

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΘΗΤΙΚΗΣ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΩΣ ΤΡΟΠΟΣ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΤΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ **ΕΡΓΑΣΙΑ Νο 29**

ΤΣΑΤΣΟΥ Δ. ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την παρουσίαση των σημαντικότερων διατάξεων συστημάτων απόσβεσης ενέργειας που χρησιμοποιούνται κυρίως σε κτίρια και γέφυρες των ΗΠΑ και της Ιαπωνίας. Οι αποσβεστικές συσκευές που εξετάζονται είναι αυτές που εξαρτώνται από την ταχύτητα και παρουσιάζουν ελαστική συμπεριφορά κατά τη διάρκεια μιας σεισμικής διέγερσης. Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των πιο συνηθισμένων διατάξεων diagonal και chevron brace με τις σχετικά καινούργιες προτάσεις διατάξεων toggle brace και scissor – jack. Η σύγκριση αυτή γίνεται σε επίπεδο αποτελεσματικότητας, εύρους χρήσης και οικονομίας. Τέλος παρουσιάζονται πειραματικές διατάξεις και αριθμητικά παραδείγματα που έχουν μελετηθεί και τα τελικά συμπεράσματα τα οποία εξάγονται από αυτά.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς, οι κατασκευές καλούνται να αναπτύσσουν ελαστοπλαστικό μηχανισμό που θα εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή κατανάλωση ενέργειας. Είναι γνωστό ότι μία κατασκευή αποσβένει μόνη της το 5% της ενέργειας που εισάγεται σε αυτήν από τη σεισμική διέγερση. Η αύξηση της ικανότητας αυτής είναι δυνατή αν χρησιμοποιηθούν συστήματα απόσβεσης σε κατάλληλες διατάξεις, και φτάνει μέχρι και ποσοστό 30% της κρίσιμης απόσβεσης. Η χρήση τέτοιων διατάξεων είναι σημαντική εκτός των νέων κατασκευών, στην ενίσχυση και επισκευή των υφιστάμενων κτιρίων, που αδυνατούν να ανταποκριθούν σε σεισμούς μεσαίας ή υψηλής σεισμικής διέγερσης.

Η σημαντική μείωση των σχετικών μετατοπίσεων των ορόφων που αποφέρει η χρήση των αποσβεστήρων, τους καθιστά ιδανική λύση ιδιαίτερα για την ενίσχυση κτιρίων που βρίσκονται κοντά στην εστία της σεισμικής διέγερσης. Παρά το υψηλό κόστος τους σε σχέση με άλλες μεθόδους ενίσχυσης, η χρήση τους σε κτίρια υψηλής επικινδυνότητας (νοσοκομεία, δημόσια κτήρια, πυρηνικά εργοστάσια) αποδεικνύει την αποτελεσματικότητά τους.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι σημαντικότερες διατάξεις συστημάτων απόσβεσης και συγκρίνονται ο τρόπος λειτουργίας τους και η αποτελεσματικότητά τους. Η περιορισμένη χρήση τους όμως σε σημαντικά έργα στη χώρα μας αλλά και η μηδενική τους σε ιδιωτικά, περιορίζει το εύρος των γνώσεών μας με αποτέλεσμα να είναι δύσκολη η εμπειρική επιβεβαίωση των συμπερασμάτων που προκύπτουν από την παρούσα εργασία.

1.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

Τα συστήματα απόσβεσης μπορούν να διαχωριστούν στις εξής κατηγορίες :

- α) **Μη εξαρτώμενα από την ταχύτητα – Υστερετικά** στα οποία ανήκουν οι αποσβεστήρες τριβής καθώς και εξαρτήματα που βασίζονται στη διαρροή των μετάλλων και
- β) **Εξαρτώμενα από την ταχύτητα** στα οποία ανήκουν αποσβεστήρες από ελαστοιξώδη στερεά υλικά, αποσβεστήρες που λειτουργούν με βάση την παραμόρφωση ελαστοιξωδών υγρών και αποσβεστήρες που λειτουργούν βάσει της δύναμης που αναπτύσσεται λόγω της πίεσης του νερού από στόμιο [1]. Εν προκειμένω παρουσιάζονται οι διατάξεις

αποσβεστήρων που ανήκουν στην δεύτερη κατηγορία και χαρακτηρίζονται από γραμμική συμπεριφορά.

