

Διερεύνηση σεισμικής απόκρισης ασύμμετρων μεταλλικών κατασκευών εξοπλισμένων με το σύστημα seesaw

Χριστίνα Ευαγγελίου

Διπλ. Πολιτικός Μηχανικός, Μεταπτ. Φοιτήτρια
ΣΜΑ/ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

std147860@ac.eap.gr

Γεώργιος Παπαγιαννόπουλος

Αναπληρωτής Καθηγητής ΣΘΕΤ ΕΑΠ

papagiannopoulos@eap.gr

Περίληψη – Στην παρούσα εργασία εξετάζεται και διερευνάται η σεισμική συμπεριφορά ασύμμετρων μεταλλικών κατασκευών εξοπλισμένων με το σύστημα seesaw (τραμπάλα). Συγκεκριμένα, διενεργούνται μη-γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας με χρήση πραγματικών επιταχυνσιογραφημάτων ιστορικών σεισμών σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες ασύμμετρες κατασκευές με δύο διαφορετικές διατάξεις του συστήματος προκειμένου να ελεγχθεί η αποδοτικότητά τους από πλευράς σεισμικής συμπεριφοράς.

Λέξεις-Κλειδιά: Σεισμική απόκριση, σύστημα seesaw, ασύμμετρες μεταλλικές κατασκευές, προεντεταμένα καλώδια, ιξώδεις αποσβεστήρες

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

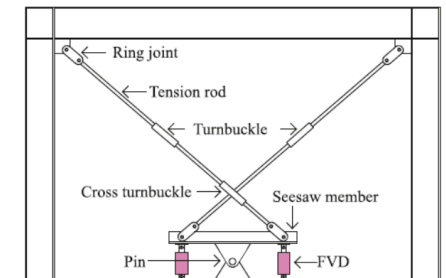
Τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα των Μηχανικών έχει επικεντρωθεί στην βελτίωση της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών, δεδομένου ότι ο σεισμός αποτελεί ένα ισχυρό δυναμικό φαινόμενο ικανό να προκαλέσει σημαντικές βλάβες σε αυτές έως και κατάρρευση τους.

Κατά την διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης εισάγεται στις κατασκευές μια σημαντική ποσότητα ενέργειας η οποία δύναται να απορροφηθεί από την κατασκευή. Για τον λόγο αυτό μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει η εισαγωγή συστημάτων ελέγχου ταλαντώσεων και διάχυσης ενέργειας στις κατασκευές, τα οποία στοχεύουν στην βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των κατασκευών με βασικό πλεονέκτημα την εύκολη επισκευή ή δυνατότητα αντικατάστασής τους. Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες συστημάτων ελέγχου της σεισμικής απόκρισης: τα ενεργητικά (active) και τα παθητικά (passive).

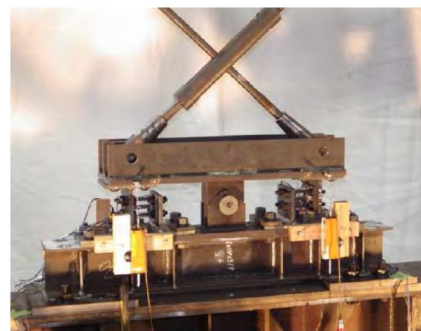
Τα ενεργητικά συστήματα ελέγχου ελέγχουν την μετακίνηση, την ταχύτητα και την επιτάχυνση της κατασκευής χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά μέσα υψηλής τεχνολογίας. Τα παθητικά συστήματα ελέγχου έχουν το πλεονέκτημα να χρησιμοποιούν υλικά τα οποία απορροφούν και αποσβένουν την σεισμική ενέργεια που εισέρχεται στην κατασκευή. Στα παθητικά συστήματα περιλαμβάνονται οι αποσβεστήρες, οι οποίοι μπορεί να είναι ιξώδεις, βισκοελαστικοί, τριβής, μεταλλικοί κ.α.

Μια διάταξη των αποσβεστήρων αποτελεί το seesaw system, στα ελληνικά «σύστημα τραμπάλας». Το σύστημα seesaw είναι μια τραμπάλα η οποία απαρτίζεται από μία οριζόντια και μία κατακόρυφη μεταλλική πλάκα

(έλασμα), οι οποίες συνδέονται μεταξύ τους με πείρο, από δύο διαγώνια τοποθετημένα προεντεταμένα καλώδια και δύο ιξώδεις αποσβεστήρες τοποθετημένους κατακόρυφα, τα άκρα των οποίων συνδέονται στο οριζόντιο μεταλλικό έλασμα. Το πλεονέκτημα αυτού του συστήματος είναι ότι τα καλώδια βρίσκονται συνεχώς υπό εφελκυσμό και επομένως δεν τίθεται το θέμα λυγισμού τους (σε αντίθεση με τον κλασικό σύνδεσμο δυσκαμψίας των μεταλλικών κατασκευών). Η διάταξη του συστήματος seesaw παρουσιάζεται στο Σχήμα 1 και μια ρεαλιστική πειραματική διάταξη δείχνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 1. Διάταξη Συστήματος Seesaw



Σχήμα 2. Πειραματική Διάταξη Συστήματος Seesaw

Μέχρι σήμερα, το σύστημα seesaw έχει μελετηθεί σε μεταλλικές κατασκευές ενός ορόφου, σε επίπεδα πλαίσια μερικών ορόφων και τρισδιάστατες κατασκευές με συμμετρική κάτοψη (Katsimpini et al. 2018, 2020a, 2020b) ενώ οι διαθέσιμες πειραματικές έρευνες είναι λίγες (Kang and Tagawa 2014). Για το λόγο αυτό, η παρούσα εργασία επιδιώκει την διερεύνηση της επίδρασης του συστήματος seesaw στη σεισμική απόκριση μη-συμμετρικών μεταλλικών κατασκευών. Συγκεκριμένα, για

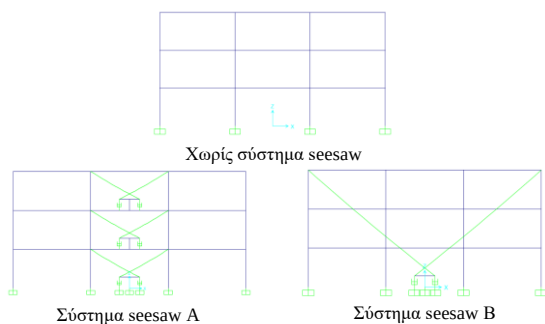
συγκεκριμένες μη-συμμετρικές μεταλλικές κατασκευές, θα εξεταστεί σε ποιους τύπους αστοχίας είναι ευαίσθητο το σύστημα seesaw και ποιες διατάξεις του συστήματος είναι ευνοϊκότερες από πλευράς σεισμικής συμπεριφοράς.

II. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

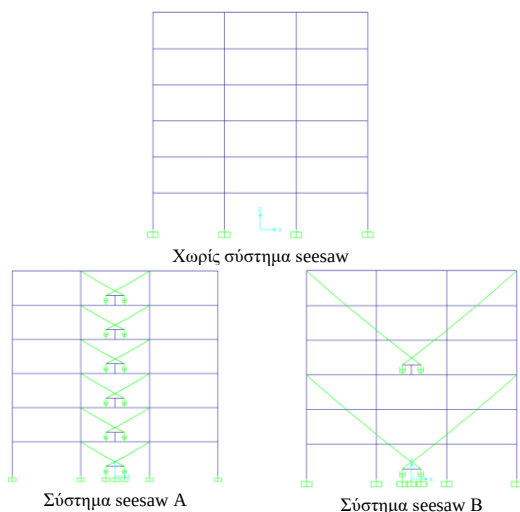
Σε όλες τις υπό μελέτη κατασκευές που ακολουθούν πραγματοποιούνται αναλύσεις με και χωρίς το σύστημα seesaw, έτσι ώστε να αναδειχθεί η αναγκαιότητά του. Στη συνέχεια εφαρμόζονται δύο διαφορετικές διατάξεις του συστήματος seesaw (Α και Β) ως προς τα σημεία αγκύρωσής τους στις δοκούς και εκτελούνται φασματικές αναλύσεις και μη-γραμμικές σεισμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, κάνοντας χρήση του λογισμικού SAP2000 (<https://www.csiamerica.com/products/sap2000>).

A. Περιγραφή Γεωμετρίας των υπό Μελέτη Κατασκευών

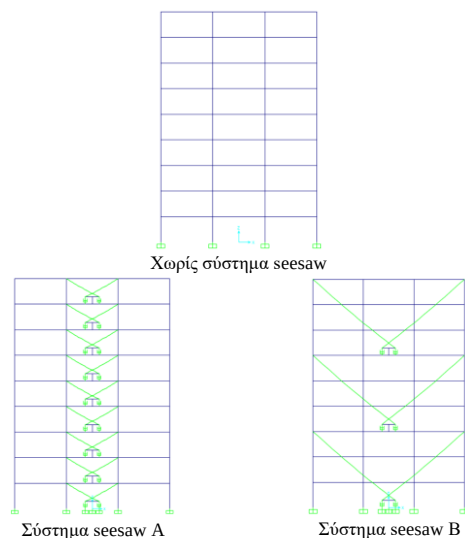
Αρχικά, πραγματοποιούνται αναλύσεις για διδιάστατα (επίπεδα) συμμετρικά πλαίσια με 3, 6 και 9 ορόφους (Σχ. 3-5) προκειμένου να δοθεί μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς του συστήματος. Στην συνέχεια, γίνονται αναλύσεις σε διδιάστατα πλαίσια με 6 και 9 ορόφους (Σχ. 6 & 7) τα οποία φέρουν εσοχές καθ' ύψος με στόχο να προσεγγιστεί η μη-συμμετρία του φορέα σε απλά πλαίσια. Έπειτα, αναλύονται τριδιάστατες μη-συμμετρικές κατασκευές 5 ορόφων με εσοχές καθ' ύψος (Σχ. 8) και με μη-συμμετρική κάτοψη (Σχ. 9). Όλα τα ανοίγματα έχουν μήκος 6.0m και το ύψος κάθε ορόφου είναι 3.0m.



