

## Επιρροή των Αβέβαιων Κατακόρυφων Φορτίων και Επιταχύνσεων στη Σεισμική Συμπεριφορά Κατασκευής ΟΣ Influence of Uncertain Vertical Loads and Accelerations on the Seismic Behavior of an RC Building

Δημήτριος ΒΑΜΒΑΤΣΙΚΟΣ<sup>1</sup>, Χρήστος ΖΕΡΗΣ<sup>2</sup>

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Μελετάται η επιρροή της αβέβαιης τιμής των μόνιμων και κινητών φορτίων και των κατακόρυφων επιταχύνσεων στη σεισμική συμπεριφορά κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος. Οι σύγχρονοι κανονισμοί επιβάλλουν τη χρήση του συνδυασμού  $G_k + 0.3Q_k$  για σεισμική φόρτιση, όπου  $G_k$  τα μόνιμα και  $Q_k$  τα κινητά φορτία, όμως οι πραγματικές τιμές και η επιρροή τους στη σεισμική απόκριση είναι αβέβαιες. Χρησιμοποιώντας ένα τυπικό υφιστάμενο πενταώροφο πλαίσιο οπλισμένου σκυροδέματος γίνεται εφαρμογή της Ανάλυσης Δυναμικής Αντίστασης για την εκτίμηση της σεισμικής επιτελεστικότητας υπό πιθανοτικές κατανομές των φορτίων, σε συνδυασμό με τη δράση ή μη της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας. Εφαρμόζονται πολλαπλά επιταχυνσιογραφήματα με κατάλληλα κλιμακούμενες εντάσεις τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη συνιστώσα, για την εξαγωγή της σεισμικής απόκρισης σε οριακές καταστάσεις που ξεκινούν από την λειτουργικότητα και φτάνουν μέχρι την καθολική δυναμική αστάθεια και κατάρρευση της κατασκευής. Ως αποτέλεσμα ποσοτικοποιείται η επιρροή των φορτίων και της εισαγωγής ή μη της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας στην εκτιμώμενη απόκριση και φέρουσα ικανότητα της κατασκευής επιτρέποντας την κατανόηση των επιδράσεων που συνεπάγονται οι κανονιστικές παραδοχές.

**ABSTRACT :** We investigate the influence of the uncertain value of dead loads, live loads and the vertical seismic excitation on the seismic performance of a reinforced concrete structure. Seismic guidelines typically enforce the use of the  $G_k + 0.3Q_k$  combination, where  $G_k$  are the dead loads and  $Q_k$  the live loads. However, their true values and their influence to the seismic response are uncertain. Using a typical existing five-story building we employ Incremental Dynamic Analysis to evaluate the seismic performance under probabilistic load distributions in combination with the use or not of the vertical component of ground motion. Multiple accelerograms are scaled to several levels of intensity both in the horizontal and in the vertical sense to evaluate the building capacity in limit-states ranging from serviceability to global dynamic instability and collapse of the structure. In summary, the influence of the loads and the use of the vertical component on the estimated demand and capacity of the structure are quantified, allowing for the extraction of useful conclusions on the assumptions of the code and their impact.

<sup>1</sup> Λέκτορας, Τμήμα Πολ. Μηχ. και Μηχ. Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Κύπρου, email: [divamva@ucy.ac.cy](mailto:divamva@ucy.ac.cy)

<sup>2</sup> Επ. Καθηγητής, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, email: [zeris@central.ntua.gr](mailto:zeris@central.ntua.gr)

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σύμφωνα με τους σύγχρονους κανονισμούς (π.χ ΕΑΚ 2000, CEN EC8 2003) η μάζα και τα συνεπαγόμενα κατακόρυφα φορτία που είναι ενεργά στο συνδυασμό φορτίων με σεισμό ανέρχονται, σε συνήθεις κατασκευές, στο 100% των μονίμων συν το 30% των κινητών. Προφανώς, η πραγματική τιμή τους τη στιγμή που θα γίνει ο σεισμός είναι αβέβαιη και μπορεί να είναι είτε χαμηλότερη, είτε υψηλότερη από την προδιαγεγραμμένη. Επιπλέον, το ζήτημα της συνεπιβολής της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας — η οποία επιτρέπεται να αγνοηθεί σε κατασκευές συνήθους σημασίας και μικρής σεισμικότητας — είναι ακόμα ένας μεγάλος άγνωστος, καθότι δεν είναι ξεκάθαρο ακόμα το εύρος της επιρροής καθώς και το πόσο ασφαλής ή μη είναι η παραδοχή ότι αυτή δύναται να αγνοηθεί.

Και τα δύο ζητήματα έχουν τύχει του ερευνητικού ενδιαφέροντος στο παρελθόν. Η ευαισθησία της σεισμικής απόκρισης των κατασκευών στην αλλαγή της μάζας τους έχει μελετηθεί, τουλάχιστον για μεταλλικά κτίρια, από τους Al-Ali (1998) και Fragiadakis (2006). Αν και ο στόχος ήταν κυρίως η εκτίμηση της επιρροής της εναλλαγής της μάζας από όροφο σε όροφο, τα αποτελέσματα δείχνουν μια σχετικώς μεσαία προς χαμηλή επιρροή των σεισμικών μαζών στη σεισμική απόκριση, ιδιαίτερα συγκρινόμενη με την επιρροή άλλων παραμέτρων που αφορούν τα κτίρια αυτά (όπως, π.χ., η αντοχή των συνδέσεων). Ωστόσο, σε καμία περίπτωση δεν ελήφθησαν υπόψη τα βαρυτικά φορτία και η τυχόν επιρροή τους στις αντοχές και στις ακαμψίες των δομικών στοιχείων, όπως συμβαίνει στα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα (ΟΣ), καθότι χρησιμοποιήθηκαν απλά στοιχεία συγκεντρωμένης πλαστικότητας με προκαθορισμένες σχέσεις ροπής-στροφής στις πλαστικές αρθρώσεις.

Αντίστοιχα έχουν γίνει αρκετές μελέτες για τη διερεύνηση της επιρροής της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας στην απόκριση των κατασκευών, όμως τα αποτελέσματα είναι διφορούμενα. Για παράδειγμα ο Chopra (1966) βρήκε σημαντική επιρροή των κατακόρυφων επιταχύνσεων στις τάσεις που παρουσιάζονται σε φράγματα βαρύτητας, ενώ ο Munshi (1998) βρήκε ασήμαντη επιρροή σε ένα σύγχρονο κτίριο ΟΣ. Από την άλλη πλευρά ο Parazoglou (1996) παρέχει μια σειρά από πιθανές ενδείξεις αστοχίας λόγω κατακόρυφης σεισμικής διέγερσης σε πρόσφατους σεισμούς ενώ χρησιμοποιούνται και αναλύσεις για να δείξουν την, υψίσυχη μεν σημαντική δε, μεταβολή του αξονικού φορτίου των υποστυλωμάτων. Όμως, οι υπάρχουσες εργασίες κατά κύριο λόγο περιορίζονται στην εκτίμηση των μεταβολών που η κατακόρυφη διέγερση προκαλεί στα εντατικά μεγέθη χωρίς να αναζητήσουν την επίδραση αυτών στην πραγματική επιτελεστικότητα. Ουσιαστικά λείπει μια ποσοτική (και όχι απλά ποιοτική) εκτίμηση της επιρροής των κατακόρυφων φορτίων αλλά και επιταχύνσεων στην πραγματική σεισμική απόδοση των κατασκευών.

