

Πρόσφατες Εξελίξεις στις Απλοποιημένες Στατικές Ανελαστικές Μεθόδους Ανάλυσης Κτιρίων Ο/Σ Recent Developments in Simplified Nonlinear Static Procedures for Analysis of R/C Buildings

Γρηγόριος ΜΑΝΟΥΚΑΣ¹, Ασημίνα ΑΘΑΝΑΤΟΠΟΥΛΟΥ², Ιωάννης ΑΒΡΑΜΙΔΗΣ³

Λέξεις κλειδιά: Στατική Υπερωθητική Ανάλυση, Καμπύλη Ικανότητας, Μετακίνηση - Στόχος, Στάθμες Επιτελεστικότητας, Ανελαστική Δυναμική Ανάλυση

ΠΕΡΙΛΗΨΗ : Τα τελευταία χρόνια για τον υπολογισμό της σεισμικής επίδοσης των κτιρίων και με στόχο την αποφυγή του υπολογιστικού κόστους και των λοιπών εγγενών αδυναμιών της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης, αναπτύχθηκε η Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (ΣΥΑ), η οποία υιοθετήθηκε σε διάφορες παραλλαγές από αντισεισμικούς κανονισμούς διεθνώς με την ονομασία Ανελαστική Στατική Μέθοδος. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η συγκριτική διερεύνηση και αξιολόγηση δύο εκ των παραλλαγών της ΣΥΑ: α) του πρόσφατου αμερικανικού κανονισμού για υφιστάμενα κτίρια (ASCE/SEI 41-06) και β) του υπό διαμόρφωση ελληνικού κανονισμού επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. – Σχέδιο κειμένου 3). Μετά από μια συνοπτική παρουσίαση των δύο παραλλαγών και επισήμανση των κυριότερων διαφορών μεταξύ τους, γίνεται μια σειρά εφαρμογών σε επίπεδα πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα και τα αποτελέσματα που προκύπτουν αξιολογούνται με βάση τα αποτελέσματα της μη-γραμμικής δυναμικής ανάλυσης.

ABSTRACT : Static Pushover Analysis (SPA) is a widely accepted procedure for the estimation of structural performance in lieu of nonlinear dynamic analysis. The SPA was developed in the past few years in order to avoid the significant computational cost and the rest inherent disadvantages of the accurate nonlinear dynamic analysis. It has been adopted by several seismic codes and pre-standards as Nonlinear Static Procedure (NSP). The objective of this paper is the comparative evaluation of two variants of SPA: a) NSP according to ASCE/SEI 41-06 and b) according to draft No3 of the Greek national code for retrofit of existing buildings. After a brief presentation of the two procedures, the differences between them are discussed. Finally, both variants are applied to R/C

¹ Υποψήφιος Διδάκτορας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ , email: grman7@otenet.gr

² Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ , email: minak@civil.auth.gr

³ Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ , email: avram@civil.auth.gr

planar frames and the produced results are compared to those obtained by nonlinear dynamic analysis.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αποτίμηση της σεισμικής τρωτότητας υφιστάμενων κατασκευών και η εν συνεχεία ανάλυση/διαστασιολόγηση του ενισχυμένου φέροντα οργανισμού τους απαιτούν σε πολλές περιπτώσεις την εφαρμογή ανελαστικών αναλύσεων. Η πολυπλοκότητα όμως των δυναμικών μη-γραμμικών αναλύσεων και τα πολλά επί μέρους προβλήματα που παρουσιάζει η εφαρμογή τους στην πράξη οδήγησαν στην ανάπτυξη διαφόρων απλοποιημένων μεθόδων ανελαστικής ανάλυσης, μεταξύ των οποίων κυρίαρχη θέση κατέχει η Στατική Υπερωθητική Ανάλυση (ΣΥΑ). Αν και η χρήση της ΣΥΑ προτείνεται ήδη από πολλούς κανονισμούς (Ανελαστική Στατική Μέθοδος), δεν πρόκειται δυστυχώς για μία μονοσήμαντα καθορισμένη μέθοδο ανάλυσης. Αντίθετα, λόγω του προσεγγιστικού της χαρακτήρα, η βασική της ιδέα εφαρμόζεται σε διάφορες παραλλαγές, κάθε μία από τις οποίες στηρίζεται σε λίγο ή πολύ διαφορετικές επί μέρους παραδοχές. Αποτέλεσμα αυτών των διαφορετικών εκδοχών της ΣΥΑ είναι η γενικώς μεγάλη διασπορά των τελικών αποτελεσμάτων των αντίστοιχων αναλύσεων. Οι σημαντικές αυτές αποκλίσεις δημιουργούν μία αίσθηση αναξιοπιστίας της μεθόδου και καθιστούν την εφαρμογή της σε πραγματικές - και όχι απλά ερευνητικού χαρακτήρα - μελέτες της δομικής πράξης προβληματική. Αυτός είναι και ο λόγος για τον οποίο συνεχίζεται με αμείωτη ένταση η έρευνα προς περαιτέρω βελτίωση της ΣΥΑ.

