_u είναι η τάση αστοχίας.

Η αρχική μετατόπιση διαρροής του αποσβεστήρα με σχισμές δίνεται από:

$$\delta_y = \frac{1.5 P_y H_T}{n E t B} \left[\left(\frac{H'}{B} \right)^2 + 2.6 \right] \quad (1.3)$$

όπου E είναι το μέτρο ελαστικότητας (μέτρο Young).

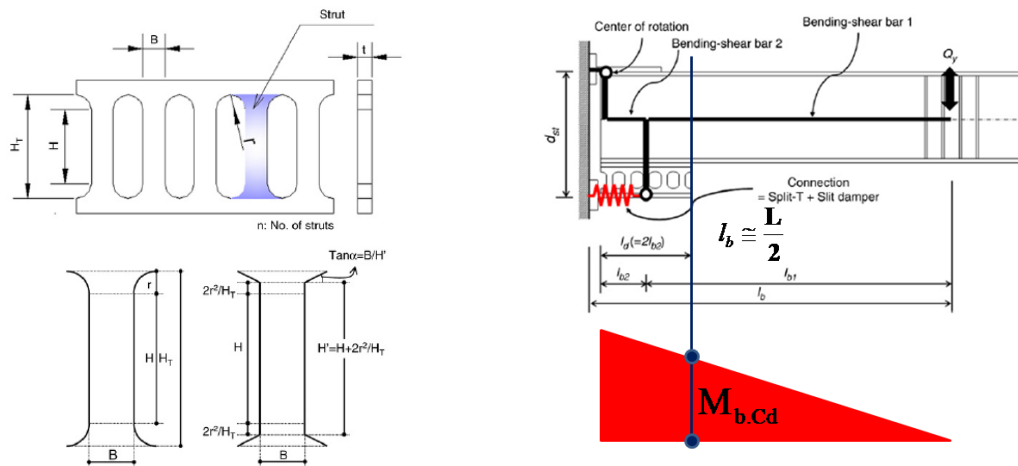
Καθώς ο στόχος των έξυπνων συνδέσεων είναι να αποτρέψει τη διαρροή των συνδεδεμένων δοκών, ένα κριτήριο σχεδιασμού μπορεί εύκολα να ληφθεί εφαρμόζοντας σωστά τη δεύτερη αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού αναφορικά με τα συστατικά μέρη της σύνδεσης. Σύμφωνα με αυτήν την αρχή, τα μέρη που δεν έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας πρέπει να σχεδιάζονται λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες εσωτερικές δράσεις που μπορούν να μεταδώσουν τα μέρη που έχουν τη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας μέχρι τις συνθήκες αστοχίας και κράτυνσής τους. Στην προκειμένη, το μέρος με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας αποτελείται από τον αποσβεστήρα με σχισμές, του οποίου η αντοχή αστοχίας δίνεται από την Εξ. (1.2). Επομένως, η ροπή κάμψης που αντιστοιχεί στην ικανότητα του αποσβεστήρα με σχισμές δίνεται από το (Σχήμα 1.7):

$$M_{b,Cd} = \frac{P_u d_{st}}{(l_{b1} + l_{b2})} (l_{b1} - l_{b2}) \quad (1.4)$$

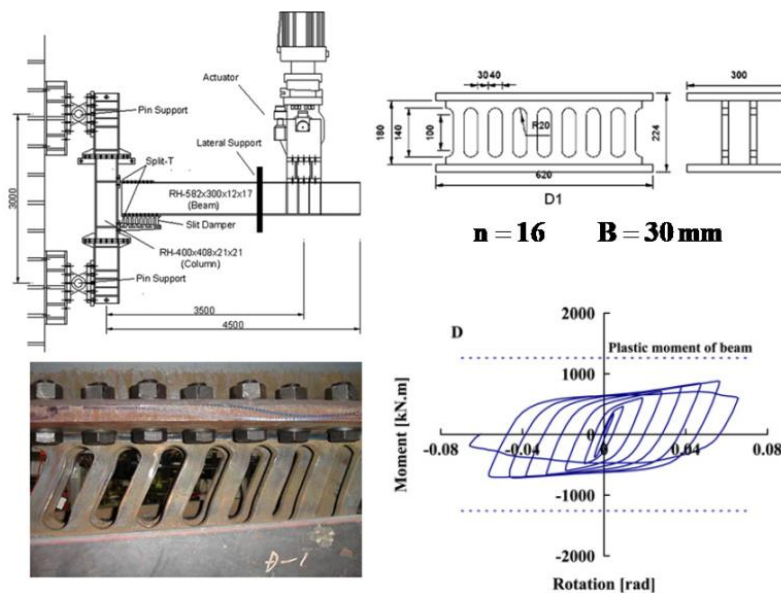
Επομένως, η δοκός, δηλαδή η κύρια ζώνη μη-απορρόφησης ενέργειας, της οποίας η διαρροή πρέπει να αποφευχθεί, πρέπει να ικανοποιεί το παρακάτω κριτήριο σχεδιασμού:

$$M_{b,Cd} \leq M_{b,Rd} \quad (1.5)$$

όπου $M_{b,Rd}$ η αντοχή σχεδιασμού της δοκού.



Σχήμα 1.7: Κριτήριο σχεδιασμού για συνδέσεις εξοπλισμένες με αποσβεστήρες με σχισμές



Σχήμα 1.8: Πειραματικά αποτελέσματα σε συνδέσεις εξοπλισμένες με αποσβεστήρες με σχισμές

Ο σχεδιασμός της δοκού αξιοποιώντας τις Εξ. (1.2), (1.4) και (1.5) διασφαλίζει ότι αποτρέπεται η διαρροή της δοκού. Προκειμένου να διασφαλιστεί ότι η απορρόφηση ενέργειας είναι συγκεντρωμένη μόνο στο αποσβεστήρα με σχισμές, πρέπει και όλα τα άλλα μέρη της σύνδεσης να σχεδιαστούν σύμφωνα με τη δεύτερη αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει ότι το συνδετικό T που βρίσκεται στο άνω πέλαμα πρέπει να είναι σχεδιασμένο για να μεταδίδει δύναμη ίση με P_u . Ομοίως, πρέπει επίσης να ελεγχθεί και ο κορμός σε θλίψη και εφελκυσμό, και το εσωτερικό φάτνωμα του κόμβου σε διάτμηση λαμβάνοντας υπόψη τη μέγιστη δύναμη P_u την οποία μπορεί να μεταδώσει ο αποσβεστήρας με σχισμές.

Λόγω της χρήσης ενός υστερητικού αποσβεστήρα ειδικά σχεδιασμένου για να εξασφαλίσει επαρκή ικανότητα μετατόπισης και απορρόφησης ενέργειας, οι συνδέσεις που είναι εξοπλισμένες με αποσβεστήρες με σχισμές είναι σε θέση να εξασφαλίσουν σταθερούς βρόχους υστέρησης (Σχήμα 1.8) με πλαστική ικανότητα στροφής πέρα από την τιμή

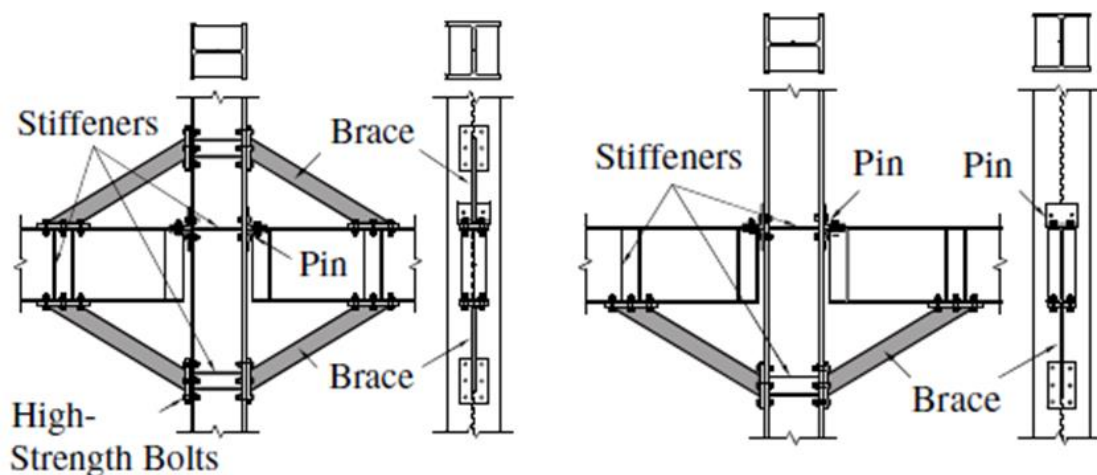
αναφοράς που απαιτείται από τις διατάξεις του κώδικα, και να αποτρέψουν την διαρροή της συνδεδεμένης δοκού. Επομένως, μετά από ένα καταστροφικό σεισμικό γεγονός, θα μπορούσε να χρειαστεί μόνο η αντικατάσταση του αποσβεστήρα.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών [28] έδειξαν ότι οι σωστά σχεδιασμένες συνδέσεις με αποσβεστήρες με σχισμές εμφάνισαν εξαιρετική υστερητική συμπεριφορά. Επιπλέον, η απορρόφηση ενέργειας και η πλαστική παραμόρφωση σε αυτό το σύστημα συγκεντρώθηκαν μόνο στους αποσβεστήρες με σχισμές, ενώ αποτρέπεται η ανελαστική συμπεριφορά δοκών και υποστυλωμάτων μέσω κατάλληλου ικανοτικού σχεδιασμού.

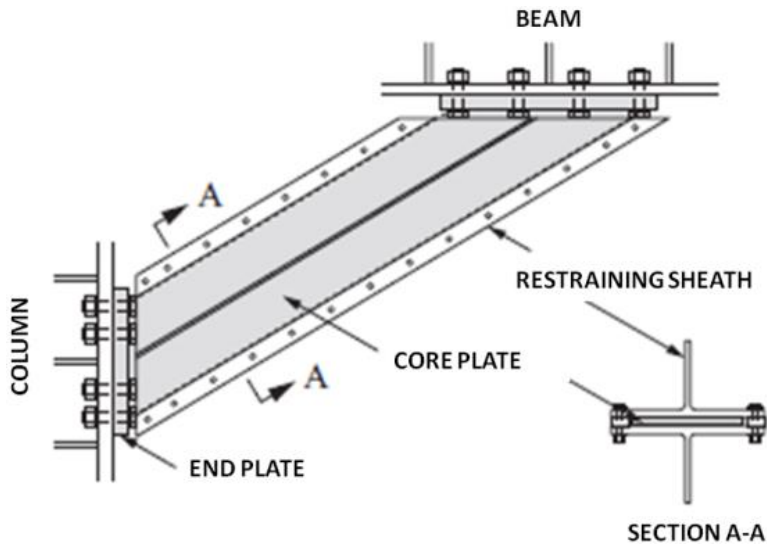
1.5.2 Έξυπνες συνδέσεις με συνδέσμους δυσκαμψίας με εξασφάλιση έναντι λυγισμού

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι σύνδεσμοι δυσκαμψίας με εξασφάλιση έναντι λυγισμού (Buckling Restrained Braces - BRB) αποτελούνται από έναν κεντρικό πυρήνα που υπόκειται σε εφελκυσμό / θλίψη και αντιπροσωπεύει το στοιχείο με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Ο λυγισμός του πυρήνα σε θλίψη εμποδίζεται χρησιμοποιώντας μια κατάλληλα σχεδιασμένη εξωτερικό περίβλημα. Επομένως, οι BRB μπορούν να θεωρηθούν ως ένας ιδιαίτερος τύπος υστερητικών αποσβεστήρων που χρησιμοποιούνται συνήθως ως στοιχεία συνδέσμων σε πλαίσια με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα. Ωστόσο, μόλις αναγνωριστούν ως τυπολογία υστερητικών αποσβεστήρων, είναι προφανές ότι η χρήση τους θα μπορέσει να επεκταθεί σε πολλές διατάξεις φορέων. Συγκεκριμένα, έχει προταθεί η χρήση BRB για τον εξοπλισμό κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με υστερητικούς αποσβεστήρες στο [29] (Σχήμα 1.9), όπου έχουν διερευνηθεί δύο διατάξεις.

Η πρώτη διάταξη αντιστοιχεί στη χρήση BRB που συνδέονται τόσο το άνω πέλμα όσο και το κάτω πέλμα. Στην δεύτερη διάταξη, οι BRB συνδέονται μόνο στο κάτω πέλμα. Και στις δύο περιπτώσεις, το άνω πέλμα συνδέεται στο υποστύλωμα επίσης χρησιμοποιώντας κοχλιωμένο έλασμα διατομής T, το οποίο ουσιαστικά καθορίζει τη θέση του κέντρου περιστροφής.



Σχήμα 1.9: Σύνδεση δοκού-υποστύλωματος εξοπλισμένη με BRB [29]

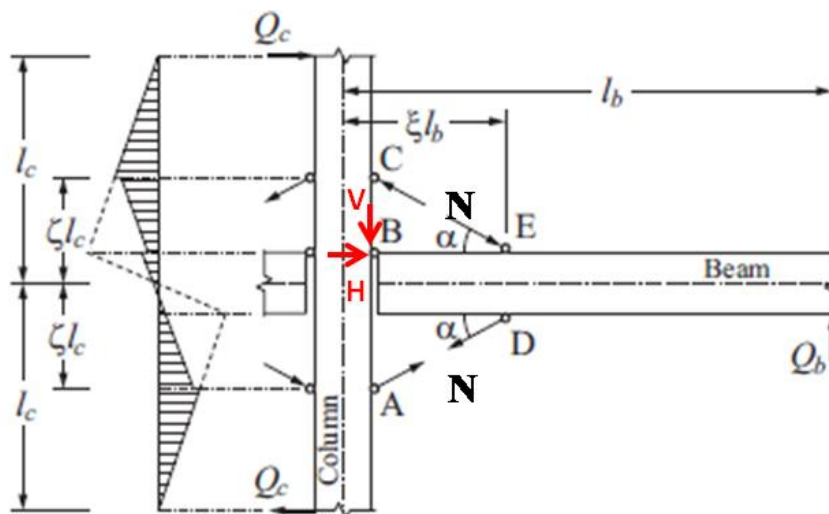


Σχήμα 1.10: Λεπτομέρεια του «όλο χάλυβα» BRB που χρησιμοποιείται ως υστερητικός αποσβεστήρας [29]

Ο υστερητικός αποσβεστήρας αποτελείται από ένα πυρήνα του οποίου ο λυγισμός σε θλίψη εμποδίζεται από ένα εξωτερικό περίβλημα που σχηματίζεται από δύο κοχλιωμένα Τ. Ως εκ τούτου, ο αποσβεστήρας BRB είναι «όλος χάλυβα» (Σχήμα 1.10).

Ο πρωταρχικός στόχος των έξυπνων συνδέσεων είναι η αποφυγή της διαρροής της δοκού και η συγκέντρωση της απορρόφησης ενέργειας στους σεισμικούς αποσβεστήρες. Επομένως, και σε αυτήν την περίπτωση, ο σχεδιασμός των δομικών λεπτομερειών πρέπει να βασίζεται στην εφαρμογή αρχών ικανοτικού σχεδιασμού σε επίπεδο συστατικών μερών. Αρχίζοντας από τη συνθήκη διαρροής του πυρήνα $N = N_y$, η διάτμηση της δοκού $Q_b = Q_{bp}$ που οδηγεί στη συνθήκη διαρροής, μπορεί εύκολα να ελεγχθεί (Σχήμα 11). Στην πραγματικότητα, ως παράδειγμα, σχετικά με τη διάταξη με BRB που συνδέουν τόσο το άνω πέλμα όσο και το κάτω πέλμα, η εξίσωση κατακόρυφης ισοροπίας δίνει:

$$V = Q_{bp} - 2N_y \sin \alpha \quad (1.6)$$



Σχήμα 1.11: Κατανομή δυνάμεων σε συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος εξοπλισμένες με άνω και κάτω BRB [29]

Η σχέση οριζόντιας ισορροπίας δίνει $H = 0$ και, τέλος, η ισορροπία ροπών ως προς το σημείο B δίνει:

$$Q_{bp} = \frac{2N_y \cos\alpha}{2l_b - d_c} [d_b + \text{tg}\alpha(2\xi l_b - d_c)] \quad (1.7)$$

Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη ότι:

$$\text{tg}\alpha = \frac{\zeta l_c - \frac{d_b}{2}}{\xi l_b - \frac{d_c}{2}} \quad (1.8)$$

η διάτμηση της δοκού που αντιστοιχεί στη διαρροή του πυρήνα του BRB δίνεται από:

$$Q_{bp} = \frac{4\zeta l_c}{2l_b - d_c} N_y \cos\alpha \quad (1.9)$$

Η μέγιστη ροπή κάμψης, που εμφανίζεται στη δοκό όταν διαρρέει ο BRB, αναπτύσσεται στο τμήμα ED, και σύμφωνα με τη δεύτερη αρχή του ικανοτικού σχεδιασμού, δίνεται από:

$$M_{b,Cd} = Q_{bp}(1-\xi)l_b = \frac{4\zeta l_c}{2l_b - d_c} N_y \cos\alpha (1-\xi)l_b \quad (1.10)$$

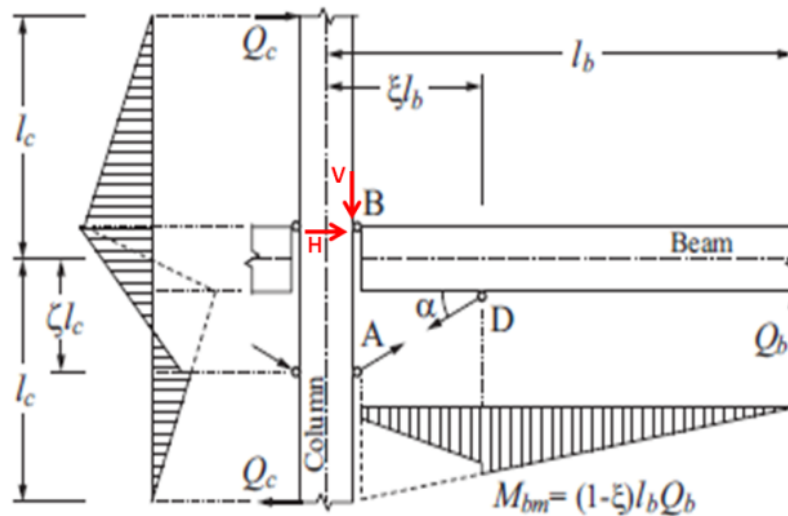
Προκειμένου να αποφευχθεί η διαρροή της δοκού, πρέπει να πληρείται η ακόλουθη συνθήκη:

$$M_{b,Cd} \leq M_{b,Rd} = \frac{Z_b f_y}{\gamma_{M0}} \quad (1.11)$$

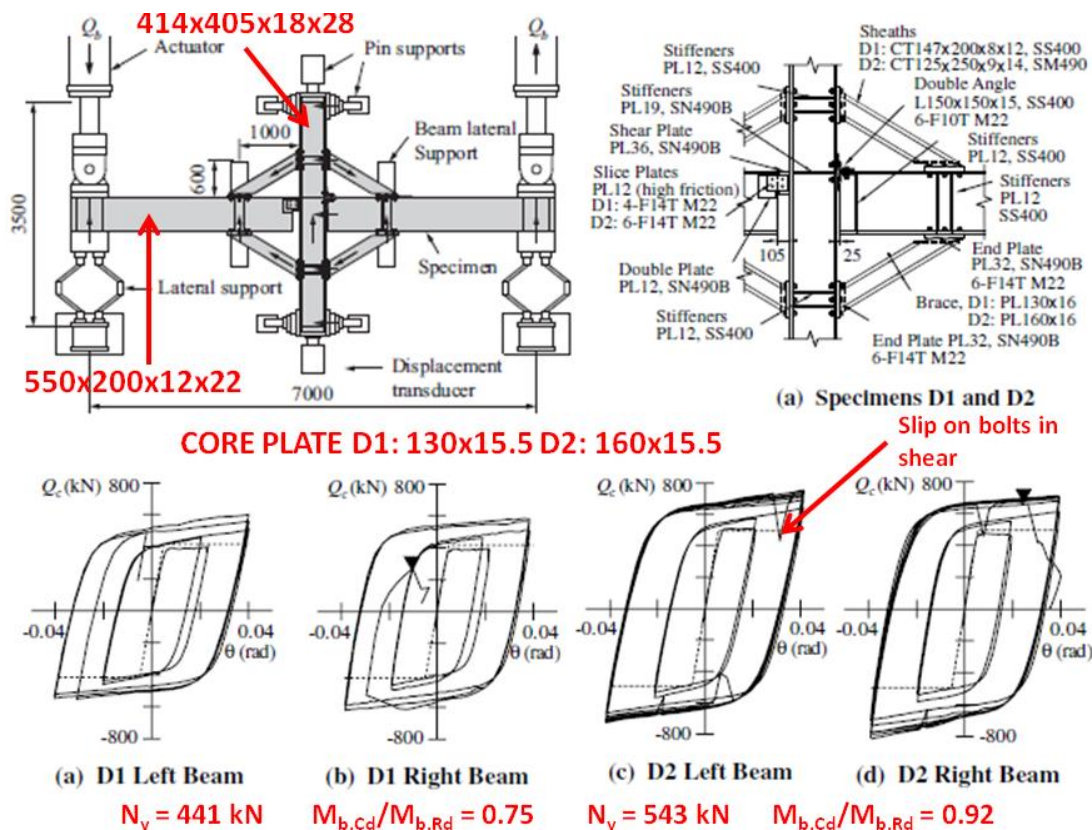
Επομένως, συνδυάζοντας τις Εξ. (1.11) και Εξ. (1.10), προκύπτει εύκολα μία σχέση για τον σχεδιασμό του πυρήνα του BRB, δεδομένων των διατομών των δοκών:

$$A_{\text{core}} \leq \frac{1}{f_y} \frac{M_{b,Rd} \left(1 - \frac{d_c}{2l_b}\right)}{2\zeta l_c (1-\xi) \cos\alpha} \quad (1.12)$$

Αφού ο πυρήνας των BRB σχεδιαστεί για αποφυγή διαρροής της δοκού, τα υπόλοιπα στοιχεία της σύνδεσης πρέπει να διαστασιολογηθούν λαμβάνοντας υπόψη τις μέγιστες δυνάμεις που μεταδίδονται όταν διαρρέει ο πυρήνας, δηλαδή όταν $N = N_y$.



Σχήμα 1.12: Κατανομή δυνάμεων σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων με κάτω BRB [29]



Σχήμα 1.13: Ανακυκλική απόκριση ροπής-στροφής σε κόμβους δοκού-υποστυλώματος με BRB [29]

Εφαρμόζοντας την ίδια διαδικασία στην περίπτωση κόμβου δοκού-υποστυλώματος με BRB που βρίσκονται μόνο στο κάτω πέλμα (Σχήμα 1.12), λαμβάνεται η ακόλουθη σχέση για το σχεδιασμό του πυρήνα:

$$A_{\text{core}} \leq \frac{1}{f_y} \frac{M_{b,Rd} \left(1 - \frac{d_c}{2l_b}\right)}{\zeta l_c (1 - \xi) \left(1 + \frac{d_b}{2\zeta l_c}\right) \cos \alpha} \quad (1.13)$$

Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι σωστά σχεδιασμένοι κόμβοι με συνδέσμους δυσκαμψίας με εξασφάλιση έναντι λυγισμού (BRB) που χρησιμοποιήθηκαν ως υστερητικοί αποσβεστήρες, έδειξαν εξαιρετική υστερητική συμπεριφορά (Σχ. 13). Η απορρόφηση ενέργειας και η πλαστική παραμόρφωση συγκεντρώθηκαν μόνο στα BRB, ενώ η ανελαστική συμπεριφορά των δοκών και των υποστυλωμάτων αποτρέπεται μέσω κατάλληλου ικανοτικού σχεδιασμού.

1.5.3 Έξυπνες συνδέσεις με αποσβεστήρες τριβής

Παρόλο που οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων με αποσβεστήρες τριβής προτάθηκαν για πρώτη φορά το 1995 από τους Popon και Yang [30], η έρευνα σχετικά με αυτό τον καινοτόμο τύπο σύνδεσης προωθήθηκε μόνο πρόσφατα, κυρίως στη Νέα Ζηλανδία [31-35], όπου έχουν γίνει επίσης και οι πρώτες εφαρμογές σε κτίρια στα “Te Puni Village Buildings” [36], και στην Ιταλία [9, 10, 37-39].

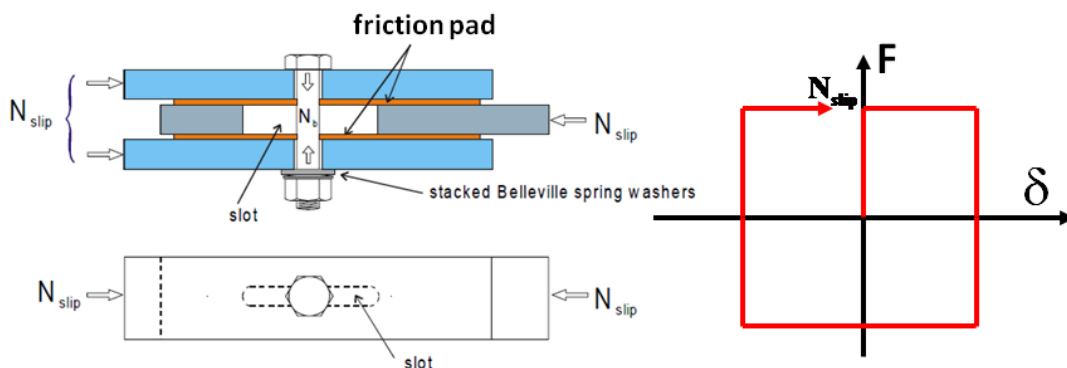
Οι αποσβεστήρες τριβής που προτείνονται σήμερα για τον εξοπλισμό κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: 1) αποσβεστήρες βασισμένους σε Συμμετρικές Συνδέσεις Τριβής (Symmetric Friction Connections - SFC) και 2) αποσβεστήρες βασισμένους σε Ασύμμετρες Συνδέσεις Τριβής (Asymmetric Friction Connections - AFC).

Οι συμμετρικές συνδέσεις τριβής τυπικά συνίστανται από δύο εξωτερικές πλάκες κοχλιωμένη με συνήθειες οπές σε μία εσωτερική πλάκα με επιμήκη οπή παράλληλα στον άξονα φόρτισης. Επιπλέον, τοποθετούνται πλάκες τριβής ανάμεσα στις εξωτερικές πλάκες και την εσωτερική πλάκα (Σχήμα 1.14). Οι πλάκες τριβής μπορεί να αποτελούνται από πλάκα ειδικά επιλεγμένου υλικού ή από χαλύβδινες πλάκες κατάλληλα επιστρωμένες. Και στις δύο περιπτώσεις, είτε το υλικό των πλακών τριβής, είτε η επίστρωση των χαλύβδινων πλακών πρέπει να επιλέγεται κατάλληλα ώστε να παρέχουν επαρκείς τιμές του συντελεστή τριβής και να μειώσουν την απώλεια προέντασης κοχλία λόγω της φθοράς των επιφανειών επαφής, με σκοπό τη διασφάλιση της σταθερότητας των βρόχων υστέρησης [40, 42]. Οι συνήθειες δακτύλιοι αντικαθίστανται με δακτύλιους Belleville, δηλ. δισκοειδή ελατήρια, ώστε να μειωθούν οι απώλειες της προέντασης κοχλία.

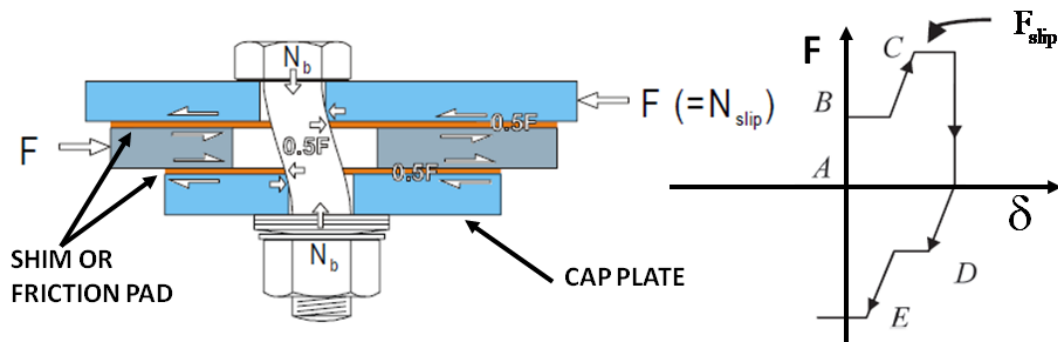
Η θεωρητική συμπεριφορά δύναμης-μετατόπισης μιας συμμετρικής σύνδεσης τριβής μπορεί να αντιστοιχιστεί στο ιδανικά άκαμπτο-απόλυτα πλαστικό μοντέλο, όπου η οριζόντια περιοχή (plateau) στην πραγματικότητα οφείλεται στην αντίσταση ολίσθησης της σύνδεσης, που μπορεί να υπολογισθεί ως:

$$N_{slip} = n_b n_s \mu N_b \quad (1.14)$$

όπου n_b το πλήθος των κοχλιών, n_s το πλήθος των επιφανειών ολίσθησης, μ ο συντελεστής τριβής και N_b η δύναμη προέντασης του κοχλία.



Σχήμα 1.14: Βασική ιδέα και ιδανική συμπεριφορά δύναμης-μετατόπισης μίας συμμετρικής σύνδεσης τριβής (SFC)



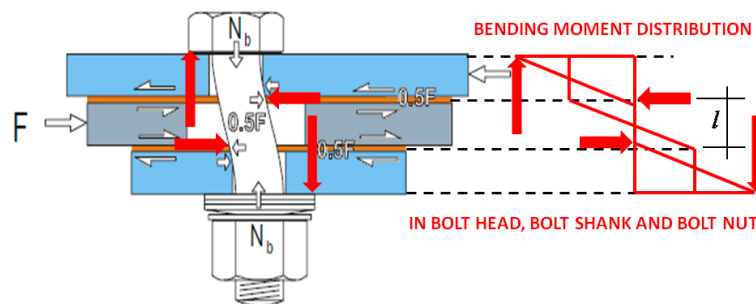
Σχήμα 1.15: Βασική ιδέα και ιδανική συμπεριφορά δύναμης-μετατόπισης μίας ασύμμετρης σύνδεσης τριβής (AFC)

Οι ασύμμετρες συνδέσεις τριβής επίσης αποτελούνται από δύο εξωτερικές πλάκες κοχλιωμένες με συνήθεις οπές σε μία εσωτερική πλάκα με επιμήκειες οπές παράλληλα στον άξονα φόρτισης, αλλά η δύναμη μεταδίδεται στη συσκευή μόνο μέσω της μίας εξωτερικής πλάκας. Η δεύτερη εξωτερική πλάκα, το λεγόμενο καπάκι, δεν υπόκειται σε εξωτερικές δυνάμεις. Επίσης, δύο σφήνες ή πλάκες τριβής βρίσκονται μεταξύ των εξωτερικών πλακών και της εσωτερικής πλάκας.

Υπάρχουν δύο επιφάνειες ολίσθησης στην AFC (ασύμμετρη σύνδεση τριβής): 1) η διεπιφάνεια μεταξύ της άνω σφήνας και της εξωτερικής πλάκας που μεταδίδει την εφαρμοζόμενη δύναμη, και 2) η διεπιφάνεια μεταξύ της κάτω σφήνας και της εξωτερικής πλάκας. Η ιδανική συμπεριφορά μετατόπισης-δύναμης των AFC χαρακτηρίζεται από δύο επίπεδα αντίστασης ολίσθησης. Καθώς η σεισμική ένταση υπερβαίνει την αντίσταση τριβής της AFC, η ολίσθηση αρχικά λαμβάνει χώρα στην πρώτη διεπιφάνεια για ένα επίπεδο αντίστασης που αντιστοιχεί στο σημείο B. Περαιτέρω αυξήσεις στη σεισμική ένταση αναγκάζουν τη δεύτερη διεπιφάνεια να ολισθήσει, που αντιπροσωπεύεται από το επίπεδο ολίσθησης C. Σε αυτό το στάδιο, ο κοχλίας βρίσκεται σε διπλή καμπυλότητα, με κατανομή ροπής-κάμψης που φαίνεται στο Σχήμα 1.16. Κατά την αντιστροφή του φορτίου, η ολίσθηση εμφανίζεται στην πρώτη διεπιφάνεια (D), ακολουθούμενη από τη δεύτερη διεπιφάνεια (E).

Η μέγιστη ροπή κάμψης στον κορμό του κοχλία δίνεται από:

$$M = \frac{Vl}{2} = \frac{\mu Nl}{2} \quad (1.15)$$



Σχήμα 1.16: Συμπεριφορά κορμού κοχλία σε διπλή καμπυλότητα

Η αντοχή σχεδιασμού σε κάμψη του κορμού του κοχλίου, απομειωμένη λόγω της ταυτόχρονης εφελκυστικής δύναμης N λόγω της προέντασης του κοχλίου, δίνεται από:

$$M_{\text{bolt.Rd}} = Z_b \left(1 - \frac{N}{N_{\text{b.Rd}}} \right) f_{\text{ub}} \cong 0.1655 d_b^3 \left(1 - \frac{N}{0.56 d_b^2 f_{\text{ub}}} \right) f_{\text{ub}} \quad (1.16)$$

Η αντίσταση σχεδιασμού σε διάτμηση του κορμού του κοχλίου δίνεται από:

$$V_{\text{bolt.Rd}} \cong 0.62 f_{\text{ub}} 0.56 d_b^2 \quad (1.17)$$

Καθώς ο κοχλίας υπόκειται ταυτόχρονα σε ροπή και διάτμηση, η αλληλεπίδραση M-V λαμβάνεται υπόψη χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{M}{M_{\text{bolt.Rd}}} + \frac{V}{V_{\text{bolt.Rd}}} = 1 \quad (1.18)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι $V = \mu N$, συνδυάζοντας τις εξισώσεις (1.15-1.18) και λύνοντας ως προς N , η αντίσταση ολίσθησης ανά κοχλίο εκτιμάται ως:

$$F_{\text{slip}} = 2\mu N \quad (1.19)$$

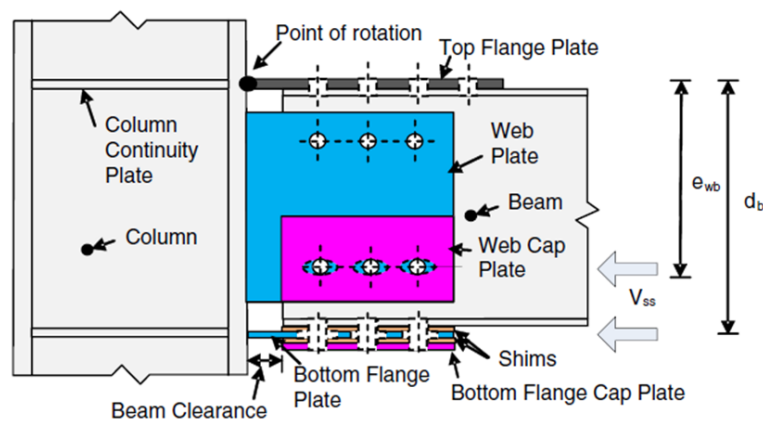
Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι το κύριο μειονέκτημα των AFC (ασύμμετρες συνδέσεις τριβής) σε σύγκριση με τις SFC (συμμετρικές συνδέσεις τριβής) οφείλεται στην αλληλεπίδραση M-N-V στον κορμό του κοχλίου, η οποία, με δεδομένο τον συντελεστή τριβής και τη διάμετρο κοχλίου, οδηγεί σε απομείωση της δύναμης που μεταφέρεται μέσω ολίσθησης. Στην πραγματικότητα, η τιμή του N που αντιστοιχεί στην κατάσταση διαρροής είναι μικρότερη του N_b , έτσι ώστε οι AFC είναι σε θέση να μεταφέρουν λιγότερη δύναμη σε σύγκριση με τα SFC. Από την άλλη πλευρά, οι συγγραφείς των AFC ισχυρίζονται ότι το σχήμα του βρόχου υστέρησης οδηγεί σε επαναφορά της κατασκευής στην απαραμόφωτη κατάσταση.

Οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων που είναι εξοπλισμένοι με αποσβεστήρες τριβής αναφέρονται επίσης και ως αρθρωτοί κόμβοι ολίσθησης (Σχήμα 1.17) [31-35]. Το άκρο της δοκού τοποθετείται ώστε να αφήνει ένα «διάκενο δοκού» μακριά από την όψη του υποστυλώματος. Το άνω πέλμα της δοκού συνδέεται με το υποστύλωμα με έλασμα συγκολλημένο στο υποστύλωμα και κοχλιωμένο στη δοκό. Το άκρο του ελάσματος που είναι συγκολλημένο στο υποστύλωμα, καθορίζει τη θέση του κέντρου περιστροφής. Η θέση του κέντρου περιστροφής στοχεύει στην ελαχιστοποίηση της βλάβης στην πλάκα. Η διατμητική δύναμη στην δοκό μεταφέρεται από τους άνω κοχλίες του κορμού. Οριζόντιες διαμήκεις οπές βρίσκονται στη πλάκα του κάτω πέλματος και στις κάτω οπές του κορμού του υποστυλώματος ώστε να επιτρέπουν σημαντικές στροφές της δοκού σε σχέση με την όψη του υποστυλώματος. Αφήνεται ένα διάκενο μεταξύ του άκρου της δοκού και της όψης του υποστυλώματος. Αυτό το διάκενο χρειάζεται να είναι αρκετά μεγάλο ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε στροφή που αναμένονται σε σοβαρά σεισμικά γεγονότα. Κάτω από τη πλάκα του κάτω πέλματος βρίσκεται το καπάκι του κάτω πέλματος. Είναι μία αιρούμενη πλάκα επειδή δεν έχει φυσική επαφή με τον υπόλοιπο κόμβο, εκτός από μέσω των κοχλίων. Ένα καπάκι κορμού τοποθετείται ομοίως στο εξωτερικό της πλάκας κορμού. Σε όλες τις επιφάνειες όπου μπορεί να εμφανιστεί ολίσθηση, τοποθετούνται σφήνες. Αυτές οι σφήνες μπορεί να κατασκευάζονται από γάλυβα, ορείχαλκο ή άλλα υλικά, και έχουν οπές τυπικού

μεγέθους, οπότε η ολίσθηση λαμβάνει χώρα στην πλευρά της σφήνας σε επαφή με την πλάκα κάτω πέλματος ή την πλάκα κορμού.

Η ανακυκλική συμπεριφορά των αρθρωτών κόμβων ολίσθησης με ασύμμετρες συνδέσεις τριβής φαίνεται στο Σχήμα 1.18. Μπορεί να επισημανθεί ότι το σχήμα του υστερητικού βρόχου δεν είναι εκείνο μιας παραδοσιακής συσκευής τριβής (δηλ. ορθογώνιο), αλλά είναι σαν μία ξεθωριασμένη εκδοχή του.

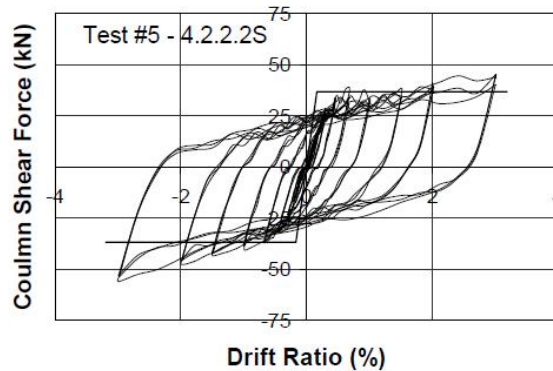
Αυτός ο τύπος σύνδεσης αναφέρεται ως σύνδεση χαμηλής βλάβης, επειδή η διαρροή περιορίζεται στην ανάπτυξη μίας γραμμής διαρροής στη πλάκα του άνω πέλματος και στη πλάκα του κάτω πέλματος που είναι συγκολλημένες στο πέλμα του υποστυλώματος, λόγω της κάμψης αυτών των πλακών που οδηγεί σε περιστροφή του κόμβου, και της διαρροής των κοχλιών που οφείλεται στην αλληλεπίδραση M-N-V που είναι τυπική στις AFC. Αυτό σημαίνει ότι, μετά από σοβαρά σεισμικά γεγονότα, οι κοχλίες πρέπει να αντικατασταθούν.



Σχήμα 1.17: Αρθρωτός κόμβος ολίσθησης με ασύμμετρες συνδέσεις τριβής [36, 43]

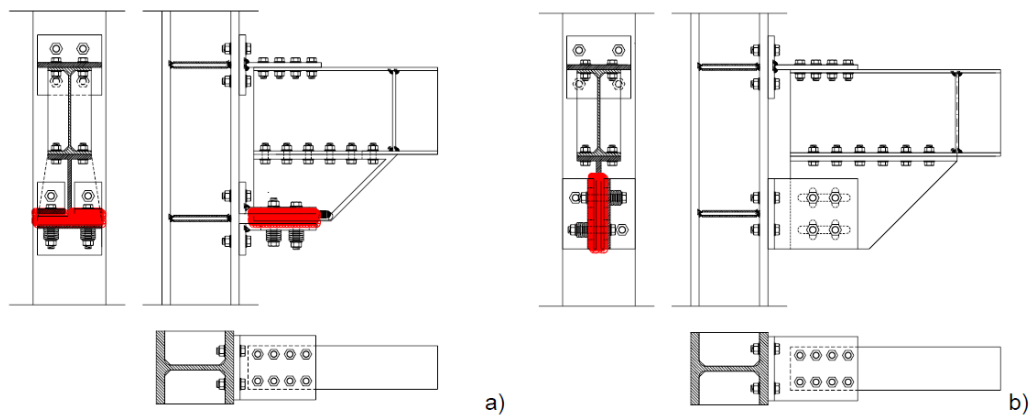


(a) Test Frame



(b) Hysteretic Behaviour

Σχήμα 1.18: Ανακυκλική συμπεριφορά αρθρωτού κόμβου ολίσθησης με ασύμμετρες συνδέσεις τριβής [43]



Σχήμα 1.19: a) Διαμόρφωση με οριζόντιο αποσβεστήρα
b) Διαμόρφωση με κατακόρυφο αποσβεστήρα

Μία ευρεία πειραματική ανάλυση των συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων με συμμετρικές συνδέσεις τριβής πραγματοποιήθηκε στο Πανεπιστήμιο του Σαλέρνο (Salerno University) στα πλαίσια του Ευρωπαϊκού Ερευνητικού Έργου RFCS FREEDAM (European RFCS Research Project FREEDAM) [44]. Η σύνδεση έχει σχεδιαστεί για να επιτρέπει τη χρήση ενός αποσβεστήρα τριβής εντελώς προκατασκευασμένο και συναρμολογημένο στο εργοστάσιο, για να εξασφαλιστεί ο μέγιστος έλεγχος της σύσφιξης των κοχλιών, και, σαν αποτέλεσμα, του επιπέδου προέντασης που διέπει την αντίσταση ολίσθησης του αποσβεστήρα τριβής. Επομένως, ο προκατασκευασμένος και προ-συναρμολογημένος αποσβεστήρας τριβής κοχλιώνεται διαδοχικά στο πέλμα του υποστυλώματος και το πέλμα της δοκού. Επιπλέον, ο προκατασκευασμένος αποσβεστήρας τριβής προκαλεί αύξηση του μοχλοβραχίονα και, συνεπώς, αύξηση της ροπής κάμψης που αντιστοιχεί στην ολίσθηση (Σχήμα 1.19). Το πειραματικό πρόγραμμα για την ανάπτυξη του αποσβεστήρα παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2, ενώ ο δοκιμαστικός έλεγχος πλήρων κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 3.

Οκτώ εξωτερικές συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων έχουν δοκιμαστεί. Ο κύριος στόχος των δοκιμών είναι, αφενός η επαλήθευση της διαδικασίας σχεδιασμού που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του έργου, και αφετέρου η αξιολόγηση του προτεινόμενου συστήματος όσον αφορά την απορρόφηση ενέργειας και την πρόληψη βλαβών στη σύνδεση.

Οι δοκιμές εξέτασαν οκτώ κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων, λαμβάνοντας υπόψη δύο διαφορετικές διατομές της δοκού (IPE 270 και IPE 450) και δύο διαφορετικές διατάξεις του αποσβεστήρα (οριζόντιο και κατακόρυφο) που εξοπλίζουν τον κόμβο (Σχήμα 1.19). Για κάθε διαμόρφωση αποσβεστήρα η δοκιμή εκτελείται δύο φορές, μία χρησιμοποιώντας δισκοειδή ελατήρια και μία χρησιμοποιώντας επίπεδους δακτυλίους για τις διατάξεις κοχλιών [44, 45].

Τα δοκίμια έχουν σχεδιαστεί ώστε να εκμεταλλεύονται για όλα τα μέρη του κόμβου, εκτός από τις πλάκες τριβής, τα μοντέλα που έχουν προταθεί από τον Ευρωκώδικα 3, Μέρος 1-8, ενώ για το νέο μέρος, δηλ. τον αποσβεστήρα τριβής, έχουν αξιοποιηθεί τα αποτελέσματα που προέρχονται από πειραματικές δοκιμές ειδικά αφιερωμένες στον αποσβεστήρα τριβής.

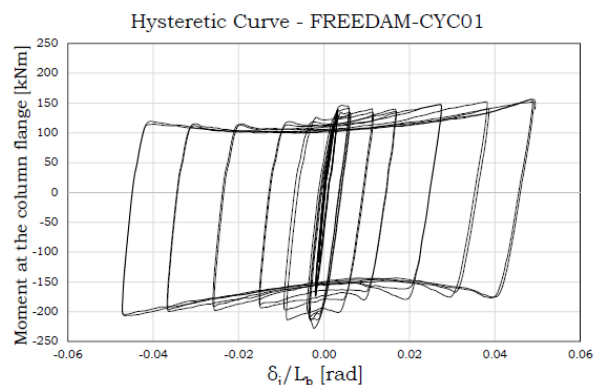
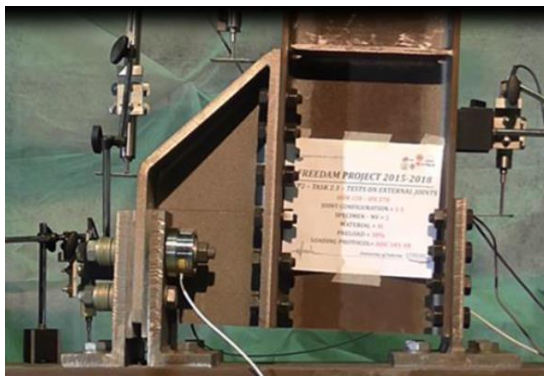
Για παράδειγμα, η δοκιμή ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος με αποσβεστήρα τριβής με οριζόντια διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 1.20. Η ανακυκλική συμπεριφορά του κόμβου παρουσιάζεται επίσης, δείχνοντας τη σχέση μεταξύ της ροπής κάμψης στο πέλμα του υποστυλώματος και της στροφής του κόμβου. Το σχήμα των βρόχων υστέρησης οφείλεται στην κάμψη του κορμού του βραχέος T και στην κάμψη των γωνιών λόγω στροφής του

κόμβου, προκαλώντας διαφορετική κατανομή τάσεων στις πλάκες τριβής (φαινόμενο πιλοτηρίου - cockpit effect) από αυτή που συμβαίνει σε απλές αξονικές δοκιμές που γίνονται συνήθως για την πειραματική διερεύνηση του αποσβεστήρα τριβής μόνο.

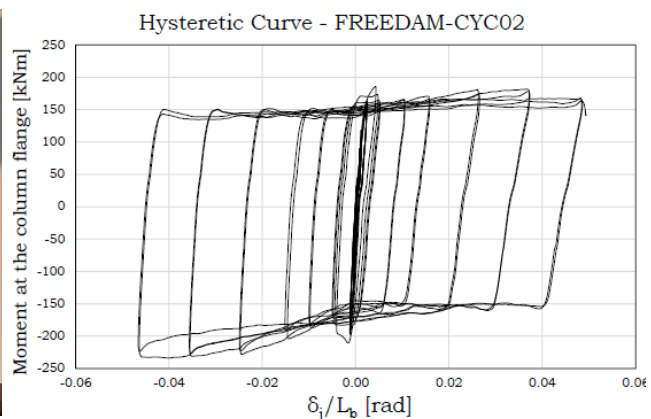
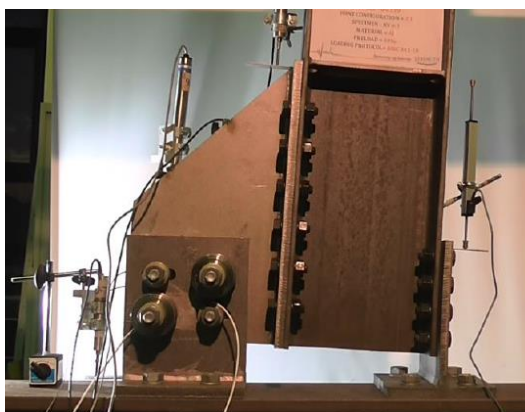
Κάποια μικρή διαρροή περιορίζεται στο κορμό του βραχείος T και στους κορμούς των γωνιών λόγω της στροφής του κόμβου. Οι συνδέσεις μπορούν εύκολα να εξυπηρετήσουν οποιαδήποτε επιθυμητή τιμή της στροφής, σχεδιάζοντας απλά τη διεύθυνση των επιμήκων οπών των αποσβεστήρων τριβής.

Ο κόμβος δοκού-υποστυλώματος με αποσβεστήρα τριβής σε κατακόρυφη διάταξη έχει σχεδιαστεί για να αποφευχθεί η στροφή του κόμβου, και, κατά συνέπεια, για να βελτιώσει το σχήμα του βρόχου υστέρησης. Και σε αυτή τη περίπτωση, ο αποσβεστήρας τριβής είναι σχεδιασμένος να είναι πλήρως προκατασκευασμένος και συναρμολογημένος στο εργοστάσιο και, διαδοχικά, κοχλιωμένος στο πέλμα του υποστυλώματος και στο πέλμα της δοκού.

Για παράδειγμα, η δοκιμή ενός κόμβου δοκού-υποστυλώματος με αποσβεστήρα τριβής σε κατακόρυφη διάταξη φαίνεται στο Σχήμα 1.21. Παρουσιάζεται επίσης η ανακυκλική συμπεριφορά του κόμβου, που δείχνει τη σχέση μεταξύ της κάμψης ροπής στο πέλμα του υποστυλώματος και της στροφής του κόμβου. Το σχήμα των βρόχων υστέρησης είναι πολύ κοντά στο ιδανικό ορθογώνιο σχήμα. Επίσης η σταθερότητα των βρόχων είναι εξαιρετική, με μόνο μικρό υποβιβασμό της αντοχής στην ολίσθηση που οφείλεται σε φθορά των επιφανειών επαφής των πλακών τριβής [44].



Σχήμα 1.20: Έλεγχος κόμβου με αποσβεστήρα τριβής σε οριζόντια διάταξη



Σχήμα 1.21: Δοκιμή κόμβου με αποσβεστήρα τριβής σε κατακόρυφη διάταξη

Επιπλέον, σε αυτή τη περίπτωση μικρή διαρροή περιορίζεται στο κορμό του βραχέος T, που υπόκειται σε κάμψη λόγω στροφής του κόμβου, που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό του κέντρου περιστροφής. Το κέντρο περιστροφής βρίσκεται προφανώς στο άνω πέλμα που υποστηρίζει την πλάκα από σκυρόδεμα. Μία τέτοια επιλογή του κέντρου περιστροφής αποσκοπεί στην πρόληψη της βλάβης της πλάκας από σκυρόδεμα στις κτιριακές κατασκευές.

1.5.4 Συνδέσεις με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση

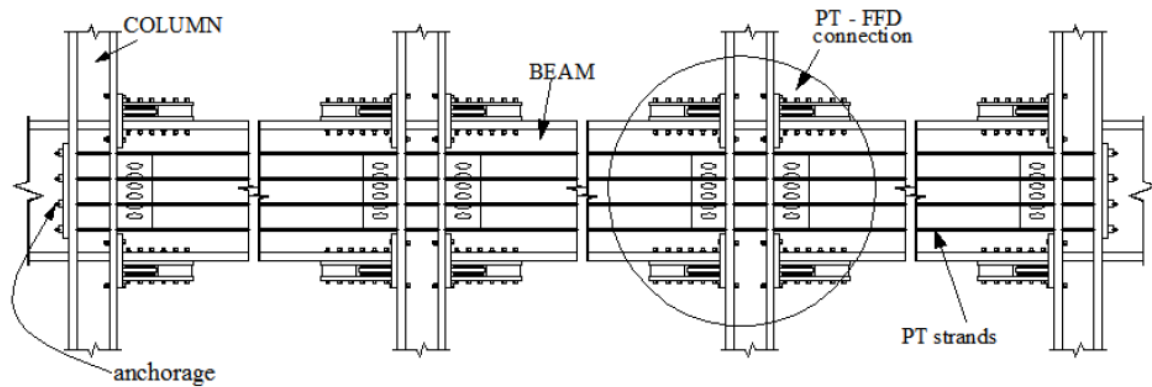
Πρόσφατα έχουν προταθεί επίσης συνδέσεις με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας και με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση (self-centering dissipative connections - SC-DC) για πλαίσια ροπής [46-54]. Αποτελούνται από ένα σύστημα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση βασισμένο σε προένταση με τάνυση του χάλυβα μετά τη σκλήρυνση του σκυροδέματος (post-tensioned - PT) ράβδων προέντασης, το οποίο συνδυάζεται με μία σύνδεση με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Παρόλο που οι SD-DC που προτείνονται από διαφορετικούς ερευνητές είναι εξοπλισμένες με υστερητικούς αποσβεστήρες ή αποσβεστήρες τριβής, κατ' αρχήν οι συνδέσεις απορρόφησης ενέργειας στους SD-DC μπορούν να εξοπλιστούν με οποιοδήποτε τύπο παθητικών σεισμικών αποσβεστήρων.

Για παράδειγμα, μία σύνδεση με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση και με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας που είναι εξοπλισμένη με παθητικούς αποσβεστήρες τριβής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.22. Το σύστημα με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση τυπικά συνίσταται από ράβδους προέντασης που τοποθετούνται παράλληλα στις δοκούς κατά μήκος πολλαπλών ανοιγμάτων διαμέσου των υποστυλωμάτων. Αυτές οι ράβδοι αγκυρώνονται έξω από την περιοχή της σύνδεσης όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.23. Οι υψηλής αντοχής χαλύβδινες ράβδοι υφίστανται προένταση αφού τοποθετηθούν οι συσκευές τριβής. Τα πέλματα της δοκού θλίβονται ενάντια στα πέλματα του υποστυλώματος λόγω της αρχικής προέντασης των ράβδων. Προκειμένου να αποφευχθεί η πρόωγη διαρροή ή λυγισμός των πελμάτων της δοκού λόγω υπερβολικής θλίψης υπό την συνδυασμένη δράση της αξονικής δύναμης λόγω προέντασης, και της κάμψης, χρειάζονται ελάσματα ενίσχυσης. Αυτά τα ελάσματα ενίσχυσης τυπικά συγκολλούνται στις εξωτερικές όψεις των πελμάτων της δοκού. Σφήνες τοποθετούνται ανάμεσα στο πέλμα του υποστυλώματος και τα πέλματα της δοκού έτσι ώστε μόνο τα πέλματα της δοκού και τα ελάσματα ενίσχυσης να βρίσκονται σε επαφή με το υποστυλώμα. Αυτό καθιστά δυνατή τη διατήρηση καλής επαφής μεταξύ των πελμάτων της δοκού και την όψη του υποστυλώματος, ενώ προστατεύει τον κορμό της δοκού από τη διαρροή υπό θλίψη.

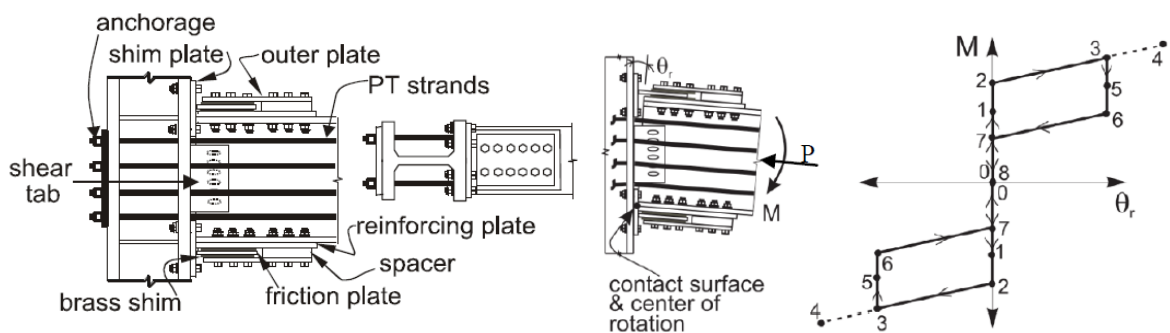
Οι συσκευές τριβής βρίσκονται στα πέλματα της δοκού και αποτελούνται από μία εσωτερική πλάκα (πλάκα τριβής), η οποία βρίσκεται μεταξύ δύο ορειχάλκινων σφηνών που αποτελούν τις πλάκες τριβής. Οι πλάκες τριβής βρίσκονται σε επαφή με την εσωτερική πλάκα και είτε το έλασμα ενίσχυσης του πέλματος της δοκού είτε την εξωτερική πλάκα. Όλες οι πλάκες κοχλιώνονται στα πέλματα της δοκού. Διαμήκειες οπές ανοίγονται στην εσωτερική πλάκα ώστε να επιτρέπουν τη κίνηση του αποσβεστήρα τριβής κατά το άνοιγμα και κλείσιμο των κενών των συνδέσεων. Η τριβή δημιουργείται όταν τα πέλματα της δοκού και η εξωτερική πλάκα ολισθαίνουν επί της εσωτερικής πλάκας όταν η δοκός στρέφεται περί του κέντρου περιστροφής που βρίσκεται στο μέσον των ελασμάτων ενίσχυσης. Μία κατακόρυφη λεπίδα που παραλαμβάνει διάτμηση με οπές με σχισμές κοχλιώνεται στον κορμό της δοκού και συγκολλάται στο πέλμα του υποστυλώματος για να μεταφέρει τις διατμητικές δυνάμεις.

Η συμπεριφορά ροπής-στροφής ενός τέτοιου τύπου σύνδεσης όταν υπόκειται σε ανακυκλική φόρτιση φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 1.23. Η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται από ένα διάκενο που ανοίγει και κλείνει στη διεπιφάνεια δοκού-υποστυλώματος. Η συνολική αντίσταση ροπής του κόμβου δίνεται από τη ροπή που οφείλεται στην αρχική προένταση των ράβδων, τη δύναμη τριβής και μία πρόσθετη δύναμη που αναπτύσσεται λόγω της επιμήκυνσης των ράβδων. Οι δυνάμεις τριβής δρουν στο μέσο των άνω και κάτω πλακών τριβής.

Υπό εφαρμοζόμενη ροπή, ο κόμβος αρχικά συμπεριφέρεται ως άκαμπτος και η σχετική στροφή είναι ίση με το μηδέν (σημεία 0 έως 2 στο Σχήμα 1.23). Μόλις το μέγεθος της εφαρμοζόμενης ροπής φτάσει την ροπή αντοχής λόγω της αρχικής δύναμης προέντασης των τενόντων, πραγματοποιείται απόθλιψη της δοκού από την όψη του υποστυλώματος. Η αντίστοιχη ροπή (σημείο 1) ονομάζεται ροπή απόθλιψης. Η εφαρμοζόμενη ροπή συνεχίζει να αυξάνεται ανάμεσα στα σημεία 1 και 2 καθώς η στροφή της δοκού περιορίζεται ακόμα από την αντίσταση των αποσβεστήρων τριβής. Στο σημείο 1 η δύναμη τριβής είναι ελάχιστη και αυξάνεται σταδιακά μέχρι τη μέγιστη τιμή στο σημείο 2, όπου αρχίζει η στροφή.



Σχήμα 1.22: Κόμβοι με δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική θέση με αποσβεστήρες τριβής[48, 54]



Σχήμα 1.23: Στοιχεία κόμβου με δυνατότητα επαναφοράς στην αρχική θέση με αποσβεστήρα τριβής (αριστερά) και η προκύπτουσα ανακυκλική απόκριση (δεξιά) [48, 54]

Μετά το άνοιγμα του διάκενου, η ελαστική αξονική δυσκαμψία των προεντεταμένων ράβδων παρέχει την παραμένουσα δυσκαμψία της σύνδεσης. Σε αυτή τη φάση, η επιμήκυνση των τενόντων παράγει μία επιπλέον δύναμη που συμβάλλει στην αντίσταση της επιβαλλόμενης ροπής. Η διαρροή των τενόντων μπορεί τελικά να συμβεί στο σημείο 4. Όταν πραγματοποιείται αποφόρτιση (σημείο 3), η σχετική στροφή παραμένει σταθερή. Στο σημείο 5, η δύναμη τριβής είναι πάλι ίση με μηδέν. Μεταξύ των σημείων 5 και 6 η δύναμη τριβής αλλάζει διεύθυνση και προοδευτικά αυξάνεται έως ότου επιτευχθεί ξανά η μέγιστη τιμή της στο σημείο 6. Μεταξύ των σημείων 6 και 7, η δοκός περιστρέφεται μέχρι το άνω πέλμα της δοκού να επανέλθει σε επαφή με τη σφήνα, αλλά όχι υπό θλίψη. Μεταξύ των σημείων 7 και 8, η τιμή της δύναμης τριβής μειώνεται με τη δοκό να θλίβεται ενάντια στις σφήνες, ενώ η ροπή μηδενίζεται στο σημείο 8. Μία πλήρης αντιστροφή στην εφαρμοζόμενη ροπή θα έχει ως αποτέλεσμα παρόμοια συμπεριφορά της σύνδεσης ως προς την αντίθετη διεύθυνση φόρτισης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.23.

Είναι εύκολο να αναγνωριστεί ότι, προκειμένου να επιτευχθεί μία συμπεριφορά με δυνατότητα επαναφοράς της κατασκευής στην αρχική της θέση, είναι πρωταρχικής σημασίας ότι οι ράβδοι παραμένουν στην ελαστική περιοχή και επιπλέον, τα πέλματα της δοκού πρέπει να ενισχύονται για να αποτραπεί η διαρροή. Εάν αυτές οι συνθήκες διασφαλισθούν, η δύναμη προέντασης διατηρείται και η σύνδεση θα επαναφερθεί στην αρχική θέση όταν αποφορτιστεί. Αυτό σημαίνει ότι η σχετική στροφή επιστρέφει στο μηδέν κατά την αφαίρεση της ροπής της σύνδεσης και η κατασκευή επιστρέφει στην προ-σεισμού θέση, υπό την προϋπόθεση ότι τα υποστυλώματα έχουν σχεδιαστεί για να αποτρέπεται η διαρροή τους. Η συμπεριφορά της σύνδεσης σε κυκλική ροπή-στροφή χαρακτηρίζεται από βρόχο υστέρησης σε σχήμα σημαίας όπου η δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας σχετίζεται με τη δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ των επιφανειών τριβής.

1.6 Βιβλιογραφία

- [1] Mazzolani F.M., Piluso V.: “Theory and Design of Seismic Resistant Steel Frames”, E & FN Spon, An imprint of Chapman & Hall, First Edition, 1996. ISBN 0-419-18760-X.
- [2] Mazzolani F.M., (Editor): “Moment Resistant Connections of Steel Frames in Seismic Areas, Design and Reliability”, E&FN Spoon, 2000.
- [3] Elghazouli A.Y.: “Seismic Design of Steel Frames with Bolted Beam-to-Column Connections”, Elnashai, A. S. and Dowling, P. J. (Editors.), ICP (pubs.), (2000).
- [4] Bruneau M., Uang C., Wittaker A. W.: “Ductile Design of Steel Structures”, McGraw Hill, 1998.
- [5] Faella C., Piluso V., Rizzano G.: “Structural Steel Semirigid Connections”, CRC Press, Boca Raton, Ann Arbor, London, Tokyo, 1999. ISBN 0-8493-7433-2.
- [6] Piluso V., G. Rizzano G.: “Random Material Variability Effects on Full-Strength End-Plate Connections”, Journal of Constructional Steel Research, Volume 63, Issue 5, pp. 658-666, 2007.
- [7] Piluso V., G. Rizzano, M. Latour M., Francavilla A.B.: “Progettazione Sismica dei Collegamenti Flangiati Trave-Colonna a Completo Ripristino di Resistenza e Duttilità”, Centro Stampa Università di Salerno, ISBN: 978-88-940089-2-0, Ottobre 2015.
- [8] Piluso V., Montuori R., Troisi M.: “Innovative structural details in MR-frames for free from damage structures”, Mechanics Research Communications, Vol. 58 (2014), pp. 146–156.
- [9] Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Free from damage beam-to-column joints: Testing and design of DST connections with friction pads”, Engineering Structures, Vol. 85, pp. 219-233, 2015

- [10] Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers”, *Engineering Structures*, Vol. 146, pp. 33-48, 2018.
- [11] Aiken I.D., Clark P.W., Kelly J.M.: “Design and Ultimate-Level Earthquake Tests of a 1/2.5 Scale Base-Isolated Reinforced-Concrete Building.” *Proceedings of ATC-17-1 Seminar on seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control*. San Francisco. California. 1993
- [12] Constantinou M.C., Soong T.T., Dargush G.F.: “Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit.” *Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research*, University at Buffalo, State of New York, 1998.
- [13] Christopoulos C., Filiatrault A.: “Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation”, *IUSS PRESS*, 2000, Pavia. Italy
- [14] Yang T-S., Popov E.P.: “Experimental and Analytical Studies of Steel Connections and Energy Dissipators”, Report No. UCB/EERC-95/13, University of California, Berkeley, 1995.
- [15] Kelly J.M.: “Aseismic Base Isolation: A review. *Proceedings, 2nd U.S. National Conference on Earthquake Engineering*, Stanford, CA, 823-837, 1979
- [16] Pall A.S., Marsh C.: “Response of Friction Damped Braced Frames”, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol. 108, No. ST6, June, pp. 1313-1323, 1982
- [17] Marsh C., Pall A.S.: “Friction Devices to Control Seismic Response”, *Proceedings Second ASCE/EMD Specialty Conference on Dynamic Response of Structures*, Atlanta, U.S.A., January, pp. 809-818, 1981.
- [18] Pall A.S., Marsh C., Fazio P.: “Limited Slip Bolted Joints for Large Panel Structures”, *Proceedings, Symposium on Behavior of Building Systems and Building Components*, Nashville, U.S.A., March, pp. 385-494, 1979.
- [19] Mualla I., Belev B.: “Seismic Response of Steel Frames Equipped with a New Friction Damper Device Under Earthquake Excitation”, *Engineering Structures*, 24(3), pp.365-71, 2002.
- [20] Kelly J., Skinner R., Heine A.: “Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures”, *Bullettin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 5(3), pp.63-88, 1972.
- [21] Calado L., De Matteis G., Landolfo R.: “Experimental response of top and seat angle semi-rigid steel frame connections”. *Material and Structures*, Vol.33, 2000, pp.499-510.
- [22] De Matteis G., Landolfo R., Calado L.: “Cyclic Behaviour of Semi-Rigid Angle Connections: a Comparative Study of Tests and Modelling”. *Proc. of Third International Conference "Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas"*, Montreal (Canada), August, 2000, Balkema pp.165-174.
- [23] Elnashai A.S., Elghazouli A.Y.: “Seismic Behaviour of Semi-Rigid Steel Frames: Experimental and Analytical Investigations”, *Journal of Constructional Steel Research*, 29, pp. 149-174, 1994.
- [24] Elnashai A.S., Elghazouli A.Y., Danish-Ashtiani F.A.: “Response of Semi-Rigid Steel Frames to Cyclic and Earthquake Loads”, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 124(8), pp. 857-867, 1998.
- [25] Iannone F., Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Experimental Analysis of Bolted Steel Beam-to-Column Connections: Component Identification”. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(2), pp. 214-44, 2011.
- [26] Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Cyclic Modeling of Bolted Beam-to-Column Connections: Component Approach”, *Journal of Earthquake Engineering*, 15(4), pp.537-63, 2011.

- [27] Latour M., Rizzano G.: “Experimental Behavior and Mechanical Modeling of Dissipative T-Stub Connections”, *Journal of Structural Engineering*, 138(2), pp.170-82, 2012.
- [28] Oh S.H., Kim Y.J., Ryu H.S.: “Seismic performance of steel structures with slit dampers”, *Engineering Structures*, vol. 31, pp. 1997-2008, 2009.
- [29] Inoue K., Suita K., Takeuchi I., Chusilp P., Nakashima M., Zhou F.: “Seismic-Resistant Weld-Free Steel Frame Buildings with Mechanical Joints and Hysteretic Dampers”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 6, June 1, pp. 864-872, 2006
- [30] Yang T.S., Popov E.P.: “Experimental and analytical studies of steel connections and energy dissipators”, Berkeley: Earthquake Engineering Research Center, UCB/EERC-95/13, 1995.
- [31] Khoo H., Clifton G.C., MacRae G., Ramhormozian S.: “Proposed design models for the asymmetric friction connection”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. December 2014;44(8):1309-1324.
- [32] Borzouie J., MacRae G., Chase J.: “Cyclic Performance of Asymmetric Friction Connections with Grade 10.9 Bolts. *The Bridge and Structural Engineer*. March 2015; 45(1).
- [33] Yeung S., Zhou H., Khoo H., Clifton G.C., MacRae G.: “Sliding shear capacities of the Asymmetric Friction Connection”, 2013 NZSEE Conference, April 26-28, Wellington, 2013. Paper n. 27
- [34] Butterworth J.W., Clifton G.C.: “Performance of Hierarchical Friction Dissipating Joints in Moment Resisting Steel Frames”, 12 World Conference on Earthquake Engineering, Paper N. 718, 2000
- [35] Golondrino J.C., MacRae G., Chase J., Rodgers G., Clifton G.C.: “Velocity effects on the behavior of asymmetrical friction connections (AFC)”, 8th STESSA Conference, Shanghai, China, July 1-3, 2015
- [36] MacRae G., Clifton G.C.: “Low Damage Design of Steel Structures”, *Steel Innovations 2013*, Workshop, 21-22 February 2013, Christchurch.
- [37] Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Experimental Analysis of Innovative Dissipative Bolted Double Split Tee Beam-to-column Connections”, DOI: 10.1002 /stco.201110009, *Steel Construction*, Volume 4, Issue 2, pages 53–64, June, 2011.
- [38] Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Experimental Behaviour of Friction T-stub Joints under Cyclic Loads”, *Steel Construction*, Volume 6, Issue 1, pages 11–18, 2013.
- [39] D’Aniello M., Zimbru M., Latour M., Francavilla A. B., Landolfo R., Piluso V., Rizzano G.: “Development and Validation of Design Criteria for Free from Damage Steel Joints”, *EUROSTEEL 2017*, September 13–15, 2017, Copenhagen, Denmark.
- [40] Ferrante Cavallaro G., Latour M., Francavilla A.B., Piluso V., Rizzano G.: “Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability”, *Journal of Constructional Steel Research*, 141, pp. 145-155, 2018.
- [41] Ferrante Cavallaro G., Francavilla A.B., Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Experimental behaviour of innovative thermal spray coating materials for FREEDAM joints”, *Composites Part B: Engineering* 115, pp. 289-299, 2017.
- [42] Latour M., Piluso V., Rizzano G.: “Experimental analysis on friction materials for supplemental damping devices”, *Construction and Building Materials* 65, pp. 159-176, 2014.
- [43] MacRae G., Clifton G.C.: “New Technology Applications, Recent Developments and Research Directions for Seismic Steel Structures in New Zealand”, *Asian Conference on Earthquake Engineering*, Bangkok, Thailand, December, 2010.
- [44] Piluso V., Rizzano G., Latour M., Francavilla A.B., Ferrante Cavallaro G., Nastri, da Silva L.S., Santiago A., Santos A.F., Castellano M.G., Di Fusco D., Jaspert J.P., Demonceau J.F., D’Antimo M., Landolfo R., D’Aniello M., Zimbru M., Silva J.M.,

- Guerra I.: “FREEDAM - FREE from DAMage Steel Connections”, Grant Agreement RFSR-CT-2015-00022, Mid-term Report: 1st July 2015 – 31st December 2016 (Coordinator: V. Piluso).
- [45] Piluso V., Latour M., Francavilla A.B., Rizzano G.: “Experimental tests on FREEDAM connections subjected to cyclic loading conditions: Test Report”, FREEDAM - FREE from DAMage Steel Connections, Grant Agreement RFSR-CT-2015-00022, Deliverable D5-WP2T2.1 “Test Report”, Task 2.1 – Tests on external beam-to-column joints, 31 March 2016.
- [46] Ricles J.M., Sause R., Garlock M., Zhao C.: “Posttensioned Seismic-Resistant Connections for Steel Frames”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 127, No. 2, February, pp. 113-121, 2001.
- [47] Christopoulos C., Filiatrault A., Uang C-M., Folz B.: “Posttensioned Energy Dissipating Connections for Moment-Resisting Steel Frames”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 128, No. 9, September 1, pp. 1111-1120, 2002.
- [48] Rojas P., Ricles J.M., Sause R.: “Seismic Response and Design of Post-Tensioned Steel Moment Resisting Frames with Friction Components”, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, Paper No. 1603, 2004.
- [49] Garlock M., Ricles J.M., Sause R.: “Experimental Studies of Full-Scale Posttensioned Steel Connections”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 3, March 1, pp. 438-448, 2005.
- [50] Chou C-C., Chen J-H., Chen Y-C, Tsai K-C: “Evaluating performance of post-tensioned steel connections with strands and reduced flange plates”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, pp. 1167–1185, 2006.
- [51] Garlock M., Sause R., Ricles J.M.: “Behavior and Design of Posttensioned Steel Frame Systems”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 133, No. 3, March 1, pp. 389-399, 2007.
- [52] Garlock M, Li J.: “Steel self-centering moment frames with collector beam floor diaphragms”, *Journal of Constructional Steel Research*, 64, pp. 526–538, 2008.
- [53] Wolski M., Ricles J.M., Sause R.: “Experimental Study of a Self-Centering Beam–Column Connection with Bottom Flange Friction Device”, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 135, No. 5, May 1, pp. 479-488, 2009.
- [54] Rojas P., Suárez D.C., Ricles J.M., Sause R.: “Seismic evaluation of an eight story building with self-centering steel moment resisting frames and flange friction devices”, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Paper No. 3002, 2012

2 Αποσβεστήρες τριβής FREEDAM

2.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών

Λατινικοί χαρακτήρες

3DS	: 3 Disk Springs – 3 δισκοειδή ελατήρια (2ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δακτυλίου)
3DSps	: 3 Disk Springs Pre-Set – 3 δισκοειδή ελατήρια προρρυθμισμένα στο εργαστήριο (2ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δακτυλίου)
ADAS	: Added Damping And Stiffness - τύπος μεταλλικού αποσβεστήρα
AFC	: Asymmetric friction connection - ασύμμετρη σύνδεση τριβής
BW	: Big Washer - προρρυθμισμένος προσαρμοσμένος/ειδικός δακτύλιος Belleville (2ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δακτυλίου)
DCH	: Ductility Class High - Υψηλή Κατηγορία Πλαστιμότητας
EXLOAD	: EXternal LOAD - εφαρμοζόμενο εξωτερικό φορτίο (συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών)
FT	: Flat Washer - επίπεδος δακτύλιος (2ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δακτυλίου)
LT	: Long-term – μακροπρόθεσμη δοκιμή (1ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δοκιμής)
LVDT	: Linear Variable Displacement Transducer – γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασχηματιστής
MT	: Mid-term – μεσοπρόθεσμη δοκιμή (1ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δοκιμής)
SFC	: Symmetrical Friction Connections – συμμετρική σύνδεση τριβής
SHJ	: Sliding Hinge Joint – αρθρωτός κόμβος ολίσθησης
ST	: Short-Term – βραχυπρόθεσμη δοκιμή (1ο συνθετικό συμβολοσειράς ονοματολογίας δοκιμών, που εκφράζει τον τύπο δοκιμής)

Ελληνικοί χαρακτήρες

OKA	: Οριακή Κατάσταση Αστοχίας
OKL	: Οριακή Κατάσταση Λειτουργικότητας
ΣΤ	: Συντελεστής Τριβής

2.2 Πίνακας Συμβόλων

Πεζοί λατινικοί χαρακτήρες

d_i	: μετατόπιση
δ_t	: αθροιστική μετακίνηση
d_{total}	: αθροιστική μετατόπιση
h	: ύψος
n	: πλήθος
r	: ημι-πλάτος
s	: τάση που απαιτείται σε διάτμηση
s_0	: κρίσιμη τάση διάτμησης του ασθενέστερου υλικού

v : ταχύτητα ολίσθησης

Κεφαλαίοι λατινικοί χαρακτήρες

A : επιφάνεια
 E : μέτρο ελαστικότητας
 F_A : δύναμη τριβής που οφείλεται σε πρόσφυση
 F_P : δύναμη τριβής που οφείλεται σε άρωση
 $F_{slip,i}$: δύναμη ολίσθησης
 N : κάθετη δύναμη
 N_0 : αρχική δύναμη προέντασης κοχλίας
 N_{cell} : δύναμη προέντασης κοχλίας από δυναμόμετρο
 P : τάση επαφής
 T : θερμοκρασία

Ελληνικοί χαρακτήρες

δ_t : αθροιστική μετακίνηση
 μ : συντελεστής τριβής
 $\mu_{effective}$: «ενεργή» τιμή (ή τιμή σχεδιασμού) του συντελεστή τριβής
 μ_{∞} : τιμή του συντελεστή τριβής όταν η τάση τείνει στο άπειρο
 σ_0 : σκληρότητα έναντι διείδυσης

2.3 Παθητικά συστήματα βασισμένα στη χρήση αποσβεστήρων τριβής

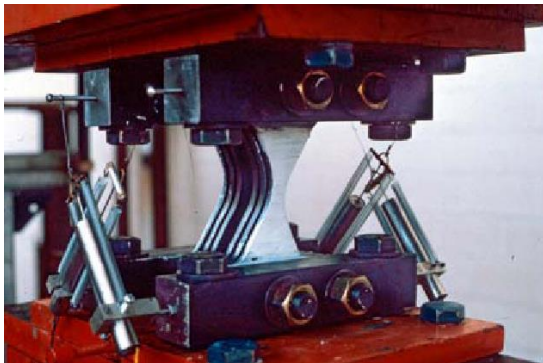
Η ανάπτυξη συμπληρωματικών συσκευών απόσβεσης ξεκίνησε στην Νέα Ζηλανδία πριν από περίπου 50 χρόνια, χάρη στη βελτιωμένη κατανόηση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών με βάση τη φυσική ερμηνεία της δυναμικής των κατασκευών μέσω της ισορροπίας ενέργειας [1]-[4]. Στην πραγματικότητα, όπως ήδη συζητήθηκε, η ενέργεια που εισάγεται κατά το σεισμό συνήθως μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια, ιξώδη και υστερητική απόσβεση, και ελαστική ενέργεια καταπόνησης. Η προσθήκη ενός συστήματος παθητικής ενεργειακής απορρόφησης σε συγκεκριμένα σημεία της κατασκευής διαφοροποιεί τις ιδιότητες του φορέα και, συγκεκριμένα, διαφοροποιεί την ισορροπία ενέργειας κατά το σεισμικό γεγονός, παρέχοντας οφέλη από την άποψη της μείωσης των καθολικών μετακινήσεων του πλαισίου και των βλαβών. Επιπλέον, η μεγιστοποίηση της απορρόφησης ενέργειας σε συγκεκριμένα σημεία ασφαλείας μέσω της υιοθέτησης κατάλληλων στρατηγικών σχεδιασμού επιτρέπει τη βελτίωση της επισκευασιμότητας της κατασκευής σε περιπτώσεις σοβαρών σεισμικών γεγονότων, καθώς δίνεται η ευκαιρία να αντικατασταθούν εύκολα οι συσκευές που έχουν υποστεί βλάβη. Λόγω αυτών των πλεονεκτημάτων, τις τελευταίες δεκαετίες, η ανάπτυξη συστημάτων συμπληρωματικής απόσβεσης έχει λάβει μεγάλη προσοχή από ακαδημαϊκούς και μηχανικούς, το οποίο οδήγησε στην ανάπτυξη μεγάλου αριθμού συσκευών απορρόφησης ενέργειας [5]-[10]. Πολλά από αυτά τα συστήματα έχουν εγκατασταθεί σε κτίρια και γέφυρες παγκοσμίως, τόσο για επιδιόρθωση κατασκευών μετά από σεισμό, όσο και για νέες κατασκευές (Σχήμα 2.1-Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.1 – Ιξώδεις αποσβεστήρες εφαρμοσμένοι στη Γέφυρα Ρίου-Αντιρρίου (Ελλάδα) - (πηγή: FIPMEC srl)



Σχήμα 2.2 – Σύνδεσμοι δυσκαμψίας ανθεκτικοί σε λυγισμό σε κατασκευή προκατασκευασμένου ο.σ. στην Ανκόνα (Ιταλία) - (πηγή: FIPMEC srl)



Σχήμα 2.3 : Συσκευή ADAS μετά από δοκιμή



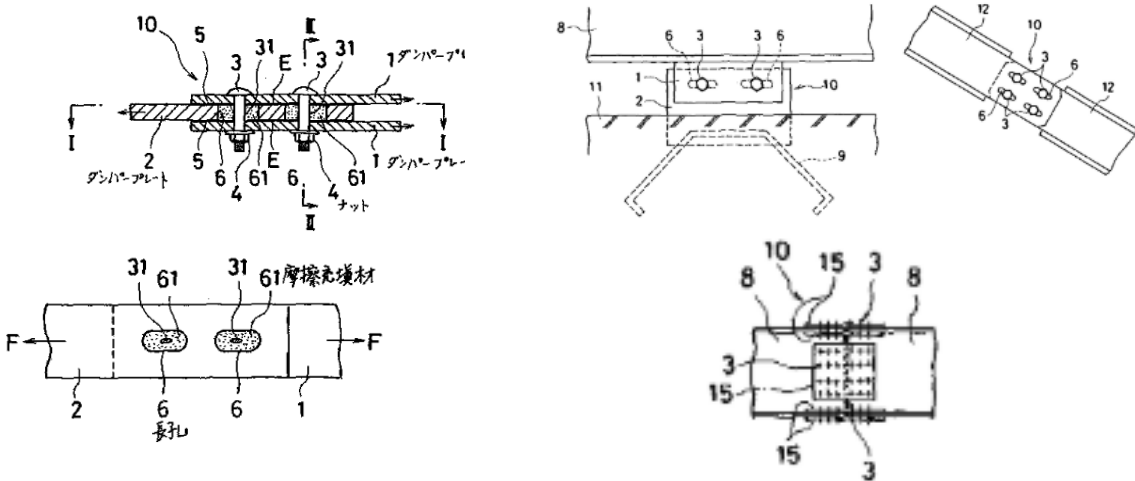
Σχήμα 2.4 : Συσκευές Pall εγκατεστημένες σε ένα μονό διαγώνιο σύνδεσμο στο Εργοστάσιο Εμπορικών Αεροσκαφών Boeing στο Έβερετ, ΗΠΑ - (πηγή: Dr Pall)

Σε γενικές γραμμές, τα παθητικά συστήματα απορρόφησης ενέργειας μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες: *i) ενεργοποιούμενα από μετατόπιση, ii) ενεργοποιούμενα από ταχύτητα, iii) ενεργοποιούμενα από κίνηση*. Η πρώτη κατηγορία αφορά τις συσκευές που απορροφούν ενέργεια λόγω της σχετικής μετακίνησης μεταξύ δύο σημείων της κατασκευής. Αυτοί οι αποσβεστήρες έχουν χαρακτηριστικά που δεν εξαρτώνται από τη συχνότητα της κίνησης και παρέχουν δυνάμεις που βρίσκονται σε φάση με τις εσωτερικές δράσεις που αναπτύσσονται στην κατασκευή. Τυπικά παραδείγματα συστημάτων που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία είναι όλοι οι τύποι των μεταλλικών αποσβεστήρων διαρροής. Η δεύτερη κατηγορία αφορά αποσβεστήρες οι οποίοι απορροφούν την ενέργεια που εισάγεται κατά το σεισμό μέσω των σχετικών ταχυτήτων μεταξύ των συνδεόμενων σημείων της κατασκευής. Τα χαρακτηριστικά αυτών των αποσβεστήρων εξαρτώνται από τη συχνότητα του σεισμού και, τυπικά, οι μέγιστες δυνάμεις που αναπτύσσονται στους αποσβεστήρες δεν είναι σε φάση με την απόκριση της κατασκευής. Αυτό σημαίνει ότι η εμφάνιση της μέγιστης αντοχής των ενεργοποιούμενων από ταχύτητα αποσβεστήρων δεν είναι ταυτόχρονη με τη μέγιστη απόκριση της κατασκευής σε όρους μετατοπίσεων και δυνάμεων. Τυπικά παραδείγματα συστημάτων που εξαρτώνται από την ταχύτητα είναι οι ιξώδεις και οι ιξωδοελαστικοί αποσβεστήρες.

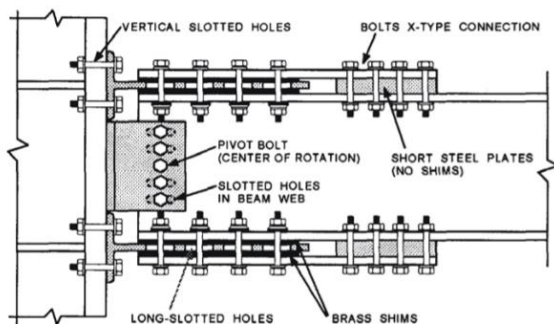
Τέλος, οι ενεργοποιούμενες από κίνηση συσκευές είναι αυτές που τροποποιούν την απόκριση της κατασκευής μέσω ενός δευτερεύοντος συστήματος. Ένα τυπικό παράδειγμα

μίας ενεργοποιούμενης από κίνηση συσκευής είναι ο αποσβεστήρας συντονισμένης μάζας, ο οποίος αποτελείται από ένα σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα, το οποίο μπορεί να διακόψει τη ροή της ενέργειας, μειώνοντας την απόκριση της κατασκευής. Μία ευρεία κατηγορία συμπληρωματικών αποσβεστήρων είναι βασισμένη σε ξηρή τριβή για την απορρόφηση της ενέργειας που εισάγεται κατά το σεισμό. Σε αυτούς, η ενέργεια απορροφάται μέσω της ολίσθησης των δύο επιφανειών σε επαφή, οι οποίες συγκρατούνται μέσω της εφαρμογής υδραυλικών πιέσεων, ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων ή, στην απλούστερη περίπτωση, μέσω κοχλιών υψηλής αντοχής. Αυτή η τελευταία μέθοδος συγκράτησης είναι, λόγω της απλότητάς της, η πιο διαδεδομένη στην πρακτική των πολιτικών μηχανικών. Χρησιμοποιώντας κοχλίες υψηλής αντοχής, είναι δυνατή η άσκηση σταθερής δύναμης σε μία ή περισσότερες επιφάνειες σε επαφή, ρυθμίζοντας απλά την τιμή της ροπής σύσφιξης και το πλήθος και τη διάμετρο των κοχλιών. Οι αποσβεστήρες τριβής συνήθως εμπίπτουν στην κατηγορία των αποσβεστήρων ενεργοποιούμενων από μετακίνηση, επειδή η δύναμη ολίσθησής τους θεωρείται μόνο ελαφρώς εξαρτώμενη από περιεχόμενο της ταχύτητας και της συχνότητας της διέγερσης. Ωστόσο, ενώ από τη μία πλευρά η επιρροή της ταχύτητας στην αρχική δύναμη ολίσθησης των αποσβεστήρων είναι σε πολλές περιπτώσεις αμελητέα, από την άλλη πλευρά, η φθορά και η υποβάθμιση της αντίστασης λόγω τριβής επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ταχύτητα. Η ανακυκλική συμπεριφορά των αποσβεστήρων τριβής μπορεί συνήθως να περιγραφεί μέσω μιας άκαμπτης-πλαστικής απόκρισης.

Επομένως, η μόνη παράμετρος που απαιτείται από τον σχεδιαστή είναι η δύναμη τριβής, η οποία, με τη σειρά της, εξαρτάται από την τιμή του φορτίου κάθετα στις επιφάνειες επαφής και από τον συντελεστή τριβής που αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό της διεπιφάνειας ολίσθησης. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των συσκευών τριβής είναι ότι μπορούν να μειώσουν τις μετατοπίσεις υπό συνθήκες λειτουργικότητας, ενώ μπορούν να απορροφήσουν την σεισμική ενέργεια σε σοβαρά σεισμικά γεγονότα.



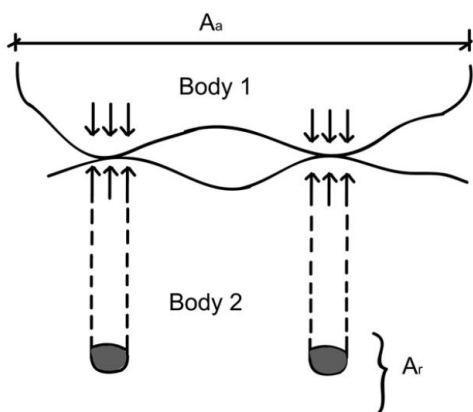
Σχήμα 2.5 : Πρώτη Ιαπωνική ευρεσιτεχνία σε αντισεισμικές συσκευές τριβής [11]



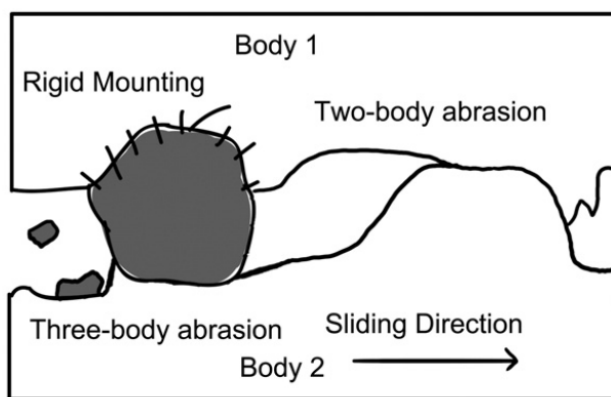
Σχήμα 2.6 : Βασική ιδέα αρθρωτού κόμβου ολίσθησης με συμμετρικές συσκευές τριβής [12]



Σχήμα 2.7 : Αρθρωτός κόμβος ολίσθησης με ασύμμετρους αποσβεστήρες τριβής του βραβευμένου χωριού Te Puni Village στο Ουέλινγκτον - [13]



Σχήμα 2.8 : Διαφορά μεταξύ πραγματικών και εμφανών περιοχών επαφής [14]

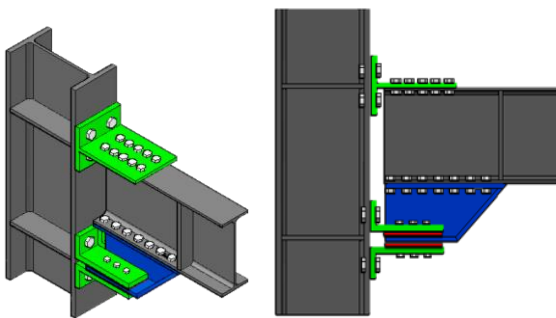


Σχήμα 2.9 : Φθορά εκτριβής [14]

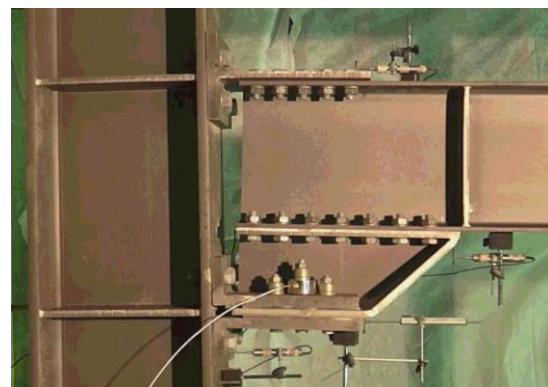
Ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από διαφορετικά φαινόμενα, όπως η πρόσφυση, η άρωση και η παρουσία προσμειξέων. Η μοντελοποίηση αυτών των φαινομένων συνήθως μελετάται στην τριβολογία, όπου, προκειμένου να αναπτυχθούν θεωρίες για τη πρόβλεψη των δυνάμεων ολίσθησης υπό στατικά και δυναμικά φορτία, η τοπογραφία των επιφανειών, η σκληρότητα των υλικών, οι μηχανικές ιδιότητες και τα αποτελέσματα των επιπέδων διασύνδεσης προσομοιώνονται (Σχήμα 2.8, Σχήμα 2.9). Αντίθετα, στην δομοστατική μηχανική, οι ιδιότητες των υλικών τυπικά μελετώνται ακολουθώντας την πειραματική προσέγγιση, η οποία, για τα πεδία της αντισεισμικής μηχανικής, θεωρείται συνήθως επαρκής για να παρέχει την πληροφορία που χρειάζεται για το σχεδιασμό τέτοιων συσκευών.

Στην τεχνική βιβλιογραφία, διάφορα έργα ασχολούνται με τον χαρακτηρισμό της υστερητικής συμπεριφοράς μεταλλικών επιφανειών ολίσθησης με διαφορετικές επιφανειακές επεξεργασίες που συγκρατούνται μέσω κοχλιών υψηλής αντοχής με εξασφάλιση έναντι ολίσθησης. Αυτή η περίπτωση είναι ιδιαίτερη σημαντική για τους σκοπούς του πολιτικού μηχανικού, καθώς το μεγαλύτερο μέρος των αποσβεστήρων τριβής που αναπτύχθηκαν από τη δεκαετία του '70 ώστε να χρησιμοποιηθούν για συνδέσμους δυσκαμψίας με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, ακολουθούν αυτή τη προσέγγιση. Οι

πρώτες συσκευές αυτού του τύπου αναπτύχθηκαν στο [15] εισάγοντας αποσβεστήρες τριβής στο σημείο τομής μεταξύ των συνδέσμων, που χρησιμοποίησαν πλάκες πέδησης με επένδυση αμιάντου ανάμεσα στις χαλύβδινες επιφάνειες ολίσθησης. Μία από τις απλούστερες μορφές αποσβεστήρων τριβής προτάθηκε στο [16] που χρησιμοποίησε ελάσματα με επιμήκεις οπές στην άκρη ενός συμβατικού συνδέσμου. Η σύνδεση συνδέσμου-πλαισίου σχεδιάστηκε ώστε να ολισθαίνει πριν τη διαρροή ή τον λυγισμό του συνδέσμου. Ένας άλλος αποσβεστήρας τριβής για συνδέσμους chevron προτάθηκε από το [17]. Οι πρόσφατες εφαρμογές των αποσβεστήρων τριβής σχετίζονται με την έννοια των συστημάτων χαμηλής βλάβης, τα οποία απορροφούν την εισαγόμενη ενέργεια, με μόνο αμελητέες βλάβες. Πρόσφατα έχουν διερευνηθεί ημιάκαμπτες συνδέσεις δοκών-υποστυλωμάτων χαμηλής βλάβης. Οι κοχλιωτές συνδέσεις με επιμήκεις οπές έχουν αποδειχτεί μία πολλά υποσχόμενη εναλλακτική στους παραδοσιακούς τύπους συνδέσεων. Πράγματι, οι κοχλιωτές συνδέσεις με επιμήκεις οπές έχουν ερευνηθεί κυρίως από τους Grigorian et al. [12] και, με βάση αυτές τις μελέτες, αναπτύχθηκαν από τον Clifton [18-21] αρθρωτοί κόμβοι ολίσθησης (Sliding Hinge Joints - SHJ) με ασύμμετρες συνδέσεις τριβής (Asymmetric friction connections - AFC) τοποθετημένες στο κάτω πέλμα της δοκού (Σχήμα 2.6, Σχήμα 2.7). Μετά από αυτές τις αρχικές μελέτες, άλλες παρόμοιες λύσεις έχουν προταθεί τα τελευταία χρόνια. Στα [23]-[24] ο αποσβεστήρας τριβής έχει υλοποιηθεί με γωνίες, και τριγωνική ενίσχυση στο άκρο της δοκού κοχλιωμένη τόσο στο κάτω πέλμα της δοκού όσο και στο υποστύλωμα. Το κύριο πλεονέκτημα αυτής της διαμόρφωσης είναι η δυνατότητα προκατασκευής του αποσβεστήρα, διασφαλίζοντας καλύτερο έλεγχο του υλικού ολίσθησης και της σωστής εφαρμογής των διαδικασιών σύσφιξης των κοχλιών. Επιπλέον, η κύρια διαφορά με τη λύση που προτείνεται από τον Clifton είναι η χρήση συμμετρικών συνδέσεων τριβής (Symmetrical Friction Connections – SFC) στη θέση των ασύμμετρων συνδέσεων τριβής (AFC). Και για τις δύο λύσεις, η παρουσία της πλάκας συγκεντρώνει την πλαστιμότητα στο επίπεδο του κάτω πέλματος της δοκού, και κατά συνέπεια, η βλάβη περιορίζεται στη συσκευή, αφήνοντας τη σύνδεση άθικτη (Σχήμα 2.10, Σχήμα 2.11).