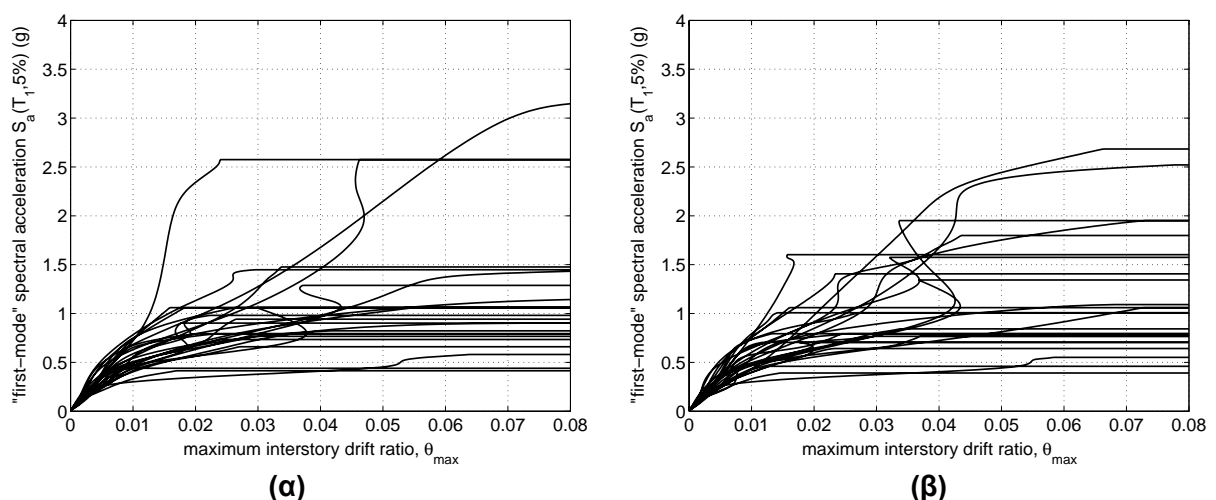
## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Για να καλύψουμε έστω και μερικώς το κενό που παρουσιάζεται στη βιβλιογραφία προτείνουμε τη χρήση της Ανάλυσης Δυναμικής Αντίστασης (ΑΔΑ, Vamvatsikos 2002) για να υπολογίσουμε επακριβώς τη σεισμική συμπεριφορά κατασκευής υπό εναλλακτικές συνθήκες κατακόρυφης φόρτισης. Η ΑΔΑ είναι μια καθιερωμένη πλέον μέθοδος που είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της σεισμικής απόκρισης και αντοχής των κατασκευών. Χρησιμοποιούνται μη γραμμικές δυναμικές αναλύσεις υπό πολλαπλά επιταχυνσιογραφήματα κλιμακούμενα σε

κατάλληλα επίπεδα έντασης, έτσι ώστε να οδηγήσουν την κατασκευή δια όλων των οριακών της καταστάσεων, από τη λειτουργικότητα (ελαστική απόκριση) έως την οριακή αστοχία σε καθολική δυναμική αστάθεια. Πρόκειται για μια υπολογιστικώς ακριβή μέθοδο, η οποία όμως παρέχει μια πλήρη εικόνα της σεισμικής συμπεριφοράς της κατασκευής και επιτρέπει τη λεπτομερή σύγκριση των παραμέτρων της απόκρισης και της αντοχής του κτιρίου για τις διάφορες παραδοχές σχεδιασμού και προσομοίωσής του.

Τα αποτελέσματα της ΑΔΑ είναι ζεύγη τιμών του Μέτρου Έντασης (ΜΕ) του σεισμού και της προκύπτουσας Παραμέτρου Τεχνικής Απόκρισης (ΠΤΑ) για κάθε ανάλυση. Με κατάλληλη παρεμβολή παρουσιάζονται σε συνεχείς καμπύλες ΑΔΑ, μία για κάθε καταγραφή. Οι καμπύλες αυτές, και η σύνοψή τους σε 16, 50 και 84% καμπύλες ΔΑ (Vamvatsikos 2002), παρουσιάζουν μια πλήρη εικόνα της συμπεριφοράς της κατασκευής, δίνοντας π.χ. το ΜΕ το οποίο πρέπει να έχει σεισμός ώστε να οδηγήσει (με συγκεκριμένη πιθανότητα) την κατασκευή σε ΠΤΑ ίση με δεδομένη τιμή. Συνήθεις επιλογές για το ΜΕ είναι η φασματική επιτάχυνση πρώτης ιδιοπεριόδου με απόσβεση 5%,  $S_a(T_1, 5\%)$ , και για το ΠΤΑ η μέγιστη ανηγμένη σχετική μετατόπιση των ορόφων,  $\theta_{max}$  (μέγιστη εν χρόνω και μεταξύ όλων των ορόφων).

Έτσι δημιουργήσαμε τα **Σχήματα 1α** και **1β** όπου έχουμε υποβάλει ένα τυπικό υφιστάμενο πενταώροφο κτίριο ΟΣ σε πολλαπλές καταγραφές με και χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα. Παρατηρούμε ότι σε κάθε περίπτωση οι καμπύλες ΔΑ καταλήγουν σε ένα οροπέδιο όπου το ΜΕ λαμβάνει και τη μέγιστη τιμή του, διαφορετική για κάθε καταγραφή. Ο λόγος είναι ότι το κτίριο παρουσιάζει δυναμική αστάθεια η οποία δεν επιτρέπει περαιτέρω κλιμάκωση. Ουσιαστικά λοιπόν αυτές οι μέγιστες τιμές  $S_a(T_1, 5\%)$  χαρακτηρίζουν και την αντοχή του κτιρίου ως προς την κατάρρευση. Συγκρίνοντάς τα δύο διαγράμματα μπορούμε άμεσα να δούμε τις διαφορές στην αντοχή σε όρους  $S_a(T_1, 5\%)$  για οποιαδήποτε τιμή  $\theta_{max}$  οι οποίες προκαλούνται από την επιπρόσθετη κατακόρυφη σεισμική διέγερση. Για κάποιες καταγραφές η κατακόρυφη επιτάχυνση δρα επιβαρυντικά, για άλλες όμως ελαφρυντικά, εξηγώντας με μια ματιά μερικούς από τους λόγους πίσω από τις αντικρουόμενες απόψεις που κατά καιρούς έχουν διατυπωθεί. Στη συνέχεια της μελέτης θα διερευνηθεί διεξοδικά το κτίριο αυτό, χρησιμοποιώντας ως εργαλείο τις καμπύλες ΑΔΑ.



**Σχήμα 1.** Καμπύλες ΔΑ (α) χωρίς επιρροή και (β) με επιρροή της κατακόρυφης εδαφικής συνιστώσας, για 100% ποσοστό των κατακόρυφων φορτίων που προβλέπει ο ΕΑΚ (2000).

## Σεισμικές Καταγραφές

Για την εκτέλεση των δυναμικών αναλύσεων χρησιμοποιούνται 26 φυσικές σεισμικές καταγραφές με δύο συνιστώσες, μια εκ των δύο οριζοντίων (με τυχαία επιλογή) και την κατακόρυφη. Ουσιαστικά πρόκειται για «συνήθη» επιταχυνσιογραφήματα χωρίς φαινόμενα κατευθυντικότητας ή ενίσχυσης λόγω μαλακού εδάφους. Το μέγεθος ροπής του σεισμού κυμαίνεται στο διάστημα 6.5 – 6.9 ενώ η κοντινότερη απόσταση είναι στα 13 – 32km. Λόγω των μικρών προς μέσων αποστάσεων έχουμε από ισχυρές έως και χαμηλές κατακόρυφες επιταχύνσεις, με λόγο μέγιστης κατακόρυφης (Peak Vertical Acceleration, PVA) προς μέγιστη οριζόντια (Peak Horizontal Acceleration, PHA) που κυμαίνεται από 0.2 έως και 2.3, ενώ τα 10 εξ αυτών (δηλαδή το 39%) έχουν λόγο μεγαλύτερο του συνήθως προτεινόμενου 2/3. Πρόκειται δηλαδή για καταγραφές με μεγάλη ποικιλία χαρακτηριστικών, όπως φαίνεται αναλυτικά στον **Πίνακα 1**.

