

## Αξιολόγηση μεθοδολογίας Στατικής Υπερωθητικής Ανάλυσης για ασύμμετρα χωρικά συστήματα

Γρηγόριος Μανούκας

Δρ. Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ, [grman7@otenet.gr](mailto:grman7@otenet.gr)

### Εκτενής περίληψη

Τα τελευταία χρόνια υπάρχει αυξημένο ενδιαφέρον τόσο των ερευνητών, όσο και των μηχανικών της πράξης για τη διενέργεια ανελαστικών αναλύσεων στα πλαίσια του αντισεισμικού σχεδιασμού κατασκευών. Η ανελαστική δυναμική μέθοδος, η οποία αποτελεί το ακριβέστερο εργαλείο για τέτοιου είδους αναλύσεις, παρουσιάζει - πέραν του πολύ μεγάλου υπολογιστικού κόστους - μία σειρά δυσκολιών που καθιστούν την εφαρμογή της στη συμβατική δομική πράξη προβληματική. Για το λόγο αυτό καταβλήθηκαν και συνεχίζουν να καταβάλλονται πολλές προσπάθειες για την εύρεση απλοποιημένων μεθόδων προσεγγιστικού υπολογισμού της ανελαστικής συμπεριφοράς κατασκευών. Καρπός αυτών των προσπαθειών υπήρξε η ανάπτυξη σε διάφορες παραλλαγές της Στατικής Υπερωθητικής Ανάλυσης (ΣΥΑ) ή Pushover Analysis, η οποία υιοθετήθηκε από διεθνή κανονιστικά ή προκανονιστικά κείμενα και εφαρμόζεται ευρέως στην πράξη.

Παρόλα αυτά, έχει εγκαίρως επισημανθεί από πολλούς ερευνητές ότι η ΣΥΑ στερείται θεωρητικής βάσης και δεν παρέχει πάντα ικανοποιητική ακρίβεια, ιδιαίτερα μάλιστα στην περίπτωση εφαρμογής της σε ασύμμετρα χωρικά συστήματα. Ένας από τους παράγοντες που εισάγουν πρόσθετα σφάλματα σε αυτή την περίπτωση είναι η χρήση απλοποιητικών κανόνων χωρικής επαλληλίας (SRSS ή ποσοστιαίοι συνδυασμοί) για τη συνεκτίμηση της ταυτόχρονης σεισμικής διέγερσης σε δύο διευθύνσεις, ενώ είναι γνωστό ότι στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας. Με στόχο την άρση της παραπάνω αδυναμίας, προτάθηκε μια πολύ-ιδιομορφική παραλλαγή της ΣΥΑ που εισάγει μια νέα τεχνική για τη συνεκτίμηση της ταυτόχρονης δράσης των δύο οριζόντιων σεισμικών συνιστωσών, με κατάλληλη τροποποίηση των ιδιοτήτων του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Με την τεχνική αυτή αποφεύγεται η χρήση απλοποιητικών κανόνων χωρικής επαλληλίας, καθώς δεν απαιτείται ανεξάρτητη ανάλυση του φορέα για κάθε διεύθυνση σεισμικής διέγερσης. Η ανάλυση διεξάγεται για διάφορους συνδυασμούς των δύο οριζόντιων σεισμικών συνιστωσών με στόχο την περιβολή της ακριβούς απόκρισης. Η εν λόγω παραλλαγή της ΣΥΑ ελέγχθηκε μέσω πληθώρας εφαρμογών που κατέδειξαν την αξιοπιστία της, σε σύγκριση και με άλλες παρόμοιες μεθοδολογίες.

Ωστόσο, η προταθείσα μεθοδολογία δεν αποδείχθηκε το ίδιο αποτελεσματική για όλα τα μεγέθη απόκρισης. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρήθηκε σε κάποιες περιπτώσεις μειωμένη ακρίβεια στον προσδιορισμό των μεγεθών απόκρισης στη δύσκαμπτη πλευρά υψηλών ασύμμετρων κτιρίων. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, που παρατηρείται στο σύνολο σχεδόν των παραλλαγών της ΣΥΑ, πρόσφατα αναπτύχθηκε μια βελτιωμένη εκδοχή της μεθοδολογίας. Η βελτίωση συνίσταται στη διόρθωση των μεγεθών απόκρισης της δύσκαμπτης πλευράς με τη χρήση τροποποιητικών συντελεστών που προκύπτουν από ιδιομορφική ανάλυση.