Σχήμα 2.10 : Προοπτική άποψη ενός κόμβου FREEDAM



Σχήμα 2.11 : Κόμβος δοκού-υποστυλώματος FREEDAM σε εργαστηριακή δοκιμή

Σε όλες τις εφαρμογές που αναφέρθηκαν παραπάνω, είναι σαφές ότι η ανάπτυξη ενός αξιόπιστου αποσβεστήρα τριβής ικανού να παρέχει ευρύ και σταθερό βρόχο υστέρησης είναι υψίστης σημασίας. Στα πλαίσια του ερευνητικού έργου FREEDAM, το ζήτημα αυτό διερευνήθηκε εκτενώς, προτείνοντας λύσεις με χαμηλό κόστος και ευκολία εφαρμογής στην πράξη, παρέχοντας επίσης απλά εργαλεία για το σχεδιασμό και τη προσομοίωση των κοχλιωτών αποσβεστήρων τριβής με επιμήκεις οπές που αναπτύχθηκαν. Η δύναμη ολίσθησης ενός αποσβεστήρα τριβής είναι το αποτέλεσμα του γινομένου του συντελεστή τριβής πολλαπλασιασμένου με το πλήθος των επιφανειών ολίσθησης, το πλήθος των κοχλιών, και την δύναμη προέντασης της κοχλίας. Επομένως, για να ρυθμιστεί η αντίσταση ολίσθησης ενός αποσβεστήρα τριβής, είναι αναγκαίο να ελέγχεται η δύναμη προέντασης που εφαρμόζεται στους κοχλίες, καθώς και να προσδιορίζεται με ακρίβεια ο συντελεστής τριβής των υλικών που χρησιμοποιούνται στην επιφάνεια ολίσθησης. Η δύναμη προέντασης των κοχλιών μπορεί να ελέγχεται μέσω των μεθόδων που προτείνονται από το EN1090-2 [27] (δηλ. συνδυασμένη, στρεπτικής ροπής, με δυναμόμετρα μορφής δακτυλίου), οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να διασφαλίζουν το ελάχιστο επίπεδο αξιοπιστίας 95% της σύσφιξης που απαιτείται από το πρότυπο EN1990 [26]. Αντίθετα, η τιμή του συντελεστή τριβής που μπορεί να αναπτύξει μία καθορισμένη επιφάνεια είναι κάτι που πρέπει να προσδιοριστεί πειραματικά και εξαρτάται από πλήθος παραγόντων. Συγκεκριμένα, όπως έχει ήδη αποδειχθεί από προηγούμενα πειραματικά έργα, ο συντελεστής τριβής μίας επιφάνειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στην συσκευή τριβής, και στις κύριες τριβολογικές του ιδιότητες, όπως η επιφανειακή επεξεργασία, η μικρο- και μακρο-σκληρότητα, η διατμητική αντοχή των υλικών και η τραχύτητα. Αυτό το θέμα εξετάζεται στις επόμενες παραγράφους, όπου αναπτύσσεται η συμπεριφορά των αποσβεστήρων τριβής κατά το ερευνητικό έργο FREEDAM. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η απόκριση των αποσβεστήρων υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης (χαμηλής και υψηλής ταχύτητας). Στη συνέχεια, εξετάζεται η μακροπρόθεσμη απόκριση των αποσβεστήρων τριβής, και παρέχονται οι σχετικές πληροφορίες για το σχεδιασμό των αποσβεστήρων τριβής του κόμβου FREEDAM.

2.4 Επιλογή υλικών για το σχεδιασμό των πλακών τριβής

2.4.1 Βασικές θεωρίες τριβής

Από ιστορική άποψη, το μεγαλύτερο μέρος των προηγούμενων τριβολογικών μελετών απευθύνεται στη διερεύνηση των ιδιοτήτων τριβής μετάλλων, αναγνωρίζοντας ότι υπάρχουν δύο κύριες πηγές τριβής μεταξύ ολισθαίνοντων σωμάτων: η πρόσφυση και η άρωση. Η συνιστώσα της προσκόλλησης προκύπτει επειδή όταν δύο επιφάνειες πιέζονται μεταξύ τους, η τραχύτητες παραμορφώνονται πλαστικά, οδηγώντας στο σχηματισμό των λεγόμενων ενώσεων ψυχρής συγκόλλησης. Λόγω της στενής επαφής αυτών των συνδέσεων, η διάτμηση των δεσμών πρόσφυσης απαιτεί ένα συγκεκριμένο φορτίο ολίσθησης. Όσον αφορά την άρωση, οφείλεται στην τραχύτητα των φυσικών επιφανειών, έτσι ώστε η σχετική μετακίνηση μεταξύ των επιφανειών που έρχονται σε επαφή, απαιτεί το ένα σώμα να ανυψώνει το άλλο. Η απλούστερη θεωρία για τη μαθηματική επεξήγηση της προέλευσης της συνιστώσας πρόσφυσης οφείλεται στο [28], όπου δηλώνεται ότι το να εξαρτάται από την πρόσφυση της διατμητικής αντοχής των ενώσεων ψυχρής συγκόλλησης, πρέπει να είναι ανάλογη της πραγματικής επιφάνειας επαφής, η οποία, για μέταλλα με ιδανική ελαστοπλαστική συμπεριφορά, μπορεί να θεωρηθεί ίση με $A = N/\sigma_0$, όπου A είναι η πραγματική επιφάνεια επαφής, σ_0 είναι η σκληρότητα έναντι διείδυσης του υλικού και N είναι το

εγκάρσιο φορτίο των επιφανειών. Η συνολική δύναμη τριβής που οφείλεται σε πρόσφυση (F_A) μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F_A = As = \frac{N}{\sigma_0} s \quad (2.1)$$

όπου s η δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας που απαιτείται σε διάτμηση ενώσεων ψυχρής συγκόλλησης. Όπως ήδη αναφέρθηκε, άρωση είναι η δύναμη τριβής που προκαλείται από τις τραχύτητες ενός σκληρού μετάλλου που διεισδύει σε ένα μαλακότερο μέταλλο. Σύμφωνα με τη θεωρία των Bowden και Tabor, αυτή η συνεισφορά μπορεί να εκτιμηθεί ως:

$$F_P = nrh\sigma_0 \quad (2.2)$$

όπου n είναι το πλήθος των τραχυτήτων, r είναι το ημι-πλάτος της τραχύτητας, και h είναι το ύψος της τραχύτητας. Επομένως, η συνολική δύναμη τριβής (F) λόγω πρόσφυσης και άρωσης δίνεται από:

$$F = F_A + F_P = \frac{N}{\sigma_0} s + nrh\sigma_0 \quad (2.3)$$

Η συνιστώσα της άρωσης είναι πολύ σημαντική κατά τη διαδικασία φθοράς λόγω εκτριβής. Αλλά στην περίπτωση των μετάλλων έχει αποδειχθεί ότι η συνεισφορά της είναι αμελητέα σε σύγκριση με την πρόσφυση. Επομένως, η Εξ.(2.1) εξηγεί μία πολύ σημαντική ιδιότητα των μετάλλων, δηλώνοντας ότι ο λόγος της δύναμης τριβής προς το εγκάρσιο εφαρμοζόμενο φορτίο έχει σταθερή τιμή. Η οποία δεν εξαρτάται από την φαινομενική περιοχή επαφής. Πρακτικά η θεωρία των Bowden και Tabor εξηγεί δύο από τα τρία αξιώματα της κλασικής θεωρία της ξηρής τριβής, που δηλώνουν ότι:

- η συνολική δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη από την φαινομενική επιφάνεια επαφής,
- η συνολική δύναμη τριβής που μπορεί να αναπτυχθεί είναι ανάλογη της εγκάρσιας εφαρμοζόμενης δράσης,
- στην περίπτωση αργών ταχυτήτων ολίσθησης, η συνολική δύναμη τριβής είναι ανεξάρτητη από την ταχύτητα ολίσθησης.

Τα πρώτα δύο αξιώματα συχνά καλούνται Νόμοι του Αμοντόν, από τον Γάλλο μηχανικό που τα παρουσίασε το 1699, ενώ το τρίτο οφείλεται στον Κουλόμπ [29]-[30]. Κατά την ολίσθηση, η κλασική σχέση υπολογισμού της εφαπτομενικής δύναμης που δρα σε αντίθετη κατεύθυνση από τη μετακίνηση είναι η γνωστή εξίσωση τριβής Κουλόμπ $F = \mu N$, όπου F είναι η δύναμη τριβής, N είναι η κάθετη δύναμη και μ είναι ο συντελεστής τριβής. Η δύναμη τριβής είναι πάντα αντίθετη της μετακίνησης (στην περίπτωση τριβής ολίσθησης) ή της δυνητικής μετακίνησης (στην περίπτωση στατικής τριβής). Από την Εξ.(2.1), μπορεί να εξαχθεί η ακόλουθη σχέση:

$$\mu = \frac{s_0}{\sigma_0} \quad (2.4)$$

όπου s_0 είναι η κρίσιμη τάση διάτμησης του ασθενέστερου υλικού, και σ_0 είναι η σκληρότητα του πιο μαλακού υλικού. Η Εξ.(2.4) παρέχει μία λογική εκτίμηση του συντελεστή τριβής για μέταλλα, αλλά σε γενικές γραμμές, ο συντελεστής τριβής εξαρτάται από τρεις άλλες επιδράσεις: την τάση επαφής (P), η ταχύτητα ολίσθησης (v), και τη θερμοκρασία (T). Επομένως, γενικά, ο συντελεστής τριβής μιας διεπιφάνειας θα πρέπει να εκφράζεται ως $\mu = \mu(P, v, T)$.

Στην περίπτωση ελαστομερών υλικών, η δομή του υλικού επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τριβής του. Το ελαστομερές έχει χαμηλό συντελεστή ελαστικότητας, και η πραγματική επιφάνεια επαφής του επηρεάζεται έντονα από το μέγεθος του εγκάρσιου φορτίου, επειδή το υλικό προσαρμόζεται στο σχήμα των τραχυτήτων της επιφάνειας, του σκληρότερου υλικού [31]. Η συμπεριφορά των πολυμερών αποκλίνει από τη θεωρία της κλασικής τριβής. Η τριβολογία τους επηρεάζεται από τις συνδέσεις πρόσφυσης, τη διατμητική αντοχή του πολυμερούς σε επαφή και την πραγματική περιοχή επαφής [32]. Ο συντελεστής τριβής των πολυμερών, ανάλογα με το θεωρούμενο εύρος του εφαρμοζόμενου εγκάρσιου φορτίου και με τον τύπο του πολυμερούς, μπορεί να αντιπροσωπευτεί μέσω συνεχών ή φθινουσών σχέσεων [33]-[35]. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί αρκετές μαθηματικές σχέσεις για τη προσομοίωση του συντελεστή τριβής των διεπιφανειών χάλυβα-ελαστομερούς, εκφράζοντας το μ ως συνάρτηση της τάσης επαφής (P) και του μέτρου ελαστικότητας του (E). Αναφέρονται μερικές από αυτές:

$$[36]: \frac{1}{\mu} = a + b \left(\frac{P}{E} \right) \quad (2.5)$$

όπου a και b είναι εμπειρικές παράμετροι που προσδιορίζονται μέσω πειραματικών δοκιμών,

$$[32]: \mu = K \left(\frac{P}{E} \right)^{-1/n} \quad (2.6)$$

όπου οι τιμές των K και n πρέπει να βρεθούν πειραματικά,

$$[37]: \mu = \mu_{\infty} + a(P)^{-h} \quad (2.7)$$

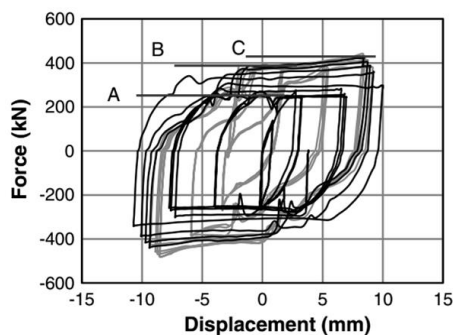
όπου μ_{∞} είναι η τιμή του συντελεστή τριβής όταν η τάση τείνει στο άπειρο, a είναι μία πειραματική σταθερά και h είναι η σκληρότητα Shore διαιρεμένη με το 100. Τέλος, στην περίπτωση των ελαστομερών, πρέπει να επισημανθεί άλλη μία σημαντική απόκλιση από την κλασική θεωρία τριβής. Η δύναμη τριβής στα πολυμερή μπορεί να εξαρτάται σημαντικά από την ταχύτητα ολίσθησης. Αυτή η συμπεριφορά οφείλεται στην ιξωδοελαστική συμπεριφορά των ελαστομερών. Παρόλα αυτά, για πολλά πολυμερή υλικά, η επιρροή της ταχύτητας είναι συνήθως μικρή σε περιορισμένο εύρος ταχυτήτων (0.01-1 cm/s).

2.4.2 Υλικά τριβής που δοκιμάστηκαν κατά το ερευνητικό έργο FREEDAM

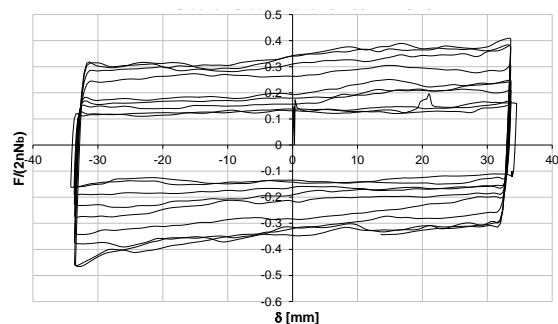
Μέχρι σήμερα, αρκετές μελέτες έχουν ήδη αφιερωθεί στην ανάλυση υλικών τριβής για σεισμικές συσκευές και κόμβους τριβής. Οι μελέτες του παρελθόντος επικεντρωνόταν κυρίως στην ανάλυση των υλικών τριβής, ειδικά για εφαρμογή σε συσκευές συμπληρωματικής απορρόφησης ενέργειας [38]-[40], ενώ πρόσφατα, παρόμοιες μελέτες έχουν αναπτυχθεί για την εφαρμογή αποσβεστήρων τριβής σε συνδέσεις ή για την ανάπτυξη συγκεκριμένων τύπων κόμβων τριβής με ανοιχτές επιμήκεις οπές για χαλύβδινους πύργους από κοίλες διατομές. Συγκεκριμένα, πρόσφατα έχουν εκπονηθεί σημαντικές μελέτες που ασχολούνται με τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς των επιφανειών τριβής στο πλαίσιο των δραστηριοτήτων του έργου HISTWIN στα [41]-[42] (όπου έχουν μελετηθεί συνδέσεις στατικής τριβής για εφαρμογή σε χαλύβδινους πύργους ανεμογεννητριών, και από την ερευνητική ομάδα του Πανεπιστημίου του Όκλαντ [18]-[21] που έχει ήδη πραγματοποιήσει μία σειρά ανακυκλικών δοκιμών τόσο σε απλές συνδέσεις όσο και σε κόμβους αποσβεστήρων με ασύμμετρες συνδέσεις τριβής. Επιπλέον, έχουν αναπτυχθεί και άλλα έργα που αφορούν το χαρακτηρισμό του συντελεστή τριβής διεπιφανειών στο [43]. Στα πλαίσια

του ερευνητικού έργου FREEDAM, όλες αυτές οι μελέτες έχουν χρησιμοποιηθεί, για την ορθολογική επιλογή υλικών που θα δοκιμαστούν στην εφαρμογή συνδέσεων FREEDAM.

Επιπλέον, η επιλογή των διεπιφανειών για τους αποσβεστήρες τριβής καθοδηγείται από αρχές που πηγάζουν από κλασικές θεωρητικές μελέτες σχετικά με την αξιολόγηση της απόκρισης συσκευών απόσβεσης που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές αντισεισμικής μηχανικής. Από την Εξ.(2.4) μπορεί εύκολα να εξαχθεί ότι, στην περίπτωση μεταλλικών επιφανειών, μπορούν να επιτευχθούν μεγάλες τιμές του συντελεστή τριβής υπό κανονικές συνθήκες, μόνο συνδυάζοντας υλικά με μεγάλη διαφορά σκληρότητα των επιφανειών τους. Υπάρχουν αρκετές δυνατότητες για την επίτευξη αυτής της διαφοράς, αλλά τα υλικά που χρησιμοποιούνται συνήθως για την υλοποίηση διεπιφανειών τριβής σε συνδυασμό με χάλυβα είναι συνήθως μέταλλα, ελαστομερή ή κράματα καρβιδίου. Μερικές από αυτές τις κατηγορίες υλικών, όπως ο χάλυβας υψηλής αντοχής, ο ορείχαλκος ή τα φαινολικά ελαστομερή, έχουν ήδη διερευνηθεί ευρέως από αρκετούς συγγραφείς. Παραδείγματα πειραματικών εργασιών που έχουν ήδη εκτελεστεί είναι το [14] σε κανονικούς και ανθεκτικούς σε τριβή χάλυβες, και το [43] σε χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα, ορείχαλκο, επιστρωμένο αλουμίνιο και διαφορετικούς τύπους ελαστικών. Αυτές οι αναλύσεις έχουν αποδείξει ότι οι διεπιφάνειες που αποτελούνται από χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα μπορούν να αναπτύξουν μόνο μικρές τιμές του συντελεστή τριβής (0.1-0.25) και επιπλέον, όταν υποβάλλονται σε ανακυκλική φόρτιση, επιδεικνύουν μια σημαντική συμπεριφορά κράτυνσης λόγω της βλάβης των επιφανειών και την αύξηση της συνιστώσας της άρωσης του συντελεστή τριβής (Σχήμα 2.12, Σχήμα 2.13).



Σχήμα 2.12 : Δοκιμή σε χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα [14]
4 κοχλίες – Προένταση κάθε κοχλία 210 kN - 1 επιφάνεια επαφής

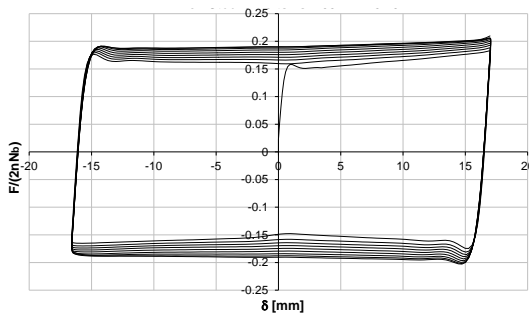


Σχήμα 2.13 : Δοκιμή σε χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα [43]
4 κοχλίες – Προένταση κάθε κοχλία 50 kN - 2 επιφάνειες επαφής

Προφανώς, η πολύ χαμηλή αρχική τιμή του συντελεστή τριβής και η κράτυνση υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης δεν είναι κατάλληλα χαρακτηριστικά για υλικά αποσβεστήρων τριβής. Υλικά με χαμηλή τιμή του αρχικού συντελεστή τριβής περιορίζουν σημαντικά τη δυνατότητα ανάπτυξης συνδέσεων τριβής με χαμηλό κόστος, καθώς η χρήση τους θα απαιτούσε πολλούς κοχλίες στον αποσβεστήρα και, κατά συνέπεια, τη χρήση συσκευών μεγάλου μεγέθους και υψηλού κόστους. Επιπλέον, η συμπεριφορά κράτυνσης δεν αποτελεί πλεονεκτικό χαρακτηριστικό επειδή, εάν οι συσκευές τριβής υπόκεινται σε κράτυνση, τότε απαιτείται όλα τα άλλα στοιχεία των συνδέσεων και των υποστυλωμάτων να έχουν υπεραντοχή σε σχέση με τις αυξημένες τιμές των δυνάμεων, οδηγώντας σε μια ισχυρή υπερδιαστασιολόγηση όλων των στοιχείων του πλαισίου. Για όλους αυτούς τους λόγους, οι διεπιφάνειες με χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα συνήθως δεν θεωρούνται κατάλληλες για σεισμικούς αποσβεστήρες, ενώ, για παρόμοιους λόγους, οι χάλυβες υψηλής αντοχής και οι χάλυβες ανθεκτικοί σε εκτριβή που προτείνονται στο [14] παρουσιάζουν περιορισμούς. Οι σφήνες τριβής από χάλυβες ανθεκτικούς σε εκτριβή,

παρόλο που μπορούν να αναπτύξουν μεγάλη τιμή του συντελεστή τριβής (περίπου 0.4), εξακολουθούν να χαρακτηρίζονται από κάποια κράτυνση. Άλλα υλικά που εξετάστηκαν σε προηγούμενα πειραματικά έργα είναι ο ορείχαλκος, το επιστρωμένο αλουμίνιο και διαφορετικοί τύπου ελαστομερών [43]. Από προηγούμενη εμπειρία, τα ελαστομερή που συνήθως χρησιμοποιούνται για εφαρμογή σε συστήματα πέδησης (τα οποία αποτελούνται κυρίως από φαινολικές ρητίνες) παρέχουν σταθερή απόκριση, αλλά και αρκετά χαμηλή τιμή του συντελεστή τριβής (που κυμαίνεται μεταξύ 0.15 και 0.25). Επιπλέον, όπως αναφέρεται στο [43], αυτά τα υλικά τυπικά χαρακτηρίζονται από μικρή αντοχή σε εφελκυσμό, η οποία τα καθιστά ακατάλληλα για εφαρμογή σε συνδέσεις τριβής, εκτός εάν είναι κολλημένα στις χαλύβδινες πλάκες. Στην πραγματικότητα, υπόκεινται εύκολα σε ψαθυρές αστοχίες σε διατομές με οπές υπό τις συνήθεις δράσεις των συνδέσεων τριβής (Σχήμα 2.14, Σχήμα 2.15). Επομένως, λόγω αυτών των μειονεκτημάτων, τα ελαστομερή υλικά δεν έχουν ληφθεί υπόψη για περαιτέρω δοκιμές στο έργο FREEDAM.

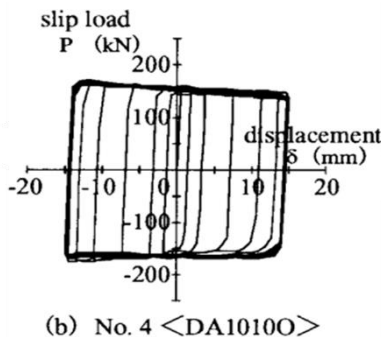
Ο ορείχαλκος έχει υπάρξει το θέμα αρκετών μελετών σχετικά με το χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του σε τριβή [38], [39], [43] ή με τη δοκιμή της εφαρμογής του σε συσκευές τριβής. Συγκεκριμένα σε εργασία των Voiculescu & Dalban [39], επισημάνθηκε, μέσω δοκιμών σε απλές συνδέσεις διάτμησης, ότι ο συντελεστής τριβής του ορείχαλκου είναι περίπου ίσος με 0.3. Στο [43], μελετήθηκε επίσης ο ορείχαλκος, μέσω δοκιμών σε ματισμένες συνδέσεις, όπου επίσης επισημάνθηκε ότι η αρχική τιμή του συντελεστή τριβής είναι πολύ μικρή (περίπου 0.1), παρόλο που τείνει να αυξηθεί με την αύξηση της άρωσης της διεπιφάνειας υπό ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης.



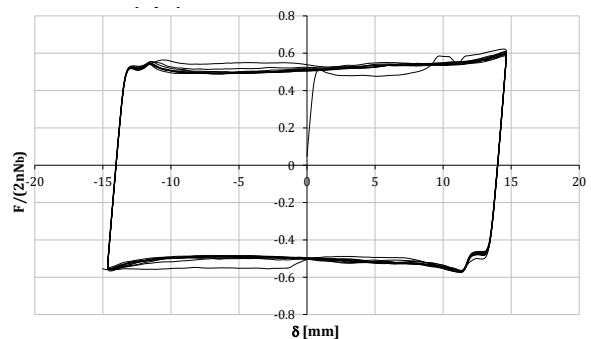
Σχήμα 2.14 : Δοκιμή σε ελαστομερές M2 [43] 4 κοχλίες – Προένταση κάθε κοχλία 50 kN – 2 επιφάνειες επαφής



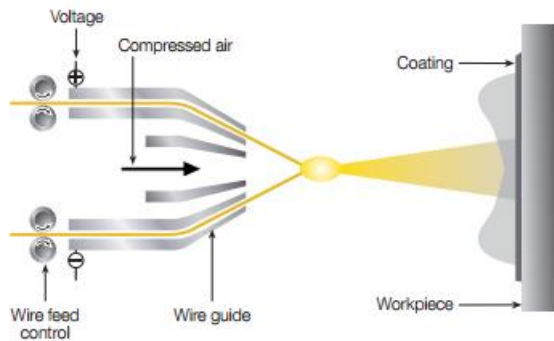
Σχήμα 2.15 : Ψαθυρή αστοχία ελαστομερής σφήνας τριβής στην καθαρή διατομή [43]



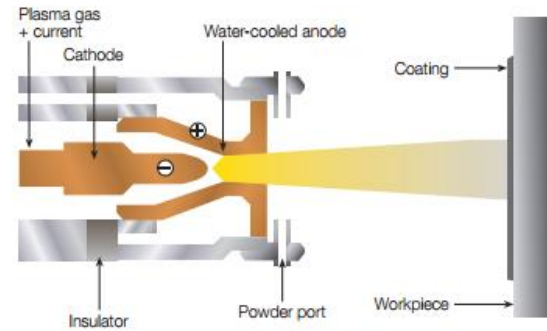
Σχήμα 2.16 : Δοκιμή σε θερμικά επιστρωμένο αλουμίνιο [40] 1 κοχλία – 2 επιφάνειες επαφής- Συντελεστής τριβής: 0.71



Σχήμα 2.17 : Συμπεριφορά θερμικά επιστρωμένο αλουμίνιο [43] 4 κοχλίες – Προένταση κάθε κοχλία 50 kN - 2 επιφάνειες επαφής



Σχήμα 2.18 : Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας επίστρωσης μέσω καλωδίων βολταϊκού τόξου (www.metco.com)



Σχήμα 2.19 : Σχηματικό διάγραμμα της διαδικασίας επίστρωσης πλάσματος (www.metco.com)

Υποσχόμενες δοκιμές σε θερμικά επιστρωμένο αλουμίνιο έχουν γίνει από [40] και [43]. Αυτές οι πειραματικές αναλύσεις έχουν δείξει ότι η τριβολογική απόκριση του θερμικά επιστρωμένου αλουμινίου, χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη τιμών του συντελεστή τριβής μεγαλύτερες από 0.4 και από μία σταθερή απόκριση υπό κυκλικές συνθήκες φόρτισης (Σχήμα 2.16, Σχήμα 2.17). Πέραν της συγκεκριμένης εφαρμογής, οι μελέτες έχουν δείξει ότι, γενικά, οι θερμικές επιστρώσεις έχουν επίσης πολλές δυνατότητες για βιομηχανική εφαρμογή λόγω του χαμηλού τους κόστους. Με βάση αυτό, κατά το ερευνητικό έργο FREEDAM, για την ανάπτυξη αποσβεστήρων τριβής, επιλέχθηκαν υλικά που να μπορούν να εφαρμοστούν με τεχνικές θερμικής επίστρωσης. Η θερμική επίστρωση είναι μία βιομηχανική διαδικασία για την εφαρμογή επιστρώσεων με ειδικές συσκευές/συστήματα, μέσω των οποίων τηγμένα μέταλλα εκτοξεύονται σε υψηλή ταχύτητα σε επιφάνειες που έχουν καθαριστεί και προετοιμαστεί. Σε αυτή τη διαδικασία, το υλικό επίστρωσης τήκεται από μία πηγή θερμότητας και στη συνέχεια εκτοξεύεται σε μορφή αερίου στο υλικό βάσης, όπου στερεοποιείται, σχηματίζοντας μία στερεά στρώση (Σχήμα 2.18, Σχήμα 2.19).

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η διαφορά σε σκληρότητα των επιφανειών των πλακών που βρίσκονται σε επαφή είναι θεμελιώδες χαρακτηριστικό, καθώς ο συντελεστής τριβής μίας μεταλλικής διεπιφάνειας διέπεται από την αναλογία μεταξύ της διατμητικής αντοχής του ασθενέστερου υλικού (s_0) και της σκληρότητας της επιφάνειας του πιο μαλακού υλικού (s_0) [28]. Επομένως, με βάση την προηγούμενη παρατήρηση, είναι σαφές ότι για να επιτευχθεί υψηλή τιμή του συντελεστή τριβής, απαιτούνται: i) μεγάλη διαφορά σκληρότητας των επιφανειών των υλικών σε επαφή, ii) υψηλή τιμή της αντοχής σε διάτμηση του ασθενέστερου υλικού, iii) πολύ χαμηλή τιμή της σκληρότητας της επιφάνειας του πιο μαλακού υλικού. Για την αποφυγή φαινομένων διάβρωσης, οι αποσβεστήρες τριβής FREEDAM αποτελούνται από εσωτερική ανοξείδωτη επένδυση κατασκευασμένη από χάλυβα 1.4301 (ισοδύναμο με AISI 304), η οποία χαρακτηρίζεται από σκληρότητα επιφάνειας περίπου 130 HV. Επομένως το υλικό των σφηνών τριβής που θα συνδυαστεί με τη πλάκα ανοξείδωτου χάλυβα, επιλέχθηκε έτσι ώστε να χαρακτηρίζεται από πολύ μικρότερη ή πολύ μεγαλύτερη τιμή σκληρότητας επιφάνειας, προκειμένου να αναπτυχθούν μεγάλες τιμές του συντελεστή τριβής. Για την επίτευξη αυτού του σκοπού, η επιλογή υλικού διενεργήθηκε ελέγχοντας μεταξύ όλων των υλικών ή κραμάτων που διατίθενται στην αγορά και χαρακτηρίζονται με τιμές σκληρότητας επιφάνειας σημαντικά μακριά από 130 HV. Επομένως, δύο κατηγορίες υλικών δοκιμάστηκαν: τα καλούμενα «σκληρά» υλικά και τα λεγόμενα «μαλακά» υλικά. Στην κατηγορία των μαλακών υλικών, ελέγχθηκαν καθαρά μέταλλα (που στις επόμενες παραγράφους αναφέρονται ως M1 έως M5) με HV που κυμαίνεται μεταξύ 5 και 30, και τα οποία εφαρμόστηκαν μέσω θερμικής επίστρωσης.

Αντιστρόφως, στην κατηγορία των σκληρών υλικών, τα κράματα καρβιδίου που παράγονται ως μίγματα σκόνης και οι σφήνες τριβής από μη ηλεκτρολυτικό νικέλιο που παράγονται από την 3M Deutschland GmbH διακρίνονται ως υλικά επίστρωσης που χαρακτηρίζονται από υψηλές τιμές της επιφανειακής σκληρότητας και είναι, επομένως, κατάλληλα για την διεπιφάνεια τριβής στην επίστρωση των σφηνών του αποσβεστήρα τριβής (αναφέρονται ως M6 έως M8 στις επόμενες παραγράφους). Η επιφανειακή σκληρότητα των επιλεγμένων κραμάτων καρβιδίου κυμαίνεται από 550 έως 1200 HV, ενώ οι σφήνες τριβής από μη ηλεκτρολυτικό νικέλιο που παράγονται από την 3M έχουν προσθήκες κονιαμάτων διαμαντιών ώστε να αποκτήσουν υψηλή τιμή της επιφανειακής σκληρότητας (600/900 HV).

Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι όταν ο ανοξειδωτός χάλυβας συνδυάζεται με σκληρότερα υλικά, προωθείται η φθορά της χαλύβδινης πλάκας και, συνεπώς, ο συντελεστής τριβής που λαμβάνεται διέπεται κυρίως από την αναλογία μεταξύ της αντοχής σε διάτμηση και της επιφανειακής σκληρότητας της χαλύβδινης πλάκας. Αντίθετα, όταν ο χάλυβας συνδυάζεται με ένα μαλακότερο υλικό, η φθορά της διεπιφάνειας οφείλεται ουσιαστικά στην φθορά των σφηνών τριβών και ο συντελεστής τριβής εξαρτάται κυρίως από την αναλογία μεταξύ της αντοχής σε διάτμηση και της επιφανειακής σκληρότητας του υλικού που χρησιμοποιείται για την επίστρωση της σφήνας τριβής.

2.5 Συμπεριφορά υπό ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης

2.5.1 Πειραματικές διατάξεις

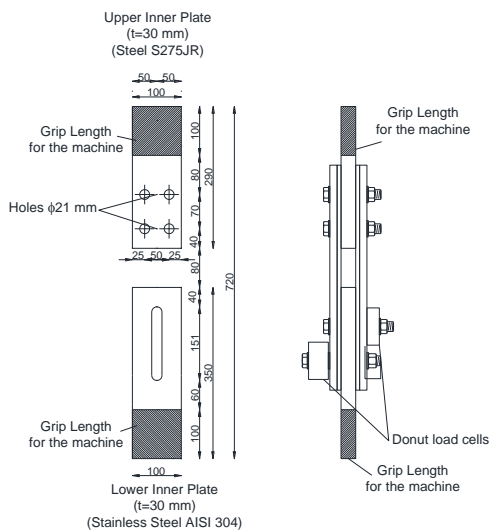
Προκειμένου να χαρακτηριστεί ο συντελεστής τριβής των αποσβεστήρων που χρησιμοποιούνται στους κόμβους FREEDAM, πραγματοποιήθηκε μια ευρεία πειραματική εκστρατεία σχετικά με τους απλούς αποσβεστήρες τριβής τόσο στο Πανεπιστήμιο του Σαλέρνο όσο και στις εγκαταστάσεις του FIP Industriale SpA. Η πειραματική εργασία έχει εξετάσει μια σειρά μεταβλητών: i) τον τύπο του υλικού τριβής που χρησιμοποιείται, ii) την επίδραση της δύναμης σύσφιξης των κοχλιών, iii) την επίδραση του τύπου του συστήματος κοχλιών που χρησιμοποιείται, iv) την τυχαία μεταβλητότητα του υλικού ως προς τον συντελεστή τριβής v) την ταχύτητα εφαρμογής των φορτίων. Στη συνέχεια αναφέρονται εν συντομία τα κύρια αποτελέσματα και οι εφαρμοσμένες διαδικασίες δοκιμών.

2.5.1.1 Διάταξη δοκιμών χαμηλής ταχύτητας

Ένα τυπικό δοκίμιο για την αξιολόγηση της τιμής του συντελεστή τριβής των διεπιφανειών που αναλύθηκαν κατά τη διάρκεια του ερευνητικού έργου FREEDAM αποτελείται από ένα σύστημα χαλύβδινων πλακών συναρμολογημένων για τη δοκιμή της μονοαξονικής συμπεριφορά στις διεπιφάνειες τριβής της πλάκας ανοξειδωτού χάλυβα με τις σφήνες τριβής που είναι επιστρωμένες με ένα από τα οκτώ υλικά που περιεγράφηκαν προηγουμένως. Ο υποφορέας που δοκιμάστηκε εμπνεύστηκε από τη διάταξη των δοκιμών στις δοκιμές ολίσθησης του EN1090-2 [27]. Συγκεκριμένα, αποτελείται από μια χαλύβδινη πλάκα με επιμήκεις οπές από ανοξειδωτο χάλυβα 1.4301 [45] που ισοδυναμεί με χάλυβα AISI 304, μία χαλύβδινη πλάκα με συνθήεις οπές που συνδέει το δοκίμιο στη μηχανή δοκιμής και στις εξωτερικές χαλύβδινες πλάκες, και σφήνες τριβής προεντεταμένους με κοχλίες M20 10.9V [46] (Σχήμα 2.22, Σχήμα 2.23). Το δοκίμιο στοχεύει στην προσομοίωση των ίδιων συνθηκών που αναμένονται στο αποσβεστήρα τριβής των συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων FREEDAM. Ειδικότερα, η πλάκα από ανοξειδωτο χάλυβα με επιμήκεις οπές προσομοιώνει την εσωτερική πλάκα ενός ενισχυτικού ελάσματος που μπορεί εύκολα να προκατασκευαστεί και να προσαρτηθεί απευθείας στο εργοτάξιο στο κάτω πέλμα της δοκού, προκειμένου να υλοποιηθεί ο αποσβεστήρας τριβής, ενώ οι εξωτερικές χαλύβδινες

πλάκες στοχεύουν στην προσομοίωση των κορμών των γωνιών που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση του αποσβεστήρα τριβής στην όψη του υποστυλώματος.

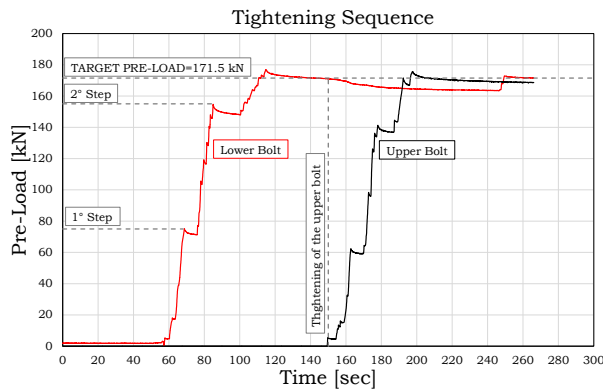
Προκειμένου να προσδιοριστεί η τιμή της αρχικής δύναμης ολίσθησης και η υποβάθμισή της, όλα τα δείγματα έχουν δοκιμαστεί υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης σύμφωνα με το πρωτόκολλο φόρτισης που παρέχεται από τον EN15129 (2009) [47], ο οποίος είναι ο μόνος κώδικας που διατίθεται σήμερα για τη δοκιμή συσκευών απορρόφησης ενέργειας που εξαρτώνται από τη μετατόπιση. Ο κώδικας απαιτεί την εκτέλεση δοκιμών υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης με στόχο την αναπαραγωγή των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας στις συσκευές. Προτείνει την εφαρμογή στον αποσβεστήρα κύκλους φόρτισης αυξανόμενου εύρους στο 25%, 50% και 100% της μέγιστης μετατόπισης σχεδιασμού της συσκευής. Το μέγιστο εύρος ορίστηκε εκτιμώντας την απαίτηση σε μετακίνηση στο επίπεδο του αποσβεστήρα τριβής σε πραγματικές εφαρμογές. Επομένως, λαμβάνοντας υπόψη μια τιμή αναφοράς του μοχλοβραχίονα, δηλαδή της απόσταση μεταξύ του άνω στελέχους του βραχέως T του κόμβου FREEDAM και του κέντρου του αποσβεστήρα τριβής, ίση με 600 mm και μία μέγιστη στροφή 40 mrad (μεγαλύτερη από την ελάχιστη τιμή που απαιτείται από τον EC8 που είναι ίση με 35 mrad για πλαίσια DCH), η ζήτηση μετατόπισης σχεδιασμού στο επίπεδο του αποσβεστήρα έχει υπολογιστεί ως $0.04 \times 600 = 24$ mm, η οποία έχει στρογγυλοποιηθεί στα 25 mm. Οι κύκλοι φόρτισης εκτελέστηκαν σε αυξανόμενες τιμές της ταχύτητας που ορίστηκαν προκειμένου να παραμείνουν σε οιονεί-στατικό εύρος και σύμφωνα με τις δυνατότητες του διαθέσιμου εξοπλισμού. Στις δοκιμές που παρουσιάζονται στη συνέχεια, η ταχύτητα του κύκλου κυμαινόταν από 1 mm/s για τους πρώτους 10 κύκλους έως 5 mm/s για τους κύκλους στο μέγιστο εύρος. Σε κάθε δοκιμή, τόσο οι άνω όσο και οι κάτω κοχλίες M20 υψηλής αντοχής έχουν συσφιχθεί με δυναμόκλειδο ώστε να επιτευχθεί η δοκιμαστική προένταση, παρακολουθώντας το μέσω δυναμόμετρων μορφής δακτυλίου (Σχήμα 2.24, Σχήμα 2.25).



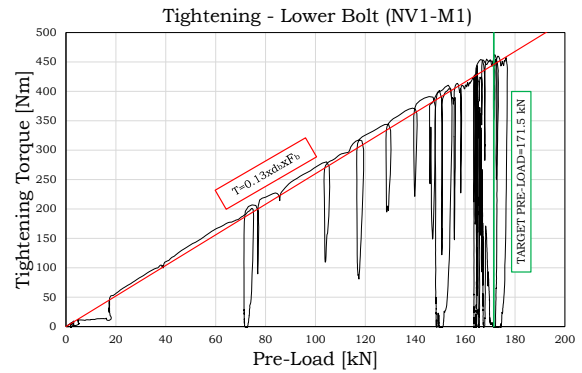
Σχήμα 2.22 : Τυπική γεωμετρία δοκιμίου



Σχήμα 2.23 : Δοκίμιο στη μηχανή



Σχήμα 2.24 : Ακολουθία σύσφιξης



Σχήμα 2.25 : Τυπικό διάγραμμα στρεπτικής ροπής-προέντασης

Οι δοκιμές χαμηλής ταχύτητας έχουν πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας μια καθολική μηχανή δοκιμής Schenck Hydropuls S56 Schenck Hydropuls S56 (Σχήμα 2.23). Η μηχανή αποτελείται από υδραυλικά έμβολα με ικανότητα φόρτισης ίση με ± 630 kN, μέγιστη μετακίνηση ίση με ± 125 mm και ένα αυτο-ισορροπούμενο χαλύβδινο πλαίσιο που χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση της αξονικής δύναμης. Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί αισθητήρες πριν και κατά τη διάρκεια της δοκιμής για τον έλεγχο της δύναμης κοχλίας, του φορτίου ολίσθησης, της ροπής σύσφιξης και της μετατόπισης. Οι αξονικές μετατοπίσεις της συσκευής έχουν διαβαστεί απευθείας από τον αισθητήρα της μηχανής δοκιμής και, με τον ίδιο τρόπο, η δύναμη ολίσθησης έχει ελεγχθεί άμεσα εκμεταλλευόμενη το δυναμόμετρο της μηχανής. Πριν από τη δοκιμή, η ροπή σύσφιξης έχει εφαρμοστεί μέσω ενός κλειδιού στρεπτικής ροπής χειρός και παρακολουθείται μέσω ενός αισθητήρα στρεπτικής ροπής Futek TAT430 με ικανότητα ίση με 680 Nm. Ταυτόχρονα, η προένταση των κοχλιών παρακολουθείται πριν και κατά τη διάρκεια της δοκιμής μέσω δακτυλίων δυναμόμετρων Futek LTH500 με ικανότητα 222 kN. Πριν από κάθε δοκιμή, η δύναμη εφαρμόζεται στους κοχλίες με δυναμόκλειδο, παρακολουθώντας τη ροπή σύσφιξης που εφαρμόζεται και τη δύναμη προέντασης του κοχλίου. Συγκεκριμένα, οι κοχλίες που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μέση τιμή του συντελεστή k ίση με 0.13. Η τιμή της ροπής σύσφιξης που εφαρμόστηκε στους κοχλίες σε κάθε δοκιμή κυμαινόταν από ένα μέγιστο ίσο με $0.13 \times 171.5 \times 20 = 446$ Nm (100% της προέντασης στο όριο ελαστικής συμπεριφοράς κοχλίου) και ένα ελάχιστο ίσο με $0.40 \times 0.13 \times 171.5 \times 20 = 178$ Nm (40% της προέντασης στο όριο ελαστικής συμπεριφοράς κοχλίου).

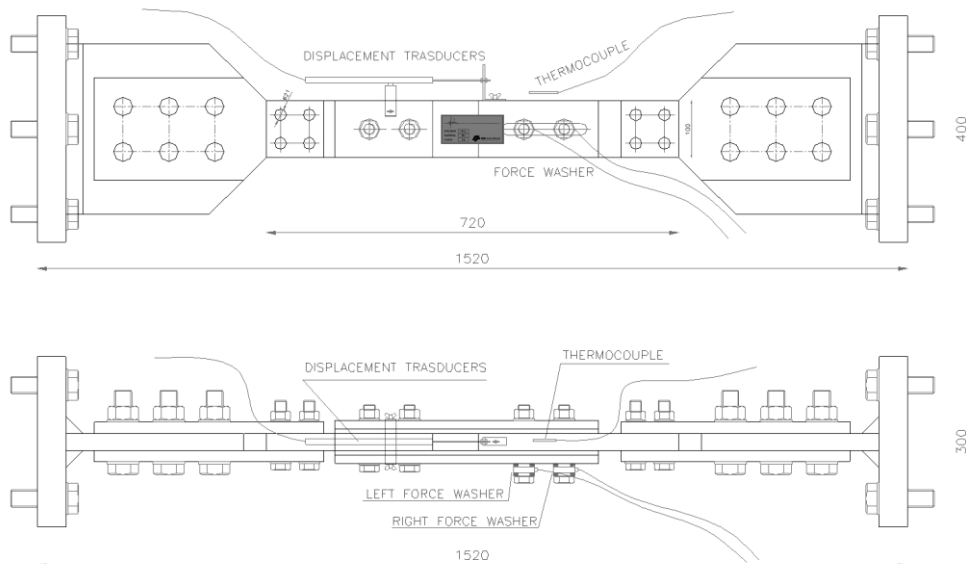
2.5.1.2 Διάταξη δοκιμών υψηλών ταχυτήτων

Προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά των υλικών τριβής σε υψηλές ταχύτητες, έχει σχεδιαστεί και αναπτυχθεί μια ειδική πειραματική εκστρατεία για υποφορείς εξοπλισμένους με πλάκες τριβής στις εγκαταστάσεις του FIP Industriale S.p.a.

Τα δοκίμια (Σχήμα 2.24) είναι σχεδόν πανομοιότυπα με αυτά που χρησιμοποιούνται στις δοκιμές σε χαμηλή ταχύτητα, εκτός από το σύστημα προσάρτησης στα στηρίγματα του πλαισίου δοκιμών. Τα δοκίμια αποτελούνται από δύο πλάκες τριβής που ολισθαίνουν πάνω σε μία πλάκα AISI 304. Οι κοχλίες που εφαρμόζουν την προένταση στις πλάκες τριβής είναι δύο M20 HV 10.9, και η δύναμή τους μετράται μέσω δύο δακτυλίων. Στο Σχήμα 2.25 φαίνεται η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές. Αποτελείται από μία πολύ άκαμπτη εξέδρα και έναν επενεργητή με μέγιστη αξονική δύναμη ίση με 2000 kN, μετακίνηση εμβόλου ίση με ± 300 mm, και μέγιστη ταχύτητα, στην μέγιστη δύναμη, ίση με

300 mm/s. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε έλεγχο μετατοπίσεων, εφαρμόζοντας τις δοκιμές της πρώτης φάσης της ανάλυσης ημιτονοειδούς εισόδου με συχνότητα 1.27 Hz, εύρος διακύμανσης (έως ± 25 mm), και μέγιστη ταχύτητα 200 mm/s.

Εκτός από το σχήμα του σήματος εισόδου, το πρωτόκολλο δοκιμών είναι το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται στις δοκιμές χαμηλής ταχύτητας. Προφανώς, η ταχύτητα εφαρμογής του φορτίου ποικίλλει κατά περίπτωση προκειμένου να διερευνηθεί ο ρόλος της ταχύτητας στον συντελεστή τριβής.



Σχήμα 2.24 : Διάταξη δοκιμών για δοκιμές υψηλών ταχυτήτων



Σχήμα 2.25 : Μηχανή δοκιμών

2.5.2 Περίληψη των αποτελεσμάτων των δοκιμών

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στις δοκιμές χαμηλής ταχύτητας, το πρωτόκολλο ανακυκλικής φόρτισης έχει εφαρμοστεί ακολουθώντας την διαδικασία φόρτισης που προτείνεται από το EN15129 [47], και για κάθε δοκιμή, οι ακολουθίες κύκλων εφαρμόστηκαν στις ακόλουθες ταχύτητες:

- 5 κύκλοι των 6.25 mm στα 1 mm/s,
- 5 κύκλοι των 12,5 mm στα 4/5 mm/s,
- 40 κύκλοι των 25 mm στα 4/5 mm/s.

Για κάθε δοκιμή, η ανακυκλική απόκριση των διεπιφανειών αξιολογήθηκε αναλύοντας την αρχική τιμή του συντελεστή τριβής και την υποβάθμισή του κατά τη διάρκεια των κύκλων φόρτισης μέσω των δυναμομέτρων που εφαρμόστηκαν στο δοκίμιο. Στα ακόλουθα διαγράμματα, φαίνονται οι ποσότητες:

- Η υστέρηση δύναμης-μετατόπισης αναπαρίσταται ως προς τη δύναμη ολίσθησης ($F_{\text{slip},i}$) και τη μετατόπιση (d_i) που λαμβάνονται από το δυναμόμετρο και το LVDT, αντίστοιχα, της μηχανής δοκιμών,
- Η «ενεργή» τιμή (ή τιμή σχεδιασμού) του συντελεστή τριβής ($\mu_{\text{effective}}$) σε σχέση με την αθροιστική μετατόπιση (d_{total}). Η ενεργή τιμή του συντελεστή τριβής υπολογίστηκε ως ο λόγος της δύναμης ολίσθησης, που λαμβάνεται από το δυναμόμετρο της μηχανής δοκιμών, προς το άθροισμα των αρχικών δυνάμεων προέντασης που ασκούνται από τους κοχλίες στην διεπιφάνεια τριβής ($4N_0$),
- Η «πραγματική» τιμή του συντελεστή τριβής (μ_{actual}) σε σχέση με την αθροιστική μετατόπιση (d_{total}). Η πραγματική τιμή του συντελεστή τριβής υπολογίστηκε ως ο λόγος της δύναμης ολίσθησης, που λαμβάνεται από το δυναμόμετρο, προς το άθροισμα των πραγματικών τιμών των δυνάμεων προέντασης που ασκούνται από τους κοχλίες στην διεπιφάνεια τριβής, το οποίο έχει ληφθεί απευθείας από τα δυναμόμετρα κατά τη διάρκεια της δοκιμής ($2N_{\text{cell},1}+2N_{\text{cell},2}$). Στη συνέχεια, καταγράφεται μια σύνθεση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

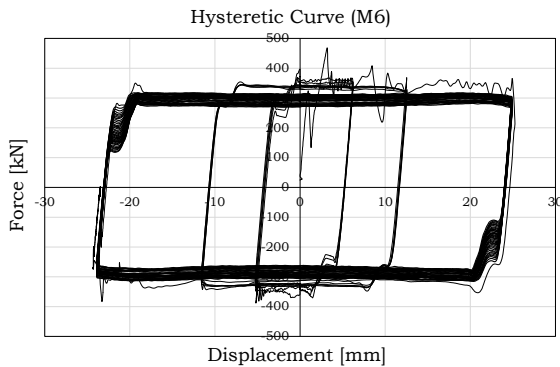
Η συμπεριφορά της συσκευής τριβής περιεγράφηκε αξιολογώντας την υποβάθμιση της ενεργής τριβής όπως ορίζεται από το EN 15129 [47]. Αυτή η παράμετρος αντιπροσωπεύει την υποβάθμιση της ενεργειακής απόσβεσης που κανονικοποιείται σε σχέση με την τιμή της ενεργειακής απόσβεσης που μετράται στον 3^ο κύκλο της σειράς ανακυκλικών φορτίσεων μέγιστου εύρους. Τα κύρια αποτελέσματα συνοψίζονται στις επόμενες ενότητες.

2.5.2.1 Επιρροή του τύπου επίστρωσης: «Σκληρά» υλικά (M6-M8)

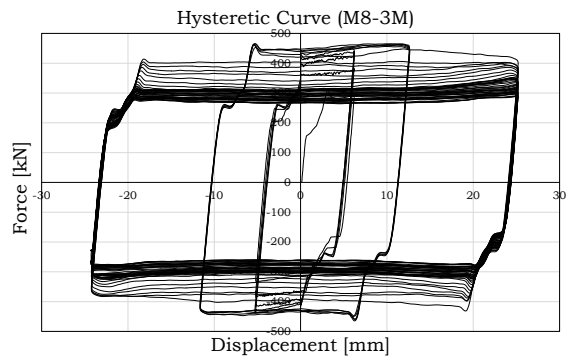
Μια σύνθεση των αποτελεσμάτων των δοκιμών στις διεπιφάνειες ανοξείδωτου χάλυβα - πλακών τριβής επιστρωμένες με τις «σκληρές» επιστρώσεις παρουσιάζεται στα Σχήματα 2.26-2.28, όπου φαίνονται οι υστερητικές καμπύλες των δοκιμασμένων υλικών.

Στην περίπτωση επίστρωσης με καρβίδιο M6, η ανακυκλική απόκριση χαρακτηρίζεται από την ανάπτυξη αρχικής τιμής της δύναμης ολίσθησης ίσης με περίπου 350 kN, ακολουθούμενη από προοδευτική υποβάθμιση που, στο τέλος της δοκιμής ήταν περίπου το 20%. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, παρατηρήθηκε ιδιόρρυθμη συμπεριφορά αυτού του υλικού. Όπως μπορεί να εξαχθεί από το Σχήμα 2.26, η υστερητική καμπύλη επηρεάστηκε από μια αρχική φάση προσκόλλησης-ολίσθησης με την ανάπτυξη ενός πρώτου ασταθούς κύκλου που χαρακτηρίζεται από άλματα της δύναμης και απότομες απελευθερώσεις ενέργειας. Παρ' όλα αυτά, μετά από αυτόν τον πρώτο κύκλο, που πιθανώς επιτρέπει τη διακοπή της αρχικής έλξης μεταξύ των ατόμων των επιφανειών που έρχονται σε επαφή (συνιστώσα πρόσφυσης της τριβής), η ολίσθηση επήλθε τακτικά οδηγώντας σε μια πολύ σταθερή απόκριση μέχρι το τέλος της δοκιμής. Στην περίπτωση της επίστρωσης με καρβίδιο M7, συνολικά, παρατηρήθηκε παρόμοια απόκριση. Η συμπεριφορά, στην περίπτωση αυτή, χαρακτηρίστηκε από μια αρχική δύναμη ολίσθησης ίση με περίπου 250 kN, η οποία μετά από λίγους κύκλους αυξήθηκε ελαφρώς, και σταθεροποιήθηκε σε τιμή περίπου 300 kN. Αφού έφτασε σε αυτήν την τιμή, όλοι οι κύκλοι χαρακτηρίστηκαν από την ίδια δύναμη ολίσθησης αποκτώντας, επίσης, μια σταθερή συμπεριφορά με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Παρόλο που η υστερητική συμπεριφορά που φαίνεται στο Σχήμα 2.28 φαίνεται αρκετά παρόμοια με αυτή του υλικού M6, στην πραγματικότητα, στην περίπτωση αυτή, για να γίνει η δοκιμή ήταν απαραίτητο να μειωθεί σημαντικά η ταχύτητα λόγω της ανάπτυξης

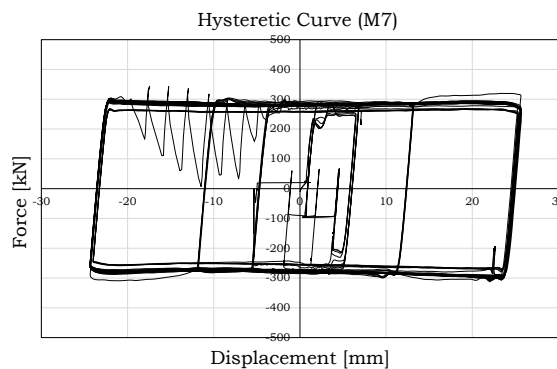
έντονης συμπεριφοράς προσκόλλησης-ολίσθησης, που χαρακτηρίζεται από ξαφνικές απελευθερώσεις ενέργειας και δονήσεων. Η απόκριση των σφηνών τριβής της 3M, όπως έχει παρατηρηθεί στο παρελθόν για άλλα υλικά όπως ορείχαλκος ή ορισμένοι τύποι φαινολικών ελαστικών [43], χαρακτηρίστηκε από δύο διαφορετικές φάσεις. Μια πρώτη φάση όπου η διεπιφάνεια παρείχε μια συμπεριφορά κράτυνσης που χαρακτηρίζεται από αύξηση της αντοχής ολίσθησης περίπου 60%. Μια δεύτερη φάση που χαρακτηρίζεται από μείωση της δύναμης ολίσθησης, η οποία, στο τέλος της υποβάθμισης επέστρεψε στην αρχική τιμή. Επιπλέον, σε αυτήν την περίπτωση, παρατηρήθηκε απόκριση προσκόλλησης-ολίσθησης, και όλοι οι κύκλοι χαρακτηρίζονται από μια σταθερή τιμή της δύναμης ολίσθησης. Η αρχική τιμή της δύναμης ολίσθησης ήταν περίπου 400 kN (Σχήμα 2.27).



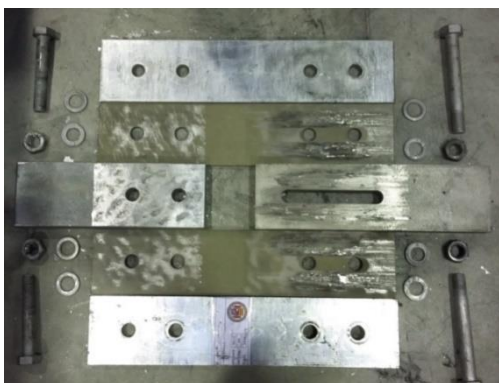
Σχήμα 2.26 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών M6



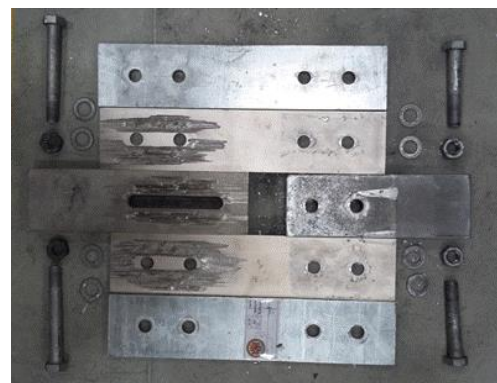
Σχήμα 2.27 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών 3M



Σχήμα 2.28 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών M7

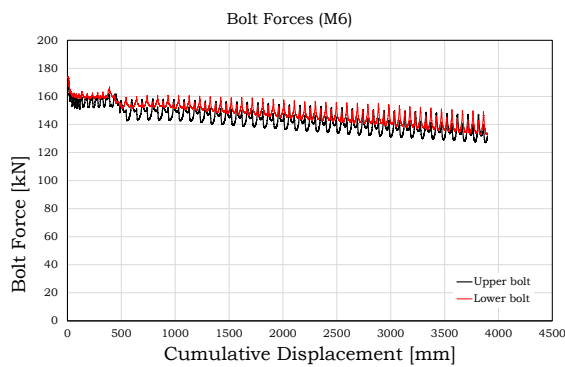


Σχήμα 2.29 : Βλάβη σφηνών M6

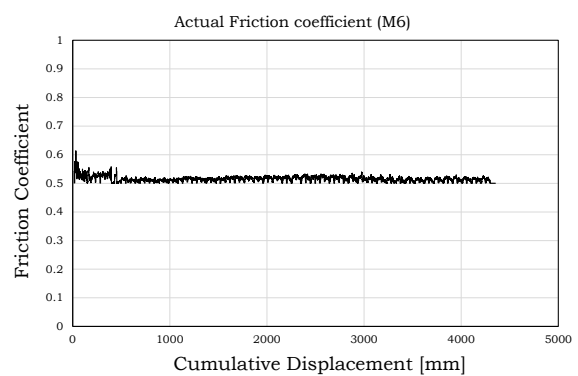


Σχήμα 2.30 : Βλάβη σφηνών 3M

Μετά τις δοκιμές, τα δείγματα ανοίγονται προκειμένου να εκτιμηθεί η βλάβη των διεπιφανειών. Στο Σχήμα 2.29 και Σχήμα 2.30 φαίνεται η κατάσταση της βλάβης σε δοκίμια με σφήνες M6 και 3M. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα σχήματα αυτών των υλικών, λόγω της υψηλότερης σκληρότητας της επίστρωσης σε σχέση με τον ανοξείδωτο χάλυβα, το μεγαλύτερο μέρος της βλάβης συγκεντρώθηκε στην πλάκα ανοξείδωτου χάλυβα, η οποία στο τέλος της δοκιμής είχε πολλές χαραγές στη ζώνη κάτω από την κεφαλή του κοχλία. Στο Σχήμα 2.31 και Σχήμα 2.32, για παράδειγμα, παρουσιάζονται τα διαγράμματα δυνάμεων κοχλία (μετρημένων μέσω δυναμόμετρων) και του πραγματικού συντελεστή τριβής αντίστοιχα, σε σχέση με την αθροιστική μετατόπιση των πλακών τριβής, για τα δοκίμια με πλάκες τριβής επιστρωμένες με καρβίδιο M6. Από το σχήμα μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι κοχλίες, που αρχικά συσφιγγόταν για να φτάσουν το φορτίο της του ορίου της ελαστικής συμπεριφοράς ίσο με 171.5 kN, μετά τον πρώτο κύκλο φόρτισης, έχασαν περίπου το 7% της αρχικής προέντασης, ενώ στη συνέχεια της δοκιμής χαλάρωσαν ομοιόμορφα, φτάνοντας στο τέλος μία συνολική απώλεια της τάξης του 20%. Αντίθετα, ο «πραγματικός» συντελεστής τριβής παραμένει σταθερός, επιδεικνύοντας μία σταθερή συμπεριφορά των πλακών τριβής.



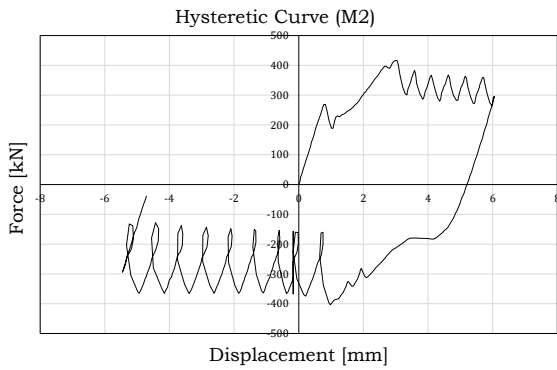
Σχήμα 2.31 : Τυπικό διάγραμμα δυνάμεων κοχλίων



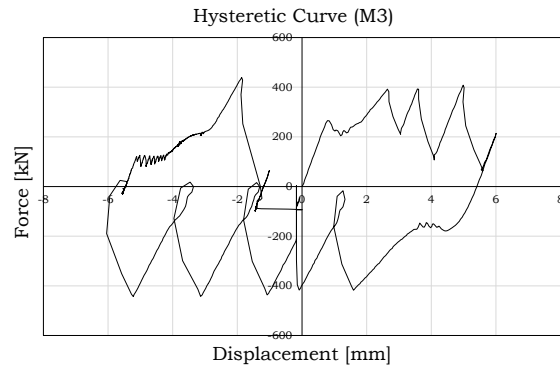
Σχήμα 2.32 : «Πραγματικός» συντελεστής τριβής – αθροιστική μετατόπιση : M6

2.5.2.2 Επιρροή του τύπου επίστρωσης: «Μαλακά» υλικά (M1-M5)

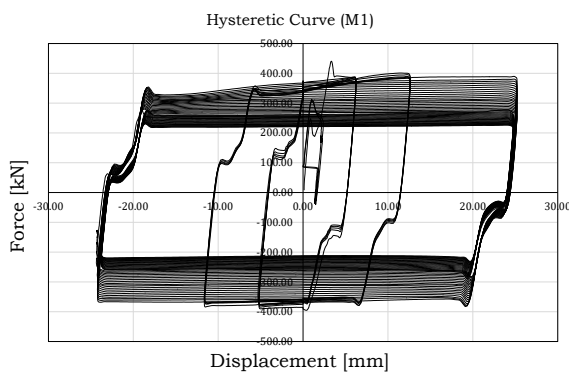
Όπως και στην περίπτωση του καρβιδίου M7, μερικά μαλακά υλικά παρουσιάζουν συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από το φαινόμενο προσκόλλησης-ολίσθησης. Συγκεκριμένα, αυτό συμβαίνει σε τρία από τα επιλεγμένα μη-σιδηρούχα μέταλλα, στα M2, M3 και M5, των οποίων η απόκριση χαρακτηρίζεται από εναλλασσόμενες στάσεις και εκκινήσεις της κίνησης με ισχυρές και ξαφνικές απελευθερώσεις ενέργειας (Σχήμα 2.33, Σχήμα 2.34). Για αυτό, στις περιπτώσεις αυτών των υλικών, οι δοκιμές τερματίστηκαν πρόωρα προκειμένου να αποφευχθούν βλάβες στον εξοπλισμό των δοκιμών. Η υστερητική συμπεριφορά των υλικών αυτών, ακόμα και μετά την ολίσθηση, χαρακτηρίζεται από εναλλασσόμενα και συνεχή άλματα της δύναμης από στατικές σε δυναμικές τιμές. Αξίζει να σημειωθεί ότι, παρά το γεγονός ότι η κυκλική συμπεριφορά αυτών των διεπιφανειών προφανώς δεν είναι κατάλληλη για αντισεισμικές εφαρμογές, από τα αποτελέσματα που προέκυψαν στην πειραματική ανάλυση, φαίνεται ότι τα υλικά αυτά θα μπορούσαν να είναι πολλά υποσχόμενα στην εφαρμογή συνδέσεων τριβής για στατικά φορτία, λόγω της υψηλής τιμής του συντελεστή τριβής τους.



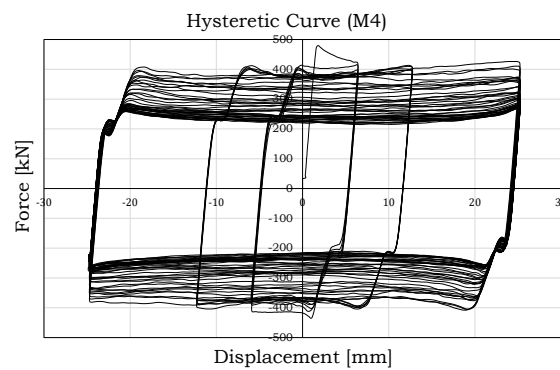
Σχήμα 2.33 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών M2



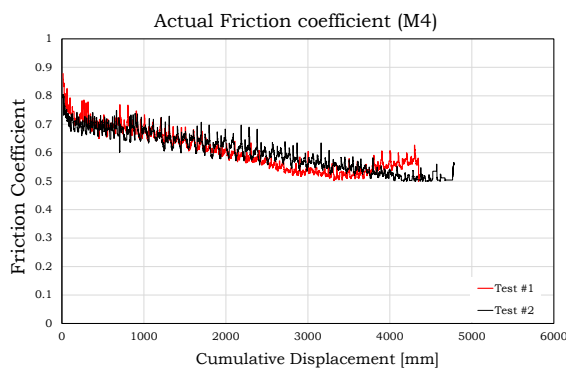
Σχήμα 2.34 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών M3



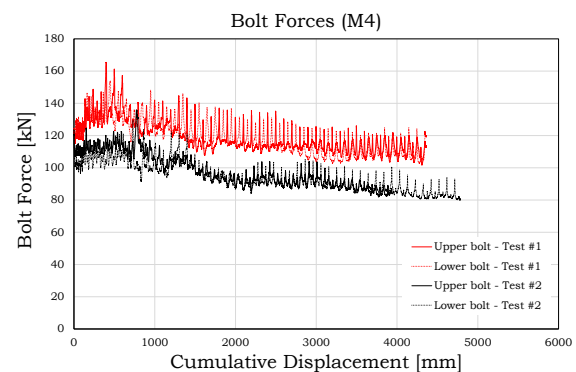
Σχήμα 2.35 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών M1



Σχήμα 2.36 : Υστερητική συμπεριφορά σφηνών M3



Σχήμα 2.37 : Πραγματικός συντελεστής τριβής – M4



Σχήμα 2.38 : Δυνάμεις κοχλιών – M4

Τα μέταλλα M1 και M4 παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά (Σχήμα 2.37, Σχήμα 2.38). Συγκεκριμένα, η υστερητική τους απόκριση χαρακτηρίστηκε από τιμή δύναμης ολίσθησης υψηλότερη από των «σκληρών» υλικών, αλλά, από την άλλη πλευρά, έδειξαν επίσης σημαντικότερη υποβάθμιση τόσο λόγω της χαλάρωσης των κοχλιών, όσο και λόγω της φθοράς των πλακών τριβής. Επιπλέον, η συμπεριφορά που παρουσίασαν τα δύο υλικά στις δύο πανομοιότυπες δοκιμές ήταν σημαντικά διαφορετική, δείχνοντας μια τυχαία

μεταβλητότητα της συμπεριφοράς τους. Η μεταβλητότητα αυτή οφείλεται κυρίως στη διαφορετική συμπεριφορά των κοχλιών στις δύο δοκιμές. Για παράδειγμα, στο Σχήμα 2.37 και το Σχήμα 2.38 οι κόκκινες και μαύρες γραμμές αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές τριβής και τις δυνάμεις κοχλιών σε σχέση με την αθροιστική μετακίνηση, για τις δύο δοκιμές που εκτελούνται στα δοκίμια με πλάκες τριβής M4. Είναι σαφές ότι, παρόλο που η πραγματική τιμή του συντελεστή τριβής δεν διαφέρει στις δύο δοκιμές, η συμπεριφορά των κοχλιών διαφέρει σημαντικά, με αποτέλεσμα, το σύνολο της υστερητικής απόκρισης να είναι διαφορετικό. Συγκεκριμένα, σε μία από τις δύο δοκιμές, μετά την πρώτη ολίσθηση, παρατηρήθηκε ξαφνική απώλεια προέντασης στους κοχλίες περίπου 15%, που κατά συνέπεια οδήγησε σε ανάλογη απώλεια της δύναμης ολίσθησης. Αυτή η διαφορετική απόκριση των δοκιμών πιθανώς οφείλεται στις ατέλειες της επίστρωσης της πλάκας τριβής, η οποία στην περίπτωση μαλακών επιστρώσεων είναι εντελώς χειροκίνητη και οδηγεί σε ανομοιόμορφη επάλειψη του μετάλλου επίστρωσης. Στην περίπτωση του υλικού M1, η υποβάθμιση της αρχικής δύναμης ολίσθησης στο τέλος των δοκιμών ήταν 45%, ενώ στη περίπτωση του υλικού M4, ήταν περίπου 50%. Ωστόσο, και τα δύο υλικά παρείχαν πολύ υψηλές τιμές του συντελεστή τριβής, με τον αρχικό συντελεστή τριβής των υλικών M1 και M4 να είναι περίπου ίσος με 0.55/0.65 και 0.7/0.9, αντίστοιχα.

Όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις, και τα δοκίμια των μαλακών υλικά ανοίχτηκαν μετά τη δοκιμή, προκειμένου να εκτιμηθεί η βλάβη των διεπιφανειών. Όπως μπορεί να εξαχθεί από το Σχήμα 2.38 και το Σχήμα 2.39, όπως αναμενόταν, η βλάβη επικεντρώθηκε κυρίως στις σφήνες τριβής, ενώ οι πλάκες από ανοξείδωτο χάλυβα ήταν πρακτικά άθικτες μετά τη δοκιμή.



Σχήμα 2.38 : Βλάβη των σφηνών M1

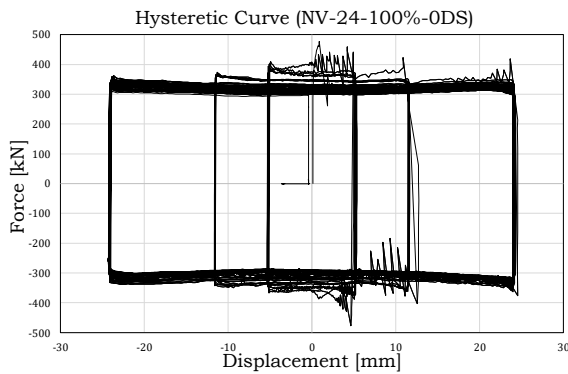


Σχήμα 2.39 : Βλάβη των σφηνών M4

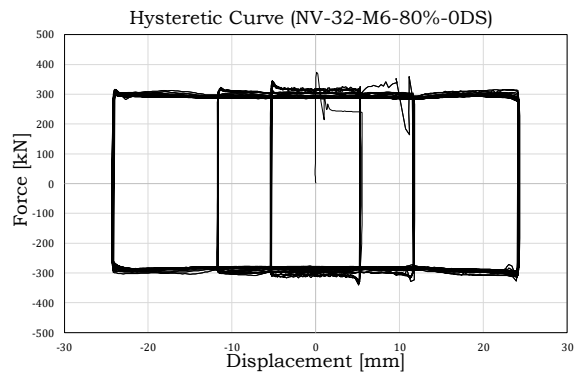
2.5.2.3 Επιρροή της δύναμης σύσφιξης

Για τη διερεύνηση της επίδρασης των παραμέτρων που επηρεάζουν την απόκριση των απλών αποσβεστήρων τριβής, επεκτάθηκαν οι πειραματικές δοκιμές σε ορισμένα υλικά (M1, M4, M6). Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν η επίδραση της δύναμης σύσφιξης, η επίδραση των διατάξεων των δισκοειδών ελατηρίων και οι συνέπειες της τυχαίας μεταβλητότητας υλικού για αυτά τα τρία υλικά. Σε αυτή την ενότητα εξετάζεται συνοπτικά η επιρροή της δύναμης σύσφιξης στην υστερητική απόκριση των αποσβεστήρων τριβής. Οι τυπικές καμπύλες δύναμης-μετατόπισης μίας σειράς δοκιμών με μεταβλητή προένταση φαίνεται, για παράδειγμα, στα Σχήματα 2.39-2.42, για ένα από τα τρία εξεταζόμενα υλικά (M6). Τα αποτελέσματα για άλλα υλικά παρουσιάζουν παρόμοια καθολική συμπεριφορά η οποία δεν

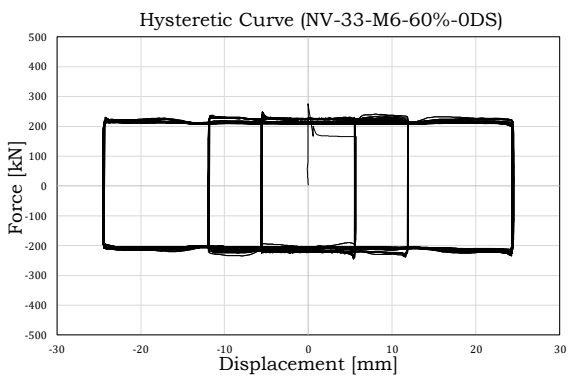
θα σχολιαστεί λεπτομερώς. Όπως ήταν αναμενόμενο, η υστερητική απόκριση χαρακτηρίστηκε γενικά από υψηλή αρχική ακαμψία μέχρι την επίτευξη της τιμής της στατικής δύναμης ολίσθησης, η οποία, σε όλες τις περιπτώσεις που αναλύθηκαν, ήταν υψηλότερη από την σταθεροποιημένη αντίσταση δυναμικής τριβής. Όλα τα υλικά παρουσίασαν βρόχους υστέρησης σχεδόν ορθογώνιους. Όσον αφορά την απόκριση σε δύναμη-μετατόπιση, το μόνο υλικό που παρέχει μια λιγότερο σταθερή συμπεριφορά ήταν το υλικό M6 το οποίο, όπως έχει ήδη εξηγηθεί, είναι μια σκληρή επίστρωση της οποίας η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται, σε υψηλές πιέσεις, από έναν πρώτο κύκλο με ελαφριά απόκριση προσκόλλησης-ολίσθησης.



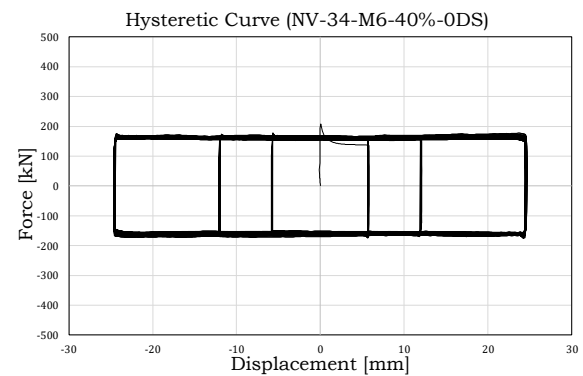
Σχήμα 2.39 : Σφήνες M6, 100% προένταση



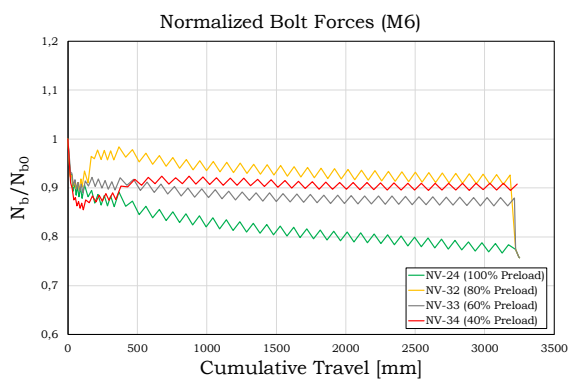
Σχήμα 2.40 : Σφήνες M6, 80% προένταση



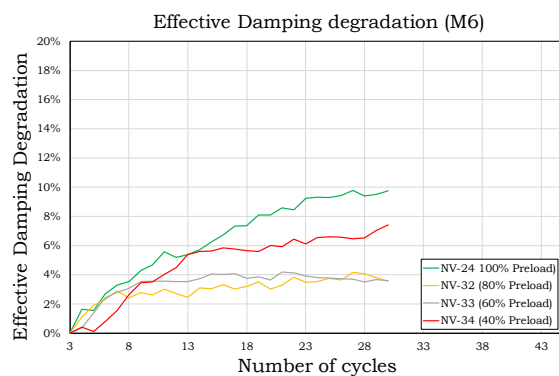
Σχήμα 2.41 : Σφήνες M6, 60% προένταση



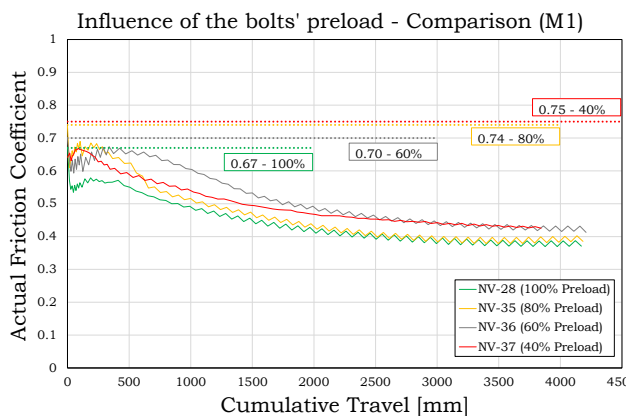
Σχήμα 2.42 : Σφήνες M6, 40% προένταση



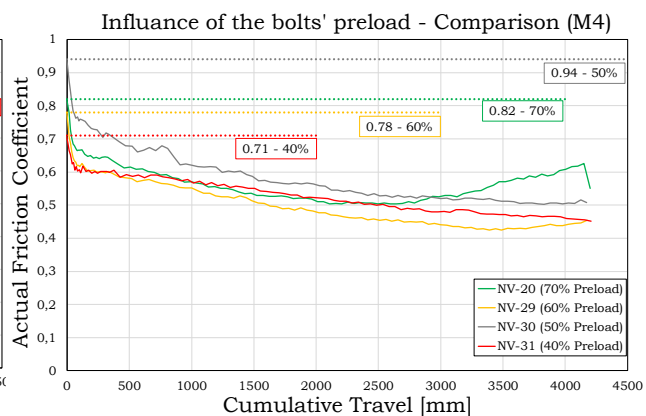
Σχήμα 2.45 : Υποβάθμιση δύναμης κοχλίας (100% με 40% προεντάσεις)



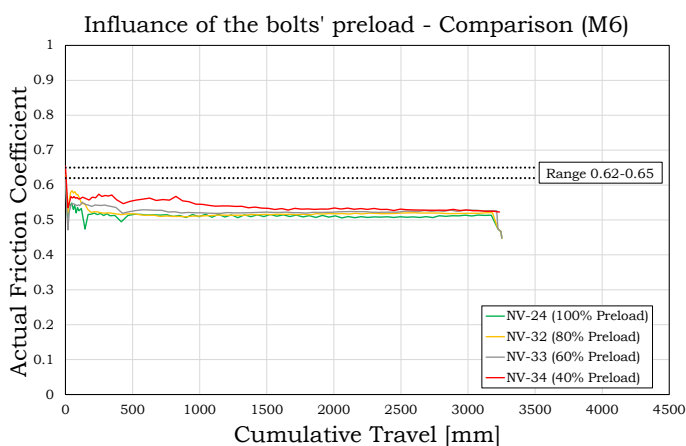
Σχήμα 2.46 : Υποβάθμιση απορρόφησης ενέργειας (100% με 40% προεντάσεις)



Σχήμα 2.47 : Επιρροή της προέντασης στον συντελεστή τριβής: σφήνες M1



Σχήμα 2.48 : Επιρροή της προέντασης στον συντελεστή τριβής: σφήνες M4



Σχήμα 2.49 – Επιρροή της προέντασης στον συντελεστή τριβής: σφήνες M6

Μία από τις σημαντικότερες παρατηρήσεις σε αυτή τη σειρά δοκιμών είναι ότι, για το συγκεκριμένο υλικό επίστρωσης, το φαινόμενο προσκόλλησης-ολίσθησης εξαφανίζεται μειώνοντας την προένταση των κοχλιών, υποδεικνύοντας ότι το φαινόμενο προσκόλλησης-ολίσθησης εξαρτάται έντονα από την πίεση επαφής που δημιουργείται στην διεπιφάνεια. Στο Σχήμα 2.45 και Σχήμα 2.46, παρουσιάζεται η εξέλιξη των δυνάμεων κοχλιών κατά τη διάρκεια των δοκιμών και η υποβάθμιση της ενεργής απόσβεσης. Η δύναμη κοχλία (N_b) κανονικοποιείται με βάση την αρχική τιμή της στην έναρξη της δοκιμής (N_{b0}), ενώ η υποβάθμιση της ενεργής απόσβεσης υπολογίζεται σύμφωνα με τη διαδικασία που δίνεται στο [47].

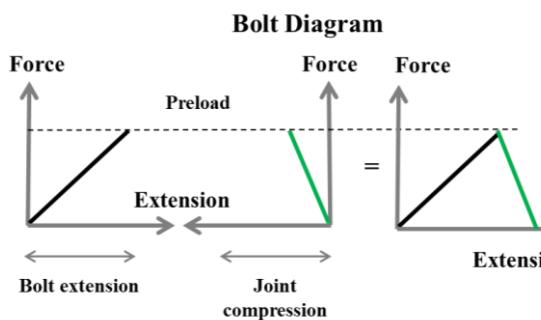
Από αυτά τα διαγράμματα, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μείωση της αρχικής δύναμης προέντασης οδηγεί σε βελτίωση της ενεργής υποβάθμισης. Αυτή η τελευταία παράμετρος εκφράζει κυρίως την υποβάθμιση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας της σύνδεσης τριβής. Όσον αφορά την αρχική τιμή του συντελεστή τριβής, όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.47-2.49, τα τρία υλικά που αναλύθηκαν δεν έδειξαν ισχυρή εξάρτηση από την προένταση, ενώ η προοδευτική υποβάθμισή τους μειώθηκε, όσο μειώθηκε η αρχική δύναμη σύσφιξης. Η μεταβολή της αρχικής τιμής του συντελεστή τριβής που παρατηρήθηκε σε αυτές τις δοκιμές ήταν πρακτικά εντός του κανονικού στατιστικού εύρους διακύμανσης του συντελεστή τριβής που παρατηρήθηκε για αυτά τα υλικά. Συγκεκριμένα, η αρχική τιμή του

συντελεστή τριβής για το υλικό M1 κυμάνθηκε από 0.67 έως 0.75, για το υλικό M4 από 0.71 έως 0.94 και για το υλικό M6 από 0.62 έως 0.65 (μη δείχνοντας σαφή εξάρτηση σε σχέση με την εφαρμοζόμενη προένταση), ενώ το στατιστικό εύρος διακύμανσης της ίδιας παραμέτρου είναι, όπως αποδεικνύεται στη συνέχεια, ίσο με το 0.62-0.81 για το υλικό M1, 0.69-0.84 για το υλικό M4 και 0.52-0.68 f για το υλικό M6.

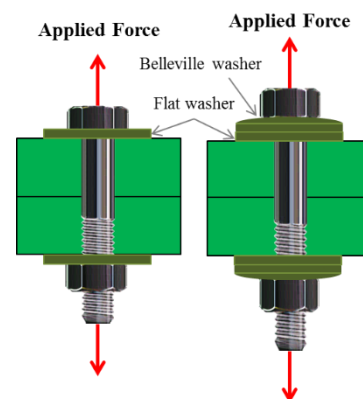
Επομένως, οι δοκιμές σε μεταβλητές τιμές της δύναμης προέντασης δεν έδειξαν σαφή συσχέτιση μεταξύ του συντελεστή στατικής τριβής και της προέντασης κοχλίας. Αντιθέτως, η αναπαράσταση των δυνάμεων κοχλίας, κανονικοποιημένες με βάση με την αρχική προένταση, σε σχέση με την αθροιστική μετατόπιση, καθώς και τα διαγράμματα της υποβάθμισης της ενεργής απόσβεσης σε σχέση με τον αριθμό των κύκλων, έδειξαν, όπως αναμενόταν, ότι η μείωση της δύναμης προέντασης οδηγεί σε χαμηλότερη απώλεια προέντασης κοχλίας και χαμηλότερη υποβάθμιση ενέργειας. Επιπλέον, η ανάλυση όλων των δεδομένων έδειξε ότι για το υλικό M6 η ενεργή υποβάθμιση απόσβεσης στον 10^ο κύκλο ήταν πάντα χαμηλότερη από το 10% όπως απαιτείται από το EN15129 [47]. Αντίθετα, για τα υλικά M1 και M3 (μαλακά υλικά), τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτή η ελάχιστη απαίτηση θα μπορούσε να ικανοποιηθεί μόνο εάν η τάση φορτίου περιορίζεται στο 60% του φορτίου στο όριο της ελαστικής συμπεριφοράς κοχλίας.

2.5.2.4 Επιρροή της διάταξης των δισκοειδών ελατηρίων

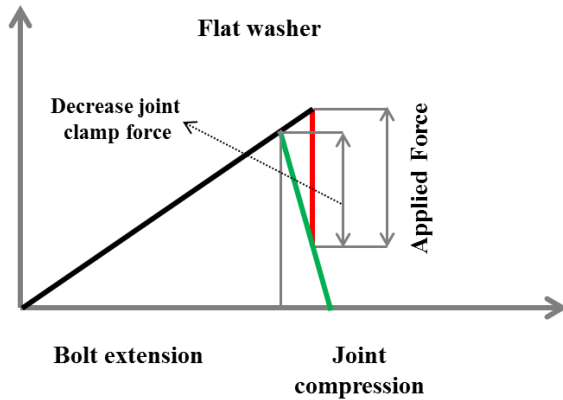
Τα δισκοειδή ελατήρια είναι ένας τύπος κωνικών δακτυλιοειδών δακτυλίων, που συχνά αναφέρονται ως δακτύλιοι Belleville, τα οποία μπορούν να θλιφτούν ελαστικά (με την προϋπόθεση ότι έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα [48] έως ότου φτάσουν την οριακή τιμή πέραν της οποίας παρουσιάζουν σημαντική αύξηση της ακαμψίας μέχρι την πλήρη επιπεδοποίηση. Το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι μπορούν να διαταχθούν το ένα πάνω στο άλλο (παράλληλη διάταξη) για να διπλασιάσουν την αντοχή ή πλάτη με πλάτη (διάταξη εν σειρά) για να διπλασιάσουν την παραμόρφωση ή, και πάλι, σε συνδυασμούς σειρών και παραλλήλων για να αποκτήσουν σύστημα δακτυλίων με τις επιθυμητές τιμές ακαμψίας και αντοχής συγχρόνως. Η παρουσία τους, στην τεχνική βιβλιογραφία, θεωρείται συνήθως ωφέλιμη σε όλες τις περιπτώσεις στις οποίες απαιτείται να διατηρείται σταθερή η προένταση σε κοχλίες κατά τη διάρκεια ζωής μιας σύνδεσης και ειδικά στις περιπτώσεις όπου μπορεί να αναμένονται δονήσεις, ερπυσμοί ή ελαστικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κοχλίων.



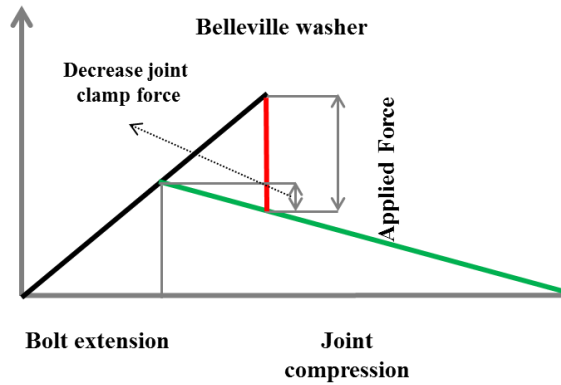
Σχήμα 2.50 : Τυπικό διάγραμμα κοχλίας



Σχήμα 2.51 : Σύνδεση με δακτυλίους ή δισκοειδή ελατήρια

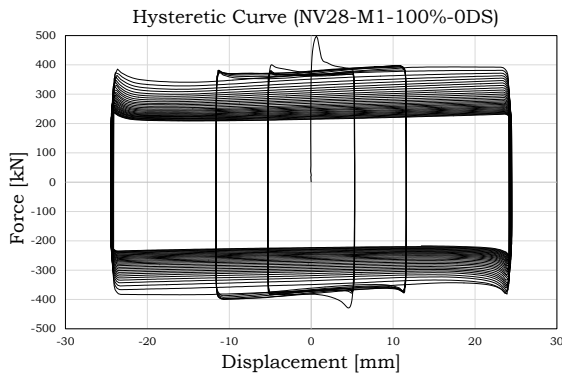


Σχήμα 2.52 : Διάγραμμα κοχλία με επίπεδους δακτυλίους

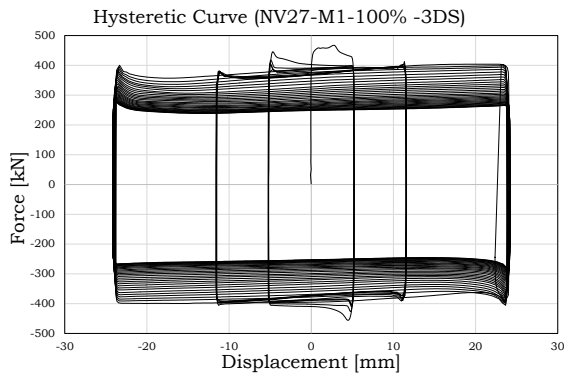


Σχήμα 2.53 : Διάγραμμα κοχλία με δισκοειδή ελατήρια

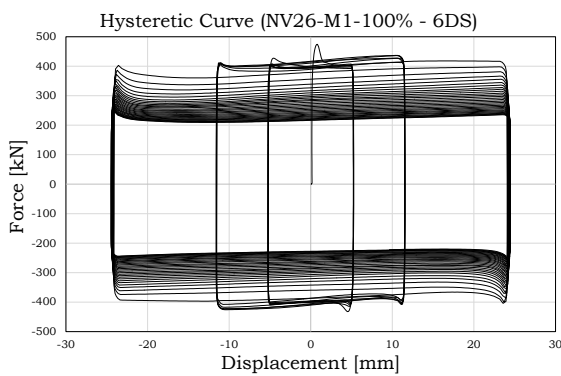
Όλα αυτά τα φαινόμενα εξηγούνται λεπτομερώς στο [48]. Το πιθανό τους αποτέλεσμα εξηγείται εν συντομία στα Σχήματα 2.50-2.53, όπου συγκρίνεται η συμπεριφορά ενός συστήματος με κανονικούς δακτυλίους με ένα άλλο με δισκοειδή ελατήρια. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων, που επαληθεύεται εύκολα, είναι ότι όταν στη σύνθεση κοχλίων υπάρχει μείωση του πάχους, η οποία μπορεί να οφείλεται σε φθορά υπό ανακυκλικά φορτία ή σε ερπυσμό των στρώσεων επίστρωσης, η μικρότερη αξονική ακαμψία της σύνθεσης βοηθά στο να αντισταθμιστεί η μείωση του πάχους των τμημάτων της σύνδεσης που συσγίγγονται, που μπορεί να οφείλεται στη φθορά του υλικού τριβής ή στη συμπίεση των επιστρώσεων και των τραχυτήτων. Στην πραγματικότητα, οι κωνικοί δακτύλιοι δρουν ως ελατήρια ωθώντας τον κορμό του κοχλία και αποκαθιστώντας, τουλάχιστον εν μέρει, την χαλάρωση. Οι συνέπειες της διάταξης των δισκοειδών ελατηρίων μελετήθηκε κατά τη διάρκεια του έργου FREEDAM με κυκλικές δοκιμές, λαμβάνοντας υπόψη τέσσερις διαφορετικές πιθανές διατάξεις: χωρίς δισκοειδή ελατήρια, 3 παράλληλα, 2 σειρές των 3 παραλλήλων (6 δισκοειδή ελατήρια), 3 σειρές των 3 παραλλήλων (9 δισκοειδή ελατήρια). Όπως και πριν, τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται ως παράδειγμα για το υλικό M1. Καθώς η παρατηρηθείσα συμπεριφορά των άλλων υλικών είχε αμελητέες διαφορές, οι ίδιες γενικές παρατηρήσεις που αναφέρονται εδώ μπορούν να επεκταθούν σε όλα τα υλικά του έργου. Η σύγκριση παρέχεται με αναφορά στο υλικό M1 επειδή επιτρέπει την πιο εύκολη ανάδειξη της επίδρασης των δισκοειδών ελατηρίων στην ανακυκλική απόκριση. Από τα Σχήματα 2.54-2.57 μπορεί να παρατηρηθεί, για το υλικό M1, ότι η διάταξη των δισκοειδών ελατηρίων, συνολικά, δεν φαίνεται να παρέχει σημαντική επίδραση στην υστερητική απόκριση. Όλες οι δοκιμές ξεκίνησαν με μια αρχική δύναμη ολίσθησης περίπου 400 kN και τελείωσαν με μια δύναμη περίπου 200 kN και, σε αντίθεση με την αναμενόμενη απόκριση, στην περίπτωση με τον περισσότερο αριθμό δισκοειδών ελατηρίων, η συμπεριφορά έδειξε μεγαλύτερη υποβάθμιση.



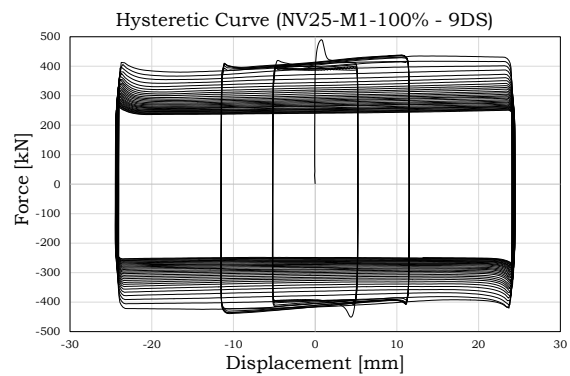
Σχήμα 2.54 : Σφήνες M1 με επίπεδους δακτυλίους



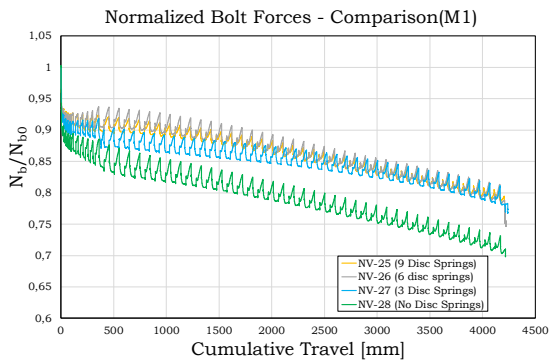
Σχήμα 2.55 : Σφήνες M1 με 3 δισκοειδή ελατήρια



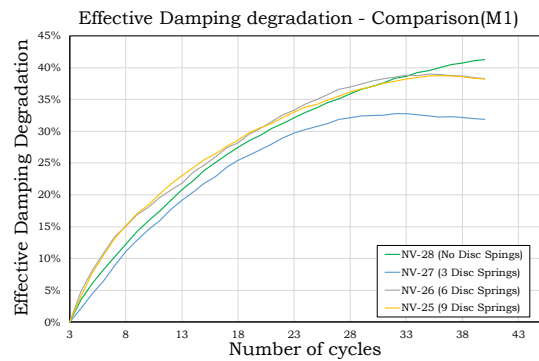
Σχήμα 2.56 : Σφήνες M1 με 6 δισκοειδή ελατήρια



Σχήμα 2.57 : Σφήνες M1 με 9 δισκοειδή ελατήρια



Σχήμα 2.58 : Δυνάμεις κοχλιών με διαφορετικές διατάξεις δακτυλίων



Σχήμα 2.59 : Ενεργή υποβάθμιση απόσβεσης με διαφορετικές διατάξεις δακτυλίων

Αυτό το αποτέλεσμα, από την άποψη της συνολικής υστερητικής απόκρισης, επισημαίνει την περιορισμένη απόδοση των ευρωπαϊκών τυποποιημένων δισκοειδών ελατηρίων στη συνολική απόκριση του αποσβεστήρα. Αυτό αποδεικνύεται επίσης από την αναπαράσταση των δυνάμεων των κοχλιών κατά τη διάρκεια της δοκιμής και το διάγραμμα ενεργής υποβάθμισης της απόσβεσης (Σχήμα 2.58, Σχήμα 2.59).