**Πίνακας 1.** Οι εικοσιέξι καταγραφές που χρησιμοποιούνται.

Γεγονός Σταθμός	R <sup>a</sup> (km)	Έδαφος <sup>b</sup>	φ <sup>c</sup> (deg)	PHA <sup>d</sup> (g)	PVA <sup>e</sup> (g)	PVA/PHA (g)
Superstition Hills 1987 (M=6.7)						
1. Wildlife Liquef. Array	24.4	-,D	090	0.18	0.41	2.28
2. Westmoreland Fire Station	13.3	C,D	090	0.17	0.25	1.47
3. El Centro Imp. Co Cent	13.9	C,D	000	0.36	0.13	0.36
San Fernando, 1971 (M=6.6)						
4. LA Hollywood Sto Lot	21.2	C,D	090	0.21	0.14	0.67
Imperial Valley 1979 (M=6.5)						
5. Plaster City	31.7	C,D	045	0.04	0.03	0.75
6. El centro Array #12	18.2	C,D	140	0.14	0.07	0.50
7. El centro Array #13	21.9	C,D	140	0.12	0.05	0.42
8. Westmoreland Fire Station	15.1	C,D	090	0.07	0.08	1.14
9. El centro Array #1	15.5	C,D	140	0.14	0.06	0.43
Northridge 1994 (M=6.7)						
10. Leona Valley #2	37.7	C,-	000	0.09	0.06	0.67
11. Lake Hughes #1	36.3	C,C	000	0.09	0.10	1.11
12. LA Hollywood Sto FF	25.5	C,D	090	0.23	0.14	0.61
13. LA Baldwin Hills	31.3	B,B	090	0.24	0.09	0.38
14. Canoga Park - Topanga Can	15.8	C,D	106	0.36	0.49	1.36
15. LA N Faring Rd	23.9	C,B	000	0.27	0.19	0.70
16. LA Fletcher Dr	29.5	C,D	144	0.16	0.11	0.69
17. LA Centinela St	30.9	C,D	155	0.47	0.11	0.23
18. Glendale Las Palmas	25.4	C,C	177	0.36	0.13	0.36
Loma Prieta 1989 (M=6.9)						
19. Hollister Diff Array	25.8	-,D	165	0.27	0.15	0.56
20. WAHO	16.9	-,D	000	0.37	0.27	0.73
21. Halls Valley	31.6	C,C	000	0.13	0.06	0.46
22. Agnews State Hospital	28.2	C,D	000	0.17	0.09	0.53
23. Anderson Dam Downstrm	21.4	B,D	270	0.24	0.15	0.63
24. Coyote Lake Dam Downstrm	22.3	B,D	195	0.16	0.10	0.63
25. Sunnyvale Colton Ave	28.8	C,D	270	0.21	0.10	0.48
26. Hollister South & Pine	28.8	-,D	000	0.37	0.20	0.54

<sup>a</sup> Κοντινότερη απόσταση από ρήγμα

<sup>b</sup> Κατηγορία εδάφους κατά USGS, Geomatrix

<sup>c</sup> Προσανατολισμός οριζόντιας συνιστώσας

<sup>d</sup> Μέγιστη οριζόντια επιτάχυνση

<sup>e</sup> Μέγιστη κατακόρυφη επιτάχυνση

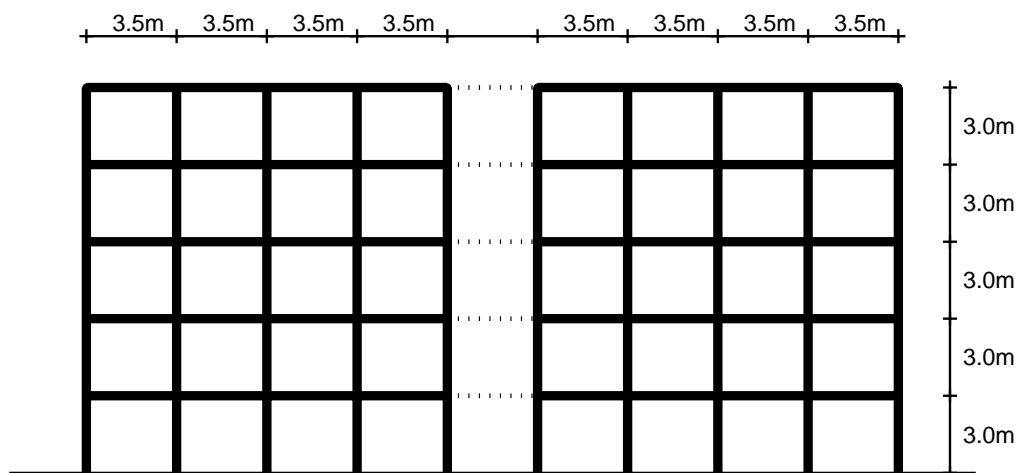
<sup>f</sup> Μέγεθος ροπής

## Χρησιμοποιούμενο Κτίριο και Προσομοίωμα

Η κατασκευή που αναλύεται είναι ένα τυπικό υφιστάμενο πενταώροφο πλαίσιο από ΟΣ, αντιπροσωπευτική των μεθόδων σχεδίασης και κατασκευής τυπικών κτιρίων της δεκαετίας του 1960. Έχει πέντε ορόφους ύψους 3.00m έκαστος και έχει συμμετρική κάτοψη, τεσσάρων επί τριών ανοιγμάτων (Zeris 2006). Είναι σχεδιασμένο για μέτρια σεισμικότητα σύμφωνα με τον κανονισμό του 1959 (ΒΔ 1959), λαμβάνοντας υπόψη τις γεωμετρικές αναλογίες, τα δομικά υλικά και τα φορτία σχεδιασμού της γενιάς αυτών των κτιρίων (Reparis 2006).

Το κτίριο προσομοιώνεται ως ένα δισδιάστατο επίπεδο πλαίσιο τεσσάρων ανοιγμάτων κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Λόγω συμμετρίας αρκεί να προσομοιωθεί μόνο το μισό της κατασκευής χρησιμοποιώντας ένα εσωτερικό και ένα εξωτερικό πλαίσιο τοποθετημένα το ένα δίπλα στο άλλο και στερεά συνδεδεμένα μεταξύ τους σε κάθε όροφο λόγω του άκαμπτου διαφράγματος (**Σχήμα 2**). Χρησιμοποιώντας το λογισμικό OpenSEES (McKenna 2001) προσομοιώσαμε τις δοκούς και τα υποστυλώματα με στοιχεία κατανεμημένης βλάβης βασισμένα στην εσωτερική κατανομή της ευκαμψίας των διατομών. Χρησιμοποιούνται διατομές με επαρκώς ακριβή διακριτοποίηση μέσω ινών του χάλυβα οπλισμού και του σκυροδέματος. Ο οπλισμός της πλάκας λαμβάνεται υπόψη εντός του ενεργού πλάτους για τον υπολογισμό των καμπτικών χαρακτηριστικών των δοκών σε αρνητική κάμψη, υποθέτοντας διαφορετικά ενεργά πλάτη, για τις δοκούς του εσωτερικού και του εξωτερικού πλαισίου (1.0m και 0.5m αντίστοιχα). Οι καταστατικές σχέσεις τάσης-τροπής των ινών καταρτίζονται βάσει των μέσων ιδιοτήτων των υλικών (και όχι των χαρακτηριστικών). Η μέση αντοχή του απερίσφιχτου σκυροδέματος λαμβάνεται ίση με 18MPa για ποιότητα C16 (B120), ενώ η επιρροή της περίσφιξης (πρακτικά πολύ χαμηλή δεδομένης της μεγάλης απόστασης των συνδετήρων) λαμβάνεται υπόψη σύμφωνα με το προσομοίωμα του Mander (1988). Για το διαμήκη οπλισμό, βασιζόμενοι σε πραγματικά πειράματα για λείες ράβδους 14mm, λαμβάνουμε μέση τιμή αντοχής διαρροής ίση με 310MPa. Για να επιτευχθεί ακριβής αναπαράσταση της διαφορετικής όπλισης κατά μήκος κάθε δοκού και να υπολογιστεί η επακριβής αρχική κατανομή ροπών λόγω βαρυτικών φορτίων, η κάθε δοκός έχει υποδιαιρεθεί ομοιόμορφα σε πέντε στοιχεία δοκού-τύλου, με πέντε διατομές ελέγχου ανά στοιχείο. Από την άλλη, τα υποστυλώματα προσομοιώνονται ως ένα μόνο στοιχείο πέντε διατομών ενώ συμπεριλαμβάνουν και μια πρώτης τάξεως προσέγγιση των γεωμετρικών μη γραμμικοτήτων (φαινόμενα P-Δ).