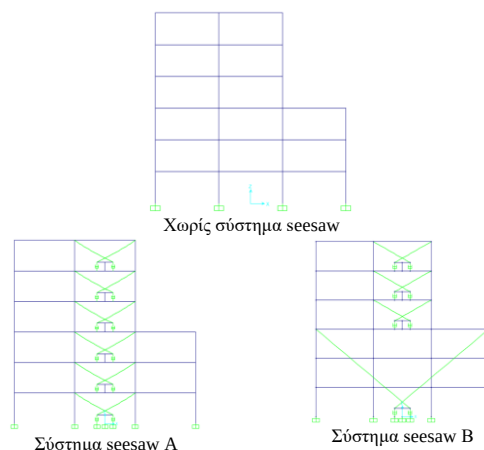
Σχήμα 3. Επίπεδο πλαίσιο 3ων ορόφων



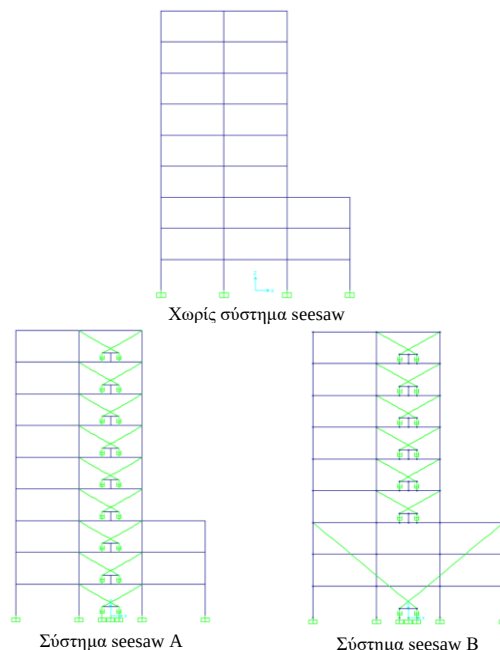
Σχήμα 4. Επίπεδο πλαίσιο 6 ορόφων



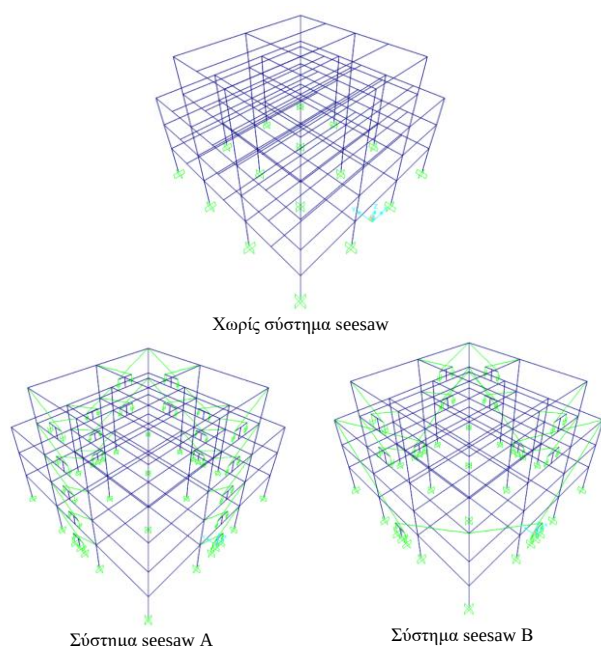
Σχήμα 5. Επίπεδο πλαίσιο 9 ορόφων



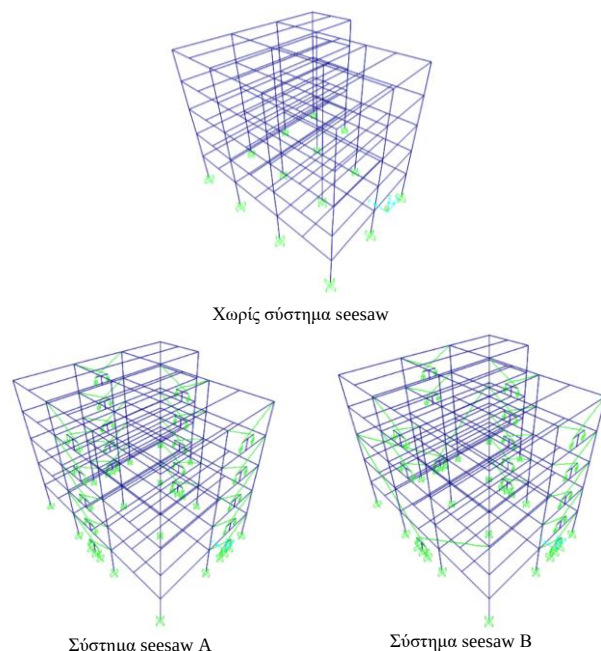
Σχήμα 6. Επίπεδο πλαίσιο 6 ορόφων με εσοχές



Σχήμα 7. Επίπεδο πλαίσιο 9 ορόφων με εσοχές



Σχήμα 8. κατασκευή 5 ορόφων με εσοχές



Σχήμα 9. Τριδιάστατη κατασκευή 5 ορόφων με μη-συμμετρική κάτοψη

Οι συνδέσεις δοκού-υποστυλώματος καθώς και οι εδράσεις των υποστυλωμάτων είναι συνδέσεις ροπής. Τα κατακόρυφα μεταλλικά ελάσματα σχεδιάζονται στην βάση τους ως αρθρωτά (σύνδεση πείρου). Επιπλέον, γίνεται η θεώρηση ότι η κατασκευή αποτελείται από σύμικτες πλάκες και λήφθηκε υπόψη η διαφραγματική λειτουργία τους σε κάθε όροφο. Για την προσομοίωση των δοκών και υποστυλωμάτων χρησιμοποιούνται γραμμικά μέλη, τα οποία διαστασιολογούνται μέσω φασματικής ανάλυσης σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 3 (Eurocode 3 2009a) και 8 (Eurocode 8 2009). Για τα υποστυλώματα και τις δοκούς, λαμβάνεται ποιότητα χάλυβα S275.

Β. Καλώδια, Αποσβεστήρες και Μεταλλικά Ελάσματα

Τα καλώδια είναι εφελκόμενα μέλη τα οποία παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της φόρτισής τους

μέσω της παραμόρφωσής τους. Η προσομοίωση των καλωδίων πραγματοποιείται με στοιχεία καλωδίου (cable elements), στα οποία λαμβάνεται υπόψη προέκταση περίπου 5-10% της εφελκυστικής αντοχής τους όπως αυτή παρέχεται από τον κατασκευαστή τους. Επιπλέον, για τα χαλύβδινα καλώδια λαμβάνεται εφελκυστική αντοχή 1960 MPa και μέτρο ελαστικότητας 100GPa. Ο σχεδιασμός και η διαστασιολόγηση των καλωδίων γίνεται σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 3, μέρος 1-11 (Eurocode 3 2009b). Ανάλογα με την υποδοχή στα άκρα σύνδεσης και τον τύπο αγκύρωσης του καλωδίου, γίνεται απομείωση έως και 20% στη μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει το καλώδιο.

Στον Πίνακα I (Katsimpini 2016, 2020) παρατίθενται τα χαρακτηριστικά των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν στις αναλύσεις της παρούσας εργασίας, για καλώδια με διάμετρο μικρότερη ή ίση με 52mm, ενώ στον Πίνακα II (Round Strand Wire Rope, <http://www.aulone.com>) για καλώδια με διάμετρο μεγαλύτερη των 52mm.

ΠΙΝΑΚΑΣ I

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΓΙΑ D<52MM

Rope Diameter		Minimum Breaking Strength		Safe Load	
(in)	(mm)	(lbf)	(kN)	(lbf)	(kN)
1/4	6.4	5480	24.4	1100	4.89
5/16	8	8520	37.9	1700	7.56
3/8	9.5	12200	54.3	2440	10.9
7/16	11.5	16540	73.6	3310	14.7
1/2	13	21400	95.2	4280	19.0
9/16	14.5	27000	120	5400	24.0
5/8	16	33400	149	6680	29.7
3/4	19	47600	212	9520	42.3
7/8	22	64400	286	12900	57.4
1	26	83600	372	16700	74.3
1 1/8	29	105200	468	21000	93.4
1 1/4	32	129200	575	25800	115
1 3/8	35	155400	691	31100	138
1 1/2	38	184000	818	36800	164
1 5/8	42	214000	952	42800	190
1 3/4	45	248000	1100	49600	221
1 7/8	48	282000	1250	56400	251
2	52	320000	1420	64000	285

ΠΙΝΑΚΑΣ II

ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΗ ΔΥΝΑΜΗ ΚΑΛΩΔΙΩΝ ΓΙΑ D>52MM

Rope Nominal Diameter (mm)	Approx. Nominal Weight (kg/100m)	Nominal Metal cross sectional area (mm ²)	Nominal Tensile Strength MPa		
			1570	1670	1770
50	1200	1450	2090	2129	2250
51	1250	1510	2090	2215	2350
52	1300	1570	2170	2303	2440
54	1400	1690	2340	2484	2640
56	1510	1820	2510	2671	2840
57	1570	1890	2610	2787	2940
58	1620	1950	2700	2865	3040
60	1730	2090	2890	3066	3250
62	1850	2230	3080	3274	3480
64	1970	2380	3280	3489	3700
65	2100	2530	3490	3710	3940
67	2160	2610	3600	3823	4060
68	2230	2680	3710	3938	4180
70	2360	2840	3930	4173	4430

Η προσομοίωση των ιξωδών αποσβεστήρων γίνεται με χρήση του στοιχείου link element του SAP 2000. Για τα διδιάστατα μοντέλα λαμβάνονται αποσβεστήρες με συνελεστική απόσβεσης $c=250$ kNsec/m, ενώ για τα τριδιάστατα μοντέλα λαμβάνεται $c=500$ kNsec/m. Τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στον Πίνακα III (από Taylor Devices, <https://www.taylordevices.com>).