1.3 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΠΟΣΒΕΣΗΣ ΕΞΑΡΤΩΜΕΝΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΧΥΤΗΤΑ

Με τη μέθοδο αυτή είναι δυνατό η κατασκευή να διατηρήσει την ελαστική συμπεριφορά της κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης και να αποφευχθούν έτσι οι ανεπιθύμητες μόνιμες παραμορφώσεις. Η προσθήκη των αποσβεστήρων δεν αλλάζει σημαντικά την φυσική περίοδο της κατασκευής. Αυξάνει όμως την απόσβεση από το αρχικό 5% της κρίσιμης σε περίπου 30% αυτής ή και περισσότερο [3]. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι πιθανές διατάξεις ιξωδών αποσβεστήρων για πλαισιωτή κατασκευή [1].

Diagonal		$f = \cos\theta$
Chevron		$f = 1.00$
Lower Toggle		$f = \frac{\sin\theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)}$
Upper Toggle		$f = \frac{\sin\theta_2}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} + \sin\theta_1$
Reverse Toggle		$f = \frac{\alpha \cos\theta_1}{\cos(\theta_1 + \theta_2)} - \cos\theta_2$
Scissor-Jack		$f = \frac{\cos\psi}{\tan\theta_2}$

Πίνακας 1: Διατάξεις αποσβεστήρων

Αν συμβολίσουμε με u την μετακίνηση του ορόφου, με u_D την μετακίνηση κατά μήκος του άξονα το αποσβεστήρα, με F τη δύναμη που ασκείται στο πλαίσιο και F_D τη δύναμη κατά μήκος του αποσβεστήρα, τότε ισχύει:

$$u_D = f u \quad (1)$$

$$F = f F_D \quad (2)$$

Η σημασία του μεγεθυντικού συντελεστή αποδεικνύεται καλύτερα στην περίπτωση γραμμικών ιξωδών αποσβεστήρων για τους οποίους ισχύει:

$$F_D = C_0 u_D^a \quad (3)$$

όπου u_D είναι η σχετική ταχύτητα ανάμεσα στα άκρα του αποσβεστήρα κατά μήκος του άξονά του και C_0 είναι ο συντελεστής απόσβεσης. Ο εκθέτης a παίρνει την τιμή 1 για γραμμικούς αποσβεστήρες και 0,5 για μη γραμμικούς. Το ποσοστό απόσβεσης κάτω από ελαστικές συνθήκες για πλαισιωτή κατασκευή βάρους W και θεμελιώδους περιόδου T είναι :

$$\beta = \frac{C_0 f^2 g T}{4\pi W} \quad (4)$$

Βάσει των εξισώσεων (1), (2), και (3) προκύπτει το συμπέρασμα πως ο ενισχυτικός συντελεστής f είναι ενδεικτικός της αποτελεσματικότητας του αποσβεστήρα. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συντελεστής f , τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό απόσβεσης β και κατά συνέπεια ο αποσβεστήρας καταναλώνει περισσότερη ενέργεια με αποτέλεσμα το υπόλοιπο δομικό σύστημα να δέχεται μικρότερες τέμνουσες λόγω σεισμού.

