

EC8 vs EAK 2000: Κριτική Θεώρηση Διατάξεων Ανάλυσης Κατασκευών

EC8 vs EAK 2000: review of structural analysis provisions

**Ασημίνα ΑΘΑΝΑΤΟΠΟΥΛΟΥ¹, Ιωάννης ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ², Κυριάκος
ΑΝΑΣΤΑΣΙΑΔΗΣ³**

Λέξεις κλειδιά: EC8, Ανάλυση Κατασκευών, Επίπεδα Μοντέλα, Επιρροή Στροφής

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Με δεδομένο ότι οι Ευρωκώδικες πολύ σύντομα (2010) θα αποκτήσουν ισχύ ως πρότυπα-κανονισμοί σε όλα τα κράτη μέλη της ΕΕ, συμπληρούμενοι βέβαια από τα εκάστοτε Εθνικά Παραρτήματα και με παράλληλη απόσυρση των αντίστοιχων Εθνικών Κανονισμών, εξετάζονται κριτικά στην παρούσα εργασία ορισμένες διατάξεις του μείζονος σημασίας για τη σεισμολογία χώρας μας Ευρωκώδικα 8 (EC8, Final Draft). Υπό το φως της σημερινής επιστημονικής γνώσης ελέγχονται ορισμένες διατάξεις του κεφαλαίου 4 (Design of Structures) που αφορούν στην ανάλυση των κατασκευών. Ειδικότερα ελέγχεται η εφαρμοσιμότητα και η συμβατότητα με τη σημερινή επιστημονική γνώση των διατάξεων που αναφέρονται στην ανάλυση χωρικών κτιρίων με χρήση δύο επίπεδων μοντέλων, στην εφαρμογή της απλοποιημένης φασματικής μεθόδου, της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης κ.α. Αποδεικνύεται ότι οι διατάξεις αυτές σε πολλά σημεία τους όχι μόνο δεν αντανακλούν τη σύγχρονη επιστημονική γνώση, αλλά ούτε δίνουν πάντα αποτελέσματα προς την πλευρά της ασφάλειας.

ABSTRACT : In a very short space of time (2010) Eurocodes will become national standards in all member states of EU and, supplemented by the National Annexes, which will replace the corresponding National Codes. It seems therefore reasonable to critically examine some provisions of EC8 (Final Draft), which is of major importance for our country. In particular certain provisions of chapter 4 (Design of Structures) concerning the analysis of structures are reviewed under the light of current scientific knowledge. More specifically, the provisions concerning the analysis of spatial structures by using two planar models, the application of lateral force procedure, the torsional effects and the Non Linear Static Analysis are examined. It turns out that these provisions neither reflect the current scientific knowledge nor give conservative results.

¹ Αναπλ. Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., email: minak@civil.auth.gr

² Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., email: avram@civil.auth.gr

³ Ομότ. Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., email: anastasiadisk@ath.forthnet.gr

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι Ευρωκώδικες πολύ σύντομα θα τεθούν σε ισχύ ως κανονισμοί σε όλα τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, συμπληρούμενοι από τα Εθνικά παραρτήματα. Ταυτόχρονα οι αντίστοιχοι Εθνικοί Κανονισμοί θα αποσυρθούν. Έτσι, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα, το 2010 θα γίνει η αντικατάσταση του ΕΑΚ/2003 με τον EC8. Επειδή η Ελλάδα είναι από τις πλέον σεισμογόνες χώρες της Ευρωπαϊκής ένωσης, η ποιότητα και η ασφάλεια των κατασκευών της είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με τον καλό αντισεισμικό σχεδιασμό τους, ο οποίος εξαρτάται άμεσα από τον εφαρμοζόμενο αντισεισμικό κανονισμό. Ως εκ τούτου μια κριτική παρουσίαση ορισμένων διατάξεων των δύο κανονισμών που αφορούν στην ανάλυση των κατασκευών κρίνεται επίκαιρη και ενδιαφέρουσα.

Οι διατάξεις αυτές εξετάζονται υπό το πρίσμα της άποψης ότι οι αντισεισμικοί κανονισμοί θα πρέπει να αντανakλούν τη σύγχρονη επιστημονική γνώση, να μην παραβιάζουν τις αρχές της δυναμικής των κατασκευών και να παρέχουν οδηγίες για τον ασφαλή και οικονομικό σχεδιασμό των συνήθων κατασκευών (Chopra 2007).