ΠΙΝΑΚΑΣ III

ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΙΞΩΔΩΝ ΑΠΟΣΒΕΣΤΗΡΩΝ (TAYLOR DEVICES)

FORCE (kN)	TAYLOR DEVICES MODEL NUMBER	MID-STROKE LENGTH (mm) CLEVIS-BASE*	MID-STROKE LENGTH (mm) CLEVIS-CLEVIS*	STROKE (mm)	MAXIMUM CYLINDER DIAMETER (mm)
250	17120	787	867	±75	114
500	17130	997	1067	±100	146

Τα μεταλλικά ελάσματα της τραμπάλας, όπου συνδέονται τα καλώδια και οι αποσβεστήρες, εξιδανικεύονται ως άκαμπτα μέλη (rigid elements). Το ύψος των κατακόρυφων ελασμάτων επιλέγεται ανάλογα

με τον τύπο του αποσβεστήρα και συγκεκριμένα το mid-stroke length clevis. Το πλάτος της τραμπάλας λήφθηκε 1600mm. Το πάχος των ελασμάτων μπορεί να υπολογιστεί λαμβάνοντας υπόψη τα εντατικά μεγέθη τους και μέσω κατάλληλων μεταλλικών νευρώσεων μπορεί να μειωθεί δραστικά.

C. Φορτία και Ιδιομορφική Φασματική Ανάλυση

Το μόνιμο φορτίο και το κινητό φορτίο θεωρούνται 5.0kN/m² και 2.0kN/m² αντίστοιχα, ομοιόμορφα στους ορόφους, τα οποία αναλύονται καταλλήλως στις δοκούς ως γραμμικά φορτία.

Για την ιδιομορφική φασματική ανάλυση θεωρήθηκε Ζώνη Σεισμικής Επικινδυνότητας II με επιτάχυνση εδάφους $a_g=0.24g$, Κατηγορία Σπουδαιότητας Σ2 ($\gamma_i=1.00$) και Κατηγορία Εδάφους B ($S=1.20$). Επιπλέον, επιλέχθηκε συντελεστής συμπεριφοράς των υπό εξέταση κατασκευών $q=4.0$.

D. Μη Γραμμική Ανάλυση Χρονοϊστορίας

Για τα μέλη δοκών και υποστυλωμάτων θεωρείται ελαστοπλαστική συμπεριφορά με κράτυνση. Επίσης, για τους ιξώδεις αποσβεστήρες, θα πρέπει να ισχύει η σχέση $c/k \leq \Delta t \cdot 10^{-2}$, όπου c είναι ο συντελεστής απόσβεσης, k η δυσκαμψία του αποσβεστήρα και Δt το χρονικό βήμα του επιταχυνσιογραφήματος με σκοπό να εξασφαλίζεται ότι οι αποσβεστήρες δεν θα έχουν δυσκαμψία. Επιπλέον, ο εκθετικός συντελεστής απόσβεσης θεωρείται ίσος με τη μονάδα (γραμμικός αποσβεστήρας) και ο εγγενής λόγος απόσβεσης όλων των κατασκευών ίσος με 3%. Τα βασικά χαρακτηριστικά των επιταχυνσιογραφημάτων (σεισμικών κινήσεων) που χρησιμοποιήθηκαν για τις αναλύσεις φαίνονται στον Πίνακα IV.

ΠΙΝΑΚΑΣ IV
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΕΠΙΤΑΧΥΝΣΙΟΓΡΑΦΗΜΑΤΩΝ

Σεισμός Χώρα	Σύμβολο	Mw	Έδαφος
Loma Prieta, U.S.A.	LOS GATOS	7.0	HR
Bam, Iran	BAMIRAN	6.5	SL
Cape Mendocino, U.S.A	PETROLIA	6.9	SR

III.ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Ως δείκτες σεισμικής απόκρισης για κάθε περίπτωση εξάγονται οι κατανομές των πλαστικών αρθρώσεων των μελών με βάση τα όρια σεισμικής επιτελεστικότητας, όπου IO, LS, CP είναι τα επίπεδα «άμεσης χρήσης», «προστασίας ζωής» και «οικονομική κατάρρευσης» (ASCE 41-17, 2017). Επίσης, υπολογίζονται η σχετική μετακίνηση των ορόφων (IDR), η παραμένονσα σχετική μετακίνηση των ορόφων (RIDR) και η μέγιστη επιτάχυνση των πλακών (PFA), καθώς και οι δυνάμεις των καλωδίων και των αποσβεστήρων για τα τρία επιταχυνσιογραφήματα. Τέλος, παρουσιάζονται σε πίνακα τα μέγιστα εντατικά μεγέθη του οριζόντιου και του κατακόρυφου μεταλλικού ελάσματος της τραμπάλας.

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν τις υπό εξέταση ασύμμετρες κατασκευές ενδεικτικά.

A. Αποτελέσματα αναλύσεων επίπεδου πλαισίου 6 ορόφων με εσοχή καθ' ύψος

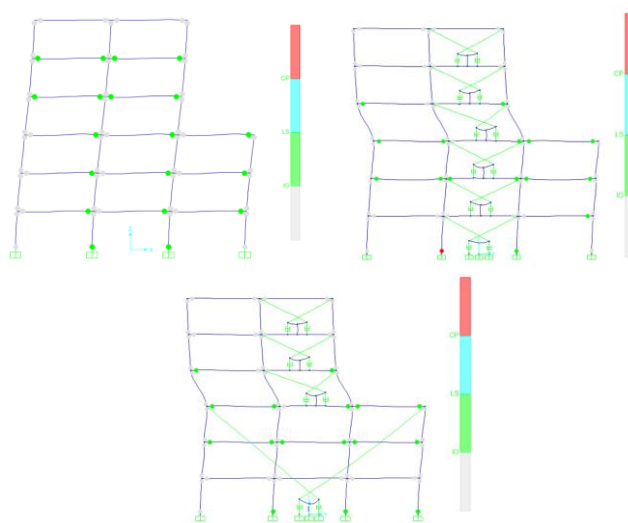
Το πλαίσιο 6 ορόφων αποτελείται από υποστυλώματα διατομής HEB360 και δοκούς διατομής IPE330. Οι

διάμετροι των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πλαίσιο δίνονται στον Πίνακα V.