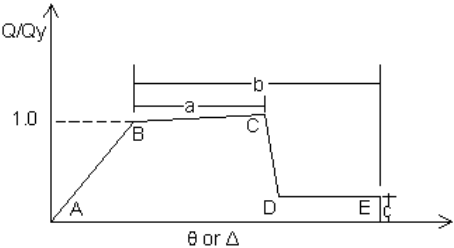
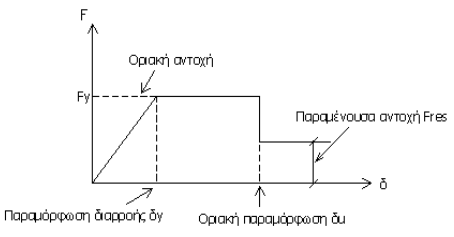
Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται και συγκρίνονται δύο μορφές της ΣΥΑ: α) η μέθοδος όπως προτείνεται στο κείμενο του τελευταίου αμερικανικού κανονισμού για υφιστάμενα κτίρια (ASCE/SEI 41-06) και β) όπως περιγράφεται στον υπό διαμόρφωση ελληνικό κανονισμό επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ. – Σχέδιο κειμένου 3). Αρχικά γίνεται παράλληλη βήμα προς βήμα παρουσίαση της διαδικασίας εφαρμογής της ΣΥΑ σύμφωνα με τα δύο κανονιστικά κείμενα και επισημαίνονται οι κυριότερες διαφορές μεταξύ τους. Λόγω στενότητας χώρου παρουσιάζονται μόνο οι στοιχειώδεις αρχές της ΣΥΑ και πολλά σημαντικά επιμέρους θέματα αναφέρονται μόνο ακροθιγώς (π.χ. προσομοίωση πλαστικών αρθρώσεων) ή και καθόλου (π.χ. αλληλεπίδραση εδάφους – θεμελίωσης – ανωδομής). Ακολουθεί μια σειρά αριθμητικών εφαρμογών των δύο παραλλαγών της ΣΥΑ σε τέσσερα κανονικά επίπεδα πλαίσια από οπλισμένο σκυρόδεμα 3, 6, 9 και 12 ορόφων. Τα αποτελέσματα για κάθε παραλλαγή της μεθόδου συγκρίνονται τόσο μεταξύ τους, όσο και με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από δυναμική μη-γραμμική ανάλυση με χρήση τεχνητών επιταχυνσιογραφημάτων, τα φάσματα απόκρισης των οποίων αντιστοιχούν στο φάσμα του ΕΑΚ. Τέλος, η εργασία κλείνει με σύντομο σχολιασμό των αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.

ΠΑΡΑΛΛΗΛΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΥΑ ΚΑΤΑ ASCE ΚΑΙ ΚΑΝΕΠΕ

Προϋποθέσεις Εφαρμογής

ASCE 41-06	ΚΑΝ.ΕΠΕ.
<p>Η εφαρμογή της ΣΥΑ επιτρέπεται όταν ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:</p> <p>-Το επίπεδο γνώσης των δεδομένων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον «σύνηθες» [2.2.6.4.3]</p> <p>-Ο λόγος της απαιτούμενης αντοχής για απεριόριστα ελαστική απόκριση προς τη διαθέσιμη αντοχή διαρροής του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος R δεν πρέπει να υπερβαίνει μια μέγιστη τιμή R_{max} [2.4.2.1]</p> <p>-Η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική [2.4.2.1]. Για να προσδιοριστεί το κατά πόσο η επιρροή αυτή είναι σημαντική ή όχι απαιτείται η διενέργεια δύο Δυναμικών Φασματικών Αναλύσεων, μιας με θεώρηση επαρκούς αριθμού ιδιομορφών, ώστε η δρώσα μάζα τους να είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής και μιας μόνο με θεώρηση της 1^{ης} ιδιομορφής. Αν η συνισταμένη τέμνουσα δύναμη κάποιου ορόφου σύμφωνα με την πρώτη ανάλυση ξεπερνά το 130% της αντίστοιχης τέμνουσας σύμφωνα με τη δεύτερη ανάλυση, τότε η επίδραση των ανωτέρων ιδιομορφών θεωρείται σημαντική. Στην περίπτωση αυτή επιτρέπεται η εφαρμογή της Ανελαστικής Στατικής Ανάλυσης παράλληλα με μια Ελαστική Δυναμική Ανάλυση, στην οποία τα κριτήρια αποδοχής των πλάστιμων δράσεων (m-factors) λαμβάνονται αυξημένα κατά 33%.</p>	<p>Η εφαρμογή της ΣΥΑ επιτρέπεται όταν ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:</p> <p>-Η στάθμη αξιοπιστίας των δεδομένων θα πρέπει να είναι τουλάχιστον «ικανοποιητική» [5.7.2]</p> <p>-Η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική [5.7.2], [Σ.5.7.2]. Για να προσδιοριστεί το κατά πόσο η επιρροή αυτή είναι σημαντική ή όχι απαιτείται η διενέργεια δύο Δυναμικών Φασματικών Αναλύσεων, μιας με θεώρηση επαρκούς αριθμού ιδιομορφών, ώστε η δρώσα μάζα τους να είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής και μιας μόνο με θεώρηση της 1^{ης} ιδιομορφής. Αν η συνισταμένη τέμνουσα δύναμη κάποιου ορόφου σύμφωνα με την πρώτη ανάλυση ξεπερνά το 130% της αντίστοιχης τέμνουσας σύμφωνα με τη δεύτερη ανάλυση, τότε η επίδραση των ανωτέρων ιδιομορφών θεωρείται σημαντική. Στην περίπτωση αυτή επιτρέπεται η εφαρμογή της Ανελαστικής Στατικής Ανάλυσης παράλληλα με μια Ελαστική Δυναμική Ανάλυση, στην οποία τα κριτήρια αποδοχής των πλάστιμων δράσεων (m-factors) λαμβάνονται αυξημένα κατά 33%.</p>