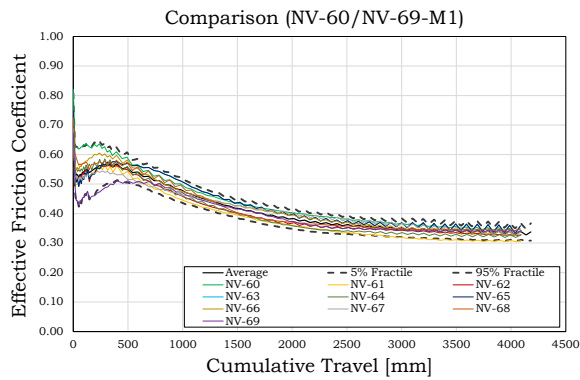
Στο Σχήμα 2.58 φαίνονται οι δυνάμεις των κοχλιών κατά τις δοκιμές, που δείχνουν, όπως αναμενόταν, ότι η υψηλότερη παραμόρφωση του κοχλία οδηγεί σε μικρότερη απώλεια της αρχικής προέντασης. Ωστόσο, το όφελος που προκύπτει δεν οδηγεί σε συνολική βελτίωση

της υστερητικής απόκρισης της σύνδεσης, πιθανώς λόγω της μεγαλύτερης φθοράς του υλικού τριβής. Αυτό τονίζεται στα διαγράμματα της ενεργής υποβάθμισης απόσβεσης (Σχήμα 2.59), που δείχνουν ότι η υιοθέτηση διαφορετικής διάταξης δισκοειδών ελατηρίων δεν αντιστοιχεί σε σημαντική βελτίωση της απόκρισης.

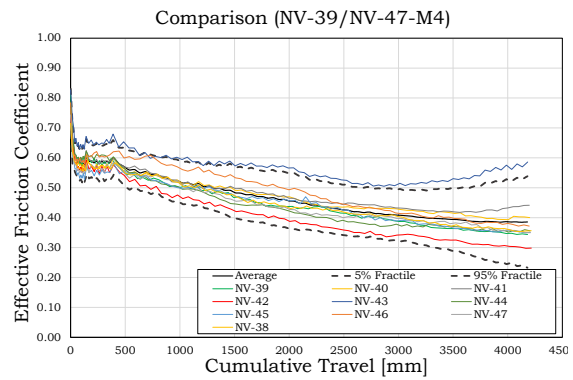
Συμπερασματικά, τα αποτελέσματα αυτής της σειράς δοκιμών έδειξαν ότι τα ευρωπαϊκά τυποποιημένα δισκοειδή ελατήρια θα μπορούσαν να βοηθήσουν να διατηρηθεί σταθερή η προένταση του κοιλία, αλλά, συνολικά, δεν είναι σε θέση να παράσχουν σημαντική βελτίωση της κυκλικής απόκρισης. Επομένως, ενώ ο ρόλος τους μπορεί να είναι σημαντικός για τον περιορισμό άλλων επιπτώσεων, όπως εκείνων που σχετίζονται με τη μακροπρόθεσμη απώλεια της αρχικής προέντασης, τις δονήσεων ή τις θερμικές επιδράσεις, ταυτόχρονα, η χρήση τους φαίνεται να έχει περιορισμένη επίδραση στην κυκλική συμπεριφορά.

2.5.2.5 Επιρροή της τυχαιότητας

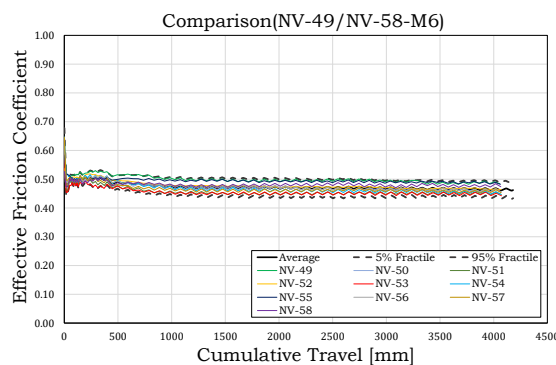
Συγκεκριμένες δοκιμές του έργου FREEDAM αφιερώθηκαν για να εκτιμηθεί το στατιστικό εύρος διακύμανσης του συντελεστή τριβής και να προταθούν τιμές των συντελεστών τριβής που θα χρησιμοποιηθούν στο σχεδιασμό σε ΟΚΛ και σε ΟΚΑ. Είναι εύκολο να παρατηρηθεί επίσης από τα προηγούμενα αποτελέσματα ότι τα εξεταζόμενα υλικά επίστρωσης επηρεάζονται από μια τυχαία διακύμανση που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο σχεδιασμό, ειδικά ενόψει της εφαρμογής των αρχών ικανοτικού σχεδιασμού. Ενώ για τους ελέγχους σε ΟΚΛ χρειάζεται η χαρακτηριστική τιμή του συντελεστή στατικής τριβής, για τους ελέγχους σε ΟΚΑ και, συγκεκριμένα για την εφαρμογή των αρχών ικανοτικού σχεδιασμού, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε και την ελάχιστη τιμή του συντελεστή δυναμικής τριβής (που αναφέρεται στον σταθεροποιημένο κυκλικό) και το ανώτερο όριο της τιμής του συντελεστή στατικής τριβής. Η αναλογία μεταξύ αυτών των δύο τιμών επηρεάζει προφανώς τον παράγοντα υπεραντοχής, ο οποίος πρέπει να εξεταστεί στην πράξη για το σχεδιασμό των τμημάτων της κατασκευής χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Η σειρά των δοκιμών εκτελέστηκε, για κάθε υλικό επίστρωσης, σε δέκα ίδια δοκίμια, όλα προεντεταμένα στο 60% της τάσης του ορίου της ελαστικής συμπεριφοράς (μέγιστη τιμή που προτείνεται ως αποτέλεσμα του έργου FREEDAM). Παρόλο που τα δισκοειδή ελατήρια δεν είναι σημαντικά από σεισμική άποψη, όπως εξηγήθηκε παραπάνω λαμβάνοντας υπόψη την πιθανή επίδρασή τους στη μακροπρόθεσμη απόκριση, καθώς και στις δονήσεις και τις θερμικές επιδράσεις, τα δοκίμια διατάχθηκαν με έξι δισκοειδή ελατήρια, σε 3 σειρές 2 παραλλήλων. Στα διαγράμματα των Σχημάτων 2.60-2.62, δίνεται μια σύνθεση των συντελεστών τριβής που λαμβάνονται από όλες τις δοκιμές, σε σχέση με την αθροιστική μετατόπιση, ενώ στα ίδια διαγράμματα φαίνεται η μέση τιμή (συνεχής γραμμή) και τα ποσοστιαία 5% και 95% (κάτω και άνω διακεκομμένες γραμμές) που εκτιμώνται για κάθε τιμή της αθροιστικής μετατόπισης αφαιρώντας ή προσθέτοντας στη μέση τιμή k -φορές τον συντελεστή διακύμανσης. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη το περιορισμένο πλήθος δεδομένων (10 δοκίμια για κάθε υλικό), η τιμή του k - έχει καθοριστεί σύμφωνα με τις οδηγίες που δίνονται από τον EC0 στο τμήμα D7.2 [26], δηλαδή θεωρείται ότι ισούται με 1.92 υπό την προϋπόθεση της κανονικής κατανομής.



Σχήμα 2.60 : Τυχασιότητα του συντελεστή τριβής- σφήνες M1



Σχήμα 2.61 : Τυχασιότητα του συντελεστή τριβής- σφήνες M4



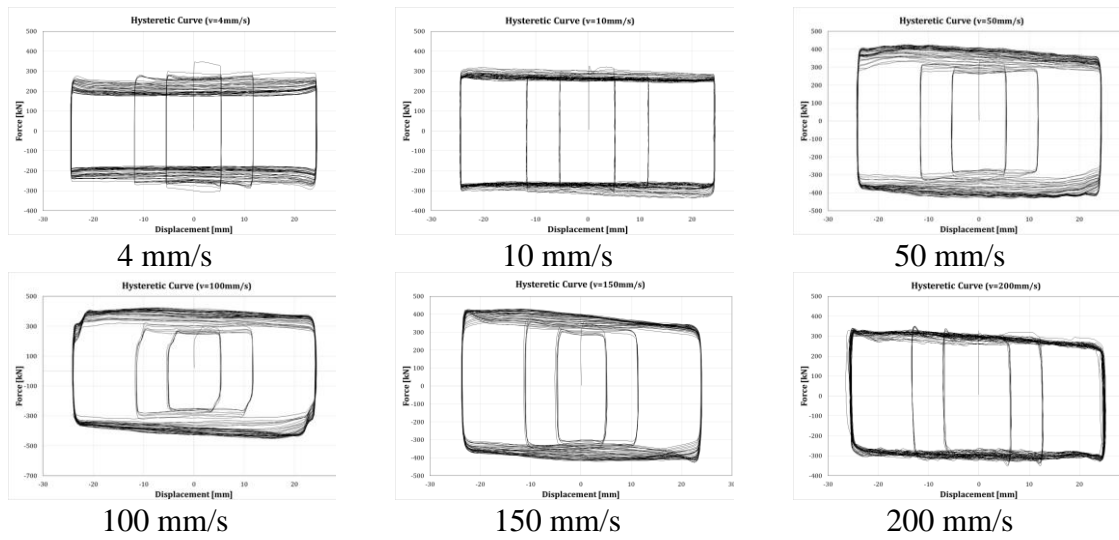
Σχήμα 2.62 : Τυχασιότητα του συντελεστή τριβής- σφήνες M6

2.5.2.6 Επιρροή της ταχύτητας

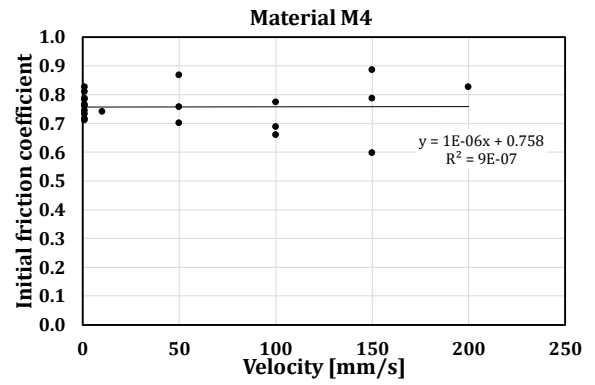
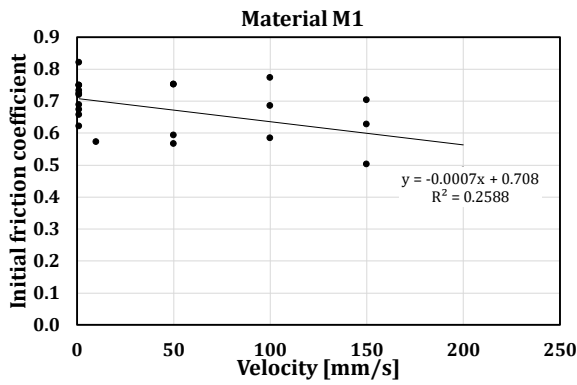
Ομοίως με τις δοκιμές χαμηλής ταχύτητας, οι δοκιμές υψηλής ταχύτητας έχουν πραγματοποιηθεί σε δύο ξεχωριστά στάδια. Στο πρώτο στάδιο, έγινε περιορισμένος αριθμός δοκιμών, επεκτείνοντας την ανάλυση σε οκτώ υλικά. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκαν περαιτέρω δοκιμές μόνο στα υλικά M1, M4, M6.

Η πρώτη φάση δοκιμών εξέτασε 15 δοκιμές υψηλής ταχύτητας, με σφήνες τριβής επιστρωμένες με τα πέντε μαλακά και τρία σκληρά υλικά που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Αντίθετα, η δεύτερη φάση εξέτασε 45 δοκιμές υψηλής ταχύτητας μόνο σε τρία υλικά (M1, M4 and M6).

Οι δοκιμές υψηλής ταχύτητας επισήμαναν μια σημαντική εξάρτηση του συντελεστή τριβής από την ταχύτητα. Αυτό αναγνωρίζεται εύκολα από τα αποτελέσματα των δοκιμών, τα οποία παρουσιάζονται εδώ, ως παράδειγμα, μόνο για υλικό M4 (Σχήμα 2.63). Για τα άλλα υλικά λήφθηκαν παρόμοια αποτελέσματα, παρόλο που για το υλικό M1 παρατηρήθηκε κάποια αστάθεια των υστερητικών βρόχων, μόνο για την υψηλότερη θεωρούμενη ταχύτητα (200 mm/s). Η ταχύτητα παρέχει μια αλλαγή του σχήματος των υστερητικών βρόχων, αλλά δεν αλλάζει σημαντικά την τιμή της αρχικής δύναμης ολίσθησης. Όπως φαίνεται στα Σχήματα 2.64-2.66, η αρχική τιμή του συντελεστή τριβής που παρατηρήθηκε σε όλες τις δοκιμές υψηλής ταχύτητας κυμάνθηκε σε ελάχιστες/μέγιστες τιμές, οι οποίες εμπίπτουν στο κανονικό στατιστικό εύρος διακύμανσης του συντελεστή τριβής για τα τρία θεωρούμενα υλικά. Επιπλέον, για τα τρία υλικά παρατηρήθηκε μια πολύ ασθενής συσχέτιση που σχηματίζει μια ευθεία παλινδρόμησης του αρχικού συντελεστή τριβής σε σχέση με την ταχύτητα ολίσθησης (σχεδόν οριζόντια παλινδρόμηση).

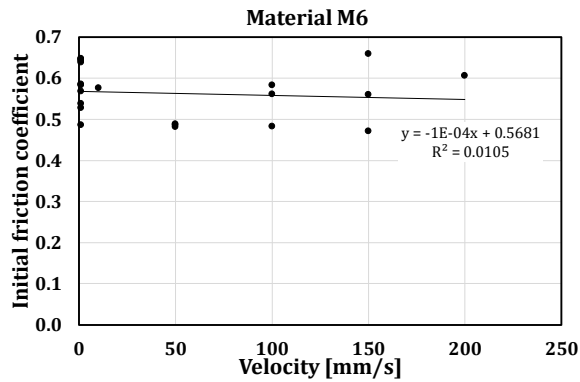


Σχήμα 2.63 : Τυχασιότητα της ταχύτητας– σφήνες M4

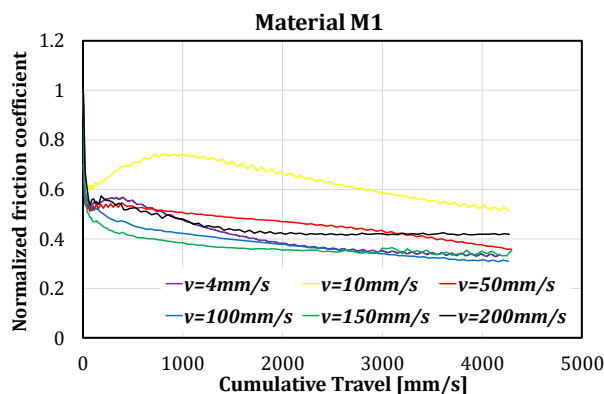


Σχήμα 2.64 : Επιρροή της ταχύτητας – σφήνες M1

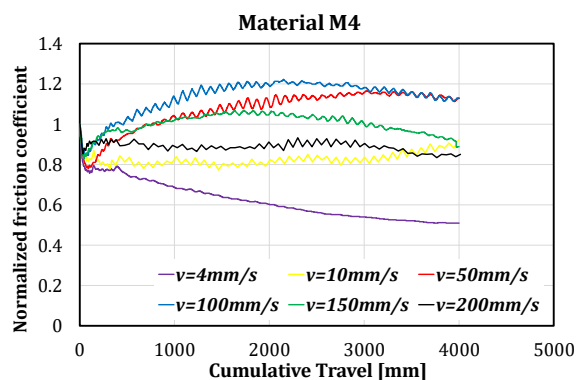
Σχήμα 2.65 : Επιρροή της ταχύτητας – σφήνες M4



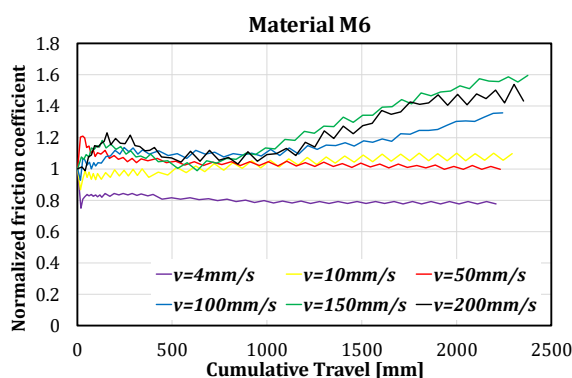
Σχήμα 2.66 : Επιρροή της ταχύτητας – σφήνες M6



Σχήμα 2.66 : Εξάρτηση της υποβάθμισης του ΣΤ από την ταχύτητα – σφήνες M1



Σχήμα 2.67 : Εξάρτηση της υποβάθμισης του ΣΤ από την ταχύτητα – σφήνες M4

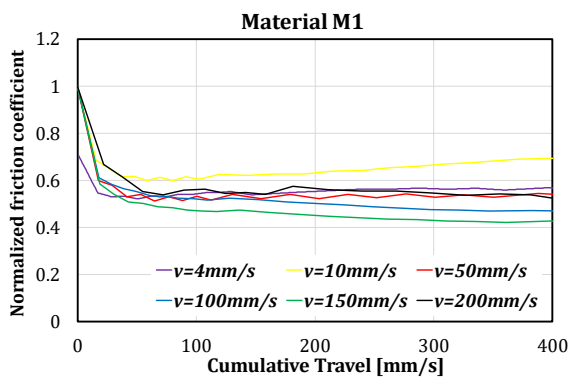


Σχήμα 2.68 : Εξάρτηση της υποβάθμισης του ΣΤ από την ταχύτητα – σφήνες M6

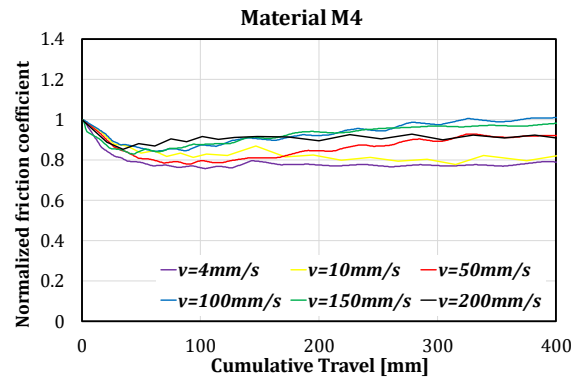
Ωστόσο, οι δοκιμές υπογράμμισαν ότι, ενώ η ταχύτητα δεν επηρεάζει σημαντικά τις τιμές του αρχικού συντελεστή τριβής, συσχετίζεται με τη φθορά του υλικού και την αυξομείωση των δυνάμεων κοχλιών κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Σε όλες σχεδόν τις ανακυκλικές δοκιμές, παρατηρήθηκε ότι η ανακυκλική υποβάθμιση του συντελεστή τριβής είναι σημαντικά υψηλότερη όταν η ταχύτητα ολίσθησης είναι χαμηλή (οιονεί-στατική). Επομένως, μια συντηρητική εκτίμηση της εξέλιξης της υποβάθμισης του συντελεστή τριβής μπορεί να ληφθεί συνήθως, με δοκιμές χαμηλής ταχύτητας, οι οποίες υπό κανονικές συνθήκες μπορούν να πραγματοποιηθούν με απλούστερες διατάξεις. Η ανακυκλική υποβάθμιση του συντελεστή τριβής δεν μεταβάλλεται ομοιόμορφα με την ταχύτητα ολίσθησης. Για τα τρία υλικά, παρατηρήθηκαν διαφορετικοί ρυθμοί υποβάθμισης ανάλογα με την ταχύτητα της δοκιμής. Για παράδειγμα, στο υλικό M4, παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός υποβάθμισης του συντελεστή τριβής μειώνεται, αυξάνοντας την ταχύτητα στο εύρος 4-100 mm/s, ενώ αυξάνεται πάλι στο εύρος ταχυτήτων 100-200 mm/s. Ομοιότητες παρατηρήθηκαν και σε άλλες περιπτώσεις, αλλά κάθε υλικό έχει τις δικές του ιδιότητες υποβάθμισης, και δεν μπορεί να οριστεί ένας γενικός κανόνας. Το υλικό M1 έδειξε μικρή εξάρτηση της υποβάθμισης του συντελεστή τριβής από την ταχύτητα. Αντιθέτως, το υλικό M6 έδειξε μεταβλητή απόκριση ανάλογα με την ταχύτητα ολίσθησης.

Τα υλικά M4 και M6 έδειξαν πιθανή αύξηση του συντελεστή τριβής πέραν της αρχικής στατικής τιμής, ανάλογα με την αθροιστική μετακίνηση και ταχύτητα ολίσθησης. Συγκεκριμένα, το υλικό M4 παρουσίασε περίπου 20% μέγιστη αύξηση του συντελεστή τριβής, σε σχέση με τη στατική τιμή. Αντίθετα, το υλικό M6 έφτασε αυξήσεις της τάξης του 60%, για πολύ μεγάλες τιμές της αθροιστικής μετακίνησης. Από την άποψη του σχεδιασμού,

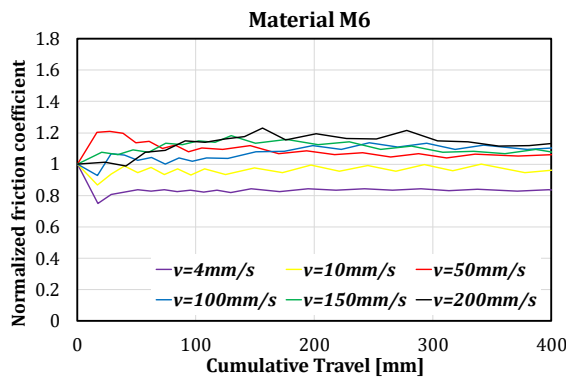
αυτό το φαινόμενο μπορεί να είναι επιβλαβές για την εφαρμογή των αρχών ικανοτικού σχεδιασμού και, ως εκ τούτου, πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την εκτίμηση της υπεραντοχής του αποσβεστήρα για το σχεδιασμό των στοιχείων της κατασκευής χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι δοκιμές υψηλής ταχύτητας πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη πολύ μεγάλες τιμές αθροιστικών μετακινήσεων, οι οποίες είναι σίγουρα πέραν των απαιτήσεων σε αθροιστική μετακίνηση ρεαλιστικών σεισμικών γεγονότων. Σε πρακτικές καταστάσεις, θα μπορούσε να γίνει μία αληθής εκτίμηση της μέγιστης αθροιστικής μετακίνησης, λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις που προκύπτουν από τα τυποποιημένα πρωτόκολλα φόρτισης, τα οποία συνήθως θεωρούνται ως σημεία αναφοράς για τον χαρακτηρισμό της συμπεριφοράς του κόμβου. Για παράδειγμα, είναι εύκολο να επαληθευτεί ότι εάν ληφθεί υπόψη το πρωτόκολλο φόρτισης του AISC 358 για σεισμική πιστοποίηση, ο μοχλοβραχίονας ενός κόμβου αναφοράς είναι σταθερός, για παράδειγμα, στα 600 mm και η μέγιστη στροφή κόμβου είναι σταθερή στα 40 mrad, η εκτίμηση άνω ορίου της απαίτησης σε αθροιστική μετακίνηση στο αποσβεστήρα τριβής είναι περίπου 400 mm. Στα Σχήματα 2.69-2.72 τα ίδια διαγράμματα σχεδιάζονται εκ νέου, ορίζοντας τη μέγιστη τετμημένη στα 400 mm. Αυτό τονίζει ότι, σε αυτό το εύρος, η δυναμική υπεραντοχή, σε σύγκριση με την αρχική στατική τιμή, είναι ίση με περίπου 1 για τα υλικά M1 και M4 (μαλακά), ενώ είναι ίση με περίπου 1.2 για το υλικό M6.



Σχήμα 2.69 : Εξάρτηση της υποβάθμισης του ΣΤ από την ταχύτητα έως 400 mm – σφήνες M1



Σχήμα 2.70 : Εξάρτηση της υποβάθμισης του ΣΤ από την ταχύτητα έως 400 mm – σφήνες M4



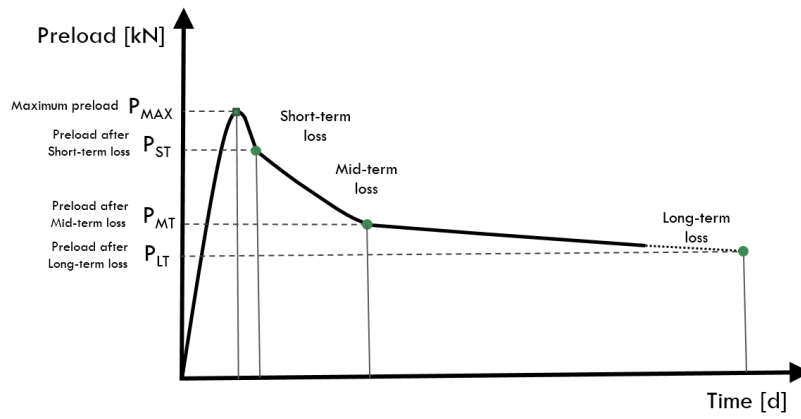
Σχήμα 2.72 : Εξάρτηση της υποβάθμισης του ΣΤ από την ταχύτητα έως 400 mm – σφήνες M6

2.6 Απώλειες προέντασης κατά την ωφέλιμη διάρκεια ζωής

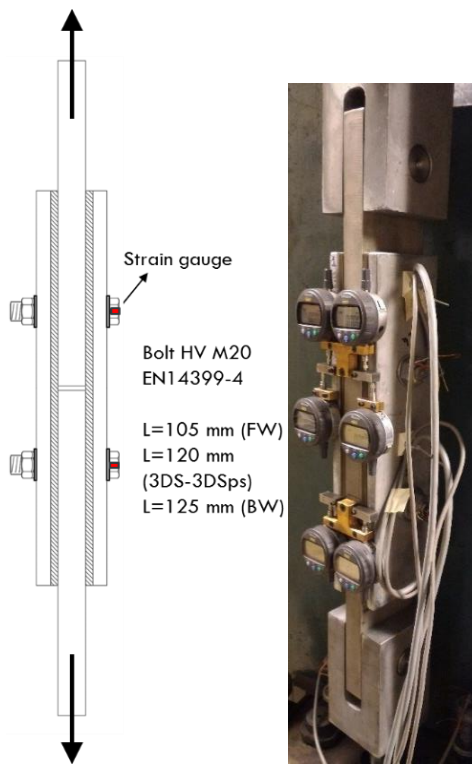
2.6.1 Εισαγωγή

Αρκετά έργα έχουν εξετάσει την επίδραση των τεχνικών προέντασης, των φαινομένων χαλάρωσης, του ερπυσμού των επιστρώσεων, των δονήσεων, της αυτο-χαλάρωσης, δείχνοντας ότι οι προεντεταμένοι κοχλίες παρουσιάζουν πάντα απώλεια της αρχικής προέντασης [49]-[51]. Η απώλεια προέντασης είναι συνήθως σημαντική κατά τις πρώτες 12 ώρες μετά τη σύσφιξη, και μια ισχυρή επίδραση στη συνολική απώλεια οφείλεται επίσης στο μέγεθος των εξωτερικών φορτίων που εφαρμόζονται στις συνδέσεις [52]. Επιπλέον, οι μακροπρόθεσμες δοκιμές συνήθως δείχνουν ότι μετά το τέλος των αρχικών επιπτώσεων, η απώλεια προέντασης είναι συνεχής, ακολουθώντας εξελικτικό λογαριθμικό νόμο [50]. Η απώλεια της αρχικής τάσης του κοχλία συνδέεται με διαφορετικά φαινόμενα, τα σημαντικότερα των οποίων είναι η ανεπαρκής αρχική προένταση στους κοχλίες, η αυτο-χαλάρωση, η χαλάρωση, ο ερπυσμός, η χρήση ακατάλληλου υλικού και η εφαρμογή εξωτερικών φορτίων. Μια σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης της προέντασης του κοχλία με την πάροδο του χρόνου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.72, όπου μπορούν να διακριθούν τρεις φάσεις. Αμέσως μετά τη σύσφιξη, ο κοχλίας παρουσιάζει μια αρχική απώλεια που σχετίζεται κυρίως με τη διαδικασία εγκατάστασης. Αυτή η αρχική απώλεια συμβαίνει αμέσως μετά τη σύσφιξη και αυξάνεται με το μέγεθος της εφαρμοσμένης προέντασης, ειδικά εάν ο κοχλίας συσφίγγεται πέρα από το όριο διαρροής [53]. Μετά την εγκατάσταση, εμφανίζεται η αποκαλούμενη μεσοπρόθεσμη απώλεια. Η ποσότητα αυτής της απώλειας επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες, όπως οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, τα προβλήματα εγκατάστασης και η επίδραση των εξωτερικών φορτίων. Τέλος, μια μακροπρόθεσμη απώλεια συμβαίνει συνεχώς κατά τη διάρκεια ζωής της κατασκευής και, μετά από ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, ο ρυθμός απώλειας καθίσταται σταθερός.

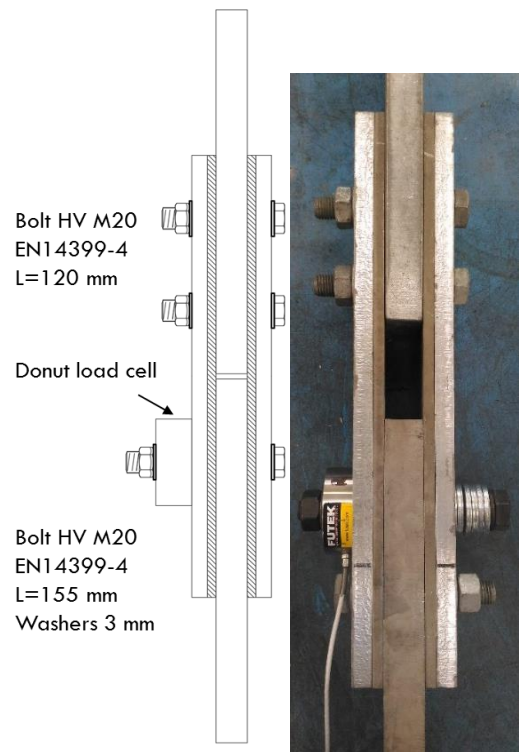
Προκειμένου να χαρακτηριστεί η απόκριση των προεντεταμένων κοχλίων που τοποθετούνται σε συσκευές τριβής, κατά τη διάρκεια του έργου FREEDAM πραγματοποιήθηκαν πειραματικές δοκιμές στο Πανεπιστήμιο του Σαλέρνο και στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης (Σχήμα 2.73, Σχήμα 2.74). Για τον χαρακτηρισμό της απώλειας προέντασης, αξιολογώντας τις μεθοδολογίες για τον περιορισμό της, εξετάστηκαν τέσσερις τύποι συνθέσεων κοχλίων εξοπλισμένων με διαφορετικές διατάξεις δακτυλίων και δισκοειδών ελατηρίων. Επιπλέον, για την εκτίμηση τόσο της βραχυπρόθεσμης, της μεσοπρόθεσμης όσο και της μακροπρόθεσμης απώλειας, για κάθε διάταξη δακτυλίων, εκτελέστηκαν δοκιμές που έχουν παρατάθηκαν για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Προκειμένου να εκτιμηθεί η βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη χαλάρωση, πραγματοποιήθηκαν 20 βραχυπρόθεσμες δοκιμές (παρατεταμένες έως 18 ώρες) και τέσσερις ενδιάμεσες δοκιμές (30 ημέρες). Επιπρόσθετα, για τις τέσσερις διαφορετικές διατάξεις δακτυλίων, πραγματοποιήθηκαν πέντε δοκιμές μακροχρόνιας χαλάρωσης παρακολουθώντας την εξέλιξη των δυνάμεων κοχλία για 5 μήνες.



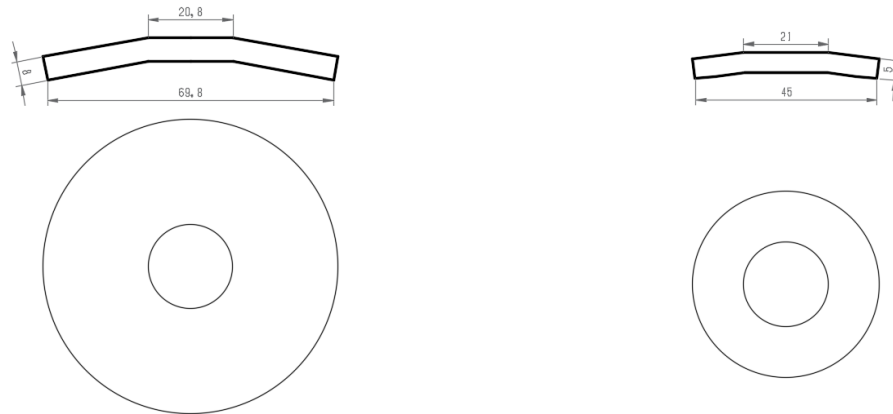
Σχήμα 2.72 – Εξέλιξη της προέντασης στο χρόνο



Σχήμα 2.73 – Διαμόρφωση μακροπρόθεσμης δοκιμής



Σχήμα 2.74 – Διαμόρφωση μεσοπρόθεσμης και βραχυπρόθεσμης δοκιμής

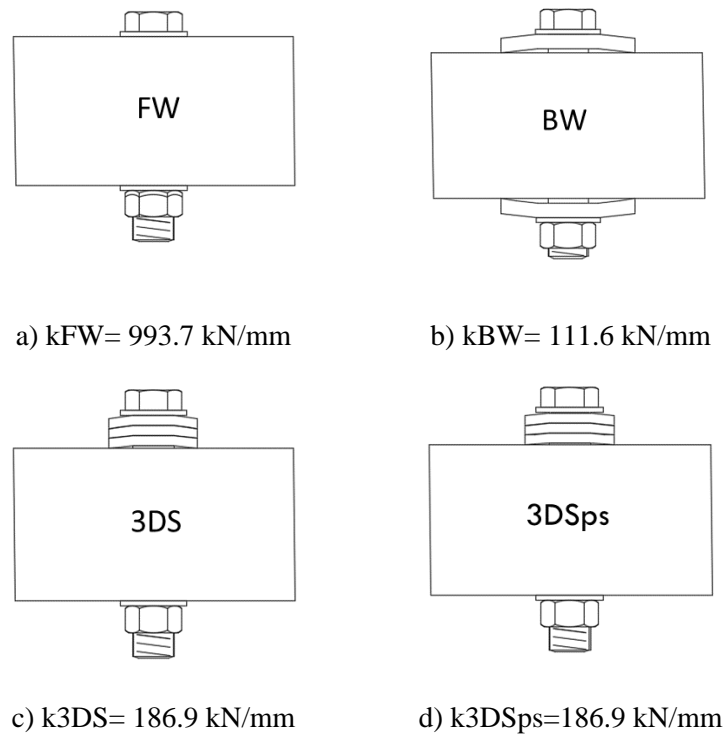


Σχήμα 2.75 : Προσαρμοσμένος δακτύλιος (BW) Σχήμα 2.76 : Δισκοειδή ελατήρια DIN 6796 M20

Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε συμμετρικές συνδέσεις τριβής (SFC) αποτελούμενες από σφήνες (8 mm) επιστρωμένες με υλικό τριβής (υλικό M4), δύο γαλβανισμένα εν θερμώ εξωτερικά ελάσματα (15 mm) από χάλυβα S275JR και μια εσωτερική πλάκα με οπές από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304, που στερεώθηκαν με κοχλίες M20 10.9 HV. Ο προκαθορισμένος στόχος προέντασης κοχλιών της συσκευής ήταν ίσος με 120 kN, καθώς προηγούμενες δοκιμές σε SFC έδειξαν θετικά αποτελέσματα, με μείωση και περιορισμό της τάσης κοχλία σε εύρος λειτουργίας περίπου 30-70% της προέντασης στην τάση του ορίου της ελαστικής συμπεριφοράς. Για όλες τις δοκιμές, οι κοχλίες ήταν εξοπλισμένοι με συσκευές μέτρησης δυνάμεων. Στις βραχυπρόθεσμες και μεσοπρόθεσμες δοκιμές, η εξέλιξη της προέντασης των κοχλιών ανιχνεύθηκε χρησιμοποιώντας ένα δακτυλοειδή δυναμόμετρο (FUTEK LYH500 μέγιστης ικανότητας 222.4 kN). Για τις μακροπρόθεσμες δοκιμές, χρησιμοποιήθηκαν επιμηκυνσιόμετρα ενσωματωμένοι στον κορμό των κοχλιών.

Σε ορισμένες από τις δοκιμές, προκειμένου να μειωθεί η απώλεια προέντασης, έχουν χρησιμοποιηθεί δακτύλιοι Belleville με σχήμα κωνικού δίσκου (Σχήμα 2.75, Σχήμα 2.76). Για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητάς τους στην μείωση της απώλειας προέντασης, εξετάστηκαν δύο διαφορετικοί τύποι κωνικών δισκοειδών ελατηρίων: τα τυποποιημένα ευρωπαϊκά δισκοειδή ελατήρια για κοχλίες M20 (DS DIN 6796 [54]) και ένας προσαρμοσμένος τύπος δακτυλίου Belleville (Μεγάλος Δακτύλιος - Big Washer, BW). Τα προσαρμοσμένα/ειδικά δισκοειδή ελατήρια προρρυθμίζονται στο εργοστάσιο. Αυτό σημαίνει ότι επιπεδοποιούνται πλήρως στο εργοστάσιο, ώστε να εξασφαλιστεί μία ιδανική ελαστική συμπεριφορά δύναμης-μετατόπισης. Αντίθετα, ο ευρωπαϊκός τύπος του τυποποιημένου δισκοειδή ελατηρίου συνήθως κατασκευάζεται χωρίς προρρύθμιση. Επομένως, δοκιμάστηκε εναλλακτικά σε κατάσταση «ως παραδόθηκε», προρρυθμίζοντάς τα στο εργαστήριο με καθολική συσκευή ελέγχου.

Τα προσαρμοσμένα ελατήρια φέρουν δύναμη ίση με περίπου 120 kN. Αντίθετα, τα ευρωπαϊκά δισκοειδή ελατήρια κατά το DIN6796 φέρουν φορτίο επιπεδοποίησης περίπου 70 kN. Όπως προαναφέρθηκε, στην παρούσα μελέτη δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικές διατάξεις δακτυλίων, που περιγράφονται στο Σχήμα 2.77: i) μία διάταξη με επίπεδο δακτύλιο (flat washer – FT) κατά το EN14399-6 [55], ii) μία διάταξη με ένα ζεύγος προρρυθμισμένων προσαρμοσμένων δακτυλίων Belleville (Big Washers – BW) τοποθετημένα κάτω από την κεφαλή του κοχλία και κάτω από το περικόχλιο, iii) μία παράλληλη διάταξη 3 δισκοειδών ελατηρίων (3 disk springs – 3DS) κατά DIN6796, iv) μία παράλληλη διάταξη 3 δισκοειδών ελατηρίων κατά DIN6796 προρρυθμισμένα στο εργοστάσιο (3 disk springs pre-set – 3DSps).



Σχήμα 2.77 : Διατάξεις δακτυλίων που εξετάστηκαν

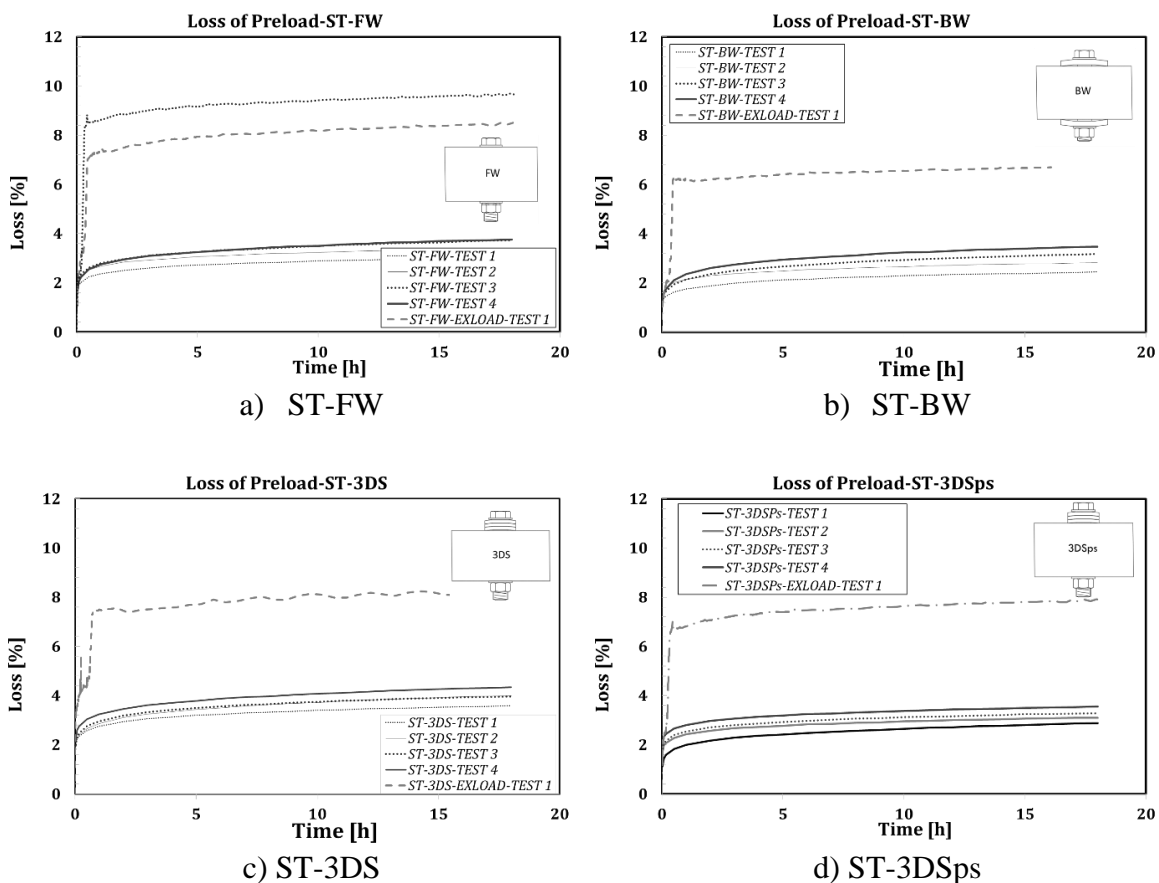
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τρεις πειραματικές δοκιμές για τη διερεύνηση των βραχυπρόθεσμων, μεσοπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων δοκιμών. Οι δοκιμές που εκτελέστηκαν ονομάστηκαν με συμβολοσειρές αρκτικόλεξων «ST-FW-TEST #», όπου το πρώτο ζεύγος γραμμάτων δείχνει το τύπο της δοκιμής: ST=βραχυπρόθεσμη (Short-Term), MT= μεσοπρόθεσμη (Mid-term), και LT= μακροπρόθεσμη (Long-term), το δεύτερο ζεύγος γραμμάτων υποδεικνύει τη διάταξη κοχλιών: FW= επίπεδος δακτύλιος (Flat Washer), BW= προσαρμοσμένος δακτύλιος Belleville (Big Washer), 3DS= 3 δισκοειδή ελατήρια (3 Disk Springs) και 3DSps= 3 προρρυθμισμένα δισκοειδή ελατήρια (3 Disk Springs Pre-Set), και ο τελευταίος αριθμός δείχνει τον αριθμό δοκιμής (1, 2, 3...). Η ίδια συμβολοσειρά χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή με εφαρμοζόμενο εξωτερικό φορτίο, προσθέτοντας τη συμβολοσειρά EXLOAD (EXternal LOAD) μετά τη διάταξη κοχλιών. Για παράδειγμα, η επισήμανση «ST-BW-EXLOAD-TEST1» υποδεικνύει την βραχυπρόθεσμη (ST) Δοκιμή 1 (TEST1) στη διάταξη με δακτύλιο Belleville (BW) με εφαρμοζόμενο εξωτερικό φορτίο (EXLOAD). Το εξωτερικό φορτίο που εφαρμόστηκε στην παράθεση κόμβων διάτμησης καθορίστηκε σύμφωνα με το EN1090-2 για εκτεταμένες δοκιμές ερπυσμού ίσο με 120 kN.

2.6.2 Βραχυπρόθεσμη απώλεια προέντασης

Προκειμένου να εκτιμηθεί η βραχυπρόθεσμη χαλάρωση στην προτεινόμενη κοχλιωτή σύνδεση, πραγματοποιήθηκαν 20 δοκιμές (παρατεταμένες έως 18 ώρες) στη δεύτερη διαμόρφωση (Σχήμα 2.74). Για κάθε διάταξη, έχουν πραγματοποιηθεί πέντε δοκιμές. Οι εξεταζόμενες διατάξεις των δακτυλίων είναι οι εξής: a) οι τυποποιημένοι κατά EN14399-6 δακτύλιοι χωρίς δισκοειδή ελατήρια (FW), b) τα προσαρμοσμένα δισκοειδή ελατήρια (BS), c) οι δακτύλιοι κατά DIN 6796 χωρίς προρρύθμιση (3DS), d) οι δακτύλιοι κατά DIN 6796 με προρρύθμιση (3DSps). Τέσσερις από τις πέντε δοκιμές εκτελέστηκαν χωρίς εξωτερικά φορτία στη σύνδεση (ST-##-TEST#), ενώ η πέμπτη δοκιμή εκτελέστηκε εφαρμόζοντας εξωτερικό φορτίο ίσο με 120 kN (ST-##-EXLOAD-TEST#) στον απλό αποσβεστήρα

τριβής, ώστε να υπολογιστεί ξεχωριστά η επίδραση του εξωτερικού εφελκυστικού φορτίου στην απώλεια προέντασης. Τα αποτελέσματα των δοκιμών συνοψίζονται στο Σχήμα 2.78.

Κατά την εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου στο αποσβεστήρα (ST-##-EXLOAD-TEST#), εμφανίζεται μια στιγμιαία απώλεια προέντασης, η οποία οφείλεται στην υποχώρηση της επικάλυψης μεταξύ της κεφαλής του κοχλία και του περικοχλίου, καθώς και της επικάλυψης του σπειρώματος του κοχλία. Κυρίως, το εφαρμοζόμενο εξωτερικό φορτίο οδηγεί σε απώλεια που συγκεντρώνεται στο τέλος της διαδικασίας φόρτισης. Όλες οι δοκιμές, στην πραγματικότητα, δείχνουν μία μετατόπιση των καμπυλών απώλειας-χρόνου ανάλογη με το εφαρμοζόμενο φορτίο. Στους Πίνακες 2.1-2.4, φαίνεται η απώλεια προέντασης των κοχλιωτών συνθέσεων σε όρους στατιστικών παραμέτρων (μέση τιμή, ποσοστιαία 5% και 95%) για χρονικό βήμα 1h, 6h, 12h και 18h. Η απώλεια υπολογίζεται ως ποσοστό της αρχικής μέγιστης τιμής (120kN). Επιπλέον, η αναμενόμενη απώλεια σε 50 χρόνια υπολογίζεται σε κάθε χρονικό βήμα με μια λογαριθμική παρεκβολή των δεδομένων μέχρι το συγκεκριμένο χρονικό βήμα, σύμφωνα με τη διαδικασία που δίνεται στο EN 1090-2. Οι δύο τελευταίες στήλες κάθε πίνακα δείχνουν την απώλεια προέντασης και την εκτίμηση απώλειας σε 50 έτη για τη δοκιμή με εφαρμοζόμενο εφελκυστικό φορτίο. Στην περίπτωση αυτή, λόγω του περιορισμένου δείγματος δοκιμών, η στατιστική αξιολόγηση δεν ήταν δυνατή.



Σχήμα 2.78 : Αποτελέσματα βραχυπρόθεσμων δοκιμών

Πίνακας 2.1: Βραχυπρόθεσμη χαλάρωση σε διάταξη FW

ST-BW TEST 1-4									ST-BW-EXLOAD-TEST 1	
Χρόνος	μ [%]	σ [%]	CV	Ποσοτι- μόριο 5% [kN]	Ποσοτι- μόριο 95% [kN]	Απώλεια σε 50 έτη			Απώλεια [%]	Απώλεια σε 50 έτη [%]
						Ποσοτι- μόριο 5%	μ [%]	Ποσοτι- μόριο 95%		
1h	2.65%	0.17%	6.39%	2.29%	3.01%	5.24%	6.93%	6.90%	8.15%	12.80%
6h	3.12%	0.15%	4.71%	2.81%	3.44%	5.46%	6.57%	6.68%	8.71%	13.16%
12h	3.34%	0.26%	7.91%	2.78%	3.91%	5.05%	6.45%	7.10%	8.97%	13.13%
18h	3.49%	0.29%	8.40%	2.86%	4.11%	4.98%	6.42%	7.16%	9.16%	13.23%

Πίνακας 2.2: Βραχυπρόθεσμη χαλάρωση σε διάταξη BW

ST-BW TEST 1-4									ST-BW-EXLOAD-TEST 1	
Χρόνος	μ [%]	σ [%]	CV	Ποσοτι- μόριο 5% [kN]	Ποσοτι- μόριο 95% [kN]	Απώλεια σε 50 έτη			Απώλεια [%]	Απώλεια σε 50 έτη [%]
						Ποσοτι- μόριο 5%	μ [%]	Ποσοτι- μόριο 95%		
1h	2.10%	0.22%	10.35%	1.64%	2.56%	4.28%	5.49%	6.70%	6.17%	6.31%
6h	2.61%	0.31%	12.06%	1.94%	3.28%	4.08%	5.49%	6.90%	6.48%	7.07%
12h	2.84%	0.36%	12.55%	2.08%	3.60%	4.02%	5.49%	6.96%	6.60%	9.91%
18h	2.98%	0.39%	12.96%	2.16%	3.80%	3.97%	5.49%	7.00%	6.76%	9.22%

Πίνακας 2.3: Βραχυπρόθεσμη χαλάρωση σε διάταξη 3DS

ST-BW TEST 1-4									ST-BW-EXLOAD-TEST 1	
Χρόνος	μ [%]	σ [%]	CV	Ποσοτι- μόριο 5% [kN]	Ποσοτι- μόριο 95% [kN]	Απώλεια σε 50 έτη			Απώλεια [%]	Απώλεια σε 50 έτη [%]
						Ποσοτι- μόριο 5%	μ [%]	Ποσοτι- μόριο 95%		
1h	2.96%	0.18%	6.08%	2.57%	3.34%	6.05%	6.95%	7.85%	7.55%	15.23%
6h	3.54%	0.22%	6.30%	3.07%	4.02%	6.01%	6.94%	7.88%	7.95%	13.38%
12h	3.81%	0.24%	6.39%	3.29%	4.33%	6.00%	6.95%	7.89%	8.12%	12.83%
18h	3.97%	0.27%	6.69%	3.40%	4.54%	5.96%	6.95%	7.94%	8.29%	12.59%

Πίνακας 2.4: Βραχυπρόθεσμη χαλάρωση σε διάταξη 3DSps

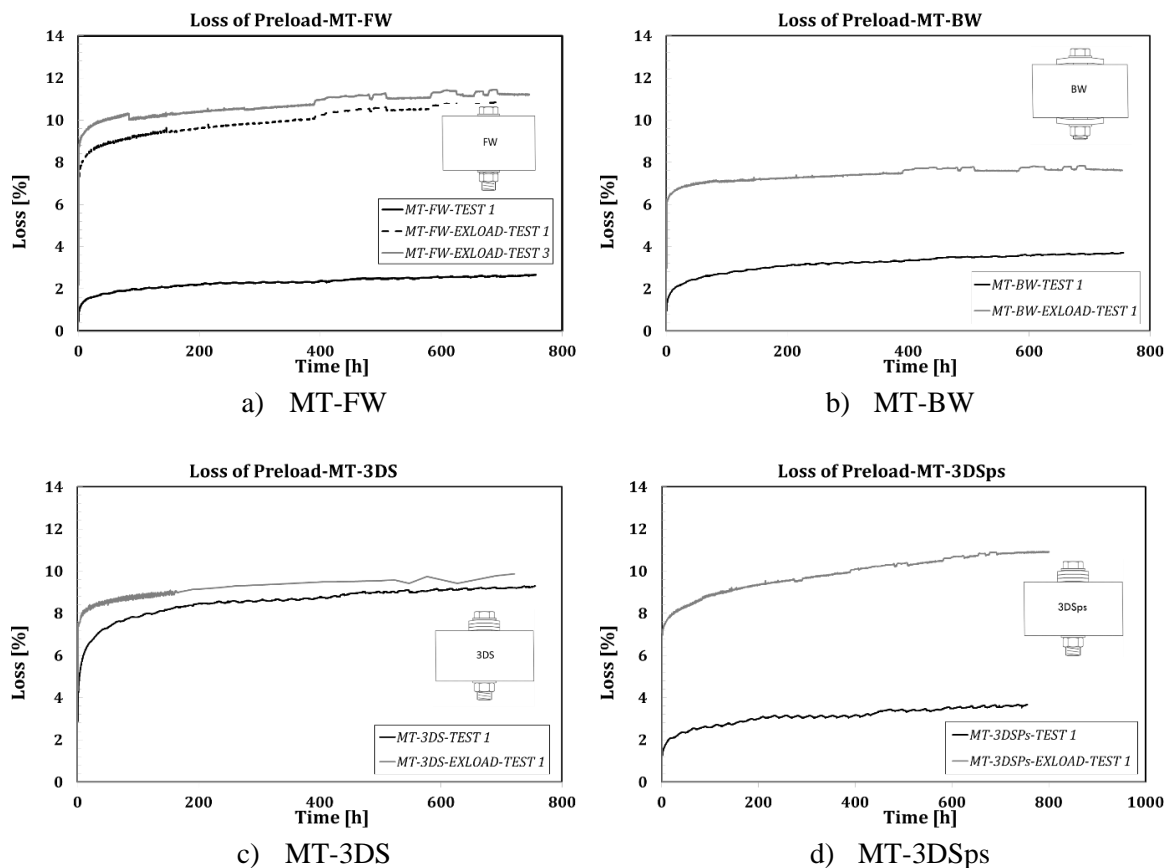
ST-BW TEST 1-4									ST-BW-EXLOAD-TEST 1	
Χρόνος	μ [%]	σ [%]	CV	Ποσοτι- μόριο 5% [kN]	Ποσοτι- μόριο 95% [kN]	Απώλεια σε 50 έτη			Απώλεια [%]	Απώλεια σε 50 έτη [%]
						Ποσοτι- μόριο 5%	μ [%]	Ποσοτι- μόριο 95%		
1h	2.44%	0.29%	11.98%	1.82%	3.07%	4.13%	5.55%	6.97%	6.87%	12.28%
6h	2.88%	0.28%	9.56%	2.30%	3.47%	2.22%	5.52%	6.65%	7.47%	11.16%
12h	3.07%	0.26%	8.49%	2.52%	3.63%	4.51%	5.51%	6.51%	7.72%	11.18%
18h	3.20%	0.25%	7.76%	2.67%	3.73%	4.59%	5.50%	6.41%	7.85%	11.21%

Η βραχυπρόθεσμη απώλεια φαίνεται να έχει παρόμοιο μέγεθος για κάθε μελετώμενη διάταξη όταν δεν εφαρμόζονται εξωτερικά φορτία (3.4% κατά μέσο όρο). Όταν λαμβάνεται υπόψη το εξωτερικό φορτίο, οι διατάξεις FW, 3DS και 3DSps εμφανίζουν συγκρίσιμο επίπεδο απώλειας (9.16%, 8.29% και 7.85% αντίστοιχα), ενώ η διαμόρφωση BW εμφανίζει μια ελαφρώς μικρότερη απώλεια 6.76%.

2.6.3 Μεσοπρόθεσμη απώλεια προέντασης

Ακολουθώντας την ίδια προσέγγιση που εφαρμόστηκε για τις βραχυπρόθεσμες δοκιμές και την ίδια διάταξη, πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές μεσοπρόθεσμης χαλάρωσης, παρακολουθώντας την εξέλιξη της δύναμης του κοχλία, έως και 30 ημέρες (720 ώρες). Ο βασικός σκοπός των μεσοπρόθεσμων δοκιμών είναι ο εντοπισμός της απώλεια που εμφανίζεται τις πρώτες ώρες/ημέρες μετά τη σύσφιξη. Ωστόσο, οι δοκιμές παρατάθηκαν πολύ περισσότερο ώστε να αποκτηθεί μια ιδέα για το χρόνο σταθεροποίησης της απώλειας. Τα αποτελέσματα που δίνονται στο Σχήμα 2.79 συγκρίνονται πάντα με την περίπτωση στην οποία εφαρμόζεται εξωτερικό εφελκυστικό φορτίο στο δοκίμιο (MT-##-EXLOAD-TEST#).

Στον Πίνακα 2.5 δίνονται τα αποτελέσματα για τις δοκιμές με και χωρίς εξωτερικά φορτία. Για την διάταξη με FW, με εφαρμογή εξωτερικής φόρτισης, διατίθενται δύο δοκιμές. Επομένως οι τιμές αναφέρονται στο μέσο όρο, χρησιμοποιώντας μία μελέτη παλινδρόμησης που δίνει τις αναμενόμενες απώλειες σε χρονικό ορίζοντα 50 ετών, βασιζόμενη στις δοκιμές χαλάρωσης των 30 ημερών. Ο Πίνακας αναφέρεται και στις δύο δοκιμές, τόσο στη δοκιμή με εξωτερική φόρτιση (MT-##-EXLOAD-TEST#) όσο και στη δοκιμή χωρίς (MT-##-TEST#).



Σχήμα 2.79 : Αποτελέσματα μεσοπρόθεσμων δοκιμών.

Πίνακας 2.5: Περίληψη μεσοπρόθεσμων αποτελεσμάτων

Χρόνος	MT-FW		MT-FW-EXLOAD		MT-BW		MT-BW-EXLOAD	
	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]
1h	0.89	0.9	8.62	12.54	1.22	4.18	6.17	6.31
6h	1.31	2.77	9.27	12.82	1.76	4.75	6.48	7.07
12h	1.48	3.17	9.49	12.85	1.99	5.00	6.60	9.19
18h	1.56	3.43	9.64	12.93	2.13	5.13	6.76	9.22
24h	1.6	4.18	9.77	13.00	2.2	5.13	6.81	7.75
7d	2.15	4.01	10.31	12.93	2.45	5.78	7.21	8.61
15d	2.32	4.19	10.70	12.97	3.29	6.06	7.47	9.11
30d	2.59	4.35	11.22	13.61	3.67	6.33	7.65	9.08

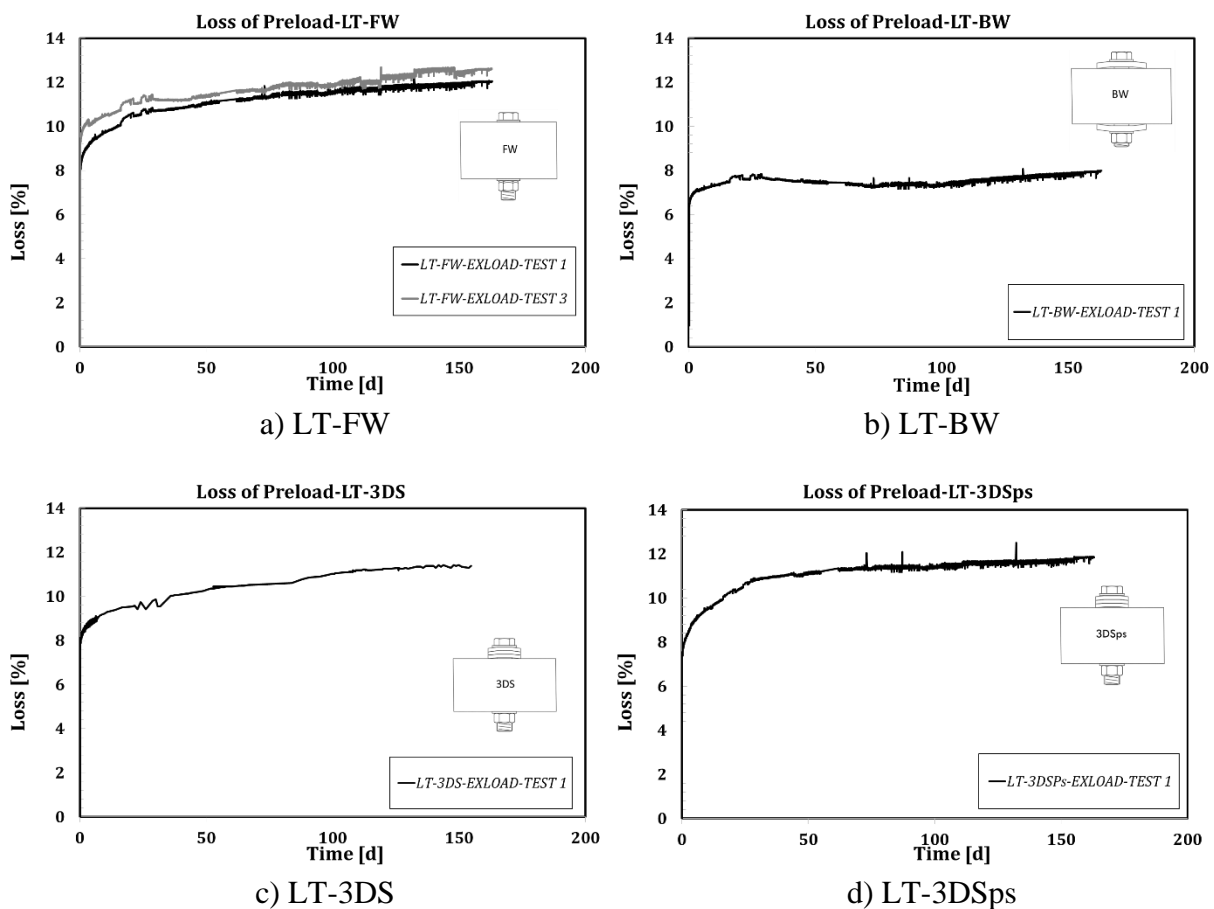
Χρόνος	MT-3DS		MT-3DS-EXLOAD		MT-3DSPs		MT-3DSPs-EXLOAD	
	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]	Απώ- λεια [%]	Απώ- λεια 50ετίας [%]
1h	3.8	13.99	7.55	16.23	1.17	4.12	6.82	12.28
6h	5.54	15.81	7.95	13.38	1.69	4.68	7.48	11.17
12h	6.17	15.94	8.12	12.84	1.92	4.94	7.73	11.17
18h	6.72	15.94	8.29	12.59	2.08	5.18	7.85	11.22
24h	6.72	15.82	8.41	12.19	2.10	5.18	8.00	11.48
7d	8.27	14.84	9.00	11.73	2.44	5.49	9.22	12.44
15d	8.65	14.28	9.35	11.78	3.10	5.87	9.90	15.92
30d	9.21	13.92	9.87	11.88	3.60	6.12	10.84	15.97

Συνολικά δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά σε απώλεια για τις διατάξεις FW, BW και 3DSPs όταν δεν εφαρμόζεται εξωτερικό φορτίο. Αντιθέτως, για την διάταξη 3DS εμφανίζεται υψηλότερη απώλεια (9.21%), η οποία είναι σχετικά κοντά στην απώλεια της ίδιας διάταξης με εφαρμογή εξωτερικού φορτίου (9.87%). Ωστόσο, λόγω του περιορισμένου πλήθους δοκιμών, είναι δύσκολο να γενικευτεί η μεσοπρόθεσμη απόκριση των διαφόρων διατάξεων.

2.6.4 Μακροπρόθεσμη απώλεια προέντασης

Οι μακροπρόθεσμες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν παρακολουθώντας την απώλεια προέντασης σε χρονικό διάστημα πέντε μηνών. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το πρωτόκολλο για παρατεταμένες δοκιμές ερπυσμού, σύμφωνα με το EN 1090-2. Ο στόχος της κωδικοποιημένης προσέγγισης είναι να καθορίσει την κλίση της καμπύλης μετατόπισης-λογαριθμικού χρόνου, καθορίζοντας, με παρεκβολή, την απώλεια που συμβαίνει στον ζητούμενο χρόνο. Στις δοκιμές που παρουσιάζονται στην προκειμένη εργασία, η σταθεροποίηση πραγματοποιήθηκε μετά από περίπου 2-3 μήνες. Αυτό το αποτέλεσμα είναι συνεπές με τα ευρήματα άλλων συγγραφέων, οι οποίοι, με παρόμοια στοιχεία, διαπίστωσαν ότι η σταθεροποίηση συνήθως συμβαίνει πριν από τους 4 μήνες [49]. Οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν σε δωμάτιο ελεγχόμενης θερμοκρασίας με σταθερή θερμοκρασία 20 °C για όλη τη διάρκεια των δοκιμών. Στόχος ήταν να μετρηθεί η μεταβολή της καταπόνησης των κοχλιών, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί το ποσό της απώλειας σε

μια μακροπρόθεσμη χρονική περίοδο, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του λειτουργικού φορτίου όπως ορίζεται σύμφωνα με το EN 1090-2. Οι μετρήσεις τάνσης καταγραφόταν συνεχώς για πέντε μήνες πριν και μετά την εφαρμογή εφελκυστικού φορτίου. Για την παρακολούθηση των μετατοπίσεων της πλάκας λόγω ερπυσμού, τοποθετήθηκαν στα δοκίμια έξι δείκτες (Digimatic indicator ID-C112X/1012X) με ακρίβεια 0.0025 mm. Οι συσκευές μετράνε τις σχετικές μετατοπίσεις μεταξύ της εσωτερικής πλάκας και των πλακών τριβής, οι οποίες είναι κατά πολύ κάτω από το όριο που δίνεται στο EN1090-2. Χρησιμοποιήθηκαν έξι συσκευές για τον έλεγχο τόσο των σχετικών όσο και των συνολικών μετατοπίσεων. Αμέσως μετά τη σύσφιξη των κοχλιών, τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη μηχανή και εφαρμόστηκε το εφελκυστικό αξονικό φορτίο. Οι απώλειες προέντασης κατά τη διάρκεια πέντε μηνών, εκφραζόμενες ως ποσοστό της αρχικής προέντασης κοχλιών, φαίνονται στο Σχήμα 2.80.



Σχήμα 2.80 : Αποτελέσματα μακροπρόθεσμων δοκιμών

Συνολικά, δεν υπάρχει αξιοσημείωτη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των διατάξεων FW, 3DS και 3DSps, επιβεβαιώνοντας τα αποτελέσματα των βραχυπρόθεσμων και μεσοπρόθεσμων δοκιμών. Η υψηλότερη απώλεια κοχλία εντοπίζεται στη διάταξη με επίπεδους δακτυλίους (FW), με απώλεια προέντασης 11.9%-12.3%. Αυτό ήταν αναμενόμενο, καθώς δεν υπάρχει δυνατότητα για το τυπικό δακτύλιο να αντισταθμίσει την απώλεια του κοχλία. Η διάταξη 3DS παρουσιάζει απώλεια 11.3%, παρόμοια με αυτή της διάταξης FW. Σε αυτή τη περίπτωση, η έλλειψη προρρυθμίσεων των δισκοειδών ελατηρίων τα καθιστά λιγότερο κατάλληλα για την τρέχουσα εφαρμογή. Ωστόσο, και η διάταξη 3DSps δείχνει παρόμοια αποτελέσματα (11.6% σε 5 μήνες), με παρόμοια καταγεγραμμένη

απώλεια. Το αποτέλεσμα του 3DSps (Belleville DIN6796) δείχνει ότι, για αυτήν την περίπτωση, η απώλεια προέντασης δεν επηρεάζεται από τη διαδικασία προρρυθμισμού. Μια χαμηλότερη μείωση της απώλειας προέντασης παρατηρείται με τη διάταξη BW, παρουσιάζοντας μικρότερη απώλεια προέντασης σε 5 μήνες (7.4%). Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τη βραχυπρόθεσμη και μεσοπρόθεσμη απώλεια που παρουσιάζεται στις προηγούμενες παραγράφους. Ωστόσο, η εξέλιξη της απώλειας είναι ελαφρώς διαφορετική από τις άλλες περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα, η κλίση της απώλειας δεν είναι πάντα θετική, κάτι το οποίο μπορεί να οφείλεται στο φαινόμενο της χαλάρωσης, που οδηγεί σε αργή αποφόρτιση του δακτυλίου, αντισταθμίζοντας την απώλεια έντασης στον κοχλία. Αυτό μπορεί να απαιτήσει την μείωση της προέντασης του κοχλία έως ότου επιτραπεί η ολίσθηση της άκρης των δακτυλίων Belleville (BW) πάνω από την κάτω πλάκα. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με την επίδραση αυτού του είδους δακτυλίου στην προένταση μπορούν να βρεθούν στο [56]. Επισημαίνεται ότι οι πειραματικές δοκιμές που παρουσιάζονται, αν και είναι περιορισμένου αριθμού, επιβεβαιώνουν και επεκτείνουν τα αποτελέσματα προηγούμενων δοκιμών με παρόμοια στοιχεία [57]-[58]. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις, η απώλεια της αρχικής προέντασης κοχλία δεν ξεπέρασε ποτέ το 16% της προέντασης εγκατάστασης. Από την άποψη του σχεδιασμού, αυτές οι πληροφορίες είναι πολύ σημαντικές, διότι υπογραμμίζουν την ανάγκη χρησιμοποίησης ενός συντελεστή μερικής ασφαλείας που σχετίζεται με την απώλεια προέντασης κοχλία, ο οποίος, βάσει των πραγματοποιούμενων αναλύσεων, θα μπορούσε να καθοριστεί συντηρητικά ίσως με το 1.16. Από πρακτική άποψη, αυτό σημαίνει ότι για να βεβαιωθούμε ότι οι συσκευές δεν ολισθαίνουν κατά την αναμενόμενη διάρκεια ζωής της κατασκευής, οι κοχλίες θα πρέπει αρχικά να προεντεταθούν με υψηλότερες ροπές σύσφιξης κατά 16%.

2.7 Σχεδιασμός και προηγμένη προσομοίωση των αποσβεστήρων τριβής

2.7.1 Τιμές σχεδιασμού του συντελεστή τριβής και του μοντέλου παλινδρόμησης

Προκειμένου να παραχθεί ένα γρήγορο εργαλείο για το σχεδιασμό ή τη προσομοίωση των συσκευών με τα τρία υλικά επίστρωσης (M1, M4 και M6) που έχουν μελετηθεί σε βάθος κατά τη διάρκεια του ερευνητικού έργου FREEDAM, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση παλινδρόμησης των αποτελεσμάτων (μέση τιμή και άνω/κάτω όρια ποσοστιμορίων) της δοκιμής χαμηλής ταχύτητας. Για λόγους απλότητας, λαμβάνονται τα δεδομένα δοκιμής χαμηλής ταχύτητας καθώς, όπως φαίνεται παραπάνω, παρέχουν την πιο συντηρητική απόκριση ως προς την κυκλική υποβάθμιση. Τα αποτελέσματα της μελέτης παλινδρόμησης συνοψίζονται στον Πίνακα 2.6. Ο συντελεστής τριβής εκφράζεται ως συνάρτηση της αθροιστικής μετακίνησης μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$\begin{aligned} \mu_{eff} &= A_0 \delta_t^2 + B_0 \delta_t + C_0 & , \text{εάν } \delta_t < k \\ \mu_{eff} &= A_1 \delta_t^2 + B_1 \delta_t + C_1 & , \text{εάν } k < \delta_t < 400 \text{ mm} \\ \mu_{eff} &= A_2 \delta_t^2 + B_2 \delta_t + C_2 & , \text{εάν } 400 < \delta_t < 1500 \text{ mm} \\ \mu_{eff} &= A_3 \delta_t^2 + B_3 \delta_t + C_3 & , \text{εάν } 1500 < \delta_t < 4000 \text{ mm} \end{aligned}$$

Πίνακας 2.6: Αποτελέσματα μελέτης παλινδρόμησης

	<u>Υλικό M1</u>			<u>Υλικό M4</u>		
	Ποσοστμόριο 5%	Μέσος όρος	Ποσοστμόριο 95%	Ποσοστμόριο 5%	Μέσος όρος	Ποσοστμόριο 95%
A_0	0	0	0	$6.35 \cdot 10^{-5}$	$7.34 \cdot 10^{-5}$	$7.934 \cdot 10^{-5}$
B_0	$-7.2 \cdot 10^{-3}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	$7.9 \cdot 10^{-3}$	$-6.35 \cdot 10^{-3}$	$-7.34 \cdot 10^{-3}$	$-7.934 \cdot 10^{-3}$
C_0	0.61	0.69	0.79	0.69	0.76	0.84
A_1	0	0	0	0	0	0
B_1	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	0	0	0	0
C_1	0.43	0.50	0.59	0.53	0.58	0.64
A_2	0	0	0	0	0	0
B_2	$-1.1 \cdot 10^{-4}$	$-1.6 \cdot 10^{-4}$	$-1.1 \cdot 10^{-4}$	$-1.233 \cdot 10^{-4}$	$-9.096 \cdot 10^{-5}$	$-7.37 \cdot 10^{-5}$
C_2	0.55	0.64	0.63	0.579	0.616	0.669
A_3	0	0	0	0	0	0
B_3	$-4 \cdot 10^{-5}$	$-3 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	$-5.32 \cdot 10^{-5}$	$-4.41 \cdot 10^{-5}$	$-3.09 \cdot 10^{-5}$
C_3	0.45	0.44	0.54	0.474	0.545	0.604
k		25			50	

	<u>Υλικό M6</u>		
	Ποσοστμόριο 5%	Μέσος όρος	Ποσοστμόριο 95%
A_0	$1.2 \cdot 10^{-4}$	$9.83 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-5}$
B_0	$-6.7 \cdot 10^{-3}$	$-6.84 \cdot 10^{-3}$	$-7.1 \cdot 10^{-3}$
C_0	0.52	0.60	0.68
A_1	0	0	0
B_1	$-4.3 \cdot 10^{-5}$	$-2.11 \cdot 10^{-5}$	$-8.69 \cdot 10^{-7}$
C_1	0.487	0.504	0.521
A_2	0	0	0
B_2	$-3.63 \cdot 10^{-5}$	$-3.01 \cdot 10^{-5}$	$-2.39 \cdot 10^{-5}$
C_2	0.484	0.508	0.532
A_3	0	0	0
B_3	0	0	0
C_3	0.43	0.463	0.496
k		50	

Επιπλέον, έχοντας ως αναφορά τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενοτήτων, προέκυψαν οι κύριες παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό των συνδέσεων απορρόφησης ενέργειας με τα τρία υλικά που περιγράφονται στη παρούσα. Όπως προαναφέρθηκε, ο σχεδιασμός μιας συσκευής τριβής απαιτεί τουλάχιστον τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή τριβής. Η τιμή που πρέπει να χρησιμοποιείται για ελέγχους οριακής κατάστασης λειτουργικότητας, η τιμή για το σχεδιασμό της αντοχής των αποσβεστήρων και η άνω οριακή τιμή του συντελεστή τριβής για το σχεδιασμό των τμημάτων της κατασκευής που δεν έχουν δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας (στη περίπτωση κατασκευής με χαμηλό όριο διαρροής είναι οι συνδέσεις, οι δοκοί και τα υποστυλώματα). Συγκεκριμένα, όσον αφορά τους ελέγχους σε ΟΚΛ, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι οι συνδέσεις τριβής δεν ολισθαίνουν σε συνθήκες στατικής φόρτισης ή σε σεισμικά γεγονότα μέτριας έντασης. Σε όλους αυτούς τους συνδυασμούς φορτίων, πρέπει να χρησιμοποιείται η χαρακτηριστική τιμή του συντελεστή στατικής τριβής. Όσον αφορά τους αποσβεστήρες, προκειμένου να διασφαλιστεί η σωστή απορρόφηση ενέργειας στην ΟΚΛ, πρέπει να ληφθεί υπόψη η χαμηλότερη αναμενόμενη τιμή του συντελεστή δυναμικής τριβής, δηλαδή η χαρακτηριστική τιμή του. Επιπλέον, για το σχεδιασμό σε ΟΚΛ των

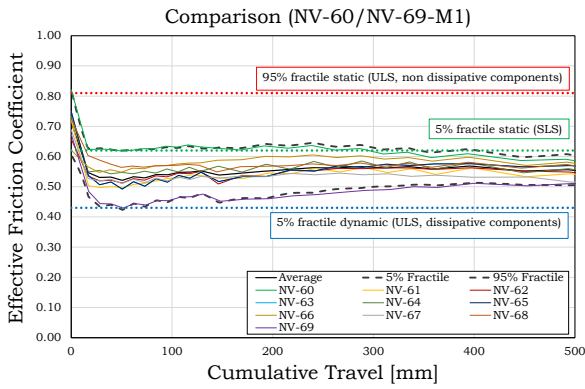
τιμημάτων της κατασκευής χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, που στην περίπτωση αυτή είναι οι δοκοί, τα υποστυλώματα και τα συνδετικά στοιχεία, πρέπει να ληφθεί υπόψη η υψηλότερη αναμενόμενη τιμή του συντελεστή στατικής τριβής, δηλαδή η τιμή του 95% ποσοστμορίου. Από στατιστική άποψη, αυτή είναι η μέγιστη δυνατή τιμή που τιμή στην απαιτούμενη αντοχή των στοιχείων χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας ώστε να αποφευχθεί η ολίσθηση των συσκευών απόσβεσης. Προς αυτή τη κατεύθυνση, για τα τρία υλικά και για κάθε σύνολο 10 αποτελεσμάτων, αξιολογήθηκαν οι ενεργές και πραγματικές τιμές των συντελεστών στατικής τριβής. Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 2.7.

Όπως περιεγράφηκε παραπάνω, αυτές οι τιμές, μαζί με τα ποσοστμορία του 5% των συντελεστών δυναμικής τριβής, που αξιολογήθηκαν με βάση τον πρώτο σταθεροποιημένο κύκλο, αντιπροσωπεύουν τις τιμές που απαιτούνται για το σχεδιασμό των συνδέσεων τριβής.

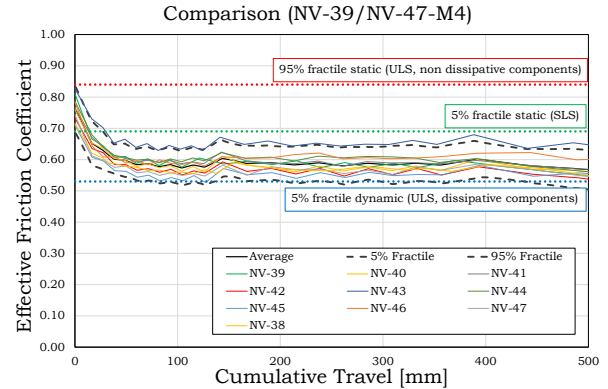
Οι έννοιες αυτών των συντελεστών τριβής παρουσιάζονται στα Σχήματα 2.70-2.72, ενώ για λόγους απλότητας, συνοψίζονται στον Πίνακα 2.8.

Πίνακας 2.7: Στατιστική διακύμανση συντελεστή στατικής τριβής

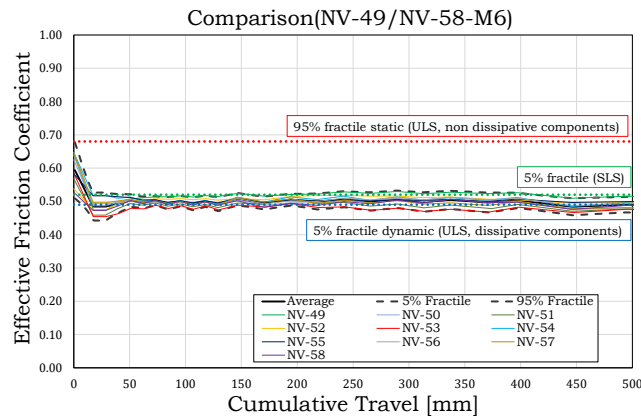
Υλικό M1			Υλικό M4			Υλικό M6		
<i>n</i> ^ο δοκιμής	$\mu_{0,effective}$	$\mu_{0,actual}$	<i>n</i> ^ο δοκιμής	$\mu_{0,effective}$	$\mu_{0,actual}$	<i>n</i> ^ο δοκιμής	$\mu_{0,effective}$	$\mu_{0,actual}$
NV 60	0.82	0.84	NV 38	0.72	0.74	NV 49	0.64	0.65
NV 61	0.72	0.73	NV 39	0.81	0.85	NV 50	0.63	0.63
NV 62	0.66	0.67	NV 40	0.76	0.81	NV 51	0.57	0.57
NV 63	0.75	0.77	NV 41	0.77	0.80	NV 52	0.54	0.55
NV 64	0.73	0.75	NV 42	0.73	0.76	NV 53	0.59	0.59
NV 65	0.75	0.77	NV 43	0.83	0.86	NV 54	0.65	0.65
NV 66	0.62	0.62	NV 44	0.79	0.82	NV 55	0.58	0.59
NV 67	0.69	0.70	NV 45	0.71	0.74	NV 56	0.64	0.65
NV 68	0.72	0.74	NV 46	0.78	0.81	NV 57	0.65	0.65
NV 69	0.67	0.69	NV 47	0.74	0.77	NV 58	0.53	0.53
MEAN	0.71	0.73	MEAN	0.76	0.79	MEAN	0.60	0.61
DEV ST	0.06	0.061	DEV ST	0.04	0.041	DEV ST	0.05	0.047
CV	0.08	0.084	CV	0.05	0.052	CV	0.08	0.077
Ποσ/ριο 5%	0.62	0.61	Ποσ/ριο 5%	0.69	0.72	Ποσ/ριο 5%	0.52	0.52
Ποσ/ριο 95%	0.81	0.85	Ποσ/ριο 95%	0.84	0.87	Ποσ/ριο 95%	0.68	0.70



Σχήμα 2.81 : Διαδικασία σύσφιξης



Σχήμα 2.82 : Τυπικό διάγραμμα ροπής-προέντασης



Σχήμα 2.83 : Διαδικασία σύσφιξης

Πίνακας 2.8: Τιμές σχεδιασμού των συντελεστών τριβής

Υλικό M1		Υλικό M4		Υλικό M6	
Design FC	$\mu_{0,d}$	Design FC	$\mu_{0,d}$	Design FC	$\mu_{0,d}$
Static 5% fractile	0.62	Static 5% fractile	0.69	Static 5% fractile	0.52
Static 95% fractile	0.81	Static 95%	0.84	Static 95% fractile	0.68
Dynamic 5% fractile	0.43	Dynamic 5%	0.53	Dynamic 5% fractile	0.49

2.8 Βιβλιογραφία

- [1] Kelly, J., Skinner, R. & Heine, A., 1972. Mechanisms of Energy Absorption in Special Devices for Use in Earthquake Resistant Structures. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering, 5(3), pp.63-88.
- [2] Skinner, R., Kelly, J. & Heine, A., 1975. Hysteresis Dampers for Earthquake Resistant Structures. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3, pp.287-96.
- [3] Aiken, I., Nims, D., Whittaker, A. & Kelly, J., 1993. Testing of Passive Energy Dissipation Systems. Earthquake Spectra, 9(3).
- [4] Christopoulos, C. & Filiatrault, A., 2006. Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation. Pavia: IUSS PRESS.

- [5] Soong, T. & Spencer Jr, B., 2002. Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice. *Engineering Structures*, 24, pp.243-59.
- [6] Cahis, X., Bozzo, L., Foti, D. & Torres, L., 1997. An Energy Dissipating Device for Seismic Protection of Masonry Walls. In *L'ingegneria Sismica in Italia*. Taormina, Italia, 1997.
- [7] Kobori, T. et al., 1992. Development of Hysteresis Steel Dampers. In *Earthquake Engineering Tenth World Conference.*, 1992.
- [8] Nakashima, M., 1995. Strain-Hardening Behavior of Shear Panels made of Low-yield Steel: Test. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 121(12), pp.1742-49.
- [9] Whittaker, A., Bertero, V., Alonso, J. & Thompson, C., 1989. UCB/EERC-89/02 Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping and Stiffness Elements. Berkeley: College of Engineering University of California.
- [10] Alonso, J., 1989. Mechanical Characteristics of X-Plate Energy Dissipators. Berkeley: University of California.
- [11] Takenaka Komuten KK, 1989. ANTI-SEISMIC DAMPER USING BOLT DRIVE. Patent. Priority JP20211389A·1989-08-03
- [12] Grigorian CE, Yang TS, Popov EP. 1993 “Slotted bolted connection energy dissipators”. *Earthquake Spectra*. Vol.9, No.3, pp.491-504.
- [13] MacRae G.A., Clifton G.C., Mackinven H., Mago N., Butterworth J., Pampanin S. “The sliding hinge joint moment connection.” *Bulletin of New Zealand society for earthquake engineering*, vol.43, n.3, September 2010.
- [14] Khoo, H., Clifton, C. Butterworth, J. MacRae, G. Ferguson, G. 2012. “Influence of steel shim hardness on the sliding hinge joint performance”. *Journal of Constructional Steel Research*, 72, 119-129.
- [15] Pall, A. & Marsh, C., 1981. Response of Friction Damped Braced Frames. *Journal of the Structural Division*, 108(6), pp.1313-23.
- [16] Tremblay, R. & Stiemer, S., 1993. Energy Dissipation through Friction Bolted Connections in Concentrically Braced Steel Frames. *ATC 17-1 Seminar on Seismic Isolation*, 2, pp.557-68.
- [17] Mualla, I. & Belev, B., 2002. Seismic Response of Steel Frames Equiped with a New Friction Damper Device Under Earthquake Excitation. *Engineering Structures*, 24(3), pp.365-71.
- [18] Clifton GC, Butterworth JW, (2000). Moment-resisting steel framed seismic-resisting systems with semi-rigid connections 12th WCEE, Auckland, New Zealand.
- [19] G. C. Clifton, J. Butterworth, and J. Weber, “Moment-resisting steel framed seismic-resisting systems with semi-rigid connections”, *SESOC*, vol. 11, no. 2, pp. 21–52, 1988.
- [20] MacRae G.A., Clifton G.C., Mackinven H., Mago N., Butterworth J., Pampanin S. “The sliding hinge joint moment connection.” *Bulletin of New Zealand society for earthquake engineering*, vol.43, n.3, September 2010.
- [21] S. Ramhormozian, G. Clifton, D. Cvitanich, S. Maetzig, and G. Macrae, “Recent Developments on the Sliding Hinge Joint,” in *The 2016 New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE) Annual Technical Conference*, 2016.
- [22] S. Kishiki, S. Yamada, T. Takeuchi, K. Suzuki, E. Saeki, A. Wada.. 2004. “New ductile steel frames limiting damage to connection elements at bottom flange of beam-ends: part 2 cyclic loading tests of frames with a concrete slab. *Proc. 13th WCEE*.
- [23] M. Latour, V. Piluso, and G. Rizzano, “Free from damage beam-to-column joints: Testing and design of DST connections with friction pads,” *Eng. Struct.*, 2015.
- [24] M. Latour, V. Piluso, and G. Rizzano, “Experimental analysis of innovative dissipative bolted double split tee beam-to-column connections,” *Steel Constr.*, 2011.

- [25] Cahis, X., Bozzo, L., Foti, D. & Torres, L., 1997. An Energy Dissipating Device for Seismic Protection of Masonry Walls. In *L'ingegneria Sismica in Italia*. Taormina, Italia, 1997.
- [26] EUROCODE 0. Basis of structural design. CEN, 2010.
- [27] EN 1090-2. Execution of steel structures and aluminium structures: technical requirements for steel structures. CEN, 2008.
- [28] Bowden, F. & Tabor, D., 1950. *The Friction and Lubrication of Solids: part I*. Oxford: Oxford University Press.
- [29] Halling, J., 1978. *Principles of Tribology*. London: Macmilln Education LTD.
- [30] Persson, B., 2000. *Sliding Friction*. Berlin: Springer.
- [31] Zhang, S., 1998. State-of-the art of Polymer Tribology. *Tribology International*, 31, pp.49-60.
- [32] Schallamach, A., 1958. Friction and Abrasion of Rubber. *Wear*, 1, pp.384-417.
- [33] Shooter, K. & Thomas, R., 1952. Frictional Properties of some Plastics. *Research*, 2, pp.533-39.
- [34] Rees, B., 1957. Static Friction of Bulk Polymers over a Temperature Range. *Research*, 10, pp.331-38.
- [35] Schallamach, A., 1952. The Load Dependence of Rubber Friction. In *Phys Soc.*, 1952
- [36] Thirion, P., 1948. Les Coefficients d'Adherence du Caoutchouc. *Rubber Chemistry and Technology*, 21, pp.505-15.
- [37] Ratner, S. & Sokolskaya, V., 1956. The Influence of the Hardness of Rubber on its Coefficient of Static Friction without Lubrication. *Rubber Chem. Technol.*, 29, pp.829-33.
- [38] Mualla, I., 2000. "Experimental evaluation of new friction damper device". 12th WCEE, Auckland, New
- [39] Voiculescu, D., Dalban, C., 1999. "Behaviour of steel concentrically braced frames with friction dissipation devices". SDSS '99, Timisoara, Romania Zealand.
- [40] Ono, S., Nakahira, K., Tsujioka, S., Uno, N., 1996. "Energy absorption capacity of thermally sprayed aluminum friction dampers". *Journal of Thermal Spray Technology*, 5(3), 303-309.
- [41] C. Heistermann, M. Veljkovic, R. Simões, C. Rebelo, L. Simões da Silva. (2013). Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes. *Journal of Constructional Steel Research*, Volume 82, March 2013, Pages 223-233
- [42] M.Pavlović, C. Heistermann, M. Veljković, D.l Pak, M. Feldmann, C. Rebelo, L. Simões da Silva. (2015). Friction connection vs. ring flange connection in steel towers for wind converters. *Engineering Structures*, Volume 98, 1 September 2015, Pages 151-162
- [43] Latour M, Piluso V, Rizzano G. (2014). Experimental Analysis of Friction Materials for supplemental damping devices. *Construction and Building Materials*.
- [44] Voiculescu, D., Dalban, C., 1999. "Behaviour of steel concentrically braced frames with friction dissipation devices". SDSS '99, Timisoara, Romania Zealand.
- [45] EN10088-1, 2005. Part 1: List of stainless steels
- [46] EN 14399-4 (2006). High-strength structural bolting assemblies for preloading –Part 4: System HV –Hexagon bolt and nut assemblies
- [47] EN 15129, (2009). Anti-seismic devices
- [48] G. P. Davet, "Using Belleville Springs To Maintain Bolt Preload," 1997.
- [49] C. Heistermann, "Behaviour of Pretensioned Bolts in Friction Connections," 2011.
- [50] C. Heistermann, M. Veljkovic, R. Simões, C. Rebelo, and L. Simões da Silva, "Design of slip resistant lap joints with long open slotted holes," *Journal of Constructional Steel Research*, 2013.

- [51] M. Veljkovic, “Achievements of HISTWIN project,” 2015.
- [52] “FINITE ELEMENT ANALYSIS OF LAP JOINTS.” [Online]. Available: https://www.steelconstruct.com//gsPublications/Eurosteel2014-Christine_Heistermann.pdf. [Accessed: 11-Apr-2016].
- [53] C. Heistermann, “Resistance of Friction Connections with Open Slotted Holes in Towers for Wind Turbines,” 2014.
- [54] “DIN 6796. Conical spring washers for bolted connections.”
- [55] CEN, “EN 14399-6. High-strength structural bolting assemblies for preloading - Part 6: Plain chamfered washers,” no. June, 2006.
- [56] S. Ramhormozian, G. C. Clifton, G. A. MacRae, and G. P. Davet, “Stiffness-based approach for Belleville springs use in friction sliding structural connections,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 138, pp. 340–356, Nov. 2017.
- [57] M. D’Antimo, J.-F. Démonceau, M. Latour, G. Rizzano, and J.-P. Jaspart, “Experimental investigation of the creep effect on prestressed bolts used in innovative friction connections,” *Ce/Papers*, vol. 1, no. 2–3, pp. 580–589, 2017.
- [58] G. Ferrante Cavallaro, M. Latour, A. B. Francavilla, V. Piluso, and G. Rizzano, “Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 141, pp. 145–155, 2018.

3 Πειραματικές δοκιμές σε κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων FREEDAM

3.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών

AFD	: Asymmetric Friction Damper – ασύμμετρος αποσβεστήρας τριβής
DCH	: Ductility Class High - Υψηλή Κατηγορία Πλαστιμότητας
DT	: Αισθητήρας μετατόπισης
HFC	: Οριζόντια διάταξη αποσβεστήρα
LVDT	: Linear Variable Displacement Transducer – γραμμικός μεταβλητός διαφορικός μετασηματιστής
MRF	: Moment Resisting Frame – πλαίσιο ροπής
SFD	: Symmetrical Friction Damper – συμμετρικός αποσβεστήρας τριβής
SHJ	: Sliding Hinge Joint – αρθρωτός κόμβος ολίσθησης
TC	: Thermocouple – Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας
VFC	: Κατακόρυφη διάταξη αποσβεστήρα

3.2 Πίνακας Συμβόλων

Κεφαλαίοι λατινικοί χαρακτήρες

F	: Δύναμη επενεργητή
L_b	: Μήκος μεταξύ της κάθετης στήριξης της δοκού και την όψη του υποστυλώματος
L'_b	: Μήκος μεταξύ της κάθετης στήριξης της δοκού και το κέντρο περιστροφής της σύνδεσης
L_c	: Μήκος μεταξύ της κορυφής του υποστυλώματος και την άρθρωση στη βάση του υποστυλώματος
M_t	: Ροπή του κόμβου

Ελληνικοί χαρακτήρες

δ	: Μετατόπιση που μετρήθηκε στο σημείο της εφαρμογής φορτίου
θ	: Στροφή κόμβου

3.3 Εισαγωγή

Τις τελευταίες δεκαετίες, η χρήση αντικαταστάσιμων αντισεισμικών συσκευών στους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων έχει προσελκύσει μεγάλη προσοχή από την επιστημονική κοινότητα [1-11] λόγω της υψηλής ικανότητας απορρόφησης ενέργειας και της επακόλουθης μείωσης των συνολικών και τοπικών απαιτήσεων σε πλαστιμότητα. Μέχρι σήμερα, έχει προταθεί μία μεγάλη ποικιλία αποσβεστήρων, που παρέχουν συστήματα βασισμένα στην ενεργοποίηση απλών μηχανισμών απορρόφησης ενέργειας όπως η διαρροή των μετάλλων, η ξηρή τριβή και το ιξώδες των υγρών [12,13]. Η εφαρμογή τους έχει προταθεί κυρίως στο πλαίσιο στρατηγικών σχεδιασμού που βασίζονται στη συμπληρωματική απορρόφηση ενέργειας.

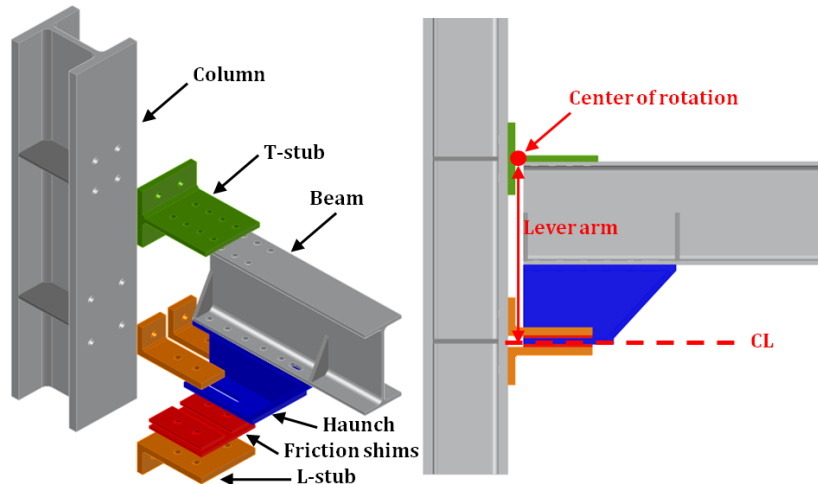
Ωστόσο, παρόλο που η εισαγωγή αντισεισμικών συσκευών μειώνει τις δομικές βλάβες, οι πλευρικές μετατοπίσεις που συνήθως χρειάζονται για την ενεργοποίηση των αποσβεστήρων οδηγούν σε βλάβες στα κύρια δομικά στοιχεία των οποίων η επισκευή μπορεί να είναι είτε δύσκολη είτε μη πρακτική.