ΠΙΝΑΚΑΣ V
ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

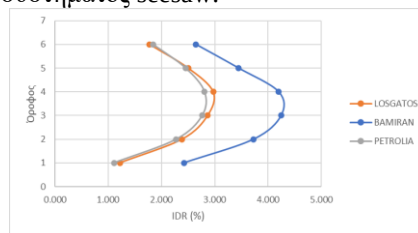
Διάμετρος καλωδίων d (mm)				
Σεισμός	Οροφος	Seesaw A	Οροφος	Seesaw B
LOSGATOS	1÷6	35	1	45
			2÷6	35
BAMIRAN	1÷2	66	1	60
	3÷6	38	2÷6	42
PETROLIA	1÷6	38	1÷6	38

Στο Σχ. 10 παρουσιάζονται για το εν λόγω πλαίσιο οι κατανομές των πλαστικών αρθρώσεων των μελών που προέκυψαν από τις μη-γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, για τη σεισμική κίνηση PETROLIA, χωρίς το σύστημα seesaw και με τις διατάξεις του συστήματος A και B.

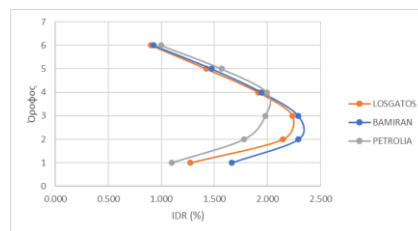


Σχήμα 10. Κατανομή πλαστικών αρθρώσεων – PETROLIA

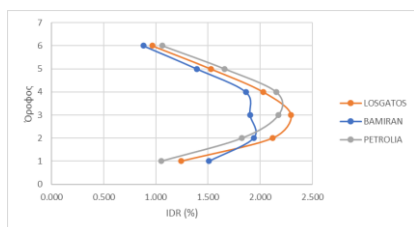
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι καθ' ύψος κατανομές των δεικτών IDR (Σχ. 11-13), RIDR (Σχ. 14-16) και PFA (Σχ. 17-19) που προέκυψαν από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα του Πίνακα IV, για το πλαίσιο χωρίς το σύστημα seesaw και για αυτό με τις διατάξεις A και B του συστήματος seesaw.



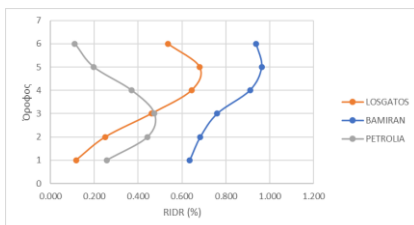
Σχήμα 11. Διάγραμμα IDR - Χωρίς σύστημα seesaw



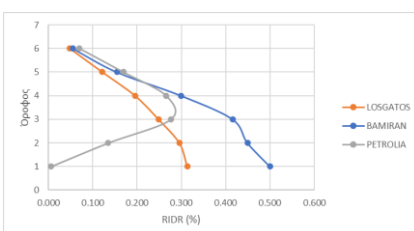
Σχήμα 12. Διάγραμμα IDR - Σύστημα seesaw A



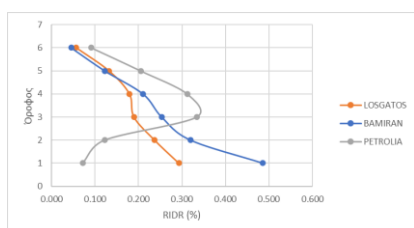
Σχήμα 13. Διάγραμμα IDR - Σύστημα seesaw B



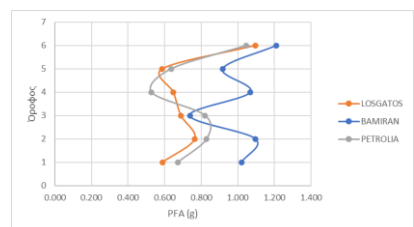
Σχήμα 14. Διάγραμμα RIDR - Χωρίς σύστημα seesaw



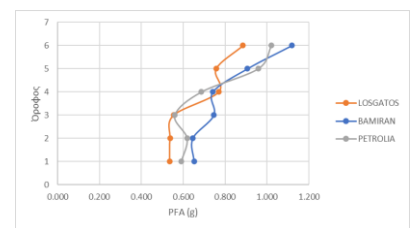
Σχήμα 15. Διάγραμμα RIDR - Σύστημα seesaw A



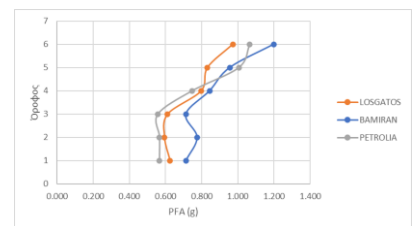
Σχήμα 16. Διάγραμμα RIDR - Σύστημα seesaw B



Σχήμα 17. Διάγραμμα PFA - Χωρίς σύστημα seesaw

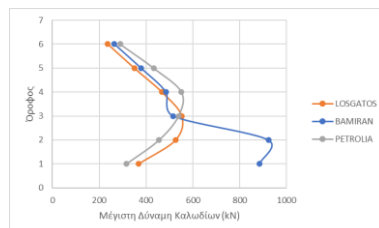


Σχήμα 18. Διάγραμμα PFA - Σύστημα seesaw A

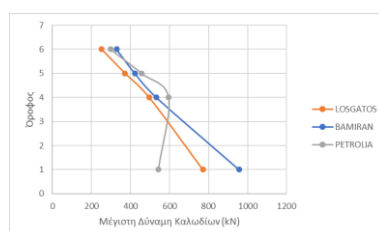


Σχήμα 19. Διάγραμμα PFA - Σύστημα seesaw B

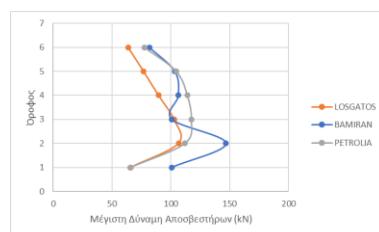
Στα ακόλουθα σχήματα δίνονται οι δυνάμεις των καλωδίων που προέκυψαν ανά όροφο από τα τρία επιταχυνσιογραφήματα για το πλαίσιο με τις διατάξεις A και B του συστήματος seesaw (Σχ. 20, 21) και οι αντίστοιχες δυνάμεις των αποσβεστήρων (Σχ. 22, 23).