Τα φορτία σχεδιασμού που χρησιμοποιούνται είναι: α) το ίδιο βάρος της κατασκευής, το οποίο περιλαμβάνει τον περιμετρικό μπατικό τοίχο (οπτοπλινθοδομή) πάχους 25cm, β) ένα ομοιόμορφο φορτίο 2.50 kN/m<sup>2</sup>, το οποίο (σύμφωνα με τις προβλέψεις του κώδικα) περιλαμβάνει φορτίο 1.00 kN/m<sup>2</sup> για τα εσωτερικά ελαφρά χωρίσματα πάχους 10cm και γ) το κινητό φορτίο 2.00kN/m<sup>2</sup> για χρήση συνήθους κατοικίας. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μια σχετικώς υψίσυχη κατασκευή με πρώτη ιδιοπερίοδο  $T_1 = 0.57\text{sec}$ .



**Σχήμα 2.** Δισδιάστατο προσομοίωμα του πενταώροφου κτιρίου ΟΣ.

## ΠΙΘΑΝΟΤΙΚΗ ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Για την ορθότερη ανάλυση της κατασκευής οφείλουμε να βρούμε την κατανομή των κατακόρυφων φορτίων της. Προς τούτο θα αξιοποιήσουμε την κατανομή φορτίων που ουσιαστικά προβλέπουν τα δεδομένα του Ευρωκώδικα 8 (CEN 2003). Σύμφωνα με τα δεδομένα μας το κτίριο φέρει μόνιμο φορτίο  $G_k = 5.38 \text{ kN/m}^2$  και κινητό φορτίο  $Q_k = 2 \text{ kN/m}^2$ . Το συνολικό σεισμικό φορτίο που προβλέπεται είναι  $P = G_k + 0.3Q_k$ . Στην πραγματικότητα όμως, για στατικές αναλύσεις εκτός σεισμού προβλέπονται συνολικοί συντελεστές ασφαλείας  $\gamma_g = 1.35$  και  $\gamma_q = 1.50$  ώστε να μετατρέψουν τα φορτία στις χαρακτηριστικές τιμές τους που έχουν μόνο 5% πιθανότητα υπέρβασης στους μη τυχηματικούς συνδυασμούς φόρτισης.

Με αυτά τα δεδομένα υπόψη θα προσπαθήσουμε να ανακατασκευάσουμε τις πιθανοτικές κατανομές των συντελεστών των φορτίων έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις παραδοχές του Ευρωκώδικα. Έτσι υποθέτουμε ότι ο συντελεστής  $\gamma_g$  του μόνιμου φορτίου  $G_k$  ακολουθεί κανονική κατανομή με μέση τιμή 1.0 και τυπική απόκλιση 0.21 ώστε το 95% ποσοστημόριο του να είναι 1.35. Αντίστοιχα, θεωρούμε ότι ο συντελεστής  $\gamma_q$  του κινητού φορτίου  $Q_k$  ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με διάμεση τιμή 0.3 και τυπική απόκλιση του  $\ln(\gamma_q)$  ίση με 0.98 ώστε να προκύπτει το 95% ποσοστημόριο ίσο με 1.50.

Χρησιμοποιώντας προσομοίωση Monte Carlo υπολογίζουμε την κατανομή του Συντελεστή Φόρτισης  $\gamma_p$  που περιγράφει την μεταβλητότητα του ολικού φορτίου  $P$  γύρω από την κλασική τιμή  $G_k + 0.3Q_k$ :

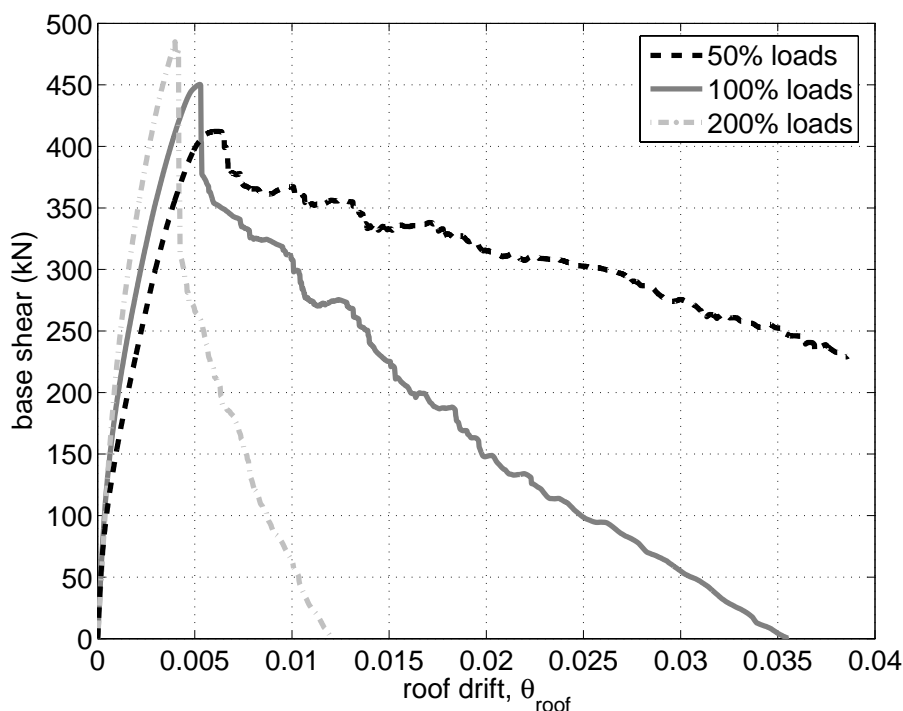
$$\gamma_p = \frac{\gamma_g G_k + \gamma_q Q_k}{G_k + 0.3Q_k} \quad (1)$$

Το αποτέλεσμα είναι μια κατανομή που προσομοιάζει αρκετά στην κανονική αλλά έχει μεγάλη ουρά προς τις μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή  $\gamma_p$ . Η μέση τιμή είναι 1.06 και η τυπική απόκλιση 0.28, δηλαδή κατά κύριο λόγο κληρονομούνται τα χαρακτηριστικά της κανονικής κατανομής των μόνιμων φορτίων, τα οποία άλλωστε έχουν και τη μεγαλύτερη

συνεισφορά στο συνολικό  $P$  για το δεδομένο κτίριο. Παρατηρούμε επίσης ότι οι τιμές με περίπου 0.5% πιθανότητα υποσκέλισης και 0.5% πιθανότητα υπέρβασης για το  $\gamma_p$  είναι οι 0.5 και 2.0, αντίστοιχα. Αυτές είναι δύο ακραίες τιμές για το συντελεστή φόρτισης  $\gamma_p$  τις οποίες θα χρησιμοποιήσουμε για να διερευνηθούν οι αντίστοιχες ακραίες επιρροές των κατακορύφων. Σε κάθε περίπτωση, θα θεωρήσουμε ενιαίο Συντελεστή Φόρτισης για κάθε όροφο.

### ΕΥΑΙΣΘΗΣΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΤΗ ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

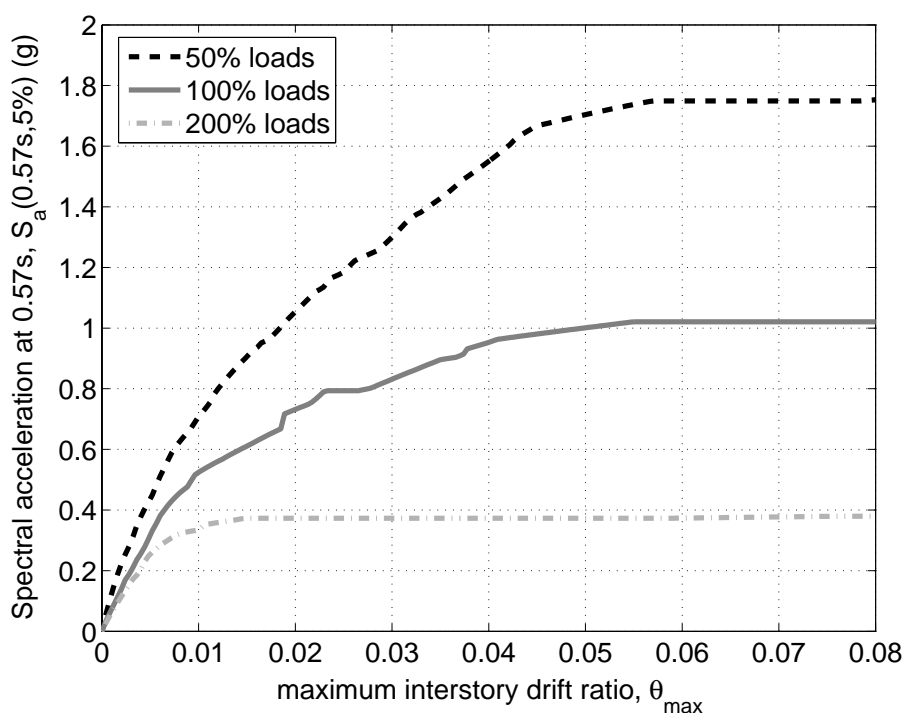
Για πληρέστερη κατανόηση της επιρροής του  $\gamma_p$  στη συμπεριφορά της κατασκευής εκτελέστηκαν στατικές αναλύσεις υπό αύξουσα οριζόντια μετατόπιση οροφής — Αναλύσεις Στατικής Αντίστασης (ΑΣΑ) — για τις τιμές 50%, 100% και 200%. Οι προκύπτουσες καμπύλες ΣΑ (Σχήμα 3) μας δίνουν μια καλή εικόνα της επιρροής των βαρυντικών φορτίων στην κατασκευή. Καταρχάς βλέπουμε ότι η αύξηση των φορτίων προσδίδει αρχικά μεγαλύτερη δυσκαμψία ενώ επιτρέπει στην κατασκευή να φτάσει σε υψηλότερες τιμές τέμνουσας βάσης. Ο λόγος είναι η υψηλότερη αρχική αξονική ένταση που αποκτούν οι διατομές των υποστυλωμάτων, η οποία τους επιτρέπει να παραλάβουν μεγαλύτερες ροπές υπό αυξημένη εγκάρσια δυσκαμψία, λόγω σχετικά μικρότερης ρηγμάτωσης. Στη συνέχεια όμως, η αυξημένη αξονική καταναλώνει πολύ γρήγορα τη φέρουσα ικανότητά τους, οδηγώντας σε απότομη πτώση της καμπύλης αντίστασης μετά το μέγιστο, με μειωμένη ολική πλαστιμότητα. Ουσιαστικά, η αυξημένη αξονική προκαλεί τη μείωση των τοπικών πλαστιμοτήτων στα κατακόρυφα δομικά στοιχεία. Εν τέλει τα αποτελέσματα της αύξησης των βαρυντικών φορτίων είναι ξεκάθαρα αρνητικά: Όταν αυξάνεται το  $\gamma_p$  από 0.5 σε 2.0 έχουμε αύξηση της μέγιστης τέμνουσας περίπου κατά 20% αλλά ταυτόχρονη μείωση της μέγιστης ανηγμένης σχετικής μετατόπισης οροφής  $\theta_{\text{roof}}$  κατά τουλάχιστον έξι φορές.



Σχήμα 3. Καμπύλες ΣΑ για 50%, 100% και 200% ποσοστά των κατακόρυφων φορτίων.

Για να εκτιμηθεί η επιρροή του Συντελεστή Φόρτισης  $\gamma_p$  στη δυναμική συμπεριφορά εκτελέστηκαν ΑΔΑ για τις τρεις τιμές του και υπολογίσθηκαν οι διάμεσες καμπύλες ΔΑ (Vamvatsikos 2004). Δεδομένου ότι η αλλαγή στις μάζες αλλάζει και την περίοδο του κτιρίου, χρησιμοποιήθηκε ως κοινό ΜΕ το  $S_a(0.57s, 5\%)$ , όπου 0.57s είναι η πρώτη ιδιοπερίοδος της κατασκευής για  $\gamma_p = 1.0$  (**Σχήμα 4**).

Είναι σημαντικό να παρατηρήσουμε ότι πλέον συνυπάρχουν δύο αντιμαχόμενα φαινόμενα. Το πρώτο είναι η επιρροή των αξονικών και τα συνεπαγόμενα παράγωγα φαινόμενα αύξησης δυσκαμψίας και τελικής απομείωσης της αντοχής που παρατηρήσαμε στις καμπύλες ΣΑ. Το δεύτερο είναι η επιρροή της αλλαγής μάζας και ιδιοπεριόδου στην τιμή του σεισμικού φορτίου. Γενικώς, η τιμή  $\gamma_p = 0.5$  συνεπάγεται τη χαμηλή ιδιοπερίοδο  $T_1 = 0.39s$ , η οποία οδηγεί στο δυσμενέστερο τμήμα του μέσου σεισμικού φάσματος, με υψηλές επιταχύνσεις. Αντιθέτως, η υψηλή τιμή  $\gamma_p = 2.0$  αυξάνει την ιδιοπερίοδο σε  $T_1 = 0.92s$  και οδηγεί σε αρκετά χαμηλότερες τιμές επιτάχυνσης. Όπως δείχνει όμως το **Σχήμα 4**, αυτό δεν είναι αρκετό για να αντισταθμίσει τις ιδιαίτερα φθίνουσες αντοχές που προκαλούν τα υψηλά αξονικά φορτία. Έτσι οι καμπύλες ΔΑ ακολουθούν ανάλογες τάσεις με τις καμπύλες ΣΑ και επηρεάζονται σημαντικά από το συντελεστή φόρτισης. Ο διπλασιασμός ή υποδιπλασιασμός των φορτίων οδηγεί σε αντίστοιχη μείωση ή αύξηση των σεισμικών αντοχών σε όρους ΜΕ κατά 40 – 60%, σχεδόν για κάθε μετελαστική οριακή κατάσταση.