Προσομοίωση Πλαστικών Αρθρώσεων

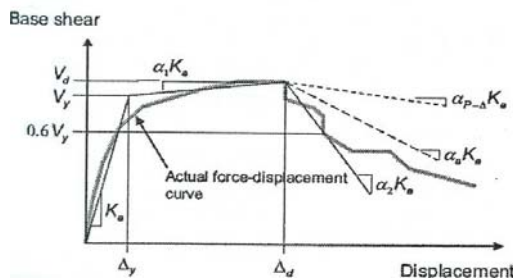
ASCE 41-06	KAN.ΕΠΕ.
<p>Η πλαστική μηχανική συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής ή ενός κόμβου περιγράφεται μέσω ενός πολυγραμμικού διαγράμματος γενικευμένου εντατικού μεγέθους Q/Q_y συναρτήσεως του εργικά ανταποκρινόμενου (γενικευμένου ή μη) μεγέθους μετακίνησης / παραμόρφωσης Δ ή θ [2.4.4.3], [6.3.1.2.2.]:</p>  <p>The diagram shows a multi-linear curve on a coordinate system where the vertical axis is labeled Q/Q_y and the horizontal axis is labeled θ or Δ. The curve starts at point A, goes linearly to point B, then horizontally to point C, then linearly down to point D, and finally horizontally to point E. Two horizontal segments are labeled 'a' and 'b'.</p>	<p>Η πλαστική μηχανική συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής ή ενός κόμβου περιγράφεται μέσω ενός πολυγραμμικού διαγράμματος εντατικού μεγέθους F συναρτήσεως του εργικά ανταποκρινόμενου μεγέθους μετακίνησης / παραμόρφωσης δ [7.1.2.1], [7.1.2.2.α]:</p>  <p>The diagram shows a multi-linear curve on a coordinate system where the vertical axis is labeled F and the horizontal axis is labeled δ. The curve starts at point A, goes linearly to point B (labeled 'Ορακή αντοχή'), then horizontally to point C (labeled 'Παραμένουσα αντοχή F_{res}'), then linearly down to point D (labeled 'Ορακή παραμόρφωση δ_u'), and finally horizontally to point E (labeled 'Παραμόρφωση διαρροής δ_y').</p>

Καμπύλη Ικανότητας

ASCE 41-06	KAN.ΕΠΕ.
<p>Για τη σχεδίαση της καμπύλης ικανότητας $V-\delta$ απαιτείται η επίλυση με προοδευτικά αυξανόμενα οριζόντια φορτία η καθ' ύψος κατανομή των οποίων θα πρέπει να είναι ανάλογη με το ιδιοδιάνυσμα της θεμελιώδους ελαστικής ιδιομορφής κατά την εξεταζόμενη διεύθυνση διέγερσης [3.3.3.2.4].</p>	<p>Για τη σχεδίαση της καμπύλης ικανότητας $V-\delta$ απαιτούνται τουλάχιστον δύο επιλύσεις με δύο διαφορετικές καθ' ύψος κατανομές φορτίων. Επιλέγεται μία κατανομή από καθεμιά από τις ακόλουθες ομάδες [5.7.3.3]:</p> <p style="text-align: center;"><u>Ομάδα Α</u></p> <p>A1. Κατανομή σύμφωνα με τα σεισμικά φορτία της Ελαστικής Στατικής Μεθόδου.</p> <p>A2. Κατανομή σύμφωνα με το ιδιοδιάνυσμα της 1^{ης} ιδιομορφής (κατά τη θεωρούμενη διεύθυνση).</p> <p>A3. Κατανομή ανάλογη με τις τέμνουσες δυνάμεις των ορόφων, όπως αυτές προκύπτουν από δυναμική φασματική ανάλυση.</p> <p style="text-align: center;"><u>Ομάδα Β</u></p> <p>B.1 Ομοιόμορφη κατανομή, ανάλογα</p>

Ως κόμβος ελέγχου για τη σχεδίαση της καμπύλης ικανότητας λαμβάνεται το κέντρο μάζας του ανώτερου ορόφου. Για κτίρια με μικρά ρετιρέ ο κόμβος ελέγχου λαμβάνεται στην οροφή του πλήρους υποκείμενου ορόφου [3.3.3.2.3].

Η πρωτογενής καμπύλη ικανότητας $V-\delta$ εξιδανικεύεται συνήθως σε μια διγραμμική καμπύλη, βάσει της (προσεγγιστικής) εξίσωσης του εμβαδού μεταξύ των δύο καμπύλων και του άξονα των μετακινήσεων, για μετακινήσεις από 0 ως δ_t ή Δ_d (όποια είναι μικρότερη), όπου δ_t η μετακίνηση-στόχος και Δ_d η μετακίνηση έναρξης του κατιόντος κλάδου. Η πρωτογενής και η εξιδανικευμένη καμπύλη τέμνονται για $V=0,6V_y$ και $\delta=\delta_t$ ή Δ_d . Σε περίπτωση που $\delta_t > \Delta_d$ η εξιδανικευμένη καμπύλη πρέπει να είναι τριγραμμική. Ο τρίτος κλάδος καθορίζεται έτσι ώστε να τέμνει την πρωτογενή καμπύλη για $V=0,6V_y$ [3.3.3.2.5].



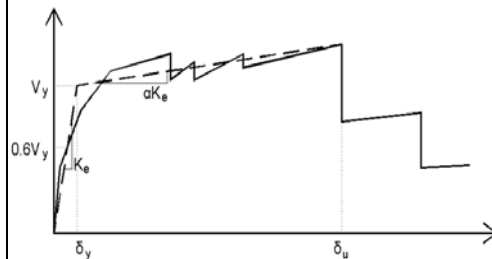
Η ισοδύναμη θεμελιώδης ιδιοπερίοδος προκύπτει με πολλαπλασιασμό της ελαστικής με την τετραγωνική ρίζα του λόγου των αρχικών κλίσεων της πρωτογενούς και της εξιδανικευμένης

με τις μάζες των ορόφων.