ΧΡΗΣΗ ΔΥΟ ΕΠΙΠΕΔΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ- ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΣΤΡΟΦΗΣ

Η συντριπτική πλειοψηφία των κτιρίων αποτελείται από κατακόρυφα, απλά ή σύνθετα, στοιχεία τα οποία συνδέονται στις στάθμες των ορόφων με ατενή διαφράγματα. Σε αυτές τις περιπτώσεις οι μάζες των ορόφων θεωρούνται συγκεντρωμένες στο ΚΒ κάθε διαφράγματος και οι αδρανειακοί βαθμοί ελευθερίας για κάθε διάφραγμα είναι τρεις: δύο οριζόντιες μετακινήσεις και η στροφή γύρω από κατακόρυφο άξονα. Λόγω της εν γένει ασύμμετρης διάταξης των κατακόρυφων στοιχείων οι τρεις αυτοί βαθμοί ελευθερίας είναι συζευγμένοι. Η επιρροή της σύζευξης στροφής - μεταφορικών μετακινήσεων υπήρξε αντικείμενο πολλών ερευνών τα τελευταία 30 χρόνια, (Tso and Dempsey 1980, Tso and Sadek 1985, Chandler and Hutchinson 1986, Hejal and Chopra 1987, Chandler and Hutchinson 1987, Goel and Chopra 1990a, Goel and Chopra 1990b, Goel and Chopra 1991, Rutenberg et al 1992, Rutenberg 1992, Tso and Zhu 1992, De Stefano et al 1993, Correnza and Hutchinson 1994, Correnza et al 1994, Wong and Tso 1995, Tso and Wong 1995, De la Llera and Chopra 1995, De Stefano and Rutenberg 1997, Ghersi and Rossi 2000, Paulay 1997, Rutenberg 1998, Anastassiadis et al 1998, Rutenberg 2002, Tso and Myslimaj 2002, Stathopoulos and Anagnostopoulos 2002, De Stefano and Pintucchi 2002, Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos 2005) οι οποίες κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι ελαστικές στροφές των διαφραγμάτων των ασύμμετρων κτιρίων εξαρτώνται από το λόγο ω_z/ω_y , (ω_z και ω_y η θεμελιώδης ασύζευκτη στρεπτική ιδιοσυχνότητα γύρω από άξονα z και μεταφορική κατά y, αντίστοιχα) την δομική ή στατική εκκεντρότητα και το ποσοστό απόσβεσης.

- Η ανελαστική απόκριση, εκτός από τους ανωτέρω παράγοντες, εξαρτάται από την εκκεντρότητα των αντοχών και την κατανομή των αντοχών σε κάτοψη και βέβαια από τη σεισμική διέγερση.
- Η ασυμμετρία στην κάτοψη αυξάνει τη μέγιστη ακραία μετακίνηση των κατακόρυφων στοιχείων σε σχέση με την αντίστοιχη μετακίνηση ενός συμμετρικού συστήματος.
- Η μέγιστη παραμόρφωση εμφανίζεται στη εύκαμπτη πλευρά ενώ η μέγιστη απαίτηση πλαστιμότητας μπορεί να αφορά σε στοιχεία της δύσκαμπτης πλευράς.

Στον ΕΑΚ-2003 η ανάλυση γίνεται πάντοτε χρησιμοποιώντας χωρικό προσομοίωμα της κατασκευής, ακόμα και για κτίρια με δύο άξονες συμμετρίας λόγω της στρεπτικής επιπόνησης που εισάγει πάντοτε η τυχηματική εκκεντρότητα (ΕΑΚ, Σ.3.1.2[3]. Στον EC8 επιτρέπεται η χρήση επίπεδων μοντέλων στις ακόλουθες περιπτώσεις: α) Το κτίριο πληροί τα κριτήρια κανονικότητας σε κάτοψη. (β) Το κτίριο έχει σχετικά δύσκαμπτα και ομοιόμορφα κατανεμημένα διαχωριστικά (π.χ. τοιχοποιίες), το ύψος του είναι μικρότερο από 10 m και οι πλάκες των ορόφων λειτουργούν ως απολύτως στερεοί δίσκοι. Στην περίπτωση (β) οι τιμές της απόκρισης που προκύπτουν από την ανάλυση επίπεδων μοντέλων πολλαπλασιάζονται με 1.25. Και στις δύο περιπτώσεις η επιρροή της στροφής λαμβάνεται υπόψη πολλαπλασιάζοντας της τιμές της απόκρισης με τον αυξητικό συντελεστή δ και θεωρώντας διπλάσια τιμή για την τυχηματική εκκεντρότητα:

$$\delta = 1 + 1.2 \frac{x}{L_e} \quad (1)$$

όπου:

x : η απόσταση του στοιχείου από το κέντρο μάζας και

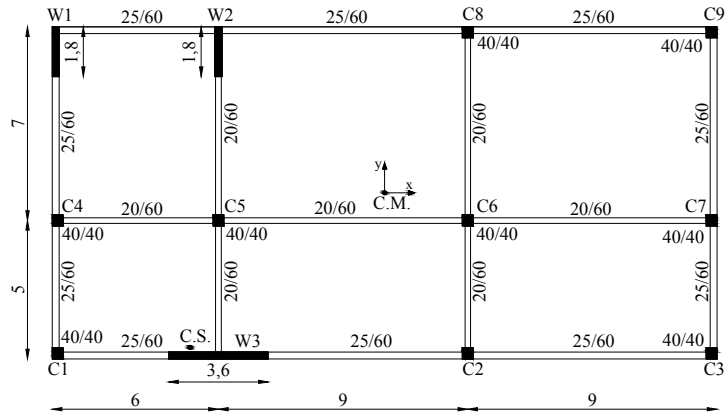
L_e : το μήκος της κάτοψης του κτιρίου κάθετα στην θεωρούμενη διεύθυνση διέγερσης.