Για αυτό το λόγο, πρόσφατα έχουν προταθεί νέες προσεγγίσεις που βασίζονται στη χρήση συνδέσεων στις κατασκευές από χάλυβα, που είναι εξοπλισμένες με αποσβεστήρες που υφίστανται μόνο ελάχιστες βλάβες, όπως, για παράδειγμα, ο αρθρωτός κόμβος ολίσθησης (Sliding Hinge Joint - SHJ) που αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Ωκλαντ από το 2004 [14-20]. Η χρήση αυτών των συνδέσεων σε πλαίσια ροπής (MRF), επιτρέπει την παραλαβή μεγάλων ανελαστικών στροφών δοκών-υποστυλωμάτων μέσω της ολίσθησης των ασύμμετρων αποσβεστήρων τριβής (AFD) που βρίσκονται στο επίπεδο του κάτω πέλματος της δοκού [21-24]. Ο τύπος αυτών των συνδέσεων παρέχει πολλά οφέλη επειδή είναι άκαμπτος και με μερική αντοχή, επιτρέποντας να περιοριστούν οι πλευρικές μετατοπίσεις και, ταυτόχρονα, να προστατευτεί το άκρο της δοκού από διαρροή και να μειωθεί η υπερδιαστασιολόγηση του υποστυλώματος που απορρέει από την εφαρμογή των ιεραρχικών κριτηρίων δοκών-υποστυλωμάτων που καθορίζονται από τις απαιτήσεις των κανονισμών.

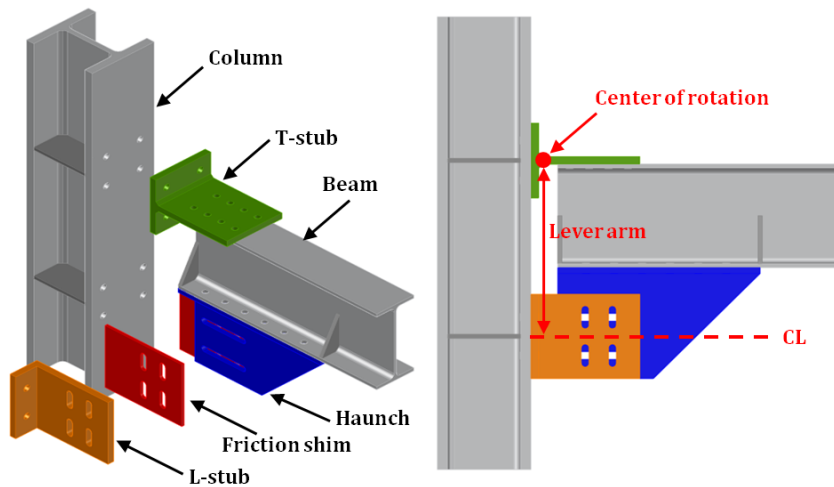
Πρόσφατα, έχουν προταθεί παρόμοιες διατάξεις συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων που συμπεριλαμβάνουν συμμετρικούς αποσβεστήρες τριβής (SFD) σε μια ολοκληρωμένη ερευνητική εργασία που στοχεύει στην ανάπτυξη, το σχεδιασμό και τη δοκιμή του κόμβου δοκού-υποστυλώματος με αποσβεστήρες τριβής [25-35]. Αυτές οι νέες συνδέσεις επιτρέπουν την επίτευξη των ίδιων πλεονεκτημάτων που παρέχονται από τον αρθρωτό κόμβο ολίσθησης - SHJ (ακαμψία, ρυθμιζόμενη αντοχή, ολκιμότητα και υψηλή ικανότητα απορρόφησης ενέργειας) με τη χρήση ενός βιομηχανοποιημένου συστήματος που κατασκευάζεται πλήρως στο εργοστάσιο και κοχλιώνεται στα δομικά στοιχεία (δοκός και υποστυλώμα) απευθείας στο εργοτάξιο.

Το κύριο πλεονέκτημα του βιομηχανοποιημένου συστήματος είναι ο ακριβής έλεγχος της ποιότητας των σφηνών τριβής και της διαδικασίας σύσφιξης των κοχλιών. Αυτά τα ζητήματα, στην πραγματικότητα, είναι θεμελιώδη για την ορθή λειτουργία των συσκευών τριβής και πρέπει να ελέγχονται αυστηρά κατά τη διαδικασία παραγωγής. Για να εξασφαλιστεί η απαιτούμενη δυνατότητα αποσυναρμολόγησης της συσκευής τριβής, ο αποσβεστήρας υλοποιείται με ένα έλασμα με οπές που είναι κοχλιωμένο στο πέλμα της δοκού και τις διατομές σχήματος L, και με σφήνες τριβής κοχλιωμένες με προεντεταμένους κοχλίες υψηλής αντοχής. Έχουν διερευνηθεί δύο διατάξεις: η οριζόντια διάταξη HFC, όπου το έλασμα είναι παράλληλο στο πέλμα της δοκού, και η διάταξη κάθετη VFC, όπου το έλασμα είναι κάθετο στο πέλμα της δοκού (Σχήμα 3.1). Σε κάμψη, ο κόμβος αναγκάζεται να στραφεί γύρω από ένα σημείο που βρίσκεται στη βάση του άνω πέλματος του T και η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας παρέχεται από την εναλλασσόμενη ολίσθηση του ελάσματος στις σφήνες τριβής. Ένα άλλο πλεονέκτημα του ελάσματος είναι η αύξηση του μοχλοβραχίονα που επιτρέπει τη μείωση της δύναμης που μεταδίδεται από τις συσκευές τριβής για την εκπλήρωση απαιτήσεων λειτουργικότητας.

Τα πειραματικά έργα σχετικά με αυτό το τύπο σύνδεσης έχουν ασχοληθεί με σημαντικές πτυχές της συμπεριφοράς της, όπως η απόκριση των σφηνών τριβής υπό ανακυκλική φόρτιση, η συμπεριφορά των προεντεταμένων κοχλιών κατά την εγκατάσταση και κατά τη διάρκεια ζωής τους, η προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με συσκευές τριβής και η απόκριση κρούσης απλών αποσβεστήρων τριβής [25-36].



a) Σύνδεση τριβής με το επίπεδο ελάσματος παράλληλα στο πέλαμα της δοκού (διάταξη HFC)



b) Σύνδεση τριβής με το επίπεδο ελάσματος παράλληλα στον κορμό της δοκού (διάταξη VFC)

Σχήμα 3.1. : Διατάξεις συνδέσεων τριβής με συμμετρικούς αποσβεστήρες τριβής (SFD)

Με στόχο την αξιολόγηση της πειραματικής απόκρισης των κόμβων τριβής, πραγματοποιήθηκε μια ευρεία πειραματική εκστρατεία στο ερευνητικό έργο FREEDAM σε δοκίμια ικανά να αντιπροσωπεύουν τη συμπεριφορά εσωτερικών και εξωτερικών κόμβων σε πραγματικά πλαίσια ροπής. Τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών επέτρεψαν την επαλήθευση των κριτηρίων σχεδιασμού για κόμβους τριβής που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου και την βαθμονόμηση των μοντέλων FEM που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση μελετών παραμέτρων. Συγκεκριμένα, ο πρωταρχικός στόχος της πειραματικής δραστηριότητας είναι η επαλήθευση της δυνατότητας των προτεινόμενων συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων να απορροφούν τη σεισμική ενέργεια χωρίς καμία σχεδόν βλάβη. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκαν 16 πειραματικές δοκιμές. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν 8 δοκιμές σε εξωτερικούς κόμβους στο Πανεπιστήμιο του Σαλέρνο και 8 δοκιμές σε εσωτερικούς κόμβους στο Πανεπιστήμιο της Κοϊμπρα.

Τα δείγματα έχουν σχεδιαστεί αξιοποιώντας, για όλα τα μέρη του κόμβου, εκτός από τους αποσβεστήρες τριβής, τα μοντέλα του Ευρωκώδικα 3 μέρη 1-8. Αντίθετα, για το νέο μέρος, δηλ. τον αποσβεστήρα τριβής, έχουν χρησιμοποιηθεί τα αποτελέσματα από πειράματα σε δοκίμια απλής διάτμησης με οπές σε παρεμβαλλόμενες πλάκες τριβής. Συγκεκριμένα, όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 2, οι δοκιμές στα υλικά επίστρωσης για τις πλάκες τριβής έχουν δείξει ότι τα υλικά M1 και M6 μπορούν να αναπτύξουν μια ελαφρά συμπεριφορά προσκόλλησης-ολίσθησης που μπορεί να προκαλέσει διεγέρσεις. Επομένως,

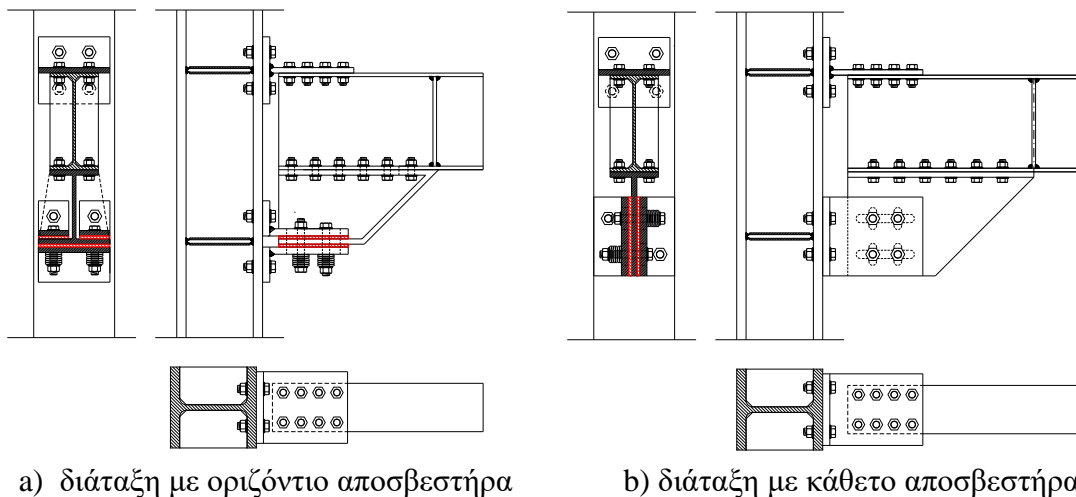
παρόλο που μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα για εφαρμογή στους αποσβεστήρες FREEDAM, οι δοκιμές στους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων έχουν περιοριστεί στο υλικό M4 επειδή φαίνεται να είναι το πιο αξιόπιστο για την εφαρμογή σε κόμβους FREEDAM αποφεύγοντας τα φαινόμενα προσκόλλησης-ολίσθησης. Οι πειραματικές δοκιμές αφορούσαν δεκαέξι κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων, οκτώ σε κόμβους με δοκούς διατομής IPE 270 και οκτώ με δοκούς διατομής IPE 450. Όπως ήδη αναφέρθηκε, εξετάστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις του αποσβεστήρα τριβής, η οριζόντια διάταξη - HFC και η κάθετη διάταξη - VFC (Σχήμα 3.1). Για κάθε διάταξη αποσβεστήρα, η δοκιμή εκτελέστηκε δύο φορές. Πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή με δισκοειδή ελατήρια και μια δεύτερη δοκιμή σε δοκίμιο με απλούς επίπεδους δακτυλίους για τα συστήματα κοχλιών.

3.4 Πειραματικές δοκιμές σε εξωτερικούς κόμβους

3.4.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Τα πειράματα αφορούσαν τους ακόλουθους κόμβους:

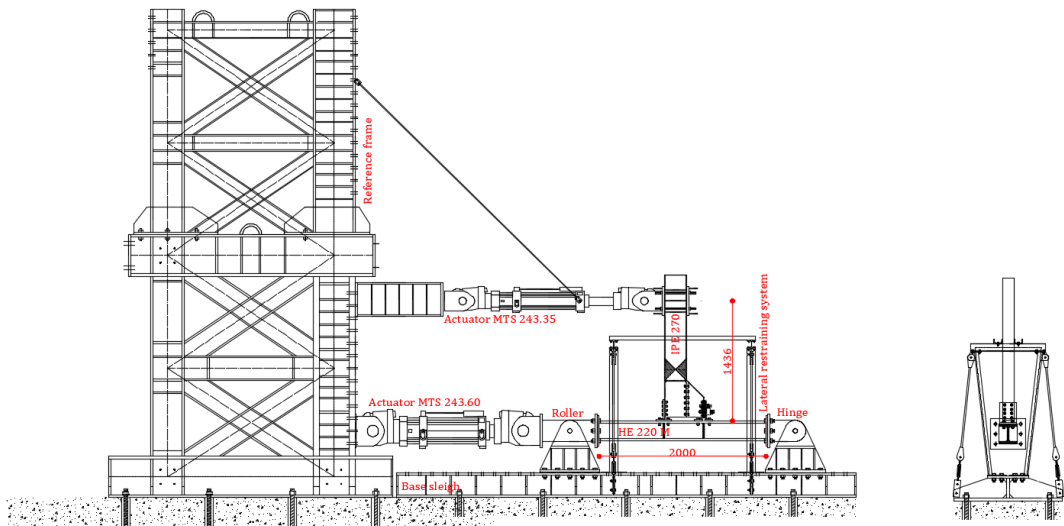
- FJ-CYC01: δοκός διατομής IPE270 - υποστύλωμα διατομής HEM220, κάθετη διάταξη VFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 με 6 δισκοειδή ελατήρια (3 σειρές των 2 παραλλήλων),
- FJ-CYC02: δοκός διατομής IPE270 - υποστύλωμα διατομής HEM220, οριζόντια διάταξη HFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 με 6 δισκοειδή ελατήρια (3 σειρές των 2 παραλλήλων),
- FJ-CYC03: δοκός διατομής IPE450 - υποστυλώματα διατομής HEB500, κάθετη διάταξη VFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 με 6 δισκοειδή ελατήρια (3 σειρές των 2 παραλλήλων),
- FJ-CYC04: δοκός διατομής IPE450 - υποστυλώματα διατομής HEB500, οριζόντια διάταξη HFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 με 6 δισκοειδή ελατήρια (3 σειρές των 2 παραλλήλων),
- FJ-CYC05: δοκός διατομής IPE270 - υποστύλωμα διατομής HEM220, κατακόρυφη διάταξη VFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 χωρίς δισκοειδή ελατήρια,
- FJ-CYC06: δοκός διατομής IPE270 - υποστύλωμα διατομής HEM220, οριζόντια διάταξη HFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 χωρίς δισκοειδή ελατήρια,
- FJ-CYC07: δοκός διατομής IPE450 - υποστυλώματα διατομής HEB500, κάθετη διάταξη VFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 χωρίς δισκοειδή ελατήρια,
- FJ-CYC08: δοκός διατομής IPE450 - υποστυλώματα διατομής HEB500, οριζόντια διάταξη HFC, κοχλίες M20 HV κατηγορίας 10.9 χωρίς δισκοειδή ελατήρια.



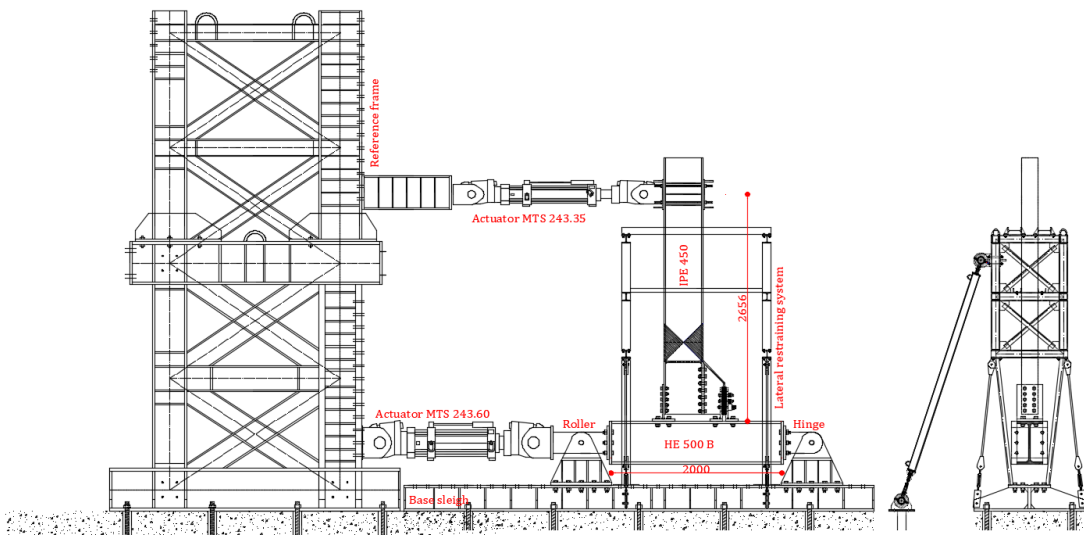
Σχήμα 3.2 : Πειραματικά δοκίμια (εξωτερικοί κόμβοι)

Όλες οι πειραματικές δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί στο εργαστήριο STRENGTH (STRuctural ENgineering Testing Hall - Αίθουσα Δοκιμών Δομοστατικής Μηχανικής) του Πανεπιστημίου του Σαλέρνο. Ο εξοπλισμός των δοκιμών αποτελείται από όργανα και μηχανήματα που θα μπορούσαν να χωριστούν σε τρεις μακρο-κατηγορίες: συσκευές περιορισμού μετακινήσεων, μηχανήματα φόρτισης και όργανα μέτρησης. Στο εργαστήριο STRENGTH, η κύρια συσκευή περιορισμού μετακινήσεων αντιπροσωπεύεται από το ισχυρό δάπεδο του εργαστηρίου που έχει οπές (διαμέτρου 80 mm σε κάναβο 1.0 m x 1.0 m) που χρησιμοποιούνται για τη στερέωση όλου του εξοπλισμού δοκιμών του εργαστηρίου. Αυτό το ισχυρό δάπεδο έχει αξιοποιηθεί για να στερεώσει όλες τις απαραίτητες στηρίξεις για την ανάπτυξη της εξέδρας δοκιμής για εξωτερικούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων. Σε αυτήν την περίπτωση, για την εκτέλεση των ανακυκλικών δοκιμών στους κόμβους, έχουν χρησιμοποιηθεί οι κατασκευές περιορισμού: ένα άκαμπτο και ισχυρό κατακόρυφο πλαίσιο και ένα οριζόντιο χαλύβδινο άκαμπτο σύστημα συγκράτησης, τα οποία κατασκευάστηκαν με τη συναρμολόγηση πλήρως συγκολλημένων χαλύβδινων πλακών και δομικών μερών (Σχήμα 3.3).

Επιπλέον, με στόχο την προσομοίωση του σημείου των μηδενικών ροπών που συμβαίνουν στο πραγματικό στατικό σύστημα (Σχήμα 3.4), έχουν υιοθετηθεί δύο μεταλλικές στηρίξεις (Σχήμα 3.3). Οι στηρίξεις αυτές έχουν σχεδιαστεί με αντοχή σε διάτμηση έως και 2000 kN και βιδώνονται στη χαλύβδινη βάση. Μία από τις δύο στηρίξεις σχεδιάστηκε ώστε να απορροφά τις διατμητικές και τις αξονικές δυνάμεις χρησιμοποιώντας έναν πείρο. Η δεύτερη σχεδιάστηκε για να επιτρέπει την οριζόντια μετακίνηση και να αντιστέκεται σε κατακόρυφες μετακινήσεις, χρησιμοποιώντας έναν πείρο σε συνδυασμό με επιμήκεις οπές ώστε να επιτρέπεται η επιθυμητή μετακίνηση.

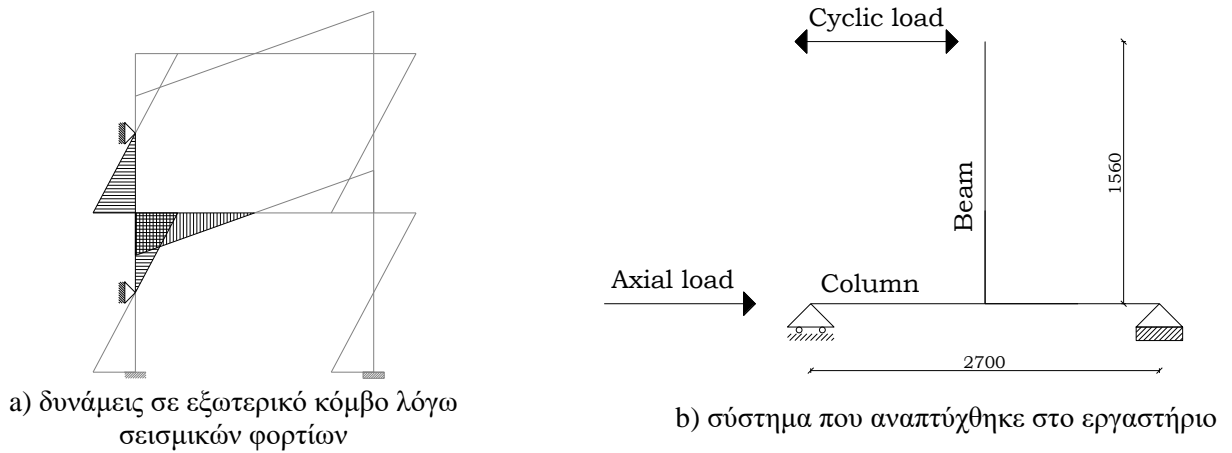


a) FJ-CYC01-FJ-CYC04



b) FJ-CYC05-FJ-CYC08

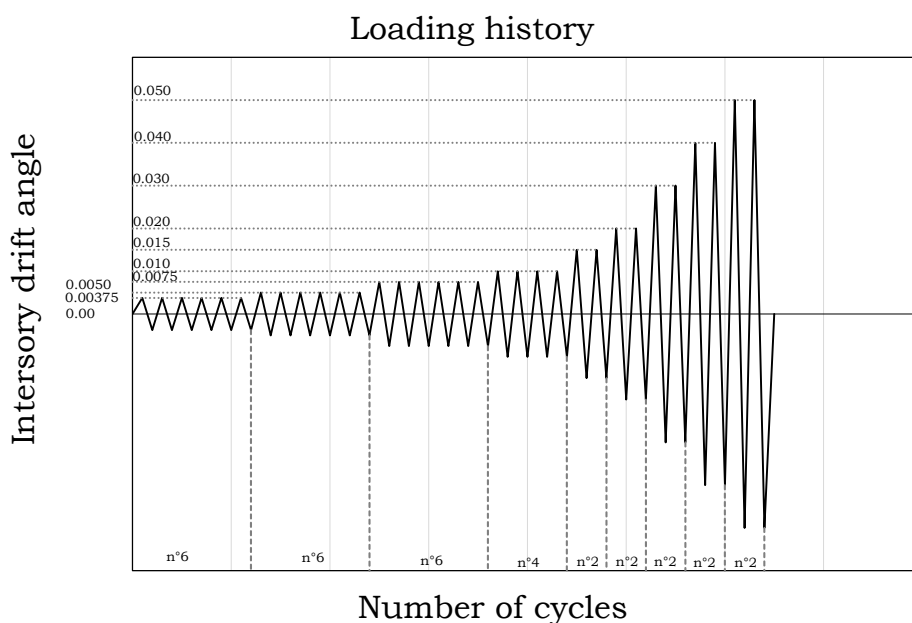
Σχήμα 3.3 : Πειραματική διάταξη



Σχήμα 3.4 : Στατικό σύστημα

Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν στηρίξεις έναντι πλευρικού λυγισμού (Σχήμα 3.3) για την αποφυγή φαινομένων στρεπτοκαμπτικού λυγισμού της δοκού κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών. Όσον αφορά τον εξοπλισμό φόρτισης, στο πείραμα έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις διαφορετικοί υδραυλικοί επενεργητές MTS. Για την εφαρμογή του αξονικού φορτίου στο υποστύλωμα, χρησιμοποιήθηκε ένας επενεργητής MTS 243.60, που λειτουργεί έλεγχο επιβαλλόμενου φορτίου. Αυτός ο επενεργητής έχει μέγιστη ικανότητα φόρτισης ίση με 1000kN σε θλίψη και 650 kN σε εφελκυσμό με μέγιστη διαδρομή εμβόλου ίση με +/- 125mm. Για την εφαρμογή της κάμψης στη σύνδεση, έχουν χρησιμοποιηθεί δύο διαφορετικοί επενεργητές MTS ανάλογα με το μέγεθος της δοκού. Ο πρώτος, που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή δοκών διατομής IPE 270, έχει μέγιστη ικανότητα φορτίου ίση με 245 kN με μέγιστη διαδρομή εμβόλου ίση με +/- 500mm και ο δεύτερος, που χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή δοκών διατομής IPE 450, έχει ικανότητα φορτίου ίση με 500 kN και μέγιστη διαδρομή εμβόλου ίση με +/- 500 mm. Και οι δύο έχουν αξιοποιηθεί για να εφαρμόσουν, σε έλεγχο μετατόπισης, το επιθυμητό ιστορικό μετατόπισης στο άκρο της δοκού. Η παρακολούθηση των εφαρμοζόμενων μετατοπίσεων στα δοκίμια πραγματοποιήθηκε επίσης χρησιμοποιώντας μορφοτροπείς εξωτερικών μετατοπίσεων. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, οι μετατοπίσεις της δοκού, του υποστυλώματος και των μερών που συνθέτουν τον κόμβο, ιδιαίτερα του αποσβεστήρα τριβής, μετρώνται συνεχώς με χρήση LVDT. Όπως προαναφέρθηκε, οι πειραματικές δοκιμές έχουν εκτελεστεί χρησιμοποιώντας δύο υδραυλικούς επενεργητές, εκ των οποίων ο κάτω επενεργητής έχει ρυθμιστεί σε έλεγχο δύναμης για την επιβολή σταθερού αξονικού θλιπτικού φορτίου ίσο με 650 kN ενώ ο άνω επενεργητής έχει χρησιμοποιηθεί για την επιβολή του επιθυμητού ιστορικού ανακυκλικής μετατόπισης.

Συγκεκριμένα, ο άνω επενεργητής έχει συνδεθεί στο άκρο της δοκού για να εφαρμόσει ένα ιστορικό μετατοπίσεων σύμφωνα με το πρωτόκολλο φόρτισης AISC 346-10 [37] (Σχήμα 3.5), το οποίο είναι ένα πρωτόκολλο φόρτισης αφιερωμένο ειδικά στους κόμβους, πολύ συνηθισμένο στην πρακτική των ΗΠΑ, και συνήθως χρησιμοποιείται για την προεπιλογή κόμβων. Αυτό το πρωτόκολλο έχει χρησιμοποιηθεί επίσης και στο ερευνητικό έργο EQUALJOINTS.



Σχήμα 3.5: Ιστορικό φόρτισης

Πίνακας 3.1: Ιστορικό εφαρμοζόμενης μετατόπισης

v [mm/s]	βήμα	θ [rad]	# κύκλων	δ [mm]
0.5	1	0.00375	6	5.835
	2	0.0050	6	7.780
	3	0.0075	6	11.67
1	4	0.010	4	15.56
	5	0.015	2	23.34
	6	0.020	2	31.12
2	7	0.030	2	46.68
	8	0.040	2	62.24
4	9	0.050	2	77.80

Επομένως, με γνωστές τις απαιτήσεις του κανονισμού, είναι δυνατό να ληφθεί το ιστορικό μετατοπίσεων στην κορυφή της δοκού. Οι δοκιμές έχουν εκτελεστεί μέχρι τη μέγιστη στροφή των 50 mrad (Πίνακας 3.1). Είναι χρήσιμο να σημειωθεί ότι η στροφή αυτή είναι πολύ υψηλότερη από το ελάχιστο που απαιτείται από τον EC8, που για πλαίσια DCH είναι ίσο με 35 mrad.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, έχουν παρακολουθηθεί και συλλεχθεί πολλές παράμετροι, για την αξιολόγηση των δυνάμεων και των μετατοπίσεων στο επίπεδο του άνω επενεργητή και των μετατοπίσεων των διαφόρων μερών του κόμβου. Σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τουλάχιστον έξι μορφοτροπίες γραμμικής μετατόπισης. Παραδείγματα της διάταξης των συσκευών στις δύο διαφορετικές διαμορφώσεις κόμβων αναφέρονται στη συνέχεια για τη δοκιμή n°1 και τη δοκιμή n°2. Για όλες τις άλλες δοκιμές έχουν χρησιμοποιηθεί παρόμοιες διατάξεις των συσκευών μέτρησης.

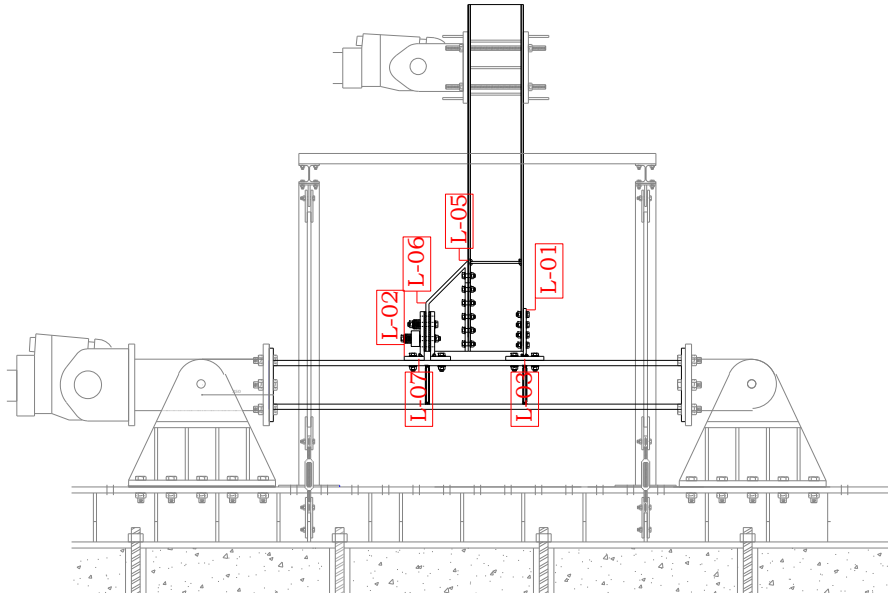
Συγκεκριμένα, στον κόμβο FREEDAM CYC-01 έχουν χρησιμοποιηθεί οι ακόλουθοι αισθητήρες (Σχήμα 3.6a):

- LVDT n.02, 03 και 07 για τη μέτρηση της σχετικής μετατόπισης μεταξύ των T/πελμάτων γωνιών και του πέλματος του υποστυλώματος,
- LVDT n. 05 για τη μέτρηση της μετατόπισης μεταξύ του ελάσματος και της δοκού,
- LVDTs n. 06 για τη μέτρηση της μετατόπισης της συσκευής τριβής,
- LVDT n. 01 για την αξιολόγηση πιθανών ολισθήσεων του κορμού του T σε σχέση με το πέλμα της δοκού.

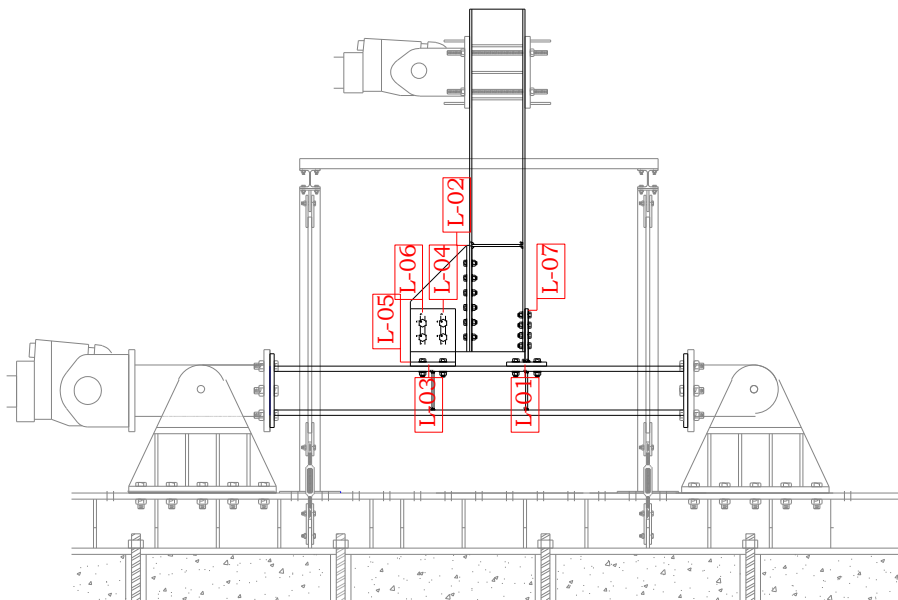
Στον κόμβο FREEDAM CYC-02 έχουν χρησιμοποιηθεί οι ακόλουθοι αισθητήρες (Σχήμα 3.6b):

- LVDTs n.01, 03 και 05 έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μέτρηση της σχετικής μετατόπισης μεταξύ των T/πελμάτων γωνιών και του πέλματος του υποστυλώματος,
- LVDT n. 02 για τη μέτρηση της μετατόπισης μεταξύ της νεύρωσης και το πέλμα της δοκού στην σύνδεση τριβής,
- LVDTs n. 04 και 06 για τη μέτρηση της μετατόπισης μεταξύ δύο σερών κοχλιών της συσκευής τριβής,
- LVDT n. 07 για την αξιολόγηση πιθανών ολισθήσεων του κορμού του T σε σχέση με το πέλμα της δοκού.

Επιπλέον, σε όλες τις πειραματικές δοκιμές, οι προεντάσεις που εφαρμόστηκαν στους κοχλίες των συσκευών τριβής παρακολογήθηκαν πριν και κατά τη διάρκεια της δοκιμής χρησιμοποιώντας δακτυλίους δυναμομέτρων (Futek LTH500) με ενδείξεις RC-01, RC-03 και RC-04. Στις δοκιμές με δοκούς διατομής IPE 270 έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο δύο δακτύλιοι δυναμομέτρων, ενώ στις δοκιμές με δοκούς διατομής IPE 450 έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις δακτύλιοι δυναμομέτρων.



a) FREEDAM-CYC01



b) FREEDAM-CYC02

Σχήμα 3.6 : Θέσεις των LVDT

Επιπλέον, σε όλες τις πειραματικές δοκιμές, οι προεντάσεις που εφαρμόστηκαν στους κοχλίες των συσκευών τριβής παρακολούθηθηκαν πριν και κατά τη διάρκεια της δοκιμής χρησιμοποιώντας δακτυλίους δυναμομέτρων (Futek LTH500) με ενδείξεις RC-01, RC-03 και RC-04. Στις δοκιμές με δοκούς διατομής IPE 270 έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο δύο δακτύλιοι δυναμομέτρων, ενώ στις δοκιμές με δοκούς διατομής IPE 450 έχουν χρησιμοποιηθεί τρεις δακτύλιοι δυναμομέτρων.

3.4.2 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών

Για λόγους συντομίας, εδώ παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα που των δοκιμών FJ-CYC01 έως FJ-CYC04. Περισσότερες πληροφορίες για το σύνολο του πειραματικού προγράμματος μπορούν να βρεθούν στην τελική έκθεση του συνολικού έργου.

Οι πειραματικές δοκιμές παρείχαν μια απόκριση σύμφωνη με την αναμενόμενη συμπεριφορά. Όπως απεικονίζεται στα Σχήματα 3.7, έχουν επιτευχθεί ευρείς και σταθεροί κύκλοι υστέρησης και, μακροσκοπικά, στο τέλος των δοκιμών δεν παρατηρήθηκαν βλάβες στα μέρη χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας.

Πίνακας 3.2 : Σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και των τιμών σχεδιασμού των ροπών τριβής

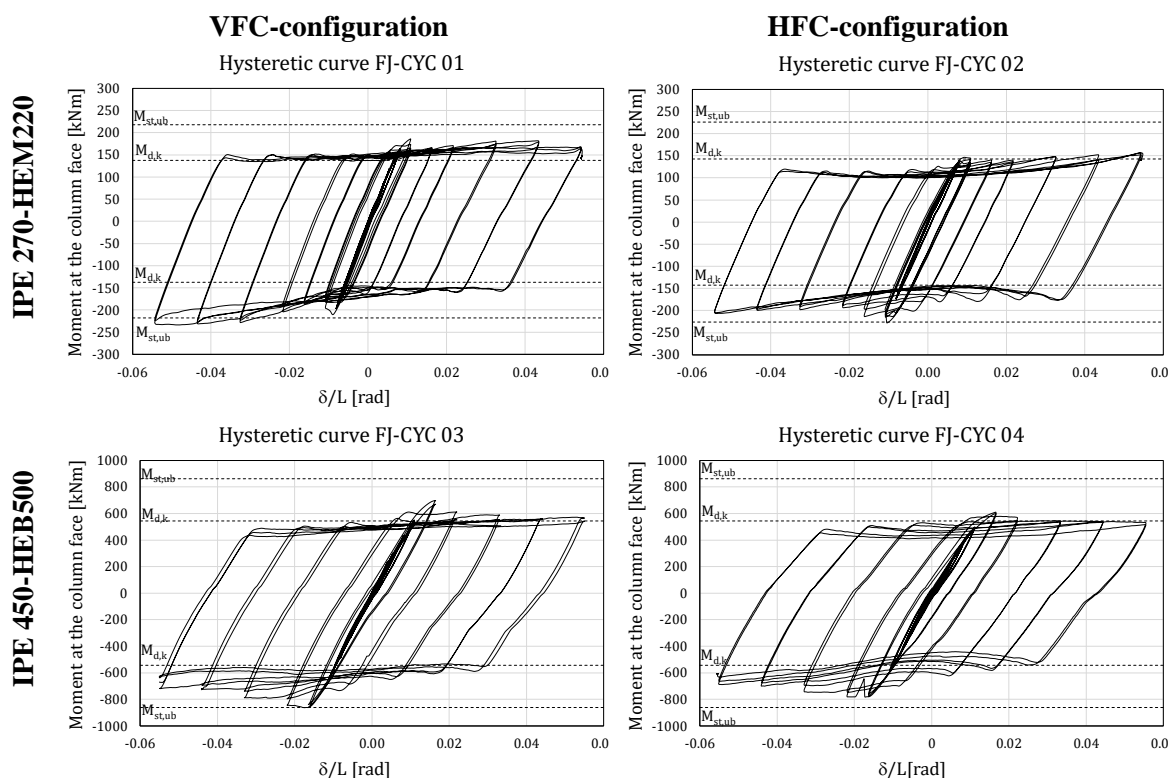
	<i>FJ-CYC01</i>	<i>FJ-CYC02</i>	<i>FJ-CYC03</i>	<i>FJ-CYC04</i>
M_{exp} [kNm]	+185.45	+145.73	+697.48	+556.97
	-210.41	-227.80	-863.04	-782.37
$M_{nd,d}$ [kNm]	226.02	217.85	861.85	861.85
M_{Ed} [kNm]	142.61	137.46	543.79	543.79

Το άνω όριο των τιμών της στατικής αντοχής που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό των μερών χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας (που απεικονίζεται στο Σχήμα 3.7 με διακεκομμένη γραμμή) είναι πρακτικά ίσο με τις μέγιστες καμπτικές ροπές που παρατηρήθηκαν κατά τις πειραματικές δοκιμές (Πίνακας 3.2). Παρομοίως, οι δυναμικές τιμές αντοχής κάμψης, που υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τον συντελεστή δυναμικής τριβής, βρίσκονται πολύ κοντά στην αντίσταση ολίσθησης των κόμβων. Στον Πίνακα 3.2, φαίνεται η σύγκριση μεταξύ της πειραματικής αντοχής των τεσσάρων συνδέσεων και της αντοχής σχεδιασμού των δοκιμών. Για όλα τα δείγματα, παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές της καμπτικής αντοχής των κόμβων είναι πολύ κοντά στο πεδίο τιμών σχεδιασμού (μεταξύ του άνω ορίου των στατικών και του κάτω ορίου των δυναμικών τιμών). Η συμφωνία με τη διαδικασία σχεδιασμού είναι απολύτως ικανοποιητική.

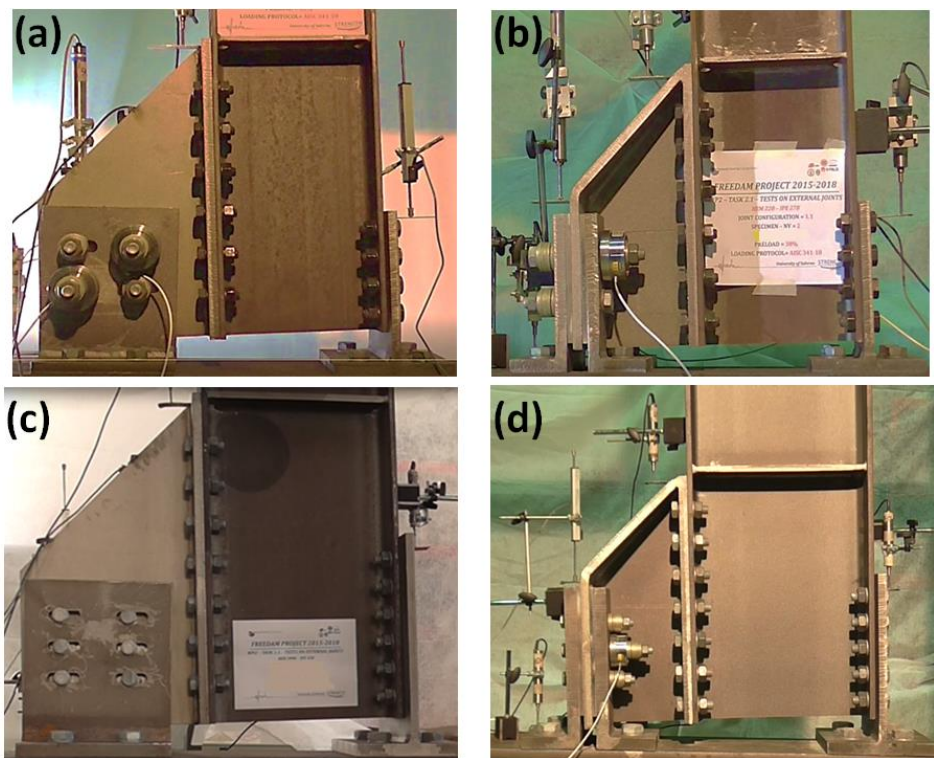
Στην περίπτωση κόμβων με οριζόντια διάταξη HFC, παρατηρήθηκε μία ελαφρώς χαμηλότερη αντίσταση ολίσθησης υπό θετικές ροπές κάμψης (εφελκυσμός κάτω), κυρίως λόγω της μεγαλύτερης παραμόρφωσης των L σε εφελκυσμό, που οδήγησε σε μεγαλύτερη από την αναμενόμενη απώλεια προέντασης. Αντίθετα, στην περίπτωση κόμβων με κάθετη διάταξη VFC, η αντίσταση ολίσθησης της σύνδεσης, τόσο σε αρνητικές όσο και σε θετικές ροπές κάμψης, είναι πρακτικά ίση με την αντοχή σχεδιασμού. Στους κόμβους με οριζόντια διάταξη HFC, η απόκριση του κόμβου ήταν έντονα ασύμμετρη, με σημαντικά διαφορετικές τιμές αντοχής υπό θετικές και αρνητικές καμπτικές ροπές. Η διαφορά ως προς τη μέγιστη αντοχή ήταν πάνω από 35% στη περίπτωση του δοκιμίου FJ-CYC 02. Η ασυμμετρία οφείλεται κυρίως στην κάμψη των ελασμάτων T/L και την επακόλουθη διακύμανση της τάσης στις πλάκες τριβής. Οι κόμβοι με κάθετη διάταξη VFC εμφάνισαν λιγότερη ασυμμετρία της ανακυκλικής συμπεριφοράς. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των πειραματικών

δοκιμών, επίσης λόγω της μείωσης των δυνάμεων σύσφιξης των κοχλιών, παρατηρήθηκε μία μικρή μείωση της καμπτικής ροπής σε μεγάλες στροφές. Αυτό το φαινόμενο ήταν πιο εμφανές για τα δοκίμια με την υψίκορμη δοκό, για τα οποία η αθροιστική μετατόπιση στο επίπεδο του αποσβεστήρα τριβής είναι μεγαλύτερη, λόγω της αύξησης του μοχλοβραχίονα της σύνδεσης.

Από τους βρόχους υστέρησης παρατηρείται επίσης ότι η απόκριση χαρακτηρίζεται από μία πρώτη ολίσθηση με τιμή δύναμης ελαφρώς υψηλότερη από αυτή που αντιστοιχεί στους επόμενους κύκλους. Μετά από μερικούς κύκλους, η δύναμη ολίσθησης σταθεροποιείται και οι βρόχοι υστέρησης σχεδόν πάντα επαναλαμβάνονται για όλο το ιστορικό φόρτισης με το ίδιο σχήμα. Αυτά τα αποτελέσματα συμβαδίζουν με τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών στους αποσβεστήρες τριβής, καθώς τα σχήματα των βρόχων του κόμβου ήταν απόλυτα συγκρίσιμα με αυτά των δοκιμών διάτμησης των αποσβεστήρων τριβής, που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2. Οι πρώτες κορυφές αντιστοιχούν στον συντελεστή στατικής τριβής (που είναι υψηλότερος αυτού της δυναμικής τριβής στα μαλακά υλικά επίστρωσης), ενώ ο σταθεροποιημένος κύκλος αντιστοιχεί σε δύναμη ολίσθησης του αποσβεστήρα του οποίου η τιμή σχετίζεται κυρίως με τον συντελεστή δυναμικής τριβής. Επιπλέον, με βάση τους συντελεστές τριβής που λαμβάνονται ελέγχοντας μόνο τους αποσβεστήρες (Κεφάλαιο 2), είναι δυνατόν να επαληθευτεί ότι οι τιμές τόσο της στατικής όσο και της δυναμικής δύναμης ολίσθησης που παρατηρήθηκαν στο σύνολο του ιστορικού φόρτισης ήταν συμβατές με το προβλεπόμενο εύρος τιμών δύναμης ολίσθησης που βασίστηκαν στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν μόνο στους αποσβεστήρες. Λαμβάνονται μικρές διαφορές σε κάθε περίπτωση λόγω της ευκαμψίας των χαλύβδινων L του αποσβεστήρα τριβής, η οποία κατά τις δοκιμές προκάλεσε ταλαντώσεις (αύξηση και μείωση) των δυνάμεων των κοχλιών υπό αρνητικές/θετικές καμπτικές ροπές.



Σχήμα 3.7 : Καμπύλες υστέρησης



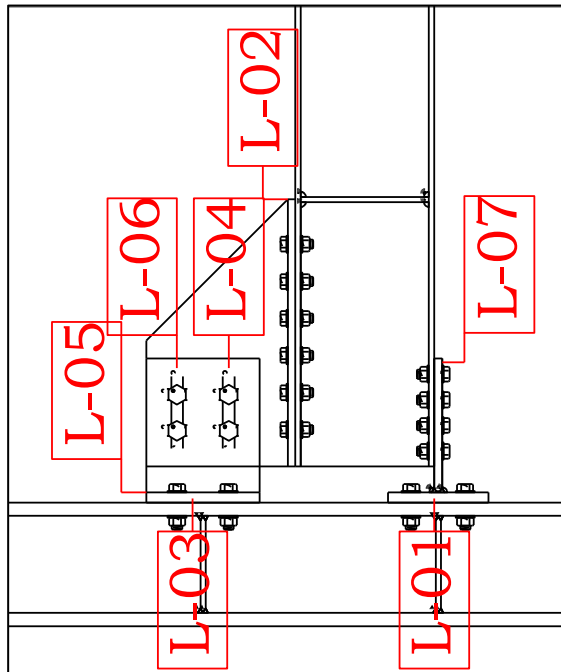
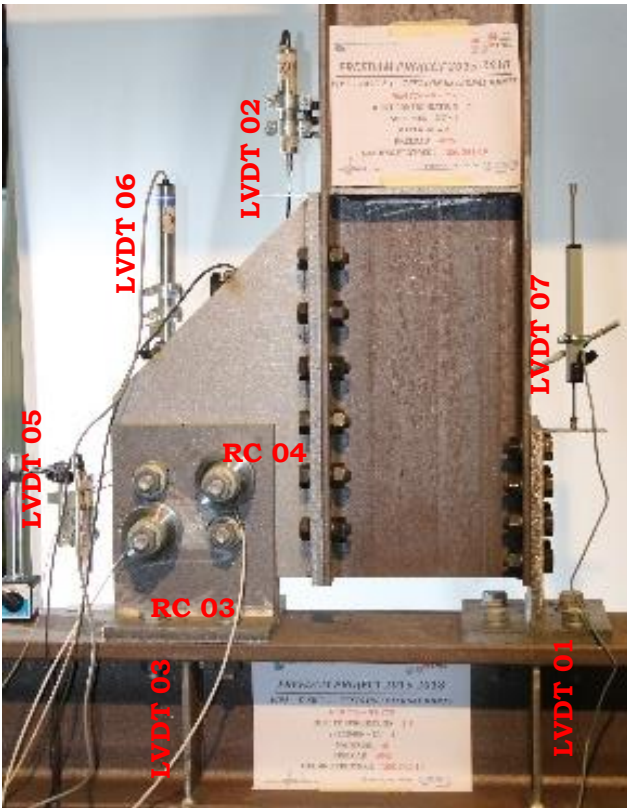
Σχήμα 3.8 – Δοκίμια στην παραμορφωμένη κατάσταση: a) FJ-CYC01, b) FJ-CYC02, c) FJ-CYC03, d) FJ-CYC04

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζονται οι κόμβοι στην παραμορφωμένη κατάσταση επισημαίνοντας τον σωστό ορισμό της γεωμετρίας των αποσβεστήρων που ήταν σε θέση να παραλάβουν τη στροφή σχεδιασμού ίση με 50 mrad.

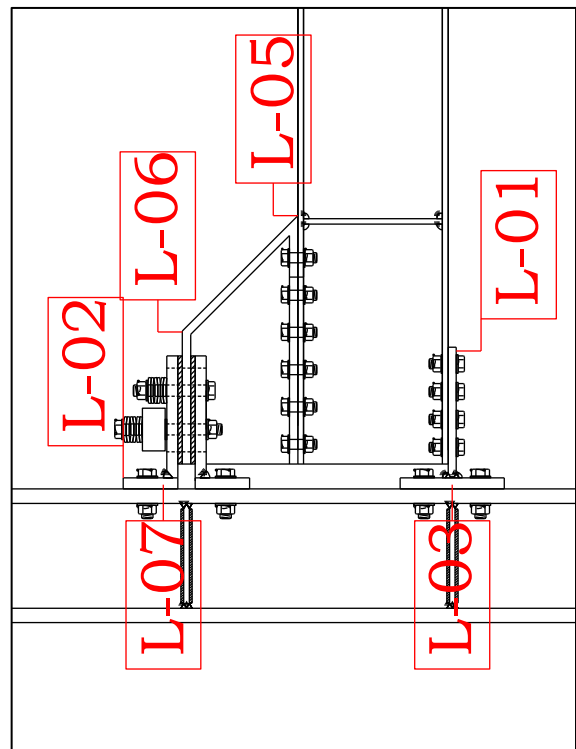
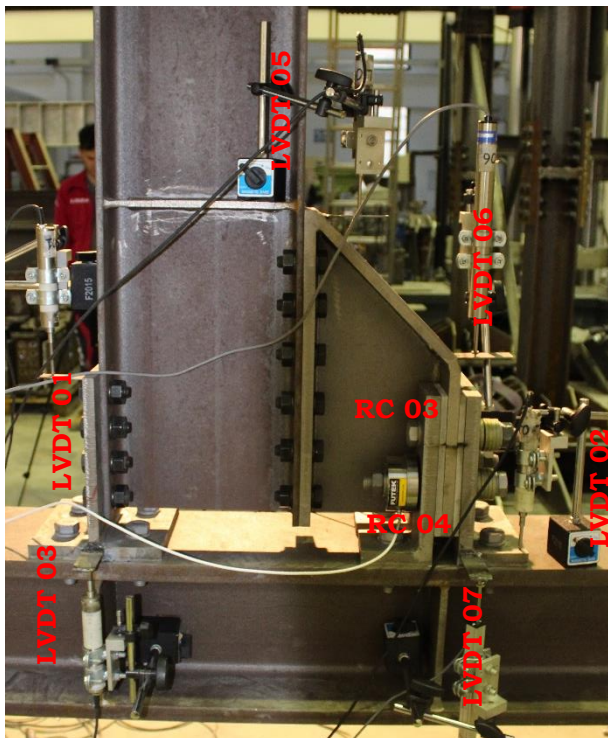
Η ακρίβεια της διαδικασίας σχεδιασμού αποδείχθηκε επίσης από τις τοπικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Στην πραγματικότητα, για όλα τα δοκίμια, η απορρόφηση ενέργειας γίνεται μόνο από τους αποσβεστήρες τριβής, αφήνοντας στο τέλος της δοκιμής όλα τα δομικά στοιχεία πρακτικά άθικτα. Συγκεκριμένα, θεωρώντας ότι το κέντρο περιστροφής βρίσκεται σε αντιστοιχία του T στην κεντρική γραμμή του άνω πέλματος της δοκού και ο αποσβεστήρας υπόκειται σε κυκλική εφελκυστική/θλιπτική δύναμη, οι αναπαραστάσεις των τοπικών μετρήσεων που λαμβάνονται από τα LVDT γίνονται αναφέροντας τη μετρούμενη μετατόπιση σε σχέση με την τοπική δύναμη που δρα στον αποσβεστήρα ή στο επίπεδο του T.

Χρησιμοποιώντας τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από τα LVDT 04 και LVDT 06 (Σχήμα 3.9) στην κάθετη διάταξη VFC, και τις μετακινήσεις που καταγράφηκαν από το LVDT 06 (Σχήμα 3.10) στην οριζόντια διάταξη HFC, καθορίστηκε η δύναμη σε σχέση με τη μετατόπιση των αποσβεστήρων τριβής. Μπορεί εύκολα να παρατηρηθεί ότι οι υστερητικοί βρόχοι είναι πρακτικά ορθογώνιοι με σημαντική ικανότητα απορρόφησης ενέργειας και σχεδόν καθόλου υποβάθμιση τόσο της ακαμψίας όσο της αντοχής (Σχήμα 3.11).

Οι τοπικές μετρήσεις (Σχήματα 3.12 και 3.13) δείχνουν ότι τα T και τα L παραμένουν πρακτικά στην ελαστική περιοχή, ενώ η απορρόφηση ενέργειας παρέχεται μόνο από τον αποσβεστήρα τριβής, ο οποίος δίνει μια σταθερή υστερητική απόκριση με υψηλή απορρόφηση ενέργειας. Στο τέλος των δοκιμών, παρατηρήθηκε απώλεια της δύναμης σύσφιξης των κοχλιών ίση με περίπου το 25-30%.



Σχήμα 3.9 : Χωροθέτηση των οργάνων - FREEDAM-CYC01

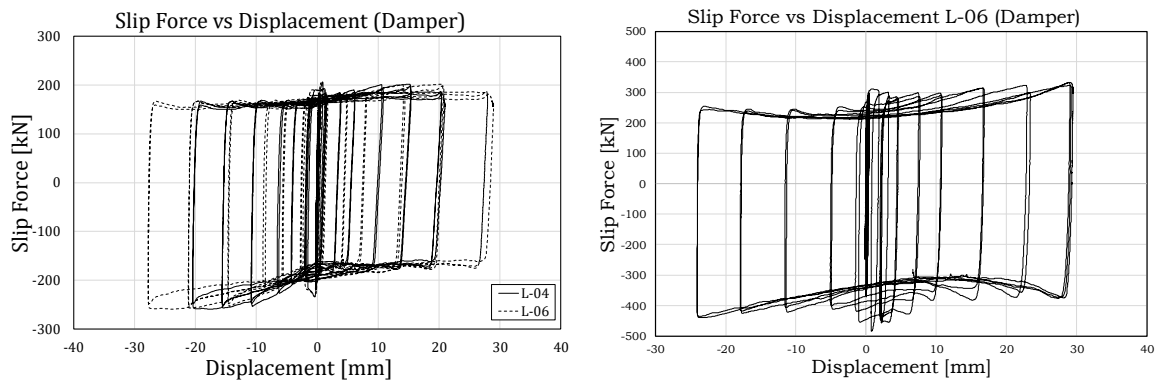


Σχήμα 3.10 : Χωροθέτηση των οργάνων - FREEDAM-CYC02

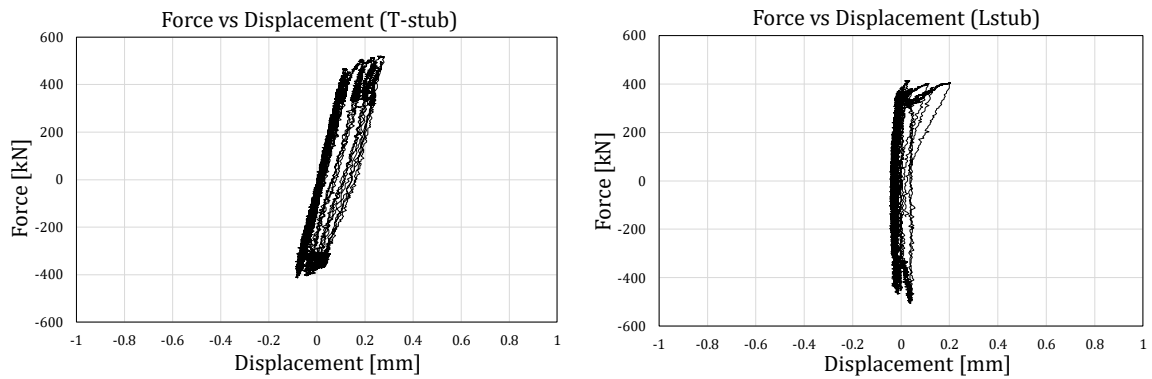
Αυτό το αποτέλεσμα υποδηλώνει ότι, παρόλο που οι συνδέσεις τριβής περιορίζουν τις βλάβες, μετά την εμφάνιση σοβαρής μετακίνησης εδάφους χρειάζονται κατάλληλη συντήρηση για να ελεγχθεί την παραμένουσα αντοχή του αποσβεστήρα και το μέγεθος της

απώλειας προέντασης. Συγκεκριμένα, μπορεί να απαιτείται εκ νέου σύσφιξη των κοχλιών για επαναφορά της προέντασης κοχλία. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι πραγματικοί σεισμοί παρέχουν μια απαίτηση αθροιστικής πλαστικής στρώσης στα μέρη του κόμβου, η οποία είναι συνήθως αρκετά χαμηλότερη εκείνης που επιβάλλεται από το πρωτόκολλο φόρτισης AISC-358. Επομένως, η απώλεια της δύναμης σύσφιξης που παρατηρείται κατά τη διάρκεια των δοκιμών πρέπει να θεωρείται ως το άνω όριο της τιμής που δεν έχει άμεση αντιστοιχία με την απώλεια προέντασης που συμβαίνει μετά από μια πραγματική μετακίνηση εδάφους.

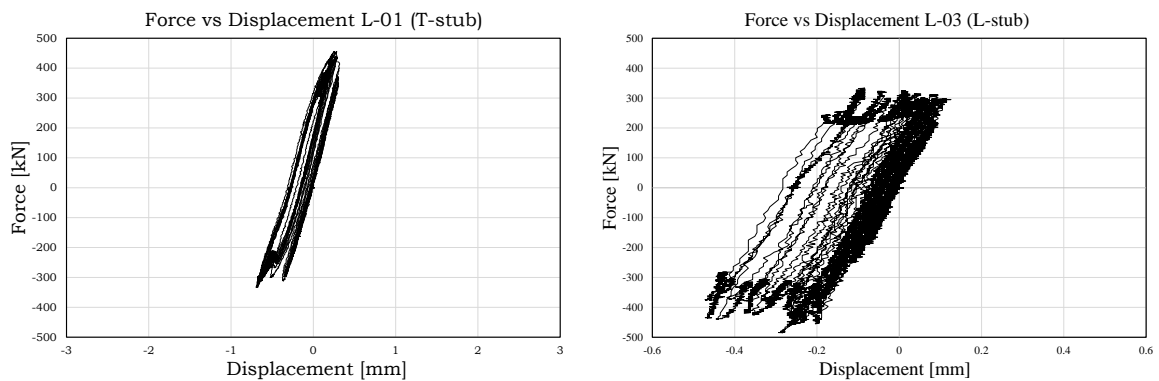
Η τιμή της προέντασης των κοχλιών και η διακύμανση τους κατά τις δοκιμές παρακολουθήθηκε χρησιμοποιώντας δύο δυναμόμετρα, RC-03 και RC-04, που βρίσκονται στις δύο σειρές κοχλιών του αποσβεστήρα αντίστοιχα.



Σχήμα 3.11 : Δύναμη ολίσθησης-καμπύλη μετακίνησης των αποσβεστήρων τριβής FREEDAM-CYC01 (αριστερά) and FREEDAM-CYC02 (δεξιά)



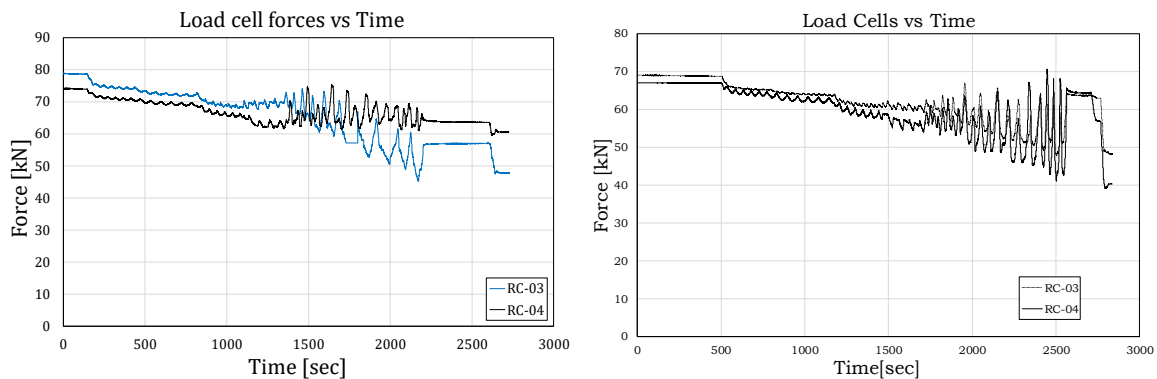
Σχήμα 3.12: Τοπικές μετρήσεις FREEDAM-CYC01 – T και L



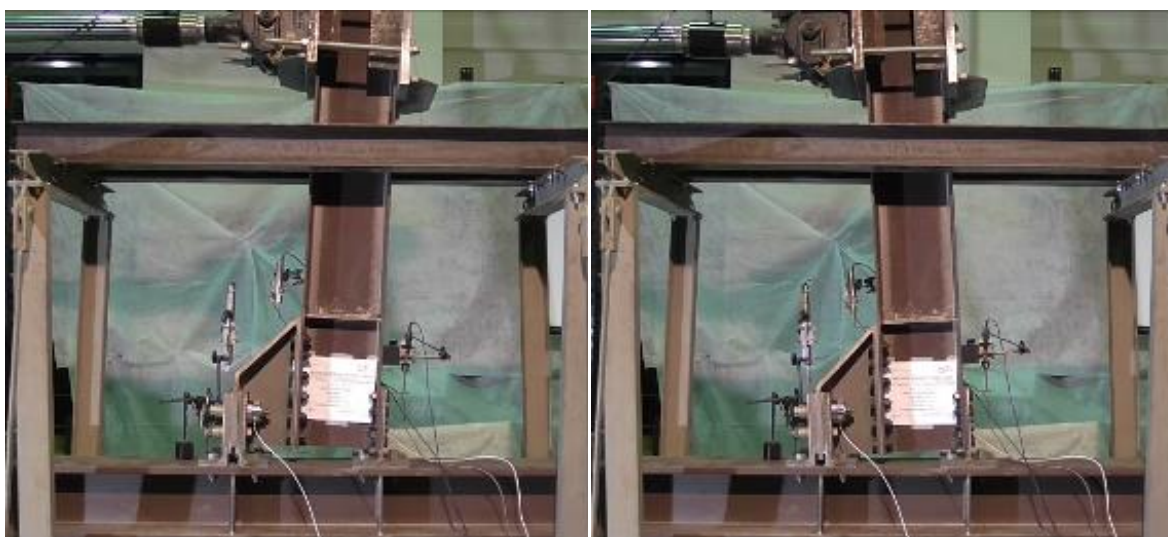
Σχήμα 3.13 : Τοπικές μετρήσεις FREEDAM-CYC02 – T και L

Αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.14, όπου παρατηρείται ότι αρχικά, στην πρώτη ολίσθηση όπως έχει ήδη ανιχνευθεί στις δοκιμές διάτμησης, υπάρχει μια χαλάρωση των κοχλιών που αυξάνεται όσο αυξάνονται οι κύκλοι φόρτισης. Αυτή η χαλάρωση συνεχίζει μέχρι την επίτευξη κύκλων μεγάλων μετατοπίσεων, στους οποίους τα φαινόμενα κάμψης που αναπτύσσονται στις γραμμές κοχλιών των αποσβεστήρων οδηγούν σε σημαντική ταλάντωση των δυνάμεων κοχλιών που, στην κορυφή, επιτυγχάνουν, πάλι, ουσιαστικά την αρχική δύναμη.

Όλες οι πειραματικές δοκιμές εμφάνισαν συμπεριφορά πλήρως σύμφωνη με την αναμενόμενη. Σε όλες τις δοκιμασμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκε μικρή διαρροή των T και L στη σύνδεση κορμού με πέλμα, επιβεβαιώνοντας την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας σχεδιασμού. Ως εκ τούτου, σε όλες τις πειραματικές δοκιμές η απορρόφηση ενέργειας παρέχεται μόνο από τους αποσβεστήρες τριβής FREEDAM αφήνοντας στο τέλος της δοκιμής όλα τα δομικά μέρη πρακτικά άθικτα (Σχήμα 3.15). Κάτι άλλο που επισημάνθηκε σε αυτήν την πειραματική φάση είναι ότι τα δισκοειδή ελατήρια Belleville δεν φαίνεται να παρέχουν ουσιαστικό όφελος όσον αφορά την υστερητική συμπεριφορά. Αυτό επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις που έγιναν ήδη στο Κεφάλαιο 2 σχετικά με τις δοκιμές των αποσβεστήρων τριβής.



Σχήμα 3.14 : Δύναμη προέντασης στους κοχλίες του αποσβεστήρα τριβής FREEDAM-CYC01 (αριστερά) and FREEDAM-CYC02 (δεξιά)



Σχήμα 3.15: Δοκίμο FREEDAM-CYC02 στην παραμορφωμένη κατάσταση στο τέλος της δοκιμής

Συγκεκριμένα, όσον αφορά τη σύγκριση μεταξύ της κάθετης διάταξης VFC και της οριζόντιας διάταξης HFC, παρατηρήθηκε παρόμοια συμπεριφορά σχετικά με την υποβάθμιση της αντοχής κατά τη διάρκεια του ιστορικού ανακυκλικής φόρτισης. Επίσης, η επίδραση των δακτυλίων Belleville ήταν αμελητέα και στις δύο περιπτώσεις. Ωστόσο, η χρήση της κάθετης διάταξης VFC παρέχει μείωση της ασυμμετρίας των βρόχων υστέρησης και βελτίωση του σχήματος τους που είναι πιο κοντά στο ιδανικό σχήμα, όπως αποδεικνύεται από τη σύγκριση δύναμης - καμπυλών μετατόπισης των αποσβεστήρων τριβής που λήφθηκε για κάθετη διάταξη VFC (Σχήμα 3.11 αριστερά) και τη οριζόντια διάταξη HFC (Σχήμα 3.11 δεξιά). Συγκεκριμένα, το τυπικό σχήμα που παρουσιάζεται από τους βρόχους υστέρησης στην οριζόντια διάταξη HFC οφείλεται στη διαφορετική κατανομή των τάσεων στις πλάκες τριβής όταν ο κόμβος βρίσκεται υπό αρνητική ροπή σε σύγκριση με την κατανομή των τάσεων υπό θετική ροπή. Αυτό έχει επίσης αποδειχθεί από τις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

3.5 Πειραματικές δοκιμές σε εσωτερικούς κόμβους

3.5.1 Διάταξη δοκιμών και πειραματικό πρόγραμμα

Στο Πανεπιστήμιο της Κοϊμπρα δοκιμάστηκαν εσωτερικοί κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων. Οι κόμβοι που δοκιμάστηκαν σε αυτό το πείραμα είναι ίδιοι με αυτούς που δοκιμάστηκαν στο Πανεπιστήμιο του Σαλέρνο ως εξωτερικοί κόμβοι. Αυτό, επομένως, σημαίνει ότι η μόνη διαφορά που εμφανίζεται στην ανακυκλική απόκριση των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων οφείλεται στη διαφορετική συμπεριφορά του εσωτερικού φατνώματος του κόμβου σε διάτμηση. Συγκεκριμένα, υπό τυπική σεισμική κατανομή της ροπής κάμψης που μεταδίδεται από τις δοκούς, η διατμητική δύναμη που αναμένεται στο εσωτερικό φάνωμα του κόμβου είναι διπλάσια από αυτήν των εξωτερικών κόμβων. Επομένως, ο πρωταρχικός στόχος αυτού του πειράματος που διενεργείται στα πλαίσια του ερευνητικού έργου FREEDAM είναι η επαλήθευση των κριτηρίων αξιολόγησης της συμπεριφοράς του εσωτερικού φατνώματος του κόμβου σε διάτμηση, που αποτελεί μέρος της διαδικασίας σχεδιασμού που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του έργου.

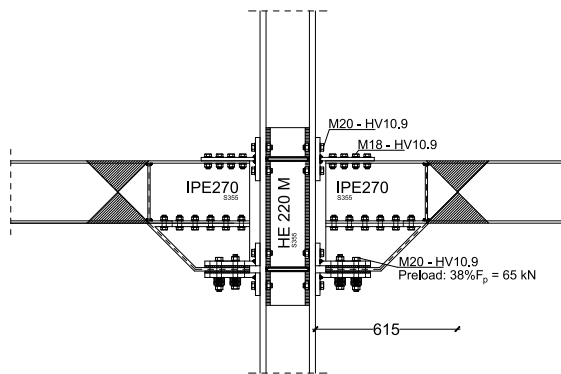
Παρομοίως με τα πειράματα σε εξωτερικούς κόμβους, δοκιμάστηκαν τέσσερις διαφορετικές διατάξεις συνδέσεων FREEDAM, που ποικίλλουν στις διατομές της δοκού και του υποστυλώματος (IPE270/HEM220 και IPE450/HEB500) και στην διάταξη των αποσβεστήρων τριβής (κάθετη ή οριζόντια διάταξη). Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 δοκιμές, όπως περιγράφονται στον Πίνακα 3.3.

Σε όλες τις δοκιμές, χρησιμοποιήθηκε ως υλικό επίστρωσης των πλακών τριβής το υλικό M4 και οι δακτύλιοι δισκοειδών ελατηρίων χρησιμοποιήθηκαν στα συστήματα κοχλιών των αποσβεστήρων. Οι κοχλίες προεντάθηκαν με τη μέθοδο ροπής με δύναμη προέντασης του συστημάτων κοχλιών που προεκτιμήθηκε για κάθε δοκίμιο με βάση τη διαδικασία σχεδιασμού αποσβεστήρων FREEDAM που αναπτύχθηκε βάσει των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Η προένταση κοχλία αντιστοιχεί στην μέση τιμή του συντελεστή τριβής και τη στατιστική του διακύμανση.

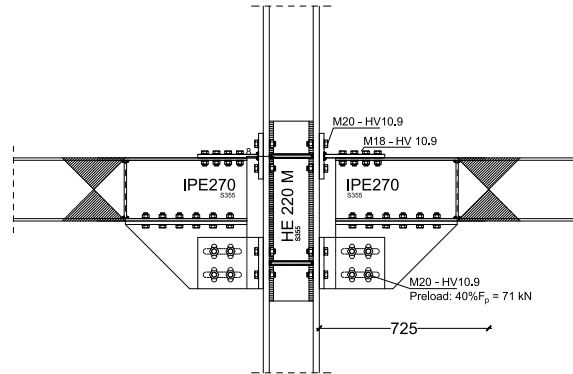
Τα δοκίμια του πειράματος απεικονίζονται στο Σχήμα 3.16. Μία διάταξη της δοκιμής φαίνεται στο Σχήμα 3.17. Το υποστυλώμα δεσμεύεται από μία στήριξη στο κάτω μέρος, ενώ τα άκρα της δοκού δεσμεύονται κατακόρυφα, επιτρέποντας την πλευρική μετατόπιση των δοκιμίων. Το κυκλικό φορτίο εφαρμόστηκε στην κορυφή του υποστυλώματος μέσω ενός επενεργητή, κατά το AISC 341/2010 [37], με μέγιστη επιβαλλόμενη στροφή 50 mrad.

Πίνακας 3.3 : Πειραματικό πρόγραμμα

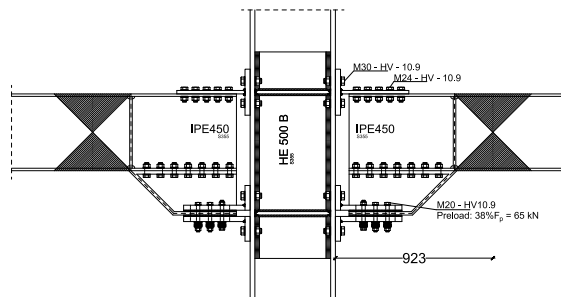
N.	Κωδ. δοκιμής	Διαστάσεις υποστρώματος / δοκού	Τύπος δοκιμής	Διάταξη αποσβεστήρα FREEDAM	Υλικό επί-στρωσης
1	IN270_CYC 1_M4_(1)	HE220M / IPE270	Ανακυκλική	Οριζόντιες πλάκες τριβής	M4
2	IN270_CYC-1_M4_(2)	HE220M / IPE270	Ανακυκλική	Οριζόντιες πλάκες τριβής	M4
3	IN270_CYC-2_M4_(1)	HE220M / IPE270	Ανακυκλική	Κάθετες πλάκες τριβής	M4
4	IN270_CYC-2_M4_(2)	HE220M / IPE270	Ανακυκλική	Κάθετες πλάκες τριβής	M4
5	IN450_CYC-1_M4_(1)	HE500B / IPE450	Ανακυκλική	Οριζόντιες πλάκες τριβής	M4
6	IN450_CYC-1_M4_(2)	HE500B / IPE450	Ανακυκλική	Οριζόντιες πλάκες τριβής	M4
7	IN450_CYC-2_M4_(1)	HE500B / IPE450	Ανακυκλική	Κάθετες πλάκες τριβής	M4
8	IN450_CYC-2_M4_(2)	HE500B / IPE450	Ανακυκλική	Κάθετες πλάκες τριβής	M4



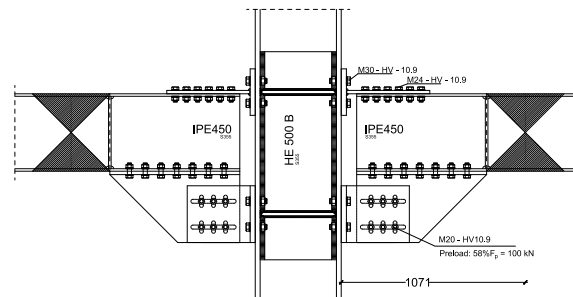
a. Διάταξη 1.1 - HE220M / IPE270 – Οριζόντιες πλάκες τριβής



b. Διάταξη 2.1 - HE220M / IPE270 – Κάθετες πλάκες τριβής

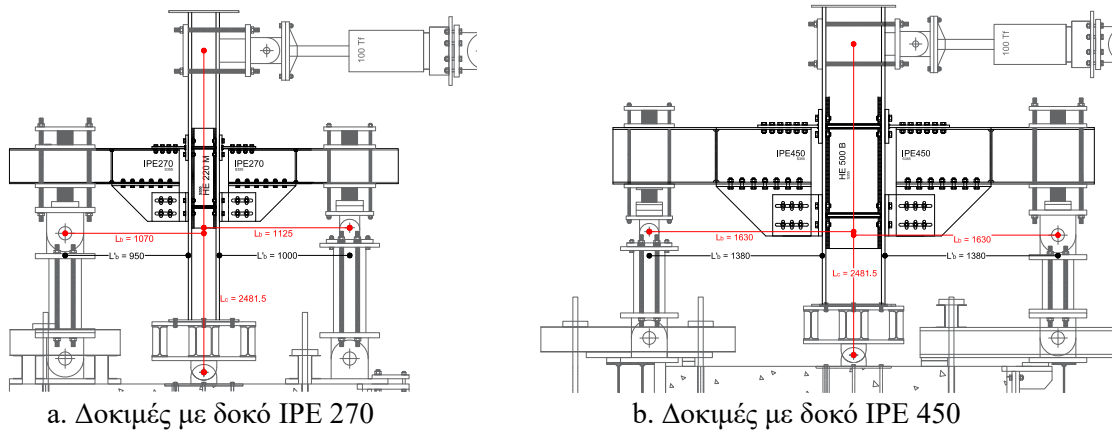


c. Διάταξη 1.2 - HE500B / IPE450 - Οριζόντιες πλάκες τριβής



d. Διάταξη 2.2 - HE500B / IPE450 – Κάθετες πλάκες τριβής

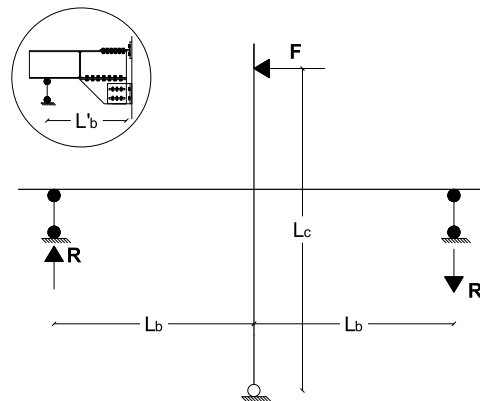
Σχήμα 3.16 : Δοκίμια (εσωτερικοί κόμβοι)



a. Δοκιμές με δοκό IPE 270

b. Δοκιμές με δοκό IPE 450

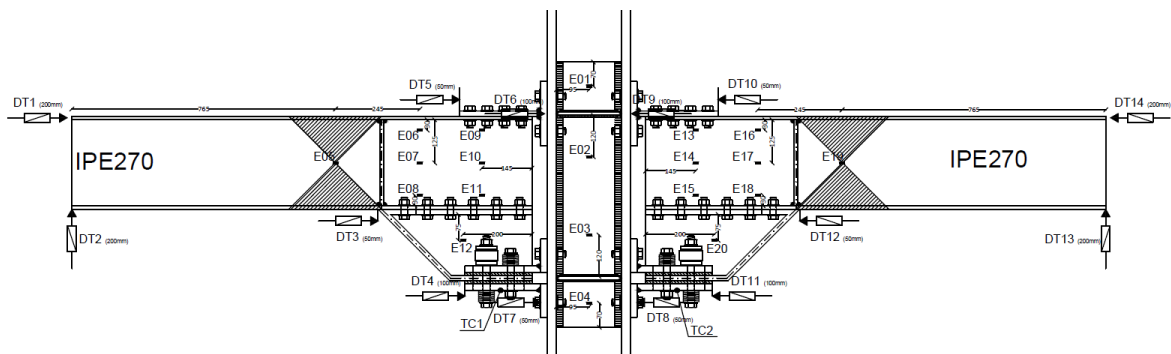
Σχήμα 3.17 : Πειραματική διάταξη για εσωτερικούς κόμβους(διαστάσεις σε mm)



Σχήμα 3.18 : Σκαρίφημα για τον υπολογισμό των αντιδράσεων στη στήριξη στην πειραματική διάταξη

Η καμπτική ροπή που μεταδίδεται στους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων εκτιμήθηκε με την Εξ. (3.1), πολλαπλασιάζοντας την αντίδραση στα άκρα των δοκών, R (Σχήμα 3.18), με το μήκος μεταξύ της στήριξης της δοκού και το πέλμα του υποστυλώματος (L_b στα Σχήματα 3.17 και 3.18), ενώ η στροφή της χορδής της σύνδεσης εκτιμάται διαιρώντας την οριζόντια μετατόπιση του υποστυλώματος στο επίπεδο του επενεργητή, δ με την απόσταση μεταξύ του επενεργητή και την άρθρωση του υποστυλώματος (L_c στα Σχήματα 3.17 και 3.18).

$$M_t = R \times L_b \quad (3.1)$$



Σχήμα 3.19 : Διάταξη οργάνων

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις της δύναμης, των μετατοπίσεων, των παραμορφώσεων, της ροπής και της θερμοκρασίας, οι οποίες απαιτήσαν τη χρήση σημαντικής ποσότητας οργάνων, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.19 για ένα από τα δοκίμια. Αναλυτικά, σε κάθε ένα, χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα όργανα:

- 1 επενεργητής – Εύρος δύναμης: ± 900 kN; Εύρος μετατόπισης: ± 150 mm, Συχνότητα 1Hz με μέγιστη ικανότητα μετατόπισης $+7.02\text{mm}/-5.63\text{mm}$,
- 4 δυναμόμετρα – Μέγιστη ικανότητα 500kN σε θλίψη,
- 15 μορφοτροπείς μετατοπίσεων (DT στο Σχήμα 3.19) - LVDT (εύρος αισθητήρων $n.4 \pm 25\text{mm}$, εύρος αισθητήρων $n.4 \pm 50\text{mm}$),
- 1 μορφοτροπέα στατικής ροπής – ονομαστική ροπή 1000Nm,
- Αισθητήρας μέτρησης θερμοκρασίας (TC στο Σχήμα 3.19),
- 4 δακτυλιοειδή δυναμόμετρα - ικανότητα 350kN,
- 46 επιμηκυνσιόμετρα, (E στο Σχήμα 3.19) - μήκος 6mm, όριο τάσης 5.

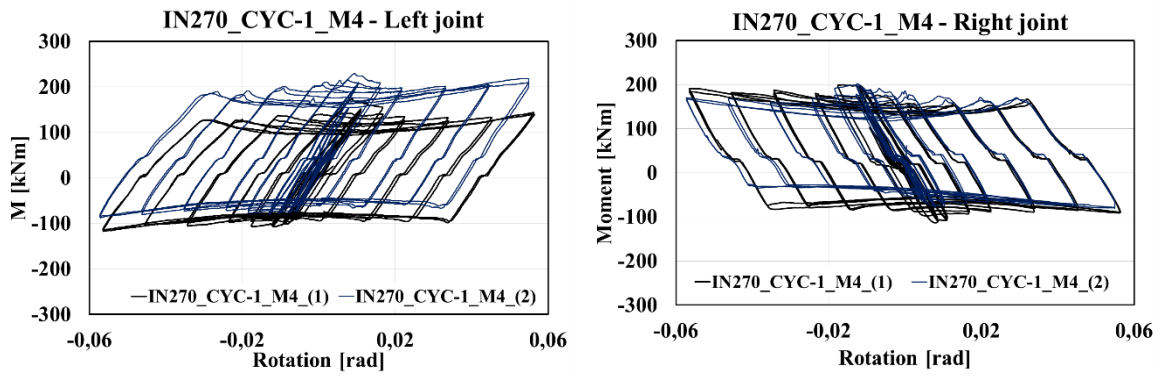
3.5.2 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών

Οι καμπύλες ροπής-στροφής των διαφόρων δοκιμών φαίνονται στο Σχήμα 3.20 για τα δοκίμια με δοκό διατομής IPE270 και στο Σχήμα 3.21 για τα δοκίμια με δοκό διατομής IPE450 αντίστοιχα. Στις καμπύλες, όταν εμφανίζεται θετική ροπή κάμψης, το άνω μέρος του κόμβου είναι σε εφελκυσμό και ο αποσβεστήρας τριβής σε θλίψη. Αντίθετα, όταν εμφανίζεται αρνητική ροπή κάμψης, συμβαίνει το αντίστροφο, με τον αποσβεστήρα τριβής σε εφελκυσμό και το κοχλιωμένο T που συνδέει το άνω πέλμα σε θλίψη. Γενικά, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι αυτοί οι κόμβοι, ανεξάρτητα από το μέγεθος της δοκού και την διάταξη του αποσβεστήρα, παρουσιάζουν παρόμοια ανακυκλική συμπεριφορά, με άκαμπτη συμπεριφορά μέχρι την επίτευξη της αντοχής στατικής τριβής, που ακολουθείται από αρκετά σταθερούς βρόχους υστέρησης καθ' όλη τη διάρκεια του ιστορικού φόρτισης. Άλλωστε, όλα τα άλλα μέρη της σύνδεσης παρέμειναν πρακτικά στην ελαστική περιοχή, όπως φαίνεται από τα μέρη L και T στο Σχήμα 3.22. Επομένως, η χρήση των αποσβεστήρων τριβής είναι σε θέση να εξασφαλίσει την απορρόφηση ενέργειας, αποφεύγοντας τη βλάβη όλων των υπολοίπων μερών του κόμβου.

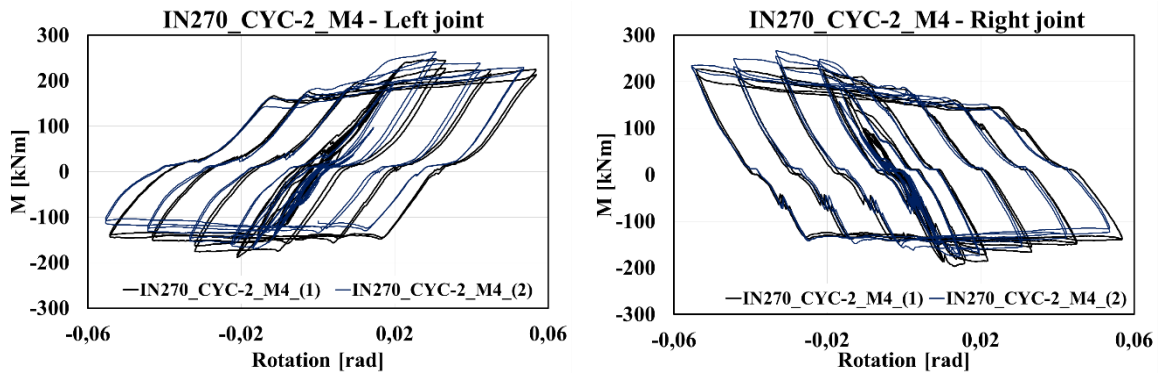
Από τις διαφορετικές καμπύλες ροπής-στροφής μπορεί να παρατηρηθεί μία ασυμμετρία ανάμεσα στην απόκριση του δεξιού και του αριστερού κόμβου λόγω κάποιων ασυμμετριών της πειραματικής διάταξης. Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι τα κέντρα περιστροφής των δύο εκκρεμών που βρίσκονται στα αντίστοιχα άκρα της δοκού δεν είναι τέλεια ευθυγραμμισμένα.

Επίσης, όλα τα δοκίμια παρουσιάζουν ασύμμετρη συμπεριφορά σε απόκριση σε αρνητική και θετική ροπή των κόμβων, που οφείλεται κυρίως στις διαφορετικές παραμορφώσεις που υφίστανται τα T και L κατά την θλίψη και κατά τον εφελκυσμό (Σχήμα 3.23). Αυτό είναι συνήθως εντονότερο στα δοκίμια με οριζόντια διάταξη, όπως έχει ήδη επισημανθεί από τα πειράματα σε εξωτερικούς κόμβους.

Επιπλέον, η υποβάθμιση της αντίστασης τριβής που παρατηρείται μπορεί να εξηγηθεί από την αύξηση της απώλειας προέντασης κοχλιών κατά το ιστορικό ανακυκλικής φόρτισης (Σχήμα 3.24).

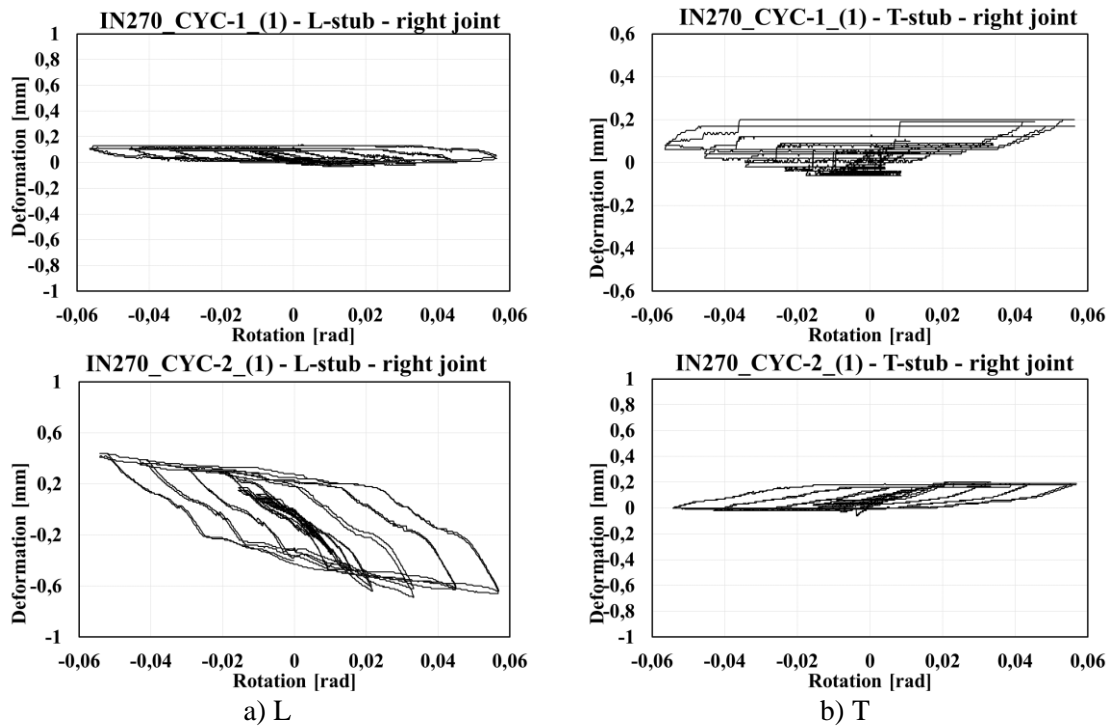


IN270_CYC 1_M4 (HE220M/ IPE270 - Οριζόντιες πλάκες τριβής)



b. IN270_CYC-2_M4 (HE220M/ IPE270 - Κάθετες πλάκες τριβής)

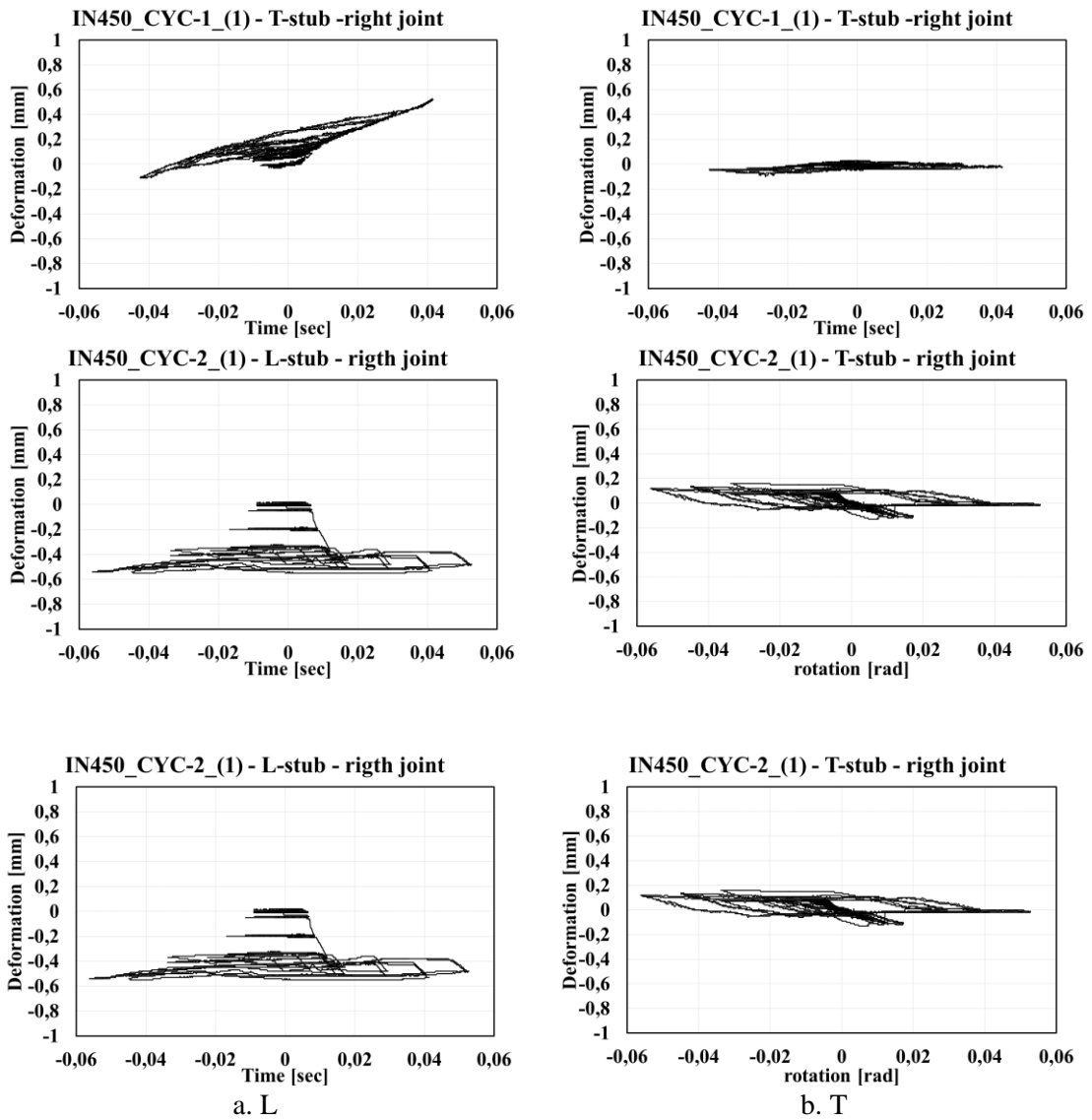
Σχήμα 3.20 : Καμπύλες ροπής-στροφής – Δοκίμια με μικρή δοκό



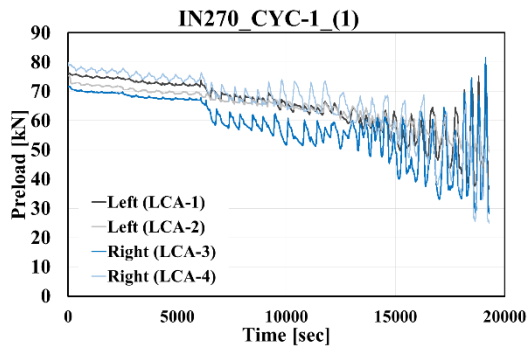
a) L

b) T

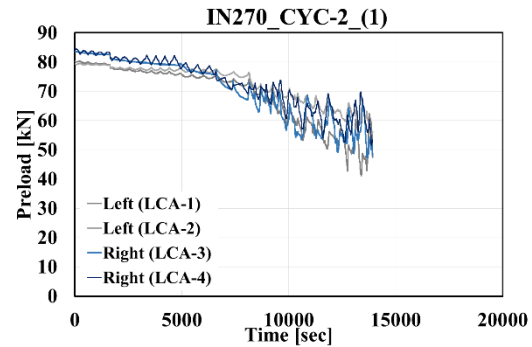
Σχήμα 3.22 : Παραμόρφωση των T και L



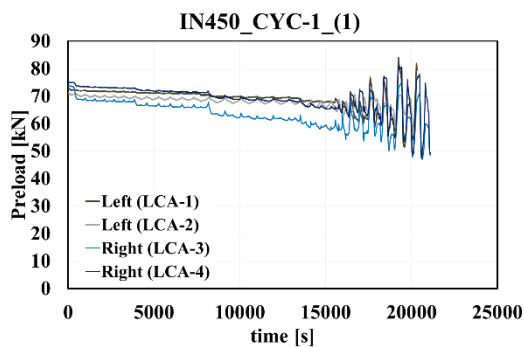
Σχήμα 3.23 : Παραμόρφωση των T και L



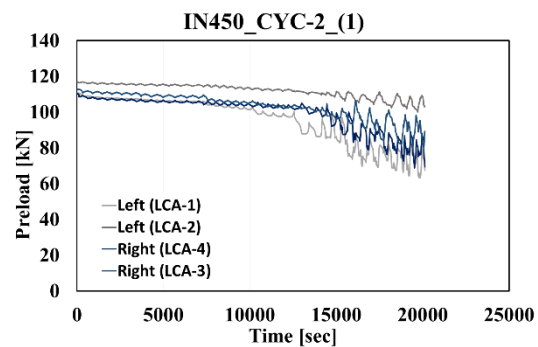
a. IN270_CYC 1_M4 (HE220M/ IPE270 – Οριζόντιες πλάκες τριβής)



b. IN270_CYC-2_M4 (HE220M/ IPE270 – Κάθετες πλάκες τριβής)



c. IN450_CYC 1_M4 (HE500B/ IPE450 – Οριζόντιες πλάκες τριβής)



d. IN450_CYC-2_M4 (HE500B/ IPE450 – Κάθετες πλάκες τριβής)

Σχήμα 3.24 : Δυνάμεις κοχλία

3.6 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, αναφέρθηκαν τα αποτελέσματα του πειραματικού προγράμματος της μελέτης της σεισμικής συμπεριφοράς κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων που είναι εξοπλισμένοι με δύο διαφορετικές διατάξεις συσκευών τριβής. Συγκεκριμένα, με βάση τα κύρια αποτελέσματα από τις προηγούμενες εργασίες του έργου (μηχανικές παράμετροι των υλικών τριβής, ρόλος του δακτυλίου Belleville, επιρροή της απώλειας προέντασης κοχλιών), σχεδιάστηκαν και δοκιμάστηκαν 16 κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων στο Εργαστήριο STRENGTH του Πανεπιστημίου του Σαλέρνο (εξωτερικοί κόμβοι) και στο Πανεπιστήμιο της Κοϊμπρα (εσωτερικοί κόμβοι).