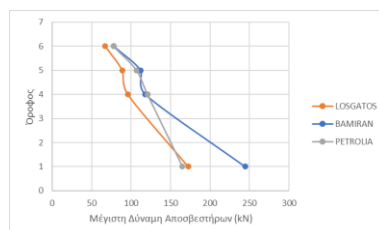
Σχήμα 20. Δυνάμεις καλωδίων ανά όροφο - Σύστημα seesaw A



Σχήμα 21. Δυνάμεις καλωδίων ανά όροφο - Σύστημα seesaw B



Σχήμα 22. Δυνάμεις αποσβεστήρων ανά όροφο - Σύστημα seesaw A



Σχήμα 23. Δυνάμεις αποσβεστήρων ανά όροφο - Σύστημα seesaw B

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι εμφανής η αναγκαιότητα της χρήσης του συστήματος seesaw. Συγκεκριμένα, για το πλαίσιο χωρίς το σύστημα seesaw παρατηρείται ότι εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις σε πολλά μέλη του και η παραμένουσα σχετική μετακίνηση (RIDR), με εξαίρεση τη σεισμική κίνηση PETROLIA, είναι μεγαλύτερη από 0.50% που είναι το επιτρεπτό όριο (Katsimpini 2016, 2020). Επιπλέον, εντοπίζονται υψηλές τιμές και για την σχετική μετακίνηση (IDR).

Κατά την εφαρμογή των διατάξεων A και B του συστήματος seesaw παρατηρείται μείωση των πλαστικών αρθρώσεων των μελών και αποφυγή αστοχίας μαλακού ορόφου. Η εμφάνιση πλαστικής άρθρωσης στη βάση των υποστυλωμάτων θεωρείται αποδεκτή ως προς τη θέση της, αλλά αν η στροφή της πλαστικής άρθρωσης ξεπεράσει το επίπεδο LS και φθάσει το επίπεδο CP, θα έχει συμβεί αστοχία της συγκόλλησης, των κοχλιών κλπ., και θα πρέπει να επανασχεδιαστεί το πλαίσιο με χρήση μεγαλύτερης διατομής σε ορισμένα υποστυλώματα. Επιπλέον, με χρήση του συστήματος seesaw παρατηρείται

μείωση της σχετικής μετακίνησης (IDR) και της παραμένουσας σχετικής μετακίνησης (RIDR) κάτω από το όριο του 0.50%. Για την μέγιστη επιτάχυνση των ορόφων (PFA) σημειώνεται κυρίως μείωση με λίγες εξαιρέσεις. Τα καλώδια και οι αποσβεστήρες δεν αστοχούν.

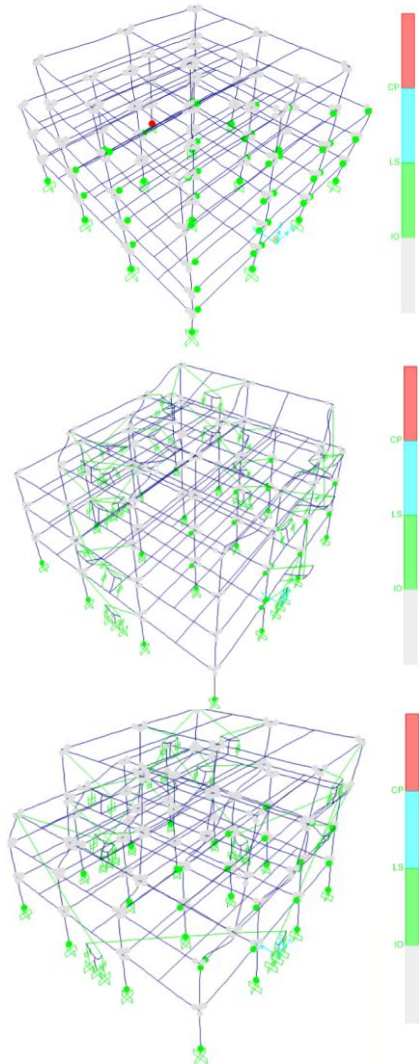
Β. Αποτελέσματα αναλύσεων τριδιάστατης κατασκευής 5 ορόφων με εσοχές καθ' ύψος

Τα υποστυλώματα των εξωτερικών πλαισίων είναι διατομής HEB400, ενώ των εσωτερικών HEM300 και όλες οι δοκοί είναι διατομής IPE360. Οι διαμέτροι των καλωδίων που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε πλαίσιο δίνονται στον Πίνακα VI.

ΠΙΝΑΚΑΣ VI
ΔΙΑΜΕΤΡΟΙ ΚΑΛΩΔΙΩΝ

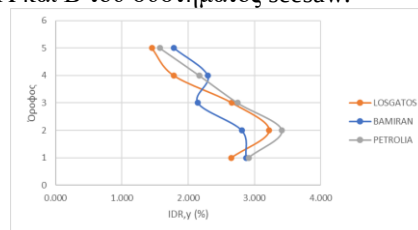
Σεισμός	Διάμετρος καλωδίων d (mm)		
	Ορόφος	Seesaw A	Seesaw B
LOGGATOS	1÷5	52	52
BAMIRAN	1÷5	52	52
PETROLIA	1÷5	52	52

Στο Σχ. 24 παρουσιάζονται οι κατανομές των πλαστικών αρθρώσεων των μελών της κατασκευής που προέκυψαν από τις μη-γραμμικές ανελαστικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, ενδεικτικά για τη σεισμική κίνηση LOGGATOS, χωρίς το σύστημα seesaw και με τις διατάξεις του συστήματος A και B.

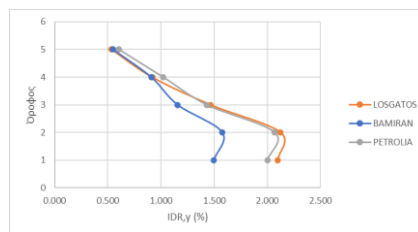


Σχήμα 24. Κατανομή πλαστικών αρθρώσεων – LOGGATOS

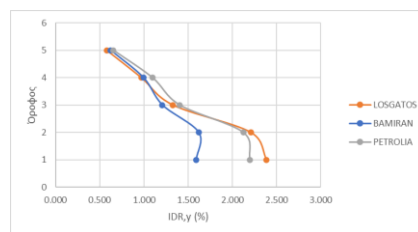
Στα επόμενα σχήματα παρουσιάζονται οι καθ' ύψος κατανομές των δεικτών IDR (Σχ. 25-27), RIDR (Σχ. 28-30) και PFA (Σχ. 31-33) στην διεύθυνση y, που προέκυψαν από τις τρεις σεισμικές κινήσεις του Πίνακα IV, για την κατασκευή χωρίς σύστημα seesaw και με τις διατάξεις A και B του συστήματος seesaw.