Η χρήση επίπεδων μοντέλων και η εκτίμηση της επιρροής της στρέψης με τις απλοποιητικές αυτές σχέσεις και λαμβάνοντας υπόψη μόνο την τυχηματική εκκεντρότητα κατά την απλοποιημένη φασματική μέθοδο εμπεριέχει, χωρίς όμως αυτό να αναφέρεται ρητά τις εξής παραδοχές:

- Η φυσική σύζευξη μεταφορικών και στρεπτικών ταλαντώσεων αγνοείται.
- Η δυσκαμψία των κατακόρυφων στοιχείων θεωρείται ομοιόμορφα κατανεμημένη σε κάτοψη.

Οι παραδοχές αυτές μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντική υποεκτίμηση της απόκρισης. Ως ενδεικτικό παράδειγμα, το μονώροφο κτίριο του Σχήματος 1 αναλύεται με χρήση επίπεδων και χωρικών μοντέλων σύμφωνα με τις διατάξεις του EC8 με αμφότερες τις μεθόδους γραμμικής ανάλυσης που συστήνει ο κανονισμός. Τα αποτελέσματα δίνονται στον 'Πίνακα 1'. Στην τελευταία στήλη του 'Πίνακα 1' δίνεται το ποσοστό απόκλισης της απόκρισης που προκύπτει με χρήση επίπεδων μοντέλων σε σχέση με τις αντίστοιχες τιμές που προκύπτουν με

χρήση χωρικών μοντέλων. Παρατηρούμε ότι η ανάλυση με επίπεδα μοντέλα για το συγκεκριμένο κτίριο οδηγεί σε κάποια στοιχεία (υποστύλωμα C9) σε υποεκτίμηση έως και κατά 68.5% των μεγεθών απόκρισης.



Σχήμα 1. Μονώροφο μη κανονικό κτίριο

Πίνακας 1. Τιμές απόκρισης με χρήση χωρικών (R_{3d}) και επίπεδων (R_{2d}) μοντέλων.

Απλοποιημένη Φασματική Μέθοδος ($T_x=0.1264$, $T_y=0.2043$ sec)

		R_{3d}	R_{2d}	$DR=(R_{2d}-R_{3d})/R_{3d}(\%)$
C3	M_x	88.07	43.45	-50.66
	M_y	6.10	14.60	139.48
	u_{x1}	0.000728	0.001714	135.34
	u_{y1}	0.009232	0.004565	-50.56
C9	M_x	83.86	41.32	-50.72
	M_y	43.86	15.15	-65.45
	u_{x1}	0.004897	0.001714	-64.99
	u_{y1}	0.009232	0.004565	-50.56
Δυναμική Φασματική Μέθοδος ($T_1=0.37$ sec)				
C3	M_x	91.44	43.45	-52.49
	M_y	4.98	14.60	193.00
	u_{x1}	0.000592	0.001714	189.35
	u_{y1}	0.009583	0.004565	-52.37
C9	M_x	87.08	41.32	-52.55
	M_y	48.16	15.15	-68.54
	u_{x1}	0.005379	0.001714	-68.13
	u_{y1}	0.009583	0.004565	-52.37

Τα ανωτέρω αποτελέσματα δείχνουν ότι η ανάλυση ασύμμετρων κτιρίων με χρήση επίπεδων μοντέλων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική υποεκτίμηση των μεγεθών απόκρισης των στοιχείων της εύκαμπτης πλευράς (68.54% για το

ανωτέρω παράδειγμα). Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη διαρροή αυτών των στοιχείων, ακόμα και για σεισμούς πολύ μικρότερους από το σεισμό σχεδιασμού. Επί πλέον, με τα ευρέως διαθέσιμα σήμερα υπολογιστικά μέσα η διάταξη αυτή κρίνεται ότι δεν εξυπηρετεί κανένα στόχο και θα πρέπει να καταργηθεί.

ΙΣΟΔΥΝΑΜΕΣ ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΚΚΕΝΤΡΟΤΗΤΕΣ

Στον ΕΑΚ/2000 οι εκκεντρότητες σχεδιασμού, οι αποστάσεις δηλαδή των οριζοντίων στατικών σεισμικών δυνάμεων από τον ελαστικό άξονα (πραγματικό ή πλασματικό (Makarios and Anastassiadis 1998a, Makarios and Anastassiadis 1998b, Doudoumis and Athanatoroulou 2008)), είναι το άθροισμα της τυχηματικής εκκεντρότητας και της ισοδύναμης στατικής εκκεντρότητας. Με την τυχηματική εκκεντρότητα λαμβάνονται υπόψη οι στρεπτικές επιπονήσεις που οφείλονται σε παράγοντες που δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν: (α) αποκλίσεις μεταξύ της πραγματικής και της υπολογιστικής κατανομής μαζών, δυσκαμψιών και αντοχών, και (β) διαφορικές κινήσεις του εδάφους που έχουν ως αποτέλεσμα τη στρεπτική διέγερση της βάσης της κατασκευής (ΕΑΚ, παρ. 3.3.1 και Σ.3.3.1[1]). Με τις ισοδύναμες στατικές εκκεντρότητες λαμβάνονται υπόψη οι στρεπτικές ταλαντώσεις της κατασκευής λόγω μεταφορικής σεισμικής διέγερσης της βάσης (ΕΑΚ, Σ.3.3.3[1]).

Συστηματικές έρευνες των διατάξεων των κανονισμών που αναφέρονται στην επιρροή των περί τον κατακόρυφο άξονα στροφών κτιρίων κατέληξαν στα παρακάτω συμπεράσματα (Chandler and Duan 1991, Tso and Tso 1992, Zhu and Tso 1992, Chopra and Goel 1991, Rutenberg et al. 1992, De Stefano et al. 1993, Duan and Chandler 1993, Chandler and Duan 1993):

- Για εφαρμογή των στατικών σεισμικών δυνάμεων στο κέντρο μάζας ($e_o=e_f$) παρατηρούνται μεγάλες απαιτήσεις πλαστιμότητας στα στοιχεία της δύσκαμπτης πλευράς. Οι απαιτήσεις πλαστιμότητας μειώνονται καθώς το σημείο εφαρμογής των σεισμικών δυνάμεων μετακινείται προς το ελαστικό κέντρο.
- Για εφαρμογή των στατικών σεισμικών δυνάμεων στο κέντρο μάζας ($e_o=e_f$) παρατηρούνται μεγάλες ανελαστικές μετακινήσεις στα στοιχεία της εύκαμπτης πλευράς.
- Για $e_f > e_o$ και $e_f < e_o$ παρατηρούνται οι πιο ικανοποιητικές απαιτήσεις πλαστιμότητας σε όλα τα στοιχεία. Επί πλέον παρατηρείται πιο ικανοποιητική κατανομή των αντοχών.

Όπου:

e_o : η στατική ή δομική εκκεντρότητα.

e_r, e_f : η απόσταση εφαρμογής των στατικών σεισμικών δυνάμεων από το ελαστικό κέντρο.

Στον EC8 οι ισοδύναμες στατικές εκκεντρότητες αγνοούνται παντελώς. Δηλαδή κατά την απλοποιημένη φασματική μέθοδο οι στατικές σεισμικές δυνάμεις

εφαρμόζονται στο κέντρο μάζας της κάτοψης και λαμβάνεται υπόψη μόνο η τυχηματική εκκεντρότητα με τη βοήθεια στρεπτικών ροπών. Επιπλέον η διεύθυνση των στατικών σεισμικών δυνάμεων δεν καθορίζεται.

ΠΕΔΙΟ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΑΦΜ

Στην παράγραφο 4.3.3.2.1(1P) του EC8 αναφέρεται ότι η Απλοποιημένη Φασματική Μέθοδος (ΑΦΜ, Lateral Force Procedure) εφαρμόζεται σε κτίρια των οποίων η απόκριση δεν επηρεάζεται σημαντικά από τη συμμετοχή ιδιομορφών ανώτερων από την θεμελιώδη σε κάθε κύρια διεύθυνση (“whose response is not significantly affected by contributions from modes of vibration higher than the fundamental mode in each principal direction”). Η διάταξη αυτή εγείρει δυο ερωτήματα:

(α) “Θεμελιώδης ιδιομορφή σε κάθε κύρια διεύθυνση” είναι άγνωστη στη Δυναμική των Κατασκευών. Αντίθετα γνωρίζουμε ότι οι τρεις ελευθερίες κίνησης συνυπάρχουν, επομένως κάθε ιδιομορφή έχει γενικώς συνιστώσες και για τις τρεις ελευθερίες κίνησης. Η έννοια της ιδιομορφής ή ιδιοπερίοδου σε συγκεκριμένη διεύθυνση έχει νόημα μόνον εφόσον αναφέρεται στην *ασύζευκτη* κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση.

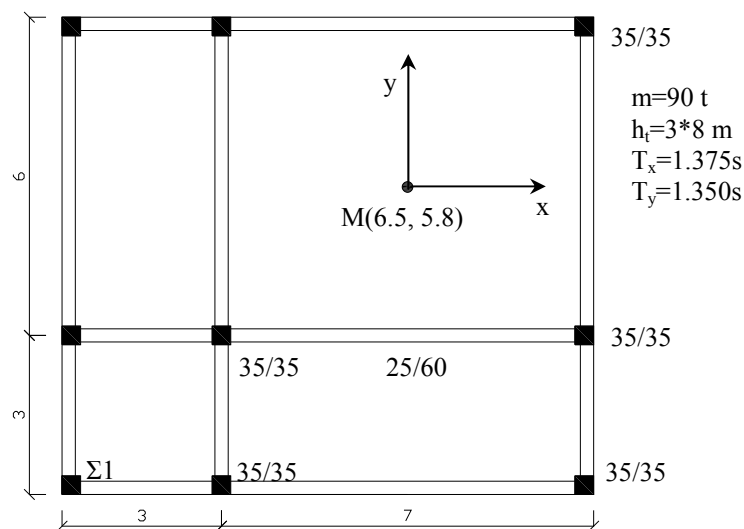
(β) Οι κύριες διευθύνσεις (“principal directions”) στον EC8 ορίζονται μόνο σε κτίρια στα οποία τα κατακόρυφα στοιχεία είναι διατεταγμένα σε δύο οριζόντιες κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις. Για τα υπόλοιπα κτίρια, τα οποία αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό στον ελληνικό χώρο (και όχι μόνον), ο EC8 δεν δίνει οδηγίες για τον προσδιορισμό τους, ενώ υπάρχουν αντίστοιχες δημοσιευμένες εργασίες (Makarios and Anastassiadis 1998, Athanatoroulou and Doudoumis 2008). Στον ΕΑΚ/2000 οι (πλασματικές) κύριες διευθύνσεις ορίζονται με βάση τις εργασίες των Makarios and Anastassiadis 1998.

Στην πρόταση (2P) της ίδιας παραγράφου του EC8 αναφέρεται ότι η πρόταση (1P) ισχύει εάν ικανοποιούνται οι εξής δύο απαιτήσεις:

(α) Τα κτίρια έχουν θεμελιώδεις ιδιοπεριόδους σε δύο κύριες διευθύνσεις οι οποίες είναι μικρότερες από $4T_c$ ή 2 sec.

(β) Τα κτίρια είναι κανονικά καθ’ ύψος.

Η τεκμηρίωση του αποδεκτού αυτών των απλοποιήσεων που επιτρέπει ο EC8 για την ανάλυση είναι ανύπαρκτη στην υπάρχουσα διεθνή βιβλιογραφία. Κατά τη γνώμη μας (και γνώση μας) στερούνται παντελώς θεωρητικού υπόβαθρου και η ισχύ τους δεν συνεπάγεται την κυριαρχία της θεμελιώδους ιδιομορφής. Ως ενδεικτικό παράδειγμα αναλύεται το κτίριο του **Σχήματος 2**. Διενεργείται ιδιομορφική ανάλυση και υπολογίζονται οι ιδιοπεριόδοι, οι ιδιομορφές και τα ποσοστά συμμετοχής της κάθε ιδιομορφής στην τελική απόκριση, για ανεξάρτητη διέγερση, παράλληλη προς τον άξονα x και y αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα δίνονται στον ‘Πίνακα 2’. Παρατηρούμε ότι για το συγκεκριμένο κτίριο ενώ ικανοποιούνται οι συνθήκες (α) και (β) εν τούτοις, ιδιαίτερα για διέγερση παράλληλα με τον άξονα y, οι τρεις πρώτες ιδιομορφές συμμετέχουν περίπου με το ίδιο ποσοστό.



Σχήμα 2. Κάτοψη οκταώροφου κανονικού καθ' ύψος κτιρίου.

Πίνακας 2. Ιδιοπερίοδοι και ποσοστά συμμετοχής των ιδιομορφών οκταώροφου κανονικού καθ' ύψος κτιρίου.

Ιδιομορφή	T	Ποσοστά συμμετοχής για διεγερση x	Ποσοστά συμμετοχής για διεγερση y
1	1.826	16.095	21.272
2	1.366	48.378	30.523
3	1.152	14.502	27.292
4	0.690	2.131	2.906
5	0.507	6.755	4.318
6	0.431	2.292	3.912
7	0.395	0.872	1.199
8	0.289	2.982	1.906
9	0.284	0.230	0.351
10	0.246	0.985	1.684

Επί πλέον διενεργήθηκε αντισεισμικός υπολογισμός του κτιρίου με τη Δυναμική Φασματική Μέθοδο (ΔΦΜ) και την Απλοποιημένη Φασματική Μέθοδο (ΑΦΜ) με χρήση του φάσματος σχεδιασμού του ΕΑΚ (ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙ και κατηγορία εδάφους Β). Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το υποστύλωμα Σ₁ στο ισόγειο (Σ₁₁) και στον 8^ο όροφο (Σ₁₈) δίνονται στον 'Πίνακα 3'. Με έντονους χαρακτήρες δίνεται το πηλίκο των τιμών της ΑΦΜ προς τις τιμές της ΔΦΜ. Παρατηρούμε ότι η ΑΦΜ δίνει για όλα τα εντατικά μεγέθη (πλην της

αξονικής δύναμης στο ισόγειο) *μικρότερες* τιμές από τη ΔΦΜ. Η μείωση για το στοιχείο Σ_{18} ανέρχεται στο 50% ενώ για το στοιχείο Σ_{11} στο 22%.

Πίνακας 3. Εντατικά μεγέθη του στύλου $\Sigma 1$ με τη ΔΦΜ και την ΑΦΜ.

Στήλη 1	N	Q _x	Q _y	M _x	M _y
Σ_{18} (ΔΦΜ)	11.87	14.23	13.69	19.46	20.25
Σ_{18} (ΑΦΜ)	5.96	8.28	7.48	10.39	11.51
ΑΦΜ/ΔΦΜ	0.50	0.58	0.55	0.53	0.57
Σ_{11} (ΔΦΜ)	704.17	64.96	61.45	112.03	118.61
Σ_{11} (ΑΦΜ)	754.56	54.02	48.11	88.78	99.69
ΑΦΜ/ΔΦΜ	1.07	0.83	0.78	0.79	0.84

ΣΤΑΤΙΚΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ (PUSHOVER)

Κατανομή οριζοντίων φορτίων

Στην παράγραφο 4.3.3.4.2.2 αναφέρεται ότι η στατική μη γραμμική ανάλυση θα πρέπει να διεξάγεται με δύο κατανομές φορτίων: (α) μια “ομοιόμορφη κατανομή” με δυνάμεις ανάλογες προς τις μάζες και (β) μια ιδιομορφική κατανομή με δυνάμεις ανάλογες προς αυτές που καθορίζονται κατά τη θεωρούμενη διεύθυνση στην ελαστική ανάλυση (σύμφωνα με τις παραγράφους 4.3.3.2 (ΑΦΜ) και 4.3.3.3 (ΔΦΜ)).

Στην περίπτωση (β) θα πρέπει να διευκρινιστεί: (i) Αν οι κατανομές των ‘δυνάμεων’ που θα χρησιμοποιηθούν περιλαμβάνουν μόνο δυνάμεις ή και ροπές και (ii) σε ποια (ή ποιες) ιδιομορφή(ες) αντιστοιχούν οι ιδιομορφικές αυτές ‘δυνάμεις’. Είναι γνωστό ότι η κατανομή των φορτίων που χρησιμοποιούνται στη στατική μη γραμμική ανάλυση επηρεάζουν σημαντικά τη μορφή της ικανοτικής καμπύλης, τη μετακίνηση στόχο καθώς και το σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων (Krawinkler and Seneviratna (1998), Μανούκας et al. (2006), Μανούκας et al. (2008)).

Επιρροή στρέψης

Κατά τη σεισμική απόκριση ασύμμετρων κτιρίων παρατηρείται αύξηση των μετακινήσεων των περιμετρικών στοιχείων λόγω της σύζευξης μεταφορικών-στρεπτικών ταλαντώσεων. Κατά την στατική μη γραμμική ανάλυση τα φορτία, σύμφωνα με τον EC8, ασκούνται στο ΚΜ λαμβάνοντας υπόψη τις τυχηματικές εκκεντρότητες. Αυτή η ανάλυση μπορεί να “υποεκτιμήσει σημαντικά τις παραμορφώσεις των στοιχείων της δύσκαμπτης πλευράς στρεπτικά ευαίσθητων κτιρίων και για το λόγο αυτό οι παραμορφώσεις αυτών των στοιχείων *πολ/ζονται* με ένα μεγεθυντικό συντελεστή που στηρίζεται στα αποτελέσματα της “ιδιομορφικής ανάλυσης ενός χωρικού προσομοιώματος” (παρ. 4.3.3.4.2.7). Η διάταξη αυτή αφενός δεν είναι θεωρητικά τεκμηριωμένη και αφετέρου για να εφαρμοστεί ως έχει θα πρέπει να διευκρινιστεί πώς ορίζεται ο συντελεστής αυτός.

Επί πλέον στην περίπτωση ανάλυσης χωρικού προσομοιώματος η ανάλυση για τέσσερις διαφορετικές θέσεις της μάζας, για δύο διαφορετικές κατανομές φορτίων με δύο διαφορετικές φορές των δυνάμεων οδηγεί σε 16 στατικές μη γραμμικές αναλύσεις. Διαπιστώνεται ότι ο όγκος των υπολογισμών υπερβαίνει τα εφικτά στη δομική πράξη όρια.

Χωρική επαλληλία

Γενικά, οι δύο οριζόντιες συνιστώσες της σεισμικής διέγερσης θεωρούνται ταυτόχρονες σε όλους τους αντισεισμικούς κανονισμούς. Ο υπολογισμός της απόκρισης για ταυτόχρονη δράση των δύο οριζόντιων συνιστωσών γίνεται υπολογίζοντας χωριστά την απόκριση λόγω κάθε συνιστώσας και συνδυάζοντας τις αποκρίσεις με κάποιο πιθανοτικό κανόνα χωρικής επαλληλίας (SRSS ή ποσοστιαίο συνδυασμοί).

Η αρχή της επαλληλίας ισχύει στην ελαστική περιοχή συμπεριφοράς και όχι στην ανελαστική. Επομένως η χωρική επαλληλία, όπως και κάθε επαλληλία, ισχύει για τις ελαστικές μεθόδους ανάλυσης και όχι τις ανελαστικές. Η σχετική διάταξη του EC8 (4.3.3.5.1.(6)) εγείρει πολλά ερωτηματικά καθότι τα αποτελέσματα της μεθόδου βασίζονται σε κανόνες που παραβιάζουν θεμελιώδεις αρχές της Μηχανικής.

Συμπερασματικά, η Ανελαστική Στατική Μέθοδος του EC-8 με τη σημερινή της μορφή απέχει πολύ από το να χαρακτηριστεί αξιόπιστη. Συνεπώς, απαιτούνται σημαντικές διορθωτικές τροποποιήσεις και εν γένει βελτιώσεις, ώστε να μπορεί στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί με ασφάλεια στη δομική πράξη.

ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Στην παράγραφο 4.3.3.4.1, πρόταση 7(P) του EC8 αναφέρεται ότι η σεισμική δράση θα πρέπει να εφαρμόζεται και κατά τη θετική και κατά την αρνητική διεύθυνση και θα χρησιμοποιείται η μέγιστη απόκριση που προκύπτει από τις δύο αναλύσεις (“The seismic action shall be applied in both positive and negative directions and the maximum seismic effects as a result of this shall be used”). Στη συνέχεια στην παράγραφο 4.3.3.5.1, πρόταση 7(P) αναφέρεται ότι όταν χρησιμοποιείται για την ανάλυση χωρικό προσομοίωμα, τα επιταχυνσιογραφήματα εφαρμόζονται ταυτόχρονα κατά μήκος των *δύο οριζοντίων αξόνων* του κτιρίου. Για την πρώτη από τις ανωτέρω δύο προτάσεις θα πρέπει να διευκρινιστεί (ίσως με κάποιο σχήμα) πώς εφαρμόζεται στην περίπτωση ανάλυσης χωρικού προσομοιώματος. Για τη δεύτερη πρόταση θα πρέπει να δοθούν διευκρινίσεις για το ποιοι είναι οι δύο οριζόντιοι άξονες του κτιρίου, δεδομένου ότι έχει αποδειχθεί ότι η διεύθυνση (ο προσανατολισμός) των δύο οριζόντιων επιταχυνσιογραφημάτων επηρεάζει έντονα τα μεγέθη απόκρισης (Athanatoroulou 2005).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Εν κατακλείδι, από την κριτική παρουσίαση που πραγματοποιήθηκε συνάγονται τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Η διάταξη που αναφέρεται στην ανάλυση χωρικών κτιρίων με χρήση επίπεδων μοντέλων θα πρέπει να καταργηθεί.
- Το πεδίο εφαρμογής της απλοποιημένης φασματικής μεθόδου πρέπει να τροποποιηθεί.
- Η θέση σε κάτοψη των σεισμικών δυνάμεων κατά την εφαρμογή της απλοποιημένης φασματικής μεθόδου πρέπει να τροποποιηθεί.
- Η εφαρμογή της στατικής μη γραμμικής ανάλυσης, με τη σημερινή της μορφή, σε χωρικούς φορείς (αλλά και σε κάποιες κατηγορίες επίπεδων πλαισίων) μπορεί λόγω των παραδοχών της να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα.
- Οι ‘κύριες διευθύνσεις’ που αναφέρονται σε αρκετά σημεία θα πρέπει να καθοριστούν.
- Απαιτούνται περαιτέρω διευκρινίσεις για την εφαρμογή της δυναμικής μη γραμμικής ανάλυσης.

Τελευταίο, αλλά όχι έσχατο, ένα σχόλιο που αφορά στον τρόπο αρίθμησης των διατάξεων. Η χρήση πέντε ή και έξι αριθμών (π.χ. 4.3.3.5.1(2)), που είναι ίσως αναπόφευκτη σε ένα νομικό κείμενο για δικηγόρους, είναι μάλλον ακατάλληλη για έναν κανονισμό που απευθύνεται σε μηχανικούς και ασφαλώς λίγο συνεισφέρει στην κατανόηση της αλληλουχίας των διαφόρων διατάξεων και της εν γένει δομής του.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Anastassiadis K., Athanatopoulou A., Makarios T. “Equivalent static eccentricities in the simplified methods of seismic analysis of buildings”. Earthquake Spectra 14, Issue 1, (1998) 1-34.

Athanatopoulou A. M., “Critical orientation of three correlated seismic components”. Engineering Structures, Volume 27, Issue 2, (2005) 301-312.

Chandler A. M. and Hutchinson G. L., “Evaluation of code torsional provisions by a time history approach”. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 15, No 4, (1987) 491-516

Chandler A. M and Duan X.N., “Evaluation of factors influencing the inelastic seismic performance of torsionally asymmetric buildings”. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 20, (1991) 87-95

Chandler A. M and Duan X.N., “A modified static procedure for the design of torsionally unbalanced multistory frame buildings”. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 22, (1993) 447-462

De la Llera J. C. and Chopra A. K., “Understanding the inelastic behaviour of asymmetric-plan buildings”. Earthquake Engrg Struct. Dyn., 24 (1995) 549-572

De Stefano M. and Pintucchi B., “A review of research on seismic behavior of

irregular building structures since 2002”. Bull Earthquake Eng, Vol. 6, No 2 (2008) 285-308

De Stefano M., Faella G. and Ramasco R., “Inelastic response and design criteria of plan-wise asymmetric systems”. Earthquake Engng. Struct. Dyn., 22 (1993) 245-259

De Stefano M., Rutenberg A., “A comparison of the present SEAOC/UBC torsional provisions with the old ones”. Engineering Structures, Vol. 19 (1997) 655-664

Doudoumis I. N. and Athanatopoulou A. M., “Invariant torsion properties of multistorey asymmetric buildings”. The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 17, Issue 1, (2008) 79-97.

Doudoumis I. N. and Athanatopoulou A. M., “Principal directions under lateral loading in multistorey asymmetric buildings”. The Structural Design of Tall and Special Buildings, Vol. 17, Issue 4, (2008) 773-794.

Duan X. N. and Chandler A. M., “Inelastic seismic response of code-designed multi-storey frame buildings with regular asymmetry”. Earthquake Engrg. Struct. Dyn., Vol. 22, (1993) 431-445

“Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings”. European Committee for Standardization (2003)

Gherzi A., Rossi P.P., “Formulation of design eccentricity to reduce ductility demand in asymmetric buildings”. Engineering Structures, Vol. 22, No 7 (2000) 857-871

Goel R. K. and Chopra A. K., “Inelastic seismic response of one-story, asymmetric plan systems”, Report No. EERC 90/14 (1990)

Goel R.K., Chopra A.K., “Inelastic seismic response of one-storey, asymmetric-plan systems: effects of stiffness and strength distribution”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.19, (1990) 949–970

Goel R.K., Chopra A.K., “Inelastic seismic response of one-storey, asymmetric-plan systems: effects of system parameters and yielding”. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 20, (1991) 201-222

Hejal R. and Chopra A. K., “Earthquake response of torsionally-coupled buildings”. Report No. UCB/EERC-87/20, Earthquake Engineering Research Center (1987)

Krawinkler H., and Seneviratna G.D.P.K., “Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation”. Engineering Structures, Vol. 20, No 4-6 (1998) 452–464

Makarios T., Anastassiadis K., “Real and fictitious elastic axes of multi-storey buildings: applications”. The Structural Design of Tall Buildings, Volume 7, Issue 1, (1998) 57-71.

Makarios T., Anastassiadis K., “Real and fictitious elastic axes of multi-storey buildings: theory”. The Structural Design of Tall Buildings, Volume 7, Issue 1, (1998) 33-55.

Μανούκας Γ.Η., Αθανατοπούλου Α.Μ., και Αβραμίδης Ι.Ε.. “Συγκριτική διερεύνηση παραλλαγών της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης βάσει σύγχρονων κανονιστικών κειμένων (FEMA 356-440, EC-8, ΚΑΝ.ΕΠΕ.)”, Πρακτικά 15ου Πανελληνίου Συνεδρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος, Αλεξανδρούπολη (2006)

Μανούκας, Γ., Αθανατοπούλου, Α., Αβραμίδης Ι., “Στατική Υπερωθητική Ανάλυση σε Χωρικά Συστήματα -Κανονιστικές Διατάξεις και Προβλήματα Εφαρμογή”. 3ο Πανελλήνιο Συνέδριο Αντισεισμικής Μηχανικής & Τεχνικής Σεισμολογίας, Άρθρο 1794, Αθήνα, 5-7 Νοεμβρίου (2008)

Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας, “Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός (ΕΑΚ 2000/2003)”.

Paulay T., “Seismic torsional effects on ductile structural wall systems”. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 1, No 4 (1997) 721-45

Rutenberg A., “EAE Task Group (TG) 8: Behavior of irregular and complex structures—State of the art report: Seismic non linear response of code-designed asymmetric structures”. *Proceedings of the 11th European conference on earthquake engineering*, September 6-11, PARIS (1998) CNIT, Paris la Défense, France

Rutenberg A., EAE Task Group (TG) 8: behaviour and irregular and complex structures—progress since 1998, *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, London, September (2002) CD ROM

Rutenberg A., Eisenberger M. and Shohet G., “Inelastic seismic response of code-designed single storey asymmetric structures”. *Engng Struct.*, Vol. 14, No 2 (1992) 91- 102

Rutenberg A., “Nonlinear response of asymmetric building structures and seismic codes: a state of the art review”. *European Earthquake Eng.*, Vol 2, (1992) 3-19

Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos S.A., Inelastic earthquake induced torsion in buildings: results and conclusions from realistic models, *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, London, September (2002).

Stathopoulos K.G., Anagnostopoulos S.A., “Inelastic torsion of multi-storey buildings under earthquake excitations”. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 34, (2005) 1449-1465.

Tso W. K. and Dempsey K. M., “Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity”. *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol 8, (1980) 275-289

Tso W. K. and Sadek A. W., “Inelastic seismic response of simple eccentric structures”. *Earthquake eng. struct. dyn.*, Vol. 13, (1985) 255-269

Tso W. K. and Wong C. M., “Seismic displacements of torsionally unbalanced buildings”. *J. Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 24, No 10 (1995) 1371-1387

Tso W.K., Myslimaj B., “Effect of strength distribution on the inelastic torsional response of asymmetric structural systems”. *Proceedings of the 12th European conference on earthquake engineering*, CD ROM, London, September (2002)

Tso W. K. and Zhu T. J., “Design of torsionally unbalanced structural systems based on code provisions I: Ductility demand”. *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, Vol. 21, (1992) 609-627

Zhu T. J. and Tso W. K., “Design of torsionally unbalanced structural systems based on code provisions II: Strength distribution”. *Earthquake Engrg. Struct. Dyn.*, Vol. 21, (1992) 629-644.

Wong C. M. and Tso W. K., “Evaluation of seismic torsional provisions in Uniform Building Code”. *J Struct. Engng*, ASCE, Vol. 121, (1995) 1436 1442