Βάσει των αποτελεσμάτων, μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Δοκιμάστηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις: i) με τον αποσβεστήρα τριβής τοποθετημένο στο οριζόντιο επίπεδο παράλληλα στο πέλμα της δοκού (διάταξη HFC) και ii) με τον αποσβεστήρα τοποθετημένο ώστε οι πλάκες τριβής να είναι ευθυγραμμισμένες με το επίπεδο του κορμού της δοκού, δηλαδή σε κάθετη διάταξη (VFC). Η διαφορά από άποψη συνολικής απόκρισης κόμβου είναι σχετικά μικρή, υποδηλώνοντας ότι και οι δύο διατάξεις μπορούν να εφαρμοστούν αποτελεσματικά στην πράξη. Ωστόσο, ο κόμβος με τον αποσβεστήρα τριβής σε διάταξη VFC παρείχε μία πιο σταθερή ανακυκλική συμπεριφορά και χαμηλότερη ασυμμετρία της ανακυκλικής συμπεριφοράς,

- Σε όλες τις περιπτώσεις αναλύσεων, η συμπεριφορά που προέκυψε χαρακτηρίστηκε από βρόχους υστέρησης με περίπου ορθογώνιο σχήμα χωρίς καθόλου στένωση, όπως αναμενόταν, και με χαμηλή υποβάθμιση της ικανότητας απορρόφησης ενέργειας, της αντοχής και της ακαμψίας,
- Οι τοπικές μετρήσεις που έγιναν κατά τη διάρκεια των δοκιμών έδειξαν ότι, σε συμφωνία με τα κριτήρια σχεδιασμού, η απορρόφηση ενέργειας παρέχεται μόνο από τους αποσβεστήρες τριβής, ενώ τα μέρη χωρίς δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας (δοκός, T, L) παραμένουν πρακτικά άθικτα.

Επομένως, τα αποτελέσματα του συνόλου των πειραμάτων αποτελούν μία αποτελεσματική προεπιλογή των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων FREEDAM και των αντίστοιχων κριτηρίων σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, η προεπιλεγμένη διαδικασία σχεδιασμού θα καθορίσει όλες τις τεχνολογικές λεπτομέρειες και απαιτήσεις που πρέπει να τηρηθούν ώστε να επιτευχθούν τα προκαθορισμένα επίπεδα απόδοσης, ακολουθώντας την ίδια μεθοδολογία που παρέχεται από την «μέθοδο των συστατικών μερών» του EC3 [38].

3.7 Βιβλιογραφία

- [1] V. Piluso, G. Rizzano: “Experimental analysis and modelling of bolted T-stubs under cyclic loads”, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, pp. 655–669, 2008.
- [2] M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: “Experimental analysis of innovative dissipative bolted double split tee beam-to-column connections”, *Steel Construction*, Vol. 4, pp. 53-64, 2011.
- [3] M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: “Free from damage beam-to-column joints: Testing and design of DST connections with friction pads”, *Engineering Structures*, Vol. 85, pp. 219-233, 2015.
- [4] M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: “Experimental Analysis of Friction Materials for supplemental damping devices”. *Construction and Building Materials*, Vol.65, pp. 159-176, 2014.
- [5] M. Latour, G. Rizzano: “Monotonic Modelling, Cyclic Behaviour and Fatigue Life of Dissipative T-stubs”, ICASS 2009, Hong Kong, 2009.
- [6] M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: “Cyclic behaviour of Friction Dissipative Double Split Tee Connections”, STESSA 2011, Santiago de Chile, 2011.
- [7] C.E. Grigorian, T.S. Yang, E.P. Popov: “Slotted bolted connection energy dissipators”, *Earthquake Spectra*. Vol.9, No.3, pp.491-504, 1993.
- [8] A. Sato, K. Kimura, K. Suita, K. Inoue: “Cyclic test of high strength steel beam-to column connection composed with knee-brace damper and friction damper connected by high strength bolts”, *Proceedings of the SEEBUS 2009*. Kyoto, Japan, 2009.
- [9] E.M. Guneyisi, M. D’Aniello, R. Landolfo: “Seismic upgrading of steel moment-resisting frames by means of friction devices”, *Open Construction and Building Technology Journal*, Vol. 8(Suppl 1: M9), pp.289–99, 2014.
- [10] M. Taghi Nikoukala, S.R. Mirghader, K.M. Dolatshahi: “Analytical study of moment resisting frames retrofitted with shear slotted bolted connection”. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 141, 2015:04015019.
- [11] V. Piluso, R. Montuori, M. Troisi: “Innovative structural details in MR-frames for free from damage structures”. *Mechanism Research Communications*, Vol.58, pp.146-156, 2014.

- [12] C. Christopoulos, A. Filiatrault: "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation", Pavia: IUSS PRESS, 2006.
- [13] T.T. Soong, Jr B.F. Spencer: "Supplemental Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice", Engineering Structures. Vol.24, pp.243-259, 2002.
- [14] G.A. MacRae, G.C. Clifton, H. Mackinven, N. Mago, J. Butterworth, S. Pampanin: "The sliding hinge joint moment connection", Bulletin of New Zealand society for earthquake engineering, Vol.43, n.3, September 2010.
- [15] S. Ramhormozian, G.C. Clifton, G.A. MacRae: "The Asymmetric Friction Connection with Belleville springs in the Sliding Hinge Joint", NZSEE Conference, 2014.
- [16] G.C. Clifton, J.W. Butterwoth: "Moment-resisting steel framed seismic-resisting systems with semi-rigid connections", 12th WCEE, Auckland, New Zealand.
- [17] G.C. Clifton, R. Zaki, J.W. Butterwoth: "Damage-resistance steel framed seismic-resisting systems", 13th WCEE, Vancouver, Canada, 2004.
- [18] J.C. Golondrino, G. MacRae, J. Chase, G. Rodgers, G.C. Clifton: "Velocity effects on the behavior of asymmetrical friction connections (AFC)", 8th STESSA Conference, Shanghai, China, July 1-3, 2015.
- [19] H. Khoo, G.C. Clifton, J. Butterworth, G. MacRae, G. Ferguson: "Influence of steel shim hardness on the sliding hinge joint performance", Journal of Constructional Steel Research, Vol.72, pp. 119-12, 2012.
- [20] S. Ramhormozian, G.C. Clifton, H. Nguyen, K. Cowle: "Determination of the required part-turn of the nut with respect to the number of free threads under the loaded face of the nut in fully tensioned high strength friction grip property class 8.8 bolts", Steel Innovations Conference, 2015.
- [21] H. Khoo, G.C. Clifton, J. Butterworth, G. MacRae: "Experimental Study of Full-Scale Self-Centering Sliding Hinge Joint Connections with Friction Ring Springs", Journal of Earthquake Engineering. September Vol. 17, pp. 972-997, 2013.
- [22] H. Khoo, G.C. Clifton, G. Macrae, S. Ramhormozian: "Proposed design models for the asymmetric friction connection", Earthquake Engineering & Structural Dynamics. Vol. 44(8), pp.1309-1324, 2014.
- [23] H. Khoo, G.C. Clifton, J. Butterworth, G. MacRae, S. Gledhill, G. Sidwell: "Development of the self-centering Sliding Hinge Joint with friction ring springs", Journal of Constructional Steel Research, Vol.78, pp.201-211, 2012.
- [24] J. Borzouie, G. MacRae, J. Chase: "Cyclic Performance of Asymmetric Friction Connections", The Bridge and Structural Engineer, March 45(1), 2015.
- [25] G. Ferrante Cavallaro, A.B. Francavilla, M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: "Cyclic response of low yielding connections using different friction materials", Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 114, pp. 404-423, 2018.
- [26] G. Ferrante Cavallaro, A.B. Francavilla, M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: "Standardised friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability", Journal of Constructional Steel Research, Vol.41, pp.66-81, 2018.
- [27] M. Latour, M. D'Aniello, M. Zimbru, G. Rizzano, V. Piluso, R. Landolfo: "Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints", Soil Dynamics and earthquake Engineering, Vol. 115, pp. 66-81, 2018.
- [28] G. Ferrante Cavallaro, A.B. Francavilla, M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: "Experimental behaviour of innovative thermal spray coating materials for FREEDAM joints". Composites Part B Engineering, Vol. 115, pp.289-299, 2017.
- [29] M. Latour, V. Piluso, G. Rizzano: "Experimental analysis of beam-to-column joints equipped with sprayed aluminium friction dampers", Journal of Constructional Steel Research, 146, pp. 33-48, 2018.

- [30] A. Lemos, L.S. da Silva, M. Latour, G. Rizzano: “Numerical modelling of innovative DST steel joint under cyclic loading”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (3), pp. 687-701, 2018.
- [31] M. D’Antimo, M. Latour, G. Rizzano, J.F. Demonceau J.P. Jaspart: “Preliminary study on beam-to-column joints under impact loading”, *Open Construction and Building Technology Journal*, 12, pp. 112-123.arch, 141, pp. 145-155, 2018.
- [32] M. Zimbru, M. D’Aniello, A. De Martino, M. Latour, G. Rizzano, V. Piluso: “Investigation on friction features of dissipative lap shear connections by means of experimental and numerical tests”, *Open Construction and Building Technology Journal*, 12, pp. 154-169, 2018.
- [33] E. Nastri, M. D’Aniello, M. Zimbru, S. Streppone, R. Landolfo, R. Montuori, V. Piluso: “Seismic response of steel Moment Resisting Frames equipped with friction beam-to-column joints”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 119, pp. 144-157, 2019.
- [34] V. Piluso, R. Montuori, E. Nastri, A. Paciello: “Seismic response of MRF-CBF dual systems equipped with low damage friction connections”, *Journal of Constructional Steel Research*, 154, pp. 263-277, 2019.
- [35] F. Di Lauro, R. Montuori, E. Nastri, V. Piluso: “Partial safety factors and overstrength coefficient evaluation for the design of connections equipped with friction dampers”, *Engineering Structures*, 178, pp. 645-655, 2019.
- [36] A.F. Santos, A. Santiago, G. Rizzano: “Experimental response of friction dampers under different loading rates”, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 132, pp.1-14, 2019.
- [37] ASCE 341-2010, *Seismic provisions for structural steel buildings*. Chicago, 2010.
- [38] CEN, 2005b. “Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints”. s.l.:s.n.

4 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων των αποσβεστήρων και συνδέσεων FREEDAM

4.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών

C3D8R	: 8-Node linear brick reduced integration – γραμμικό στοιχείο 8 κόμβων με μειωμένη ολοκλήρωση
FE	: Finite element – πεπερασμένο στοιχείο
FEA	: finite element analysis – ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων
FEM	: finite element model – μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων
FFD	: FREEDAM Friction Device – συσκευή τριβής FREEDAM
FREEDAM	: FREE from DAMage
PEEQ	: equivalent plastic strain – ισοδύναμη πλαστική παραμόρφωση

4.2 Πίνακας Συμβόλων

Πεζοί λατινικοί χαρακτήρες

d_b	: Διάμετρος κοχλία
d_i	: Μετατόπιση κατά τη δοκιμή
d_{total}	: Αθροιστική μετατόπιση
f_y	: Όριο διαρροής
f_u	: Εφελκυστική αντοχή
f_{ub}	: Εφελκυστική αντοχή κοχλία
k	: Συντελεστής σύσφιξης
k_b	: Ακαμψία κοχλία
n_b	: Ποσοστό της σύσφιξης κοχλία σε σχέση με τη πλήρη δύναμη προέντασης ($F_{p,c}$) όπως ορίζεται στον EC3-1-8
n_{bolts}	: Πλήθος κοχλιών
$n_{surfaces}$: Πλήθος επιφανειών τριβής

Κεφαλαίοι λατινικοί χαρακτήρες

$A_{effective}$: Επιφάνεια τμήματος του κορμού με σπείρωμα
A_{gross}	: Ολική επιφάνεια διατομής του κορμού του κοχλία
E	: Πραγματικό όριο ελαστικότητας του χάλυβα
F	: Αντίδραση που μετράται στο σημείο εφαρμογής των ιστορικών μετατόπισης
$F_{slip,i}$: Δύναμη ολίσθησης κατά τη δοκιμή
$F_{preload}$: Δύναμη προέντασης
M	: Ροπή κάμψης στον άξονα του υποστυλώματος
$M^{(+)}$: Θετική ροπή κάμψης
$M^{(-)}$: Αρνητική ροπή κάμψης
N_b	: Δύναμη προέντασης σχεδιασμού των κοχλιών
N_{cell}	: Ένδειξη προέντασης από το δυναμόμετρο μορφής δακτυλίου

Πεζοί ελληνικοί χαρακτήρες

δ	: Μετατόπιση οριζόντιου αποσβεστήρα
----------	-------------------------------------

θ	: Στροφή χορδής
$\theta_{connection}$: Η στροφή της σύνδεσης που εκτιμάται βάσει της οριζόντιας μετατόπισης του αποσβεστήρα
μ_{avg}	: Μέση τιμή του συντελεστή δυναμικής τριβής
$\mu_{dyn 5\%}$: Ποσοστιαίο 5% του συντελεστή δυναμικής τριβής
$\mu_{dyn 95\%}$: Ποσοστιαίο 95% του συντελεστή δυναμικής τριβής
$\mu_{effective}$: Ισοδύναμος συντελεστής τριβής
μ_{actual}	: Πραγματικός συντελεστής τριβής

Κεφαλαίοι ελληνικοί χαρακτήρες

$\Gamma^{(+)}$: Μεταβολή της θετικής ροπής κάμψης με την μεταβολή παραμέτρου
$\Gamma^{(-)}$: Μεταβολή της αρνητικής ροπής κάμψης με την μεταβολή παραμέτρου
$\Delta M^{(+/-)}/M^{(-)}$: Η μεταβολή μεταξύ της ικανότητας αρνητικής και θετικής ροπής κάμψης

4.3 Εισαγωγή

Τα χαλύβδινα πλαίσια ροπής (Moment Resisting Frames – MRF) είναι πλάστιμα δομικά συστήματα με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας που μπορούν να εγγυηθούν άριστη σεισμική απόδοση εάν είναι σωστά λεπτομερώς σχεδιασμένα. Ωστόσο, η εκμετάλλευση της μεγάλης πηγής πλαστιμότητάς τους συνεπάγεται την αποδοχή σοβαρής βλάβης στα κύρια μέρη το οποίο συνδέεται αναπόφευκτα με μεγάλες παραμένουσες μετατοπίσεις. Ως άμεσο αποτέλεσμα, οι κατασκευές που παρουσιάζουν εξαιρετική σεισμική συμπεριφορά ενδέχεται, μετά από ισχυρό σεισμό, να απαιτούν δαπανηρές ανακατασκευές και επισκευές, μη πρακτικές και μη βιώσιμες, ώστε τελικά η κατεδάφιση να είναι ευνοϊκότερη.

Οι πρόσφατοι σεισμοί στη Νέα Ζηλανδία (π.χ. ξεκινώντας από το Christchurch 2010) υπογράμμισαν αυτό το ζήτημα. Επομένως, η έρευνα σε νέες τεχνικές για την πρόληψη ή τον περιορισμό των δομικών βλαβών στα κτίρια έχει αποκτήσει σημασία. Η παγκόσμια τάση στρέφεται προς την ανάπτυξη και την εφαρμογή αντισεισμικών συστημάτων χαμηλής βλάβης, προκειμένου να μειωθούν οι οικονομικές επιπτώσεις των σεισμών, έτσι ώστε τυχόν μικρές βλάβες να μπορούν να επιδιορθωθούν εύκολα και φθηνά, αποτρέποντας έτσι την κατάρρευση του κτιρίου και διασφαλίζοντας τη γρήγορη λειτουργία του.

Ο κύριος στόχος του έργου FREEDAM ήταν να αναπτύξει και να ελέγξει την εγκυρότητα νέων συνδέσεων με αποσβεστήρες τριβής που αποτρέπουν τη ζημιά στα συνδεδεμένα μέρη και απορροφούν την ενέργεια μέσω της ολίσθησης συσφιγμένων χαλύβδινων μερών και μίας πλάκας τριβής.

Ένα ευρύ φάσμα δοκιμών και αναλυτικών μελετών πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο του έργου FREEDAM, τα σχετικά αποτελέσματα του οποίου περιγράφονται σε άλλα κεφάλαια του παρόντος (βλ. Κεφάλαιο 2 για την ανάπτυξη αποσβεστήρων FREEDAM, Κεφάλαιο 3 για την ανάπτυξη συνδέσεων FREEDAM και Κεφάλαιο 6 για ψευδο-δυναμική σεισμική δοκιμή). Ωστόσο, με βάση μια κριτική ανασκόπηση της τελευταίας τεχνολογίας, εντοπίστηκαν οι κύριες πτυχές που χαρακτηρίζουν την συμπεριφορά του κόμβου, και προκειμένου να χαρακτηριστεί η τοπική απόκριση των συσκευών καθώς και η αλληλεπίδρασή τους με τα άλλα μέρη της σύνδεσης και τα δομικά μέλη, πραγματοποιήθηκε μια ολοκληρωμένη και εκτεταμένη παραμετρική μελέτη βάσει προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων. Πράγματι, ένα ευρύ φάσμα μελετών έδειξε ότι οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την πρόβλεψη

της μη γραμμικής συμπεριφοράς των κοχλιωτών κόμβων, δίνοντας μια ακριβή περιγραφή των διαδρομών φόρτισης στα μέρη των κόμβων.

Επομένως, στο πλαίσιο του έργου πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές σειρές αριθμητικών αναλύσεων, με σκοπό, αφενός να ερευνηθούν πλήρως τη συμπεριφορά των διεπαφών τριβής, και αφετέρου να αναλύσουν τα αποτελέσματα όταν εφαρμόζονται σε κόμβους με δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας ώστε να διερευνηθεί η τοπική τους απόκριση.

Οι στόχοι αυτής της μελέτης είναι οι εξής:

- Ανάπτυξη μίας στρατηγικής προσομοίωσης για σύνθετα προβλήματα τριβής. Η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να περιγράψει τη συμπεριφορά τριβής του αποσβεστήρα που είναι εγκατεστημένος στη κοχλιωτή σύνδεση.
- Προσομοίωση των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων που είναι εξοπλισμένοι με τη συσκευή τριβής, υπό μονοτονικές και ανακυκλικές συνθήκες φόρτισης.
- Χαρακτηρισμός της μηχανικής απόκρισης σε τοπικό επίπεδο για την ανάπτυξη αποτελεσματικών κανόνων σχεδιασμού.

Όλα αυτά τα θέματα περιγράφονται και αναλύονται σε αυτό το Κεφάλαιο, όπου συνοψίζονται τα αποτελέσματα όλων των προσομοιώσεων πεπερασμένων στοιχείων που εκτελούνται στο έργο FREEDAM. Το κεφάλαιο οργανώνεται σε τρία κύρια μέρη, συγκεκριμένα: 1) την περιγραφή και την ανάλυση της προσομοίωσης των αποσβεστήρων FREEDAM και τα σχετικά χαρακτηριστικά της τοπικής συμπεριφοράς, 2) την περιγραφή και την ανάλυση της σεισμικής απόκρισης των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων FREEDAM, 3) την ανάλυση πιθανών διατάξεων σχεδιασμού που προκύπτουν από την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων.

4.4 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων των αποσβεστήρων FREEDAM

Οι πρωταρχικοί στόχοι των αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων ήταν η αξιολόγηση των επιπτώσεων της αλληλεπίδρασης μεταξύ των κοχλιών και των επιπτώσεων της κατανομής δυνάμεων κάτω από τις κεφαλές των κοχλιών.

Μετά την επαλήθευση των μοντέλων μέσω των πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές προσομοιώσεις για τη διερεύνηση της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς των δοκιμών διάτμησης που σχεδιάστηκαν για να ελεγχθεί η απόκριση των αποσβεστήρων τριβής. Οι προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων επέτρεψαν την αξιολόγηση των συντελεστών τριβής των οκτώ διαφορετικών υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως διεπιφάνειες, αξιολογώντας επίσης την ικανότητά τους να αντέχουν σε ιστορικά ανακυκλική φόρτιση από την άποψη της μείωσης ενέργειας και αντοχής. Τα μοντέλα συγκρίθηκαν με τα πειραματικά αποτελέσματα, αποδεικνύοντας την ακρίβειά τους στην προσομοίωση της συμπεριφοράς των συνδέσεων τριβής διάτμησης, ενώ επίσης έδειξαν την επίδραση των διαφορετικών προσεγγίσεων μοντέλων στα προσομοιωμένα δεδομένα.

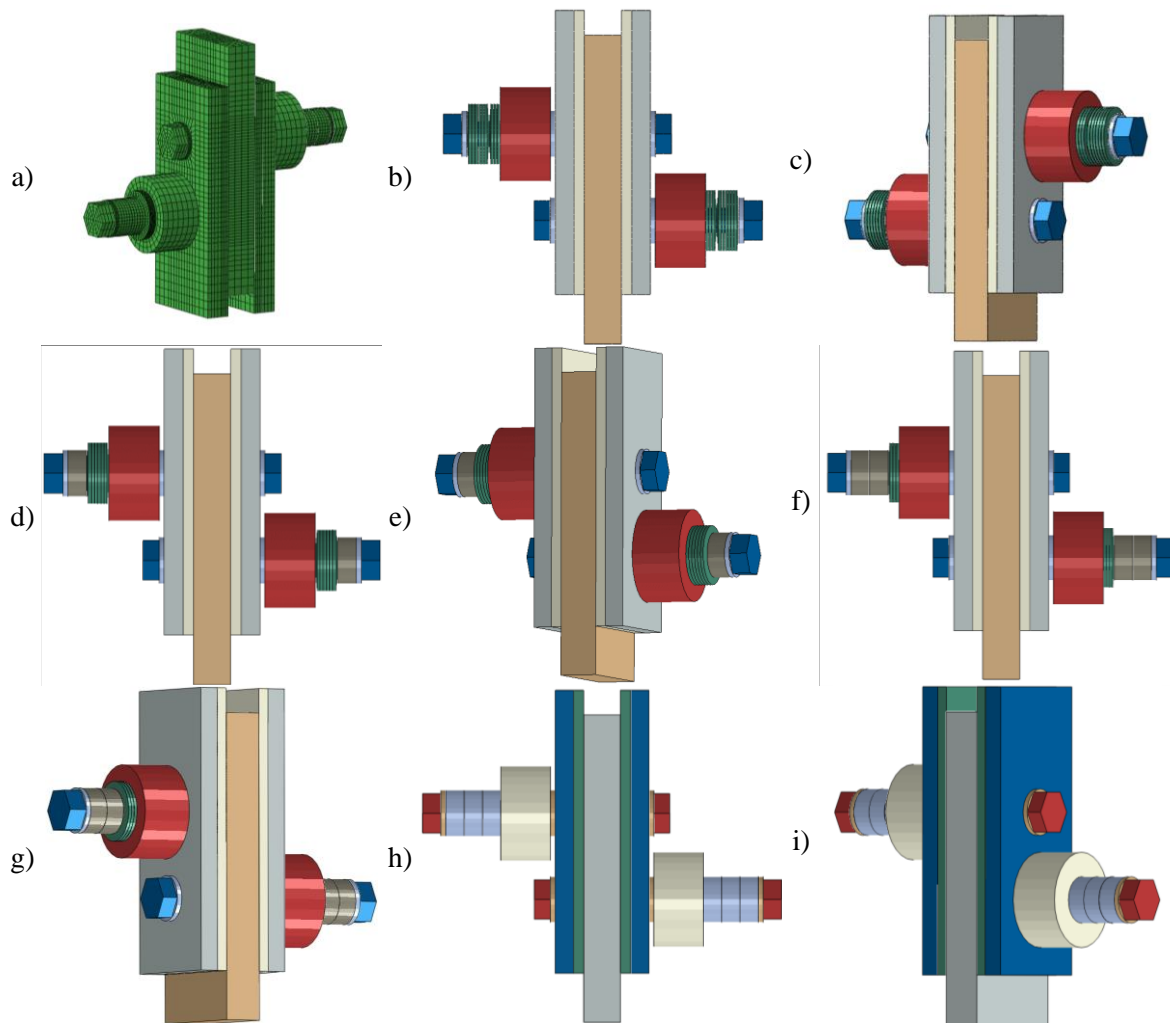
4.4.1 Παραδοχές προσομοίωσης

Τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (Finite element models – FEM) αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό ABAQUS v.6.14 [2]. Τα στοιχεία της γεωμετρίας των

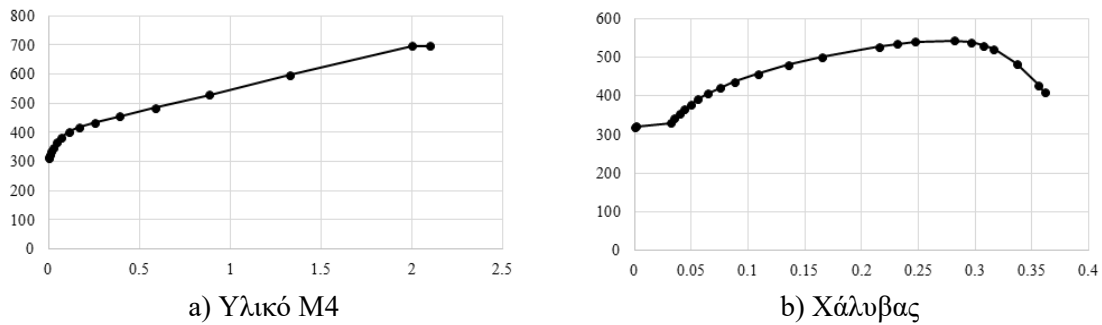
αριθμητικών μοντέλων ήταν ονομαστικά πανομοιότυπα με εκείνα των δοκιμών του έργου FREEDAM (Σχήμα 4.1). Συγκεκριμένα, προσομοιώθηκαν υποφορείς συσκευών τριβής FREEDAM (FREEDAM Friction Device – FFD) με διαφορετικό πλήθος δισκοειδών ελατηρίων (9, 6, 3 και 0), χωρίς να συμπεριληφθεί η γεωμετρία του σταθερού μέρους, καθώς δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα, προκειμένου να μειωθεί το υπολογιστικό κόστος (Σχήμα 4.1 b-i).

Το στερεό πεπερασμένο στοιχείο τύπου C3D8I (γραμμικό 8 κόμβων, ασυμβίβαστος τρόπος τυποποίησης) υιοθετήθηκε για όλες τις χαλύβδινες πλάκες και τους κοχλίες υψηλής αντοχής. Η επιλογή του πεπερασμένου στοιχείου βασίστηκε στην ικανότητά του να αποφεύγει το φαινόμενο διατμητικού κλειδώματος που μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την αρχική ακαμψία σύνδεσης, σε αντίθεση με το στοιχείο C3D8R.

Οι ιδιότητες χάλυβα για πλάκες προσομοιώθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις ονομαστικές ελαστικές ιδιότητες, ενώ η μη γραμμική συμπεριφορά προσομοιώθηκε με βάση το κριτήριο διαρροής von Mises. Η πλαστική κράτνυση αναπαραστάθηκε χρησιμοποιώντας μη γραμμική κινηματική και ιστροπική κράτνυση. Η πλαστιμότητα μετάλλου εξετάστηκε επίσης για την επίστρωση M4. Οι καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης που χρησιμοποιήθηκαν για υλικό M4 και τις χαλύβδινες πλάκες δίνονται στο Σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1 : Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων δοκιμών διάτμησης: a) παράδειγμα πλέγματος, b-i) υποφορείς με διάφορα πλήθη δισκοειδών ελατηρίων



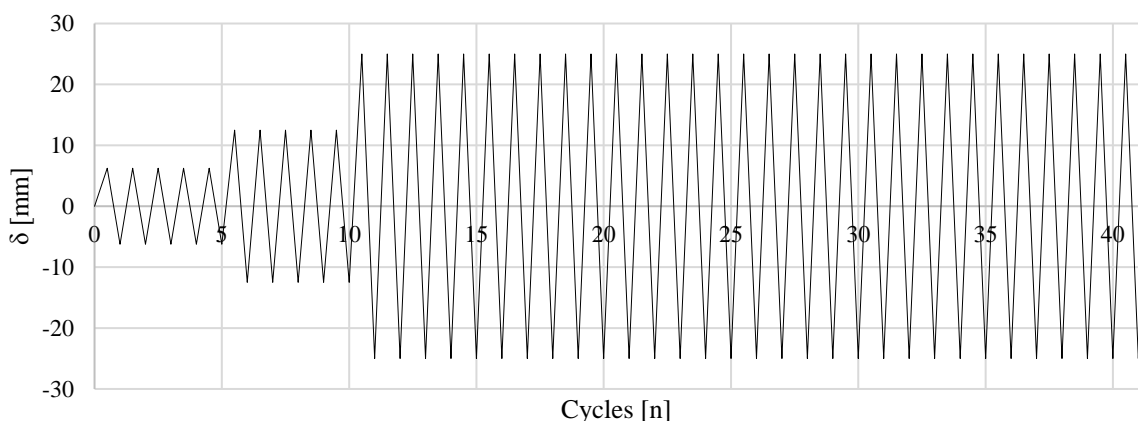
Σχήμα 4.2 : Πραγματικές μη-γραμμικές ιδιότητες τάσεων-παραμορφώσεων

Οι κοχλίες προσομοιώθηκαν με τη δημιουργία πλέγματος ενός στερεού κυλίνδρου που έχει την ονομαστική κυκλική ολική επιφάνεια του κοχλίου, και οι καμπύλες πραγματικών τάσεων-πραγματικών παραμορφώσεων εξήχθησαν από τα [3, 4].

Όλες οι πιθανές αλληλεπιδράσεις (κεφαλή κοχλίου με εξωτερική πλάκα, κορμός κοχλίου με την αντίστοιχη σπλή κοχλίου, πλάκες σε επαφή) προσομοιώνονται με τη μέθοδο “Surface to Surface contact” με διατύπωση πεπερασμένης ολίσθησης. Λαμβάνονται υπόψη τόσο η επαφτομενική όσο και η κάθετη συμπεριφορά, η πρώτη χρησιμοποιώντας μία διατύπωση μείωσης (“Penalty”) λόγω τριβής σε συνδυασμό με «δεδομένα εξαρτώμενα από το ρυθμό ολίσθησης» με κατάλληλη κλίμακα για ρητές αναλύσεις, ενώ η δεύτερη χρησιμοποιεί τη διατύπωση “Hard-Contact”. Οι περιορισμοί “tie” χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση του δεσμού μεταξύ της επίστρωσης M4 και της χαλύβδινης σφήνας.

Η σύσφιξη των κοχλίων προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τη λειτουργία “Bolt load” που διατίθεται στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων και εισάχθηκε η τιμή προέντασης σχεδιασμού. Η σύσφιξη εφαρμόστηκε σε ένα διακριτό βήμα πριν από την εφαρμογή του πρωτοκόλλου φόρτισης.

Οι εξωτερικές στηρίξεις προσομοιώθηκαν με εξάρτηση των κόμβων που ανήκουν στο ακραίο τμήμα της εσωτερικής πλάκας της συσκευής σε σημεία αναφοράς (reference points - RP). Το ιστορικό μετατόπισης επιβλήθηκε στο σημείο αναφοράς (RP) που βρίσκεται στο ένα άκρο της συσκευής. Το πρωτόκολλο φόρτισης και ο αριθμός κύκλων των αναλύσεων ήταν ίσα με αυτά που επιβλήθηκαν πειραματικά (π.χ. βλ. Σχήμα 4.3).

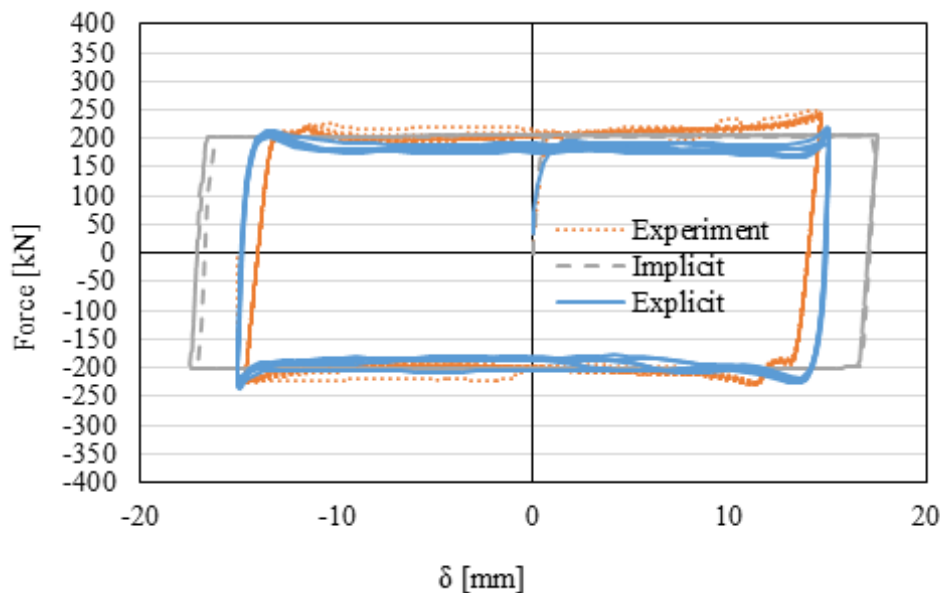


Σχήμα 4.3 : Ιστορικό μετατοπίσεων UT-NV

Οι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο Σαλέρνο στα δοκίμια διάτμησης με και χωρίς δισκοειδή ελατήρια υπογράμμισαν τη μεγάλη ποσότητα θερμότητας που αναπτύχθηκε λόγω της τριβής σε μεγάλη αθροιστική μετατόπιση. Δεδομένου ότι η

θερμότητα που προκαλείται από τη τριβή μπορεί να επηρεάσει την υστερητική συμπεριφορά των κόμβων τριβής λόγω θερμικής διαστολής, έχουν πραγματοποιηθεί συνδυασμένες θερμο-μηχανικές αναλύσεις. Προκειμένου να αναπαραχθεί η μεταβολή της θερμοκρασίας και η διάδοση λόγω θέρμανσης που προκαλείται από τριβή, λήφθηκαν επίσης υπόψη οι θερμικές ιδιότητες. Η ειδική θερμότητα “c” ορίστηκε ίση με $4.52E^{+8}$ mJ/ton/°C, η θερμική διαστολή α_L θεωρήθηκε ίση με $1.26E^{-5}$ mm/mm/°C και η θερμική αγωγιμότητα “k” ίση με 48 mW/mm/°C.

Διεξήχθησαν τόσο πεπλεγμένες οιονεί στατικές όσο και ρητές συνδυασμένες θερμοδυναμικές αναλύσεις, προκειμένου να διερευνηθεί η υπολογιστική αποδοτικότητα και ακρίβεια αυτών των τύπων ανάλυσης. Ένα παράδειγμα που δείχνει τη διαφορά μεταξύ των τύπων ανάλυσης φαίνεται στο Σχήμα 4.4. Πρέπει να σημειωθεί ότι και οι δύο τύποι ανάλυσης είναι αποτελεσματικοί για την προσομοίωση της συνολικής συμπεριφοράς των συνδέσεων τριβής. Γενικά, οι πεπλεγμένες αναλύσεις παρέχουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα από τις ρητές. Από την άλλη πλευρά, οι ρητές αναλύσεις παρέχουν πλεονεκτήματα όσον αφορά την υπολογιστική αποδοτικότητα. Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τον μέσο υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για τη διεξαγωγή κάθε τύπου ανάλυσης. Μπορεί να διαπιστωθεί εύκολα ότι ο πεπλεγμένος αλγόριθμος επίλυσης (solver) έχει μεγαλύτερες απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ.



Σχήμα 4.4 : Πειραματικές (Experimental) σε σχέση με πεπλεγμένες (Implicit) και ρητές (Explicit) καμπύλες δύναμης-μετατόπισης

Πίνακας 4.1: Σύγκριση μεταξύ πεπλεγμένης και ρητής ανάλυσης

Αλγόριθμος επίλυσης	Μέσος χρόνος ανάλυσης	Παρατηρήσεις αποτελεσμάτων
Πεπλεγμένος	24 ώρες	Και οι δύο αλγόριθμοι επίλυσης FE δίνουν επιτυχώς αποτελέσματα ανάλογα των πειραματικών
Ρητός	6 ώρες	

Πίνακας 4.2: Ονομασία δοκιμών με δισκοειδή ελατήρια

Πλήθος δισκοειδών ελατηρίων	M6	M4
9 DS	NV 21	NV 17
6 DS	NV 22	NV 18
3 DS	NV 23	NV 19
0 DS	NV 24	NV 20

Στον Πίνακα 4.2 αναφέρονται οι τύποι δοκιμών με το αντίστοιχο πλήθος δισκοειδών ελατηρίων (DS). Η γεωμετρία του σταθερού μέρους των δοκιμών αγνοήθηκε προκειμένου να μειωθούν οι υπολογιστικές απαιτήσεις, καθώς δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα (βλ. Σχήμα 4.1 b-i).

Στη συνέχεια αναλύονται τα αριθμητικά αποτελέσματα των ακόλουθων εξόδων: i) Δύναμη ολίσθησης [kN] - Μετατόπιση [mm] / Χρόνο [s], ii) Συνολικό μέγεθος προέντασης [kN] - Μετατόπιση [mm], iii) Θερμοκρασία [kN] - Μετατόπιση [mm] / Χρόνο [s].

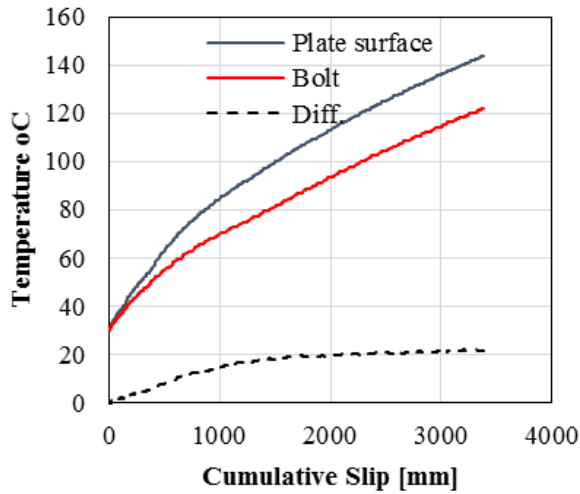
4.4.2 Επαλήθευση και ανάλυση των αποτελεσμάτων

4.4.2.1 Επιρροή των δισκοειδών ελατηρίων σε κόμβους διάτμησης με υλικό τριβής M6 [NV-21-22-23-24]

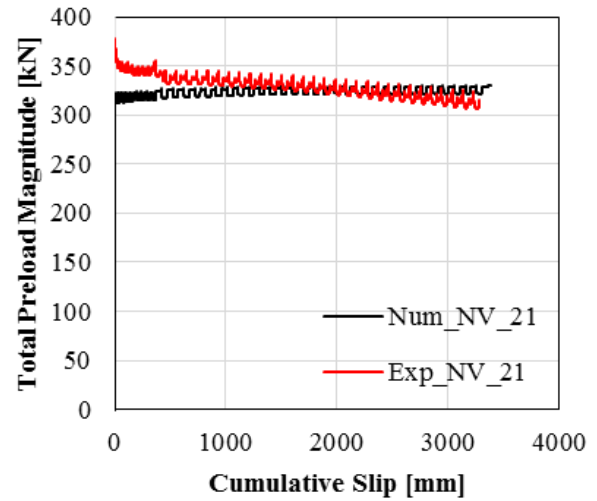
Στο Σχήμα 4.5 συνοψίζονται τα κύρια αποτελέσματα της τοπικής συμπεριφοράς των διατμητικών κόμβων με υλικό M6. Συγκεκριμένα, το Σχήμα 4.5a δείχνει ότι για το μοντέλο NV-21 η θερμοκρασία στα μέρη του κόμβου (δηλαδή τόσο οι κοχλίες όσο οι πλάκες) αυξάνεται με την αθροιστική ολίσθηση. Όπως αναμενόταν, η ενέργεια που απορροφάται με τριβή μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Παρατηρήθηκε ότι μετά από 3000mm αθροιστικής ολίσθησης, η μέση διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας της πλάκας και του κοχλία είναι περίπου 15oC έως 20oC για όλα τα μοντέλα. Παρόλο που οι θερμικές ιδιότητες προσομοιώθηκαν όπως περιεγράφηκε παραπάνω, φαίνεται ότι οι δυνάμεις προέντασης επηρεάζονται σημαντικά και παραμένουν σταθερές στα μοντέλα (βλέπε Σχήμα 4.5b), κυρίως επειδή η θερμική διαστολή συμβαίνει τόσο στις πλάκες όσο και στους κοχλίες.

Η μερική απώλεια του συντελεστή τριβής προσομοιώθηκε στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιώντας νόμους τριβής που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία και βαθμονομήθηκε με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα (βλ. Σχήμα 4.5c). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της συνεχούς ολίσθησης των πλακών, ο συντελεστής τριβής μειώνεται αναλόγως, και όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.5d, τα μοντέλα προβλέπουν ικανοποιητικά αυτά τα φαινόμενα.

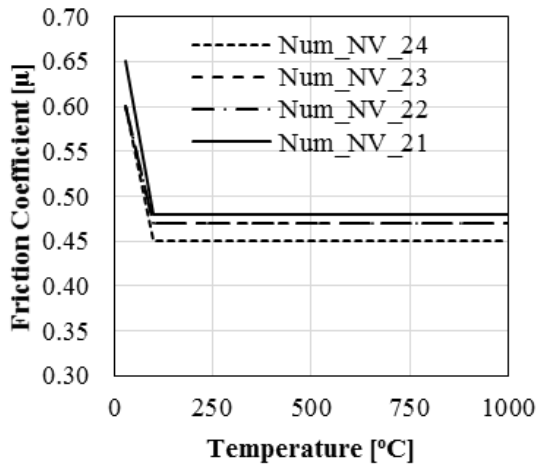
Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών και αριθμητικών καμπυλών όσον αφορά τη δύναμη ολίσθησης και την μετατόπιση. Όπως παρατηρείται, τα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων είναι πλήρως ικανά να αναπαράγουν τις συνολικές υστερητικές καμπύλες, παρέχοντας έτσι ακριβή αποτελέσματα.



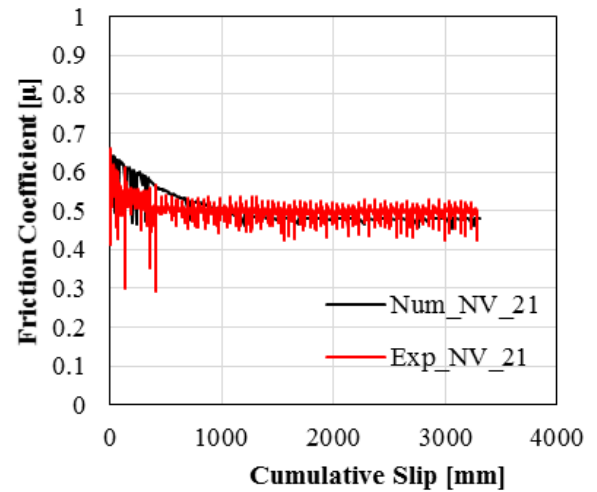
a) Θερμοκρασία στα μέρη του μοντέλου



b) Μεταβολή συνολικής προέντασης

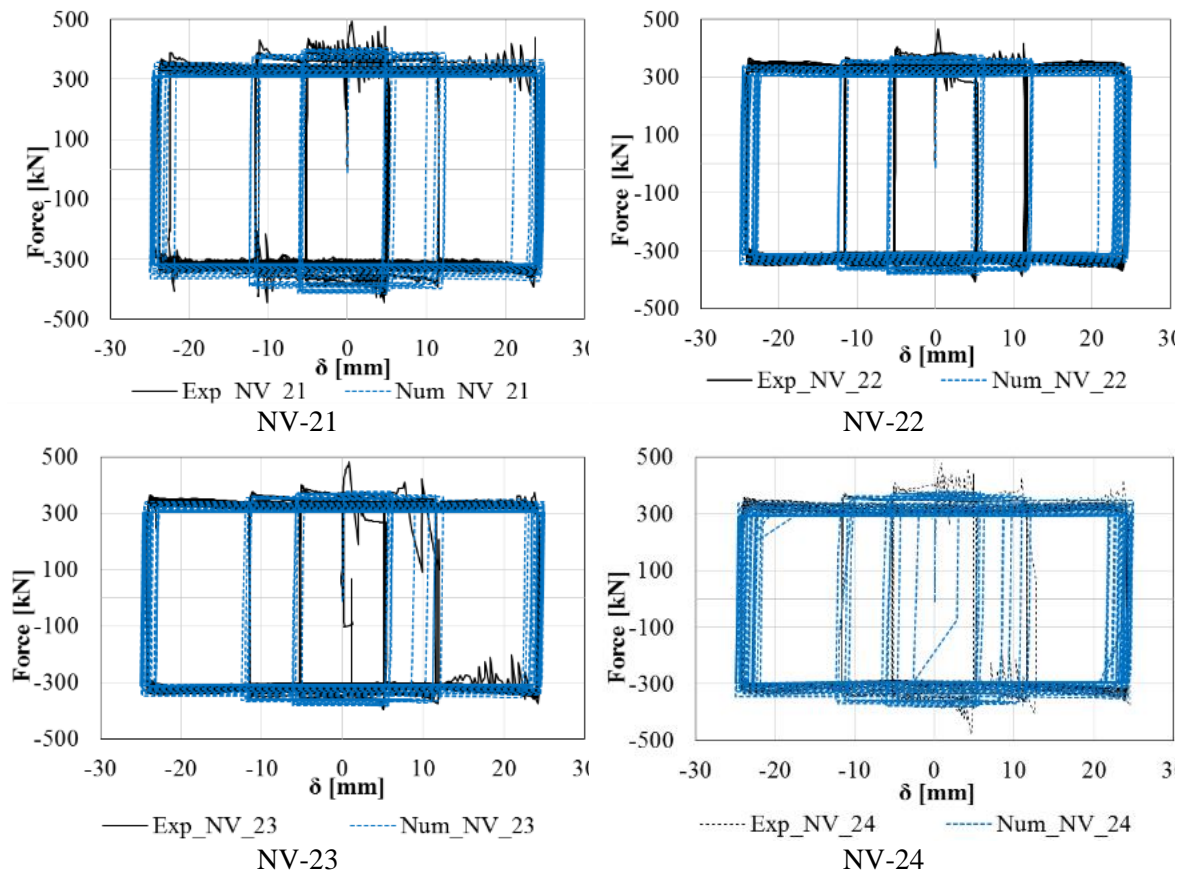


c) Συντελεστής τριβής που εξαρτάται από τη θερμοκρασία



d) Μεταβολή συντελεστή τριβής

Σχήμα 4.5 : Απόκριση ολίσθησης-μετατόπισης των μοντέλων NV-21-22-23-24

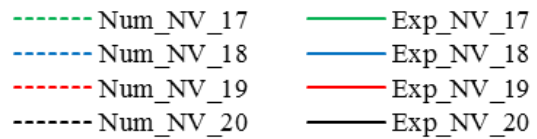
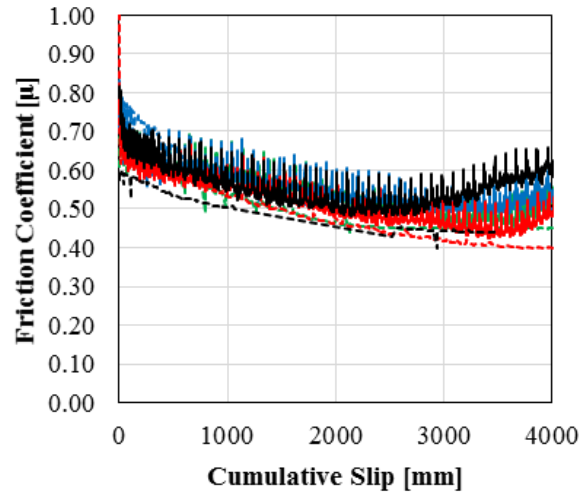
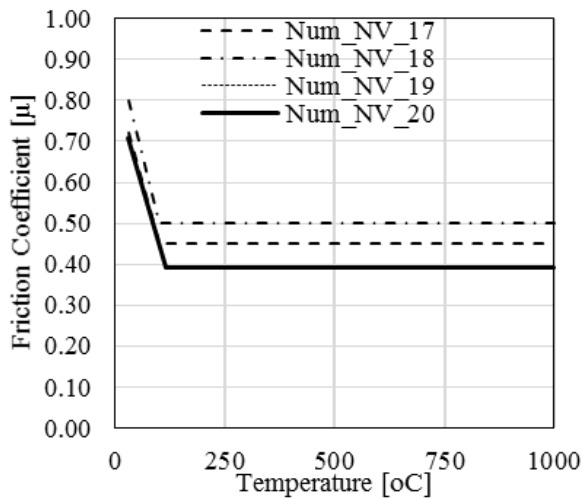


Σχήμα 4.6 : Προσομοιωμένη σε σχέση με πειραματική απόκριση των κόμβων διάτμησης με υλικό M6 [NV-21-22-23-24]

4.4.2.2 Επιρροή των δισκοειδών ελατηρίων σε κόμβους διάτμησης με υλικό M4 [NV-17-18-19-20]

Όπως παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, το υλικό M4 εμφανίζει τη μεγαλύτερη υποβάθμιση τριβής κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, κάτι που οδηγεί σε μια πιο περίπλοκη προσομοίωση. Επίσης και σε αυτήν την περίπτωση δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές ως προς την απώλεια προέντασης μεταξύ των μοντέλων με διάφορα πλήθη δισκοειδών ελατηρίων (DS). Καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται λόγω της συνεχούς ολίσθησης των πλακών, ο συντελεστής τριβής μειώνεται σύμφωνα με τα δεδομένα εισόδου που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία (βλέπε Σχήμα 4.7a). Επιπλέον, δεν υπάρχει άμεση σχέση του πλήθους των δισκοειδών ελατηρίων με την υποβάθμιση των συντελεστών τριβής (βλ. Σχήμα 4.7b).

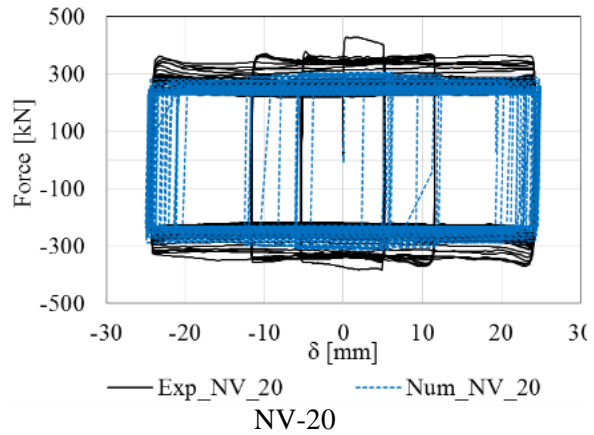
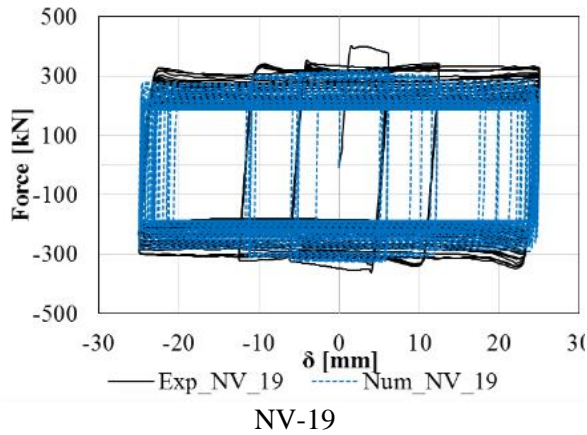
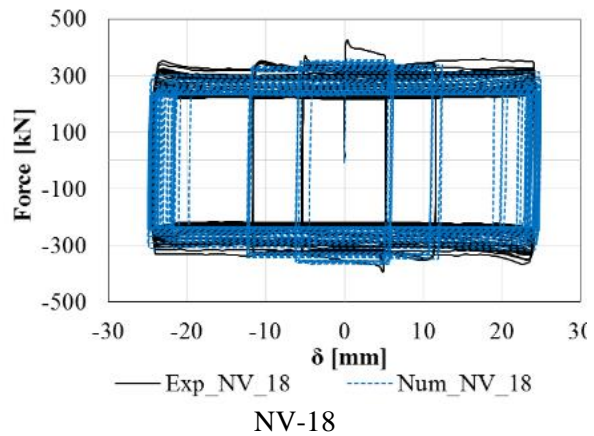
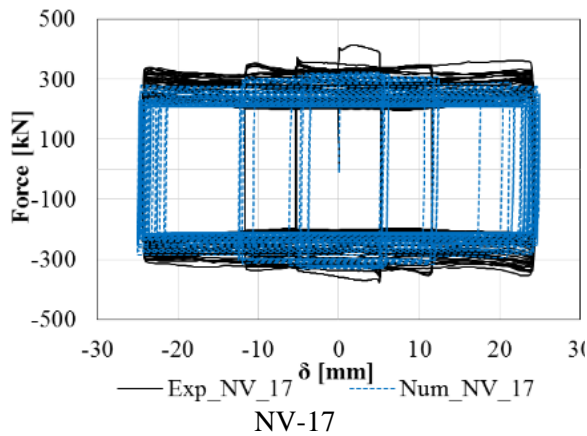
Οι καμπύλες δύναμης ολίσθησης-μετατόπισης απεικονίζονται στο Σχήμα 4.8, όπου φαίνεται η διακριτή υποβάθμιση της ικανότητας ολίσθησης σε κάθε κύκλο.



a) Συντελεστής τριβής εξαρτώμενος από τη θερμοκρασία

b) Καμπύλες συντελεστή τριβής-μετατόπισης

Σχήμα 4.7 : Συντελεστής τριβής για κόμβους διάτμησης με υλικό M4 [NV-17-18-19-20]



Σχήμα 4.8 : Συντελεστής τριβής για κόμβους διάτμησης με υλικό M4 [NV-17-18-19-20]

4.4.2.3 Εξάρτηση των συντελεστών τριβής από τάσεις

Προκειμένου να διερευνηθεί η εξάρτηση των συντελεστών τριβής από τάσεις, καταγράφονται από τις προσομοιώσεις πεπερασμένων στοιχείων οι πληροφορίες για την περιοχή επαφής και οι κάθετες δυνάμεις που οφείλονται σε επαφές για κάθε αλληλεπίδραση. Με τη βοήθεια αυτών, μπορεί να δημιουργηθεί μια σχέση μεταξύ της μετρούμενης πειραματικής δύναμης τριβής, της τάσης επαφής και της σχετικής περιοχής επαφής μέσω της ακόλουθης έκφρασης:

$$F_f = \mu(F_{pre}) \cdot F_{pre} \approx \int_A \mu(P) \cdot P \cdot dA \approx \sum_i \mu(P_i) \cdot P_i \cdot A_i \approx \mu(F_N) \cdot F_N \quad (4.1)$$

όπου:

F_f = δύναμη τριβής που μετρήθηκε κατά την πειραματική δοκιμή

F_{pre} = κάθετη δύναμη που μετρήθηκε κατά την πειραματική δοκιμή (προένταση)

F_N = κάθετη δύναμη από την προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων

P = τάση επαφής από την προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων

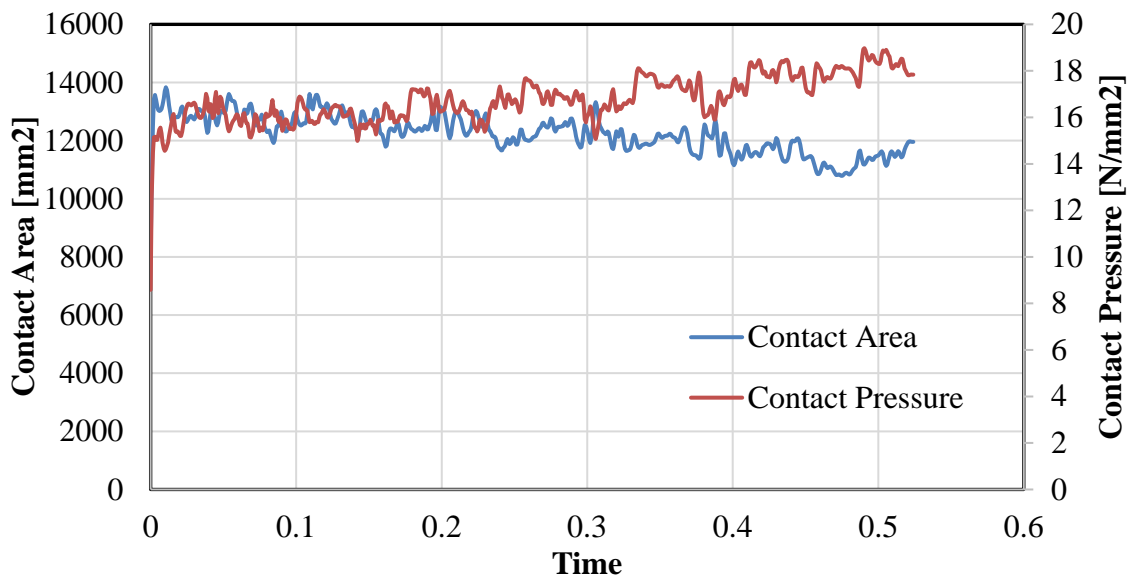
A = επιφάνεια επαφής από την προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων

$\mu(F_{pre})$ = συντελεστής τριβής που υπολογίστηκε από τα πειραματικά αποτελέσματα

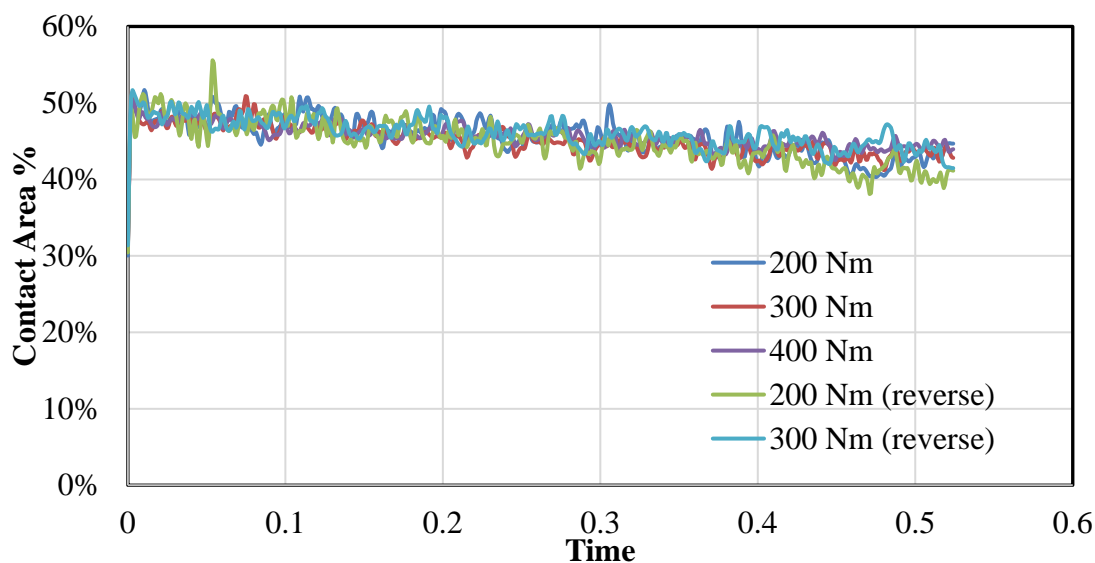
$\mu(F_N)$ = συντελεστής τριβής που εξάχθηκε από τη σχέση των πειραματικών δεδομένων και της προσομοίωσης πεπερασμένων στοιχείων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.9, με τη συνολική κίνηση, ανεξάρτητα από την κατεύθυνσή της, η περιοχή επαφής μειώνεται ελαφρώς όσο αυξάνεται η τάση επαφής.

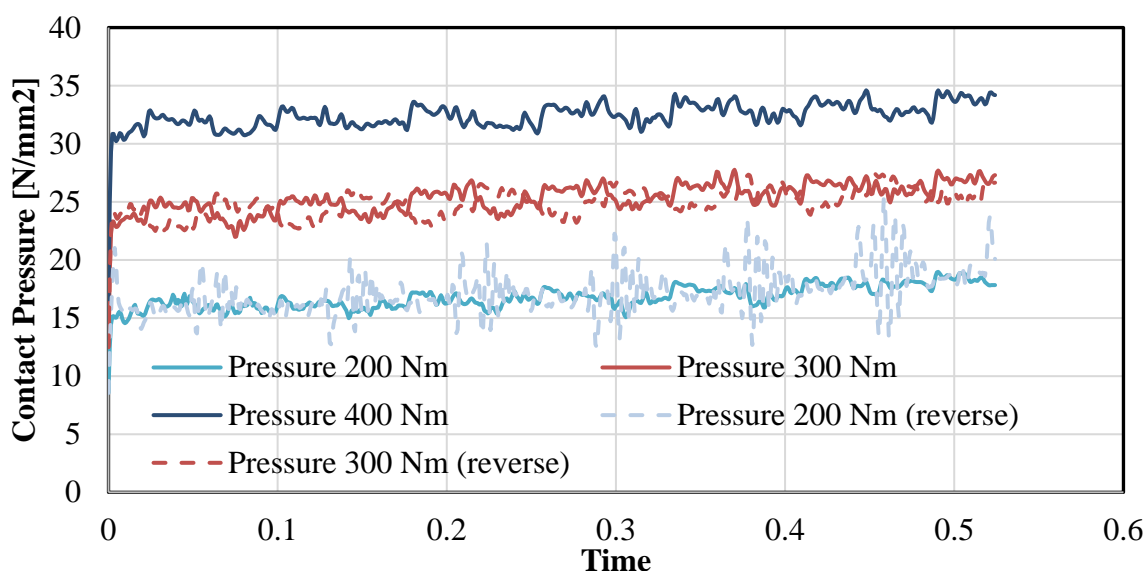
Επίσης, στην πραγματικότητα, ανεξάρτητα από το μέγεθος της προέντασης, η τάση επαφής και οι μετρούμενες επιφάνειες επαφής ακολουθούν πάντα την ίδια τάση στις προσομοιώσεις μονοαξονικών πειραμάτων των συσκευών τριβής FREEDAM (FREEDAM Friction Device – FFD) όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.10 και 4.11. Αυτή η κατάσταση δείχνει επίσης ότι τα υλικά είναι αρκετά άκαμπτα ώστε να μην επηρεάζονται από την τάση επαφής. Αυτή η ελαφρά μείωση της περιοχής επαφής μπορεί να οφείλεται σε ελαστική/πλαστική κράτνυση των επιφανειών ή σε κάμψη των πλακών σε μικρό βαθμό.



Σχήμα 4.9 : Επιφάνεια επαφής – τάση



Σχήμα 4.10 : Ποσοστά επιφανειών επαφής για διάφορες ροπές προέντασης



Σχήμα 4.11 : Τάσεις επαφής για διάφορες ροπές προέντασης

Ωστόσο, τα πειράματα έδειξαν ότι υψηλότερα μεγέθη προέντασης οδηγούν σε χαμηλότερους συντελεστές τριβής λόγω του τριβολογικού χαρακτηριστικού του στρώματος τριβής, καθώς επίσης και ότι με τη συνεχή κίνηση, παρατηρήθηκε πολύ ελαφριά υποβάθμιση της τριβής, η οποία μπορεί να οφείλεται στην μείωση της περιοχής επαφής και συνεπώς στην αύξηση της τασης, το οποίο φαίνεται επίσης κατά τη διάρκεια αναλύσεων.

4.5 Προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων των συνδέσεων FREEDAM

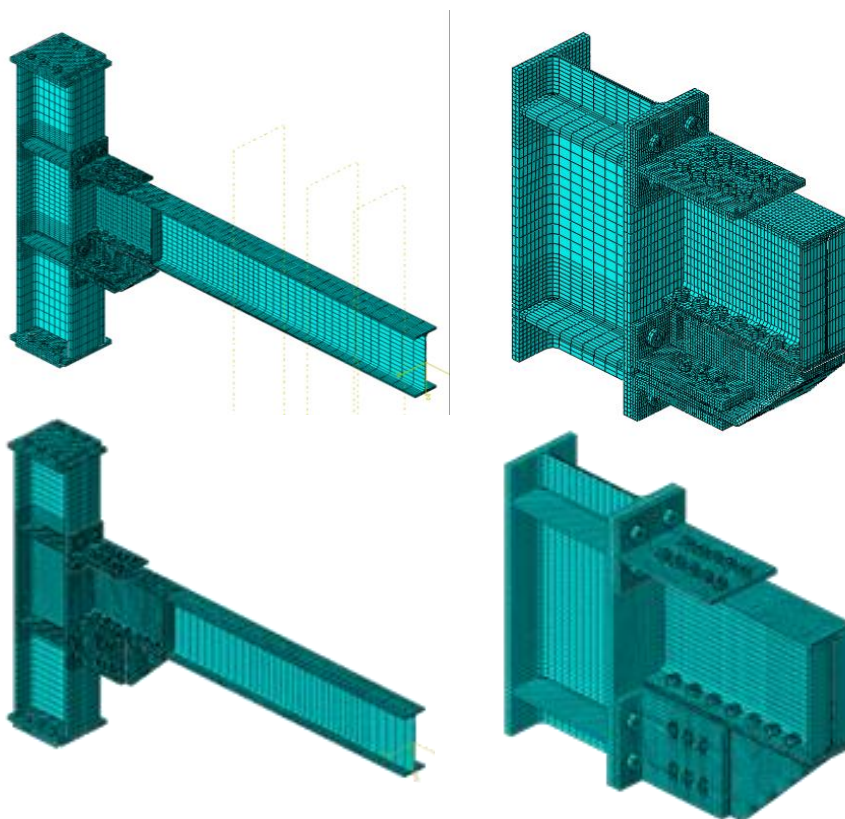
Οι αναλύσεις πεπερασμένων στοιχείων στις συνδέσεις FREEDAM αφιερώθηκαν στη διερεύνηση της τοπικής συμπεριφοράς των φορέων, προκειμένου να αξιολογηθούν οι

επιδράσεις του μηχανισμού μεταφοράς από τη δοκό στο υποστύλωμα και η τοπική ανακατανομή δυνάμεων και παραμορφώσεων μέσα στα κοχλίες των συσκευών.

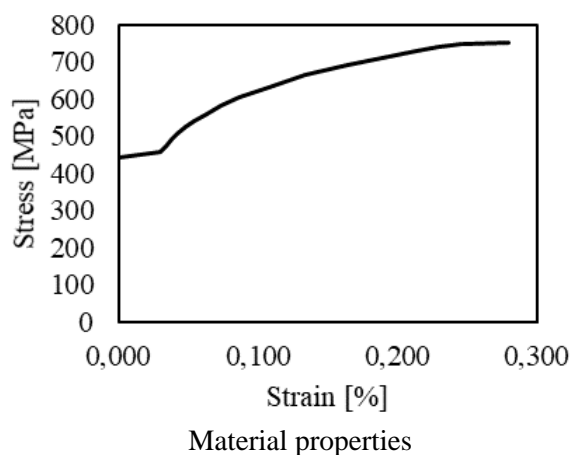
Μετά την επαλήθευση των μοντέλων μέσω των πειραματικών δοκιμών, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές προσομοιώσεις για τη διερεύνηση της μονοτονικής και ανακυκλικής συμπεριφοράς των κόμβων με αποσβεστήρες τριβής.

4.5.1 Παραδοχές προσομοίωσης

Οι πειραματικές δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευση των μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (finite element - FE) που αναπτύχθηκαν χρησιμοποιώντας το Abaqus v 6.14 [2]. Οι οριζόντιες στατικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας τον Dynamic Implicit solver. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πειραματικών φορέων αναπαράχθηκαν στο λογισμικό πεπερασμένων στοιχείων με προσομοίωση στερεών μερών με πλέγμα χρησιμοποιώντας το πεπερασμένο στοιχείο C3D8R (γραμμικό 8 κόμβων με μειωμένη ολοκλήρωση). Λήφθηκαν υπόψη τόσο οι γεωμετρικές όσο και οι μηχανικές μη γραμμικότητες. Οι πειραματικές δοκιμές σε μεγάλους φορείς δοκών-υποστυλωμάτων υπέστησαν απροσδόκητη ολίσθηση στις συνδέσεις μεταξύ του υποστυλώματος και της διάταξης και επομένως, η πηγή παραμόρφωσης ελήφθη υπόψη στο αριθμητικό μοντέλο. Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται το γενικό σχήμα του μοντέλου και στο Σχήμα 4.13 φαίνονται οι μέσες ιδιότητες υλικού που λαμβάνονται πειραματικά.



Σχήμα 4.12 : Ιδιότητες του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με αποσβεστήρες FREEDAM



Σχήμα 4.13 : μέση καμπύλη τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα S355

Οι ιδιότητες υλικού του χάλυβα προσομοιώθηκαν με βάση δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο ως μέρος του συνόλου πειραμάτων: η τάση διαρροής ορίστηκε ίση με 380 MPa για δοκούς, 427 MPa για υποστυλώματα και 443MPa και για L και T. Ο συντελεστής ελαστικότητας θεωρήθηκε ίσος με 210000MPa και ο συντελεστής Poisson ίσος με 0.3.

Ο μη γραμμικός κλάδος του καταστατικού νόμου εφαρμόστηκε χρησιμοποιώντας μια μέθοδο εισόδου μισού κύκλου και υποθέτοντας τόσο μη γραμμική κινηματική όσο και ιστροπική πλαστική κράτυνση, όπως περιγράφεται στο [5-10]. Οι κοχλίες προσομοιώθηκαν όπως φαίνεται στα [3,4].

Τα μέρη του μοντέλου που βρίσκονται σε επαφή, όπως οι κοχλίες και οι πλάκες, προσδιορίστηκαν με αλληλεπιδράσεις που προσομοιώνουν τόσο την κάθετη συμπεριφορά για την αποφυγή του φαινομένου overclosure (φαινόμενο κατά το οποίο κατά την επαφή δύο επιφανειών εμφανίζεται διείσδυση της μίας επιφάνειας στην άλλη) μέσω της επιλογής "Hard Contact", όσο και την εφαπτομενική συμπεριφορά για τον καθορισμό της σχετικής ολίσθησης (χρησιμοποιώντας το νόμο τριβής Coulomb). Επιπλέον, για την προσομοίωση της μερικής απώλειας του συντελεστή τριβής λόγω της εξομάλυνσης της επιφανειακής τραχύτητας της πλάκας τριβής, χρησιμοποιήθηκαν οι νόμοι τριβής που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία που αναφέρονται στην Ενότητα 4.4, συνεπώς ο συντελεστής τριβής μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της συνεχούς ολίσθησης των πλακών. Οι ιδιότητες τριβής αναφοράς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Οι προσομοιώσεις που παρουσιάζονται στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν θεωρώντας το δυναμικό εκατοστημόριο 5% για τις αριθμητικές προσομοιώσεις.

Πίνακας 4.3: Ιδιότητες υλικού τριβής

Συντελεστής τριβής	5% ποσοστημόριο	95% ποσοστημόριο
	$\mu_{5\%}$	$\mu_{95\%}$
Στατικός	0.69	0.84
Δυναμικός	0.53	0.65

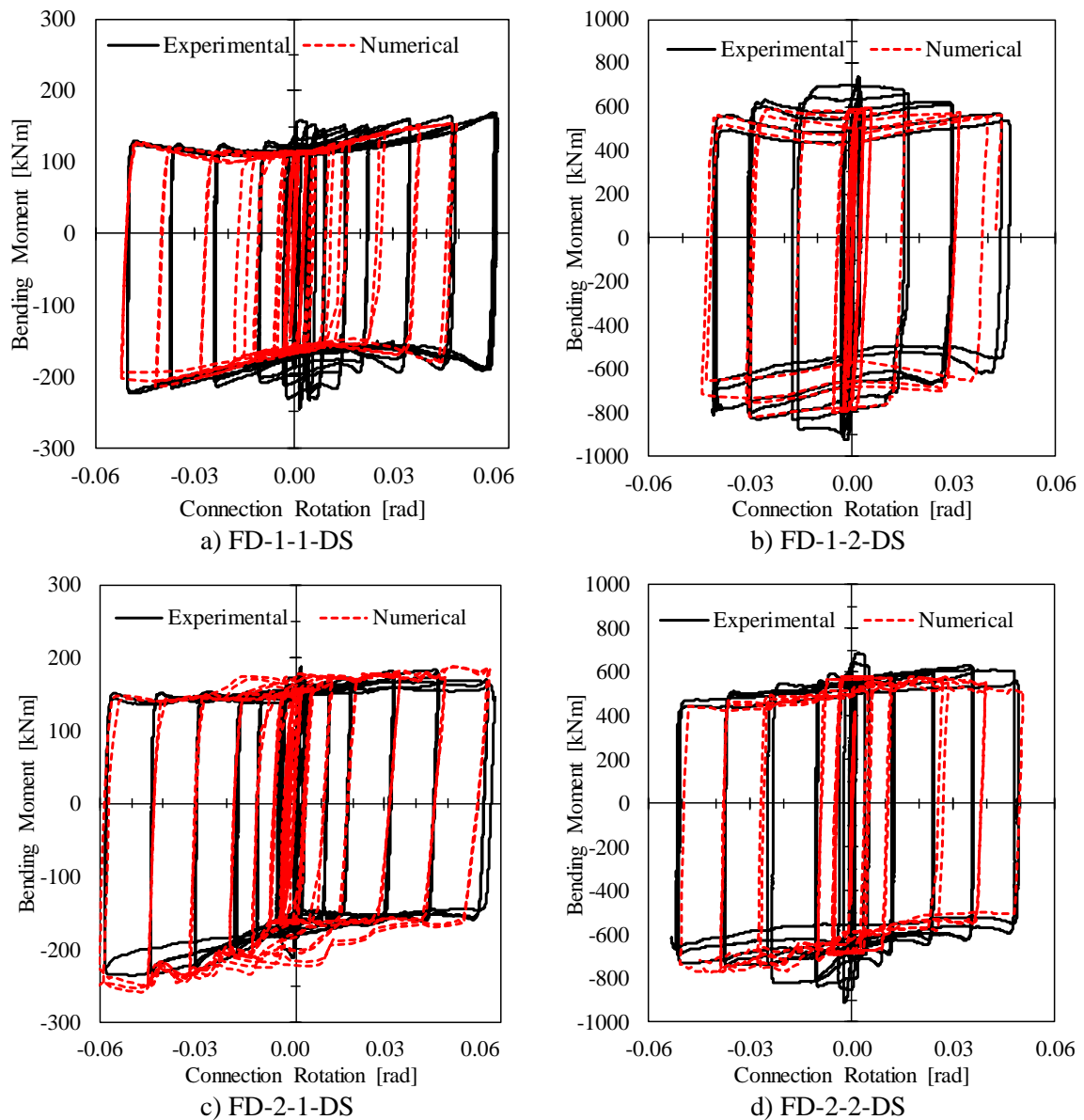
Δεδομένου ότι δεν αναμένονται πλαστικές παραμορφώσεις στα συγκολλημένα μέρη, έχουν χρησιμοποιηθεί περιορισμοί «tie» για τη σύνδεση μεταξύ των επιφανειών σε επαφή ώστε να αναπαραχθεί με απλοποιημένο τρόπο η παρουσία συγκολλήσεων πλήρους διείσδυσης.

Οι αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν λαμβάνοντας υπόψη δύο στάδια φόρτισης: (i) σύσφιξη κοχλιών και (ii) εφαρμογή ιστορικού μετατόπισης.

Οι οριακές συνθήκες των κόμβων έχουν προσομοιωθεί με ακρίβεια ώστε να αναπαράγουν εκείνες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Επιπρόσθετα, η δοκός εξασφαλίστηκε πλευρικά με περιορισμούς εκτός του επιπέδου που βρίσκονται στα ίδια τμήματα της πειραματικής διάταξης. Το πρωτόκολλο φόρτισης AISC 341 [11] με έως και 5% αναλογία μετακίνησης ορόφου εφαρμόστηκε στο άκρο της δοκού σταθερά κατά τη διαδικασία δοκιμής.

4.5.2 Επαλήθευση και ανάλυση αποτελεσμάτων: εξωτερικοί κόμβοι

Οι παραδοχές προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκαν προσομοιώνουν αποτελεσματικά τόσο την καθολική όσο και την τοπική απόκριση των δοκιμασμένων κόμβων, όπως μπορεί να παρατηρηθεί στα Σχήματα 4.14 και 4.15 αντίστοιχα.



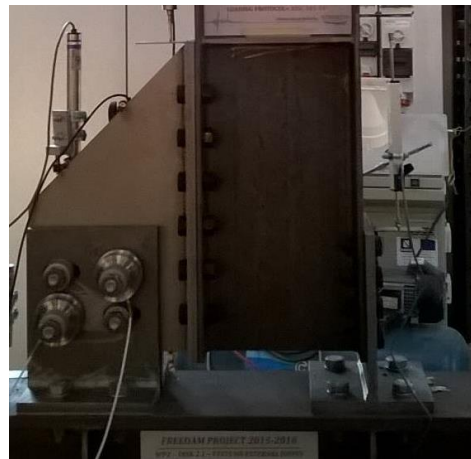
Σχήμα 4.14 : Πειραματικά σε σχέση με αριθμητικά αποτελέσματα σε όρους ροπής κάμψης-στροφής σύνδεσης

Δεδομένου ότι η μετάβαση από τη στατική στη δυναμική τριβή δεν προσομοιώθηκε, η απόκριση της κόμβου κατά τους αρχικούς κύκλους δεν αναπαράγεται με ακρίβεια. Ωστόσο, αυτή η ανακρίβεια εξαφανίζεται με την αύξηση του αριθμού των κύκλων.

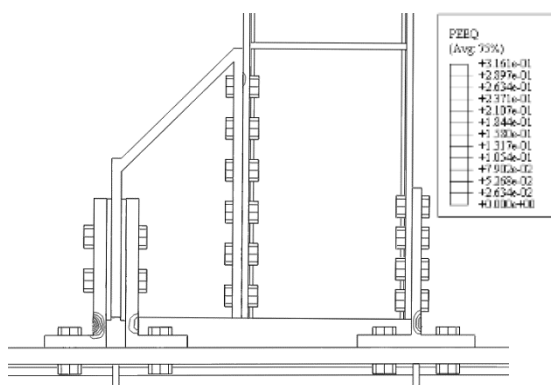
Κατά τη διάρκεια του συνόλου πειραμάτων δεν παρατηρήθηκε βλάβη στα χαλύβδινα στοιχεία. Ωστόσο, οι αριθμητικές αναλύσεις δείχνουν ορισμένες συγκεντρώσεις ελαφριάς πλαστικής βλάβης, που απεικονίζεται σε όρους ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (PEEQ) στο Σχήμα 4.15, στη βάση του κορμού του άνω T (όπου βρίσκεται το κέντρο περιστροφής), και είτε στις βάσεις των L, είτε στην άνω περιοχή κορμού-πέλματος της δοκού κάτω από το T και στους κοχλίες διάτμησης της συσκευής. Επιπλέον, μπορούν να παρατηρηθούν πλαστικές παραμορφώσεις στους κορμούς των κοχλιών της συσκευής τριβής. Πράγματι, η οριζόντια διάταξη αποσβεστήρα προκαλεί φαινόμενα διατμητικής κάμψης σε όλους τους κορμούς των κοχλιών της συσκευής με δύο θλιβόμενες περιοχές. Αντίθετα, οι κοχλίες στον κατακόρυφο αποσβεστήρα έχουν μία θλιβόμενη ζώνη στο μέσο του συσφιγμένου κορμού, η οποία οδηγεί σε μεγαλύτερη τοπική πλαστική παραμόρφωση (βλέπε Σχήμα 4.16). Επιπλέον, σε αυτή τη δεύτερη περίπτωση οι κοχλίες κοντά στην όψη του υποστυλώματος δεν εμφανίζουν πλαστικές παραμορφώσεις.



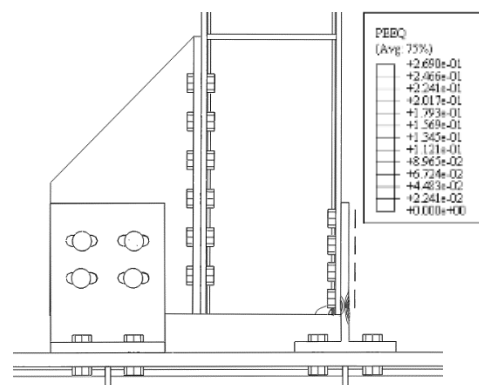
α) Πειραματικός κόμβος FD 1-1



β) Πειραματικός κόμβος FD 2-1

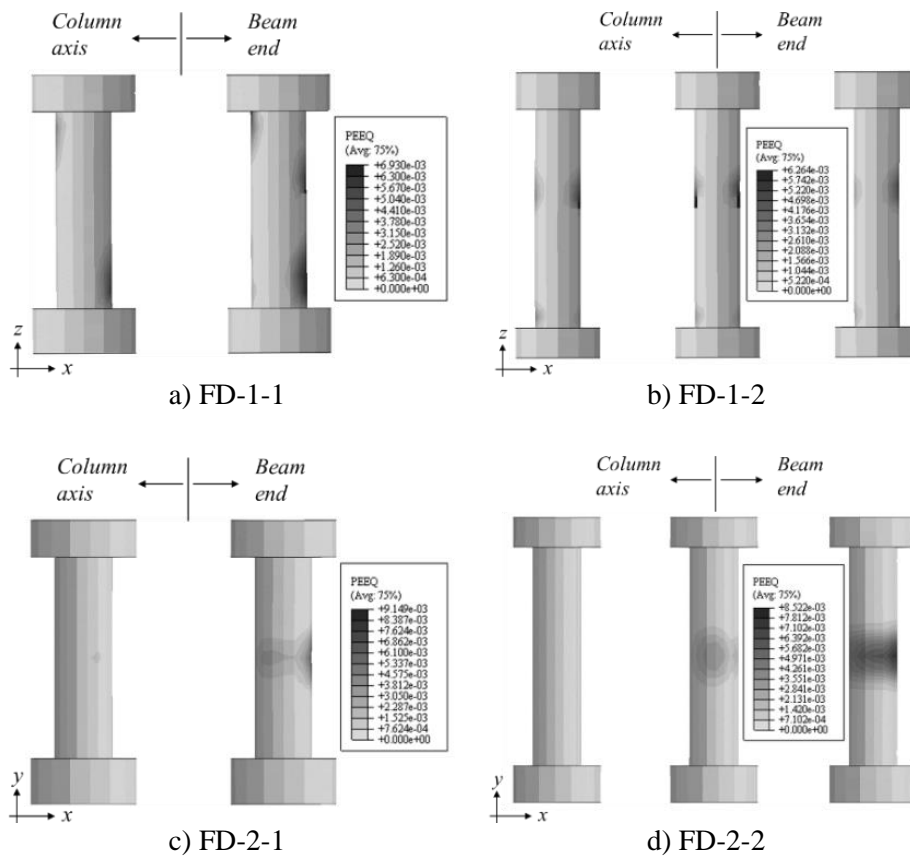


γ) Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (PEEQ) του μοντέλου FD 1-1



δ) Κατανομή ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (PEEQ) του μοντέλου FD 2-1

Σχήμα 4.15 : Πειραματικά σε σχέση με αριθμητικά μοντέλα μετά από ανακυκλική δοκιμή έως 5%



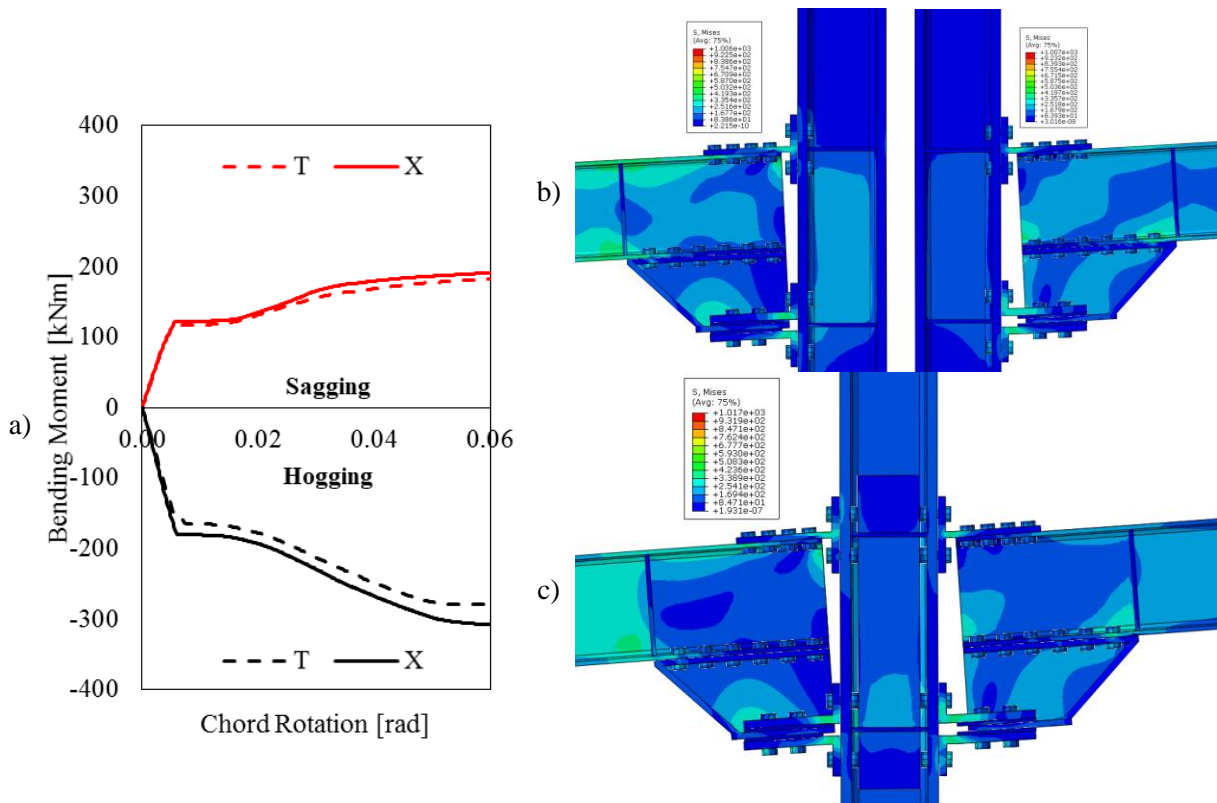
Σχήμα 4.16 : Ισοδύναμη πλαστική βλάβη (PEEQ) στους κοχλίες του αποσβεστήρα

4.5.3 Επαλήθευση και συζήτηση των αποτελεσμάτων: εσωτερικοί κόμβοι

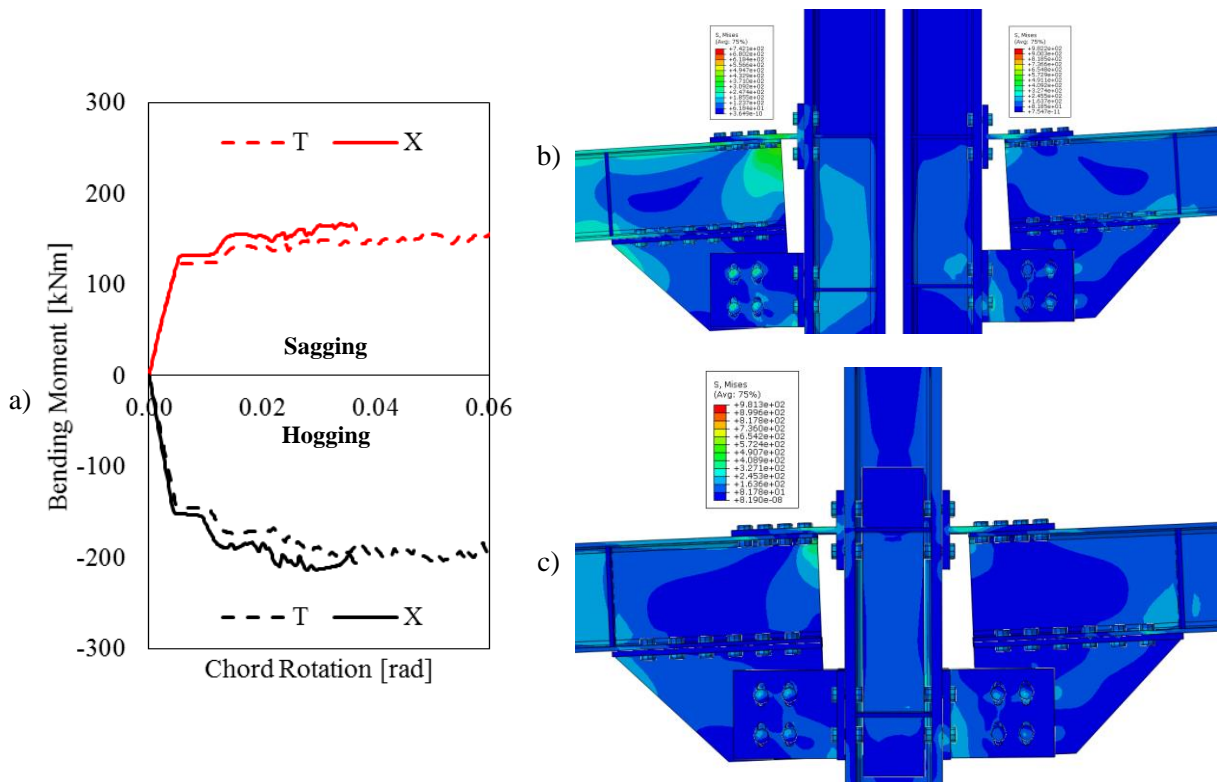
Οι εσωτερικοί κόμβοι (εφεξής αναφερόμενοι στις γραφικές παραστάσεις ως κόμβοι «X») εμφανίζουν σχεδόν την ίδια συμπεριφορά με τους εξωτερικούς κόμβους (εφεξής αναφέρονται επίσης στις γραφικές παραστάσεις ως κόμβοι «T»), καθώς ο κορμός του υποστυλώματος παραμένει στην ελαστική περιοχή και ο μη γραμμικός μηχανισμός αναπτύσσεται στους αποσβεστήρες FREEDAM. Επομένως, για λόγους συντομίας, στη συνέχεια φαίνεται απλώς η σύγκριση μεταξύ της απόκρισης των κόμβων T και X εναλλακτικά εξοπλισμένων με αποσβεστήρες με τριγωνική ενίσχυση στο άκρο της δοκού (δηλαδή οριζόντιο μηχανισμό τριβής) και κατακόρυφη νεύρωση (κάθετο μηχανισμό τριβής).

Τα σχήματα 4.17a και 4.18a δείχνουν τις καμπύλες απόκρισης ροπής-στροφής των κόμβων με οριζόντιο και κάθετο αποσβεστήρα. Μία μικρή παρατήρηση είναι ότι οι διαφορές είναι αμελητέες και οφείλονται κυρίως στη διαφορετική συνολική ακαμψία του υποστυλώματος, το οποίο είναι πιο άκαμπτο στην περίπτωση εσωτερικών κόμβων, επομένως στην ίδια επιβαλλόμενη στροφή χορδής, η συνεισφορά του υποστυλώματος στη στροφή του κόμβου είναι χαμηλότερη και η ολίσθηση της συσκευής είναι ελαφρώς μεγαλύτερη, όπως και η αντίστοιχη αντίδρασή της.

Το παραμορφωμένο σχήμα και οι κατανομές τάσης είναι σχεδόν οι ίδιες τόσο για τους κόμβους T όσο και για τους X, όπως μπορεί να παρατηρηθεί συγκρίνοντας τα Σχήματα 4.17b-4.17c και τα Σχήματα 4.18b-4.18c για τις διαμορφώσεις με οριζόντιο και κάθετο αποσβεστήρα, αντίστοιχα.



Σχήμα 4.17 : Σύγκριση μεταξύ κόμβων T και X με οριζόντιο αποσβεστήρα (με τριγωνική ενίσχυση στο άκρο της δοκού)



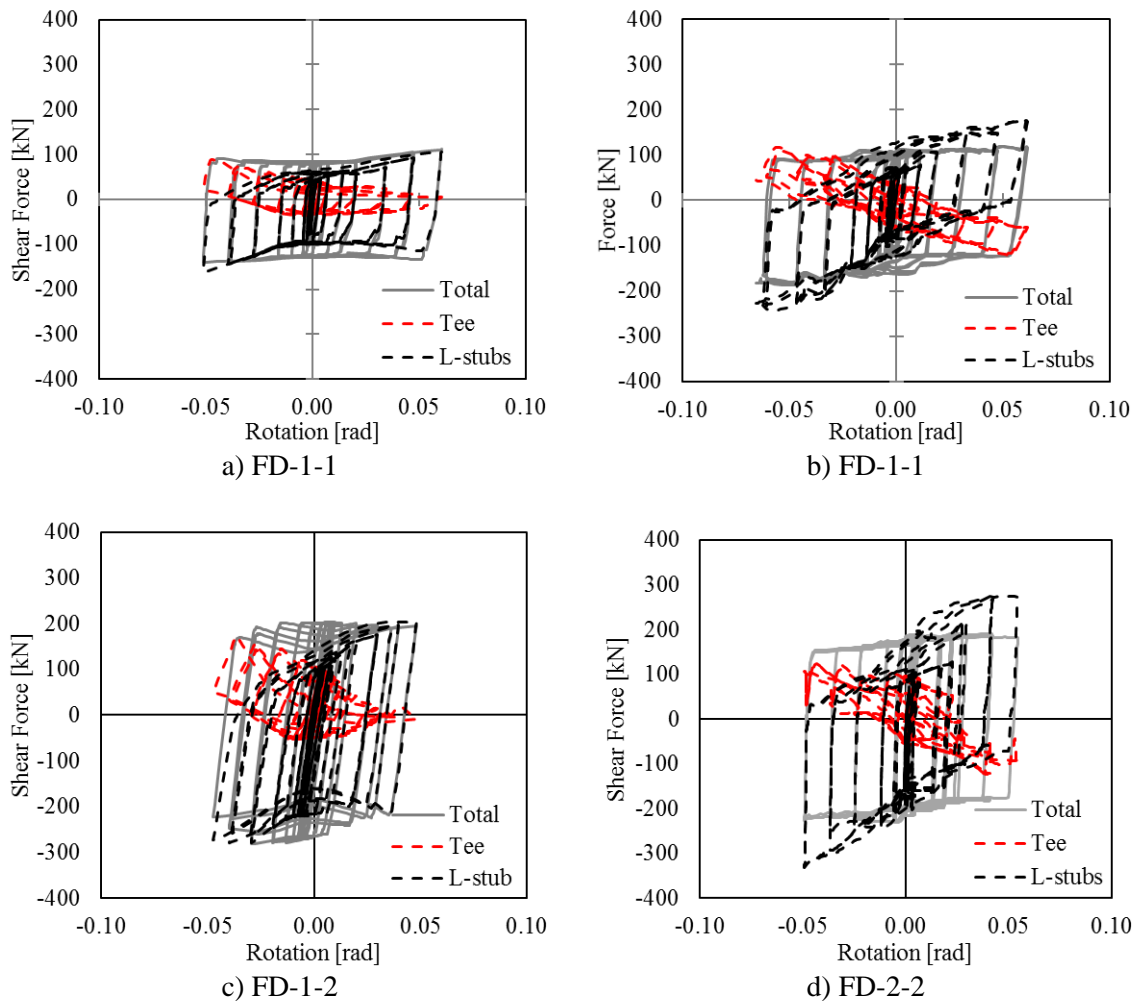
Σχήμα 4.18 : Σύγκριση μεταξύ κόμβων T και X με κάθετο αποσβεστήρα (με κατακόρυφη νεύρωση)

4.6 Περίληψη νέων δεδομένων για τις διατάξεις σχεδιασμού

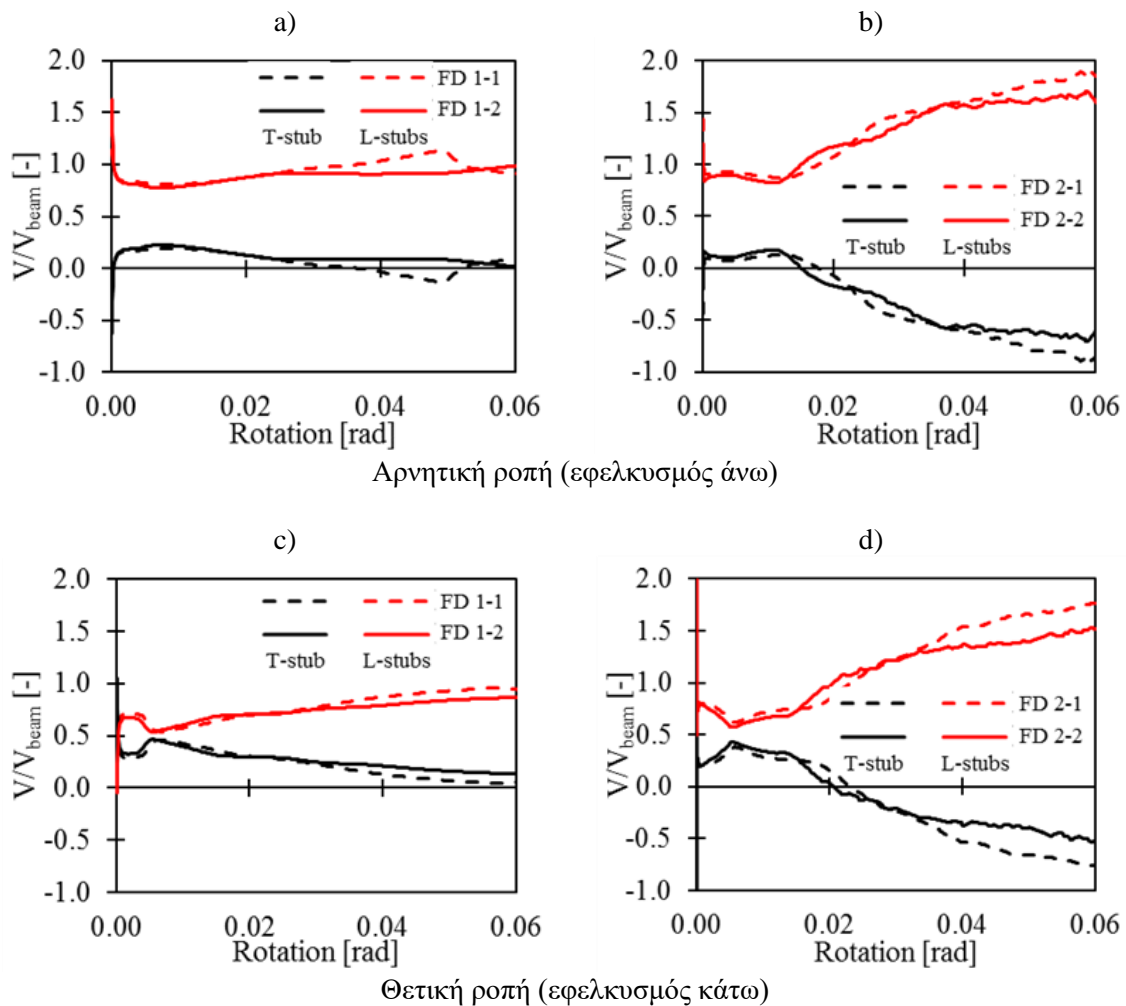
4.6.1 Δύναμη διάτμησης στις συνδέσεις με T και L

Μέσω αναλύσεων πεπερασμένων στοιχείων (Finite Elements Analysis – FEA) διερευνήθηκε η τοπική συμπεριφορά των κόμβων FREEDAM προκειμένου να χαρακτηριστούν οι πτυχές που σχετίζονται με το σχεδιασμό των συνδέσεων (T και L). Στην όψη του υποστυλώματος είναι ο έλεγχος σε διάτμηση, επειδή αυτά τα στοιχεία πρέπει να διασφαλίσουν την αντοχή λόγω συνδυασμένων δυνάμεων εφελκυσμού και διάτμησης για την αποφυγή πρόωρης αστοχίας.

Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται η κατανομή των δυνάμεων διάτμησης στο επίπεδο των T και L καθώς και η συνολική δύναμη διάτμησης στη διατομή της όψης του υποστυλώματος. Και στις δύο συσκευές τριβής που δοκιμάστηκαν, η αθροιστική διάτμηση στα δύο συστατικά μέρη (δηλαδή το άθροισμα των σχετικών απόλυτων τιμών) είναι μεγαλύτερη από τη συνολική δύναμη διάτμησης (βλ. Σχήμα 4.19 a και c για τον τύπο 1 και Σχήμα 4.19 b και d για τον τύπο 2). Προκειμένου να διερευνηθεί η εξέλιξη της διατμητικής δύναμης κατά τη στροφή της σύνδεσης, πραγματοποιήθηκαν εναλλακτικά μονοτονικές αναλύσεις τόσο υπό συνθήκες φόρτισης με τον εφελκυσμό κάτω, όσο και άνω.



Σχήμα 4.19 : Δύναμη διάτμησης που μεταφέρεται από διαφορετικά συστατικά μέρη



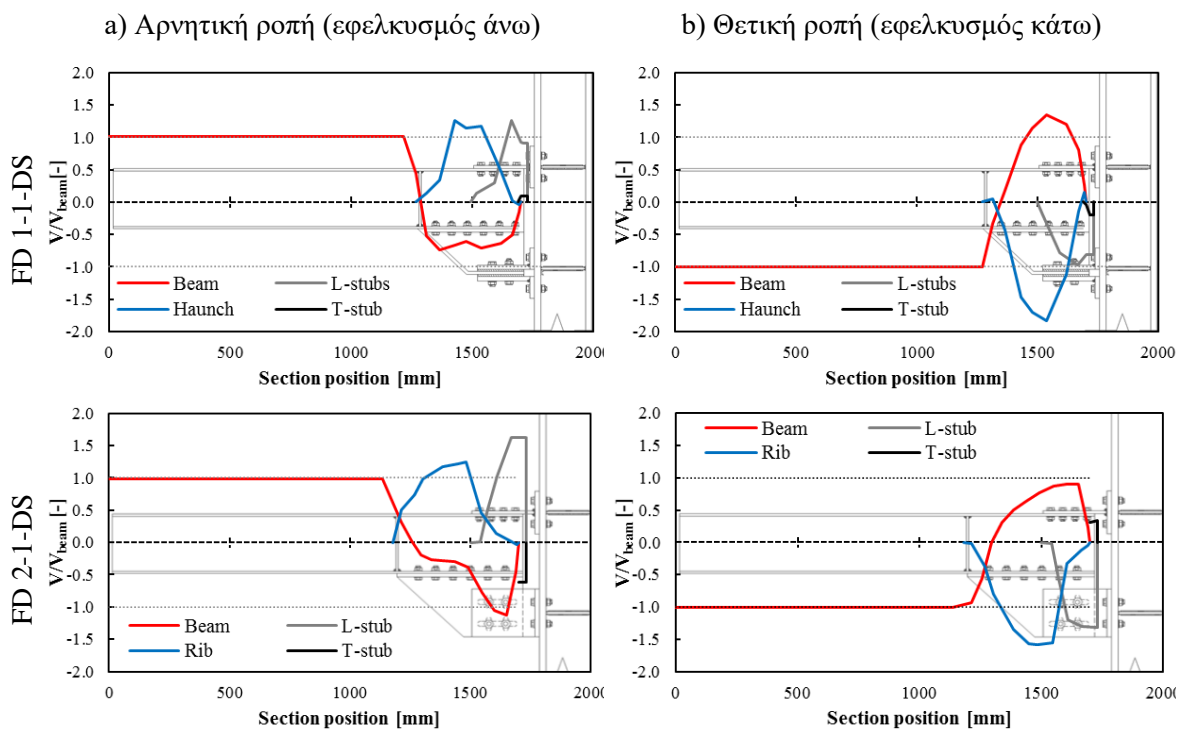
Σχήμα 4.20 : Δύναμη διάτμησης στην όψη της σύνδεσης

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.20 επιβεβαιώνουν τις προηγούμενες παρατηρήσεις και προσφέρουν πληροφορίες για το μέγεθος της διάτμησης που μεταφέρεται από κάθε συστατικό μέρος. Πράγματι, για τις περιπτώσεις που διερευνήθηκαν, τα L μεταφέρουν μεγαλύτερη δύναμη διάτμησης σε σύγκριση με το T. Οι κόμβοι διάταξης 1 χαρακτηρίζονται από επίπεδα μέγιστης δύναμης διάτμησης που μεταφέρονται από το T της τάξης του 50% της συνολικής διάτμησης, ενώ τα L φθάνουν τιμές κοντά στο 100% της συνολικής διάτμησης (Σχήμα 4.20 a και c). Ωστόσο, ενώ τα συστατικά μέρη της διάταξης 1 μεταφέρουν διάτμηση έως και τη μέγιστη συνολική διάτμηση, οι φορείς της διάταξης 2 (Σχήμα 4.20 b και d) εμφανίζουν την ίδια συμπεριφορά που παρατηρείται ανακυκλικά, δηλαδή η διάτμηση στα συστατικά μέρη φτάνει τιμές μεγαλύτερες από τη συνολική διάτμηση, με τη διάτμηση που μεταφέρεται από τα L να φτάνει σε τιμές σχεδόν 2 φορές μεγαλύτερες από τη συνολική διάτμηση για τιμές στροφής περί των 0.06 rad.

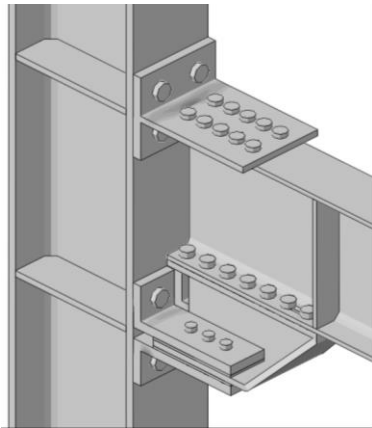
Οι διαφορές των κατανομών της δύναμης διάτμησης μεταξύ των 2 συστατικών μερών οφείλονται κυρίως στη μεγαλύτερη ακαμψία που παρέχεται από τα L στο κατακόρυφο επίπεδο και τη κάθετη συνιστώσα της δύναμης ολίσθησης. Πράγματι, ο μηχανισμός μεταφοράς της διατμητικής δύναμης μεταξύ των συστατικών μερών (για σύγκριση βλ. Σχήμα 4.16) είναι πολύ περίπλοκος και εξαρτάται από τη διάταξη. Ο σύνδεσμος τύπου 1 (FD 1-1-DS) χαρακτηρίζεται από δυνάμεις διάτμησης ίδιου προσήμου που μεταφέρονται από τα L και σε μικρότερο βαθμό από το T. Αντιθέτως, το T του FD 2-1-DS φέρει δύναμη διάτμησης αντίθετου προσήμου, λόγω του αυξημένου επιπέδου διατμητικής δύναμης που

μεταφέρεται από τα L, προκειμένου να διατηρηθεί η ισορροπία στην όψη του υποστυλώματος. Οι συνθήκες φόρτισης με εφελκυσμό άνω/κάτω οδηγούν στην ίδια κατανομή δυνάμεων μεταξύ των συστατικών μερών της ίδιας διαμόρφωσης, με ομαλότερη μεταφορά των δυνάμεων υπό θετική κάμψη (εφελκυσμός κάτω).

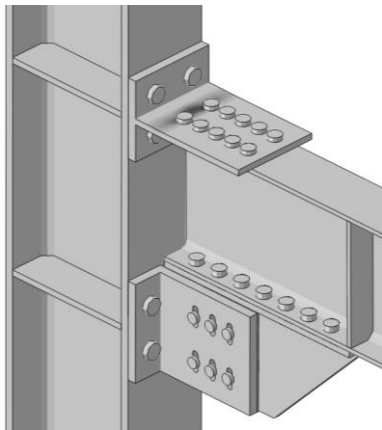
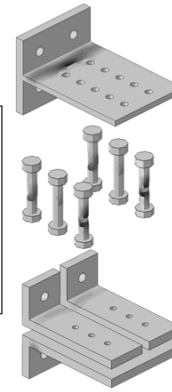
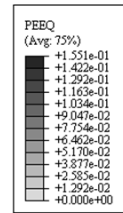
Στις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν στα μοντέλα των πειραματικών δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι μικρή συγκέντρωση βλάβης βρίσκεται στη βάση του T, των L (στην περίπτωση της διάταξης 1), των κοχλιών του αποσβεστήρα τριβής και σε μικρότερο βαθμό στη δοκό (στη σύνδεση κορμού-πέλματος στο άκρο της δοκού ακριβώς κάτω από το T και στις επιμήκειες οπές στο άκρο της σύνδεσης δοκού-τριγωνικής ενίσχυσης). Αυτά τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.22 σε όρους κατανομής της ισοδύναμης πλαστικής παραμόρφωσης (equivalent plastic strain – PEEQ) στους μεγάλους φορείς δοκών-υποστυλωμάτων. Όπως παρατηρείται στο υπόμνημα της PEEQ για στροφή ίση με 0.05rad, η οριζόντια διάταξη του αποσβεστήρα τριβής οδηγεί σε μεγαλύτερες πλαστικές παραμορφώσεις στα στοιχεία του κόμβου. Αυτό το αποτέλεσμα παρατηρείται επίσης όσον αφορά την απορροφούμενη ενέργεια, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.23. Πράγματι, η ενέργεια τριβής, που κανονικοποιείται σε σχέση με τη συνολική απορροφούμενη ενέργεια, για την πρώτη διάταξη είναι μικρότερη σε σύγκριση με αυτή της δεύτερης διάταξης, και το αντίθετο ισχύει όσον αφορά την κανονικοποιημένη πλαστική ενέργεια. Αν και η δεύτερη διάταξη αποσβεστήρα οδηγεί σε χαμηλότερη πλαστική βλάβη, αξίζει να σημειωθεί ότι η πλαστική βλάβη είναι περιορισμένη και για τις δύο διατάξεις, η μέγιστη πλαστική απορρόφηση ενέργειας είναι μικρότερη από 5% της συνολικής ενέργειας που απορροφάται στα 0.05 rad.



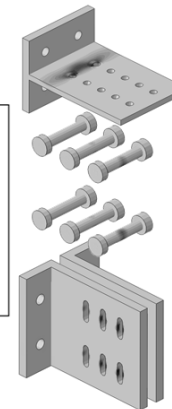
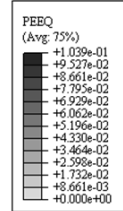
Σχήμα 4.21 : Κατανομή της διάτμησης στα συνδεδεμένα μέρη σε στροφή αποσβεστήρα 0.04



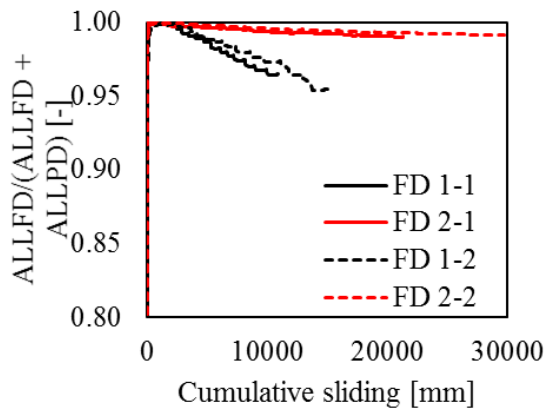
a) FD-1-2



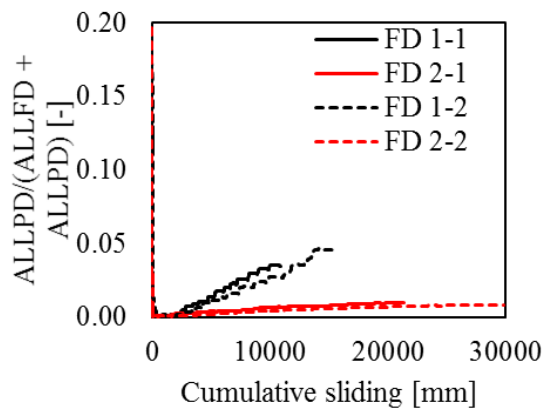
b) FD-2-2



Σχήμα 4.22 : Κατανομή PEEQ στο τέλος ανακυκλικής ανάλυσης για μεγάλους κόμβους



a) Ενέργεια τριβής



b) Πλαστική ενέργεια

Σχήμα 4.23 : Κανονικοποιημένη απορροφούμενη ενέργεια

4.6.2 Επιρροή της δύναμης σύσφιξης

Οι πειραματικές δοκιμές επιβεβαίωσαν τη σημασία της δύναμης σύσφιξης που εφαρμόζεται στους κοχλίες της συσκευής. Επομένως, εκτός από τη δύναμη προέντασης που

χρησιμοποιήθηκε στις δοκιμές (N_b), έχει ληφθεί επίσης υπόψη μια τιμή 50% μικρότερη ($0.5 N_b$) και μια τιμή 50% μεγαλύτερη ($1.5 N_b$). Πρέπει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιπτώσεις το $1.5 N_b$ είναι μικρότερο από το $F_{p,c}$ (το οποίο είναι ίσο με 172kN για κοχλίες M20 ποιότητας 10.9).

Στο Σχήμα 4.24 φαίνεται η σύγκριση των καμπυλών απόκρισης για τους τέσσερις κόμβους (δηλαδή τις δύο διατάξεις κόμβων και τους δύο φορείς) Στους Πίνακες 4.4 και 4.5 φαίνονται οι αριθμητικά μετρημένες μηχανικές ιδιότητες των κόμβων. Οι $M^{(+)}$ και $M^{(-)}$ αντιπροσωπεύουν τις ροπές κάμψης κατά την εμφάνιση της ολίσθησης σε θετικές (εφελκυσμός κάτω) και αρνητικές (εφελκυσμός άνω) ροπές, αντίστοιχα. Οι εξισώσεις (4.2), (4.3) και (4.4) αποσαφηνίζουν την έννοια της μηχανικής παραμέτρου που αναφέρεται στους πίνακες.

$$\Gamma^{(+)} = 1 + \frac{M_{0.5N_b}^{(+)} - M_{N_b}^{(+)}}{M_{N_b}^{(+)}} \quad (4.2)$$

$$\Gamma^{(-)} = 1 + \frac{M_{0.5N_b}^{(-)} - M_{N_b}^{(-)}}{M_{N_b}^{(-)}} \quad (4.3)$$

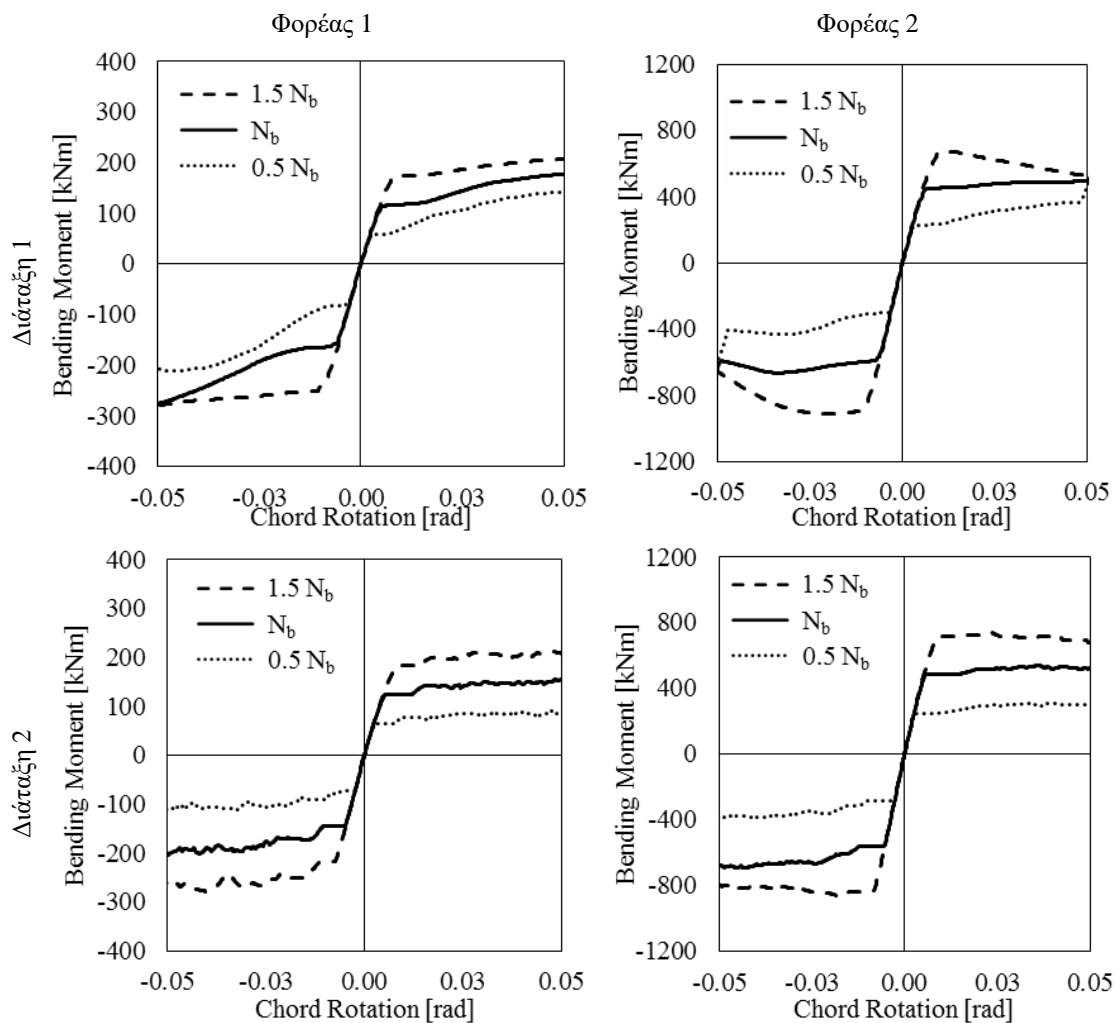
$$\Delta M^{(+/-)} / M^{(-)} = \frac{M^{(-)} - M^{(+)}}{M^{(-)}} \quad (4.4)$$

Όπου $\Gamma^{(+)}$ και $\Gamma^{(-)}$ είναι η μεταβολή της ικανότητας θετικής και αρνητικής ροπής κάμψης, αντίστοιχα, λαμβάνοντας υπόψη εναλλακτικά την αλλαγή στη δύναμη σύσφιξης από την τιμή σχεδιασμού N_b σε $0.5 N_b$ και $1.5 N_b$. $M^{(+)}$ και $M^{(-)}$ είναι οι θετικές και αρνητικές ροπές κάμψης. Οι δείκτες δηλώνουν την ανάλυση από την οποία λαμβάνεται η καμπτική ροπή, π.χ. με δύναμη σύσφιξης ίση με είτε $1.5 N_b$ είτε $0.5 N_b$. Το $\Delta M^{(+/-)} / M^{(-)}$ αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της αρνητικής και θετικής ροπής κάμψης για κάθε αντίστοιχη ανάλυση (λαμβάνοντας υπόψη τις τρεις τιμές για το N_b).

Όπως ήταν αναμενόμενο, η μεταβολή της ροπής κάμψης είναι ανάλογη με την προένταση του κοχλίου, αν και με διαφορετική αναλογία σε θετική και σε αρνητική ροπή. Όπως φαίνεται στους Πίνακες 4.4 και 4.5, αυτή η διαφορά σχετίζεται αυστηρά με τη διάταξη του κόμβου και είναι σταθερή με τα ύψη της δοκού, τη δύναμη σύσφιξης ή τον συντελεστή τριβής. Η διαφορά είναι περίπου 25% για τη διάταξη 1 και 15% για τη διάταξη 2.

Επιπλέον, από το Σχήμα 4.24 μπορεί να παρατηρηθεί ότι η απόκριση μετά τη διαρροή της διάταξης κόμβου 1 διαφέρει ανάλογα με το μέγεθος του φορέα δοκού-υποστυλώματος και με το επίπεδο της προέντασης (σχετικά με τη μέγιστη δύναμη προέντασης). Συγκεκριμένα, ο κόμβος με τη μικρότερη δοκό και χαμηλότερη σχετική προένταση εμφανίζει κράτνυση (δηλ. θετική ακαμψία μετά τη διαρροή), ενώ ο κόμβος με τη μεγαλύτερη δοκό και υψηλότερη σχετική προένταση δείχνει χαλάρωση (δηλ. αρνητική ακαμψία μετά τη διαρροή), με την τελευταία είναι πιο εμφανής για τις χαμηλότερες τιμές της δύναμης σύσφιξης. Αυτά τα φαινόμενα είναι πιο έντονα υπό αρνητική ροπή κάμψης. Η δεύτερη διάταξη παρουσιάζει μια πιο γραμμική συμπεριφορά και στους δύο εξεταζόμενους φορείς.

Η ακαμψία του κόμβου δεν επηρεάζεται από τη μεταβολή της δύναμης σύσφιξης, καθώς καθορίζεται από την ακαμψία των άλλων συστατικών μερών του κόμβου (τη σύνδεση στην όψη του υποστυλώματος, το κορμό του υποστυλώματος, κ.λπ.).



Σχήμα 4.24 : Επιρροή της δύναμης σύσφιξης στην ικανότητα καμπτικής ροπής

Πίνακας 4.4 : Ροπές κάμψης για το μοντέλο FD 1-2-DS λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της δύναμης σύσφιξης

Δύναμη σύσφιξης	M (+) [kNm]	M (-) [kNm]	Γ (+) [-]	Γ (-) [-]	ΔM (+/-)/M (-) [-]
N _b	453	602	-	-	25%
0.5N _b	230	298	51%	50%	23%
1.5N _b	690	902	152%	150%	24%

Πίνακας 4.5 : Ροπές κάμψης για το μοντέλο FD 2-2-DS λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή της δύναμης σύσφιξης

Δύναμη σύσφιξης	M ⁽⁺⁾ [kNm]	M ⁽⁻⁾ [kNm]	Γ ⁽⁺⁾ [-]	Γ ⁽⁻⁾ [-]	ΔM ^(+/-) /M ⁽⁻⁾ [-]
N _b	484	564	-	-	14%
0.5N _b	250	290	52%	51%	14%
1.5N _b	714	838	148%	149%	15%

4.6.3 Επιρροή του συντελεστή τριβής

Μια άλλη σημαντική παράμετρος σχεδιασμού είναι ο συντελεστής τριβής μεταξύ των ολισθαίνοντων επιφανειών. Προκειμένου να εξεταστεί ο ρόλος του στην συμπεριφορά του κόμβου, εξετάζονται τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή δυναμικής τριβής μ , δηλαδή το 5% εκατοστημόριο ($\mu_{5\%}$), η μέση τιμή (μ_{avg}) που ισούται με 0.59 και το 95% εκατοστημόριο ($\mu_{95\%}$) (Πίνακας 4.3).

Στο Σχήμα 4.25 φαίνονται οι αριθμητικές καμπύλες σε όρους ροπής κάμψης-στροφής χορδών. Παρατηρείται ότι όσο υψηλότερο είναι το εκατοστημόριο των τιμών του συντελεστή τριβής τόσο μεγαλύτερη είναι η ικανότητα του κόμβου. Αυτή η παρατήρηση επιβεβαιώνει την ανάγκη να ληφθεί υπόψη η μεταβλητότητα των ιδιοτήτων τριβής των πλακών τριβής για το σχεδιασμό των δομικών μερών που δεν διαρρέουν.

Παρόμοια συμπεριφορά κράτυνσης/χαλάρωσης μπορεί να παρατηρηθεί και για τις δύο διατάξεις κόμβου και, επιπλέον, οι καμπύλες απόκρισης φαίνονται να κλιμακώνονται ανάλογα με τον συντελεστή τριβής. Οι Πίνακες 4.6 και 4.7 συνοψίζουν τη μεταβολή της ικανότητας κάμψης των μοντέλων FD-1-2-DS και FD-2-2-DS που αναλύθηκαν με μεγαλύτερες τιμές συντελεστή τριβής (μ_{avg} και $\mu_{95\%}$) σε σχέση με την τιμή σχεδιασμού ($\mu_{5\%}$) υπό συνθήκες φόρτισης αρνητικής ($M^{(-)}$) και θετικής ($M^{(+)}$) ροπή.

Πίνακας 4.6 : Ροπές κάμψης για το μοντέλο FD 1-2 λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή του συντελεστή τριβής

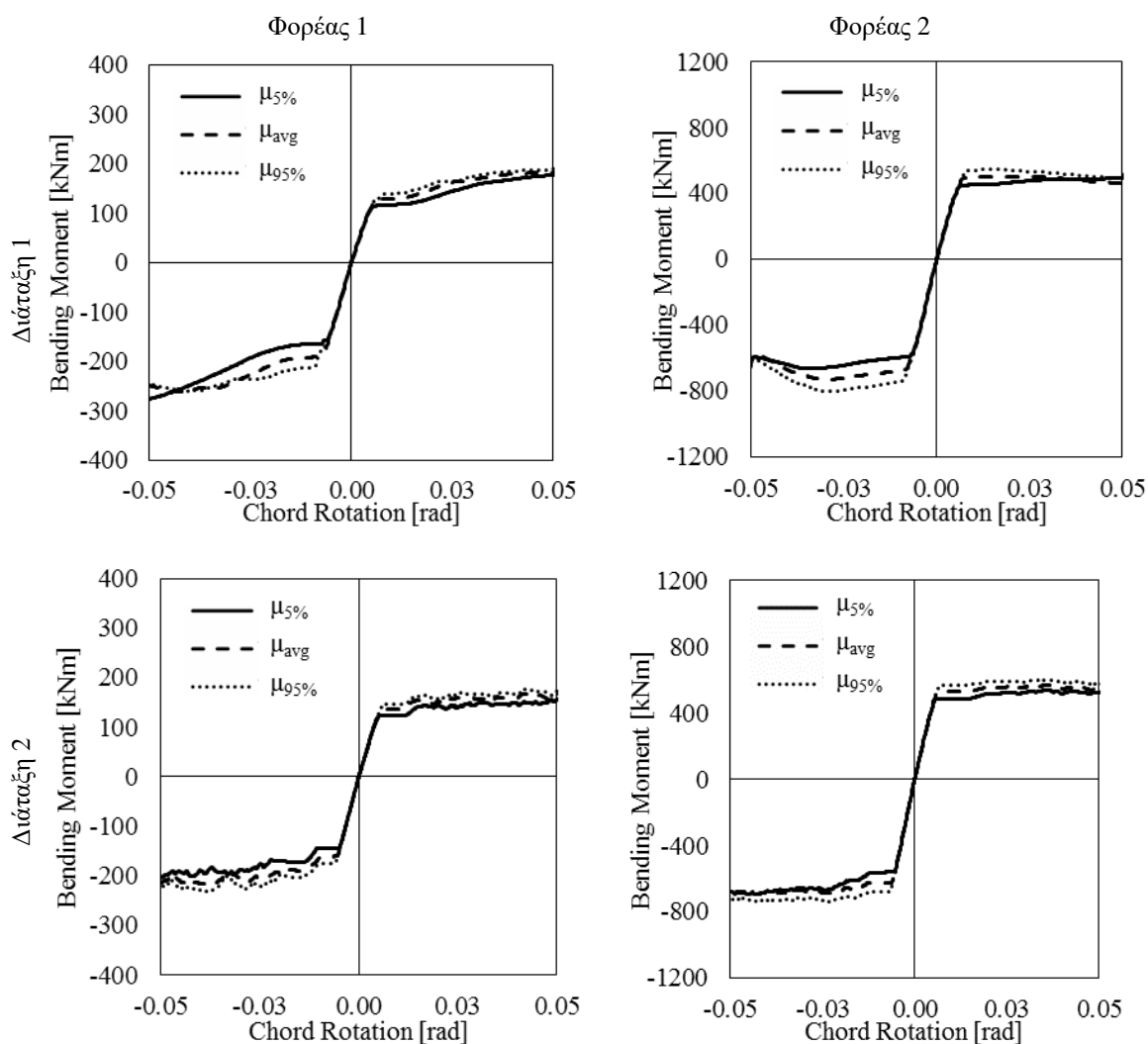
Συντελεστής τριβής	$\Delta\mu$ [-]	$M^{(+)}$ [kNm]	$M^{(-)}$ [kNm]	$\Gamma^{(+)}$ [-]	$\Gamma^{(-)}$ [-]	$\Delta M^{(+/-)}/M^{(-)}$ [-]
$\mu_{5\%}$	-	446	593	-	-	25%
μ_{avg}	110%	521	670	117%	113%	22%
$\mu_{95\%}$	117%	535	733	120%	124%	27%

Πίνακας 4.7: Ροπές κάμψης για το μοντέλο FD 2-2 λαμβάνοντας υπόψη τη μεταβολή του συντελεστή τριβής

Συντελεστής τριβής	$\Delta\mu$ [-]	$M^{(+)}$ [kNm]	$M^{(-)}$ [kNm]	$\Gamma^{(+)}$ [-]	$\Gamma^{(-)}$ [-]	$\Delta M^{(+/-)}/M^{(-)}$ [-]
$\mu_{5\%}$	-	484	564	-	-	14%
μ_{avg}	110%	529	627	109%	111%	16%
$\mu_{95\%}$	117%	568	679	117%	120%	16%

Η μεταβολή στην περίπτωση του FD-1-2-DS διαφέρει σε σχέση με τη μεταβολή του συντελεστή τριβής. Συγκεκριμένα, παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση της ροπής κάμψης για την ίδια αύξηση του συντελεστή τριβής. Αντίθετα, οι αναλύσεις του μοντέλου FD-2-2-DS στον Πίνακα 4.7 δείχνουν μια μεγαλύτερη εξάρτηση της ικανότητας κάμψης με την τυχαιότητα της ιδιότητας τριβής.

Η παράμετρος $\Delta M^{(+/-)}/M^{(-)}$, που αξιολογήθηκε επίσης για αυτό το σύνολο αναλύσεων, επιβεβαιώνει την προηγούμενη παρατήρηση σχετικά με τη σχέση μεταξύ της διάταξης του αποσβεστήρα και της διαφορετικής απόκρισης υπό συνθήκες θετικής και αρνητικής ροπής (τιμές που κυμαίνονται περίπου στο 25% για τη διάταξη 1 και στο 15% για τη διάταξη 2).



Σχήμα 4.25: Η επιρροή του συντελεστή τριβής στην αντοχή σε ροπή κάμψης

4.7 Βιβλιογραφία

- [1] Latour M., Piluso V., Rizzano G. (2014) “Experimental Analysis on Friction Materials for Supplemental Damping Devices”, *Construction and Building Materials*, 65:159-176.
- [2] Dassault Systèmes. Abaqus analysis 6.14 User’s manual. Simulia Inc.; 2015
- [3] M. D’Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo, “Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable GR10.9 bolt assemblies”, *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 124, pp. 77-90, 2016.
- [4] M. D’Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo, “Simplified criteria for finite element modelling of European preloadable bolts”, *Steel and Composite Structures*, vol. 24(6), pp. 643-658, 2017.
- [5] Cassiano D., D’Aniello M., Rebelo C., (2017) Parametric finite element analyses on flush end-plate joints under column removal. *Journal of Constructional Steel Research*, 137: 77–92.

- [6] Cassiano D., D’Aniello M., Rebelo C., (2018). Seismic behaviour of gravity load designed flush end-plate joints. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 26(5): 621-634. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2018.26.5.621>.
- [7] D’Aniello M., Tartaglia R., Costanzo S., Landolfo R. “Seismic design of extended stiffened end-plate joints in the framework of Eurocodes”. *Journal of Constructional Steel Research*, 128, 512–527, 2017
- [8] Tartaglia R., D’Aniello M., Rassati G.A., Swanson J.A., Landolfo R. (2018). Full strength extended stiffened end-plate joints: AISC vs recent European design criteria. *Engineering Structures*, 159:155–171.
- [9] Tartaglia R., D’Aniello M., Zimbru M., Landolfo R., (2018). Finite element simulations on the ultimate response of extended stiffened end-plate joints. *Steel and Composite Structures, An International Journal* 27(6): 727-745. DOI: 10.12989/scs.2018.27.6.727.
- [10] Tartaglia R., D’Aniello M., Landolfo R., (2018). The influence of rib stiffeners on the response of extended end-plate joints. *Journal of Constructional Steel Research*, 148: 669–690.
- [11] ANSI/AISC 341-16 (2016). “Seismic Provisions for Structural Steel Buildings”. American Institute of Steel Construction.
- [12] Tartaglia R., D’Aniello M., “Nonlinear performance of extended stiffened end plate bolted beam-to-column joints subjected to column removal” *The Open Civil Engineering Journal*, 2017, 11: 369-383
- [13] D’Aniello M., Cassiano D., Landolfo R. “Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable GR10.9 bolt assemblies”. *Journal of Constructional Steel Research*, 124: 77–90, 2016.
- [14] D’Aniello M., Cassiano D., Landolfo R., (2017) Simplified criteria for finite element modelling of European preloadable bolts. *Steel and Composite Structures, An International Journal*, 24(6): 643-658.
- [15] Zimbru M., D’Aniello M., De Martino A., Latour M., Rizzano G., Piluso V., (2018). Investigation on Friction Features of Dissipative Lap Shear Connections by Means of Experimental and Numerical Tests. *The Open Construction and Building Technology Journal*, 12(Suppl-1, M9): 154-169.
- [16] Francavilla A.B., Latour M., Piluso V., Rizzano G. (2015). Simplified finite element analysis of bolted T-stub connection components. *Engineering Structures*, 100: 656-664.

5 Συμπεριφορά σε φόρτιση κρούσης

5.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών

COR	: Coefficient of Restitution – συντελεστής επαναφοράς
DIC	: Digital Image Correlation – συσχέτιση ψηφιακών εικόνων
DIF	: Dynamic Increase Factor - δυναμικός παράγοντας αύξησης
DF	: Dynamic Factor – δυναμικός παράγοντας
DST	: Double Split Tee – διπλό συνδετικό T
FE	: Finite element – πεπερασμένο στοιχείο
FEM	: Finite Element Model – μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων
FI	: Full Impact - πλήρης κρούση
LTB	: Lateral Torsional Buckling – στρεπτοκαμπτικός λυγισμός
SFD	: Symmetrical Friction Damper – συμμετρικός αποσβεστήρας τριβής
SHJ	: Sliding Hinge Joint – αρθρωτός κόμβος ολίσθησης
SI	: Sequential Impact - διαδοχική κρούση

5.2 Πίνακας Συμβόλων

Πεζοί λατινικοί χαρακτήρες

a_{cm}	: κέντρο μάζας της δοκού στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο
a_f	: σημείο εφαρμογής της δύναμης
d	: διάμετρος κοχλίας
d_ε	: παραμόρφωση
d_t	: χρόνος
f_{ub}	: εφελκυστική αντοχή κοχλίας
g	: επιτάχυνση της βαρύτητας
h	: ύψος πτώσης
m	: μάζα του βάρους πτώσης
$v_{act,imp}$: πραγματική ταχύτητα κρούσης
v_{reb}	: ταχύτητα αναπήδησης
$v_{theo,imp}$: θεωρητική ταχύτητα κρούσης

Κεφαλαίοι λατινικοί χαρακτήρες

A_s	: επιφάνεια ενεργούς εφελκυστικής διατομής του κοχλίας
DF_{Pi}	: δυναμικός παράγοντας αξιολόγησης
$E_{act,imp}$: πραγματική ενέργεια κρούσης
$E_{theo,imp}$: θεωρητική ενέργεια κρούσης
F_p	: δύναμη προέντασης κοχλίας
F_u	: αντοχή αστοχίας
F_y	: αντοχή σχεδιασμού
M_{slip}	: αντίσταση σε τριβή
$P_{i,imp}$: παράμετρος συμπεριφοράς υπό φόρτιση κρούσης
$P_{i,st}$: παράμετρος συμπεριφοράς υπό οιονεί-στατική φόρτιση
R_e	: ρυθμός απορρόφησης ενέργειας
S_{ini}	: αρχική ελαστική ακαμψία μετά την εμφάνιση ολίσθησης

Πεζοί ελληνικοί χαρακτήρες

δ_{max}	: μέγιστο βέλος κάμψης του κόμβου
----------------	-----------------------------------

- δ_{perm} : μόνιμο βέλος κάμψης του κόμβου
 $\delta_{i.}$: ικανότητα πλαστιμότητας του αποσβεστήρα μετά την εμφάνιση ολίσθησης
 μ : συντελεστής στατικής τριβής

5.3 Εισαγωγή

Η συμπεριφορά της σύνδεσης δοκού-υποστυλώματος που υπόκειται σε φορτία κρούσης μπορεί να διαφέρει από τη συμπεριφορά που παρατηρείται υπό κανονικές συνθήκες φόρτισης [1–4]. Αυτό οφείλεται κυρίως στην εμφάνιση αυξημένων ρυθμών παραμόρφωσης σε διάφορα συστατικά μέρη των κόμβων, λόγω των υψηλών ταχυτήτων φόρτισης που χαρακτηρίζουν τα φορτία κρούσης.

Ο ρυθμός παραμόρφωσης είναι η ιδιότητα που καθορίζει την παραμόρφωση καταπόνησης (d_e) ανά μονάδα χρόνου (d_i) στην οποία υποβάλλεται ένα υλικό, d_e/d_i , και επηρεάζει τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του χάλυβα. Γενικά, οι ιδιότητες αντοχής αυξάνονται για υψηλότερους ρυθμούς παραμόρφωσης, με μια πιο έντονη αύξηση για χάλυβες με υψηλή πλαστιμότητα. Για παράδειγμα, για χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα, η αντοχή διαρροής σε αυξημένους ρυθμούς παραμόρφωσης (περίπου $600s^{-1}$) μπορεί να θεωρηθεί 1.5 φορές η αντοχή διαρροής υπό στατικά φορτία [5,6], ενώ ο χάλυβας υψηλής αντοχής που χρησιμοποιείται σε κοχλίες, συνήθως δεν δείχνει αύξηση πάνω από 10% της αντοχής διαρροής [1,7,8]. Επιπλέον, εκτός από τη μεταβολή της αντοχής, οι υψηλότεροι ρυθμοί παραμόρφωσης συνήθως σχετίζονται και με μία απώλεια πλαστιμότητας.

Συνήθως, η μεταβολή στις ιδιότητες αντοχής του χάλυβα όταν υπόκειται σε αυξημένους ρυθμούς παραμόρφωσης περιγράφεται από την παράμετρο DIF «δυναμικός παράγοντας αύξησης» (“dynamic increase factor”), που δίνεται από την αναλογία μεταξύ της αντοχής που παρατηρείται όταν λαμβάνονται υπόψη οι αυξημένοι ρυθμοί παραμόρφωσης και της αντοχής που παρατηρείται υπό στατικά φορτία. Μοντέλα που περιγράφουν το δυναμικό παράγοντα αύξησης της αντοχής διαρροής είναι ήδη διαθέσιμα στη βιβλιογραφία [9,10], όπως το μοντέλο Johnson-Cook [9] που περιγράφει τη μεταβολή της αντοχής με τους ρυθμούς παραμόρφωσης ως λογαριθμική συνάρτηση.

Καθώς οι συνδέσεις γενικά αποτελούνται από χάλυβες διαφορετικών ποιοτήτων (τυπικά χάλυβα υψηλής αντοχής για κοχλίες και χάλυβα μεσαίας περιεκτικότητας σε άνθρακα για πλάκες), όσον αφορά τις επιπτώσεις της ταχύτητας παραμόρφωσης στην καθολική συμπεριφορά των χαλύβδινων συνδέσεων, συμπεραίνεται εύκολα ότι η δυναμική τους απόκριση διαφέρει σημαντικά από τη στατική, ανάλογα με τις ιδιότητες του ρυθμού παραμόρφωσης των υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένες οι πλάκες και οι κοχλίες. Γενικά, με την αύξηση της ταχύτητας φόρτισης παρατηρείται μία αύξηση της ελαστικής και οριακής αντοχής τους, ενώ η πλαστιμότητά τους τείνει να μειώνεται [1–4]. Σε αυτό το πλαίσιο, γνωρίζοντας ότι σε κλίμακα κατασκευής, μια καλή τοπική πλαστιμότητα των συνδέσεων είναι αρκετά σημαντική για να επιτραπεί η ανάπτυξη εναλλακτικών διαδρομών φορτίου [11,12], είναι σαφές ότι η επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης πρέπει να ληφθεί σωστά υπόψη στη προσομοίωση της κατασκευής.

Σε αυτό το κεφάλαιο, περιγράφονται περιληπτικά τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα που προέκυψαν κατά τη διάρκεια του έργου FREEDAM [13], σχετικά με τη συμπεριφορά των συνδέσεων FREEDAM υπό φόρτιση κρούσης. Λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να βρεθούν στις διδακτορικές διατριβές των Marina D’Antimo [14] και Ana Francisca Santos [15].

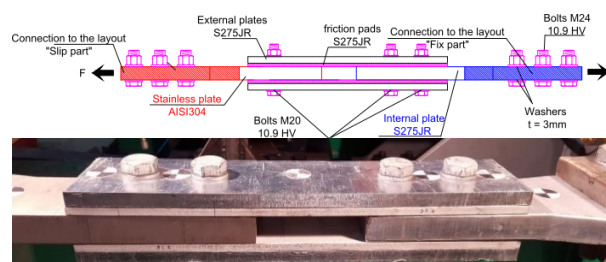
5.4 Αποσβεστήρες FREEDAM υπό φόρτιση κρούσης

5.4.1 Περιγραφή των πειραματικών δοκιμίων και του πειραματικού προγράμματος

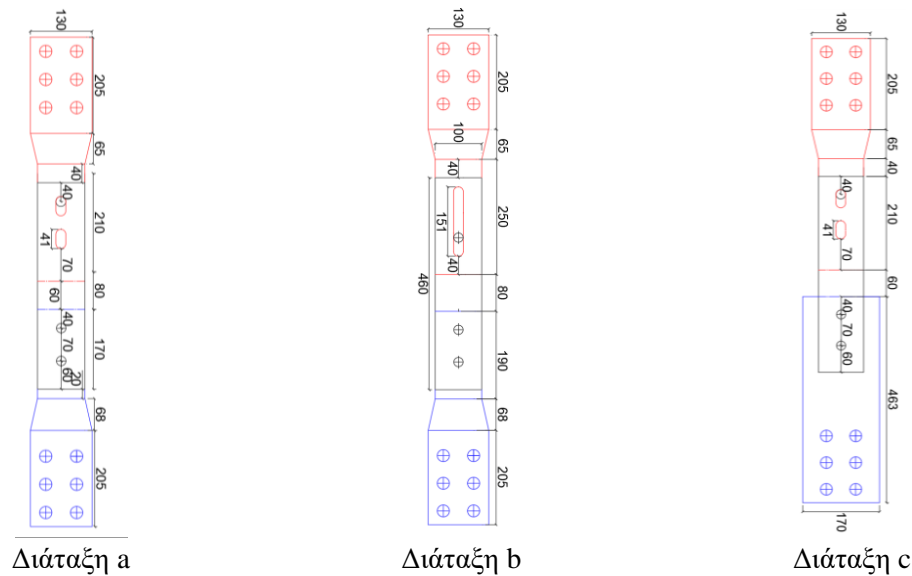
Τα πειραματικά δοκίμια που φαίνονται στο Σχήμα 5.1 είναι παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις ανακυκλικές δοκιμές. Αυτά τα δοκίμια είναι διπλές διατμητικές συνδέσεις με δύο επιπλέον χαλύβδινες πλάκες 8 mm (από χάλυβα S275JR) θερμικά επιστρωμένες (πλάκες τριβής) και προεντεταμένες με κοχλίες M20. Το δοκίμιο συντίθεται από δύο διακριτά μέρη. Το πρώτο είναι το «ολισθαίνον μέρος», στο οποίο η εσωτερική πλάκα (από ανοξείδωτο χάλυβα AISI304) έχει επιμήκεις οπές για να προσομοιώνει την τριγωνική ενίσχυση με επιμήκεις οπές στο πέγμα της σύνδεσης FREEDAM. Το δεύτερο μέρος είναι το «σταθερό μέρος», όπου μια εσωτερική πλάκα χάλυβα S275JR χρησιμοποιείται για τη σύνδεση των δοκιμίων με τον πειραματικό εξοπλισμό. Επιπλέον, δύο εξωτερικές χαλύβδινες πλάκες με πάχος 15 mm τοποθετούνται ανάμεσα στις κεφαλές των κοχλιών και τις πλάκες τριβής ώστε να αναπαραχθεί η κατανομή των δυνάμεων κοχλιών στη διεπιφάνεια. Σχεδιάστηκαν τρεις διαφορετικές παραλλαγές της «τυπικής» διαμόρφωση του Σχήματος 5.1 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3 [16], έτσι ώστε να μπορούν να αξιολογηθούν διαφορετικοί τρόποι αστοχίας του αποσβεστήρα τριβής (Σχήμα 5.2).

Στον Πίνακα 5.1 συνοψίζεται όλο το πειραματικό πρόγραμμα και χωρίζεται σε τρεις ομάδες. Στην πρώτη ομάδα (Group A), χρησιμοποιήθηκε η διάταξη δοκιμίου a (Σχήμα 5.2), η οποία έχει δύο επιμήκεις οπές με συνολικό μήκος ίσο με 41 mm, εσωτερικές πλάκες πάχους 30 mm και προεντεταμένους κοχλίες M20 10.9 HV. Στη δεύτερη ομάδα (Group B), χρησιμοποιήθηκαν κοχλίες M20 8.8 SB και στις οκτώ δοκιμές. Σε αυτές τις δοκιμές, το δοκίμιο a χρησιμοποιήθηκε για τις στατικές δοκιμές, ενώ στις δοκιμές κρούσης χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο b, το οποίο διαφέρει από το δοκίμιο a στο μήκος της επιμήκης οπής (έχει μόνο μία μεγαλύτερη επιμήκη οπή, Σχήμα 5.2). Τέλος, στη τρίτη ομάδα (Group C), χρησιμοποιήθηκε το δοκίμιο c, που διαφέρει από τη διάταξη a στο πάχος των εσωτερικών πλακών (εδώ έχουν πάχος 10 mm) έτσι ώστε να μπορεί να δοκιμαστεί η πλάκα σε κατάσταση αστοχίας λόγω σύνθλιψης άντυνας. Επιπλέον, το πλάτος της εσωτερικής πλάκας στο σταθερό μέρος αυξήθηκε για να διασφαλιστεί ο μηχανισμός αστοχίας στο ολισθαίνον μέρος του δοκιμίου. Επιπρόσθετα, τα τρία διαφορετικά υλικά επίστρωσης που επιλέχθηκαν βάσει των αποτελεσμάτων των ανακυκλικών δοκιμών στους αποσβεστήρες FREEDAM, δηλαδή τα M1, M4 και M6, χρησιμοποιήθηκαν σε κάθε ομάδα πειραμάτων.

Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 32 δοκιμές κρούσης. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν ακόμα 8 οιονεί-στατικές δοκιμές, ώστε να ληφθεί η θεμελιώδης συμπεριφορά των δοκιμίων ώστε να συγκριθεί με τα αποτελέσματα των δοκιμών κρούσης. Πριν από κάθε δοκιμή, οι κοχλίες σφίγγονταν χρησιμοποιώντας ένα βαθμονομημένο δυναμόκλειδο για να εισαχθεί μια δύναμη προέντασης F_p ίση με $0.5 \cdot f_{ub} \cdot A_s$ (f_{ub} είναι η εφελκυστική αντοχή του κοχλία και A_s είναι η επιφάνεια ενεργούς εφελκυστικής διατομής του κοχλία). Το μέγεθος της ροπής που εφαρμόζεται σε κάθε κοχλία εξαρτάται από την τιμή προέντασης σχεδιασμού F_p , τη διάμετρο του κοχλία d και τον συντελεστή κοχλία k .



Σχήμα 5.1 : Δοκίμιο FREEDAM: Πλάγια όψη



Σχήμα 5.2 : Πειραματικά δοκίμια: Πρόσοψη (διαστάσεις σε mm).

Πίνακας 5.1 : Πειραματικό πρόγραμμα

⁽¹⁾ ID	Διάταξη	Κοχλίας	Προένταση	⁽²⁾ Είδος δοκιμής
Group A				
T3-M4/M1/M6-SI-30	a	M20 10.9 HV	122.5 kN	4 Κρούσεις: 20Bar; 50Bar; 75Bar; 100Bar
T4-M1/M6- FI-30				100Bar
T8-M4/M6/M1-St.-30				Μονοτονική FC: 0.2kN/s
T10/11-M4-St.-30				Μονοτονική DC: 0.01mm/s
Group B				
T1-M1-SI-30	b	M20 8.8 SB	98 kN	3 Κρούσεις: 40Bar; 60Bar; 80Bar
T2-M1-FI-30				80Bar
T1-M6-SI-30				3 Κρούσεις: 20Bar;40Bar; 60Bar
T7-M1/M6-St.-30	a			Μονοτονική FC: 0.2kN/s
Group C				
T5-M4-SI-10	c	M20 10.9 HV	122.5 kN	5 Κρούσεις: 50Bar; 80Bar; 100Bar; 120Bar; 150Bar
T5-M1/M6-SI-10				3 Κρούσεις:50 Bar; 100 Bar; 150 Bar
T9-M1-St.-10				Μονοτονική FC: 0.2kN/s

⁽¹⁾ ID-Δοκιμής; Tn^o- X- Tt – Pt: Tn^o=Αριθμός δοκιμής – X=ID Υλικό επίστρωσης (M4, M1, M6) – Tt=Είδος δοκιμής: Διαδοχική (SI), Πλήρης κρούση (FI), Στατική (St.) – Pt=πάχος εσωτερικής πλάκας [mm]

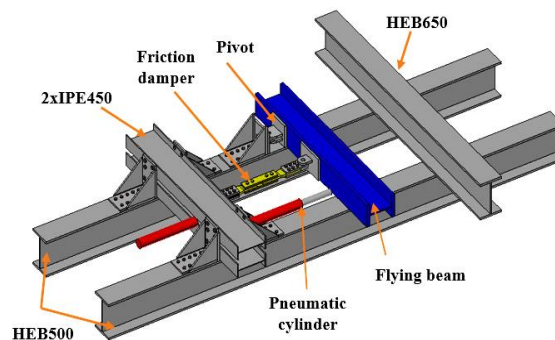
⁽²⁾ FC – έλεγχος δύναμης; DC- έλεγχος μετακίνησης

5.4.2 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

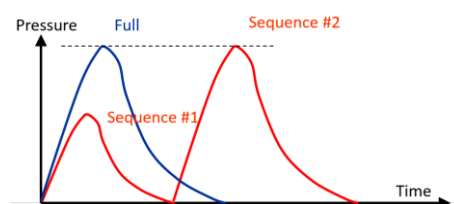
Η πειραματική διάταξη για τις δοκιμές κρούσης παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχήμα 5.3. Αποτελείται από δύο δοκούς HEB 500 τοποθετημένες οριζόντια και στερεωμένες στο δάπεδο του εργαστηρίου. Στο ένα άκρο, αυτές οι δοκοί κοχλιώνονται ορθογώνια σε ένα άκαμπτο πλαίσιο αντίδρασης κατασκευασμένο από δύο IPE450 ενώ, στο άλλο άκρο, συνδέονται με ένα HEB650. Όλα τα χαλύβδινα μέρη της διάταξης κατασκευάστηκαν από δομικό χάλυβα ποιότητας S355. Με αυτόν τον τρόπο, κατασκευάζεται μια πολύ άκαμπτη κατασκευή, η οποία μπορεί να δεχθεί κρούσεις χωρίς παραμορφώσεις ή στροφές. Επιπλέον, το υποστύλωμα στο οποίο ασκείται η δύναμη κρούσης («ιπτάμενη δοκός»: δοκός όπου εφαρμόζεται το φορτίο) τοποθετείται παράλληλα με το άκαμπτο πλαίσιο αντίδρασης και κατασκευάζεται από μια διατομή με πολύ υψηλή δυσκαμψία (HEM340) για να μην υποστεί σημαντικές παραμορφώσεις όταν εφαρμόζεται η δύναμη κρούσης. Η δοκός που βρίσκεται στο αντίθετο άκρο από αυτό που εφαρμόζεται το φορτίο, συγκρατείται από μία διάταξη που επιτρέπει τη στροφή περί δύο αξόνων. Πρόσθετες λεπτομέρειες σχετικά με τα στηρίγματα του πλαισίου δοκιμών μπορούν να βρεθούν στο [17].

Το δοκίμιο συνδέεται με την δοκό στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο και το πλαίσιο αντίδρασης. Οι συνοριακές συνθήκες του δοκιμίου εξαρτώνται από τον τύπο των φορτίων που μεταφέρονται. Σε αυτήν την περίπτωση, το δοκίμιο συνδέθηκε με δύο αρθρώσεις για να μεταδίδει μόνο εφελκυστικές μονοαξονικές δυνάμεις (Σχήμα 5.3).

Μπορούν να εκτελεστούν δύο τύποι δοκιμών κρούσης χρησιμοποιώντας αυτήν τη διάταξη: πλήρης κρούση (Full Impact, FI) και διαδοχική κρούση (Sequential Impact, SI). Σε μια διαδοχική δοκιμή, το ίδιο δοκίμιο υπόκειται σε φόρτιση και αποφόρτιση πολλές φορές, με υψηλότερη τάση κάθε φορά, έως την αστοχία (κόκκινες γραμμές στο Σχήμα 5.4). Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί κατά προσέγγιση η τιμή της τάσης που απαιτείται για την επίτευξη αστοχίας. Επιπλέον, από τη φάση αποφόρτισης του δοκιμίου, μπορεί να προσεγγιστεί η ελαστική ακαμψία του δοκιμίου. Για πλήρη δοκιμή κρούσης, χρησιμοποιείται η τάση που επέφερε αστοχία στη διαδοχική δοκιμή.



Σχήμα 5.3 : Σκαρίφημα της πειραματικής διάταξης των δοκιμών κρούσης – Δοκιμές αποσβεστήρα τριβής



Σχήμα 5.4 : Τύποι δοκιμών κρούσης – Ιστορικό δύναμης

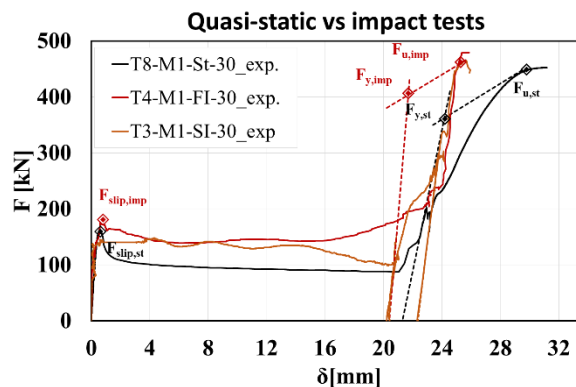
Για τη δοκιμή των δοκιμίων υπό φορτίο κρούσης, η διάταξη των οργάνων μέτρησης που απαιτούνται δεν είναι τόσο απλή όσο για τις οιονεί-στατικές δοκιμές λόγω της δυναμικής φύσης των φορτίων. Πρώτον, οι δυνάμεις αδράνειας του συστήματος δεν μπορούν πλέον να αγνοηθούν και δεύτερον, τα όργανα που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι ειδικά για την ανάγνωση δοκιμών μικρής διάρκειας. Στη συνέχεια, εκτός από τη δύναμη και τις μετατοπίσεις, πρέπει να μετρηθούν επίσης επιταχύνσεις και ταχύτητες. Η δύναμη μετράται από ένα δυναμόμετρο, ενώ η παραμόρφωση του δοκιμίου και της δοκού στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο μετρήθηκε με αισθητήρες τριγωνισμού λέιζερ. Εκτός αυτού, χρησιμοποιήθηκε επίσης μία κάμερα Photron υψηλής ταχύτητας, η οποία κατέγραψε τις δοκιμές και παρείχε μετατοπίσεις, ταχύτητες και επιταχύνσεις κατά τη διάρκεια των δοκιμών σε συγκεκριμένα σημεία του δοκιμίου. Επιπλέον, για να ληφθούν υπόψη οι δυνάμεις αδράνειας της δοκού, χρησιμοποιήθηκαν δύο επιταχυνσιόμετρα για την καταγραφή των επιταχύνσεων στο κέντρο μάζας της δοκού στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο a_{cm} και στο σημείο εφαρμογής της δύναμης a_f .

5.4.3 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών

Ο κύριος σκοπός αυτού του πειράματος ήταν να μελετήσει τη συμπεριφορά των αποσβεστήρων FREEDAM υπό φόρτιση κρούσης και να αξιολογήσει εάν οι ρυθμοί παραμόρφωσης που προκαλούνται γενικά από αυτόν τον τύπο φόρτισης, αλλάζουν σημαντικά τη συμπεριφορά αναφοράς των ίδιων δοκιμίων που παρατηρήθηκαν υπό οιονεί-στατική φόρτιση. Αυτή η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω ενός δυναμικού παράγοντα “ DF ” (Εξ. 5.1):

$$DF_{P_i} = \frac{P_{i,imp}}{P_{i,st}} \quad (5.1)$$

ο οποίος αναφέρεται στο λόγο μιας συγκεκριμένης παραμέτρου συμπεριφοράς (P_i) υπό φόρτιση κρούσης (imp) και της ίδιας παραμέτρου υπό οιονεί-στατική φόρτιση (st). Επιλέχθηκαν πέντε παράμετροι συμπεριφοράς: ο συντελεστής στατικής τριβής μ , η αντοχή σχεδιασμού και αστοχίας (F_y και F_u), η αρχική ελαστική ακαμψία μετά την εμφάνιση ολίσθησης S_{imi} και η πλαστιμότητα του αποσβεστήρα μετά την εμφάνιση ολίσθησης δ_u . Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.5, φαίνονται αυτές οι παράμετροι συμπεριφοράς για τις δοκιμές της πρώτης ομάδας - Group A (Πίνακας 5.1), με την επίστρωση M1. Ο Πίνακας 5.2 και ο Πίνακας 5.3 συνοψίζουν τους δυναμικούς παράγοντες για όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις.



Σχήμα 5.5 : Καμπύλες δύναμης-μετατόπισης πειράματος (Group A, M1)

Πίνακας 5.2 : Σύνοψη των τιμών των δυναμικών παραγόντων τριβής και της απομείωσης της αντίστασης λόγω τριβής

Υλικό	Ποιότητα κοχλία	F_k/F_{slip}		DF_{frict}
		Στατική	Κρούσης	
M4	10.9 HV	0.8	0.84	1.06
M1	10.9 HV	0.7	0.9	1.04
	8.8 SB	0.48	0.84	1.09
M6	10.9 HV	0.5	1.15	1.13
	8.8 SB	0.67	0.83	1.03

F_k : κινηματική δύναμη ολίσθησης (δύναμη στο τέλος της ολίσθησης)
 F_{slip} : αρχική δύναμη ολίσθησης (βλ. Σχ. 5.5)

Πίνακας 5.3: Σύνοψη των τιμών των δυναμικών παραγόντων μετά την εμφάνιση ολίσθησης

Παράμετρος	DF	Group		
		A	B	C
S	DF_S	1.37	1.28	1.44
F_y	DF_y	1.08	-	1.3
F_u	DF_u	1.04	1.09	1.11
δ_u	DF_δ	0.72	0.57	0.44

Με βάση τα αποτελέσματα, τα κύρια συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν σχετικά με τη συμπεριφορά των αποσβεστήρων FREEDAM είναι:

- Παρατηρήθηκε γενικά μία αύξηση της αρχικής αντίστασης τριβής υπό φόρτιση κρούσης ($DF_{friction}$ στον Πίνακα 5.2). Επιπλέον, κατά την ολίσθηση, παρατηρήθηκε υποβάθμιση της δύναμης ολίσθησης τόσο στις δοκιμές κρούσης όσο και στις οιονει-στατικές δοκιμές (F_k/F_{slip} στον Πίνακα 5.2). Ωστόσο, ανεξάρτητα από το υλικό επίστρωσης, αυτή η υποβάθμιση ήταν λιγότερο σημαντική στις δοκιμές κρούσης, πιθανώς επειδή σε υψηλούς ρυθμούς φόρτισης, ο αρχικός συντελεστής τριβής προσεγγίζει τον κινητικό συντελεστή. Από αυτή την άποψη, η εφαρμογή αποσβεστήρων τριβής σε συνδέσεις μπορεί να βελτιώσει τη συμπεριφορά τους υπό φορτία που εφαρμόζονται με ταχείς ρυθμούς, καθώς η αντίσταση τριβής τους αυξάνεται με την παρουσία αυξημένων τιμών παραμόρφωσης.
- Η ελαστική αρχική ακαμψία μετά την ολίσθηση (S) αυξήθηκε επίσης για υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης, το οποίο σχετίζεται με την αύξηση της αντοχής των υλικών που συνθέτουν τα μέρη του αποσβεστήρα τριβής.
- Η επίδραση των ποσοστών φόρτισης στην αντοχή αστοχίας και τη πλαστιμότητα του αποσβεστήρα τριβής ήταν σημαντικότερη όταν το δοκίμιο αστόχησε λόγω της πλάκας σε σύνθλιψη άντυγας από όταν αστόχησε λόγω διάτμησης κοχλία (αύξηση αντοχής 11% έναντι 5% και μείωση πλαστιμότητας 50% έναντι 30%). Αυτό συμβαίνει επειδή ο ανοξείδωτος χάλυβας που χρησιμοποιείται στις πλάκες έχει

υψηλότερη ευαισθησία σε διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης από τον υψηλής αντοχής χάλυβα που χρησιμοποιείται στους κοχλίες [18,19].

- Για τα δοκίμια, οι μηχανισμοί αστοχίας που παρατηρήθηκαν στις στατικές δοκιμές δεν άλλαξαν με παρουσία υψηλών ρυθμών φόρτισης. Οι αλλαγές στο στατικό μηχανισμό αστοχίας των συνδέσεων λόγω φόρτισης κρούσης εξακολουθούν να μην γίνονται πλήρως κατανοητές, καθώς φαίνεται να εξαρτώνται από διάφορες πτυχές, όπως οι μηχανικές και γεωμετρικές ιδιότητες των μερών που αποτελούν σύνδεση (όπως το πάχος των πλακών ή/και της ποιότητας των κοχλιών), ο ρυθμός της δοκιμής και οι πειραματικές οριακές συνθήκες. Για παράδειγμα, η παραμετρική μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Ribeiro *et al.* [20] έδειξε ότι το βραχύ T με την αύξηση του ρυθμού φόρτισης, δείχνει ψαθυρές μορφές αστοχίας. Από την άλλη πλευρά, άλλοι συγγραφείς όπως [3,4], παρατήρησαν πάντα τον ίδιο μηχανισμό αστοχίας, ανεξάρτητα από το πάχος των πλακών ή τον εφαρμοζόμενο ρυθμό φόρτισης.

5.4.4 Προσομοίωση των αποτελεσμάτων των δοκιμών

Μετά το σύνολο πειραμάτων που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, πραγματοποιήθηκε μια αριθμητική μελέτη για τη διεύρυνση των γνώσεων σχετικά με τη συμπεριφορά του αποσβεστήρα τριβής. Αρχικά, το μοντέλο βαθμονομήθηκε προσομοιώνοντας τα πειραματικά αποτελέσματα. Μετά από αυτήν τη βαθμονόμηση, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη λαμβάνοντας υπόψη: i) τέσσερα πάχη εσωτερικής πλάκας: 8 mm, 10 mm 15 mm και 30 mm, για την ενεργοποίηση διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας, ii) μεταβολή της αρχικής προέντασης κοχλία και iii) διαφορετικές τιμές ταχύτητας.

Όλες οι αριθμητικές αναλύσεις πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ABAQUS, χρησιμοποιώντας το δυναμικό επλεγμένο αλγόριθμο επίλυσης (dynamic implicit solver) [21] με την οιονεί-στατική διαδικασία (quasi-static procedure) για τη προσομοίωση της οιονεί στατικής συμπεριφοράς και τη διαδικασία μέτριας απορρόφησης ενέργειας (moderate dissipation procedure) για τη προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς των δοκιμών.

Το μοντέλο έχει την ίδια γεωμετρία με τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν πειραματικά στην προηγούμενη ενότητα (Σχήμα 5.6). Δεν υπήρχε στήριξη στη ολισθαίνουσα πλάκα, και στο άλλο άκρο, η σταθερή εσωτερική πλάκα εξασφαλίστηκε προς την κατεύθυνση της εφαρμογής της μετατόπισης. Όσον αφορά την εφαρμοζόμενη φόρτιση, καθορίστηκαν δύο επακόλουθα βήματα. Πρώτα, οι κοχλίες προεντάθηκαν χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση διαφοράς θερμοκρασίας και μετά, αφαιρέθηκε η εσωτερική ανοξείδωτη πλάκα. Για την οιονεί-στατική ανάλυση, οι μετατοπίσεις εφαρμόστηκαν μονοτονικά. Για τη βαθμονόμηση των δυναμικών αριθμητικών μοντέλων, εφαρμόστηκαν οι πειραματικές καμπύλες μετατόπισης-χρόνου ως συνοριακή συνθήκη.

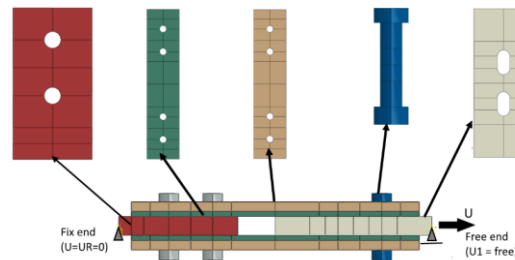
Το μοντέλο δημιουργήθηκε με στερεό στοιχείο τύπου C3D8R (πρώτης τάξεως στοιχεία μειωμένης ολοκλήρωσης) με εξαεδρικό σχήμα στοιχείου (“Hex”), επιτρέποντας μη γραμμική συμπεριφορά γεωμετρίας και υλικού. Οι κανονικές συνθήκες επαφής εισήχθησαν με την ιδιότητα “hard-contact” που επιτρέπει τον διαχωρισμό. Όσον αφορά την επαπτομενική συμπεριφορά, θεωρήθηκαν διαφορετικές ιδιότητες ανάλογα με τις επιφάνειες επαφής. Για τα μέρη που δεν βρισκόταν σε επαφή με τις σφήνες τριβής, ελήφθη ένας συντελεστής τριβής ίσος με 0.2 με διατύπωση “penalty”. Για τα υπόλοιπα μέρη, θεωρήθηκε τιμή του συντελεστή τριβής ίση με την πειραματική τιμή. Επιπλέον, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα, παρατηρείται γενικά απομείωση της αντίστασης λόγω τριβής κατά την ολίσθηση του αποσβεστήρα τριβής. Αυτό το φαινόμενο, σύμφωνα με τα πειραματικά αποτελέσματα, θεωρήθηκε ότι υποβαθμίζει τη δύναμη προέντασης των κοχλιών. Για τις

δοκιμές κρούσης, έχει χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο που εξαρτάται από την ταχύτητα ολίσθησης, λαμβάνοντας υπόψη το DF_{frict} , που δίνεται στον Πίνακα 5.2.

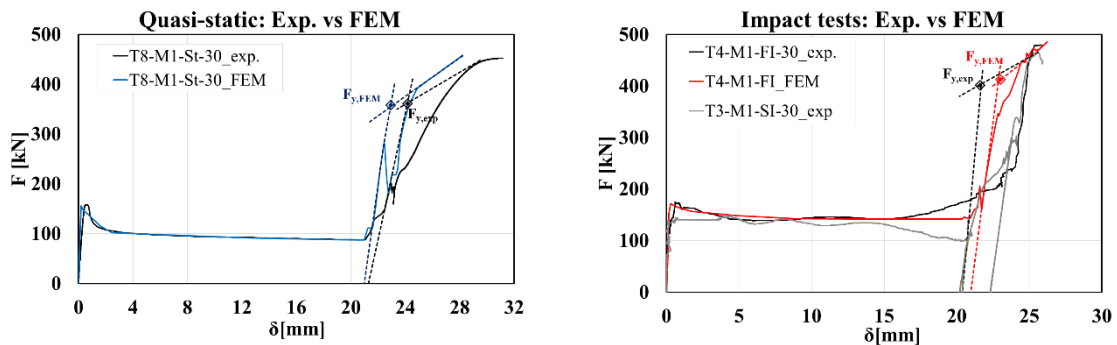
Μια βασική πτυχή αυτών των αριθμητικών προσομοιώσεων ήταν ο χαρακτηρισμός των ιδιοτήτων των υλικών των διαφόρων μερών του αποσβεστήρα, καθώς, για να χαρακτηριστεί πλήρως η συμπεριφορά (στατική και δυναμική) των αποσβεστήρων, απαιτείται ένας πλήρης χαρακτηρισμός των καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης των υλικών συμπεριλαμβανομένων των βλαβών καθώς και της επίδρασης των ρυθμών παραμόρφωσης στις καμπύλες. Η βλάβη των υλικών συμπεριλήφθηκε χρησιμοποιώντας το μοντέλο πλαστικών βλαβών (damage ductile model) που διατίθεται στο ABAQUS, ενώ το μοντέλο Johnson-Cook χρησιμοποιήθηκε για να επεξηγήσει τις επιπτώσεις των ρυθμών παραμόρφωσης [22].

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις μπόρεσαν να περιγράψουν αρκετά καλά τη συμπεριφορά που παρατηρήθηκε στις πειραματικές δοκιμές, με βάση τις καμπύλες δύναμης-μετατόπισης, όπως επεξηγείται στο Σχήμα 5.7 για τις καμπύλες πειραμάτων που φαίνονται παραπάνω.

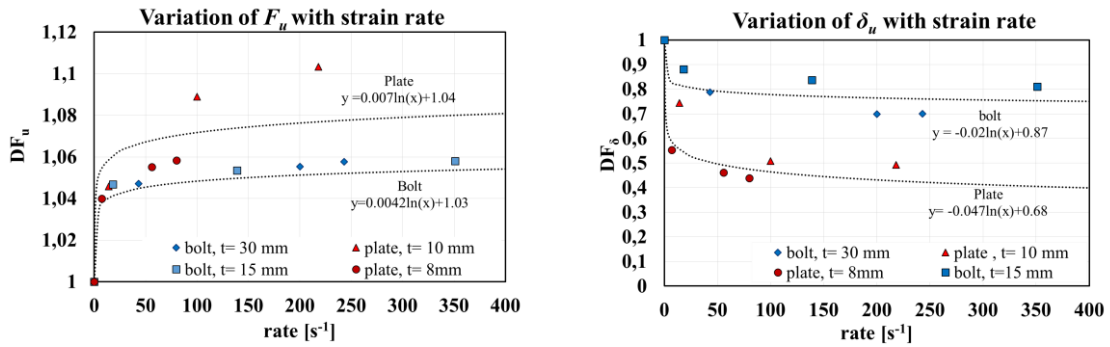
Η αύξηση του πλήθους των παραμέτρων που μελετήθηκαν κατέστησε δυνατή τη παρακολούθηση διαφορετικών μηχανισμών αστοχίας και μεγεθών παραμόρφωσης όλων των μερών του αποσβεστήρα, επιτρέποντας την αξιολόγηση των γραμμών τάσης που περιγράφουν την επίδραση των ρυθμών παραμόρφωσης για μια συγκεκριμένη παράμετρο συμπεριφοράς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.8 για την αντοχή αστοχίας και την παραμόρφωση του κοιλία και της πλάκας ολίσθησης. Αυτές οι γραμμές τάσης εφαρμόστηκαν στη συνέχεια σε ένα αναλυτικό μοντέλο για τον χαρακτηρισμό αυτών των στοιχείων [23].



Σχήμα 5.6 : Αριθμητικό μοντέλο του αποσβεστήρα τριβής: Γεωμετρία και συννοριακές συνθήκες



Σχήμα 5.7 : Πειραματικές δοκιμές σε σχέση με αριθμητικές προσομοιώσεις



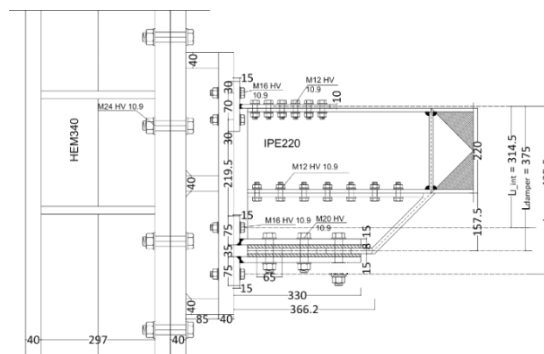
Σχήμα 5.8 : Επιρροή της ταχύτητας στη συμπεριφορά του αποσβεστήρα τριβής

5.5 Συνδέσεις FREEDAM υπό φόρτιση κρούσης

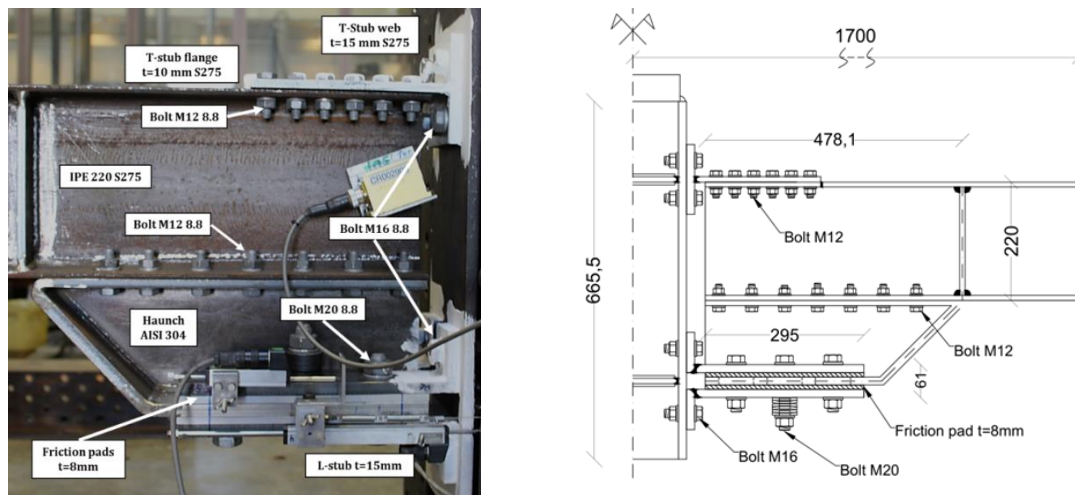
5.5.1 Δοκιμασμένοι τύποι

Τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν στο Πανεπιστήμιο της Κοϊμπρα και στο Πανεπιστήμιο της Λιέγης έχουν παρόμοιες διατάξεις, εκτός από τα υποστυλώματα, όπου για τους εξωτερικούς και εσωτερικούς κόμβους χρησιμοποιήθηκαν HEM340 και HEB220 αντίστοιχα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9 και το Σχήμα 5.10. Αυτά τα δοκίμια είναι μια παραλλαγή ενός κόμβου διπλού συνδετικού T (Double Split Tee – DST) όπου το κάτω T αντικαθίσταται από ένα αποσβεστήρα τριβής, ο οποίος αποτελείται από δύο γωνίες και προεντεταμένες πλάκες τριβής, που βρίσκονται σε μία τριγωνική ενίσχυση που είναι κοχλιωμένη στο κάτω πέλμα μίας δοκού IPE220 μέσω προεντεταμένων κοχλιών ποιότητας 10.9HV M12. Οι γωνίες και οι προεντεταμένες πλάκες τριβής που συνθέτουν τον αποσβεστήρα τριβής συνδέονται με έξι κοχλίες M20 10.9 HV, δύο από του οποίους προεντάθηκαν με 30% της δύναμης προέντασης που προτείνεται από τον Ευρωκώδικα 3 Μέρος 1-8 [24]: 50 kN.

Το άνω πέλμα της δοκού συνδέεται μέσω ενός κοχλιωμένου βραχέος T στο υποστύλωμα, ενώ το κάτω πέλμα κοχλιώνεται στη τριγωνική ενίσχυση στο άκρο της δοκού που συνδέεται με το υποστύλωμα με ένα σύστημα γωνιών. Οι πλάκες τριβής, που επιστρώνονται με ένα ειδικό υλικό (M4), βρίσκονται μεταξύ της τριγωνικής ενίσχυσης της δοκού και των γωνιών και αποτελούν τον αποσβεστήρα τριβής. Επιπλέον, για να επιτρέπεται επαρκής κίνηση του αποσβεστήρα τριβής, η τριγωνική ενίσχυση της δοκού έχει αρκετές επιμήκεις σπές. Όλα τα μέρη της σύνδεσης είναι κατασκευασμένα από χάλυβα S275JR εκτός από τη τριγωνική ενίσχυση της δοκού, που είναι κατασκευασμένη από ανοξείδωτο χάλυβα AISI 304.



Σχήμα 5.9 : Δοκιμασμένη εξωτερική σύνδεση (Πανεπιστήμιο της Κοϊμπρα)



Σχήμα 5.10 : Κύρια μέρη των εσωτερικών συνδέσεων (Πανεπιστήμιο της Λιέγης)

5.5.2 Μελέτες σε εξωτερικές συνδέσεις

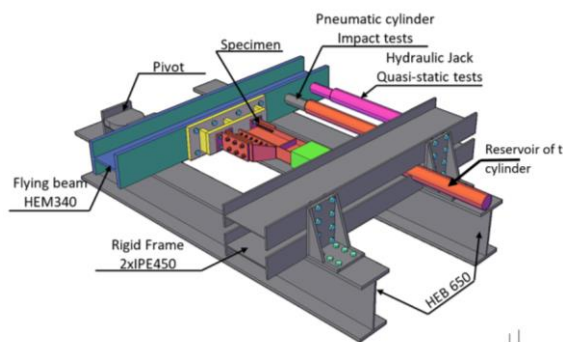
5.5.2.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης και του πειραματικού προγράμματος

Η σύνδεση δοκιμάστηκε υπό αρνητική ροπή κάμψης και το σύνολο πειραμάτων αποτελούνταν τέσσερις δοκιμές (Πίνακας 5.4): μία οιονεί-στατική δοκιμή και τρεις δοκιμές κρούσης. Κατά τη διάρκεια των δοκιμών κρούσης, το φορτίο κρούσης εφαρμόστηκε με διαδοχικό τρόπο. Οι τιμές ταχύτητας που δίνονται στον Πίνακα 5.4 μετά τις δοκιμές αντιστοιχούν στην αρχική εκτιμώμενη ταχύτητα του επενεργητή. Πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η ταχύτητα δεν είναι σταθερή κατά τη διάρκεια των δοκιμών.

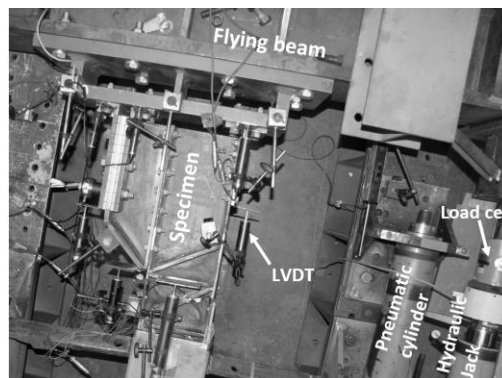
Η πειραματική διάταξη είναι η ίδια με αυτή που χρησιμοποιείται για τις πειραματικές δοκιμές στους αποσβεστήρες FREEDAM (ενότητα 5.4), αλλά, εν προκειμένω, η σύνδεση είναι απευθείας κοχλιωμένη στην δοκό στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο, και στο αντίθετο άκρο συνδέεται με έναν περιορισμό ο οποίος δεν επιτρέπει τις κάθετες μετακινήσεις στη δοκό αλλά επιτρέπει την οριζόντια ολίσθηση (Σχήμα 5.11). Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν επίσης τα ίδια με αυτά στις πειραματικές δοκιμές των αποσβεστήρων FREEDAM (ενότητα 5.4).

Πίνακας 5.4: Πειραματικό πρόγραμμα

Είδος δοκιμής	Οιονεί-στατική	Κρούσης
	Μονοτονική: έλεγχος μετατόπισης 0.02 mm/s	Διαδοχική κρούση: 75 bar (500 mm/s); 120 bar (1000mm/s) ; 200 bar (1200mm/s)



a. Τρισδιάστατο σκαρίφημα



b. Φωτογραφία μέρους της πειραματικής διάταξης

Σχήμα 5.11 : Πειραματική διάταξη

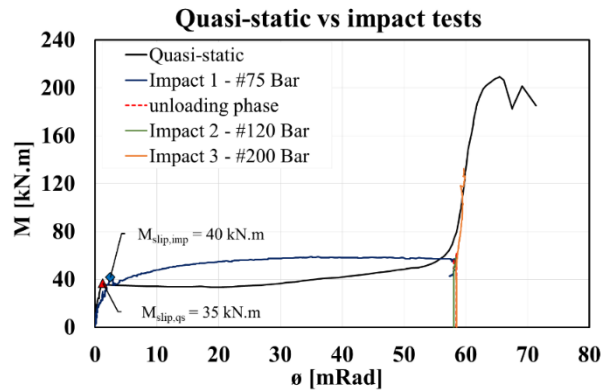
5.5.2.2 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών

Το Σχήμα 5.12 δείχνει τις πειραματικές καμπύλες ροπής κάμψης-στροφής ($M - \theta$) που λαμβάνονται από κάθε διαδοχική κρούση (Κρούση 1-Impact 1, Κρούση 2-Impact 2 και Κρούση 3-Impact 3) καθώς και την οιονεί-στατική καμπύλη $M - \theta$.

Ανεξάρτητα από τον τύπο φόρτισης, η αρχική συμπεριφορά των πειραματικών καμπυλών δείχνει ότι η απόκριση σύνδεσης διέπεται από τη συμπεριφορά του αποσβεστήρα τριβής μέχρι το τέλος της κίνησης στην επιμήκη οπή. Συγκρίνοντας την οιονεί-στατική απόκριση με την απόκριση κρούσης (Impact 1 - #75 bar), παρατηρήθηκε δυναμικός παράγοντας DF ίσος με 1.14 για την αντίσταση σε τριβή (M_{slip} στο Σχήμα 5.12). Εκτός αυτού, κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, υπό οιονεί-στατική φόρτιση, υπάρχει ορατή υποβάθμιση της αντίστασης τριβής, ενώ υπό φόρτιση κρούσης, υπάρχει αύξηση αυτής της τιμής, η οποία σχετίζεται με την αύξηση της ταχύτητας κατά την ολίσθηση [25].

Μετά την πλήρη ολίσθηση της συσκευής τριβής, ενεργοποιούνται επιπρόσθετα συστατικά μέρη της σύνδεσης και αρχίζουν να διαρρέουν ορισμένα μέρη της σύνδεσης που δεν έχουν δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας. Υπό οιονεί στατική φόρτιση, η αστοχία προήλθε από το συνδετικό T σε κάμψη με αστοχία του με αποφλοίωση σπειρώματος των κοχλιών του πέλματος του T (Σχήμα 5.13). Παρόλο που είναι ανεπιθύμητος, αυτός ο μηχανισμός αστοχίας είναι μια τυπική αστοχία για τους κοχλίες HV σε εφελκυσμό και κατά συνέπεια, για τα συνδετικά T με κοχλίες HV όταν έχουν σχεδιαστεί σε αστοχία με μηχανισμό 2 ή 3 [1,26,27].

Όσον αφορά τη δοκιμή κρούσης, μετά την πρώτη κρούση (Impact 1 - #75bar), πραγματοποιήθηκαν δύο επιπλέον δοκιμές σε μεγαλύτερες τάσεις. Δυστυχώς, αυτές οι τάσεις δεν ήταν αρκετές για να προκαλέσουν την αστοχία της σύνδεσης. Ωστόσο, κρούσης να παρατηρηθεί ότι μετά την ολίσθηση, η συμπεριφορά κρούσης ακολουθεί τη στατική.



Σχήμα 5.12 : Συμπεριφορά σε στρόφιξη της πειραματικής σύνδεσης: οιονεί στατικές δοκιμές σε σχέση με δοκιμές κρούσης



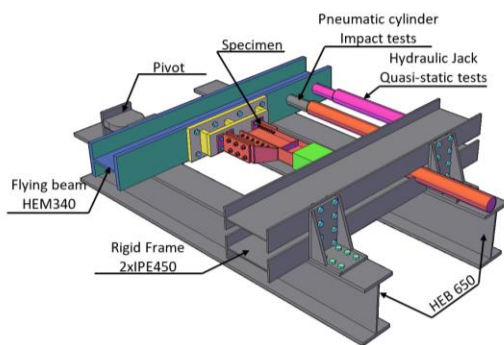
Σχήμα 5.13 : Σύνδεση μετά την αστοχία: συνδετικό T

5.5.2.3 Προσομοίωση των αποτελεσμάτων των δοκιμών

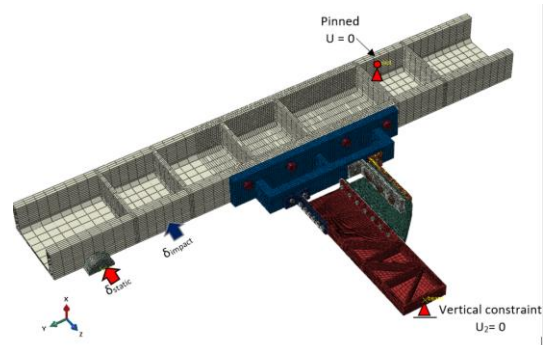
Οι προσομοιώσεις των δοκιμών στη σύνδεση FREEDAM πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό ABAQUS. Για να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος, απλοποιήθηκε η πειραματική διάταξη. Πρώτον, δεδομένου ότι η διάταξη είναι συμμετρική ως προς το επίπεδο XX, προσομοιώθηκε μόνο η μισή διάταξη. Δεύτερον, παραλείφθηκε το πλαίσιο αντίδρασης. Επιπλέον, οι στηρίξεις προσομοιώθηκαν με σημεία αναφοράς, επιβάλλοντας τους απαιτούμενους περιορισμούς στις ζώνες σε επαφή με τις στηρίξεις (άρθρωση-pinned constraint και κύλιση στην οριζόντια διεύθυνση-vertical constraint στο Σχήμα 5.14b), ενώ η ράβδος του επενεργητή προσομοιώθηκε ως στερεό αντικείμενο στο οποίο εφαρμόζονται μετατοπίσεις στο χρόνο.

Συνολικά, εξετάστηκαν πέντε διαφορετικά μέρη: i) η δοκός HEM 340 στην οποία εφαρμόζεται το φορτίο, ii) η δοκός IPE 220, iii) ο επενεργητής, iv) το άκαμπτο μέρος που συνδέει τη σύνδεση με τη δοκό HEM 340 και v) όλα τα μέρη της σύνδεσης FREEDAM. Όλοι οι κοχλίες προσομοιώθηκαν ως ένα ενιαίο τμήμα κοχλία+κεφαλή+περικόχλιο, εκτός από τους κοχλίες M16 HV, όπου η μετάβαση μεταξύ του λείου κορμού και του σπειρώματος προσομοιώθηκε μειώνοντας την επιφάνεια διατομής του κοχλία, όπως προτείνεται από τους Grimsno *et al.* [28] (Σχήμα 5.15), για την πιο σωστή εκτίμηση της αστοχίας περικόχλιου που παρατηρήθηκε στην πειραματική δοκιμή.

Όσον αφορά τις ιδιότητες/παραδοχές προσομοίωσης (δημιουργία πλέγματος, αλληλεπιδράσεις επαφών, προένταση, ιδιότητες υλικού κ.λπ.), χρησιμοποιήθηκε και εδώ η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για τα μοντέλα των αποσβεστήρων FREEDAM.

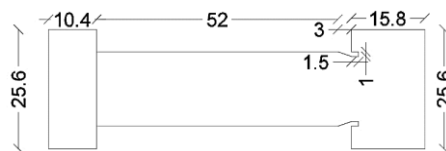


a. Πειραματικό τρισεδιάστατο σκαρίφημα

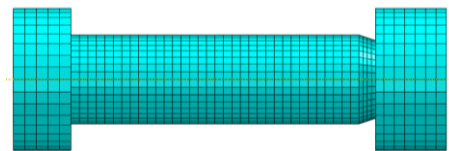


b. Μοντέλο

Σχήμα 5.14 : Μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων (FEM): Συνοριακές συνθήκες



a. Διαστάσεις (σε mm)



b. Πλέγμα

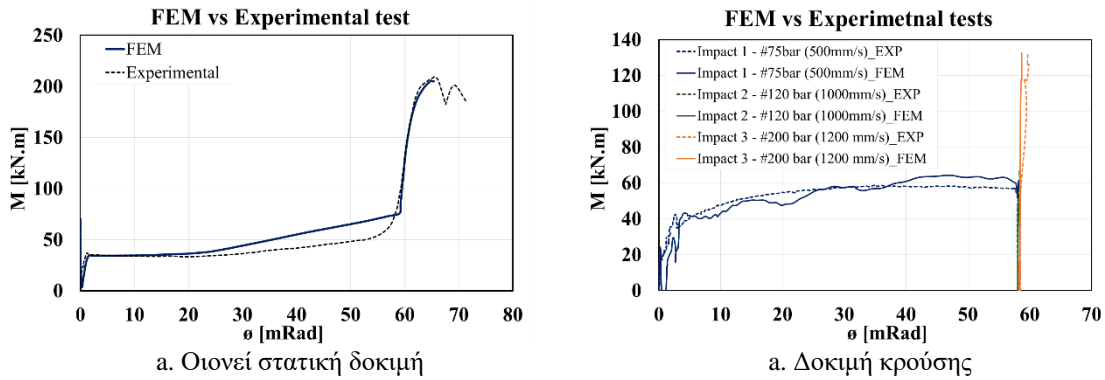
Σχήμα 5.15: Προσομοίωση κοχλία M16 HV

Οι αριθμητικές προσομοιώσεις χωρίστηκαν σε δύο μέρη: πρώτα, προσομοιώθηκαν οι πειραματικές δοκιμές (Σχήμα 5.16) και στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε μια παραμετρική μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη: i) τη κατεύθυνση κάμψης (θετική και αρνητική ροπή κάμψης), ii) την επίδραση της πλαστιμότητας του κοχλία προσομοιώνοντας τη χρήση 2 περικοχλίων στους κοχλίες HV και iii) τον ρυθμό φόρτισης.

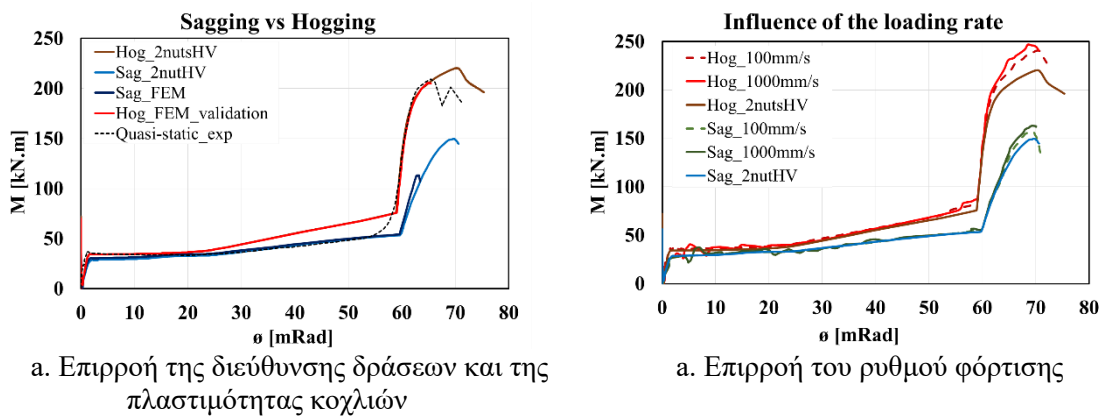
Με βάση τα αριθμητικά αποτελέσματα, εξάχθηκαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η αριθμητική μελέτη έδειξε ότι η συμπεριφορά της σύνδεσης υπό θετική και αρνητική ροπή κάμψης δεν είναι συμμετρική (Σχήμα 5.17a). Αυτή η ασυμμετρία μέχρι την ολίσθηση έχει συσχετιστεί με το μεγαλύτερο άνοιγμα των L σε σύγκριση με το άνοιγμα των T υπό αρνητική ροπή [29]. Μετά την ολίσθηση, η ασύμμετρη συμπεριφορά οφείλεται στη διαφορετική συνεισφορά των άνω και κάτω L, η οποία φαίνεται να οφείλεται κυρίως στην διατμητική παραμόρφωση στο φορτίο αστοχίας των κοχλίων του αποσβεστήρα τριβής, οι οποίοι δεν ήταν όλοι σε επαφή με τους κορμούς και των δύο L. Ωστόσο, αποδείχθηκε μέσω πεπερασμένων στοιχείων (FE) ότι αυτή η συμπεριφορά θα μπορούσε να βελτιωθεί, αποφεύγοντας την ψαθυρή αστοχία του σπειρώματος περικοχλίου των κοχλίων των T, προσομοιώνοντας τη χρήση 2 περικοχλίων στα T (Σχήμα 5.17a).
- Όσον αφορά τη δυναμική συμπεριφορά της σύνδεσης, γενικά, παρατηρείται αύξηση της αρχικής αντίστασης τριβής με την ταχύτητα των δοκιμών ($DF_{friction}$ μεταξύ 1.02 και 1.14) καθώς και αύξηση της ελαστικής αντοχής (DF_{MRd} μεταξύ 1.1 και 1.15) και

της αντοχής αστοχίας (DF_{Mu} μεταξύ 1.05 και 1.12). Αντίθετα, η πλαστιμότητα μειώνεται, αν και όχι σημαντικά, ($DF_{\theta u}$ μεταξύ 1.0 και 0.88). Εκτός αυτού, δεν παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές στην αρχική ακαμψία των δοκιμών (Σχήμα 5.17b).



Σχήμα 5.16 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) σε σχέση με πειραματικές δοκιμές

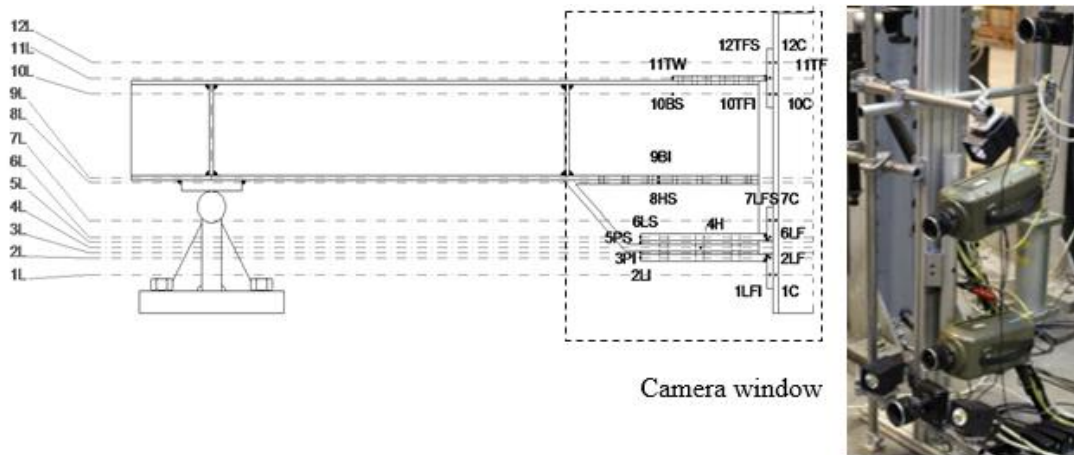


Σχήμα 5.17 : Αποτελέσματα παραμέτρων μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM)

5.5.3 Μελέτες σε εσωτερικές συνδέσεις

5.5.3.1 Περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Το σύνολο πειραμάτων που πραγματοποιήθηκε στις εσωτερικές συνδέσεις περιλάμβανε μια στατική μονοτονική δοκιμή και δοκιμές κρούσης με ρίψη βάρους σε δύο διαφορετικά δοκίμια κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων με συμμετρικούς αποσβεστήρες τριβής (Symmetrical Friction Dampers – SFD, Σχήμα 5.18).

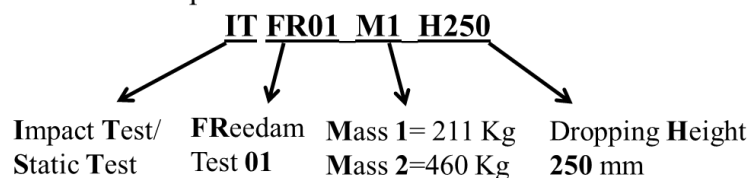


Σχήμα 5.18 : Διαμόρφωση δοκιμής κρούσης (το μισό του δοκιμίου) με μέτρηση συσχέτισης ψηφιακών εικόνων

Οι δοκιμές κρούσης έχουν πραγματοποιηθεί μέσω ρίψης βάρους, που προσκρούει στην κεφαλή του υποστυλώματος με μεταβλητές ταχύτητες (Σχήμα 5.18 και Σχήμα 5.20). Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν τροποποιήθηκαν δύο παράμετροι: το ύψος πτώσης της προσπίπτουσας μάζας σταθεροποιημένο σε μέγιστο 4.1 μέτρα από την κορυφή του υποστυλώματος στο οποίο προσκρούει, και η μάζα του βάρους πτώσης ($M1=211\text{ kg}$ και $M2=460\text{ kg}$ – Σχήμα 5.20). Αυτές οι παράμετροι καθορίζονται σύμφωνα με την επιθυμητή ενέργεια κρούσης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Η προσπίπτουσα μάζα συνδέεται με σωληνοειδείς οδηγούς (Σχήμα 5.20), οι οποίοι καθοδηγούν τη μάζα μέχρι την κρούση και κατά τη διάρκεια της αναπήδησης. Όλα τα δοκίμια προσδιορίζονται με αλφαριθμητικό κωδικό που περιγράφει τα κύρια χαρακτηριστικά της δοκιμής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.19, όπου ο κωδικός υποδεικνύει (i) τον τύπο της δοκιμής (IT για δοκιμή κρούσης-Impact Test ή ST για στατική δοκιμή-Static Test), (ii) τη διαμόρφωση κόμβου (FR για σύνδεσμο FREEDAM), (iii) τον αριθμό της δοκιμής (01, 02, κ.λπ.), (iv) τη χρησιμοποιημένη μάζα ($M1 = 211\text{kg}$ ή $M2 = 460\text{kg}$) και (v) το ύψος πτώσης (H250 υποδηλώνει ύψος πτώσης 250mm).

Πραγματοποιήθηκε ένα σύνολο 6 δοκιμών κρούσης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.5. Για τη μάζα $M1$, τα ύψη πτώσης κυμάνθηκαν από 250 mm έως 4300 mm ενώ, για τη μάζα $M2$, τα ύψη κυμάνθηκαν από 250 mm έως 3744 mm (μέγιστο αξιοποιήσιμο ύψος λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο του δοκιμίου και τη μάζα). Συνολικά, οι ταχύτητες πτώσης κυμάνθηκαν από 2.04 m/s έως 8.45 m/s. Δοκιμάστηκαν δύο δοκίμια, το δοκίμιο 1 προσκρούστηκε 5 φορές, ενώ το δοκίμιο 2 μία φορά με τη μέγιστη αξιοποιήσιμη ενέργεια κρούσης. Ο Πίνακας 5.5 παρέχει μία σύνοψη των δοκιμών κρούσης που εκτελέστηκαν, όπου «1 *» σημαίνει μια διαδοχική κρούση στο ίδιο δοκίμιο.

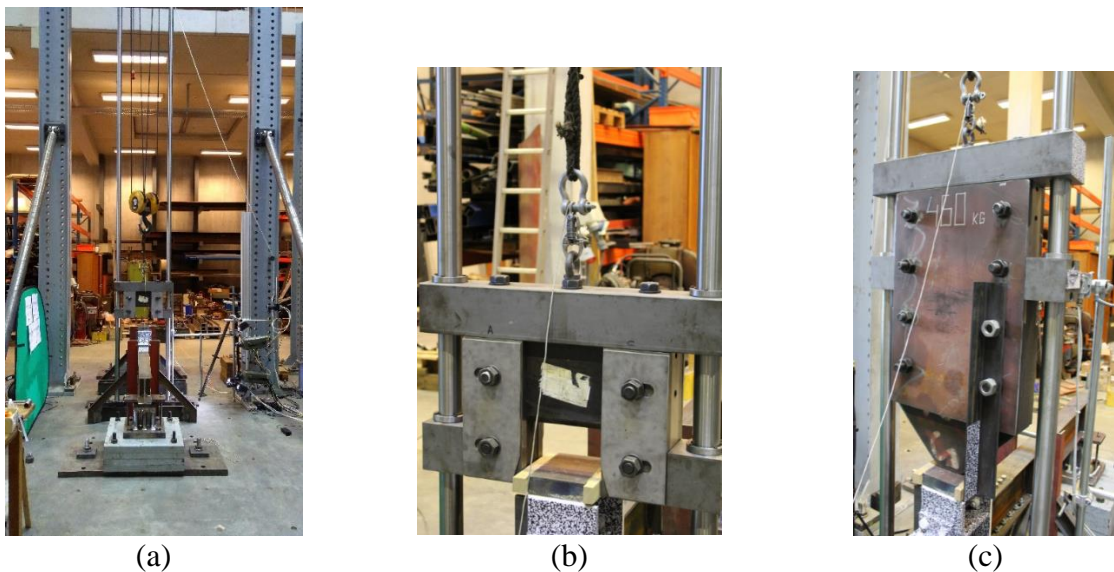
Test label example:



Σχήμα 5.19 : Ονοματολογία δοκιμών

Πίνακας 5.5 : Ονομασία και κύριες ιδιότητες δοκιμών κρούσης

Δοκιμή κρούσης	Δοκίμιο	M [kg]	h [m]	v [m/s]
ITFR01-M1-H250	1	211	0.25	2.04
ITFR02-M1-H4300	1	211	4.3	8.97
ITFR03-M2-H250	1*	460	0.25	1.98
ITFR04-M2-H2000	1*	460	2	6.09
ITFR05-M2-H2500	1*	460	2.5	6.93
ITFR06-M2-H3744	2	460	3.74	8.45



Σχήμα 5.20 : Διάταξη δοκιμών κρούσης: Μάζα M1 (211kg) (b) και M2 (460 kg) (c)

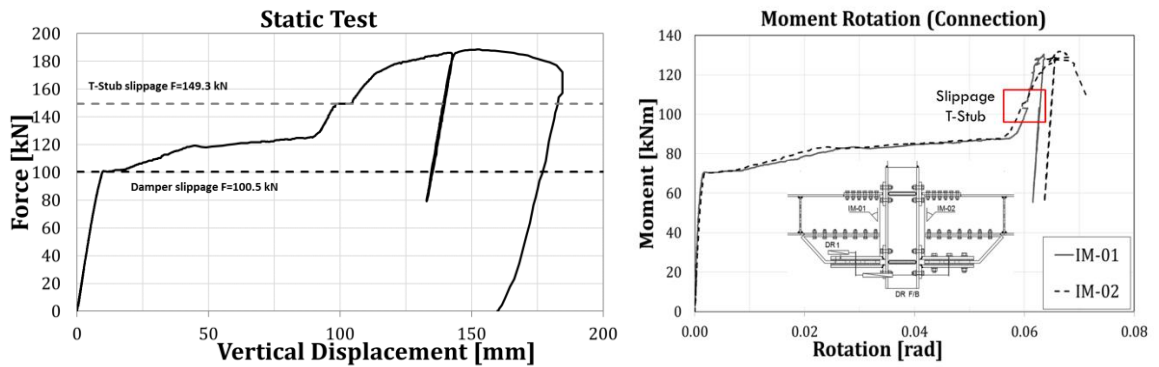
Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές βαθμονόμησης στον εξοπλισμό και δοκιμές εφελκυσμού στο υλικό που χρησιμοποιείται. Οι δοκιμές βαθμονόμησης αποτελούνταν από προκαταρκτικές δοκιμές κρούσης σε αμφιέριστες δοκούς [30].

Όλες οι μετρήσεις κατά τη διάρκεια των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας την τεχνική συσχέτισης ψηφιακών εικόνων (Digital Image Correlation - DIC) (Σχήμα 5.18).

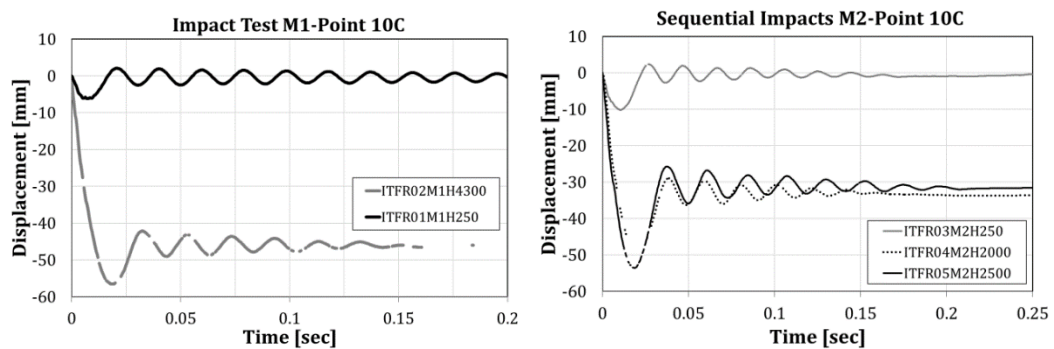
5.5.3.2 Αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών

Μέσω των στατικών δοκιμών, προέκυψαν οι καμπύλες δύναμης-κατακόρυφης μετατόπισης και ροπής-στροφής με χρήση αισθητήρων μετατόπισης και στροφής. Αυτές οι καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 5.21. Παρατηρείται σχεδόν τέλεια συμμετρική συμπεριφορά του δοκιμίου, όπως αναμενόταν. Η μέγιστη εφαρμοζόμενη δύναμη επιτεύχθηκε λόγω της απροσδόκητης εμφάνισης εκτός επιπέδου καθολικής αστάθειας του δοκιμίου. Για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο κατά τη διάρκεια της δοκιμής κρούσης, οι πλευρικοί περιορισμοί των δοκιμίων ενισχύθηκαν για τις δοκιμές κρούσης.

Αυτές οι καμπύλες χρησιμοποιήθηκαν ως αποτελέσματα αναφοράς για την επικύρωση της αριθμητικής προσέγγισης που χρησιμοποιήθηκε αργότερα για την εκτέλεση παραμετρικών μελετών.



Σχήμα 5.21 : Καμπύλες δύναμης-κατακόρυφης μετατόπισης και ροπής-στροφής που λήφθηκαν κατά τη στατική δοκιμή



Σχήμα 5.22 : Αποτελέσματα δοκιμών κρούσης – παραδείγματα μετρημένων μετατοπίσεων σημείου σε σχέση με το χρόνο για το σημείο 10C

Πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές κρούσης με τη μάζα M1 στο δείγμα 1: η δοκιμή ITFR01-M1-H250 και η ITFR02-M1-H4300 (Πίνακας 5.5). Η πρώτη δοκιμή πραγματοποιήθηκε με μικρό ύψος πτώσης 250 mm έτσι ώστε να παραμείνει στην ελαστική περιοχή (δηλ. χωρίς να παρατηρηθεί πλαστικότητα σε κανένα στοιχείο του κόμβου), ενώ η δεύτερη με ύψος πτώσης 4300 mm πραγματοποιήθηκε για την ενεργοποίηση της πλαστικότητας στο δοκίμιο.

Με τη μάζα M2 πραγματοποιήθηκαν τέσσερις δοκιμές κρούσης: τρεις από αυτές (ITFR03, ITFR04 και ITFR05) στο δοκίμιο 1, δηλαδή διαδοχικές κρούσεις στο δοκίμιο που είχε προηγουμένως δοκιμαστεί με τη μάζα M1 με κύριο στόχο τη βαθμονόμηση της διάταξης της δοκιμής με τη νέα μάζα M2, ενώ η τελευταία (ITFR06) πραγματοποιήθηκε στο δοκίμιο 2 με τη μέγιστη ικανότητα του συστήματος, από άποψη ενέργειας και ταχύτητας.

Κατά τη διάρκεια της κρούσης, καταγράφηκαν με τις κάμερες διάφορα σημεία, που ανήκουν στα κύρια συστατικά μέρη του κόμβου. Μερικά παραδείγματα αναφέρονται στο Σχήμα 5.22, όπου δίνονται οι καμπύλες κατακόρυφης μετατόπισης του Σημείου 10 C (βλ. Σχήμα 5.18) σε σχέση με το χρόνο για τις διάφορες δοκιμές. Στα σχήματα φαίνεται μια παρόμοια τάση της εξέλιξης των μετατοπίσεων στο χρόνο για όλα τα σημεία που έχουν καταχωρηθεί.

Στις δοκιμές ITFR01-M1-H250 και ITFR03-M2-H250, όλα τα συστατικά μέρη παραμένουν στην ελαστική περιοχή και το δοκίμιο δεν εμφανίζει παραμένουσες παραμορφώσεις μετά την επιβολή πίεσης στις δοκιμές. Η δοκιμή ITFR02-M1-H4300 παρουσίασε παραμένουσα παραμόρφωση 46.2 mm στο τέλος της δοκιμής, αλλά το μέγεθος

της πλαστικότητας στα συστατικά μέρη του κόμβου ήταν ακόμη περιορισμένο. Πράγματι, η ενέργεια που σχετίζεται με την κρούση με μάζα M1 δεν ήταν επαρκής για να ενεργοποιήσει την πλαστικότητα στα συστατικά μέρη του κόμβου. Ωστόσο, η συσκευή τριβής παρουσίασε ολίσθηση περίπου 20 mm με αποτέλεσμα την προαναφερθείσα μόνιμη παραμόρφωση. Λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική διάσταση των επιμηκών οπών 65 mm, και καθώς οι κοχλίες είχαν τοποθετηθεί στο κέντρο της επιμήκης οπής, οι κοχλίες έφτασαν στο τέλος της διαδρομής τους στις επιμήκεις οπές. Η δοκιμή με τη μέγιστη διαθέσιμη ενέργεια και ταχύτητα (ITFR06) έδειξε ολίσθηση 24 mm του συμμετρικού αποσβεστήρα τριβής (SFD) και παραμένουσα παραμόρφωση 88.5 mm (Σχήμα 5.25).

Σε όλες τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, οι θεωρητικές ταχύτητες που υπολογίστηκαν για την κρούση ($v_{theo,imp}$ – βλ. Εξ. 5.2) είναι ελαφρώς διαφορετικές από αυτές που μετρήθηκαν από όργανα ($v_{act,imp}$). Πράγματι, οι πραγματικές ταχύτητες είναι συνήθως χαμηλότερες από τις θεωρητικές, και κατά συνέπεια, το ίδιο παρατηρείται και για τις ενέργειες ($E_{act,imp}$ είναι η πραγματική ενέργεια και $E_{theo,imp}$ η θεωρητική – βλ. Εξ. 5.3).

$$v_{theo,imp} = \sqrt{2gh} < v_{act,imp} \quad (5.2)$$

$$E_{theo,imp} = \frac{1}{2}mv_{theo,imp}^2 < E_{act,imp} \quad (5.3)$$

όπου g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, m είναι η μάζα του βάρους πτώσης και h είναι το ύψος πτώσης. Οι πραγματικές και οι θεωρητικές τιμές, που φαίνονται στον Πίνακα 5.6, έχουν μεγαλύτερη διασπορά όσο μικρότερο είναι το ύψος πτώσης. Η παρατηρούμενη διαφορά σχετίζεται κυρίως με την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ του βάρους πτώσης και του συστήματος καθοδήγησης που δεν λαμβάνεται υπόψη στη θεωρητική εκτίμηση. Ωστόσο, σε όλες τις δοκιμές, οι λόγοι μεταξύ της θεωρητικής και της πραγματικής ταχύτητας είναι κοντά στο 1, γεγονός που δείχνει μια αμελητέα επίδραση της τριβής στις πραγματικές ταχύτητες. Στον ίδιο πίνακα, φαίνονται επίσης οι τιμές των μέγιστων (δ_{max}) και μόνιμων (δ_{perm}) μετακινήσεων του κόμβου στο σημείο 10 C. Για τις διαδοχικές κρούσεις (ITFR03, ITFR04 και ITFR05), η μόνιμη μετατόπιση αναφέρεται στην προηγούμενη δοκιμή, και η μέγιστη μετατόπιση με δείκτη i ($\delta_{max,i}$) πρέπει να αθροιστεί στις μόνιμες μετατοπίσεις όλων των προηγούμενων κρούσεων. Είναι σαφές ότι μια αύξηση του ύψους πτώσης οδηγεί σε αύξηση των μεγεθών μόνιμης παραμόρφωσης.

Εάν η ταχύτητα κρούσης είναι κοντά στην ταχύτητα αναπήδησης (v_{reb}), δηλαδή την ταχύτητα όταν η προσπίπτουσα μάζα αφήνει το σώμα, η κρούση θεωρείται ελαστική. Στην πραγματικότητα, η κρούση δεν είναι ποτέ εντελώς ελαστική, καθώς μέρος της ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραμόρφωση του προσκρούόμενου σώματος. Η φύση της κρούσης μπορεί να χαρακτηριστεί από την αναλογία αυτών των ταχυτήτων που ονομάζεται Συντελεστής Επαναφοράς (Coefficient of Restitution – COR) (βλ. Εξ. 5.4), που δίνεται στον Πίνακα 5.6. Η τιμή του συντελεστή COR κοντά στη μονάδα σημαίνει ότι η απόκριση του δοκιμίου είναι κυρίως ελαστική.

$$COR = \frac{v_{reb}}{v_{theo,imp}} \leq 1 \quad (5.4)$$

Ο συντελεστής COR για τις δοκιμές κυμαίνεται από 0.58 για την ITFR03 έως και 0.16 για την ITFR02. Αυτό υποδεικνύει ότι η αυξάνοντας την ενέργεια κρούσης (μάζα βάρους ή/και ύψος) οδηγούμαστε σε μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας μέσω της ενεργοποίησης πλαστικών παραμορφώσεων, με αποτέλεσμα η κρούση να γίνεται έντονα ανελαστική.

Πίνακας 5.6 : Αποτελέσματα δοκιμών κρούσης

Δοκιμή κρούσης	h [mm]	$v_{theo,imp}$ [m/s]	$v_{act,imp}$ [m/s]	v_{reb} [m/s]	$v_{act,imp} / v_{theo,imp}$	$E_{theo,imp}$ [J]	$E_{act,imp}$ [J]	COR	δ_{max} [mm]	δ_{perm} [mm]
M1=211 kg										
ITFR01-M1-H250	250	2.21	2.04	1.06	0.92	517.5	439.0	0.51	6.16	NA
ITFR02-M1-H4300	4300	9.18	8.97	1.49	0.98	8900.6	8488.6	0.16	56.5	46.2
M2=460 kg										
ITFR03-M2-H250	250	2.21	1.98	1.16	0.89	1128.2	901.7	0.58	10.2	NA
ITFR04-M2-H2000	2000	6.26	6.09	1.20	0.97	9025.2	8530.3	0.19	49.3	34.8
ITFR05-M2-H2500	2500	7.00	6.93	1.13	0.99	11281.5	11045.7	0.17	53.6	31.1
ITFR06-M2-H3744	3744	8.57	8.45	1.46	0.98	16895.2	16422.6	0.17	102.6	88.5

Στο τέλος των δοκιμών κρούσης, παρατηρήθηκε ένα σημαντικό επίπεδο πλαστικότητας στο L και το T. Επίσης, ήταν ορατή η ολίσθηση της συσκευής τριβής και η φθορά του υλικού επίστρωσης.

Λόγω των περιορισμών των εργαστηριακών εγκαταστάσεων, η δύναμη κρούσης δεν καταγράφηκε άμεσα κατά τη διάρκεια των δοκιμών. Κατά συνέπεια, χρησιμοποιήθηκε το θεώρημα ώθησης-ορμής και μια γραφική προσέγγιση ([14] & [30]).

Ο Πίνακας 5.7 δίνει μια σύνοψη των δύο μεθοδολογιών για την εκτίμηση της μέγιστης δύναμης κρούσης. Παρόλο που οι δύο μεθοδολογίες αποτελούν μια πρόχειρη εκτίμηση της δύναμης, υπολογίζονται οι πειραματικές τιμές των δυναμικών παραγόντων αύξησης (DIF) του κόμβου, μόνο για ανελαστικές κρούσεις καθώς ο DIF έχει φυσική σημασία μόνο σε αυτή τη περίπτωση (φαίνονται στον Πίνακα 5.7). Επιπλέον, για τις διαδοχικές δοκιμές κρούσης ITFR04 και ITFR05, έχει ήδη σημειωθεί ολίσθηση στις προηγούμενες δοκιμές, επομένως η μέγιστη μετατόπιση και η μόνιμη παραμόρφωση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη γραφική μέθοδο και δεν αναφέρονται στον Πίνακα.

Πίνακας 5.7 : Υπολογισμός δυναμικών παραγόντων αύξησης (DIF)

Δοκιμή	δ_{max} [mm]	δ_{perm} [mm]	$v_{act,imp}$ [m/s]	v_{reb} [m/s]	t_{pulse} [s]	F_{ST} [kN]	F_{GR} [kN]	F_{IT} [kN]	DIF_{GR}	DIF_{IT}
Mass M1										
ITFR02	56.5	46.2	8.97	1.49	0.018	118.5	123.1	122.6	1.039	1.03
Mass M2										
ITFR06	102.6	88.5	8.45	1.46	0.027	158.7	164.6	168.8	1.037	1.06

* όπου M είναι η προσπίπτουσα μάζα, $v_{act,imp}$ είναι η μετρηθείσα ταχύτητα, v_{reb} είναι η μετρηθείσα ταχύτητα της πρώτης αναπήδησης, t_{pulse} είναι το πλάτος παλμού της κρούσης, F_{ST} είναι η αντίστοιχη στατική δύναμη, F_{GR} είναι η δύναμη κρούσης που υπολογίστηκε με τη γραφική μέθοδο και F_{IT} είναι η μέγιστη δύναμη κρούσης που υπολογίστηκε με το θεώρημα ορμής.

Ωστόσο, πρέπει να επισημανθεί ότι ο συντελεστής DIF που υπολογίστηκε για τη δοκιμή ITFR06 ενδέχεται να μην είναι ακριβής με αυτήν τη μέθοδο. Πράγματι, κατά τη διάρκεια της στατικής δοκιμής που πραγματοποιήθηκε εμφανίστηκε στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (Lateral Torsional Buckling – LTB).

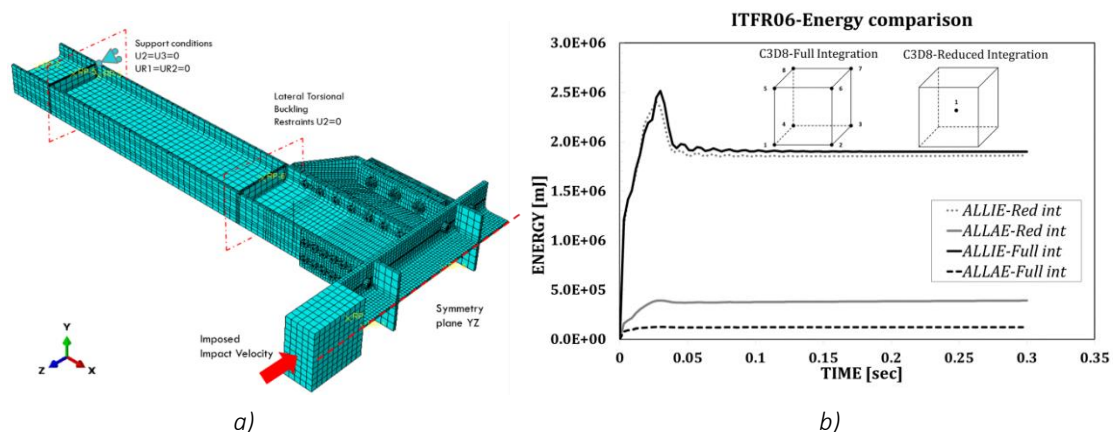
Συνεπώς, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), που παρουσιάζεται στην επόμενη ενότητα και έχει επαληθευτεί μέσω συγκρίσεων με τα πειραματικά αποτελέσματα, πρώτον για τον έλεγχο των υπολογιζόμενων τιμών των δυνάμεων και δεύτερον για τη διεύρυνση του συνόλου των πειραματικών δοκιμών εκτελώντας παραμετρικές αναλύσεις.

5.5.3.3 Προσομοίωση των πειραματικών αποτελεσμάτων

Παραδοχές προσομοίωσης

Ένα προκαταρκτικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της στατικής δοκιμής αναπτύχθηκε στο ABAQUS/CAE χρησιμοποιώντας ένα δυναμικό πεπλεγμένο αλγόριθμο επίλυσης, όπως αναφέρεται στο [31]. Ωστόσο, το μοντέλο δεν περιλάμβανε τη βλάβη των υλικών και, παρόλο που οι δυναμικές πεπλεγμένες αναλύσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν και στη περίπτωση δοκιμών κρούσης, αυτή η μέθοδος είναι χρονοβόρα. Συνεπώς, στοχεύοντας στη βελτιστοποίηση του χρόνου εκτέλεσης, η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις παραμετρικές μελέτες που πρέπει να διεξαχθούν, και για την αποφυγή προβλημάτων σύγκλισης, οι προσομοιώσεις κρούσης στον κόμβο FREEDAM πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιώντας μια ρητή χρονική ολοκλήρωση (explicit time integration). Έχουν αναπτυχθεί ρητές μέθοδοι επίλυσης για προβλήματα υψηλής ταχύτητας όπου η αδράνεια παίζει σημαντικό ρόλο [21]. Για λόγους συνοχής, ο ρητός αλγόριθμος επίλυσης επεκτείνεται επίσης στη στατική ανάλυση του δοκιμίου και συγκρίνεται με τα πειραματικά αποτελέσματα.

Η προσέγγιση που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία ενός μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων στον ρητό αλγόριθμο επίλυσης συνοψίζεται εδώ. Εκμεταλλεύοντας τη συμμετρία του συστήματος, ένα κοντό υποστυλώμα (μισής διατομής HEB 200) συνδέθηκε με τη δοκό χρησιμοποιώντας αρθρωτό κόμβο ολίσθησης (SHJ). Στο άκρο της δοκού τοποθετήθηκε μία κύλιση που προσπαθεί να προσεγγίσει όσο το δυνατόν καλύτερα τις εργαστηριακές συννοριακές συνθήκες, και προσομοιώθηκε το ήμισυ του υποστυλώματος με βάση την συμμετρία κάθετου επιπέδου (Σχήμα 5.23). Δύο διατομές της δοκού συγκρατήθηκαν πλευρικά και στρεπτικά για την προσομοίωση των περιορισμών της πειραματικής διάταξης.



Σχήμα 5.23 : Λεπτομέρειες μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) και σύγκριση ενέργειας

Η κρούση πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια ενός τρισδιάστατου διακριτού άκαμπτου σώματος με ιστροπική αδράνεια και το πλέγμα δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας άκαμπτα στοιχεία. Χρησιμοποιήθηκαν περιορισμοί «tie» για να συνδέσουν τα ελάσματα δυσκαμψίας με τη δοκό και το υποστύλωμα. Εισάχθηκε μια γενική επαφή για όλα τα στοιχεία, ορίζοντας “hard contact” στην κάθετη διεύθυνση και εφαιπτομενική συμπεριφορά με συντελεστή τριβής 0.3. Η επαφή μεταξύ των πλακών τριβής και της τριγωνικής ενίσχυσης με επιμήκεις οπές ορίστηκε ως επαφή επιφάνειας με επιφάνεια, με συγκεκριμένη εφαιπτομενική τριβή και κάθετη συμπεριφορά σύμφωνα με το κλασικό μοντέλο τριβής Coulomb. Η προσπίπτουσα μάζα τοποθετήθηκε απευθείας σε επαφή με το δοκίμιο, αποδίδοντας στη μάζα την τιμή των αρχικών ταχυτήτων ($v_{act,imp}$ που δίνεται στον Πίνακα 5.6) των πραγματικών δοκιμών. Το στοιχείο C3D8 πλήρους ολοκλήρωσης επιλέχθηκε ως το πιο κατάλληλο.

Επίσης πραγματοποιήθηκε μία μελέτη ανάλυσης ευαισθησίας πλέγματος για την επιλογή της βέλτιστης ισορροπίας μεταξύ της ακρίβειας των αποτελεσμάτων και του χρόνου ανάλυσης. Συνολικά, το πλέγμα αποτελείται από 33737 στοιχεία, με συνολικό χρόνο ανάλυσης μεταξύ 20 και 48 ωρών για κάθε προσομοίωση, ανάλογα με τα αιτήματα εξόδου. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικές αναλύσεις: στη πρώτη ανάλυση, οι κοιλίες προεντάθηκαν, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια δεύτερη δυναμική ανάλυση, όπου η κατάσταση παραμόρφωσης λόγω της προέντασης θεωρήθηκε ως αρχική κατάσταση στην αρχή της δεύτερης ανάλυσης (ως προκαθορισμένο πεδίο). Οι κοιλίες προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας την ονομαστική διάμετρο και την ονομαστική τάση του υλικού υπό κλίμακα, όπως εξηγείται στα [32–36]. Η προένταση κοιλία εφαρμόζεται στη μεσαία διατομή του κορμού του κοιλία, χρησιμοποιώντας την επιλογή “Bolt Force”. Ακολουθώντας τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στα [30,37], η απόσβεση προσομοιώθηκε με την κλασική θεωρία Rayleigh, βαθμονομώντας μόνο τον συντελεστή μάζας ($\alpha=11$) με συντελεστή απόσβεσης περίπου 2%.

Τα μοντέλα υλικών που εφαρμόζονται στο Abaqus προέρχονται από δοκιμές. Οι ονομαστικές καμπύλες εφαρμόζονται στο ABAQUS ως καμπύλες πραγματικής τάσης-πραγματικής παραμόρφωσης με μέτρο ελαστικότητας Young 210 GPa και λόγο Poisson 0.3. Το υλικό με πλαστική βλάβη εφαρμόζεται ακολουθώντας τη διαδικασία που έδωσε ο Ρανλονιό στο [38]. Η βλάβη εισήχθη μόνο στα μέρη στα οποία αναμένεται υψηλή πλαστιμότητα: T, L και κοιλίες. Η εξέλιξη της βλάβης μπορεί να εξαχθεί από πειραματικές δοκιμές, χρησιμοποιώντας μια αντίστροφη προσέγγιση και βαθμονομώντας τις παραμέτρους μέσω προσομοίωσης των δοκιμών υλικών στο Abaqus [14,30]. Η προσομοίωση των κοιλιών εφαρμόζεται σύμφωνα με το απλοποιημένο μοντέλο με ένα ισοδύναμο κορμό όπως εξηγείται στο [36]. Δεδομένου ότι δεν πραγματοποιήθηκαν δοκιμές εφελκυσμού στους κοιλίες, γίνεται αναφορά στις δοκιμές του [32]. Για δυναμικά φορτία, ο ρυθμός παραμόρφωσης πρέπει να εφαρμοστεί στο μοντέλο. Από τα αποτελέσματα που ελήφθησαν στο [30], ο καλύτερος τρόπος για να ληφθεί υπόψη ο ρυθμός παραμόρφωσης στη προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση της διατύπωσης Johnson-Cook, η οποία έχει χρησιμοποιηθεί εδώ.

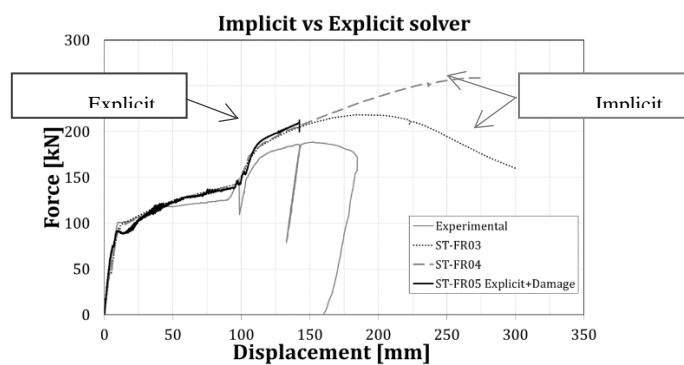
Κύρια αποτελέσματα

Η στατική δοκιμή προσομοιώθηκε με την εφαρμογή μετατόπισης στο υποστύλωμα και την εξαγωγή των αντιδράσεων στη στήριξη (λαμβάνοντας υπόψη τη συμμετρία). Η συμπεριφορά του δοκιμίου, όταν αποφεύγεται ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός (LTB), οδηγεί σε αύξηση της αντοχής και μείωση της πλαστιμότητας. Επιπλέον, λαμβάνοντας υπόψη τις βλάβες των υλικών, η αστοχία του κοιλία μπορεί να ανιχνευθεί από το μοντέλο, κάτι που δεν συνέβη στην αριθμητική προσομοίωση που παρουσιάζεται στα [31,39], όπου η πλαστιμότητα είναι υπερεκτιμημένη. Με την εισαγωγή της βλάβης και

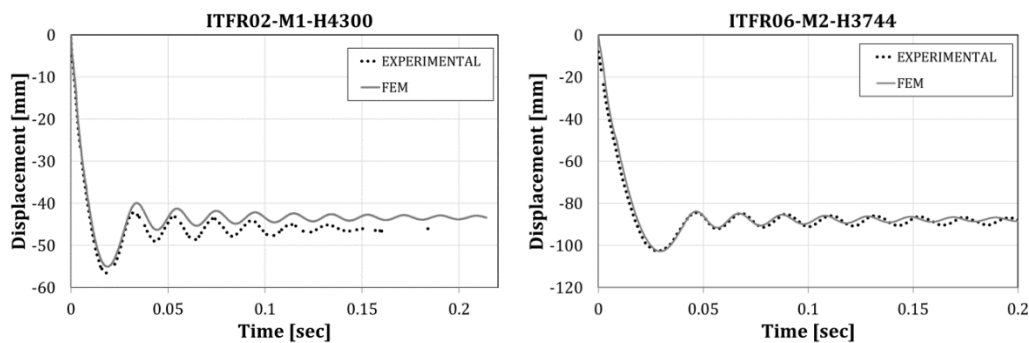
συμπεριλαμβάνοντας τους περιορισμούς εκτός του επιπέδου για να αποφευχθεί η εμφάνιση στρεπτοκαμπτικού λυγισμού (LTB), η δυναμική προσομοίωση δίνει μια καλή πρόβλεψη για τη μέγιστη αντοχή που επιτυγχάνεται στη δοκιμή. Η αστοχία εμφανίζεται στο κοιλία του του κάτω L σε συνδυασμένη διάτμηση και εφελκυσμό.

Αυτό το μοντέλο στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του δοκιμίου στην κρούση. Όπως φαίνεται στις συγκρίσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.25, το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να προσομοιώσει με καλή ακρίβεια την απόκριση του κόμβου κατά τη διάρκεια και μετά την κρούση.

Στον Πίνακα 5.8, παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και των αναλύσεων του μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) με όρους μέγιστης και μόνιμης μετατόπισης (δ_{max} and δ_{perm}) με τα σχετικά σφάλματα της πρόβλεψης. Συνολικά, το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) φαίνεται να προβλέπει με καλή ακρίβεια τις δύο τιμές με μέγιστο σφάλμα περίπου 9% για τη δοκιμή ITFR01.



Σχήμα 5.24 : Σύγκριση μεταξύ πεπλεγμένης και ρητής προσομοίωσης της στατικής δοκιμής



Σχήμα 5.25 : Πειραματικές δοκιμές σε σχέση με προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων (FE)

Πίνακας 5.8 : Σύγκριση μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων (FEM) – πειράματος

Δοκιμή κρούσης	$\delta_{max,Exp}$ [mm]	$\delta_{perm,Exp}$ [mm]	$\delta_{max,FEM}$ [mm]	$\delta_{perm,FEM}$ [mm]	%err, δ_{max} [-]	%err, δ_{per} [-]
ITFR01-M1-H250	6.16	-	5.6	-	9.09%	-
ITFR02-M1-H4300	56.7	46.2	55.1	43.9	2.82%	4.98%
ITFR06-M2-H3744	102.6	88.5	102.8	87.8	0.19%	0.79%

Πίνακας 5.9 : Εκτίμηση δύναμης κρούσης και δυναμικού παράγοντα αύξησης (DIF)

Δοκιμή	$\delta_{max,EX}$ [mm]	$\delta_{perm,EX}$ [mm]	$\delta_{max,FEM}$ [mm]	F_{ST} [kN]	$F_{ST,FEM}$ [kN]	$F_{DYN,FEM}$ [kN]	E_{Diss} [kNmm]	DIF_{FEM} [-]	DIF_{GR} [-]	DIF_{IT} [-]
ITFR02 M1 H4300	56.5	46.2	55.1	118.5	124.9.18	136.8	4774.2	1.09	1.04	1.03
ITFR06 M2 H3744	102.6	88.5	102.8	159.7	153.2	179.2	11234	1.14	1.04	1.06

* όπου $\delta_{max,EX}$ είναι η μέγιστη μετατόπιση στις πειραματικές δοκιμές, $\delta_{perm,EX}$ είναι η μόνιμη παραμόρφωση στις πειραματικές δοκιμές, $\delta_{max,FEM}$ είναι η μέγιστη μετατόπιση στο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), F_{ST} είναι η αντίστοιχη στατική δύναμη, $F_{ST,FEM}$ είναι η στατική δύναμη που υπολογίστηκε με το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), $F_{DYN,FEM}$ είναι η δύναμη που σχετίζεται με τη κρούση, E_{Diss} είναι η ενέργεια που απορροφάται.

Δεδομένου ότι δεν ήταν δυνατή η καταγραφή των δυνάμεων που σχετίζονται με τη κρούση κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, το επαληθευμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM) είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την εκτίμηση της δύναμης που ισούται με το άθροισμα των αντιδράσεων στα σημεία στήριξης. Για τον υπολογισμό του δυναμικού παράγοντα αύξησης (DIF) από το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων (FEM), χρησιμοποιήθηκε η στατική αντοχή που αποκτήθηκε από το FEM ($F_{ST,FEM}$) αντί για την πειραματική (F_{ST}), καθώς, για τη στατική πειραματική δοκιμή, ο στρεπτοκαμπτικός λυγισμός δεν αποφεύχθηκε, σε αντίθεση με την περίπτωση των δοκιμών κρούσης και των αριθμητικών προσομοιώσεων. Ο Πίνακας 5.9 παρέχει επίσης μία σύγκριση μεταξύ DIF που υπολογίζονται με διαφορετικές μεθόδους. Από τη σύγκριση, φαίνεται ότι το θεώρημα ώθησης υποεκτιμά τις τιμές των DIF.

Με τη βοήθεια του επαληθευμένου μοντέλου πεπερασμένων στοιχείων, πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές αναλύσεις για τη διεύρυνση των αποτελεσμάτων που αποκτήθηκαν μέσω του συνόλου των πειραματικών δοκιμών σε κρούση. Συνολικά, η πιο σημαντική παράμετρος που επηρεάζει τη συμπεριφορά των κόμβων είναι η ενέργεια κρούσης, αλλά μπορούν να παρατηρηθούν διαφορετικές συμπεριφορές των κόμβων όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικές μάζες κρούσης ή ταχύτητες. Συγκεκριμένα, από την παραμετρική μελέτη, η ικανότητα απορρόφησης ενέργειας του κόμβου, η οποία είναι η καλύτερη παράμετρος για την ταξινόμηση της απόκρισης, προσδιορίζεται με τη χρήση μιας παραμέτρου που ονομάζεται ρυθμός απορρόφησης ενέργειας R_e [40]. Πραγματοποιήθηκαν τρεις ομάδες παραμετρικών αναλύσεων για συνολικά 25 προσομοιώσεις:

- Η πρώτη ομάδα (Group 1) διερευνά την επίδραση της ταχύτητας κρούσης με βάρη μάζας (M1=0.106t, M2=0.23t και M3=0.3t).
- Η δεύτερη ομάδα (Group 2) διερευνά την επίδραση της μεταβολής του βάρους της μάζας στην απόκριση του κόμβου, διατηρώντας σταθερή την ταχύτητα ($V5=6.26$ m/s).
- Η τελευταία ομάδα (Group 3), διερευνά την επίδραση της ταυτόχρονης μεταβολής της μάζας και της ταχύτητας διατηρώντας σταθερή την ενέργεια κρούσης ($E11=8.83E+03$ J).

Τα κύρια αποτελέσματα της παραμετρικής μελέτης που πραγματοποιήθηκε μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- Η αύξηση V ή M αυξάνει το R_E αλλά, όταν η ενέργεια κρούσης είναι σταθερή, η αντοχή του κόμβου είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες ταχύτητες από ότι σε μεγαλύτερες μάζες λόγω των επιδράσεων του ρυθμού παραμόρφωσης, παρόλο που το εύρος της ταχύτητας που διερευνήθηκε είναι περιορισμένο λόγω της αστοχίας κοχλία. Η κατακόρυφη μετατόπιση φαίνεται να είναι περισσότερο ευαίσθητη στο βάρος της μάζας πτώσης από ότι στην ταχύτητα.
- Δεν υπάρχει σαφής συσχέτιση μεταξύ του δυναμικού παράγοντα αύξησης (DIF) και της στροφικής ταχύτητας του κόμβου, καθώς υπάρχουν πολλοί παράγοντες που συμβάλλουν στη διαφορετική κατανομή της ταχύτητας στα στοιχεία του κόμβου (ταχύτητα, μάζα και ενέργεια κρούσης).
- Ο καθολικός δυναμικός παράγοντας αύξησης (DIF) του κόμβου δεν εμφανίζει σαφή συσχέτιση με τον μέγιστο ρυθμό παραμόρφωσης που μετρήθηκε στα δοκίμια.

5.6 Σύνοψη νέων δεδομένων για τις διατάξεις σχεδιασμού

Ως γενικό αποτέλεσμα των διεξαγόμενων μελετών, αποδείχθηκε ότι η σύνδεση FREEDAM και οι αποσβεστήρες τριβής της παρουσιάζουν καλή και πλάστιμη συμπεριφορά σε περίπτωση δυναμικής φόρτισης και ιδίως σε περίπτωση κρούσης. Μπορεί να απορροφηθεί σημαντική ποσότητα ενέργειας μέσω της ενεργοποίησης του αποσβεστήρα τριβής και των σημαντικών μετατοπίσεών του.

Τα δυναμικά φαινόμενα επηρεάζουν τη καθολική απόκριση της σύνδεσης. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να επιτευχθούν υψηλότερες αντοχές λόγω (i) της αύξησης του συντελεστή τριβής στο επίπεδο της πλάκας τριβής και (ii) της ανάπτυξης φαινομένων ρυθμού παραμόρφωσης στο επίπεδο των συστατικών μερών του κόμβου, ενώ η πλαστιμότητα επηρεάζεται ελαφρώς.

Για να επωφεληθούμε από αυτό το θετικό αποτέλεσμα, απαιτείται η εξασφάλιση της ενεργοποίησης των πλάστιμων συστατικών μερών κατά την αστοχία και έτσι ώστε να αποφευχθούν οι ψαθυρές αστοχίες και, ειδικότερα, η αστοχία των κοχλιών σε διάτμηση και/ή εφελκυσμό.

Ο σχεδιασμός του κόμβου FREEDAM, λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση του ρυθμού παραμόρφωσης, μπορεί να αξιολογηθεί λαμβάνοντας υπόψη τους κανόνες στατικού σχεδιασμού και προσθέτοντας την επίδραση των ρυθμών παραμόρφωσης. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για να ληφθούν υπόψη οι ρυθμοί καταπόνησης στη συμπεριφορά της σύνδεσης. Με απλοποιημένο τρόπο, η καθολική δυναμική συμπεριφορά μπορεί να επιτευχθεί πολλαπλασιάζοντας τη στατική αντοχή με έναν συντελεστή DIF που κυμαίνεται από 1.0 έως 1.2 και την αντίσταση στατικής τριβής (αντίσταση ολίσθησης) με 1.1. Μια άλλη εναλλακτική είναι η εισαγωγή της επίδραση των ρυθμών παραμόρφωσης ξεχωριστά σε κάθε συστατικό μέρος της σύνδεσης και στη συνέχεια η εφαρμογή των κανόνων σχεδιασμού. Η εισαγωγή αυτών των αποτελεσμάτων μπορεί να γίνει μέσω της εφαρμογής γραμμών τάσης όπως αυτές που αναφέρονται στο Σχήμα 5.8 και μπορεί να εφαρμοστεί για την αντοχή και την πλαστιμότητα των συστατικών μερών. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατό να εκτιμηθεί αναλυτικά η καθολική και τοπική συμπεριφορά αυτών των συνδέσεων για διαφορετικές ταχύτητες φόρτισης, ανάλογα με τους εφαρμοζόμενους ρυθμούς παραμόρφωσης [22,25].

Για πιο προηγμένες έρευνες, οι μελέτες που διεξάχθηκαν κατέληξαν σε συστάσεις για με την αριθμητική προσομοίωση της συμπεριφοράς των κόμβων FREEDAM μέσω μοντέλων πεπερασμένων στοιχείων (FEM). Συγκεκριμένα:

- Έχει επαληθευτεί η χρήση του νόμου συμπεριφοράς Johnson-Cook για τον υπολογισμό των επιδράσεων του ρυθμού παραμόρφωσης. Συνιστώμενες τιμές για τις χαρακτηριστικές παραμέτρους του δίνονται στο [30].
- Έχουν προταθεί και επικυρωθεί μέθοδοι για την κατάλληλη προσομοίωση της προέντασης κοχλιών.
- Η διαδικασία που προτείνεται από τον Ραβλιονίδη στο [38] για την προσομοίωση βλαβών υλικού έχει εφαρμοστεί και επικυρωθεί - συγκεκριμένα, οι τιμές για τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν σε αυτήν τη διαδικασία προτείνονται στο [14].

5.7 Βιβλιογραφία

- [1] G. Culache, M.P. Byfield, N.S. Ferguson, A. Tyas, Robustness of Beam-to-Column End-Plate Moment Connections with Stainless Steel Bolts Subjected to High Rates of Loading, *J. Struct. Eng.* 143 (2017).
- [2] J.B. Davison, Investigation the Robustness of Steel Beam-to-column connections, in: 10th Int. Conf. Steel, Sp. Compos. Struct., North Cyprus, May, 2011.
- [3] E.L. Grimsmo, A.H. Clausen, M. Langseth, A. Aalberg, An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel, *Int. J. Impact Eng.* 85 (2015) 132–145.
- [4] P. Barata, A. Santiago, J.P. C. Rodrigues, C. Rigueiro, Experimental behaviour of beam -to-column steel joints subjected to impact loading, in: Eighth Int. Conf. Adv. Steel Struct., Lisbon, July, 2015.
- [5] E. Saraiva, Variação das propriedades mecânicas do aço relacionadas com problemas de impacto em estruturas., University of Coimbra, 2012.
- [6] K. Vedantam, D. Bajaj, N.S. Brar, S. Hill, Johnson - Cook strength models for mild and DP 590 steels, *AIP Conf. Proc.* 845 I (2006) 775–778.
- [7] J. Ribeiro, A. Santiago, C. Rigueiro, L. Simões da Silva, Analytical model for the response of T-stub joint component under impact loading, *J. Constr. Steel Res.* 106 (2015) 23–34.
- [8] H. Fransplass, M. Langseth, O.S. Hopperstad, Tensile behaviour of threaded steel fasteners at elevated rates of strain, *Int. J. Mech. Sci.* 53 (2011) 946–57.
- [9] G. Johnson, W. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, in: *Proc. 7th Int. Symp. Ballist.*, The Hague, The Netherlands, 1983: pp. 541–7.
- [10] J. Malvar, J. Crawford, Dynamic increase factors for steel reinforcing bars, in: Twenty-Eighth DDESB Semin., Orlando, n.d. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000971](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000971).
- [11] T. McAllister, World Trade Center building performance study: data collection, preliminary observations and recommendations., Federal Emergency Management Agency, Federal Insurance and Mitigation Administration, 2002.
- [12] Arup, Review of international research on structural robustness and disproportionate collapse, Department for Communities and Local Government, 2011.
- [13] FREEDAM, FREE from DAMage Steel Connections, Final Report, 2019.
- [14] M. D’Antimo, Impact characterization of innovative seismically designed connections for robustness application, 2020.
- [15] A.F. Santos, Behaviour of friction joints under impact loads, University of Coimbra, PhD thesis, 2019.

- [16] Eurocode 3, Design of steel structures. Part 1.8: Design of joints, Brussels, Belgium, 2010.
- [17] P. Barata, A. Santiago, J.P.C. Rodrigues, C. Rigueiro, Development of an experimental system to apply high rates of loading, *Int. J. Struct. Integr.* 7 (2016) 291–304.
- [18] W.-S. Lee, C.-F. Lin, Impact properties and microstructure evolution of 304L stainless steel, *Mater. Sci. Eng. A.* 308 (2001) 124–135.
- [19] W.E. Luecke, J.D. McColskey, C.N. McCowan, S.W. Banovic, R.J. Fields, T. Foecke, T.A. Siewert, F.W. Gayle, Mechanical Properties of Structural Steels, Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster, NIST NCSTAR 1-3D;, 2005.
- [20] J. Ribeiro, A. Santiago, C. Rigueiro, L.S. Da Silva, Analytical model for the response of T-stub joint component under impact loading, *J. Constr. Steel Res.* 106 (2015) 23–34.
- [21] Abaqus, Abaqus Theory Manual, 2011.
- [22] A.F. Santos, A. Santiago, M. Latour, G. Rizzano, Analytical assessment of the friction dampers behaviour under different loading rates, *J. Constr. Steel Res.* 158 (2019) 443–459. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.04.005>.
- [23] A.F. Santos, A. Santiago, M. Latour, G. Rizzano, Analytical assessment of the friction dampers behaviour under different loading rates, *J. Constr. Steel Res.* 158 (2019) 443–459.
- [24] Np En 1993-1-8, Norma Portuguesa - Eurocódigo 3 - Projeto de estruturas de aço, Inst. Port. Da Qual. (2010) 146.
- [25] A.F. Santos, A. Santiago, M. Latour, G. Rizzano, L. Simões da Silva, Response of friction joints under different velocity rates, *J. Constr. Steel Res.* 168 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106004>.
- [26] M. D’Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo, Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable gr10 . 9 bolt assemblies, *J. Constr. Steel Res.* 124 (2016) 77–90.
- [27] E. Munoz Garcia, J.. Davidson, A. Tyas, Analysis of the response of structural bolts subjected to rapid rates of loading, in: 4th Eur. Conf. Steel Compos. Struct. - EUROSTEEL, Maastricht, The Netherlands, 2005.
- [28] E.L. Grimsmo, A.H. Clausen, A. Aalberg, M. Langseth, A numerical study of beam-to-column joints subjected to impact, *Eng. Struct.* 120 (2016) 103–115.
- [29] M. Latour, M. D’Aniello, M. Zimbru, G. Rizzano, V. Piluso, R. Landolfo, Removable friction dampers for low-damage steel beam-to-column joints, *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 115 (2018) 66–81.
- [30] M. D’Antimo, M. Latour, J.-F. Rizzano, Gianvittorio Demonceau, Experimental and numerical assessment of steel beams under impact loadings, *J. Constr. Steel Res.* 158 (2019) 230–247. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0002288](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0002288).
- [31] M. D’Antimo, M. Zimbru, M. D’Aniello, J.-F. Demonceau, J.-P. Jaspart, R. Landolfo, Preliminary finite element analyses on seismic resistant FREE from DAMage beam to column joints under impact loading, 2018. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.763.592>.
- [32] M.D. Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo, Monotonic and cyclic inelastic tensile response of European preloadable gr10 . 9 bolt assemblies, *J. Constr. Steel Res.* 124 (2016) 77–90. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.05.017>.
- [33] M. D’Aniello, R. Tartaglia, S. Costanzo, R. Landolfo, Seismic design of extended stiffened end-plate joints in the framework of Eurocodes, *J. Constr. Steel Res.* 128 (2017) 512–527. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.09.017>.

- [34] M.D. Aniello, M. Zimbru, M. Latour, A. Francavilla, Development and validation of design criteria for free from damage steel joints, 1 (2017). <https://doi.org/10.1002/cepa.57>.
- [35] M. D'Aniello, M. Zimbru, R. Landolfo, M. Latour, G. Rizzano, V. Piluso, Finite element analyses on free from damage seismic resisting beam-to-column joints, in: COMPDYN 2017 - Proc. 6th Int. Conf. Comput. Methods Struct. Dyn. Earthq. Eng., 2017: pp. 802–814. <https://doi.org/10.7712/120117.5458.17524>.
- [36] M.D. Aniello, D. Cassiano, R. Landolfo, Simplified criteria for finite element modelling of European preloadable bolts, *Steel Compos. Struct.* 6 (2017) 643–658.
- [37] M. D'Antimo, M. Latour, J. Jaspart, J. Demonceau, Numerical and experimental investigation of simply supported steel beams under drop-weight impact tests, *Ce/Papers*. 3 (2019) 803–809. <https://doi.org/10.1002/cepa.1137>.
- [38] M.S. Pavlovic, Resistance of Bolted Shear Connectors in prefabricated steel-concrete composite decks, (2013) 1–10.
- [39] M. D'Antimo, M. Latour, G. Rizzano, J.-F. Demonceau, J.-P. Jaspart, Preliminary Study on beam-to-column joints under impact loading, *Open Constr. Build. Technol. J.* (2017).
- [40] H. Wang, B. Yang, X.H. Zhou, S.B. Kang, Numerical analyses on steel beams with fin-plate connections subjected to impact loads, *J. Constr. Steel Res.* (2016). <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.05.016>.

6 Συμπεριφορά κατασκευών με συνδέσεις RBS και συνδέσεις FREEDAM

6.1 Πίνακας Ακρωνυμίων και Συντομογραφιών

DCH	: Ductility Class High - Υψηλή Κατηγορία Πλαστιμότητας
DST-X	: διπλά T με πέλμα σχήματος X
EEP	: Extended End-Plate - προέχουσα μετωπική πλάκα
MRF	: Moment Resisting Frame – πλαίσιο ροπής
PGA	: Peak Ground Acceleration - μέγιστη επιτάχυνση εδάφους
RBS	: Reduced Beam Section - απομείωση διατομής δοκού

6.2 Πίνακας Συμβόλων

$F_{cf,sa}$: Δύναμη διαρροής
-------------	-------------------

6.3 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια περιεγράφηκε η συμπεριφορά των συνδέσεων FREEDAM με βάση την πειραματική και αριθμητική απόκριση των υποφορέων και των αποσβεστήρων τριβής. Σε αυτό το κεφάλαιο, λαμβάνοντας υπόψη την έλλειψη πειραματικών δεδομένων για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς κτιρίων πραγματικής κλίμακας με συνδέσεις τριβής, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των δοκιμών σε κατασκευές πλήρους κλίμακας που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια του έργου FREEDAM. Στο παρελθόν, έχουν αφιερωθεί μόνο λίγα έργα στην πειραματική συμπεριφορά χαλύβδινων κατασκευών πλήρους κλίμακας υπό συνθήκες σεισμικής φόρτισης. Αυτό αφήνει κάποιες αβεβαιότητες στο εύρος της εγκυρότητας των προσεγγίσεων προσομοίωσης που συνήθως χρησιμοποιούνται για ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται αριθμητικά μοντέλα, αλλά οι εξειδικευμένοι μηχανικοί συχνά δεν γνωρίζουν τους περιορισμούς του εύρους εφαρμογής των μοντέλων, κάτι που οφείλεται στην περιορισμένη διαθεσιμότητα πειραματικών δεδομένων πλήρους κλίμακας που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την επαλήθευση των αναλυτικών προσεγγίσεων. Αυτή η έλλειψη δεδομένων οφείλεται σε πρακτικούς περιορισμούς λόγω περιορισμένων πόρων, διαθεσιμότητας εξοπλισμού δοκιμών πλήρους κλίμακας και των σημαντικών απαιτούμενων προσπαθειών για τη διεξαγωγή πειραμάτων σε δοκίμια πλήρους κλίμακας.

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται οι αξιολογήσεις της δυναμικής συμπεριφοράς των κατασκευών πλήρους κλίμακας με συνδέσεις FREEDAM και συνδέσεις απομείωσης διατομής δοκού (Reduced Beam Section - RBS). Σε αυτό το πλαίσιο, πραγματοποιήθηκαν ψευδο-δυναμικές δοκιμές σε κτίρια στο Εργαστήριο STRENGTH του Πανεπιστημίου του Σαλέρνο. Για λόγους σαφήνειας, τονίζεται ότι η πειραματική δραστηριότητα αποτελεί μέρος ενός ευρύτερου ερευνητικού προγράμματος σχετικά με τη διερεύνηση πέντε διαφορετικών τύπων συνδέσεων, όλες σχεδιασμένες με μεγαλύτερη ικανότητα στροφής από την ελάχιστη που απαιτείται από τον Ευρωκώδικα 8 για Υψηλή Κατηγορία Πλαστιμότητας (Ductility Class High - DCH): συνδέσεις απομείωσης διατομής δοκού (RBS), συνδέσεις χαμηλής

βλάβης (τύπος FREEDAM), συνδέσεις με προέχουσες μετωπικές πλάκες (Extended End-Plate - EEP), συνδέσεις διπλών T (Double-Split Tee - DST) και συνδέσεις διπλών T με πέλμα σχήματος X (DST-X). Προς το παρόν, η προγραμματισμένη πειραματική δραστηριότητα έχει ασχοληθεί με την εκτέλεση δύο συνόλων δοκιμών σε ένα διώροφο χαλύβδινο κτίριο πλήρους κλίμακας, με συνδέσεις RBS στο πρώτο σύνολο δοκιμών και με κόμβους FREEDAM στο δεύτερο. Τα κύρια αποτελέσματα αυτών των ψευδο-δυναμικών δοκιμών που παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα δείχνουν τα οφέλη των συνδέσεων χαμηλής βλάβης σε σχέση με τις παραδοσιακές στρατηγικές του σχεδιασμού κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων.

6.4 Πρότυπο κτίριο

Το πρότυπο κτίριο είναι μία διώροφη κατασκευή ενός ανοίγματος που αποτελείται από δύο διαμήκη πλαίσια ροπής (MRF) που είναι εγκάρσια στηριγμένα για να αποτρέπονται οι ανεπιθύμητες τυχηματικές στρεπτικές στροφές. Το διαμήκες άνοιγμα είναι ίσο με 4 m, η εγκάρσια απόσταση είναι 2 m και το ύψος ορόφου είναι 2.40 m. Καθότι η μελέτη στοχεύει στην αξιολόγηση της συμπεριφοράς των συνδέσεων απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) και των συνδέσεων FREEDAM σε κτίριο πραγματικής κλίμακας, το πρότυπο κτίριο σχεδιάστηκε ώστε να επιτρέπεται η εύκολη αντικατάσταση τόσο των συνδέσεων όσο και των υποστυλωμάτων ή άκρων των δοκών που έχουν υποστεί βλάβες, για την εκτέλεση δύο συνόλων πειραματικών δοκιμών, μία για κάθε μελετώμενο τύπο σύνδεσης (Σχήμα 6.1). Τα πειράματα στοχεύουν στην αξιολόγηση της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής που υπόκειται σε μια σειρά σεισμικών γεγονότων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ψευδο-δυναμικής δοκιμής. Μέσω αυτής της τεχνικής, εκτιμάται η σεισμική συμπεριφορά της κατασκευής χωρίς την επιβολή επιταχύνσεων εδάφους, αλλά εφαρμόζοντας, με μερικούς υδραυλικούς επενεργητές, μετακινήσεις ορόφων που εκτιμήθηκαν επιλύοντας βήμα προς βήμα τις δυναμικές εξισώσεις κίνησης [1-3].

Για λόγους σαφήνειας, συνοψίζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του πρότυπου κτιρίου. Τα δάπεδα είναι κατασκευασμένα με προφίλ από χάλυβα HI-BOND A55 και, συμπεριλαμβανομένης πλάκας από σκυρόδεμα, έχει συνολικό πάχος ίσο με 100mm. Το δάπεδο μεταφέρει τα φορτία σε πέντε δευτερεύουσες δοκούς διατομής IPE 140 ή HEB 140 που ισαπέχουν μεταξύ τους (Σχήμα 6.2). Το αντισεισμικό σύστημα δεν παρουσιάζει σύνθετη συμπεριφορά, καθώς δεν έχουν χρησιμοποιηθεί διατμητικοί ήλοι, και υπάρχει κατάλληλο διάκενο μεταξύ της πλάκας οπλισμένου σκυροδέματος και των υποστυλωμάτων, όπως προτείνεται από τον Ευρωκώδικα 8. Τα άκαμπτα χαλύβδινα θεμέλια που στερεώνονται με ράβδους τύπου dywidag υψηλής αντοχής διασφαλίζουν τη σύνδεση του πρότυπου κτιρίου και του πλαισίου με συνδέσμους δυσκαμψίας στο ισχυρό δάπεδο του εργαστηρίου. Επιπλέον, ένα άκαμπτο διάφραγμα θεμελίωσης συνδέει τα χαλύβδινα θεμέλια του πρότυπου κτιρίου στη βάση του πλαισίου με συνδέσμους δυσκαμψίας.

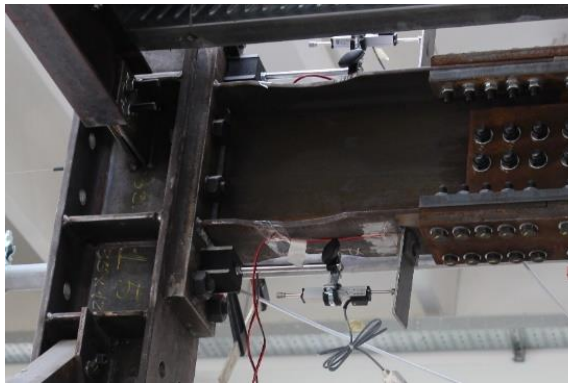
Για τα δομικά στοιχεία έχουν χρησιμοποιηθεί δοκοί διατομής IPE 270 από χάλυβα κατηγορίας S275JR και υποστυλώματα διατομής HEB 200 από χάλυβα κατηγορίας S355JR. Ο σχεδιασμός του πλαισίου πραγματοποιήθηκε σύμφωνα με τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 8 [4, 5]. Συγκεκριμένα τα πλαίσια ροπής (MRF) σχεδιάστηκαν σε Υψηλή Κατηγορία Πλαστιμότητας (DCH) και τα δομικά στοιχεία έχουν σχεδιαστεί λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις σε οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας και αστοχίας (συντελεστής συμπεριφοράς ίσος με 6, φάσμα τύπου 1, μέγιστη επιτάχυνση εδάφους ίση με 0.35 g και εδαφικός τύπος B, 1% σχετικές μετακινήσεις ορόφων σε καταστάσεις λειτουργίας υποθέτοντας ότι οι διαχωριστικοί τοίχοι δεν παρεμβαίνουν στην παραμόρφωση της κύριας κατασκευής). Το πρότυπο κτίριο στο οποίο έγιναν οι δοκιμές επιλέχθηκε έτσι ώστε τα

πλαίσια ροπής (MRF) να αντιπροσωπεύουν μία κατασκευή αναφοράς που σε κάθε κατεύθυνση έχει τρία ανοίγματα μήκους 4 m (Σχήμα 6.3). Το αρχέτυπο κτίριο χαρακτηρίζεται από τέσσερα πλαίσια ροπής (MRF) σε κάθε κατεύθυνση, ενώ τα υπόλοιπα ανοίγματα θεωρούνται ότι είναι ονομαστικά αρθρωτά (Σχήμα 6.3). Οι τιμές σχεδιασμού των φορτίων είναι: i) τα νεκρά φορτία είναι ίσα με 3.9 kN/m^2 και 3.6 kN/m^2 στο ενδιάμεσο επίπεδο και στο επίπεδο οροφής αντίστοιχα, ii) τα κινητά φορτία είναι ίσα με 3 kN/m^2 στο πρώτο επίπεδο και 0.5 kN/m^2 στο επίπεδο οροφής. Η επιφάνεια επιρροής σε κάθε πλαίσιο ροπής (MRF) αντιστοιχεί στο $\frac{1}{4}$ της συνολικής επιφάνειας ορόφου. Το βάρος των δομικών μερών και περιμετρικών στοιχείων κάλυψης λαμβάνεται υπόψη αυξάνοντας τις μάζες περίπου 10%. Συγκεκριμένα, οι μάζες που εφαρμόζονται σε κάθε πλαίσιο ισούνται με 19 τόνους και 14.2 τόνους στο πρώτο και δεύτερο επίπεδο, αντίστοιχα.



a) Πρότυπο κτίριο με συνδέσεις απομείωσης διατομής δοκού (RBS)

b) Πρότυπο κτίριο με συνδέσεις FREEDAM

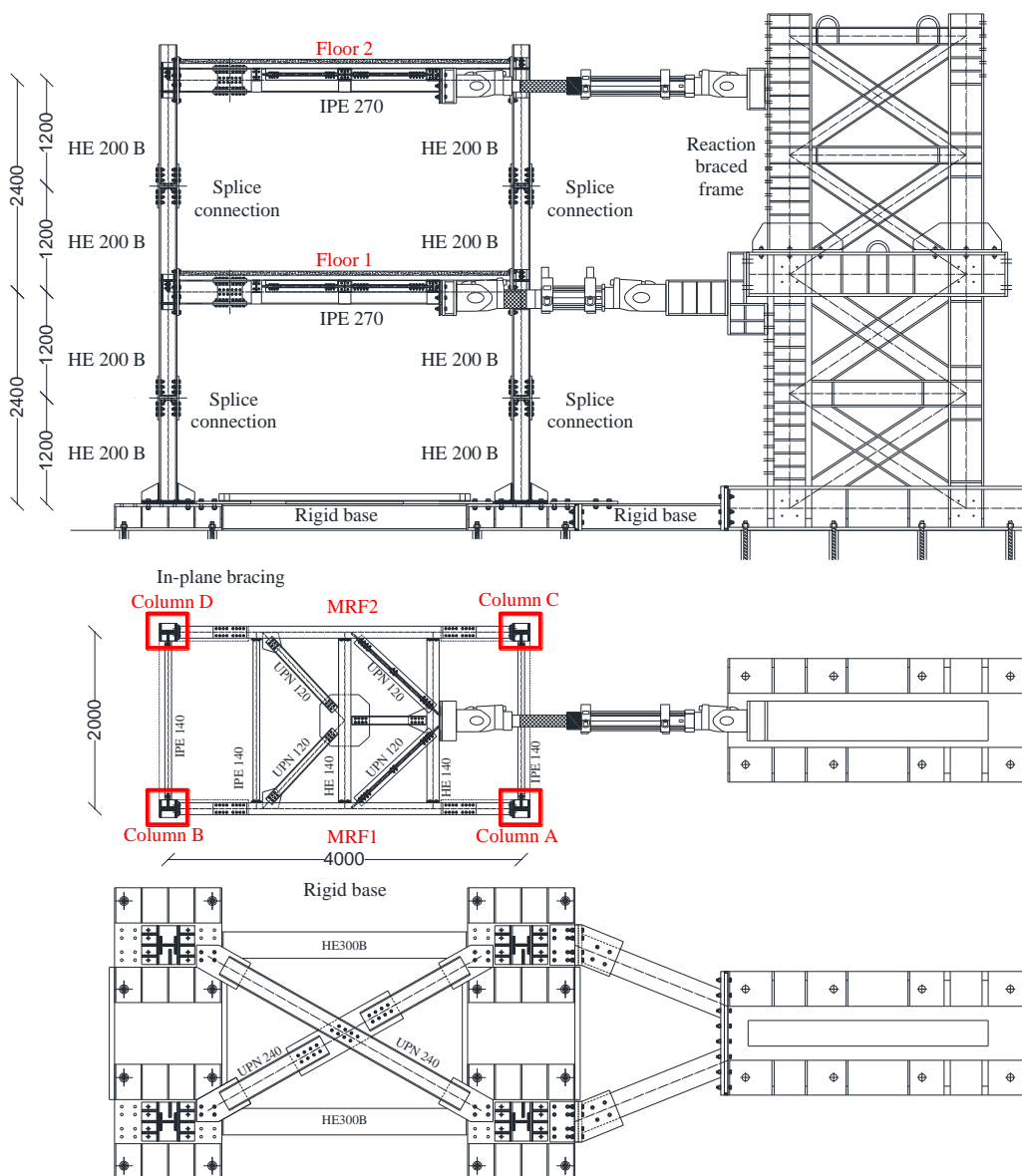


c) Σύνδεση απομείωσης διατομής δοκού (RBS)



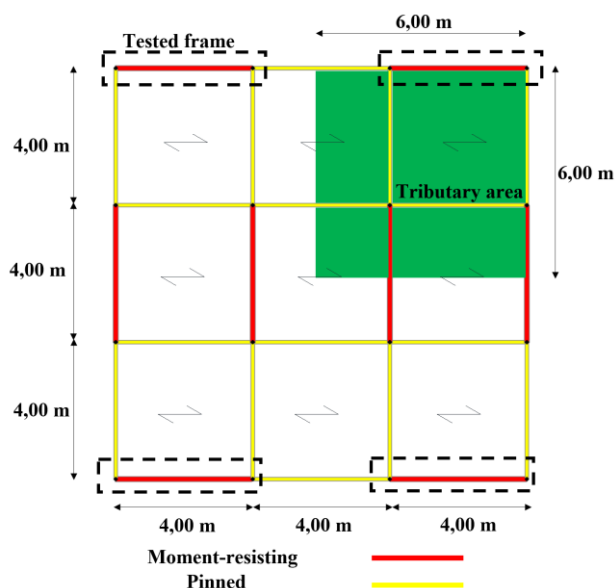
d) Σύνδεση FREEDAM

Σχήμα 6.1 : Το πρότυπο κτίριο και οι συνδέσεις του



Σχήμα 6.2 : Πρότυπο κτίριο (με συνδέσεις απομειωμένης διατομής δοκού - RBS)

Το σύνολο πειραμάτων που διεξήχθη στο εργαστήριο STRENGTH του Πανεπιστημίου του Σαλέρνο ανήκει σε ένα ευρύτερο ερευνητικό πρόγραμμα που στοχεύει στη διερεύνηση της επίδρασης διαφορετικών συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων στην συνολική σεισμική συμπεριφορά των κατασκευών. Για αυτό το λόγο, η ακολουθία επιταχυνσιογραφήματων που χρησιμοποιήθηκε είναι η ίδια τόσο για τα πειράματα στους κόμβους απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) [5], όσο και στους κόμβους FREEDAM. Τα επιταχυνσιογραφήματα που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.1. Αξίζει να επισημανθεί ότι κατά τη διάρκεια του πρώτου συνόλου πειραμάτων, ανάμεσα στη Δοκιμή 1 και τη Δοκιμή 2, πραγματοποιήθηκε μία άλλη δοκιμή, η οποία όμως ήταν μερικής έκτασης και γι' αυτό δεν αναφέρεται στη συνέχεια.



a) Τρισδιάστατη απεικόνιση του συστήματος αναφοράς της κατασκευής

b) Κάτοψη του πλαισίου που δοκιμάστηκε

Σχήμα 6.3 : Σύστημα αναφοράς που χρησιμοποιήθηκε για το σχεδιασμό των πλαισίων ροπής (MRF) που δοκιμάστηκαν

Πίνακας 6.1: Επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές

αρ. δοκιμής	Επιταχυνσιογράφημα	PGA
1	Imperial Valley	1.10g
2	Spitak	0.80g
3	Artificial	0.50g
4	Santa Barbara	0.80g
5	Coalinga (partial)	0.80g

6.5 Ψευδο-δυναμική δοκιμή του προτύπου κτιρίου με συνδέσεις RBS

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται και αναλύονται τα πειραματικά δεδομένα του συνόλου πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην κατασκευή με συνδέσεις απομείωσης διατομής δοκού (RBS).

Αναλύοντας τα πειραματικά αποτελέσματα, είναι δυνατόν να προβλεφθεί ότι για όλες τις δοκιμές, οι μέγιστες μετατοπίσεις ορόφου και οι μέγιστες δυνάμεις των επενεργητών σημειώθηκαν στις ίδιες στιγμές. Αυτό είναι σύμφωνο με την αναμενόμενη απόκριση, καθώς η κατασκευή είναι κανονική, και η πρώτη ιδιομορφή ταλάντωσης είναι κυρίαρχη. Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα κύρια αποτελέσματα.

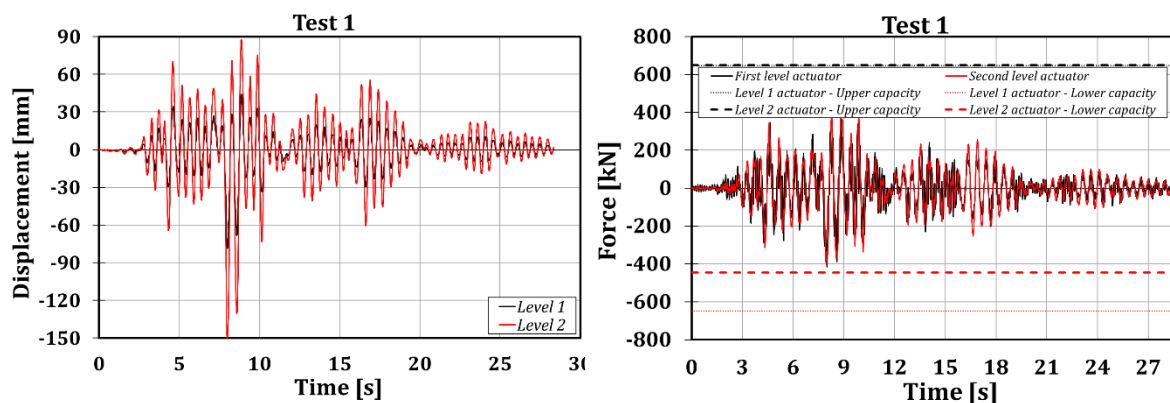
Πίνακας 6.2: Κύρια πειραματικά αποτελέσματα (κατασκευή με συνδέσεις απομειωμένης διατομής δοκού RBS)

		Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4	Δοκιμή 5	
Μέγιστη διάτμηση βάσης (kN)	Pull	-751	-652	-444	-586	-630	
	Push	667	670	555	592	612	
Μέγιστη μετακίνηση 1ου ορόφου (mm)	Pull	-78	-17	-29	-48	-47	
	Push	44	85	40	41	62	
Μέγιστη μετακίνηση οροφής (mm)	Pull	-150	-34	-66	-99	-94	
	Push	88	171	83	85	129	
Μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (%)	Pull	Επίπεδο 1	-3.3	-0.7	-1.2	-2.0	-2.0
		Επίπεδο 2	-3.0	-0.7	-1.5	-2.2	-2.0
	Push	Επίπεδο 1	1.9	3.5	1.7	1.7	2.6
		Επίπεδο 2	1.9	3.6	1.8	1.8	2.8

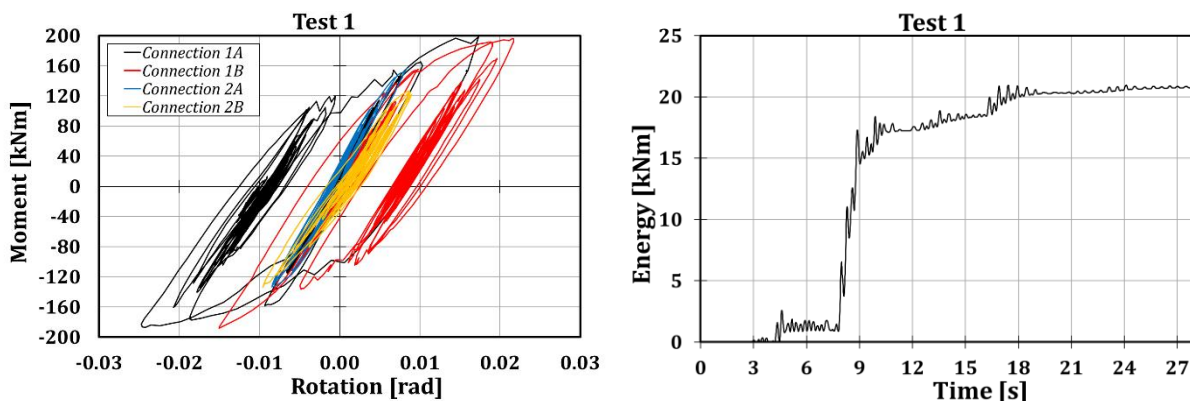
6.5.1 Σεισμός Imperial Valley (PGA = 1.10g)

Η πρώτη δοκιμή συνίστατο στην εφαρμογή της εδαφικής επιτάχυνσης που καταγράφηκε από το σταθμό που βρίσκεται στο Imperial Valley (ΗΠΑ) το 1979. Αξίζει να επισημανθεί ότι η μέγιστη φυσική επιτάχυνση του εδάφους ήταν ίση με 0.37g, αλλά χρησιμοποιήθηκε μία ενισχυμένη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (Peak Ground Acceleration – PGA) ίση με 1.10g, περίπου τριπλάσια της πραγματικής.

Από το Σχήμα 6.4 παρατηρείται ότι οι τιμές των αντιδράσεων που λαμβάνονται από τον επενεργητή στο πρώτο επίπεδο έχουν μεγαλύτερη διακύμανση από αυτές στο δεύτερο επίπεδο. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ακρίβεια του δυναμόμετρου του επενεργητή MTS 243.60-02, ο οποίος χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη ακρίβεια. Ενώ ο άνω επενεργητής (MTS 243.45-01) είναι εξοπλισμένος με επιμηκυνσιόμετρο, ο κάτω επενεργητής είναι εξοπλισμένος με ένα δυναμόμετρο διαφορικής τάσης. Η μέγιστη τέμνουσα βάσης, οι μέγιστες μετατοπίσεις και οι σχετικές μετακινήσεις ορόφων για τις δύο δοκιμές συνοψίζονται στον Πίνακα 6.2



Σχήμα 6.4 : Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων (αριστερά) και αντιδράσεων (δεξιά) για τη δοκιμή 1



Σχήμα 6.5 : Υστερητικές καμπύλες (αριστερά) και καθολική απορρόφηση ενέργειας (δεξιά) για RBS στη Δοκιμή 1 (MRF-1)

Παρατηρείται ότι η μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφου είναι περίπου 3%, οδηγώντας σε σημαντική πλαστικοποίηση των δομικών στοιχείων. Οι τοπικές συσκευές μέτρησης έδειξαν ότι τόσο οι συνδέσεις απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) όσο και οι βάσεις των υποστυλωμάτων υπέστησαν βλάβη. Η βλάβη ήταν μεγαλύτερη για τις συνδέσεις απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) που βρίσκονται στο πρώτο επίπεδο και χαμηλότερη για αυτές του δεύτερου ορόφου. Η παρατηρηθείσα τιμή της δύναμης διαρροής των απομειωμένων διατομών δοκών (RBS) είναι ουσιαστικά σύμφωνη με τις τιμές σχεδιασμού (127.5 kNm).

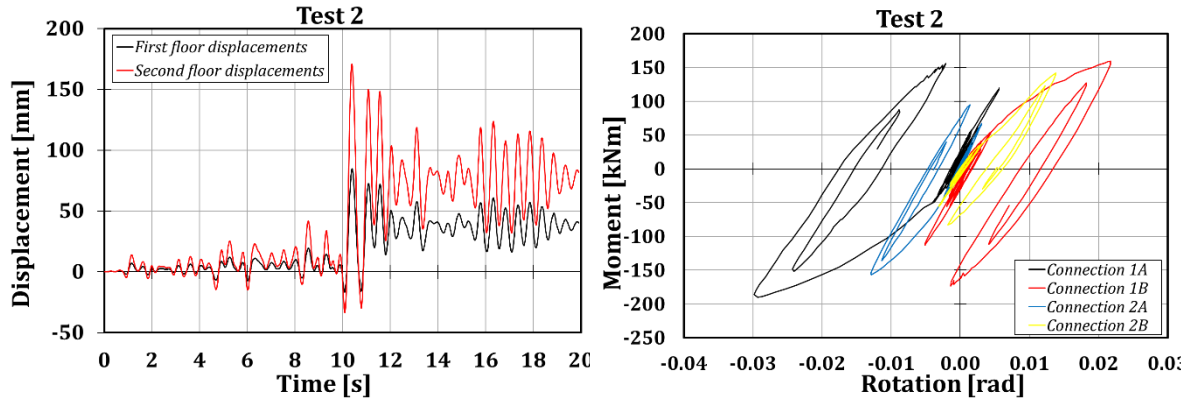
Η κατάσταση της βλάβης της κατασκευής στη Δοκιμή 1 οφείλεται στο σημαντικό πλήθος κύκλων των συνδέσεων απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) του πρώτου επιπέδου. Αυτό φαίνεται από τις υστερητικές καμπύλες των RBS που δίνονται στο Σχήμα 6.5 στα αριστερά. Στα δεξιά του Σχήματος 6.5 φαίνεται η τιμή της ενέργειας που απορροφάται από τα RBS που υπολογίζεται αρχίζοντας από τις υστερητικές καμπύλες. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συνδέσεις RBS πέτυχαν μια μέγιστη τοπική στροφή ελαφρώς χαμηλότερη από 30 mrad, η οποία είναι πολύ κοντά στην απαίτηση EC8 για κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων σε πλαίσια ροπής (MRF) Υψηλής Κατηγορίας Πλαστικότητας (DCH) (35 mrad).

6.5.2 Σεισμός Spitak (PGA = 0.80g)

Το δεύτερο επιταχυνσιογράφημα ήταν πολύ διαφορετικό από το προηγούμενο, καθώς χαρακτηριζόταν κυρίως από μόνο ένα μέγιστο έντασης, ενώ το προηγούμενο χαρακτηριζόταν από μεγαλύτερο πλήθος μέγιστων. Αυτό γίνεται εμφανές από τα αποτελέσματα: για το σεισμό Spitak, υπάρχει μόνο μία κύρια μετάβαση στην πλαστική περιοχή, που χαρακτηρίζεται από σχετική μετακίνηση ορόφου περίπου 3.6%, ενώ στις άλλες στιγμές η κατασκευή παραμένει πρακτικά στην ελαστική περιοχή. Αυτό μπορεί να διασαφηνιστεί αναλύοντας τις τοπικές μετρήσεις που λαμβάνουν υπόψη, για παράδειγμα, την απόκριση ροπής-στροφής των συνδέσεων απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) (Σχήμα 6.6). Μπορεί να σημειωθεί ότι η απόκριση ροπής-στροφής της πιο καταπονημένης σύνδεσης RBS χαρακτηρίζεται από μία μέγιστη στροφή περίπου 30 mrad, με μία ροπή κάμψης στο κέντρο της σύνδεσης ίση με περίπου 200 kNm.

Είναι χρήσιμο να παρατηρηθεί ότι αυτή η τιμή της μέγιστης ροπής είναι πολύ μεγαλύτερη από την αναμενόμενη τιμή της ροπής που χρησιμοποιήθηκε κατά το σχεδιασμό της σύνδεσης, η οποία καθορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη την πλήρη διαρροή και κράτυνση της πλαστικής ζώνης (140 kNm). Αυτό σημαίνει ότι ο συντελεστής υπεραντοχής ίσος με 1.1 που συνίσταται από τον EC8 είναι σε μεγάλο βαθμό υποτιμημένος. Σε αυτή τη περίπτωση,

ο λόγος μεταξύ της μετρηθείσας ροπής κάμψης και της ονομαστικής τιμής της πλαστικής αντοχής της RBS είναι ίσος περίπου με 1.6. Αυτή η τιμή υπεραντοχής, που υπερβαίνει σημαντικά την τιμή που δίνεται από τον κανονισμό, οφείλεται πιθανώς στην μείωση του λόγου πλάτους προς πάχους των πελμάτων στη ζώνη της RBS, που ουσιαστικά αποτρέπει τον τοπικό λυγισμό, όπως φαίνεται από τον μηχανισμό αστοχίας λόγω θραύσης είτε στο πέλμα είτε στη συγκόλληση.

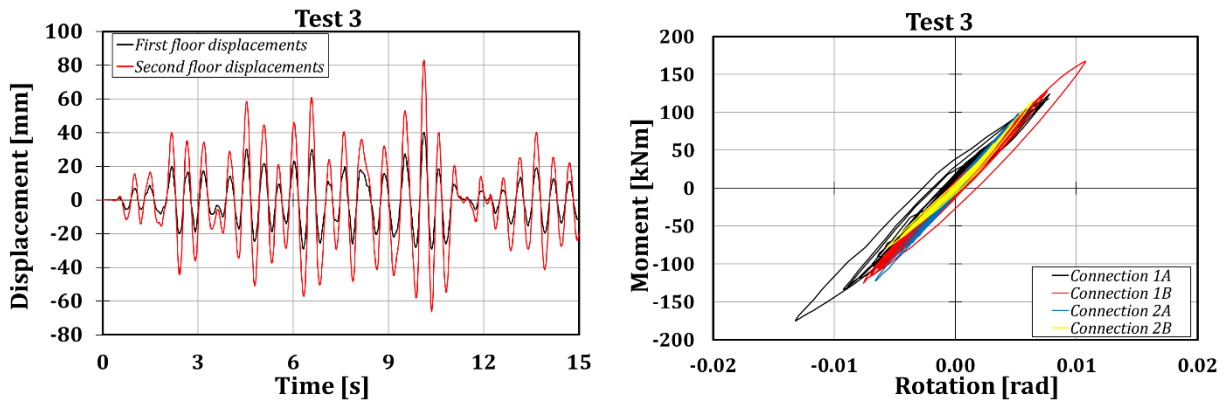


Σχήμα 6.6 : Χρονοϊστορίες μετακινήσεων (αριστερά) και καμπύλες ροπής-στροφής (δεξιά)

6.5.3 Τεχνητός σεισμός (PGA = 0.50g)

Το τρίτο επιταχυνσιογράφημα δημιουργήθηκε τεχνητά από το εργαλείο SIMQKE ώστε να προσαρμόζεται στο φάσμα σχεδιασμού που χρησιμοποιήθηκε. Η επιλογή αυτή έγινε με στόχο τη διερεύνηση των επιπτώσεων ενός σεισμού με μεγάλο πλήθος μέγιστων σε όρους επιτάχυνσης. Σε αυτή τη περίπτωση, επιλέχθηκε μία μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (Peak Ground Acceleration – PGA) ίση με 0.50g.

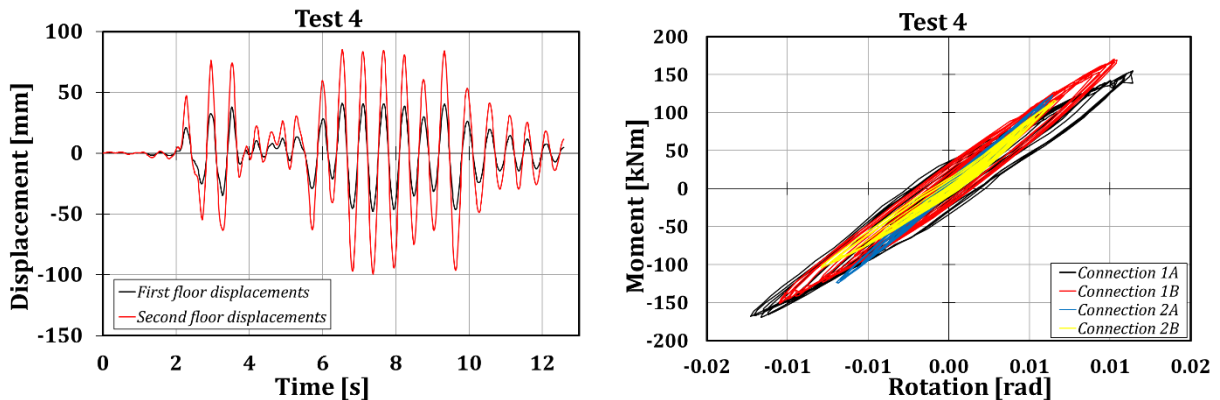
Κατά τη διάρκεια της τρίτης δοκιμής, στις συνδέσεις απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) του πρώτου επιπέδου σημειώθηκαν ροπές κάμψης περίπου 170 kNm, ενώ στο δεύτερο όροφο οι συνδέσεις RBS υπέστησαν μόνο ελαφρές βλάβες, παρουσιάζοντας μέγιστες ροπές κάμψης των 120 kNm και στροφές μικρότερες των 10 mrad (Σχήμα 6.7). Η μέγιστη τέμνουσα βάσης ήταν ίση με 555 kN και η μέγιστη μετακίνηση οροφής ίση με περίπου 83 mm, οδηγώντας σε μία μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφου ίση με περίπου 1.8%. Όσον αφορά τις καμπύλες ροπής-στροφής, οι συνδέσεις RBS παρέμειναν πρακτικά στην ελαστική περιοχή.



Σχήμα 6.7 : Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων (αριστερά) και καμπύλες ροπής-στροφής (αριστερά)

6.5.4 Σεισμός Santa Barbara (PGA = 0.80g)

Η Δοκιμή 4 συνίστατο στην εφαρμογή του επιταχυνσιογραφήματος της Santa Barbara. Η δοκιμή αυτή δεν έδειξε σημαντική περαιτέρω πλαστικοποίηση των συνδέσμων RBS, και η συμπεριφορά της κατασκευής παρέμεινε σχεδόν στην ελαστική περιοχή, όπως παρατηρείται από τις μετατοπίσεις και τις καμπύλες ροπής-στροφής του Σχήματος 6.8. Όλα τα κύρια αποτελέσματα παρατίθενται στον Πίνακα 6.2.

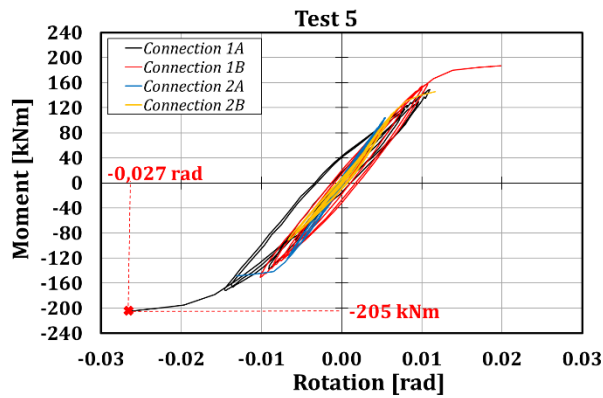


Σχήμα 6.8 : Χρονοϊστορίες μετατοπίσεων (αριστερά) και καμπύλες ροπής-στροφής (δεξιά)

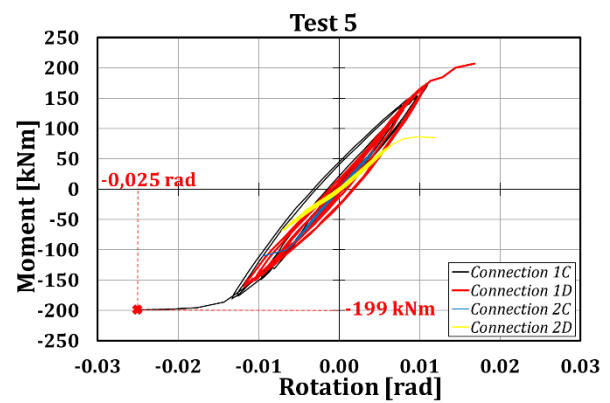
6.5.5 Σεισμός Coalinga (PGA = 0.80g)

Κατά τη Δοκιμή 5, η κατασκευή αστόχησε. Συγκεκριμένα, η τελευταία δοκιμή διακόπηκε μετά την αστοχία δύο συνδέσεων απομειωμένης διατομής δοκού (RBS) στον πρώτο όροφο του κτιρίου, στα δύο αντιδιαμετρικά πλαίσια στην πλευρά των επενεργητών (Σχήμα 6.9). Η αστοχία ξεκίνησε από την τοπική αστοχία της συγκόλλησης στην RBS-1A και, στη συνέχεια, αστόχησε επίσης και η RBS-1C λόγω της ανακατανομής των δυνάμεων που οδήγησε σε στρεπτική ροπή και υπερφόρτιση του αντιδιαμετρικού πλαισίου. Η τοπική αστοχία της RBS-1A αποδίδεται στην κόπωση της συγκόλλησης και την απροσδόκητα υψηλή ροπή κάμψης στο επίπεδο του πέλματος του υποστυλώματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ροπή κάμψης αστοχίας της RBS-1A ήταν ίση με 205 kNm. Αυτή η τιμή, όπως υπογραμμίστηκε προηγουμένως, είναι μεγαλύτερη από την ονομαστική αντοχή της RBS κατά περίπου 60% (Σχήμα 6.9).

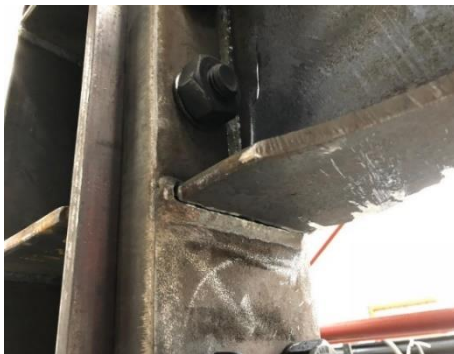
Παρόλο που η θραύση στη συγκόλληση μεταξύ του πέλματος της δοκού και του πέλματος του υποστυλώματος είναι ένας μηχανισμός αστοχίας που δεν αναμένεται στην περίπτωση συνδέσεων απομειωμένης διατομής δοκού (RBS), πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι το πρωτόκολλο φόρτισης που χρησιμοποιείται συνήθως στις πειραματικές αναλύσεις της ανακυκλικής συμπεριφοράς των συνδέσεων RBS που συνήθως εκτελούνται σε απλούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων, είναι τελείως διαφορετικό από τις συνθήκες φόρτισης των συνδέσεων δοκών-υποστυλωμάτων του δοκιμασμένου διώροφου κτιρίου λόγω της εφαρμογής μιας σειράς πέντε σεισμών. Η θραύση των συγκολλήσεων μπορεί να είναι συνέπεια της κόπωσης που επέρχεται από επαναλαμβανόμενους σεισμούς, οι οποίοι προκαλούν μεγάλο αριθμό κύκλων με σχετικά μικρά πλάτη που δεν μπορούν να οδηγήσουν σε τοπικό λυγισμό, και μόνο μικρό αριθμό κύκλων με μεγάλα πλάτη που δεν προκαλούν τοπικό λυγισμό λόγω της μείωσης του λόγου πλάτους προς πάχους των πελμάτων της δοκού στη ζώνη απομειωμένης διατομής.



α) Δοκιμή 7 – Υποστυλώματα A-B, 1ος και 2ος όροφος



β) Δοκιμή 7 – Υποστυλώματα C-D, 1ος και 2ος όροφος



γ) Αστοχία στη συγκόλληση της RBS 1A

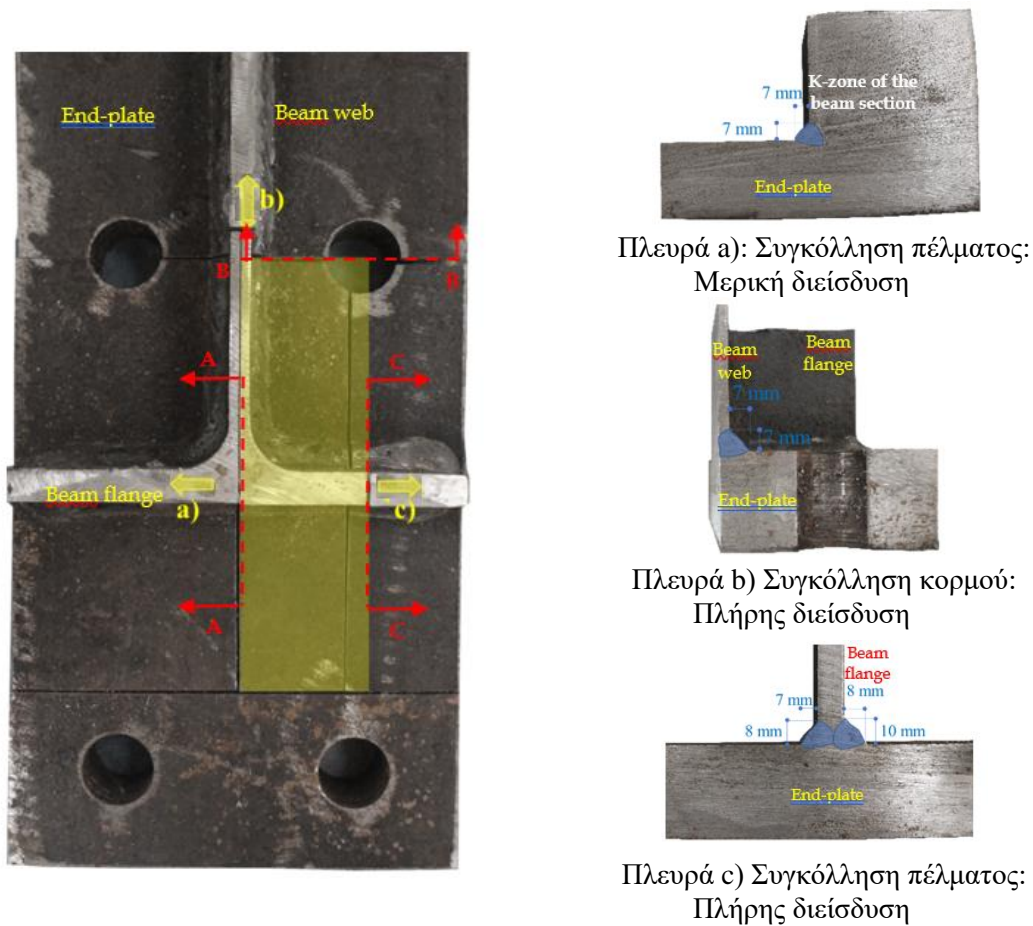


δ) Αστοχία στο κέντρο της RBS 1C

Σχήμα 6.9 : Υστερητικές καμπύλες των RBS που αστόχησαν (πάνω) και οι αντίστοιχες βλάβες (κάτω)

Για τον έλεγχο της ακρίβειας της λεπτομέρειας συγκόλλησης, μετά το τέλος της δοκιμής, κόπηκε και επιθεωρήθηκε μία εφεδρική RBS που υπήρχε ήδη στο εργαστήριο και είχε ληφθεί από το ίδιο προϊόν. Η έρευνα έδειξε ότι η λεπτομέρεια εσωραφής πλήρους διεϊσδυσης υλοποιήθηκε σωστά και χωρίς σημαντικά ελαττώματα (Σχήμα 6.10).

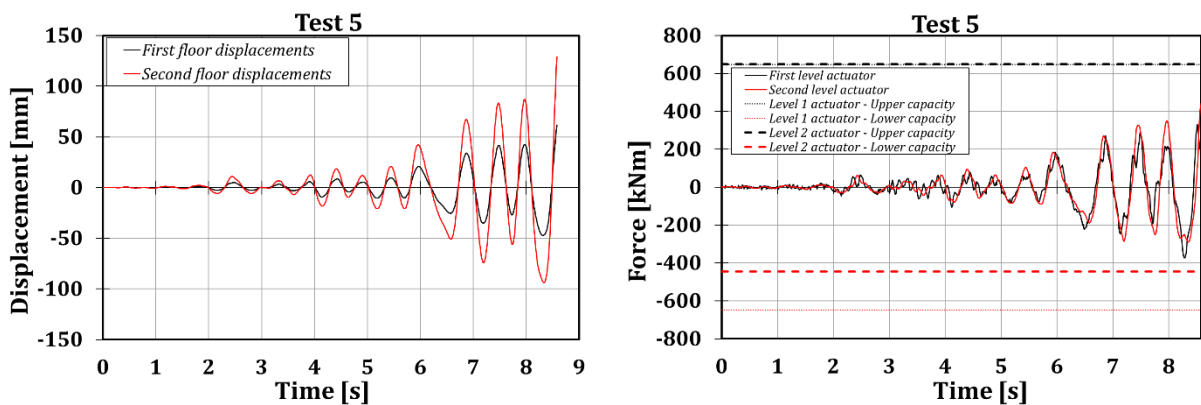
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο τύπος λεπτομέρειας συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε, EC3 [6] και EC8 και επιπλέον, συμμορφώνεται με τις ενδείξεις του Οδηγού Χαλύβδινου Σχεδιασμού AISC (AISC Steel Design Guide) [7]. Η συγκόλληση δοκού-άκρου υποστυλώματος, όπως προτείνεται από τον Οδηγό Χαλύβδινου Σχεδιασμού AISC, δεν περιλαμβάνει οπές πρόσβασης στο κορμό της δοκού για να αποφευχθεί η πρόωρη ρηγμάτωση του πέλματος της δοκού λόγω συγκέντρωσης τάσεων [8]. Επομένως, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.10 το πέλμα της δοκού συγκολλήθηκε μετωπικά υπό γωνία 45° με πλήρη διεϊσδυση, εκτός από την περιοχή του πέλματος ακριβώς πάνω από το κορμό της δοκού, η οποία συγκολλήθηκε με μερική διεϊσδυση στην εξωτερική πλευρά και με εξωραφή στις ρίζες. Καθότι η λεπτομέρεια συμμορφώνεται με τις βασικές προτάσεις του κανονισμού, το αποτέλεσμα που προκύπτει επιβεβαιώνει ότι η μερική ψαθυρή αστοχία πρέπει να αποδοθεί αφενός στην υποτίμηση του συντελεστή υπεραντοχής που χρησιμοποιήθηκε στο σχεδιασμό και αφετέρου στους κανόνες που χρησιμοποιήθηκαν στο σχεδιασμό της λεπτομέρειας συγκόλλησης, οι οποίοι πιθανώς δεν λαμβάνουν υπόψη επαρκώς τα φαινόμενα κόπωσης υπό επαναλαμβανόμενα σεισμικά γεγονότα. Αυτό το αποτέλεσμα υπογραμμίζει την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα σχετικά με την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης τυπικών λεπτομερειών συγκόλλησης υπό σεισμικές δράσεις και τη διάρκεια ζωής τους σε ολιγοκυκλική κόπωση.



Σχήμα 6.10

Εντούτοις, πρέπει να παρατηρηθεί ότι οι δοκιμασμένες συνδέσεις RBS υποβλήθηκαν σε μία σειρά πέντε καταστροφικών σεισμικών συμβάντων, που είναι μία ακραία συνθήκη που συνήθως δεν απαιτείται από την ισχύουσα πρακτική σχεδιασμού. Επομένως, παρόλο που ο τελικός μηχανισμός αστοχίας δεν ήταν απολύτως ικανοποιητικός, η συμπεριφορά των πλαισίων ροπής (MRF) ήταν εύλογα αξιόπιστη, επιβεβαιώνοντας την μεγάλη δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας των συνδέσεων απομειωμένης διατομής δοκού (RBS).

Στο Σχήμα 6.11 φαίνονται οι μετακινήσεις ορόφων και οι δυνάμεις που καταγράφηκαν από τους επενεργητές. Περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στον Πίνακα 6.2.



Σχήμα 6.11 : Μετακινήσεις ορόφων (αριστερά) και δυνάμεις επενεργητών (δεξιά) της Δοκιμής 5

6.6 Ψευδο-δυναμική δοκιμή του προτύπου κτιρίου με συνδέσεις FREEDAM

Σε αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται και αναλύονται τα πειραματικά δεδομένα του συνόλου πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν στην κατασκευή με συνδέσεις FREEDAM. Αξίζει να επισημανθεί ότι οι εφαρμοζόμενοι σεισμοί είναι οι ίδιοι που χρησιμοποιήθηκαν στο προηγούμενο σύνολο πειραμάτων. Αυτό θα επιτρέψει τη σύγκριση της σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής όταν είναι εξοπλισμένη με τους τύπους των δύο αναλυόμενων συνδέσεων. Στον Πίνακα 6.3 συνοψίζονται τα κύρια αποτελέσματα του συνόλου πειραμάτων.

Πίνακας 6.3: Κύρια πειραματικά αποτελέσματα (κατασκευή με συνδέσεις FREEDAM)

			Δοκιμή 1	Δοκιμή 2	Δοκιμή 3	Δοκιμή 4	Δοκιμή 5
Μέγιστη διάτμηση βάσης (kN)	Pull		-537	-447	-272	-388	-439
	Push		477	470	347	483	495
Μέγιστη μετακίνηση 1ου ορόφου (mm)	Pull		-73	-53	-41	-56	-72
	Push		65	79	38	52	61
Μέγιστη μετακίνηση οροφής (mm)	Pull		-104	-84	-75	-89	-112
	Push		103	112	52	70	85
Μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (%)	Pull	Επίπεδο 1	-3.0	-2.2	-1.7	-2.3	-3.0
		Επίπεδο 2	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.7
	Push	Επίπεδο 1	2.7	3.3	1.6	2.2	2.5
		Επίπεδο 2	1.6	1.4	0.6	0.7	1.0

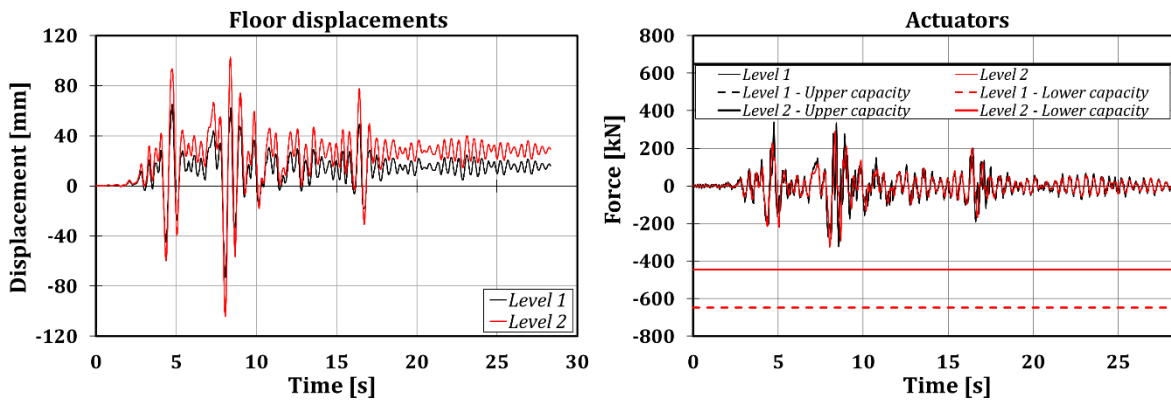
6.6.1 Σεισμός Imperial Valley (PGA = 1.10g)

Η πρώτη δοκιμή συνίστατο στην εφαρμογή του σεισμού Imperial Valley, όπως έχει ήδη γίνει για το πρώτο σύνολο πειραμάτων. Δυστυχώς, λόγω τεχνικών προβλημάτων που παρουσιάστηκαν με τους εξωτερικούς μορφοτροπείς κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα σχετικά με την τοπική απόκριση των συνδέσεων. Επομένως, είναι δυνατόν να συζητηθούν μόνο οι μετακινήσεις ορόφων και οι δυνάμεις που καταγράφονται από τους επενεργητές, όπως φαίνονται στο Σχήμα 6.12.

Οι μετακινήσεις στον πρώτο και δεύτερο όροφο έφτασαν σε μέγιστες τιμές ίσες με 73 και 104 mm, αντίστοιχα, και η μέγιστη τέμνουσα βάσης ήταν ίση με 537 kN (Πίνακας 6.3). Μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι μέγιστες μετακινήσεις ορόφων και οι μέγιστες δυνάμεις που καταγράφηκαν από τους επενεργητές συνέβησαν στις ίδιες στιγμές. Αυτό αναμενόταν καθώς η κατασκευή είναι κανονική και χαρακτηρίζεται από την πρώτη ιδιομορφή της. Μια άλλη σχετική πτυχή σχετίζεται με το γεγονός ότι οι συσκευές τριβής δεν εξασφάλισαν την επαναφορά της κατασκευής στην αρχική της θέση, καθώς σημειώθηκαν παραμένουσες μετατοπίσεις στο τέλος της δοκιμής (περίπου 16 mm και 29 mm στον πρώτο και δεύτερο όροφο αντίστοιχα).

Κατά τη διάρκεια αυτής της δοκιμής, μερικοί αποσβεστήρες τριβής υπέστησαν ολίσθηση. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.3, μπορεί να σημειωθεί ότι οι μέγιστες σχετικές

μετατοπίσεις ορόφων έφτασαν στο 3% και 1.6% στον πρώτο και δεύτερο όροφο, πολύ πέρα από το ονομαστικό ελαστικό όριο της κατασκευής ίσο με περίπου 1% που υποτέθηκε στη φάση σχεδιασμού.

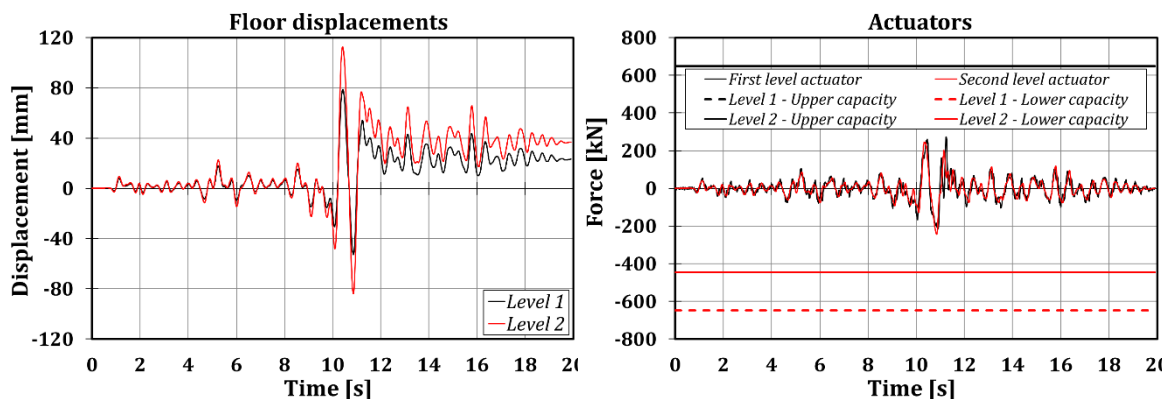


Σχήμα 6.12 : Δοκιμή 1: μετακινήσεις ορόφων (αριστερά) και δυνάμεις (δεξιά)

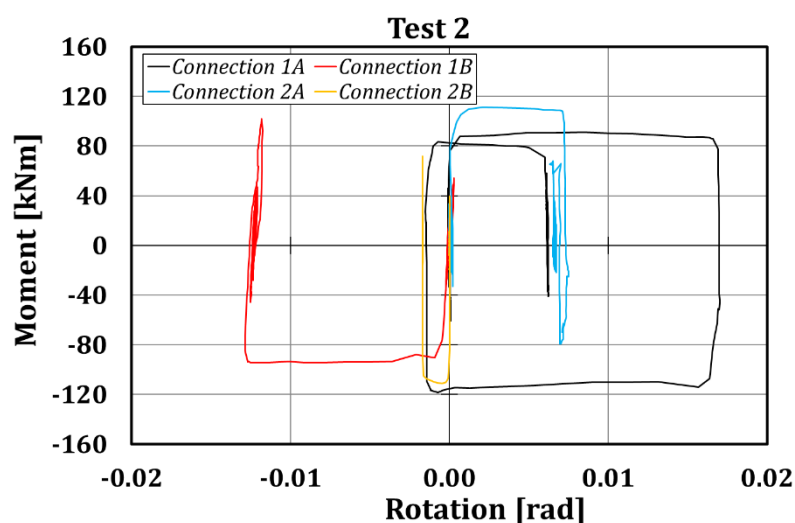
6.6.2 Σεισμός Spitak (PGA = 0.80g)

Για τη δεύτερη δοκιμή, το πρότυπο κτίριο υποβλήθηκε στον σεισμό Spitak. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι επίσης διαθέσιμα τα πειραματικά δεδομένα που αναφέρονται στη συμπεριφορά των συνδέσεων. Όσον αφορά αυτό το επιταχυνσιογράφημα, αξίζει να επισημανθεί ένα σχετικό χαρακτηριστικό: η χρονοϊστορία χαρακτηρίζεται από μόνο ένα μέγιστο σημαντικού πλάτους, όπως έχει ήδη επισημανθεί στην ανάλυση του προηγούμενου συνόλου πειραμάτων. Αυτή η πτυχή αντικατοπτρίζεται στα αποτελέσματα: το πρότυπο κτίριο εμφανίζει μόνο μία κύρια μετάβαση στην πλαστική περιοχή, όπως είναι σαφές στο Σχήμα 6.13 όπου έχουν αναφερθεί τα αποτελέσματα σχετικά με τις μετατοπίσεις ορόφων και τις δυνάμεις επενεργητών.

Παρόλο που έχει παρατηρηθεί μια μέγιστη μείωση περίπου 15% όσον αφορά τη τέμνουσα βάση, σε σύγκριση με τη Δοκιμή 1, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί μια ελαφρώς μεγαλύτερη μέγιστη μετατόπιση οροφής (112 mm έναντι 104 mm) και μια μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφου ίση με 3.3% στο πρώτο επίπεδο. Επιπλέον, σε αυτήν την περίπτωση, οι μέγιστες σχετικές μετακινήσεις ορόφου είναι πολύ χαμηλές στο δεύτερο επίπεδο. Στο Σχήμα 6.14 φαίνεται η τοπική απόκριση ως προς τις υστερητικές καμπύλες ροπής-στροφής. Από αυτό το σχήμα, είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι ελήφθησαν ευρείες και σταθερές υστερητικές καμπύλες ροπής-στροφής ορθογώνιου σχήματος, όπως αναμενόταν. Ωστόσο παρατηρείται μία ασύμμετρη συμπεριφορά των συνδέσεων, καθώς οι απόλυτες τιμές των μέγιστων και ελάχιστων ροπών κάμψης είναι περίπου 80 kNm και 120 kNm, αντίστοιχα. Αυτό συμφωνεί με την ασύμμετρία της συμπεριφοράς της σύνδεσης που έχει ήδη επισημανθεί από τις πειραματικές δοκιμές σε απλούς κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων [9], όπως συζητήθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το επιταχυνσιογράφημα Spitak χαρακτηρίζεται από ένα κύριο μέγιστο, όπως ήταν αναμενόμενο, επιβεβαιώθηκε πειραματικά ότι οι συσκευές τριβής εμφανίζουν μόνο μία ολίσθηση που αντιστοιχεί στη μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (PGA). Η μέγιστη στροφή που εμφάνισαν οι συνδέσεις επιτεύχθηκε από τη σύνδεση 1A και η τιμή της είναι περίπου 17 mrad. Οι άλλες συνδέσεις είχαν χαμηλότερες στροφές. Ειδικότερα, όπως αναμενόταν, στο δεύτερο επίπεδο οι στροφές σύνδεσης είχαν τιμές περίπου 0.007 και 0.002 rad.



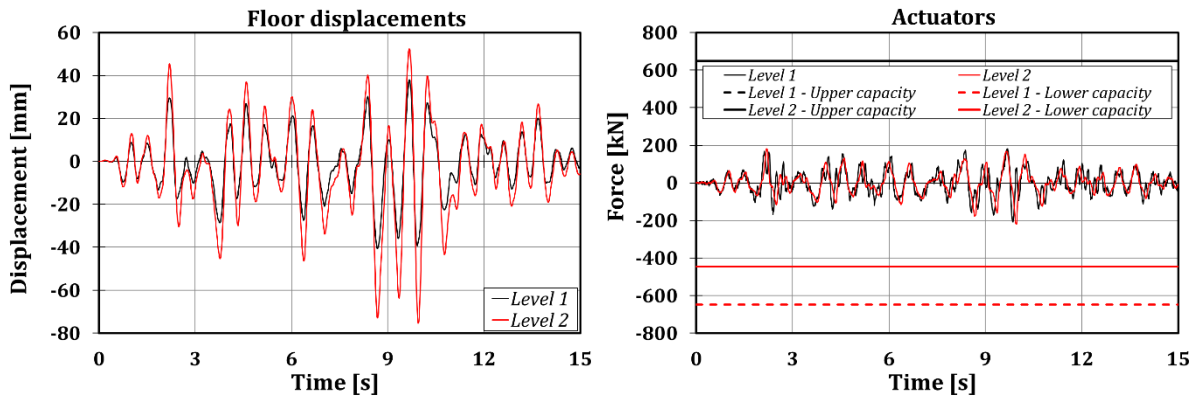
Σχήμα 6.13 : Δοκιμή 2: μετακινήσεις ορόφων (αριστερά) και δυνάμεις που μετρήθηκαν από τους επενεργητές (δεξιά)



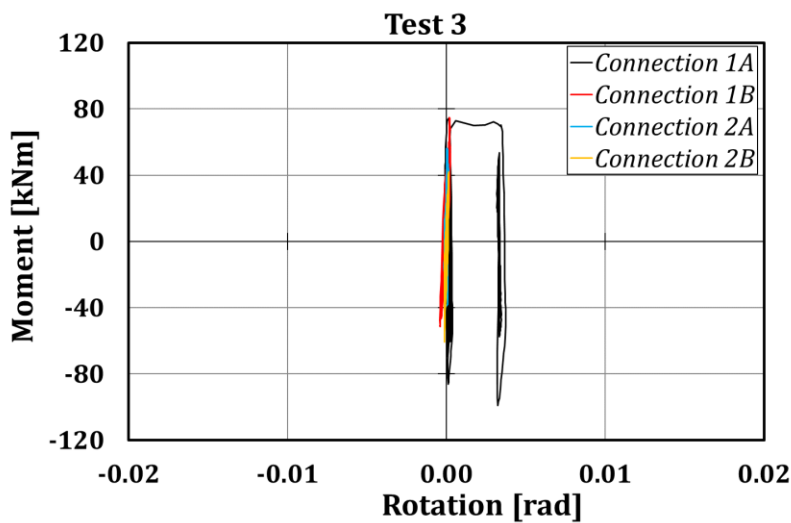
Σχήμα 6.14 : Δοκιμή 2: καμπύλες ροπής-στροφής συνδέσεων FREEDAM στο πλαίσιο MRF-1

6.6.3 Τεχνητός σεισμός (PGA = 0.50g)

Με αυτό το τεχνητά δημιουργημένο επιταχυνσιογράφημα, το οποίο επιλέχθηκε για λόγους συνέπειας με την παρόμοια κατασκευή που δοκιμάστηκε στο προηγούμενο σύνολο πειραμάτων, τα πλαίσια ροπής (MRF) παρέμειναν σχεδόν στην ελαστική περιοχή, χωρίς επιπλέον παραμένουσες μετατοπίσεις (Σχήμα 6.15). Οι τοπικές μετρήσεις, σε αυτή τη δοκιμή, υποδηλώνουν επίσης χαμηλή πλαστικοποίηση της δομής, καθώς μόνο η σύνδεση 1A είχε ελαφρώς περάσει στη πλαστική περιοχή με στροφή μόνο 4 mrad (Σχήμα 6.16).



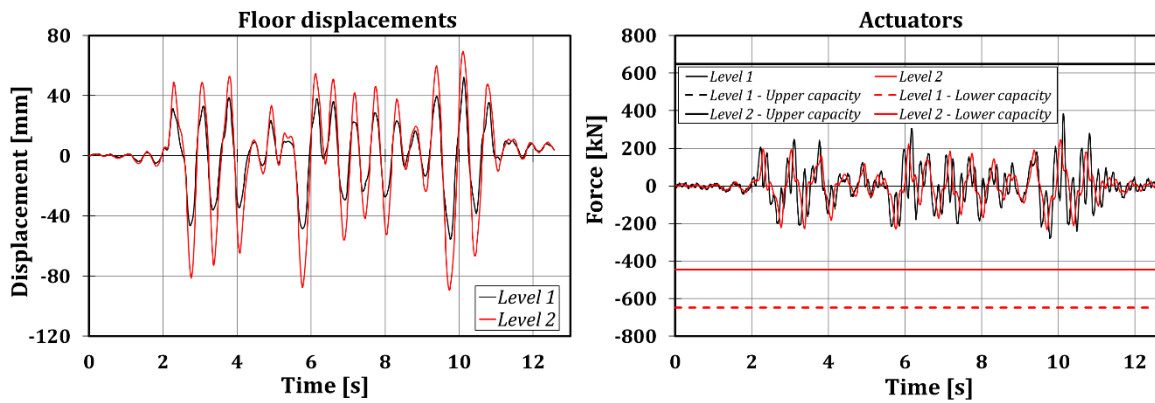
Σχήμα 6.15 : Δοκιμή 3: μετακινήσεις ορόφων (αριστερά) και δυνάμεις που μετρήθηκαν από τους επενεργητές (δεξιά)



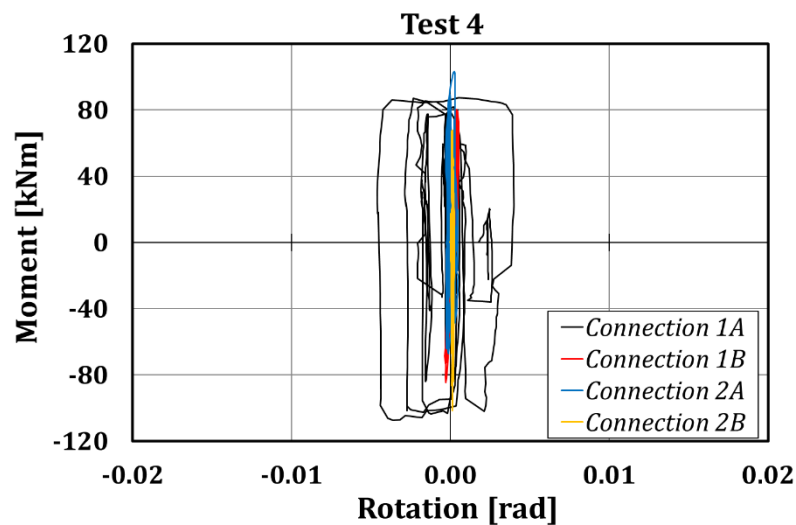
Σχήμα 6.16 : Δοκιμή 3: καμπύλες ροπής-στροφής συνδέσεων FREEDAM στο πλαίσιο MRF-1

6.6.4 Σεισμός Santa Barbara (PGA = 0.80g)

Η τέταρτη δοκιμή συνίστατο στην εφαρμογή της επιτάχυνσης του εδάφους που καταγράφηκε από το σταθμό της Santa Barbara (ΗΠΑ) το 1978. Παρόλο που η χρονοϊστορία χαρακτηρίζεται από μέγιστα με σχετικό πλάτος, ωστόσο, η χρήση της μέγιστης επιτάχυνσης εδάφους (0.80 g) επέτρεψε μόνο μία μέτρια ολίσθηση των συσκευών τριβής. Η συνολική συμπεριφορά δεν απέχει πολύ από τα χαρακτηριστικά που επισημαίνονται για τη Δοκιμή 3: οι μετατοπίσεις ορόφων δεν ξεπέρασαν τα 60 και 90 mm στον πρώτο και στο δεύτερο όροφο, αντίστοιχα, προκαλώντας μια μέγιστη σχετική μετακίνηση ορόφου ίση με 2.3% στο πρώτο επίπεδο (Σχήμα 6.17). Στο τέλος της δοκιμής δεν παρατηρήθηκαν παραμένουσες μετατοπίσεις. Επίσης σε αυτήν την περίπτωση, όπως και η Δοκιμή 3, ενεργοποιήθηκε μόνο η σύνδεση 1Α. Η μέγιστη περιστροφή της ήταν ίση με 4.6 mrad (Σχήμα 6.18).



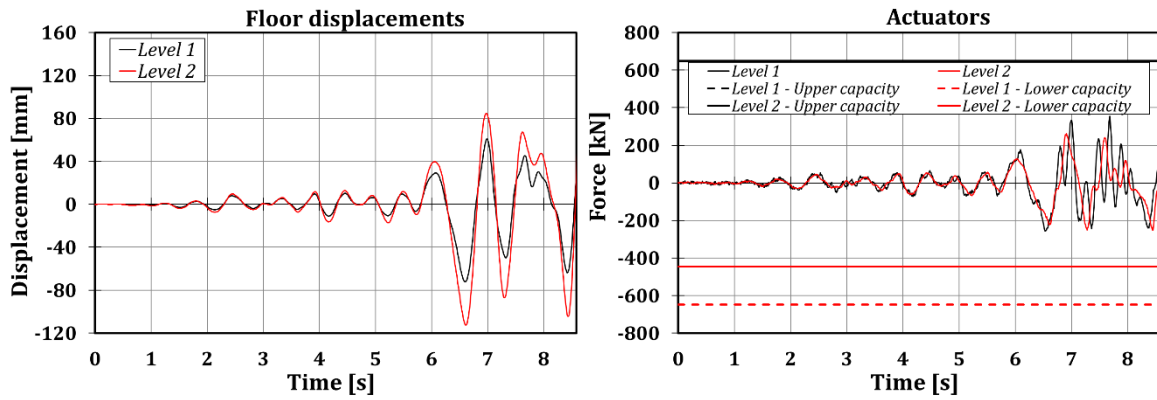
Σχήμα 6.17 : Δοκιμή 4: μετακινήσεις ορόφων (αριστερά) και δυνάμεις που μετρήθηκαν από τους επενεργητές (δεξιά)



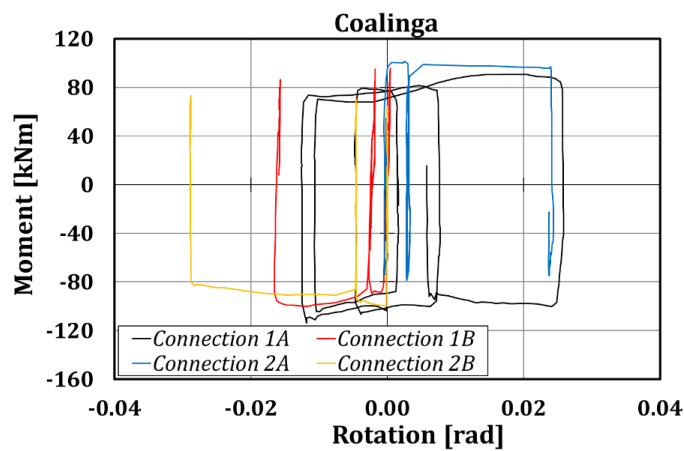
Σχήμα 6.18 : Δοκιμή 4: καμπύλες ροπής-στροφής συνδέσεων FREEDAM στο πλαίσιο MRF-1

6.6.5 Σεισμός Coalinga (PGA = 0.80g)

Κατά την τελευταία δοκιμή, σημειώθηκε υψηλότερη απορρόφηση ενέργειας. Αυτή η δοκιμή δεν έχει ολοκληρωθεί λόγω τεχνικού προβλήματος (απώλεια ελέγχου) που προκαλεί σημαντική βλάβη σε ένα μέρος που συνδέει το πρότυπο κτίριο και τον επενεργητή που βρίσκεται στον πρώτο όροφο. Αυτό συνέβη στα 8.58 δευτερόλεπτα, την ίδια στιγμή κατά την οποία η ψαθυρή θραύση της πρώτης σύνδεσης RBS εμφανίστηκε στο πρώτο σύνολο πειραμάτων. Στο Σχήμα 6.19 φαίνονται οι μετακινήσεις και οι υστερητικές καμπύλες της Δοκιμής 5 που επιβεβαιώνουν τα κύρια αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Η μέγιστη μετατόπιση ορόφου στο επίπεδο της οροφής είναι ίση με 112 mm (η ίδια τιμή που είχε στη Δοκιμή 2). Οι υστερητικές καμπύλες χαρακτηρίζονται από ασυμμετρία ως προς τις θετικές και αρνητικές ροπές κάμψης. Επιπλέον, παρατηρείται ότι οι μέγιστες ροπές μειώθηκαν καθώς ο αριθμός των κύκλων αυξήθηκε. Αυτό οφείλεται στη μείωση της σύσφιξης των προεντεταμένων κοχλιών υψηλής αντοχής που προκαλούνται από την φθορά των πλακών τριβής (Σχήμα 6.20).

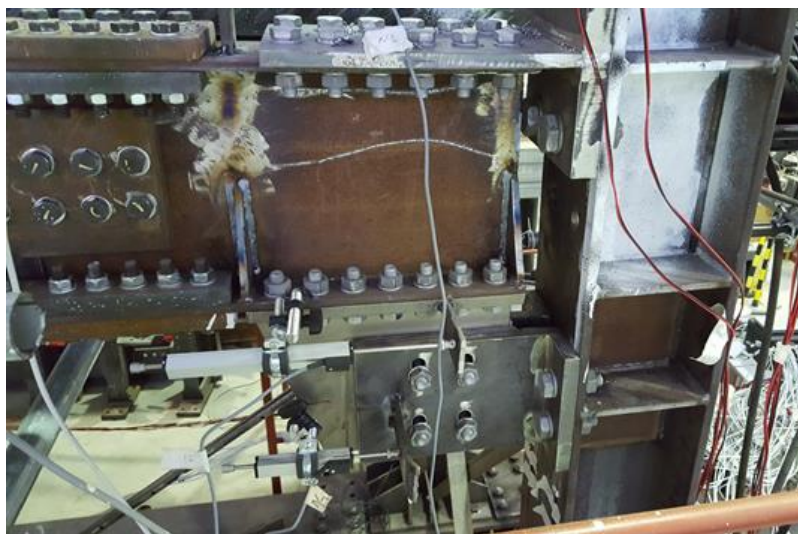


Σχήμα 6.19 : Δοκιμή 5: μετακινήσεις ορόφων (αριστερά) και δυνάμεις που μετρήθηκαν από τους επενεργητές (δεξιά)



Σχήμα 6.20 : Δοκιμή 5: καμπύλες ροπής-στροφής συνδέσεων FREEDAM στο πλαίσιο MRF-1

Στο τέλος αυτού του δεύτερου συνόλου δοκιμών, δεν παρατηρήθηκε καμία δομική βλάβη, καθώς τα μόνα μέρη που συνέβαλαν στην απορρόφηση της σεισμικής ενέργειας ήταν οι πλάκες τριβής των συνδέσεων FREEDAM.



Σχήμα 6.21 : Σύνδεση FREEDAM 1A στο τέλος του δεύτερου συνόλου πειραμάτων

6.7 Αριθμητική προσομοίωση της σεισμικής απόκρισης

6.7.1 Κατασκευή με συνδέσεις RBS

Στην προκαταρκτική φάση του σχεδιασμού του πρότυπου κτιρίου, στοχεύοντας στη συμπλήρωση των δεδομένων των δοκιμών και στην «τυφλή» πρόβλεψη (πριν τα πειράματα) της σεισμική απόκρισης, αναπτύχθηκε ένα μη γραμμικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής με συνδέσεις RBS, με το λογισμικό SeismoStruct [10] (Σχήμα 6.22). Η μη γραμμικότητα της σεισμικής απόκρισης της κατασκευής έχει προσομοιωθεί με τη χρήση μιας μικτής προσέγγισης με συγκεντρωμένη και κατανεμημένη πλαστιμότητα. Συγκεκριμένα, τα δομικά μέρη έχουν προσομοιωθεί ως ανελαστικά στοιχεία δυνάμεων λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές και υλικές μη γραμμικότητες με προσέγγιση διανεμημένης πλαστιμότητας.

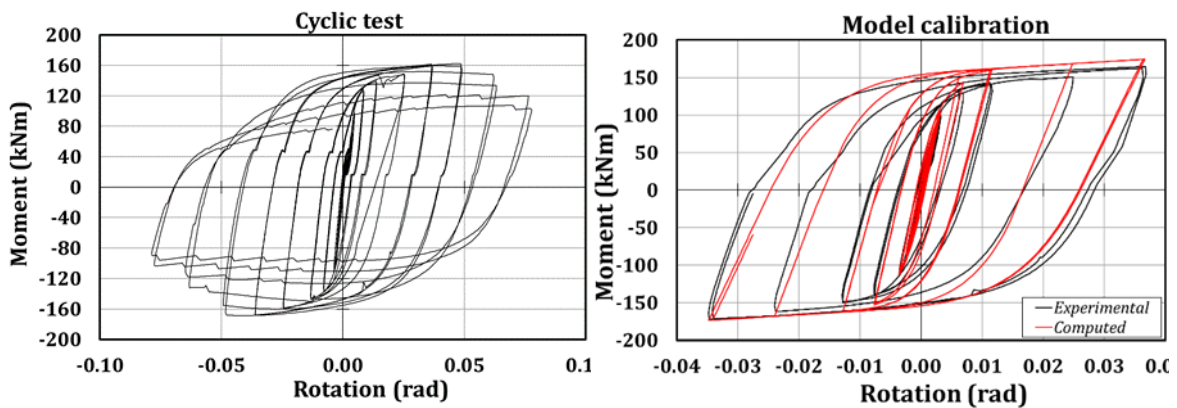


Σχήμα 6.22 : Τρισδιάστατο μοντέλο του πρότυπου κτιρίου με συνδέσεις RBS

Τα πεπερασμένα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηρίζονται από πέντε τμήματα ολοκλήρωσης που υποδιαιρούνται σε τουλάχιστον 150 ίνες. Αυτή η υποδιαίρεση είναι συνήθως αρκετή για να εξασφαλιστεί επαρκής ακρίβεια στον υπολογισμό των καμπυλών ξεκινώντας από τους νόμους των υλικών τάσης-παραμόρφωσης. Έχουν χρησιμοποιηθεί άκαμπτοι σύνδεσμοι για να προσομοιώσουν τα διαφράγματα ορόφων, ενώ οι συγκεντρωμένες μάζες τοποθετούνται στο κέντρο των ανοιγμάτων. Η δομική λεπτομέρεια των κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων που χρησιμοποιήθηκε στο πρότυπο κτίριο είχε ήδη δοκιμαστεί σε προηγούμενο έργο. Το δοκίμιο είχε λεπτομέρεια σύνδεσης με την ίδια γεωμετρία της RBS και παρόμοια κατηγορία χάλυβα. Τα αποτελέσματα αυτής της πειραματικής δοκιμής [11] χρησιμοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία για τη βαθμονόμηση ενός μη γραμμικού ελατηρίου, προσομοιώνοντας την απόκριση των συνδέσεων RBS. Η απόκριση ροπής-στροφής της RBS που δοκιμάστηκε στο [11] και φαίνεται στο Σχήμα 6.23 αναφέρεται στη ροπή κάμψης και τις στροφές που υπολογίστηκαν στο κέντρο της RBS. Ειδικότερα, η συμπεριφορά ροπής-στροφής της RBS έχει προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας ένα σύνδεσμο (smooth link element) [12]. Αυτός ο τύπος στοιχείου είναι ένα από τα πιο ολοκληρωμένα και πολύπλοκα υστερητικά μοντέλα που διατίθενται στο τρέχον εμπορικό λογισμικό. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημά του είναι ότι βασίζεται σε μεγάλο πλήθος παραμέτρων που καθιστούν τη διαδικασία βαθμονόμησης πολύ περίπλοκη. Η βαθμονόμηση αυτών των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας το εργαλείο Multical [13] ελαχιστοποιώντας τη διασπορά μεταξύ της πειραματικής και της βαθμονομημένης καμπύλης τόσο στην απορρόφηση ενέργειας όσο και στη περιβάλλουσα των κύκλων

υστερήσης. Το MultiCal είναι ένα εργαλείο για τη βαθμονόμηση των υστερητικών μοντέλων που βασίζεται σε γενετικούς αλγορίθμους.

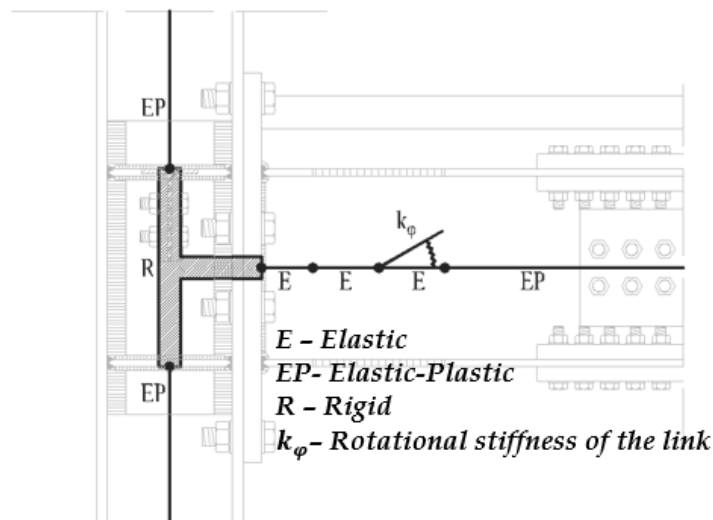
Επιτρέπει την εύρεση του καλύτερου συνδυασμού παραμέτρων που προσαρμόζονται στην πειραματική απόκριση βάσει ενός συνόλου κριτηρίων που ορίζει ο χρήστης. Όσο οι δοκιμές στο πρότυπο κτίριο οδηγούν σε πλάτη στροφής μικρότερα από 35 mrad, εφαρμόστηκε η διαδικασία βαθμονόμησης λαμβάνοντας υπόψη τους κύκλους δοκιμών έως το πλάτος των 35 mrad. Αυτή η πτυχή είναι πολύ σημαντική, καθώς η βαθμονόμηση των συντελεστών προσομοίωσης εκτός του αναμενόμενου εύρους στροφών θα μπορούσε να οδηγήσει στον ορισμό ενός συνόλου των παραμέτρων που επηρεάζονται από φαινόμενα που δεν συμβαίνουν στις στροφές σχεδιασμού. Αυτή είναι η περίπτωση, για παράδειγμα, των φαινομένων λυγισμού που παρατηρήθηκαν στη δοκιμή του κόμβου, όπου εμφανίστηκαν μόνο στροφές περίπου 50 mrad. Η περιοχή σύνδεσης έχει προσομοιωθεί σύμφωνα με την προσέγγιση που περιγράφεται στο Σχήμα 6.24. Επομένως, το ενισχυμένο τμήμα του εσωτερικού φατνώματος του κόμβου έχει προσομοιωθεί με άκαμπτους συνδέσμους, ενώ η μη γραμμικότητα της RBS έχει συμπεριληφθεί στο προηγούμενος βαθμονομημένο ελατήριο. Αυτό το μη γραμμικό ελατήριο βρίσκεται στο κέντρο του RBS.



a) Ανακυκλική απόκριση της RBS

b) Βαθμονόμηση μοντέλου

Σχήμα 6.23 : Πειραματική και αριθμητική απόκριση ροπής-στροφής της RBS



Σχήμα 6.24 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του συστήματος δοκού RBS-κόμβου

Τα σεισμικά φορτία έχουν εφαρμοστεί με όρους επιταχύνσεων στη βάση του πλαισίου. Οι αναλύσεις χρονοϊστορίας έχουν πραγματοποιηθεί λαμβάνοντας υπόψη ένα χρονικό βήμα 0.01 s, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Hilbert-Hughes-Taylor και περιλαμβάνοντας μια τιμή απόσβεσης ίση με 1% με μια προσέγγιση Rayleigh, όπως έχει ήδη γίνει κατά τη διάρκεια της ψευδο-δυναμικής δοκιμής.

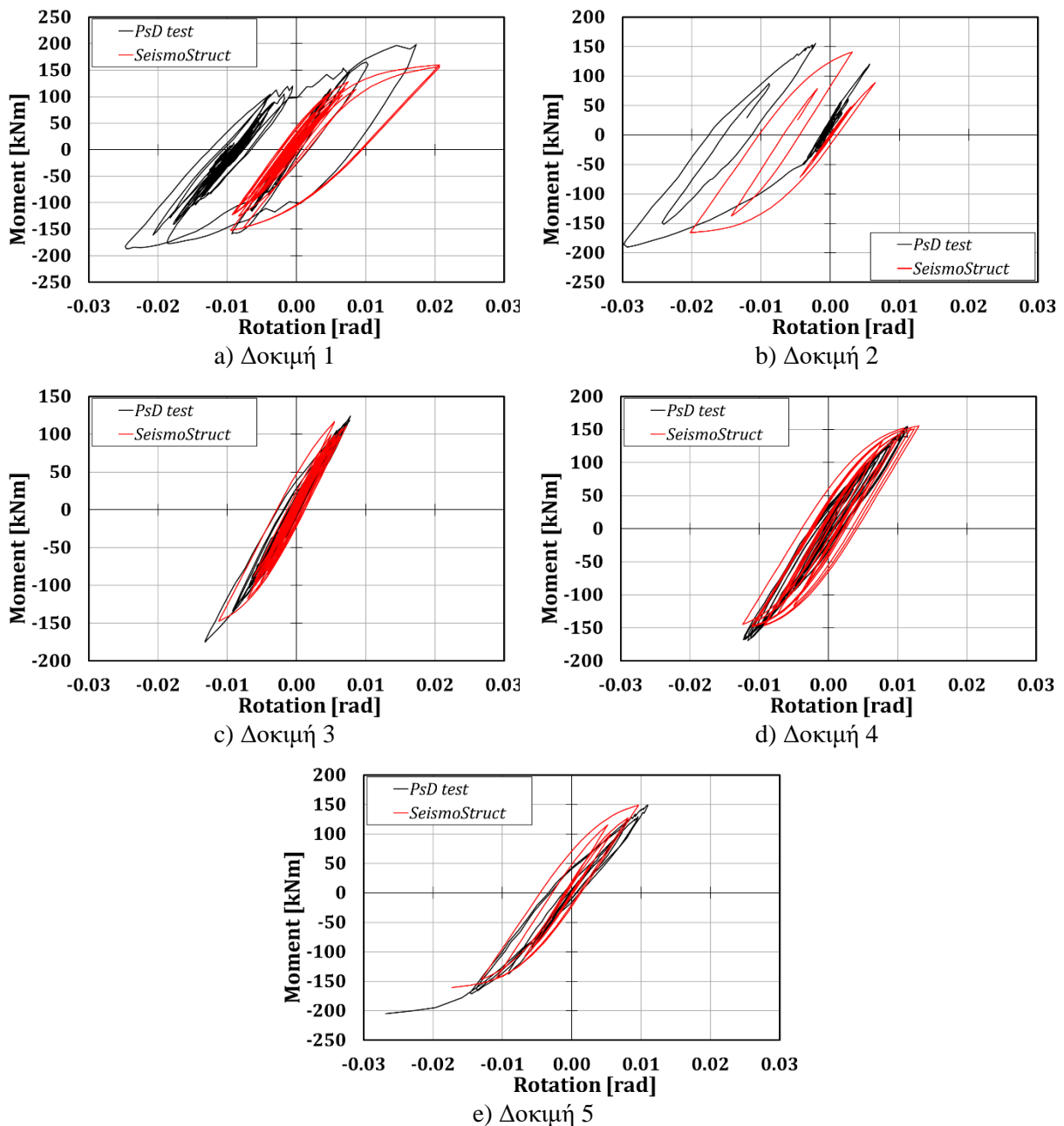
Σε αυτήν την ενότητα, αναφέρονται οι κύριες συγκρίσεις μεταξύ των πειραματικών αποτελεσμάτων και του αριθμητικού μοντέλου. Σε γενικές γραμμές, όταν συγκρίνονται οι πέντε δοκιμές, το εξελιγμένο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων φαίνεται ικανό να περιγράψει με επαρκή βαθμό ακρίβειας τις καθολικές παραμέτρους σεισμικής απόκρισης (Πίνακας 6.4). Οι διασπορές μεταξύ των πραγματικών και προβλεπόμενων μέγιστων μετατοπίσεων ή των πραγματικών και προβλεπόμενων μέγιστων δυνάμεων δεν υπερβαίνουν το 25%, εκτός από το επιταχυνσιογράφημα Spitak. Η χαμηλότερη ακρίβεια, στη συγκεκριμένη περίπτωση, οφείλεται πιθανώς στη διαδικασία βαθμονόμησης που εφαρμόζεται για τον χαρακτηρισμό των RBS. Όπως εξηγείται στο [13], όταν τα επιταχυνσιογραφήματα χαρακτηρίζονται μόνο από λίγα μέγιστα, η βαθμονόμηση των παραμέτρων μοντέλου που βασίζεται μόνο στα αποτελέσματα μιας ανακυκλικής δοκιμής μπορεί να οδηγήσει σε χονδρικές εκτιμήσεις. Ήταν στο [13] είχε επισημανθεί ότι η βαθμονόμηση που βασίζεται μόνο στα αποτελέσματα μιας ανακυκλικής δοκιμής συνήθως δεν επαρκεί για να επιτευχθεί ικανοποιητική πρόβλεψη της τοπικής απόκρισης ειδικά σε περιπτώσεις όπου η σύνδεση υπόκειται σε λίγους μόνο κύκλους μεγάλου πλάτους.

Πίνακας 6.4: Σύγκριση πειραματικών και αναλυτικών τεμνουσών βάσης, μετακινήσεων ορόφων και σχετικών μετατοπίσεων ορόφου

Δοκιμή	Μέγιστη διάτμηση βάσης (kN)		Μέγιστη μετακίνηση 1ου ορόφου (mm)		Μέγιστη μετακίνηση οροφής (mm)		Μέγιστη γωνιακή παραμόρφωση ορόφου (%)				Ενέργεια (kNm)
	Pull	Push	Pull	Push	Pull	Push	Pull (L-1)	Pull (L-2)	Push (L-1)	Push (L-2)	
1 - Real	-751	667	-79	44	-150	88	-3.27	-2.98	1.84	1.86	55.70
1 - Sim.	-656	601	-66	43	-130	84	-2.74	-3.02	1.77	1.97	50.80
1- Err. (%)	15	11	20	4	15	5	20	-1	4	-5	10
2 - Real	-652	670	-17	85	-34	171	-0.70	-0.72	3.54	3.61	33.16
2 - Sim.	-645	648	-27	74	-52	133	-1.12	-1.24	3.08	2.55	30.21
2- Err. (%)	1	3	-37	15	-36	28	-37	-42	15	42	10
3 - Real	-444	555	-29	40	-66	83	-1.22	-1.54	1.67	1.79	28.59
3 - Sim.	-477	563	-31	42	-60	88	-1.27	-1.52	1.74	1.97	15.78
3- Err. (%)	-7	-1	-4	-4	10	-6	-4	2	-4	-9	81
4 - Real	-586	592	-48	41	-99	85	-2.00	-2.16	1.71	1.84	55.63
4 - Sim.	-588	575	-47	44	-98	92	-1.95	-2.12	1.83	2.07	54.42
4- Err. (%)	0	3	2	-6	2	-8	2	2	-6	-11	2
5 - Real	-630	612	-47	62	-94	129	-1.97	-1.96	2.57	2.81	37.16
5 - Sim.	-665	555	-47	54	-81	117	-1.95	-1.62	2.26	2.63	31.12
5- Err. (%)	-5	10	1	14	15	10	1	21	14	7	19

Σε τις περιπτώσεις, η βαθμονόμηση πρέπει να πραγματοποιείται λαμβάνοντας υπόψη τουλάχιστον τα αποτελέσματα μιας ανακυκλικής δοκιμής και τα αποτελέσματα μιας μονοτονικής δοκιμής. Παρ' όλα αυτά, για όλες τις άλλες περιπτώσεις, οι προβλέψεις των μέγιστων μετατοπίσεων ορόφων, των μέγιστων δυνάμεων και των μέγιστων σχετικών μετατοπίσεων ορόφων φαίνονται μάλλον ακριβείς.

Ο πίνακας δείχνει ότι το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων παρέχει σε πολλές περιπτώσεις μια αρκετά ικανοποιητική πρόβλεψη της καθολικής απόκρισης. Αυτή η ακριβής πρόβλεψη των καθολικών παραμέτρων απόκρισης δεν αντιστοιχεί στο ίδιο επίπεδο ακρίβειας όταν συγκρίνονται τα δεδομένα δοκιμής και τα αναλυτικά αποτελέσματα σε όρους τοπικών παραμέτρων απόκρισης. Ενώ οι υστερητικοί κύκλοι έχουν συνολικό σχήμα παρόμοιο με τους πειραματικούς βρόχους, οι προβλέψεις όσον αφορά τις μέγιστες / ελάχιστες στροφές που των συνδέσεων RBS και τις μέγιστες ροπές στο κέντρο της RBS είναι σχετικά περισσότερο προσεγγιστικές (Σχήμα 6.25).



Σχήμα 6.25 : Σύγκριση των βρόχων υστέρησης για την RBS-1A
Πίνακας 6.5: Συγκρίσεις για τη σύνδεση 1A

Δοκιμή	Στροφή (rad)		Ροπή (kNm)		Ενέργεια (kNm)
	Μέγιστη	Ελάχιστη	Μέγιστη	Ελάχιστη	
1 – Real	17	-25	199	-187	10
1 – Sim.	21	-10	160	-152	7
1 – Err. (%)	19	62	-20	18	-27
2 – Real	6	-30	156	-190	4
2 – Sim.	6	-20	141	-166	3
2 – Err. (%)	15	32	-10	13	-28
3 – Real	8	-13	124	-175	3
3 – Sim.	7	-11	117	-147	2
3 – Err. (%)	-7	15	-6	16	-18
4 – Real	11	-12	155	-169	7
4 – Sim.	13	-12	155	-149	9
4 – Err. (%)	14	-1	0	12	40
5 – Real	11	-27	149	-205	6
5 – Sim.	10	-17	148	-161	4
5 – Err. (%)	-13	36	0	22	-28

Αυτή η σύγκριση, για τις πέντε δοκιμές, φαίνεται στο Σχήμα 6.25 για την απόκριση της σύνδεσης 1A του MRF-1. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι μέγιστες στροφές προβλέπονται σε πολλές περιπτώσεις με χαμηλή ακρίβεια, ενώ οι μέγιστες ροπές κάμψης προβλέπονται με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτό σημαίνει ότι παρόλο που το μοντέλο ελατηρίου που χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την απόκριση ροπής-στροφής των συνδέσεων RBS βαθμονομήθηκε έχοντας ως αφετηρία τα αποτελέσματα μιας πειραματικής δοκιμής και χρησιμοποιώντας μια ακριβή διαδικασία βαθμονόμησης, το κύριο πρόβλημα των φαινομενολογικών μοντέλων είναι εγγενές στον τύπο του μοντέλου.

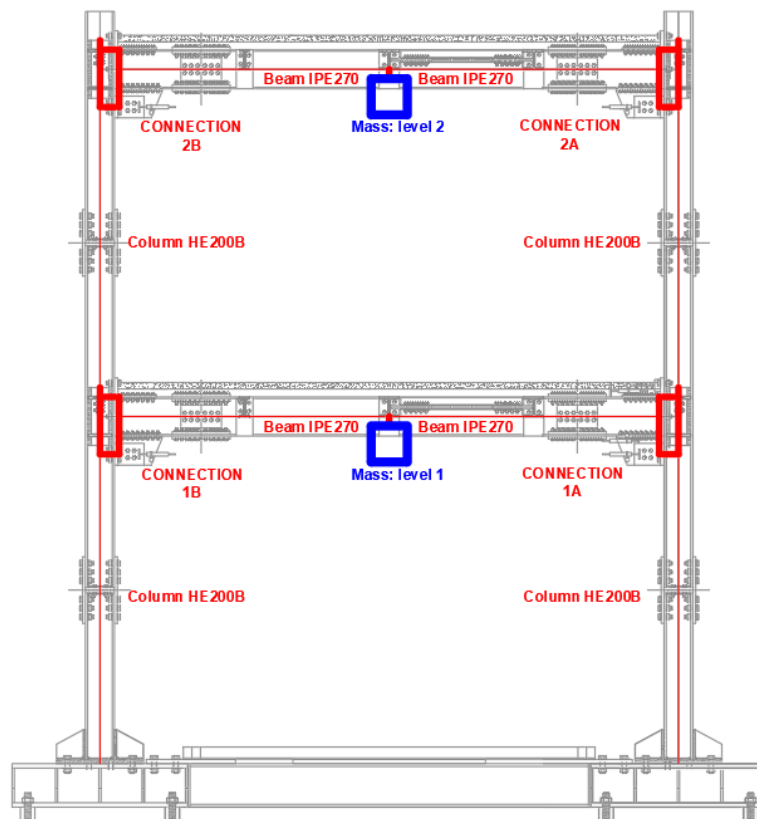
Ενώ θεωρητικά τέτοια μοντέλα βασίζονται σε αρκετές παραμέτρους ικανές να αναπαραγάγουν με μεγάλη ακρίβεια την πειραματική απόκριση οποιουδήποτε τύπου σύνδεσης, οι παράμετροι αυτές δεν συνδέονται άμεσα με τη μηχανική απόκριση του στοιχείου που προσομοιώνεται. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε ασυμφωνία μεταξύ της πραγματικής και της προσομοιωμένης συμπεριφοράς, η οποία μπορεί να είναι σημαντική σε πολλές περιπτώσεις. Οι συγκρίσεις που φαίνονται στον Πίνακα 6.5 δείχνουν ότι, όσον αφορά τις μέγιστες στροφές, τα σφάλματα κυμαίνονται από ένα ελάχιστο 1% έως ένα μέγιστο 62%, ενώ όσον αφορά τις μέγιστες ροπές, τα σφάλματα κυμαίνονται από ένα ελάχιστο 0% έως ένα μέγιστο 22%. Το πλάτος του εύρους διακύμανσης των διασπορών στην πρόβλεψη των μέγιστων στροφών, που κυμαίνονται μεταξύ 1% και 62%, οφείλεται σαφώς στο γεγονός ότι οι παράμετροι για τη προσομοίωση της ανακυκλικής συμπεριφοράς των κόμβων βαθμονομούνται έναντι των πειραματικών αποτελεσμάτων που προέρχονται από το δοκιμή κόμβων δοκών-υποστυλωμάτων που υπόκεινται σε συμβατικά πρωτόκολλα φόρτισης τα οποία μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από αυτά που συμβαίνουν υπό πραγματικούς σεισμούς και, ακόμη περισσότερο, υπό επαναλαμβανόμενους σεισμούς όπως η ακολουθία που εξετάζεται σε αυτό το έργο. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν επιβεβαιώνουν τον ρόλο ύψιστης σημασίας που διαδραματίζει το ιστορικό φόρτισης, όπως ήδη έχει επισημανθεί σε προηγούμενα έργα [13]. Ωστόσο, είναι επίσης σημαντικό να επισημανθεί ότι οι διασπορές μειώνονται σημαντικά όταν λαμβάνονται υπόψη οι καθολικές παράμετροι απόκρισης, όπως οι σχετικές μετατοπίσεις ορόφων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός

ότι οι τοπικές ανακρίβειες ομαλοποιούνται κατά μέσο όρο μόλις αυξηθεί το πλήθος των ζωνών απορρόφησης ενέργειας. Στην περίπτωση κατασκευών με μεγαλύτερο αριθμό ορόφων και ανοιγμάτων, αναμένεται περαιτέρω βελτίωση στην πρόβλεψη των καθολικών παραμέτρων απόκρισης λόγω του μεγάλου πλήθους των ζωνών απορρόφησης ενέργειας.

Από την άποψη της απορρόφησης ενέργειας, οι διασπορές είναι επίσης σημαντικές σε πολλές περιπτώσεις, όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.5.

6.7.2 Κατασκευή με συνδέσεις FREEDAM

Αναφορικά με τη κατασκευή που είναι εξοπλισμένη με συνδέσεις FREEDAM, αναπτύχθηκε ένα μη γραμμικό δισδιάστατο μοντέλο του κτιρίου με το λογισμικό OpenSees [14] (Σχήμα 6.26) για την επίτευξη διπλού σκοπού: 1) το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων αναπτύχθηκε αρχικά για να εκτελέσει αναλύσεις πρόβλεψης πριν τα πειράματα για τη σεισμική απόκριση του κτιρίου, 2) τα αποτελέσματα των πεπερασμένων στοιχείων αποσκοπούσαν στον έλεγχο του σχεδιασμού της διάταξης της δοκιμής και του εξοπλισμού, προβλέποντας τις εφαρμοζόμενες δυνάμεις και επαληθεύοντας τη συμβατότητά τους με τις ικανότητες του συστήματος ενεργοποίησης.



Σχήμα 6.26 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων της κατασκευής

Η στρατηγική που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση πεπερασμένων στοιχείων βασίστηκε στη χρήση μιας μικτής προσέγγισης συγκεντρωμένης και κατανεμημένης πλαστιμότητας. Συγκεκριμένα, οι δοκοί και τα υποστυλώματα έχουν προσομοιωθεί με ανελαστικά στοιχεία δυνάμεων (στοιχείο *forceBeamColumn* στο OpenSees) για να ληφθούν υπόψη οι γεωμετρικές και υλικές μη γραμμικότητες με μια προσέγγιση διανεμημένης πλαστιμότητας. Κάθε στοιχείο έχει χαρακτηριστεί από πέντε τμήματα ολοκλήρωσης υποδιαιρούμενα σε τουλάχιστον 120 ίνες. Αυτό εξασφαλίζει καλή ακρίβεια για την

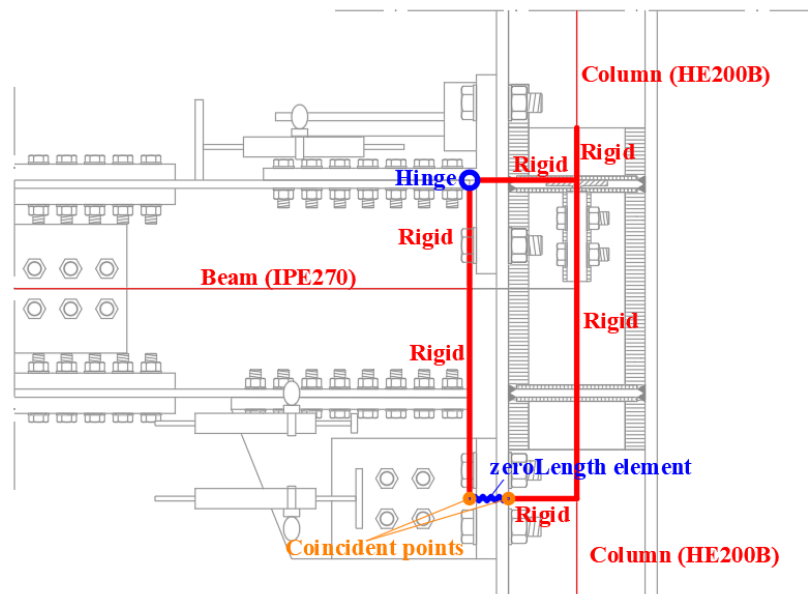
εκτίμηση των καμπυλών και εσωτερικών δυνάμεων ξεκινώντας από τη γνώση των υλικών ιδιοτήτων. Οι συγκεντρωμένες μάζες τοποθετήθηκαν 65 mm κάτω από το κέντρο των ανοιγμάτων για να προσομοιάσουν τα σημεία εφαρμογής των δυνάμεων αδράνειας από τους επενεργητές στη διάταξη δοκιμής.

Ένα πολύ εκλεπτυσμένο μοντέλο συνδέσεων έχει χρησιμοποιηθεί για τις συνδέσεις. Το μοντέλο περιλαμβάνει μία άρθρωση που βρίσκεται στο επίπεδο του άνω πέλματος δοκού όπου βρίσκεται το T που κρατάει σταθερό το κέντρο περιστροφής. Επομένως, το μοντέλο είναι συνεπές με τη φυσική θέση του κέντρου περιστροφής. Εκτός αυτού, ένα στοιχείο μηδενικού μήκους (*zeroLength element*), στο οποίο περιλαμβάνεται ένας νόμος μετασχηματισμού ανελαστικής δύναμης-μετατόπισης, τοποθετείται στο κέντρο του αποσβεστήρα τριβής (Σχήμα 6.27).

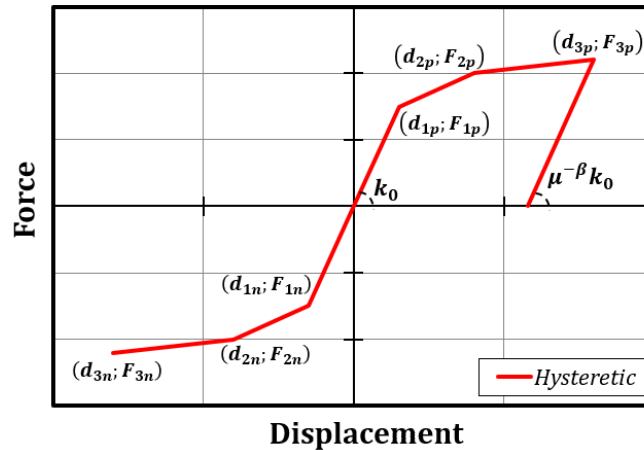
Συγκεκριμένα, ο νόμος δύναμης-μετατόπισης του ελατηρίου μετασχηματισμού έχει παρασχεθεί χρησιμοποιώντας το μονοαξονικό υστερητικό (*uniaxial material Hysteretic*) στοιχείο του οποίου οι παράμετροι εισόδου απεικονίζονται στο Σχήμα 6.28. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τις συντεταγμένες έξι σημείων για τη προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς της σύνδεσης. Επιπλέον, είναι δυνατόν να προσομοιωθεί μια ακαμψία αποφόρτισης με υποβάθμιση εξαρτώμενη από την πλαστιμότητα σύμφωνα με ένα συντελεστή που δίνεται από $\mu^{-\beta}$.

Αναφορικά με την αναλυθείσα περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε ένας συμμετρικός τριγραμμικός νόμος δύναμης-μετατόπισης, υποθέτοντας ότι η δύναμη διαρροής ισούται με την δύναμη ολίσθησης των συσκευών τριβής ($F_{cf, Sd} = 234 \text{ kN}$), και ότι η μετα-ελαστική κράτυνση είναι αμελητέα. Για λόγους σαφήνειας, οι συντεταγμένες των σημείων φαίνονται στον Πίνακα 6.6, ενώ ο συντελεστής β έχει οριστεί ίσος με 0.

Ακαμπτα στοιχεία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.27, έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύνδεση των διαφόρων μερών του μοντέλου.



Σχήμα 6.27 : Μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων του κόμβου δοκού-υποστυλώματος (εκλεπτυσμένο μοντέλο)



Σχήμα 6.28 : Μονοαξονικό υστερητικό υλικό: παράμετροι

Πίνακας 6.6: Μονοαξονικό υστερητικό υλικό: παράμετροι

Σημείο	d (mm)	F (kN)
3n	-170.00	-236.00
2n	-10.00	-235.00
1n	-0.02	-234.00
	0.00	0.00
1p	0.02	234.00
2p	10.00	235.00
3p	170.00	236.00

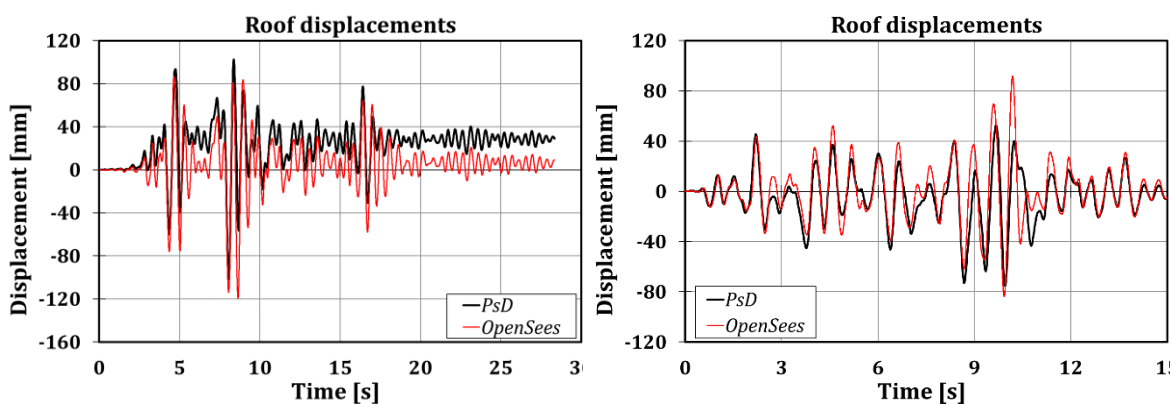
Οι επιταχύνσεις στη βάση της κατασκευής έχουν εφαρμοστεί για την ανάθεση της μετακίνησης εδάφους. Οι χρονοϊστορίες που χρησιμοποιήθηκαν χαρακτηρίζονται από χρονικό βήμα 0.01 s. Η εξίσωση κίνησης έχει επιλυθεί χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Newmark ορίζοντας μια τιμή απόσβεσης ίση με 1% σε όλες τις δοκιμές, με μια προσέγγιση Rayleigh όπως έχει ήδη γίνει κατά τη διάρκεια της ψευδο-δυναμικής δοκιμής.

Η προτεινόμενη προσέγγιση προσομοίωσης της σύνδεσης έχει αποδειχθεί πιο αξιόπιστη από την απλή προσέγγιση που συνίσταται στη συγκέντρωση της καμπτικής συμπεριφοράς της σύνδεσης σε ένα στροφικό ελατήριο, καθώς αυτή η λύση δεν είναι σε θέση να προβλέψει την ενεργοποίηση των αποσβεστήρων τριβής όπως συμβαίνει στο ψευδο-δυναμικές δοκιμές. Η εκλεπτυσμένη προσέγγιση, αντιθέτως, μπορεί να εξηγήσει την πραγματική μηχανική συμπεριφορά των κόμβων.

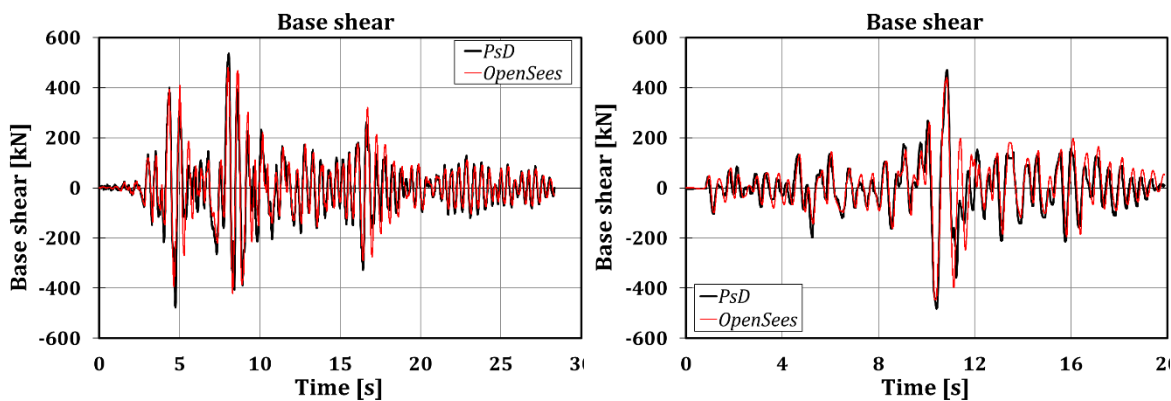
Τα αποτελέσματα σχετικά με τη συνολική σεισμική απόκριση του κτιρίου φαίνονται στον Πίνακα 6.7. Οι διασπορές σε όρους μέγιστων μετακινήσεων ορόφων είναι χαμηλότερες από 25%. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.29, η χρονοϊστορία των μετατοπίσεων βρίσκεται σε φάση, επιβεβαιώνοντας πιο ακριβή μοντελοποίηση.

Πίνακας 6.7: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών δυνάμεων επενεργητών και μετακινήσεις ορόφων

Δοκιμή	Δυνάμεις επενεργητών (kN)		Μέγιστη μετακίνηση ορόφου (mm)	
	(L-1)	(L-2)	(L-1)	(L-2)
1 - PsD	339	326	73	104
1 - Sim. 2	250	232	58	119
1 - Err. (%)	-26	-29	-21	14
2 - PsD	282	257	79	112
2 - Sim. 2	237	223	59	133
2 - Err. (%)	-16	-13	-25	18
3 - PsD	220	222	41	75
3 - Sim. 2	228	215	36	92
3 - Err. (%)	4	-3	-12	22
4 - PsD	390	255	56	89
4 - Sim. 2	240	214	43	103
4 - Err. (%)	-38	-16	-23	15
5 - PsD	340	270	72	112
5 - Sim. 2	266	242	58	126
5 - Err. (%)	-22	-10	-20	12



Σχήμα 6.29 : Μετακινήσεις οροφής: Δοκιμή 1 (αριστερά) και Δοκιμή 3 (δεξιά)



Σχήμα 6.30 : Βάση: Δοκιμή 1 (αριστερά) και Δοκιμή 2 (δεξιά)

Επιπλέον, η ακριβής πρόβλεψη της τέμνουσας βάσης φαίνεται στο Σχήμα 6.30.

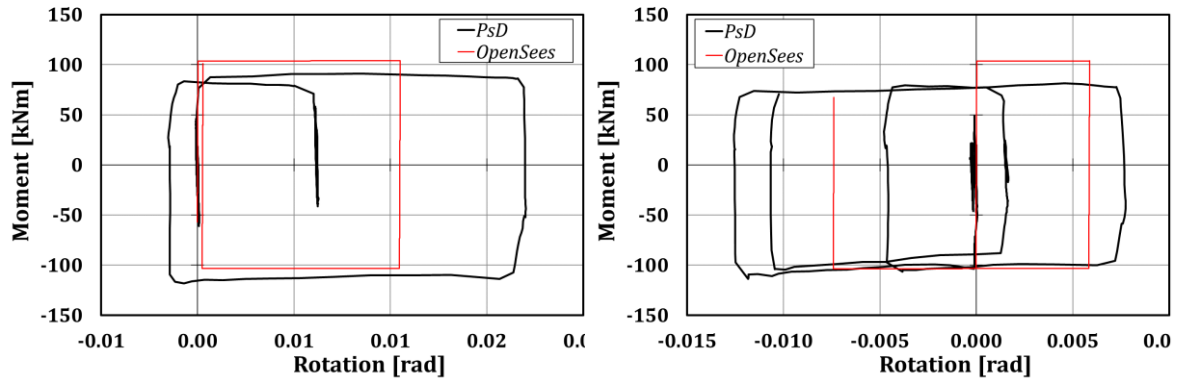
Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ πειραματικών αποτελεσμάτων και αριθμητικών προσομοιώσεων αναφορικά στις ροπές κάμψης και τις στροφές που της σύνδεσης 1Α. Οι μέγιστες διασπορές από την άποψη των ροπών κάμψης κυμαίνονται μεταξύ -14 και + 28%. Το κύριο όφελος που παρέχεται από τη χρήση αυτής της κοινής προσέγγισης προσομοίωσης είναι ότι το μοντέλο λαμβάνει την πραγματική ενεργοποίηση των αποσβεστήρων τριβής (Σχήμα 6.31).

Ωστόσο, ανεξάρτητα από την προσέγγιση προσομοίωσης κόμβου που χρησιμοποιείται, οι διασπορές μεταξύ πειραματικών και αριθμητικών αποτελεσμάτων δεν είναι αμελητέες, δείχνοντας τις δυσκολίες στην πρόβλεψη της σεισμικής μη γραμμικής απόκρισης των κατασκευών λόγω πολλών πηγών αβεβαιότητας. Ειδικότερα, στην εξεταζόμενη περίπτωση, ένας σημαντικός παράγοντας οφείλεται σίγουρα στην τυχαία μεταβλητότητα του συντελεστή τριβής των αποσβεστήρων και στον έλεγχο της πραγματικής προέκτασης των κοχλιών, τα οποία επηρεάζουν την αντίσταση ολίσθησης των αποσβεστήρων τριβής και τον χρόνο που αντιστοιχεί στην ολίσθηση τους υπό σεισμική δράση.

Τέλος, πρέπει να υπογραμμιστεί ότι μετά από όλη τη σεισμική ακολουθία οι κόμβοι δοκών-υποστυλωμάτων παρουσίασαν ουσιαστικά μηδενική βλάβη, επιβεβαιώνοντας τη συμπεριφορά που έχει ήδη επιδειχθεί από τους κόμβους δοκών-υποστυλωμάτων κατά τη διάρκεια πειραματικών δοκιμών υπό συνθήκες ανακυκλικής φόρτισης [9]. Μπορούν να αναφέρονται ως συνδέσεις χαμηλής βλάβης, επειδή σημειώθηκε μόνο μικρή διαρροή στο κοχλιωμένο T κοντά στο κέντρο περιστροφής. Παρόμοια μικρή διαρροή συνέβη στις γωνίες που συνδέουν το αποσβεστήρα τριβής με το πέλμα του υποστυλώματος [9]. Αντίθετα, το ίδιο κτίριο εξοπλισμένο με σύνδεση προεξέχουσας μετωπικής πλάκας με RBS που υποβλήθηκε στην ίδια σεισμική ακολουθία παρουσίασε [5], στο τέλος της σεισμικής ακολουθίας, αστοχία της σύνδεσης λόγω θραύσης των πελμάτων της δοκού στη ζώνη απομειωμένης διατομής δοκού και, για ορισμένους κόμβους, λόγω θραύσης των συγκολλήσεων που συνδέουν τη δοκό με τη μετωπική πλάκα.

Πίνακας 6.8: Σύγκριση πειραματικών και αριθμητικών τιμών της σύνδεσης 1Α (δοκιμές PsD – προσομοίωση Sim. 2)

Δοκιμή	Στροφή (rad)	Ροπή (kNm)		Ενέργεια (kNm)
		Αρνητική	Θετική	
2 - PsD	17.03	118.36	90.98	4.14
2 - Sim. 2	10.52	103.50	103.93	2.15
2 - Err. (%)	-38	-13	14	-48
3 - PsD	3.74	99.24	74.11	0.34
3 - Sim. 2	0.65	85.63	103.53	0.07
3 - Err. (%)	-83	-14	40	-81
4 - PsD	4.61	107.55	87.42	2.64
4 - Sim. 2	2.53	103.60	98.49	0.26
4 - Err. (%)	-45	-4	13	-90
5 - PsD	12.58	113.82	81.36	5.69
5 - Sim. 2	7.42	103.80	103.74	1.98
5 - Err. (%)	-41	-9	28	-65



Σχήμα 6.31 : Υστερητικές καμπύλες (σύνδεση 1A): Δοκιμή 2 (αριστερά) και Δοκιμή 5 (δεξιά)

6.8 Σύγκριση σεισμικών συμπεριφορών

Σε αυτήν την ενότητα, γίνεται μια σύγκριση των κύριων αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα δύο σύνολα πειραμάτων.

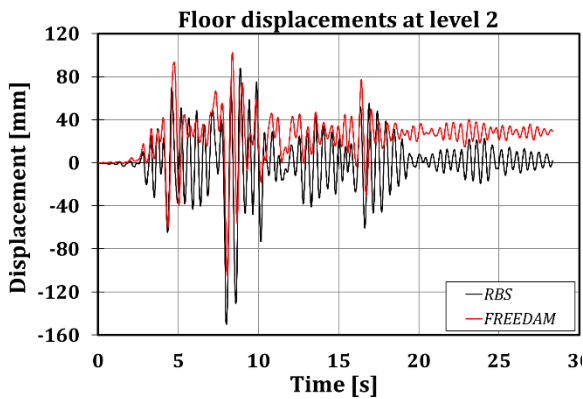
Στον Πίνακα 6.9 φαίνονται οι μετατοπίσεις ορόφου και η τέμνουσα βάσης που παρατηρήθηκε σε κάθε σύνολο πειραμάτων: είναι δυνατόν να παρατηρηθεί ότι η κατασκευή που είναι εξοπλισμένη με συνδέσεις FREEDAM παρουσιάζει πάντα χαμηλότερες τέμνουσες βάσης. Αυτό οφείλεται στις περιορισμένες ροπές κάμψης που η κατασκευή με συσκευές τριβής μπορεί να μεταδώσει στα υποστυλώματα. Αντίθετα, αυτή η τάση δεν μπορεί να παρατηρηθεί αναφορικά με τις μέγιστες μετατοπίσεις ορόφου.

Πίνακας 6.9: Σύγκριση μεταξύ πειραμάτων σε όρους μετατοπίσεων ορόφου και τέμνουσας βάσης

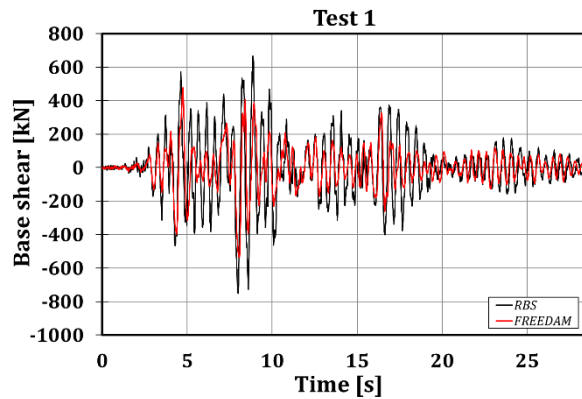
		Μετακινήσεις (mm)				Τέμνουσα βάσης (kN)	
		Pull		Push		Pull	Push
		Level 1	Level 2	Level 1	Level 2		
Imperial Valley	RBS	-79	-150	44	88	-751.33	667.09
	FREEDAM	-73	-104	65	103	-536.88	477.20
Spitak	RBS	-17	-34	85	171	-652.47	670.44
	FREEDAM	-53	-84	79	112	-446.98	469.73
Artificial	RBS	-29	-66	40	83	-444.42	555.15
	FREEDAM	-41	-75	38	52	-271.62	346.79
Santa Barbara	RBS	-48	-99	41	85	-585.66	592.36
	FREEDAM	-56	-89	52	70	-388.06	483.42
Coalinga	RBS	-47	-94	62	129	-629.71	612.24
	FREEDAM	-72	-112	61	85	-439.24	459.37

Άλλωστε, οι συνδέσεις FREEDAM επαναφέρουν τη συμπεριφορά της κατασκευής στην ελαστική περιοχή μεταξύ δύο διαδοχικών μέγιστων της χρονοϊστορίας : αυτός είναι ο λόγος για το μειωμένο εύρος μετατόπισης που παρατηρήθηκε στο δεύτερο σύνολο πειραμάτων. Αυτό το φαινόμενο έχει γενική ισχύ για όλες τις δοκιμές. Στο Σχήμα 6.32 φαίνεται για τις

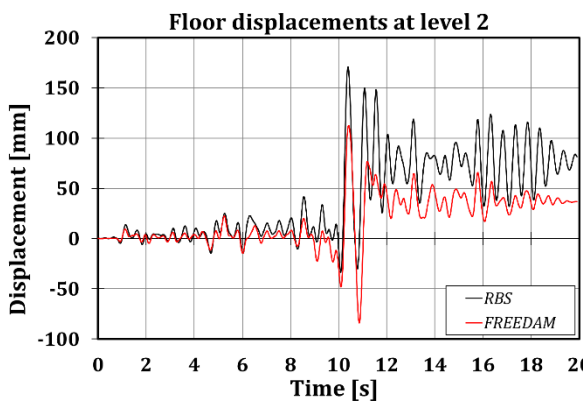
δοκιμές 1, 2 και 5. Επιπλέον, από τα σχήματα φαίνεται ότι οι συσκευές τριβής δεν εγγυώνται την επαναφορά της κατασκευής στην αρχική θέση.



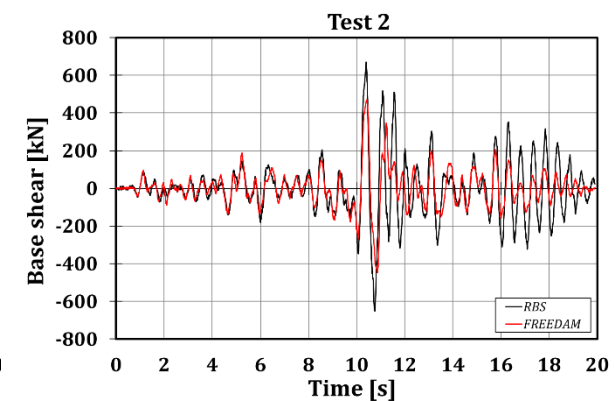
a) Δοκιμή 1: μετατοπίσεις ορόφου δεύτερου επιπέδου



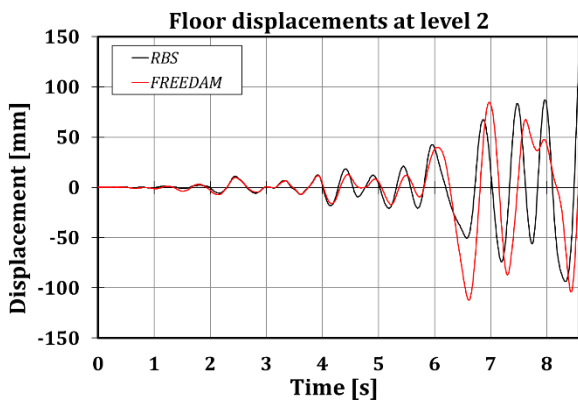
b) Δοκιμή 1: τέμνουσα βάσης



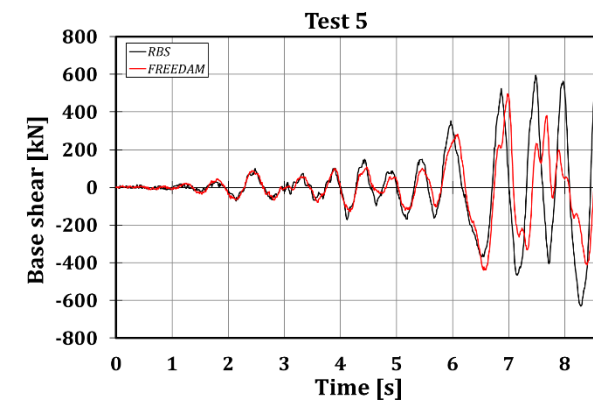
c) Δοκιμή 2: μετατοπίσεις ορόφου δεύτερου επιπέδου



d) Δοκιμή 2: τέμνουσα βάσης



e) Δοκιμή 5: μετατοπίσεις ορόφου δεύτερου επιπέδου



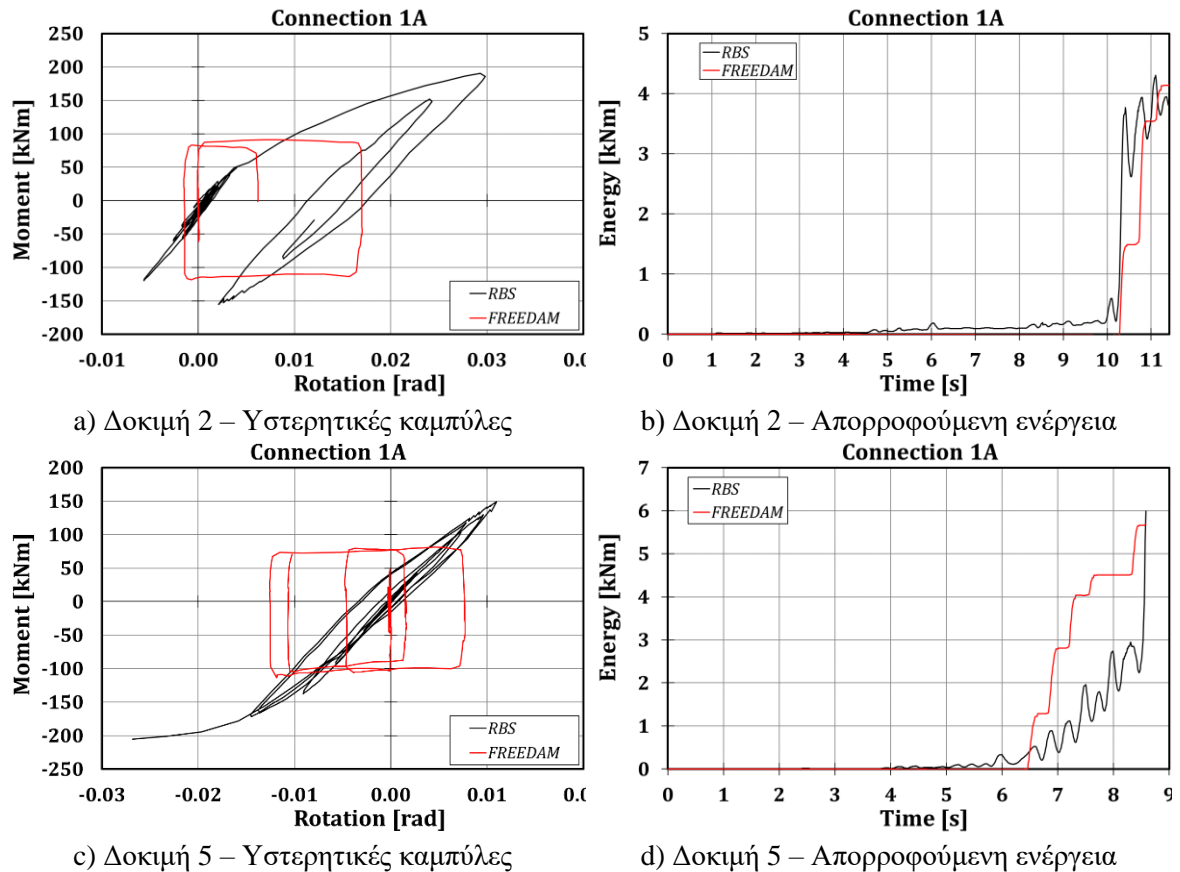
f) Δοκιμή 5: τέμνουσα βάσης

Σχήμα 6.32 : Σύγκριση μεταξύ μετατοπίσεων ορόφου δεύτερου επιπέδου και τεμνουσών βάσης

Για λόγους απλότητας, η τοπική δομική συμπεριφορά που παρουσιάζουν οι αναλυθείσες συνδέσεις αναφέρεται στην πιο αξιοποιούμενη σύνδεση για την οποία δεν έχουν προκύψει τεχνικά θέματα. Επιλέγεται η σύνδεση 1Α και η σύγκριση γίνεται με τους σεισμούς Spitak και Coalinga με μέγιστη επιτάχυνση εδάφους (PGA) ίση με 0.8g. Τα συμπεράσματα για αυτήν τη σύνδεση και την σεισμική κίνηση εισόδου είναι ανάλογες για όλες τις άλλες. Στο Σχήμα 6.33 παρατηρείται ότι η σύνδεση RBS καλείται να αντέξει μια υψηλότερη ροπή

κάμψης και να διατηρήσει μια υψηλότερη αντοχή σε στροφή: περίπου 240 kNm σε σύγκριση με 120 kNm, και περίπου 0.027 rad σε σύγκριση με 0.013 rad, αντίστοιχα. Ωστόσο, μπορεί να αποδειχθεί ότι οι δύο συνδέσεις που συγκρίνονται απορροφούν την ίδια ενέργεια. Αυτό οφείλεται στον βέλτιστο τρόπο που συμπεριφέρεται η σύνδεση FREEDAM, επιτρέποντας ταυτόχρονα, την επιβολή τάσεων στη κατασκευή σε χαμηλά επίπεδα και να καταστήσει τη κατασκευή πιο άκαμπτη, χωρίς να εμποδίζει τη δυνατότητα απορρόφησης μεγάλης ποσότητας ενέργειας.

Τα προηγούμενα σχόλια ισχύουν για συνδέσεις που βρίσκονται στον πρώτο όροφο, ενώ αυτές που βρίσκονται στο δεύτερο επίπεδο, επιδεικνύουν κυρίως ελαστική συμπεριφορά και, για το λόγο αυτό, δεν αναφέρονται εδώ.



Σχήμα 6.33 : Σύνδεση 1A: καμπύλες υστέρησης και απορροφούμενη ενέργεια

6.9 Βιβλιογραφία

- [1] Magonette, G., Pegon, P., Buchet, P., Advanced Testing Techniques at the ELSA-JRC Reaction Wall (1998).
- [2] Molina, F. J., Buchet, Ph., Magonette, G. E., Negro, P., Bidirectional pseudodynamic technique for testing a three-storey reinforced concrete building (2004) Proc. Of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper N., 75.

- [3] Tsai, K., Weng, Y., Lin S. L., Pseudo-dynamic test of a full-scale CFT/BRB frame (2004) 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper No. 750.
- [4] CEN (2005) EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, CEN, European Committee for Standardization, 2005.
- [5] CEN (2005) EN 1998-3: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings, CEN, European Committee for Standardization, 2005.
- [6] Di Benedetto, S., Francavilla, A.B., Latour, M., Ferrante Cavallaro, G., Piluso, V., Rizzano, G. Pseudo-dynamic testing of a full-scale two-storey steel building with RBS connections (2020) *Engineering Structures*, 212.
- [7] CEN [2005]: EN 1993-1-8 Eurocode 3: Design of Steel Structures. Part 1-8: Design of Joints, CEN, European Committee for Standardization, 2005.
- [8] AISC Steel Design Guide, Murray, T. M., Summer, E. A., *Extended End-Plate Moment Connections. Seismic and Wind Applications*, 2003.
- [9] Meng, R. L., *Design of moment end-plate connections for seismic loading* (1996) Ph. D. Thesis, College of Architecture and Urban Studies, The Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- [10] Francavilla, A.B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano, G., Design criteria for beam-to-column connections equipped with friction devices, *Journal of Constructional Steel Research*, 172 (2020) 106240.
- [11] SeismoSoft (2016). *SeismoStruct 2016 – A computer program for static and dynamic analysis of framed structures*.
- [12] Iannone, F., Latour, M., Piluso, V. and Rizzano, G., *Experimental Analysis of Bolted Steel Beam-to-Column Connections: Component Identification* (2011) *J. Earthq. Eng.*, vol. 15, no. 2, pp. 214–244.
- [13] Sivaselvan, M. V., Reinhorn, *HYSTERETIC MODELS FOR DETERIORATING INELASTIC STRUCTURES* (2000) *J. Eng. Mech.*, vol. 126, no. June, pp. 633–640.
- [14] Chisari, C., Francavilla, A. B., Latour, M., Piluso, V., Rizzano G., Amadio, C., *Critical issues in parameter calibration of cyclic models for steel members* (2017) *Engineering Structures*, vol. 132, pp. 123-138
- [15] McKenna, F., *OpenSees: A Framework for Earthquake Engineering Simulation*, *Computing in Science and Engineering* (2011) 13, 58-66.