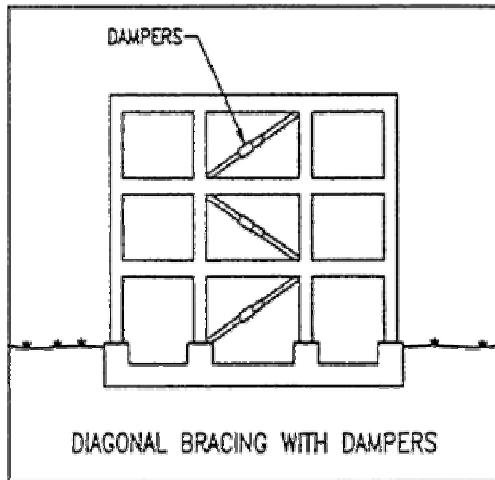
Στη συνέχεια γίνεται σύγκριση των καθιερωμένων *diagonal* (διαγώνιων) και *chevron* (τύπου V) διατάξεων των αποσβεστήρων με τις σχετικά καινούργιες διατάξεις *toggle brace* και *scissor – jack* (τύπου γρύλου – ψαλίδι).

2. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ DIAGONAL ΚΑΙ CHEVRON BRACE ΜΕ ΤΙΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ TOGGLE BRACE ΚΑΙ SCISSOR – JACK.

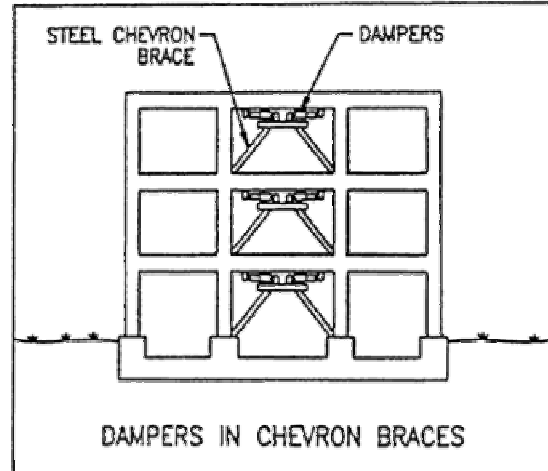
• Ως προς την αποσβεστική ικανότητα

Τα σχήματα 1 και 2 δίνουν μια εικόνα των διατάξεων ιξωδών αποσβεστήρων *diagonal* και *chevron brace* τα οποία έχουν ευρεία εφαρμογή σε κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος ενώ στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική διάταξη *toggle brace* στο Yerba Buena Tower και *scissor – jack* στον σεισμικό εξομοιωτή στο πανεπιστήμιο του Buffalo αντίστοιχα [1].

Οι συνηθισμένες διατάξεις *diagonal* και *chevron brace* χαρακτηρίζονται από περιορισμένη δυνατότητα απόσβεσης σε αντίθεση με τις διατάξεις *toggle brace* και *scissor – jack* όπου η αποσβεστική ικανότητα πολλαπλασιάζεται λόγω της κατάλληλης γεωμετρίας τους [6].



Σχήμα 1



Σχήμα 2



Σχήμα 3: Διάταξη *toggle brace* στο Yerba Buena Tower



Σχήμα 4: Ομοίωμα διάταξης *scissor – jack* στον σεισμικό εξομοιωτή στο πανεπιστήμιο του Buffalo

Από την εξίσωση 3 προκύπτει ότι η δύναμη που παράγεται από τον αποσβεστήρα είναι ανάλογη της σχετικής ταχύτητας ανάμεσα στα άκρα του. Κατά συνέπεια όσο μεγαλύτερη είναι η σχετική παραμόρφωση, τόσο μεγαλύτερη είναι η αποσβεστική δύναμη. Η επιρροή της γεωμετρίας των αποσβεστήρων στην ικανότητα απόσβεσης εκφράζεται μέσω του συντελεστή f για τον οποίο ο πίνακας 2 δίνει χαρακτηριστικές τιμές [1].