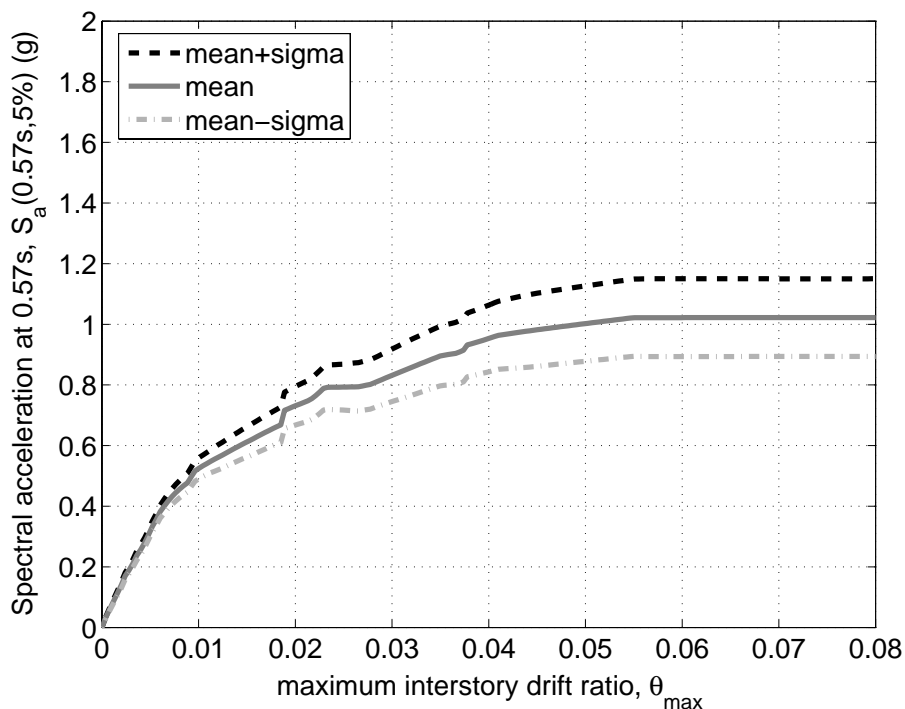
**Σχήμα 4.** Διάμεσες καμπύλες ΔΑ για 50%, 100% και 200% ποσοστά των κατακόρυφων φορτίων.



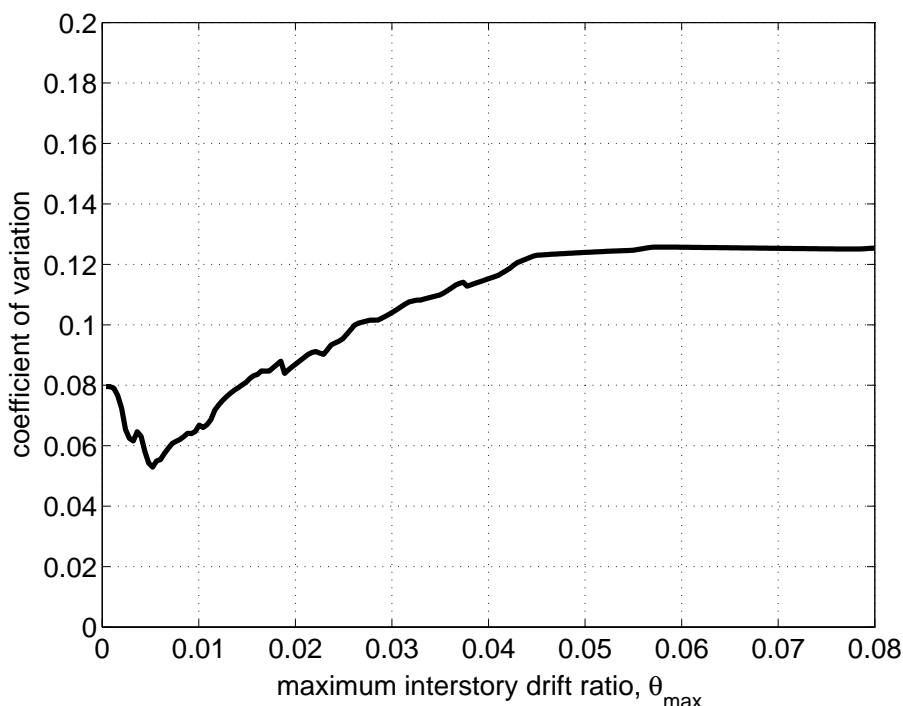
## ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΚΑΤΑΝΟΜΗΣ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ

Οι αναλύσεις ευαισθησίας που εκτελέστηκαν είναι μεν χρήσιμες για να κατανοηθεί ποιοτικά η επιρροή του Συντελεστή Φόρτισης, όμως αφορούν ακραίες τιμές του. Για να αποκτήσουμε μια σωστή εικόνα της πραγματικής επιρροής του Συντελεστή Φόρτισης λόγω αβεβαιότητας στην τιμή του, πρέπει να λάβουμε υπόψη την πλήρη πιθανοτική κατανομή του.

Προς τούτο χρησιμοποιήσαμε τη μέθοδο Πρώτου Βαθμού Δεύτερης Ροπής (First-Order Second Moment, π.χ., Benjamin 1970) για να εκτιμήσουμε τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των διάμεσων καμπυλών ΑΔΑ. Πρόκειται για μια απλή μέθοδο η οποία προσφέρει ικανοποιητικά αποτελέσματα χωρίς τις χρονοβόρες αναλύσεις μιας προσομοίωσης Monte Carlo. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 5**, όπου φαίνεται η μέση «διάμεση καμπύλη» ΑΔΑ και οι «διάμεσες καμπύλες» που απέχουν μια τυπική απόκλιση εκατέρωθεν της. Όπως βλέπουμε και στο **Σχήμα 6**, η επιρροή της αβεβαιότητας επί της σεισμικής αντοχής σε όρους ΜΕ περιορίζεται σε μόλις 6 – 12% συντελεστή διασποράς, μία χαμηλή τιμή, ενδεικτική της μικρής συμμετοχής που έχουν τα ευμετάβλητα κινητά φορτία στο συνολικό βαρυντικό φόρτο της κατασκευής. Εφόσον πρόκειται απλά για μια κατοικία και μάλιστα από ΟΣ, τα μόνιμα φορτία εμφανώς κυριαρχούν και μειώνουν αισθητά την επιρροή της οποιαδήποτε μεγάλης διασποράς των κινητών. Σε σύγκριση με την τεράστια διασπορά που παρατηρείται στα **Σχήματα 1α-β** λόγω των καταγραφών, μπορεί πλέον με ασφάλεια να αγνοηθεί η μεταβλητότητα των βαρυντικών φορτίων για αυτή την κατασκευή.



**Σχήμα 5.** Μεταβλητότητα των διάμεσων καμπυλών ΔΑ και της σεισμικής αντοχής σε όρους ΜΕ για πιθανοτική κατανομή των κατακόρυφων φορτίων.



**Σχήμα 6.** Συντελεστής διασποράς της αντοχής σε όρους ME περί της μέσης διάμεσης καμπύλης ΔΑ για πιθανοτική κατανομή των κατακόρυφων φορτίων.

## ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΗΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΑΣ

Όπως είδαμε και αρχικά στο **Σχήμα 1**, η συμπερίληψη ή μη των κατακόρυφων επιταχύνσεων αλλάζει την εκτιμώμενη συμπεριφορά της κατασκευής. Το ερώτημα είναι αν λειτουργεί υπέρ ή κατά της ασφάλειας και κατά πόσον η επιρροή της εξαρτάται από τα βαρυτικά φορτία που φέρει η κατασκευή.