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η περαιτέρω αξιολόγηση της βελτιωμένης αυτής μεθοδολογίας μέσα από μια σειρά εφαρμογών σε ασύμμετρα πολυώροφα κτίρια από οπλισμένο σκυρόδεμα. Αρχικά, γίνεται μια συνοπτική αναφορά στο θεωρητικό υπόβαθρο και τα διαδοχικά

βήματα που απαιτούνται για την εφαρμογή της, με ιδιαίτερη έμφαση στον υπολογισμό των διορθωτικών συντελεστών οι οποίοι υπολογίζονται για κάθε ιδιομορφή, για κάθε όροφο και για κάθε μέγεθος απόκρισης ξεχωριστά, μέσω ελαστικής ιδιομορφικής ανάλυσης (που ούτως ή άλλως απαιτείται για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας). Ειδικότερα, η «ιδιομορφική» τιμή ενός μεγέθους απόκρισης  $R_i$  (που αντιστοιχεί στην «ιδιομορφή»  $i$ ) που προκύπτει από την υπερωθητική ανάλυση πολλαπλασιάζεται με ένα συντελεστή  $f_{R_i}$  που δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

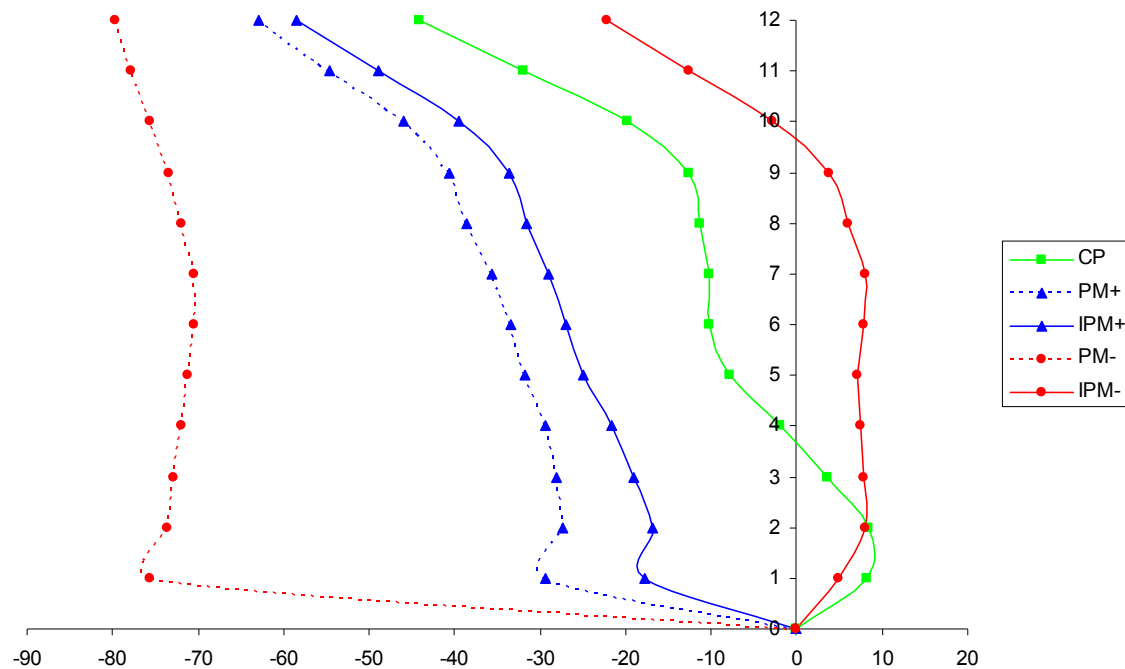
$$f_{R_i} = \max \{1, r_{\Phi_i} / \Gamma_{P_i}\}$$

όπου  $r_{\Phi_i}$ ,  $\Gamma_{P_i}$  είναι οι λόγοι κάθε μεγέθους απόκρισης (μετακίνησης ή γωνιακής παραμόρφωσης ορόφου) στη δύσκαμπτη πλευρά προς το αντίστοιχο μέγεθος στο κέντρο βάρους της κάτοψης κάθε ορόφου για την «ιδιομορφή»  $i$ , όπως αυτά προκύπτουν από την ιδιομορφική και την υπερωθητική ανάλυση αντίστοιχα. Προκειμένου να αποφευχθεί απομείωση μετακινήσεων λόγω στρέψης, ο λόγος  $r_{\Phi_i}$  λαμβάνεται πάντα μεγαλύτερος ή ίσος του 1.