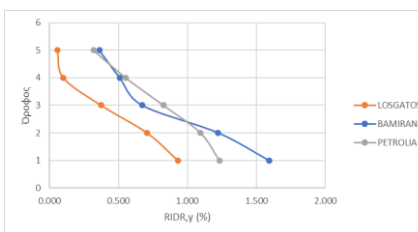
Σχήμα 25. Διάγραμμα IDR - Χωρίς σύστημα seesaw



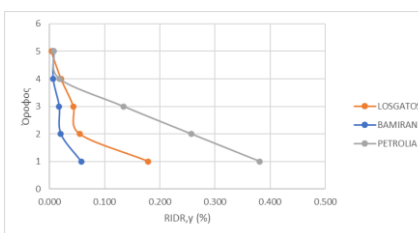
Σχήμα 26. Διάγραμμα IDR - Σύστημα seesaw A



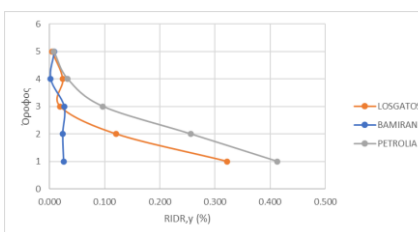
Σχήμα 27. Διάγραμμα IDR - Σύστημα seesaw B



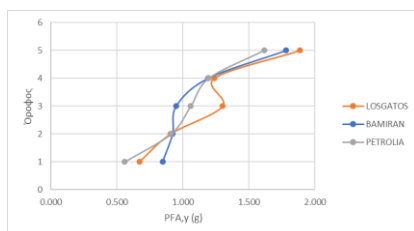
Σχήμα 28. Διάγραμμα RIDR - Χωρίς σύστημα seesaw



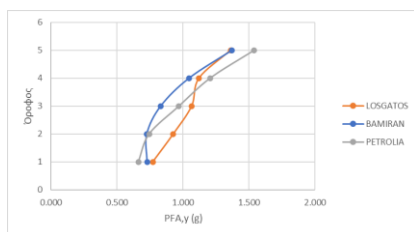
Σχήμα 29. Διάγραμμα RIDR - Σύστημα seesaw A



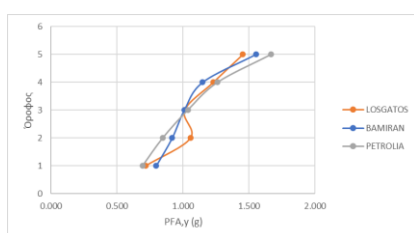
Σχήμα 30. Διάγραμμα RIDR - Σύστημα seesaw B



Σχήμα 31. Διάγραμμα PFA - Χωρίς σύστημα seesaw

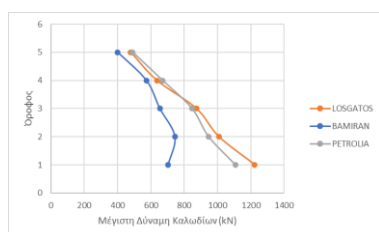


Σχήμα 32. Διάγραμμα PFA - Σύστημα seesaw A

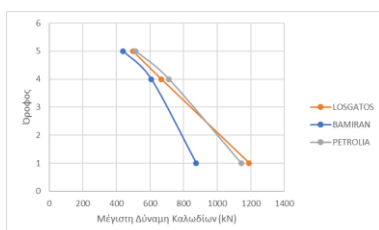


Σχήμα 33. Διάγραμμα PFA - Σύστημα seesaw B

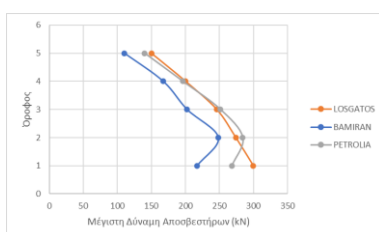
Στα ακόλουθα σχήματα δίνονται οι καθ' ύψος κατανομές των δυνάμεων των καλωδίων (Σχ. 34, 35) και των αποσβεστήρων (Σχ. 36, 37) που προέκυψαν από τις τρεις σεισμικές κινήσεις του Πίνακα IV, για την κατασκευή με τις διατάξεις A και B του συστήματος seesaw.



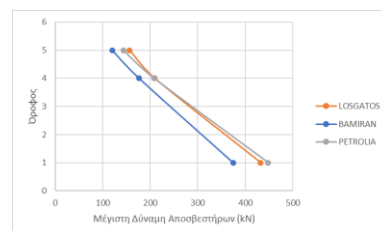
Σχήμα 34. Δυνάμεις καλωδίων ανά όροφο - Σύστημα seesaw A



Σχήμα 35. Δυνάμεις καλωδίων ανά όροφο - Σύστημα seesaw B



Σχήμα 36. Δυνάμεις αποσβεστήρων ανά όροφο - Σύστημα seesaw A



Σχήμα 37. Δυνάμεις αποσβεστήρων ανά όροφο - Σύστημα seesaw B

Από τα αποτελέσματα που προέκυψαν είναι εμφανής η αναγκαιότητα της χρήσης του συστήματος seesaw. Συγκεκριμένα, για την κατασκευή χωρίς το σύστημα seesaw παρατηρείται ότι εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις σε πολλά μέλη της και ότι η παραμένουσα σχετική μετακίνηση (RIDR) είναι μεγαλύτερη από το επιτρεπτό όριο 0.50%. Επιπλέον, εντοπίζονται υψηλές τιμές και για την σχετική μετακίνηση (IDR) κατά την y διεύθυνση.

Κατά την εφαρμογή των διατάξεων A και B του συστήματος seesaw στην κατασκευή παρατηρείται μείωση των πλαστικών αρθρώσεων των μελών της. Στα υποστυλώματα εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις στη βάση τους που, οι οποίες είναι αποδεκτές ως προς τη θέση τους, και δεν προκύπτει αστοχία μαλακού ορόφου. Επιπλέον, παρατηρείται μείωση της σχετικής μετακίνησης (IDR) και της παραμένουσας σχετικής μετακίνησης (RIDR) κάτω από το όριο 0.50%. Για την μέγιστη επιτάχυνση των ορόφων (PFA) σημειώνεται κυρίως μείωση με λίγες εξαιρέσεις. Τα καλώδια και οι αποσβεστήρες δεν αστοχούν.

IV. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ενός αριθμού συμμετρικών και ασύμμετρων επίπεδων μεταλλικών πλαισίων και τριδιάστατων ασύμμετρων μεταλλικών κατασκευών, εξοπλισμένων με το σύστημα seesaw (τραμπάλα), προέκυψαν σημαντικά συμπεράσματα για τη σεισμική συμπεριφορά τους και την αποδοτικότητα του συστήματος seesaw στις ασύμμετρες κατασκευές.

Μέσω των αναλύσεων χρονοϊστορίας που διενεργήθηκαν παρατηρήθηκε ότι σε πολλές περιπτώσεις οι κατασκευές υπόκεινται σε δύο μορφές αστοχίας. Η πρώτη αφορούσε στην αστοχία των καλωδίων, δηλαδή την υπέρβαση της αντοχής σχεδιασμού τους (κάτι που ωστόσο επιλύεται με την επαναδιαστασιολόγηση τους) και η δεύτερη στην υπέρβαση της ανώτατης επιτρεπόμενης τιμής 0.50% για την παραμένουσα σχετική μετακίνηση κάθε ορόφου (RIDR).

Βασικό συμπέρασμα, αποτελεί το γεγονός ότι η χρήση του συστήματος seesaw οδήγησε στη βελτίωση της σεισμικής συμπεριφοράς των υπό εξέταση κατασκευών, σε σχέση με αυτές που δεν διέθεταν το σύστημα seesaw. Χωρίς το σύστημα seesaw οι κατασκευές παρουσίαζαν μεγάλο αριθμό πλαστικών αρθρώσεων, η παραμένουσα σχετική μετακίνηση (RIDR) προέκυπε μεγαλύτερη από το επιτρεπτό όριο του 0.50%, ενώ υψηλές τιμές εντοπίζονταν και για την σχετική μετακίνηση (IDR).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιλογή μεγαλύτερης διαμέτρου των καλωδίων εξασφάλιζε γενικά καλύτερη σεισμική συμπεριφορά στις κατασκευές, ενώ σε πολλές περιπτώσεις παρατηρήθηκε ότι αυξάνοντας την διάμετρο των καλωδίων σε μεμονωμένους ορόφους που εμφανίζαν

μη αποδεκτές τιμές των μετακινήσεων, προέκυπταν καλύτερα αποτελέσματα από ότι όταν αυξάνονταν σε όλους τους ορόφους. Επίσης, με την αύξηση της διαμέτρου των καλωδίων παρατηρήθηκε αύξηση των εντατικών μεγεθών των μεταλλικών ελασμάτων του συστήματος seesaw.

Παρόλο που παρατηρήθηκε εμφάνιση πλαστικών αρθρώσεων στα φέροντα δομικά μέλη (δοκούς και υποστυλώματα) και με την χρήση των συστημάτων seesaw, δεν εντοπίστηκε σε καμία κατασκευή αστοχία μαλακού ορόφου. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι με την αύξηση των διατομών των υποστυλωμάτων στις κατασκευές που ήταν εξοπλισμένες με το σύστημα seesaw ελαχιστοποιούνταν σημαντικά τόσο ο αριθμός όσο και οι στροφές των πλαστικών αρθρώσεων. Αντίθετα, θεωρώντας την ίδια αύξηση των διατομών των υποστυλωμάτων στις κατασκευές που δεν διέθεταν το σύστημα seesaw, δεν παρατηρήθηκε μείωση των μετακινήσεων ώστε να ικανοποιούνται τα επιτρεπτά όρια.

Για τα περισσότερα επίπεδα πλαίσια μεταξύ των δύο διατάξεων Α και Β του συστήματος seesaw κρίθηκε πιο αποδοτικό το σύστημα Β. Για τις τριδιάστατες κατασκευές παρατηρήθηκε ότι και οι δύο διατάξεις Α και Β ήταν εξίσου αποδοτικές.

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το σύστημα seesaw αποτελεί αδιαμφισβήτητα ένα αποδοτικό σύστημα παραλαβής της σεισμικής δύναμης σε ασύμμετρες κατασκευές και δίνει την δυνατότητα στο μηχανικό να επιλέξει ένα διαφορετικό στατικό σύστημα παραλαβής των σεισμικών δυνάμεων αντί της συνήθους μεθόδου κατασκευής μεταλλικών κατασκευών με συνδέσμους δυσκαμψίας. Το γεγονός αυτό επιλύει ένα κρίσιμο πρόβλημα στον σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών που αφορά στον λυγισμό των κατακόρυφων συνδέσμων δυσκαμψίας, καθώς με την ύπαρξη καλωδίων το πρόβλημα αυτό δεν υφίσταται. Ταυτόχρονα, το σύστημα seesaw δείχνει να αποτελεί μια καλή αρχιτεκτονική λύση για τις μεταλλικές κατασκευές.

Τέλος, επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της παρούσας εργασίας μπορούν να αποτελέσουν σημαντικά και χρήσιμα εργαλεία για τον αντισεισμικό σχεδιασμό μεταλλικών κατασκευών εξοπλισμένων με το σύστημα seesaw. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζαν οι παρακάτω προτάσεις για περαιτέρω έρευνα τους συστήματος:

- Επανασχεδιασμός και επανεξέταση των ασύμμετρων κατασκευών με αλλαγή της δυσκαμψίας των αποσβεστήρων
- Διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης εφαρμόζοντας επιπλέον διατάξεις του συστήματος seesaw σε ασύμμετρες μεταλλικές κατασκευές με διαφορετικό πλήθος ορόφων
- Διερεύνηση της σεισμικής απόκρισης ασύμμετρων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα, σχεδιασμένων με παλαιότερους σεισμικούς κανονισμούς.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Katsimpini P, Askouni P, Papagianopoulos G, Karabalis D (2020a). Seismic drift response of seesaw-braced and bucking-restrained braced steel structures: A comparison study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 129, 105925.
- Katsimpini P, Papagianopoulos G, Sfakianakis M (2018). On the seismic response and damping capacity of low-rise plane steel

- frames with seesaw system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 107, 407–416.
- Katsimpini P, Papagianopoulos G, Askouni P, Karabalis D (2020b). Seismic response of low-rise 3-D steel structures equipped with the seesaw system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* Vol. 128, 105877.
- Kang JD, Tagawa H (2014). Experimental evaluation of dynamic characteristics of seesaw energy dissipation system for vibration control of structures. *Earthquake Engineering Structural Dynamics* Vol.43, 1889-1895.
- Katsimpini P (2016). *Seismic response of steel frames equipped with the seesaw system* (M.Sc. Thesis). Department of Civil Engineering, University of Patras, Greece
- Katsimpini P (2020). *Dynamic analysis of 3D steel structures equipped with the Seesaw system* (PhD Thesis). Department of Civil Engineering, University of Patras, Greece
- Eurocode 8 (2009). Design of structures for earthquake resistance – Part 1. Brussels: General rules, seismic actions and rules for buildings, CEN.
- Eurocode 3 (2009a). Design of steel structures – Part 1-1. Brussels: General rules and rules for buildings, CEN.
- Eurocode 3 (2009b). Design of steel structures – Part 1-11. Brussels: Design of structures with tension components, CEN.
- ASCE 41-17 (2017). Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. Virginia, U.S.A.: American Society of Civil Engineers
- Changsha Aulone Construction (<http://www.aulone.com>)
- SAP 2000 (<https://www.csiamerica.com/products/sap2000>)
- Taylor Devices (<https://www.taylordevices.com>)