B.2 Κατανομή που αναπροσαρμόζεται με την προοδευτική πλαστικοποίηση της κατασκευής.

Ως κόμβος ελέγχου για τη σχεδίαση της καμπύλης ικανότητας λαμβάνεται το κέντρο μάζας του ανώτερου ορόφου. Για κτίρια με σοφίτες ή μικρούς οικίσκους στο δώμα ο κόμβος ελέγχου λαμβάνεται στην οροφή του πλήρους υποκείμενου ορόφου [5.7.3.2].

Η πρωτογενής καμπύλη ικανότητας $V-\delta$ εξιδανικεύεται σε μια διγραμμική καμπύλη, βάσει της (προσεγγιστικής) εξίσωσης του εμβαδού μεταξύ των δύο καμπύλων και του άξονα των μετακινήσεων, για μετακινήσεις από 0 ως δ_u , όπου δ_u η μετακίνηση αστοχίας, πέραν της οποίας παρατηρείται μείωση της αντοχής του φορέα. Η πρωτογενής και η εξιδανικευμένη καμπύλη τέμνονται για $V=0,6V_y$ και $\delta=\delta_u$ [5.7.3.4].



Η ισοδύναμη θεμελιώδης ιδιοπερίοδος προκύπτει με πολλαπλασιασμό της ελαστικής με την τετραγωνική ρίζα του λόγου των αρχικών κλίσεων της πρωτογενούς

καμπύλης [3.3.3.2.6].

και της εξιδανικευμένης καμπύλης [5.7.3.5].

Μετακίνηση - Στόχος

ASCE 41-06	KAN.ΕΠΕ.
<p>Η μετακίνηση στόχος δ_t υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [3.3.3.2]: $\delta_t = C_0 C_1 C_2 S_a (T_e / 2\pi)^2 g$ S_a: η φασματική ψευδοεπιτάχυνση για το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού, ως ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g: η επιτάχυνση της βαρύτητας C_0, C_1, C_2: διορθωτικοί συντελεστές μέσω των οποίων λαμβάνεται υπόψη η διαφορά της φασματικής μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και της αντίστοιχης μετακίνησης του κόμβου ελέγχου του πραγματικού φορέα, η διαφορά της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης του φορέα με την αντίστοιχη ελαστική και η επιρροή της ανακύκλισης της φόρτισης στην αντοχή δυσκαμψία του φορέα αντίστοιχα.</p> <p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_0 λαμβάνεται ίσος με: - το γινόμενο του συντελεστή συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής επί την συντεταγμένη του αντίστοιχου ιδιοδιανύσματος που αντιστοιχεί στη μετακίνηση στόχο - το γινόμενο του συντελεστή συμμετοχής υπολογισμένου με «ιδιοδιάνυσμα» που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση του φορέα για τη μετακίνηση στόχο επί την συντεταγμένη του «ιδιοδιανύσματος» που αντιστοιχεί στη μετακίνηση στόχο - λαμβάνεται από πίνακα (table 3-2)</p> <p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_1</p>	<p>Η μετακίνηση στόχος δ_t υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο [5.7.4.2]: $\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 (T_e / 2\pi)^2 \Phi_e$ Φ_e: η φασματική ψευδοεπιτάχυνση για το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού C_0, C_1, C_2, C_3: διορθωτικοί συντελεστές μέσω των οποίων λαμβάνεται υπόψη η διαφορά της φασματικής μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και της αντίστοιχης μετακίνησης του κόμβου ελέγχου του πραγματικού φορέα, η διαφορά της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης του φορέα με την αντίστοιχη ελαστική, η επιρροή της ανακύκλισης της φόρτισης στην αντοχή και δυσκαμψία του φορέα και η επιρροή των φαινομένων 2^{ης} τάξεως (P-Δ) αντίστοιχα.</p> <p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_0 λαμβάνεται ίσος με 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 για αριθμό ορόφων 1, 2, 3, 5 και ≥ 10 αντίστοιχα.</p> <p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_1</p>

<p>υπολογίζεται όπως παρακάτω: - για $0,2\text{sec} < T_e < 1\text{sec}$:</p> $C_1 = 1 + \frac{R - 1}{\alpha T_e^2}$ <p>α: συντελεστής που εξαρτάται από την κατηγορία εδάφους R: ο λόγος της απαιτούμενης αντοχής για απεριόριστα ελαστική απόκριση προς την αντοχή διαρροής του φορέα</p> $R = \frac{S_a}{V_y/W} C_m$ <p>V_y: η τέμνουσα βάσης διαρροής W: το βάρος που αντιστοιχεί στη συνολικά ταλαντούμενη μάζα C_m: ο συντελεστής δρώσας μάζας (ποσοστό συμμετοχής της θεμελιώδους ιδιομορφής), που λαμβάνεται ίσος με 1.0 για μονώροφα και διώροφα κτίρια, 0.9 για πλαίσια με τρεις ή παραπάνω ορόφους, 0.8 για κτίρια με τοιχώματα Ο/Σ με τρεις ή παραπάνω ορόφους και 1.0 στις λοιπές περιπτώσεις. Για ιδιοπεριόδους μεγαλύτερες από 1sec πρέπει να λαμβάνεται $C_m=1$ - για $T_e < 0,2\text{sec}$ λαμβάνεται η τιμή που αντιστοιχεί σε $T_e=0,2\text{sec}$ - για $T_e > 1\text{sec}$ $C_1=1$</p>	<p>υπολογίζεται όπως παρακάτω: $C_1 = 1.0$ για $T_e \geq T_2$ $C_1 = [1.0 + (R-1)T_2/T_e]/R$ για $T_e < T_2$ T_2: η ιδιοπερίοδος έναρξης του φθίνοντα κλάδου του φάσματος σχεδιασμού $R \rightarrow O$ λόγος της απαιτούμενης αντοχής για πλήρως ελαστική απόκριση προς τη διαθέσιμη αντοχή του φορέα</p> $R = \frac{\Phi_e/g}{V_y/W} C_m$ <p>V_y: η τέμνουσα βάσης διαρροής W: το βάρος που αντιστοιχεί στη συνολικά ταλαντούμενη μάζα g: η επιτάχυνση της βαρύτητας C_m: ο συντελεστής δρώσας μάζας (για συνεκτίμηση των ανωτέρων ιδιομορφών), που λαμβάνεται ίσος με 1.0 για μονώροφα και διώροφα κτίρια, 0.9 για πλαίσια με τρεις ή παραπάνω ορόφους, 0.8 για κτίρια με τοιχώματα Ο/Σ με τρεις ή παραπάνω ορόφους και 1.0 στις λοιπές περιπτώσεις.</p>
<p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_2 υπολογίζεται όπως παρακάτω: - για $T_e < 0,7\text{sec}$:</p> $C_2 = 1 + 800 \left(\frac{R - 1}{T_e} \right)^2$ <p>- για $T_e > 0,7\text{sec}$ $C_2=1$</p>	<p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_2 λαμβάνεται ίσος με 1.0 για φορείς με υψηλή πλαστιμότητα, ενώ για φορείς με χαμηλή πλαστιμότητα κυμαίνεται από 1.0 ως 1.5 ανάλογα με την ιδιοπερίοδο και τη στάθμη επιτελεστικότητας.</p>
<p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_3 υπολογίζεται όπως παρακάτω: $C_3 = 1 + 5(\theta - 0,1)/T_e$ θ: ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας. Αν $\theta < 0,1$ λαμβάνεται $C_3=1.0$.</p>	<p>Ο διορθωτικός συντελεστής C_3 υπολογίζεται όπως παρακάτω: $C_3 = 1 + 5(\theta - 0,1)/T_e$ θ: ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας. Αν $\theta < 0,1$ λαμβάνεται $C_3=1.0$.</p>

Έλεγχοι Κριτηρίων Αποδοχής

ASCE 41-06	KAN.ΕΠΕ.
<p>Ο έλεγχος των κριτηρίων αποδοχής γίνεται για συνδυασμένη δράση των δύο οριζόντιων συνιστωσών του σεισμού σχεδιασμού. Συγκεκριμένα, στα εντατικά μεγέθη σχεδιασμού λόγω σεισμικής διέγερσης σε μία διεύθυνση προστίθενται τα εντατικά μεγέθη που αντιστοιχούν στο 30% της μετακίνησης στόχου κατά την κάθετη διεύθυνση και αντιστρόφως. Σημειώνεται ότι δε γίνεται επαλληλία των μεγεθών μετακίνησης / παραμόρφωσης [3.2.7].</p> <p>Για πλαστικές δράσεις ο έλεγχος γίνεται σε όρους μετακινήσεων / παραμορφώσεων, ενώ για μη πλαστικές δράσεις σε όρους εντατικών μεγεθών [3.4.3.2].</p> <p>Η αντοχή σχεδιασμού των πλαστικών δράσεων για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας (IO→«Άμεση Χρήση», LS → «Προστασία Ζωής», CP → «Αποφυγή Κατάρρευσης») εκφράζεται ως ένα ποσοστό εξάντλησης της διαθέσιμης πλαστικής μετακίνησης / παραμόρφωσης:</p>	<p>Ο έλεγχος των κριτηρίων αποδοχής γίνεται για συνδυασμένη δράση των δύο οριζόντιων συνιστωσών του σεισμού σχεδιασμού. Το κτίριο αναλύεται δύο φορές για φορτία σε δύο διευθύνσεις με λόγο των αντίστοιχων τεμνουσών βάσεως 10:3 και 3:10. Σε κτίρια χωρίς έντονη ασυμμετρία σε κάτοψη επιτρέπεται απλοποιητικά η εφαρμογή των φορτίων χωριστά σε κάθε διεύθυνση, αλλά με αύξηση της μετακίνησης στόχου κατά 30% [5.4.9.β].</p> <p>Για πλαστικές δράσεις ο έλεγχος γίνεται σε όρους μετακινήσεων / παραμορφώσεων, ενώ για μη πλαστικές δράσεις σε όρους εντατικών μεγεθών [9.2], [9.3.1].</p> <p>Η αντοχή σχεδιασμού των πλαστικών δράσεων για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας (IO→«Άμεση Χρήση», LS → «Προστασία Ζωής», CP → «Αποφυγή Κατάρρευσης») εκφράζεται ως ένα ποσοστό εξάντλησης της διαθέσιμης πλαστικής μετακίνησης / παραμόρφωσης:</p>
<p>The graph shows the normalized load Q/Q_u on the y-axis versus displacement Δ on the x-axis. The curve starts linearly, then levels off at a plateau for the IO stage (15-40% of displacement), then rises to a peak for the LS stage (33-100%), and finally drops to a lower level for the CP stage (100%).</p>	<p>The graph shows the normalized load F on the y-axis versus displacement δ on the x-axis. The curve starts linearly, then levels off at a plateau for the IO stage (0% of displacement), then rises to a peak for the LS stage (50%), and finally drops to a lower level for the CP stage (100%).</p>

ΚΥΡΙΟΤΕΡΕΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΣΥΑ ΚΑΤΑ ASCE ΚΑΙ KAN.ΕΠΕ.

Όπως προκύπτει από τις παραδοχές της ΣΥΑ και επιβεβαιώνεται και από σχετικές μελέτες, είναι αναμενόμενο σε κτίρια με σημαντική επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών τα αποτελέσματα να μην παρουσιάζουν ικανοποιητική ακρίβεια. Σύμφωνα και με τους δύο κανονισμούς, για να προσδιοριστεί το κατά πόσο η

επιρροή αυτή είναι σημαντική ή όχι απαιτείται η διενέργεια δύο Δυναμικών Φασματικών Αναλύσεων, μιας με θεώρηση επαρκούς αριθμού ιδιομορφών, ώστε η δρώσα μάζα τους να είναι τουλάχιστον το 90% της συνολικής και μιας μόνο με θεώρηση της 1^{ης} ιδιομορφής. Αν η τέμνουσα κάποιου ορόφου σύμφωνα με την πρώτη ανάλυση ξεπερνά το 130% της αντίστοιχης τέμνουσας σύμφωνα με τη δεύτερη ανάλυση, τότε η επίδραση των ανώτερων ιδιομορφών θεωρείται σημαντική. Το κριτήριο αυτό όμως, όπως αποδεικνύεται από σχετικές έρευνες (FEMA 440), είναι αναξιόπιστο. Παρ' όλα αυτά και οι δύο κανονισμοί επιτρέπουν την εφαρμογή της ΣΥΑ ακόμη και στα κτίρια με σημαντικό ρόλο των ανώτερων ιδιομορφών, αρκεί να διεξαχθεί παράλληλα και μια ελαστική δυναμική ανάλυση με αυστηρότερα κριτήρια αποδοχής. Ο ASCE 41-06 θέτει επιπλέον ως απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της ΣΥΑ την ύπαρξη μιας ελάχιστης στάθμης αντοχής, όπως αυτή εκφράζεται από το συντελεστή R. Η διάταξη αυτή αντικαθιστά την απαίτηση που υπήρχε σε προηγούμενα κανονιστικά κείμενα (FEMA 356) για πολλαπλασιασμό της μετακίνησης στόχου με το συντελεστή C₃ μέσω του οποίου λαμβάνεται υπόψη η αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων 2^{ας} τάξεως (P-Δ). Η τροποποίηση αυτή επήλθε μετά από σχετικές έρευνες που παρουσιάστηκαν στο ATC-55 Project (FEMA 440). Αντίθετα ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. διατηρεί την αντίστοιχη διάταξη της FEMA 356.

Σε ότι αφορά στην προσομοίωση των πλαστικών αρθρώσεων, αυτή γίνεται και στους δύο κανονισμούς μέσω απλοποιημένων πολυγραμμικών διαγραμμάτων εντατικού μεγέθους – μετακίνησης / παραμόρφωσης. Τα εντατικά μεγέθη αντοχής που απαιτούνται για τον προσδιορισμό των διαγραμμάτων υπολογίζονται με βάση τις γνωστές μεθοδολογίες των κανονισμών. Οι διαθέσιμες παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων υπολογίζονται είτε από πίνακες είτε από αναλυτικές σχέσεις. Πάντως, πρέπει να επισημανθεί ότι μεταξύ των διαφόρων προτεινόμενων σχέσεων και πινάκων προκύπτουν σημαντικές διαφορές στα ζητούμενα μεγέθη.

Μια ουσιώδης διαφορά μεταξύ των δύο παραλλαγών της ΣΥΑ είναι η υιοθέτηση από τον ASCE 41-06 της ιδιομορφικής κατανομής ως αποκλειστικής καθ' ύψος κατανομής των οριζόντιων φορτίων, σε αντίθεση με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. που επιβάλλει τουλάχιστον δύο εναλλακτικές κατανομές. Και αυτή η διάταξη του ASCE 41-06 προέκυψε με βάση τις έρευνες που έγιναν στα πλαίσια του ATC-55 Project (FEMA 440). Πάντως, ένα κρίσιμο ζήτημα είναι το κατά πόσο οι κατανομές που χαρακτηρίζονται ιδιομορφικές είναι πράγματι τέτοιες. Θεωρητικά, σε χωρικά συστήματα μια ιδιομορφική κατανομή θα απαιτούσε ταυτόχρονη φόρτιση με δυνάμεις σε δύο διευθύνσεις και με στρεπτικές ροπές σε αναλογία με το γινόμενο του μητρώου μάζας επί το ιδιοδιάνυσμα της θεμελιώδους ιδιομορφής, ανεξάρτητα από τη διεύθυνση της σεισμικής διέγερσης. Ο ASCE 41-06 δεν αναφέρει κάτι τέτοιο ρητώς, ενώ από τη διατύπωση των σχετικών διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. συνάγεται το συμπέρασμα ότι οι φορτίσεις που επιβάλλει είναι μόνο δυνάμεις (όχι ροπές) και μόνο κατά τη θεωρούμενη διεύθυνση διέγερσης.

Μια ακόμη σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των δύο κανονισμών είναι η μεθοδολογία που ακολουθείται για την εξιδανίκευση της καμπύλης ικανότητας. Η προσέγγιση του ASCE 41-06 είναι πιο πολύπλοκη και χρονοβόρα γιατί στη

συνήθη περίπτωση που $\delta_t < \Delta_d$ απαιτείται επαναληπτική διαδικασία. Αντίθετα στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. η εξιδανικευμένη καμπύλη ικανότητας καθορίζεται μονοσήμαντα ανεξαρτήτως της μετακίνησης στόχου και είναι κοινή για όλες τις σεισμικές διεγέρσεις.

Σε ότι αφορά στη μετακίνηση στόχο, και οι δύο κανονισμοί επιτρέπουν τον υπολογισμό της με κατάλληλη διόρθωση της φασματικής μετακίνησης ενός απεριόριστα ελαστικού ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Η διόρθωση γίνεται με τη βοήθεια συντελεστών που προκύπτουν από εμπειρικές σχέσεις ή πίνακες. Με εξαίρεση το συντελεστή C_3 που καταργήθηκε στον ASCE 41-06, οι υπόλοιποι συντελεστές είναι κοινοί στους δύο κανονισμούς, διαφέρει όμως ο τρόπος υπολογισμού τους. Ειδικότερα, ως προς το συντελεστή C_0 οι δύο πρώτοι εναλλακτικοί τρόποι υπολογισμού που δίνει ο ASCE 41-06 είναι περισσότερο συνεπείς με τις παραδοχές της ΣΥΑ, ενώ οι αντίστοιχες τιμές που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ρεαλιστικές μόνο για επίπεδα συστήματα. Σημαντικές διαφορές υπάρχουν και στον υπολογισμό των συντελεστών C_1 και C_2 , με τους σχετικούς τύπους του ASCE 41-06 να προέρχονται και πάλι από το ATC-55 Project (FEMA 440), ενώ του ΚΑΝ.ΕΠΕ. να ταυτίζονται με αυτούς της FEMA 356. Επίσης, ως προς το συντελεστή C_2 πρέπει να επισημανθεί ότι η διαφοροποίησή του ανάλογα με τη στοχευόμενη στάθμη επιτελεστικότητας σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., μπορεί να οδηγήσει σε παράδοξα αποτελέσματα, π.χ. να πληρούνται οι απαιτήσεις για τη στάθμη «Άμεση Χρήση», αλλά όχι για την «Αποφυγή Κατάρρευσης»!

Σε ότι αφορά στο συνδυασμό των αποκρίσεων λόγω των δύο οριζόντιων συνιστωσών της διέγερσης ο κάθε κανονισμός ακολουθεί διαφορετική προσέγγιση: Ο ASCE 41-06 χρησιμοποιεί τον εμπειρικό κανόνα του 0.3, επαλληλίζοντας μόνο τα μεγέθη έντασης και όχι τις μετακινήσεις/παραμορφώσεις, όπως αυτά προκύπτουν από δύο ανεξάρτητες επιβύσεις λόγω κάθε μίας οριζόντιας συνιστώσας της διέγερσης. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιβάλλει τον ίδιο κανόνα, ο οποίος όμως εφαρμόζεται στην κατανομή της οριζόντιας φόρτισης και όχι στα μεγέθη έντασης και παραμορφωσης/μετακίνησης. Εναλλακτικά ο φορέας αναλύεται ανεξάρτητα σε δύο διευθύνσεις με παράλληλη αύξηση της στοχευόμενης μετακίνησης κατά 30%. Πάντως, το θέμα του συνδυασμού των αποκρίσεων λόγω ταυτόχρονης δράσης των δύο οριζόντιων σεισμικών συνιστωσών στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς, όπου δεν ισχύει η αρχή της επαλληλίας είναι ιδιαίτερα σύνθετο.

Τέλος, αξιοσημείωτη διαφορά υπάρχει και στα κριτήρια αποδοχής των πλάστιμων δράσεων. Συγκεκριμένα, για τη στάθμη επιτελεστικότητας «Άμεση Χρήση» ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιβάλλει την παραμονή των δομικών στοιχείων στην ελαστική περιοχή, κάτι που είναι σύμφωνο με τη γενικότερη φιλοσοφία αντισεισμικής ασφάλειας των κανονισμών για νέα κτίρια. Αντίθετα, ο ASCE 41-06 αποδέχεται περιορισμένη ανελαστική συμπεριφορά. Για τη στάθμη «Αποφυγή Κατάρρευσης» οι δύο κανονισμοί αποδέχονται εξάντληση της διαθέσιμης αντοχής, ενώ στην «Προστασία Ζωής» παρατηρούνται μεγάλες διαφορές μεταξύ τους.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Για την αξιολόγηση της ακρίβειας των παραλλαγών της Ανελαστικής Στατικής Μεθόδου των ASCE 41-06 και ΚΑΝ.ΕΠΕ. έγινε εφαρμογή τους με το πρόγραμμα SAP 2000/v.10.0.7 σε τέσσερα κανονικά επίπεδα πλαίσια 3, 6, 9 και 12 ορόφων. Τα πλαίσια είναι δίστυλα με ύψος ορόφου 3μ. και μήκος ανοίγματος 4m. Είναι κατασκευασμένα από Ο/Σ κατηγορίας C20/25 και ο οπλισμός τους (S500) καλύπτει τις ελάχιστες απαιτήσεις των ελληνικών κανονισμών. Επιλέχθηκε καθ' ύψος κατανομή των φορτίων σύμφωνα με το ιδιοδιάνυσμα της θεμελιώδους ιδιομορφής και για τις δύο παραλλαγές της μεθόδου. Οι εφαρμογές έγιναν για τέσσερις τεχνητές σεισμικές διεγέρσεις που αναπτύχθηκαν από το Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών (ΙΤΣΑΚ) και το φάσμα απόκρισής τους ταυτίζεται σχεδόν με το φάσμα σχεδιασμού του ΕΑΚ για κατηγορία εδάφους Β και ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας ΙΙΙ ($\alpha=0,36g$).

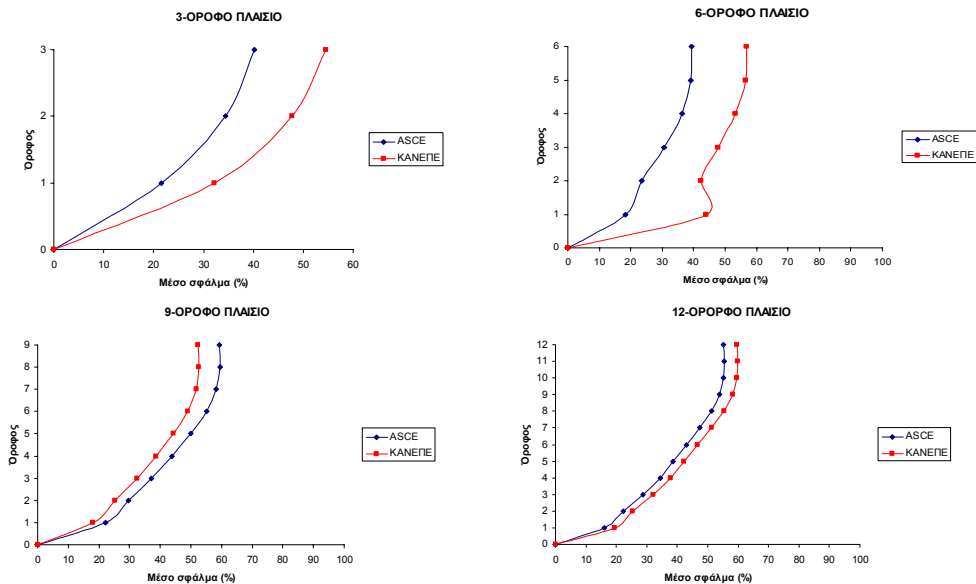
Στο **Σχήμα 1** δίνεται το μέσο (%) σφάλμα των μετακινήσεων των ορόφων κάθε πλαισίου ως προς τις μετακινήσεις που προκύπτουν από δυναμική μη-γραμμική ανάλυση με τα αντίστοιχα επιταχυνσιογραφήματα, η οποία εν προκειμένω θεωρείται ως η λύση αναφοράς. Το θετικό πρόσημο των σφαλμάτων σημαίνει ότι η ΣΥΑ υπερεκτιμά τις μετακινήσεις. Όπως φαίνεται στο σχήμα, οι επιλύσεις σύμφωνα με τους δύο κανονισμούς δίνουν παρόμοια προφίλ μετακινήσεων, με το μέσο σφάλμα να αυξάνει καθ' ύψος. Ειδικότερα, σε ότι αφορά στη μετακίνηση κορυφής, η οποία θεωρείται αντιπροσωπευτική της συνολικής συμπεριφοράς μιας κατασκευής, τα μέσα σφάλματα της ΣΥΑ σύμφωνα με τον ASCE 41-06 κυμαίνονται από 40% ως 60% περίπου, ενώ σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. από 50% ως 60% περίπου.

ΣΥΝΟΨΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Όπως προκύπτει από τη σύντομη παρουσίαση που προηγήθηκε, η γενική πορεία εφαρμογής της ΣΥΑ σύμφωνα με τον ASCE 41-06 και τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι παρόμοια, αφού και οι δύο κανονισμοί βασίζονται στη γνωστή μέθοδο τροποποίησης της μετακίνησης ενός ιδεατού ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος που θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει τη συνολική συμπεριφορά του εξεταζόμενου φορέα (Displacement Modification Method). Υπάρχουν όμως μεταξύ τους ουσιώδεις διαφορές, κυρίως ως προς τους διορθωτικούς συντελεστές με τους οποίους πολλαπλασιάζεται η ελαστική μετακίνηση του ισοδύναμου συστήματος για να προκύψει η μετακίνηση στόχος.

Σε ότι αφορά στα αποτελέσματα και οι δύο κανονισμοί φαίνονται αρκετά συντηρητικοί, με τον ASCE 41-06 να δίνει ελαφρώς καλύτερα αποτελέσματα. Η μικρή αυτή υπεροχή οφείλεται κυρίως στις τιμές των διορθωτικών συντελεστών C_0 και C_1 , καθώς οι τρόποι υπολογισμού τους σύμφωνα με τον ASCE 41-06 φαίνεται ότι είναι καλύτερα τεκμηριωμένοι. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι η γενίκευση των όποιων συμπερασμάτων είναι παρακινδυνευμένη, αφού κάτι

τέτοιο θα απαιτούσε εκτεταμένες εφαρμογές με τη χρήση μεγάλης ποικιλίας φορέων και σεισμικών διεγέρσεων. Επίσης, η επίτευξη ενός επιπέδου ακριβείας ως προς μία παράμετρο, π.χ. τη μετακίνηση κορυφής δεν εξασφαλίζει ανάλογη ακρίβεια και στα υπόλοιπα μεγέθη απόκρισης, π.χ. πλαστικές στροφές κρίσιμων διατομών, γωνιακές παραμορφώσεις ορόφων, κ.α. (Μανούκας κ.α., 2006).



Σχήμα 1. Μέσο (%) σφάλμα μετακινήσεων ορόφων

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures, Federal Emergency Management Agency - Applied Technology Council, FEMA 440 – ATC-55 Project (2005)

Κανονισμός Επεμβάσεων (ΚΑΝ.ΕΠΕ.) – Σχέδιο Κειμένου 3, ΟΑΣΠ (2006)

Μανούκας, Γ.Η., Αθανατοπούλου, Α.Μ., & Αβραμίδης Ι.Ε., “Συγκριτική διερεύνηση παραλλαγών της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης βάσει σύγχρονων κανονιστικών κειμένων”, Πρακτικά 15^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Σκυροδέματος (Αλεξ/πολη Οκτώβριος 25-27, 2006), ΤΕΕ/ΕΤΕΚ, Αλεξ/πολη, (2006) 410-421

Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, Federal Emergency Management Agency FEMA 356 (2000)

Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, ASCE/SEI 41-06 Standard (2008)