Κατόπιν, παρουσιάζονται οι εκτελεσθείσες εφαρμογές που περιλαμβάνουν ανάλυση των κτιρίων  $i$ ) με τη βελτιωμένη εκδοχή της προταθείσας μεθοδολογίας (IPM – Improved Proposed Methodology),  $ii$ ) με την αρχική εκδοχή της προταθείσας μεθοδολογίας (PM – Proposed Methodology),  $iii$ ) με μια ‘συμβατική’ πολύ-ιδιομορφική παραλλαγή της ΣΥΑ που στηρίζεται στη χρήση απλοποιημένων κανόνων χωρικής επαλληλίας (CP – Conventional Procedure) και  $iv$ ) με τη θεωρητικά ακριβή μη γραμμική δυναμική ανάλυση που χρησιμεύει ως λύση αναφοράς. Όλες οι αναλύσεις γίνονται για 12 επιταχυνσιογραφήματα που έχουν καταγραφεί στον ελλαδικό χώρο. Κάθε επιταχυνσιογράφημα θεωρείται ότι δρα ταυτόχρονα σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις με την ίδια ένταση. Για κάθε μέγεθος απόκρισης και για κάθε παραλλαγή της ΣΥΑ υπολογίζεται το μέσο σφάλμα ως προς τα αποτελέσματα της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης για τις 12 διεγέρσεις. Ενδεικτικά, στο Σχ. 1 δίνεται το μέσο σφάλμα (%) των γωνιακών παραμορφώσεων των ορόφων στη δύσκαμπτη πλευρά ενός δωδεκάωροφου κτιρίου. Με IPM+, IPM- και PM+, PM- συμβολίζονται οι δύο εναλλακτικοί συνδυασμοί που προκύπτουν από τη βελτιωμένη και την αρχική εκδοχή της προτεινόμενης μεθοδολογίας αντίστοιχα. Από την όλη έρευνα συνάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Οι εναλλακτικοί συνδυασμοί των σεισμικών δράσεων σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία παρέχουν ένα άνω κι ένα κάτω όριο για κάθε μέγεθος απόκρισης που ως επί το πλείστον περιβάλλουν τις θεωρητικά ακριβείς τιμές της μη γραμμικής δυναμικής ανάλυσης.
- Σε γενικές γραμμές η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ακριβέστερη από τη ‘συμβατική’ μεθοδολογία.
- Η εισαγωγή των διορθωτικών συντελεστών οδηγεί σε θεαματική βελτίωση της ακρίβειας στην εκτίμηση των μεγεθών απόκρισης της δύσκαμπτης πλευράς.

Προφανώς, η γενίκευση των παραπάνω συμπερασμάτων απαιτεί τη διεξαγωγή περαιτέρω έρευνας που θα περιλαμβάνει ανάλυση μεγάλης ποικιλίας χωρικών ασύμμετρων συστημάτων για πληθώρα σεισμικών διεγέρσεων.



Σχ. 1 Μέσο σφάλμα (%) γωνιακών παραμορφώσεων ορόφων στη δύσκαμπτη πλευρά δωδεκαώροφου κτιρίου

## Βιβλιογραφία

- Chopra, A.K. and Goel R.K. (2004), "A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 33, pp. 903-927.
- Fajfar, P., Marusic, D. and Perus, I. (2005), "The extension of the N2 method to asymmetric buildings", *Proceedings of the 4<sup>th</sup> European Workshop on the Seismic Behaviour of Irregular and Complex Structures, 4EWICS*, Thessaloniki, Greece, August 2005, Paper No. 41.
- Manoukas, G.E., Athanatopoulou, A.M. and Avramidis I.E. (2012), "Multimode Pushover Analysis for Asymmetric Buildings under Biaxial Seismic Excitation Based on a new Concept of the Equivalent Single Degree of Freedom System", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 38, pp. 88-96.
- Manoukas, G.E. and Avramidis, I.E. (2014), "Evaluation of a Multimode Pushover Procedure for Asymmetric in Plan Buildings under Biaxial Seismic Excitation", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 6, pp. 2607-2632.
- Manoukas, G.E. and Avramidis, I.E. (2015), "Improved Multimode Pushover Procedure for Asymmetric in Plan Buildings under Biaxial Seismic Excitation – Application to Tall Buildings", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 24, No. 6, pp. 397-420.
- Reyes, J.C. and Chopra, A.K. (2011a), "Three dimensional modal pushover analysis of buildings subjected to two components of ground motion, including its evaluation for tall buildings", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 40, pp. 789-806.
- Reyes, J.C. and Chopra, A.K. (2011b), "Evaluation of three-dimensional modal pushover analysis for unsymmetric-plan buildings subjected to two components of ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 40, pp. 1475-1494.