Είδος διάταξης	Συντελεστής f
Diagonal brace	0.799
Chevron brace	1.00
Lower toggle brace	2.662
Upper toggle brace	3.191
Reverse toggle brace	2.521
Scissor – jack	2.159

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικές τιμές του συντελεστή ενίσχυσης f

Στην περίπτωση των διατάξεων *toggle brace* και *scissor – jack* το f είναι μεγαλύτερο της μονάδας, το οποίο συνεπάγεται, από τη σχέση (1) ότι οι σχετικές μετακινήσεις του ορόφου u είναι μικρότερες από αυτές του αποσβεστήρα. Τιμές του μεγεθυντικού συντελεστή μεταξύ 2 και 3 μπορούμε να πάρουμε αλλάζοντας τις γωνίες θ_1 και θ_2 των βραχιόνων (πίνακας 1) [1]. Γίνεται έτσι αντιληπτό ότι για τις συγκεκριμένες διατάξεις η μεγαλύτερη αποσβεστική ικανότητα που επιτυγχάνεται τις καθιστά πιο αποτελεσματικές.

- **Ως προς το εύρος χρήσης**

Οι διατάξεις *toggle brace* και *scissor – jack* έχουν σχεδιαστεί κυρίως για δύσκαμπτες κατασκευές, συμπεριλαμβανομένων αυτών που περιέχουν τοιχία και άκαμπτα συστήματα αντηρίδων καθώς και για κατασκευές που δέχονται μεγάλα φορτία λόγω ανέμου. Τέτοιου είδους κατασκευές κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης έχουν μικρές σχετικές μετακινήσεις ορόφων [1],[4],[5],[7].

Αντίθετα οι αποσβεστήρες που εγκαθίστανται οριζόντια (*chevron brace*) ή διαγώνια (*diagonal brace*) είναι κατάλληλες για εύκαμπτες κατασκευές, και όπως αποδείχτηκε προηγουμένως δεν έχουν μεγάλη αποσβεστική ικανότητα [7]. Κατά συνέπεια χρησιμοποιώντας τις διατάξεις αυτές σε κατασκευές με υψηλή σεισμική καταπόνηση δεν έχουμε σημαντική ανακούφιση της κατασκευής από τα σεισμικά φορτία.

- **Ως προς την οικονομία**

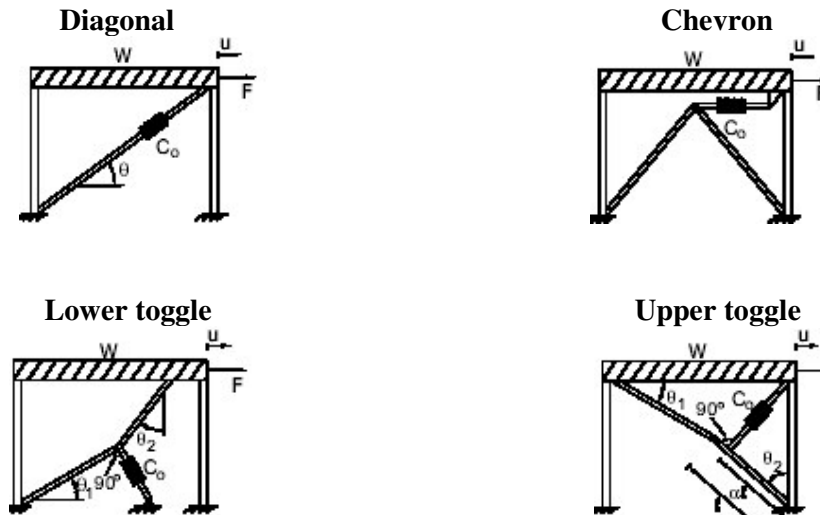
Λόγω της συμπεριφοράς των άκαμπτων κατασκευών και των κατασκευών που καταπονούνται από ισχυρά ανεμικά φορτία που αναφέρθηκε προηγουμένως, προκύπτει ότι στην περίπτωση που γίνεται χρήση *diagonal* και *chevron brace* διατάξεων, για να έχουμε ικανοποιητική αποσβεστική ικανότητα πρέπει οι αποσβεστήρες να έχουν μεγάλη διάμετρο. Αυτό συνεπάγεται μεγάλο κόστος. Οι δυνάμεις απόσβεσης που παράγονται με τις διατάξεις *toggle brace* και *scissor – jack* είναι μικρότερες, αλλά η γεωμετρική τους διάταξη είναι τέτοια που προκύπτει μεγάλος ενισχυτικός συντελεστής f . Κατά συνέπεια δίνουν πολύ καλή αποσβεστική ικανότητα με παράγωγή μικρότερης δύναμης πράγμα το οποίο τις καθιστά πιο οικονομικές και αποτελεσματικές ταυτόχρονα [1],[4],[5],[7].

- **Ως προς την εφαρμογή**

Οι διατάξεις *toggle brace* και *scissor – jack* είναι πιο περίπλοκες στην εφαρμογή τους, αφού απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή κατά την εγκατάστασή τους.

3. ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΠΛΑΙΣΙΟΥ ΣΤΟ ΟΠΟΙΟ ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΙ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ *DIAGONAL BRACE*, *CHEVRON BRACE*, *LOWER TOGGLE BRACE* ΚΑΙ *UPPER TOGGLE BRACE*.

Στο αριθμητικό παράδειγμα που ακολουθεί εξετάζεται μονώροφο πλαίσιο στο οποίο εφαρμόζονται οι διατάξεις *diagonal brace*, *chevron brace*, *lower toggle brace* και *upper toggle brace*. Η μάζα του ορόφου είναι $m = 14.58e^3$ kg, η ελαστική δυσκαμψία $k = 1.28e^6$ KN/m και η επιπρόσθετη απόσβεση είναι $2,27e^4$ KN/ms [6].



Όπως φαίνεται από τους πίνακες 3 και 4 με την *toggle brace* διάταξη τόσο οι μέγιστες παραμορφώσεις, όσο και οι μέγιστες ταχύτητες μειώνονται κατά ένα πολύ μεγαλύτερο ποσοστό σε σχέση με τις διατάξεις *diagonal* και *chevron brace*.

	Χωρίς απόσβεση	Diagonal	Chevron	Lower toggle	Upper toggle
Μέγιστη Παραμόρφωση	0,059	0,052	0,050	0,039	0,036
% Μείωση Παραμόρφωσης	-	12,71	15,42	34,75	39,66

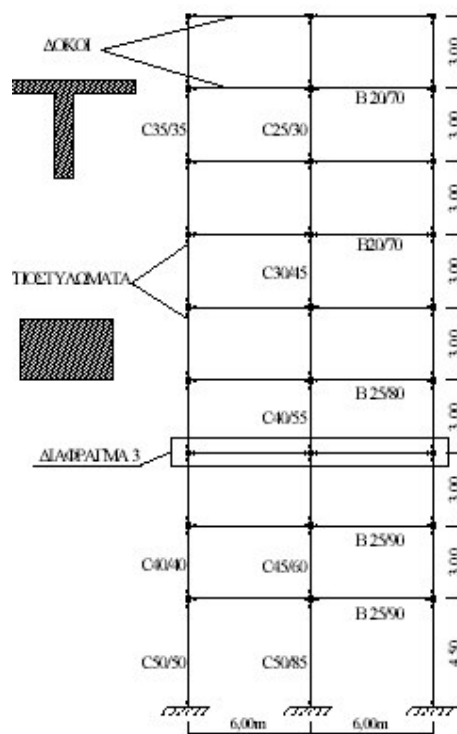
Πίνακας 3: Μειώσεις των μετακινήσεων

	Χωρίς απόσβεση	Diagonal	Chevron	Lower toggle	Upper toggle
Μέγιστη Ταχύτητα	0,602	0,535	0,520	0,419	0,395
% Μείωση Ταχύτητας	-	11,13	13,60	30,44	34,43

Πίνακας 4: Μειώσεις της ταχύτητας

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΦΟΡΕΑ ΠΟΥ ΕΝΙΣΧΥΕΤΑΙ ΜΕ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ *DIAGONAL BRACE* ΚΑΙ *SCISSOR – JACK*

Ο φορέας είναι ένα πλαισιακό σύστημα 9 ορόφων, που αποτελείται από οπλισμένο σκυρόδεμα και είναι σχεδιασμένος σύμφωνα με τους παλιούς Ελληνικούς Κανονισμούς (ΒΔ 1954,1959) (σχήμα 5). Η ανάλυση έγινε με το πρόγραμμα SAP2000 Nonlinear v.7.44 και ακολουθήθηκε η ανελαστική δυναμική ανάλυση με προσομοιώματα συγκεντρωμένης ανελαστικότητας, τύπου απλού μέλους. Στα άκρα κάθε μέλους τοποθετήθηκαν μη γραμμικά στροφικά ελατήρια που ενεργοποιούνταν κάθε φορά που το άκρο αυτό έφτανε τη ροπή διαρροής του. Τα επιταχυνσιογραφήματα που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά του πίνακα 4 και χρησιμοποιήθηκε σεισμικός συντελεστής $\varepsilon = 0,8$ [2].



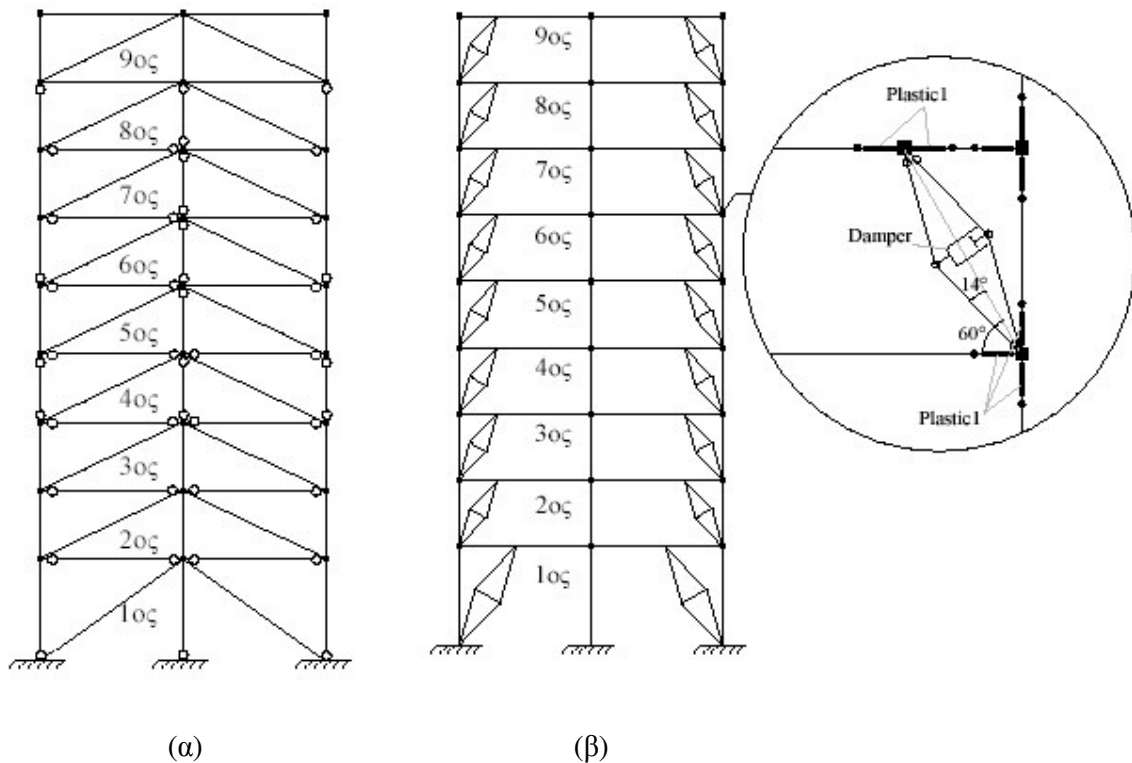
Σχήμα 5: Γεωμετρία φορέα

Σεισμός	Τόπος καταγραφής	Συνιστώσα	Μέγιστη Επιτάχυνση	Συντελεστής αναγωγής στο φάσμα για 0.16g
Imperial Valley California 18.5.1940	El Centro Site	S00E	0.35 g	0.59
Καλαμάτα Ελλάδα 13.9.86	Καλαμάτα (κέντρο)	N10W	0.27 g	0.79
Αλκυονίδες Ελλάδα 24.2.81	Κόρινθος (κέντρο)	N35E	0.24 g	0.70

Πίνακας 5: Χαρακτηριστικά επιταχυνσιογραφημάτων

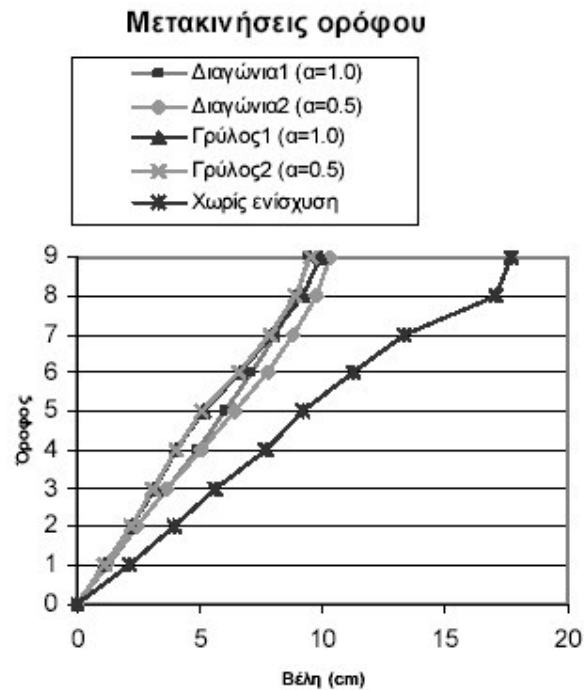
Θεωρώντας ότι το κτήριο βρίσκεται στη ζώνη επικινδυνότητας II ($A=0,16g$) η αποτίμηση του έγινε για το αντίστοιχο σε κάθε περίπτωση φάσμα καθώς και για το διπλάσιό του. Αυτό που παρατηρήθηκε από την ανάλυση του κτιρίου πριν την ενίσχυση, ήταν πως στους τελευταίους ορόφους ιδιαίτερα στον 6^ο, 7^ο και 8^ο είχαμε την εμφάνιση μηχανισμού κατάρρευσης υποστυλώματος τόσο για τον σεισμό El Centro 0.59, όσο και για τον διπλάσιό του El Centro 1.17.

Στο μοντέλο του ενισχυμένου φορέα που επρόκειτο να αναλυθεί χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές διατάξεις γραμμικών ($\alpha = 1$) και μη γραμμικών ($\alpha = 0,5$) ιξωδών αποσβεστήρων, η diagonal brace και η scissor-jack (σχήμα 6).



Σχήμα 6: Διατάξεις αποσβεστήρων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση του ενισχυμένου φορέα (α) diagonal brace και (β) scissor-jack

Το διάγραμμα 1 δείχνει την συμπεριφορά της κατασκευής (τις μετακινήσεις των ορόφων) πριν και μετά την ενίσχυση για τα δύο είδη διατάξεων των αποσβεστήρων τόσο για γραμμική όσο και για μη γραμμική συμπεριφορά αυτών.



Διάγραμμα 1: Μετακινήσεις του φορέα πριν και μετά την ενίσχυση

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης που αφορούν τις ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά της κάθε διάταξης:

Διάταξη ενίσχυσης :	Διαγώνιων		Γρύλου-ψαλίδι	
	Γραμμικοί	Μη γραμμικοί	Γραμμικοί	Μη γραμμικοί
Αποσβεστήρες:				
Συντελεστής ενίσχυσης f :	0.89	0.89	2.0	2.0
Εκθέτης απόσβεσης α :	1.0	0.5	1.0	0.5
Σταθερά απόσβεσης C [kN-s/m]:	1250	150	190	45
Μέγιστη δύναμη απόσβεσης [kN]:	104.3	56.4	29.4	21.4

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά τεσσάρων περιπτώσεων ενίσχυσης με αποσβεστήρες.

Από την ανάλυση που προηγήθηκε συμπεραίνουμε ότι οι δύο διαφορετικές διατάξεις αποσβεστήρων που χρησιμοποιήθηκαν, μπορεί να έχουν τα ίδια αποτελέσματα όσο αφορά στις μετακινήσεις της κατασκευής αλλά παρουσιάζουν ουσιαστικές διαφορές ως προς τη γεωμετρία, τα τεχνικά χαρακτηριστικά και κατά συνέπεια το κόστος. Από τον πίνακα 5 φαίνεται πως η διάταξη Scissor jack (γρύλου – ψαλίδι) έχει το ίδιο καλά αποτελέσματα αναπτύσσοντας μικρότερη αποσβεστική δύναμη λόγω του υψηλού συντελεστή ενίσχυσης f και κατά συνέπεια όντας οικονομικότερη.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία αναλύονται και συγκρίνονται οι σημαντικότερες διατάξεις αποσβεστικών εξαρτημάτων που εξαρτώνται από την ταχύτητα και χαρακτηρίζονται από ελαστική συμπεριφορά.

Η σύγκριση έγινε ανάμεσα στις κλασικές διατάξεις *diagonal brace* και *chevron brace* και στις διατάξεις *toggle brace* και *scissor – jack*. Η εφαρμογή των διατάξεων *toggle brace* και *scissor – jack* αποτελεί μια ικανοποιητική λύση, ιδιαίτερα σε περιπτώσεις άκαμπτων κατασκευών. Οι διατάξεις αυτού του είδους συνδυάζουν την μεγάλη ικανότητα απόσβεσης ενέργειας με την ανάπτυξη μικρών αποσβεστικών δυνάμεων, γεγονός το οποίο τις καθιστά όχι μόνο αποτελεσματικές αλλά και οικονομικές. Οι διατάξεις *diagonal* και *chevron brace* αποτελούν μία καλή λύση όσο αφορά στην χρήση τους σε εύκαμπτες κατασκευές καθώς και στον τρόπο εφαρμογής τους. Αντενδείκνυται όμως η χρήση τους στην περίπτωση άκαμπτων κατασκευών, αφού σε αυτήν την περίπτωση προκύπτουν αντιστοιχοοικονομικές και αναξιόπιστες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] **Constantinou M.C.** : Damping systems for new and retrofit construction , *fib* Symposium: Concrete Structures in Seismic Regions Athens 6-8 May 2003.

[2] **Κάππος Α.Ι – Δημητρακόπουλος Η.Γ.** : Εφαρμογή ιξωδών αποσβεστήρων στην ενίσχυση υφιστάμενων κτιρίων από σκυρόδεμα. 14^ο Συνέδριο σκυροδέματος Κως 15-17 Οκτωβρίου 2003.

[3] **Gregg Haskell** (Hawn Engineering Modesto, California), **David Lee** (West Coast Division Taylor Devices, Inc. Santa Monica, California) : Fluid Viscous Damping as an Alternative to Base Isolation. (Internet)

[4] **Taylor** – www.taylordevices.com

[5] **Constantinou M.C., Dargush G.F., Lee G.C., Reinborn A.M., Whittaker A.S.** : Analysis and Design of Buildings with Added Energy Dissipation Systems (Internet)

[6] **Sundiata Marcelin** : Parametric Study of the Effectiveness of the Toggle Brace Damper. (internet)

[7] **Natali Sigaher** : Development, Testing and Modelling of Highly Effective Energy Dissipation System Configurations , Department of Civil Structural and Environmental Engineering – University of Buffalo. (internet)