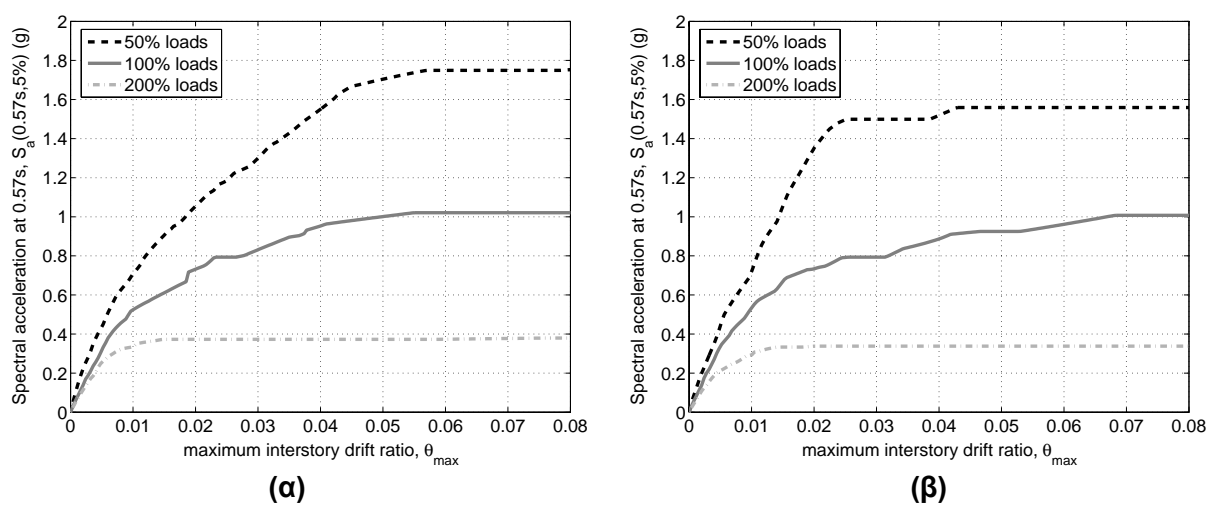
Για να απαντήσουμε σε αυτά τα ερωτήματα εκτελέσαμε αναλύσεις ΔΑ για Συντελεστές Φόρτισης 0.5, 1.0 και 2.0, χρησιμοποιώντας ταυτόχρονα την οριζόντια και την κατακόρυφη συνιστώσα κάθε καταγραφής. Οι διάμεσες καμπύλες ΔΑ υπό την επιρροή της κατακόρυφης επιτάχυνσης παρουσιάζονται στο **Σχήμα 7β**, όπου μπορούν να συγκριθούν με τις διάμεσες καμπύλες ΔΑ χωρίς κατακόρυφη συνιστώσα του **Σχήματος 7α**. Χρησιμοποιώντας, όπως και προηγουμένως, το κοινό ME  $S_a(0.57s, 5\%)$  μπορούμε να εκτιμήσουμε με ακρίβεια τις διαφορές ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Σε κάθε περίπτωση παρατηρείται ότι οι διάμεσες καμπύλες για δεδομένο συντελεστή  $\gamma_p$  είναι γενικώς συγκρίσιμες: Υπάρχουν μεταβολές στην τιμή της αντοχής  $S_a(0.57s, 5\%)$  που φτάνει η κάθε καμπύλη για δεδομένη τιμή  $\theta_{max}$  οι οποίες όμως είναι άλλοτε μεγαλύτερες και άλλοτε μικρότερες, ενώ διαφέρουν σε μέγεθος και πρόσημο ανάλογα με την οριακή κατάσταση (δηλαδή το μέγεθος της απόκρισης  $\theta_{max}$ ) της κατασκευής.

Με βάση το κοινό ME, μπορούμε να αποκτήσουμε και άμεση ποσοτική σύγκριση των αποτελεσμάτων. Έτσι παρουσιάζουμε στο **Σχήμα 8** τη σχετική μεταβολή στην εκτιμώμενη σεισμική αντοχή  $S_a(0.57s, 5\%)$ , λόγω της συμπερίληψης της κατακόρυφης συνιστώσας για κάθε τιμή της  $\theta_{max}$ . Αυτή υπολογίζεται με το λόγο  $(S_a^{xz} - S_a^x) / S_a^x$ , όπου με  $x$  συμβολίζουμε την τιμή του ME στα 0.57s για διέγερση κατά την οριζόντια διεύθυνση και με  $xz$  την τιμή του

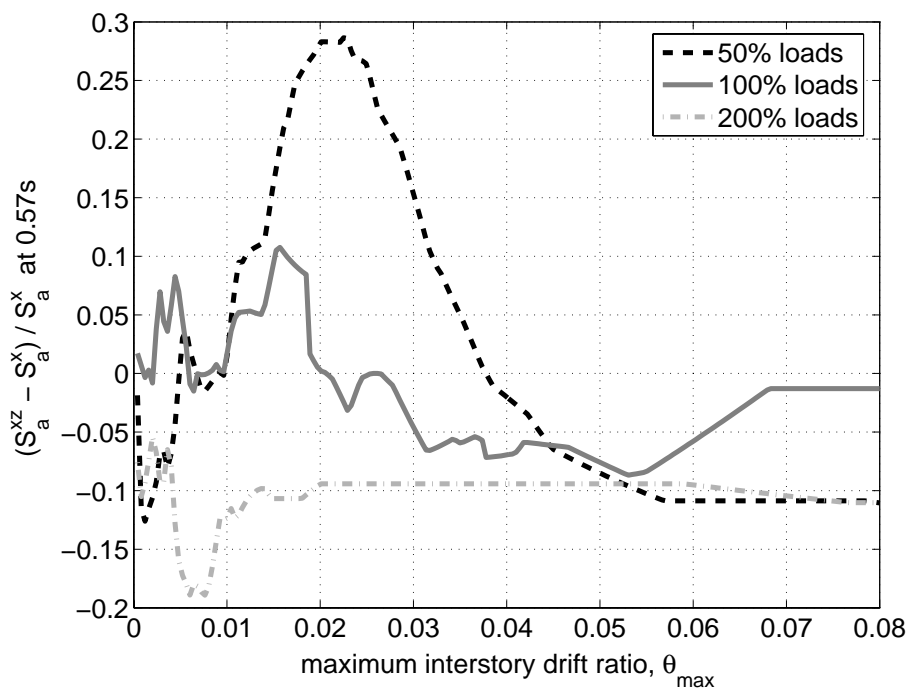
για ταυτόχρονη οριζόντια και κατακόρυφη διέγερση. Βλέπουμε πλέον καθαρά ότι για 50% χαμηλότερα βαρυτικά φορτία η κατακόρυφη συνιστώσα έχει συχνά ευεργετικές συνέπειες που αγγίζουν αυξημένη αντοχή ΜΕ έως και 30% για χαμηλές τιμές απόκρισης  $\theta_{\max}$ . Η αύξηση του Συντελεστή Φόρτισης στο 100% της τιμής του όμως συνεπάγεται δραστική μείωση των ωφελημάτων, όπως συνάγεται από το γεγονός ότι η επιρροή της κατακόρυφης επιτάχυνσης δείχνει πλέον να είναι κατά μέσο όρο σχεδόν μηδενική για το σύνολο των τιμών μέτρου απόκρισης. Όταν όμως αυξήσουμε τα φορτία στο 200% τους, τότε πλέον η επιβολή της κατακόρυφης διέγερσης είναι κατεξοχήν αρνητική και μειώνει τις αντοχές του κτιρίου κατά περίπου 10%, ενώ αγγίζει και το 20% σε ορισμένα επίπεδα απόκρισης.

Παρατηρούμε, λοιπόν, ότι έχει ουσιαστική διαφορά για το κτίριο το να φέρει μικρό ή μεγάλο ποσοστό του κατακόρυφου φορτίου σχεδιασμού και, κατ' επέκταση, χαμηλό ή υψηλό ανηγμένο αξονικό φορτίο στα υποστυλώματα. Οφείλει να ληφθεί επί πλέον υπόψη το γεγονός ότι το κτίριο δεν έχει σχεδιαστεί με τη σύγχρονη φιλοσοφία των ικανοτικών ελέγχων στους κόμβους, επομένως εμφανίζονται πλαστικές αρθρώσεις και σε υποστυλώματα. Κάθε αύξηση του αξονικού φορτίου έχει λοιπόν άμεση επιρροή στη ροπή και στην πλαστιμότητα που μπορούν να παραλάβουν οι κρίσιμες διατομές, κάτι που αποτελεί σημαντικό λόγο εμφάνισης των φαινομένων που βλέπουμε στο **Σχήμα 8**.

Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι η αύξηση ή μείωση της αντοχής του κτιρίου όταν επιβάλλονται κατακόρυφες επιταχύνσεις, δεν έχει καμία συσχέτιση ανά καταγραφή (όλες είναι κάτω του 15%) με το λόγο PVA/PHA, την τιμή PVA αλλά ούτε και με την αντίστοιχη μεταβολή της αντοχής για διαφορετικό ποσοστό κατακορύφων φορτίων  $\gamma_p$ . Επομένως, δεν υπάρχει κάποιος απλός κανόνας για να προβλέψουμε για συγκεκριμένη καταγραφή κατά πόσο επηρεάζει την απόκριση η συμμετοχή της κατακόρυφης συνιστώσας. Το μόνο που φαίνεται στατιστικά προβλέψιμο είναι ότι για υψηλές σχετικά τιμές των κατακορύφων φορτίων έχουμε αρνητική επίδραση στην αντοχή του κτιρίου, ενώ για χαμηλές σχετικά τιμές η επίδραση είναι τυχαία, άλλοτε θετική και άλλοτε αρνητική.



**Σχήμα 7.** Διάμεσες καμπύλες ΔΑ (α) χωρίς επιρροή και (β) με επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας για 50%, 100% και 200% ποσοστά των αρχικών κατακόρυφων φορτίων.



**Σχήμα 8.** Σχετική μεταβολή της εκτιμώμενης διάμεσης αντοχής σε όρους  $S_a(0.57, 5\%)$  όταν λαμβάνεται υπόψη η κατακόρυφη σεισμική συνιστώσα, για  $\gamma_p$  ίσο προς 0.5, 1.0 και 2.0.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εκτελέστηκαν Αναλύσεις Στατικής και Δυναμικής Αντίστασης για την εκτίμηση της σεισμικής συμπεριφοράς τυπικής υφιστάμενης κατασκευής του 1960 από ΟΣ με σκοπό την ποσοτικοποίηση της επιρροής των αβεβίων βαρυντικών φορτίων και της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας στην σεισμική της απόκριση. Παρατηρήθηκε ότι στις περιπτώσεις όπου τα μόνιμα φορτία αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος των συνολικών κατακόρυφων φορτίων σχεδιασμού, τότε λόγω της χαμηλής μεταβλητότητάς τους οι επιρροή των αβεβαιοτήτων είναι μικρή. Συγκριμένα, στην περίπτωση του υφιστάμενου πενταώροφου κτιρίου που εξετάζεται στην παρούσα, η προκύπτουσα διασπορά των τελικών αποτελεσμάτων δυναμικής ανάλυσης είναι της τάξης του 10%. Στην περίπτωση όμως που τα κινητά αποτελούν ένα σημαντικό ποσοστό των κατακόρυφων φορτίων, τότε οι μελέτες ευασθησίας δείχνουν ότι η επιρροή τους είναι ιδιαίτερα σημαντική. Όταν πρόκειται για κτίρια όπου έχουμε πρακτικά μη τυχηματική και ιδιαίτερα μεγάλη μεταβλητότητα των κινητών, π.χ. σε κτίρια με αλλαγή στη χρήση ή κτίρια που αν και γεμάτα τις εργάσιμες ώρες, αδειάζουν εκτός αυτών, τότε ενδέχεται να είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό ζήτημα η επιρροή της αβεβαιότητας αυτής.

Η επιρροή της κατακόρυφης συνιστώσας δείχνει να εξαρτάται άμεσα από τα κατακόρυφα φορτία και το ανηγμένο αξονικό φορτίο που παραλαμβάνει κάθε υποστύλωμα. Στην εξεταζόμενη περίπτωση, ενώ για χαμηλό αξονικό φορτίο παρατηρούμε άλλοτε θετικές και άλλοτε αρνητικές επιρροές στην αντοχή του κτιρίου, όταν αυξηθούν τα κατακόρυφα φορτία η προσθήκη της κατακόρυφης συνιστώσας λειτουργεί συστηματικά αρνητικά, φτάνοντας μέχρι και 20% μείωση της σεισμικής αντοχής της κατασκευής. Γενικότερα συμπεράσματα δεν πρέπει όμως να εξαχθούν προτού εκτελεστούν ανάλογες μελέτες σε περισσότερα κτίρια με διαφορετικά γεωμετρικά και φορτιστικά χαρακτηριστικά (π.χ. κτίρια γραφείων, αποθήκες και υπέργειοι χώροι στάθμευσης).

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Οι συγγραφείς επιθυμούν να ευχαριστήσουν τους πολιτικούς μηχανικούς Κ. Αλεξανδρόπουλο και Π. Γιαννίτσα στο πλαίσιο της διπλωματικής των οποίων δημιουργήθηκε το προσομοίωμα του κτιρίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- ΒΔ59, 1959. “Περί Αντισεισμικού Κανονισμού Οικοδομικών Έργων”, *Βασιλικό Διάταγμα 26/2/59*, Υπουργείο Δημοσίων Έργων.
- Al-Ali A.A.K., Krawinkler H. (1998), “Effects of vertical irregularities on seismic behaviour of building structures”, *Report No 130*, John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, Stanford, CA.
- Benjamin J.R., and Cornell C.A. (1970), *Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers*, McGraw-Hill, New York.
- CEN (2003). “Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance, Part 1”, *European standard prEN 1998-1*, European Committee for Standardization, Brussels.
- Chintanapakdee C., and Chopra A.K. (2004). “Seismic response of vertically irregular frames: Response history and modal pushover analysis”, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 130(8), pp. 1177–1185.
- Chopra A.K. (1966), “The importance of the vertical component of earthquake motions”, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 56(5), pp. 1163–1175.
- ΕΑΚ (2000), *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός*, Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αθήνα, Ελλάδα.
- Fragiadakis M., Vamvatsikos D., and Papadrakakis M. (2006). “Evaluation of the influence of vertical irregularities on the seismic performance of a 9-storey steel frame”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(12), pp. 1489–1509.
- Mander J.B., Priestley M.J.N., and Park R., (1988), Theoretical stress–strain model for confined concrete, *ASCE Journal of Structural Engineering*, 114 (8), pp. 1804–1825.
- McKenna F., and Fenves G.L. (2001), *The OpenSees Command Language Manual - Version 1.2.*, Pacific Earthquake Engineering Research Centre, University of California, Berkeley.
- Munshi J.A., and Ghosh S.K. (1998), “Analyses of seismic performance of a code designed reinforced concrete building”, *Engineering Structures*, 20(7), pp.608–616.
- Papazoglou A.J., and Elnashai A.S. (1996), “Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion”, 25, pp. 1109–1137.
- Repapis K., Vintzeleou E., and C. Zeris, (2006), “Evaluation of the Seismic Performance of Existing RC Buildings: I Suggested Methodology”, *Journal of Earthquake Engineering*, 10, 2, pp. 265-288.
- Vamvatsikos D., and Cornell C.A. (2002), “Incremental dynamic analysis”, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31, pp. 491–514.
- Vamvatsikos D., and Cornell C.A. (2004), “Applied Incremental Dynamic Analysis”, *Earthquake Spectra*, 20(2), pp. 523–553.
- Zeris C., Giannitsas P., Alexandropoulos K., and Vamvatsikos D. (2006), “Inelastic modeling sensitivity of the predicted seismic performance of an existing RC building”, *Proceedings of the 1<sup>st</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva.