

ΕΠΙΣΚΕΥΕΣ – ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΚΤΙΡΙΩΝ

Γ. Παναγόπουλος
Καθηγητής Εφαρμογών, ΤΕΙ Σερρών



Η ανελαστική στατική ανάλυση (pushover)
στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Επιτρεπόμενες μέθοδοι ανάλυσης στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Ελαστικές μέθοδοι

Ελαστική (ισοδύναμη)
στατική ανάλυση

Ελαστική δυναμική
ανάλυση

Αντιστοίχιση με τις μεθόδους
ανάλυσης που χρησιμοποιούνται
από τους κανονισμούς στο
σχεδιασμό νέων κατασκευών

Ανελαστικές μέθοδοι

Ανελαστική στατική
(pushover) ανάλυση

Ανελαστική δυναμική
ανάλυση χρονοϊστορίας

Δεν περιλαμβάνονται στους
κανονισμούς για το σχεδιασμό
νέων κατασκευών παρά μόνο ως
εναλλακτική επιλογή

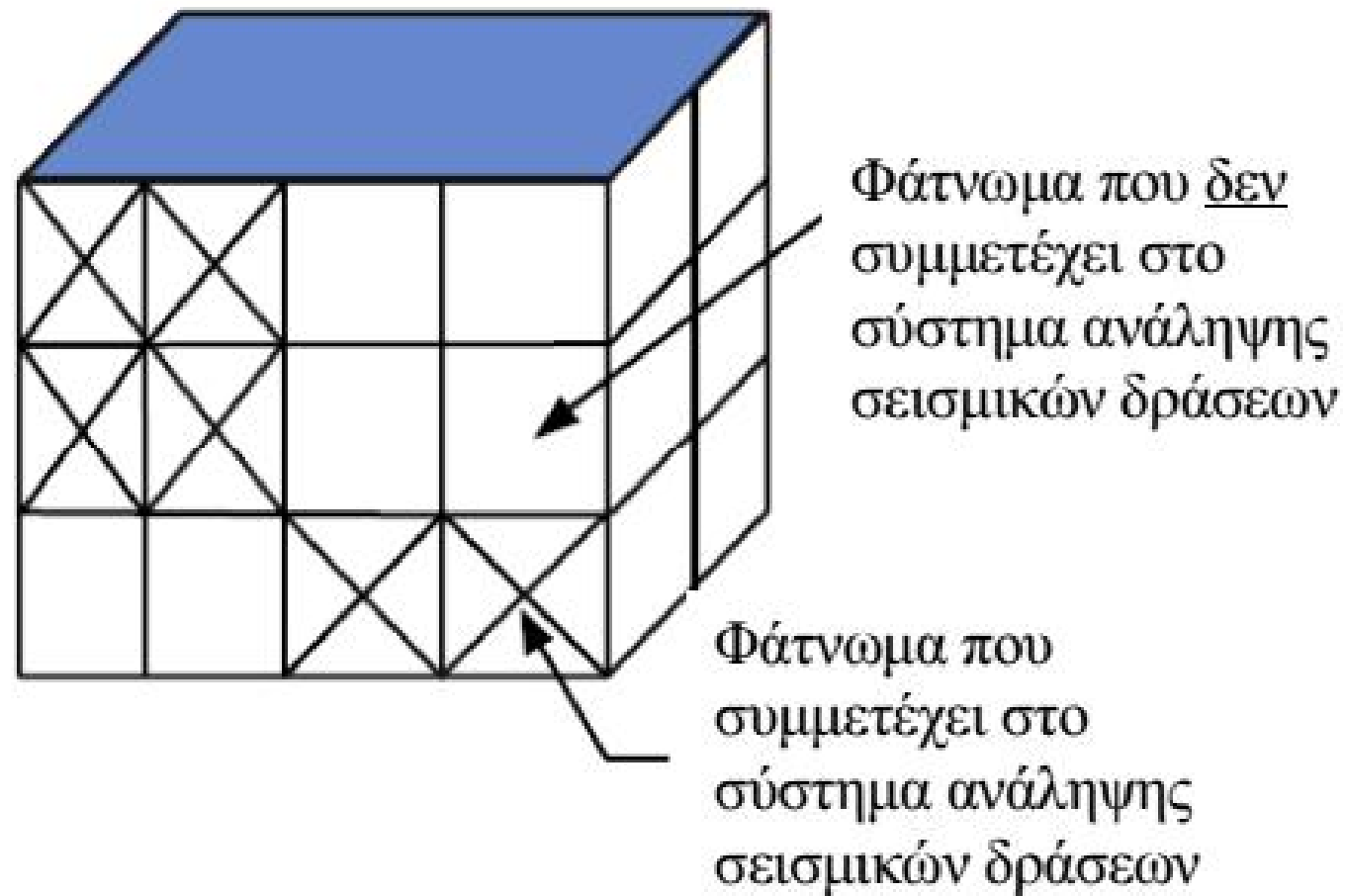
Ελαστική στατική ανάλυση – Προϋποθέσεις εφαρμογής

Ισχύουν οι προϋποθέσεις που θέτει ο ΕΚ 8-3, και ειδικότερα για τα ελληνικά κτίρια ισχύουν τα εξής:

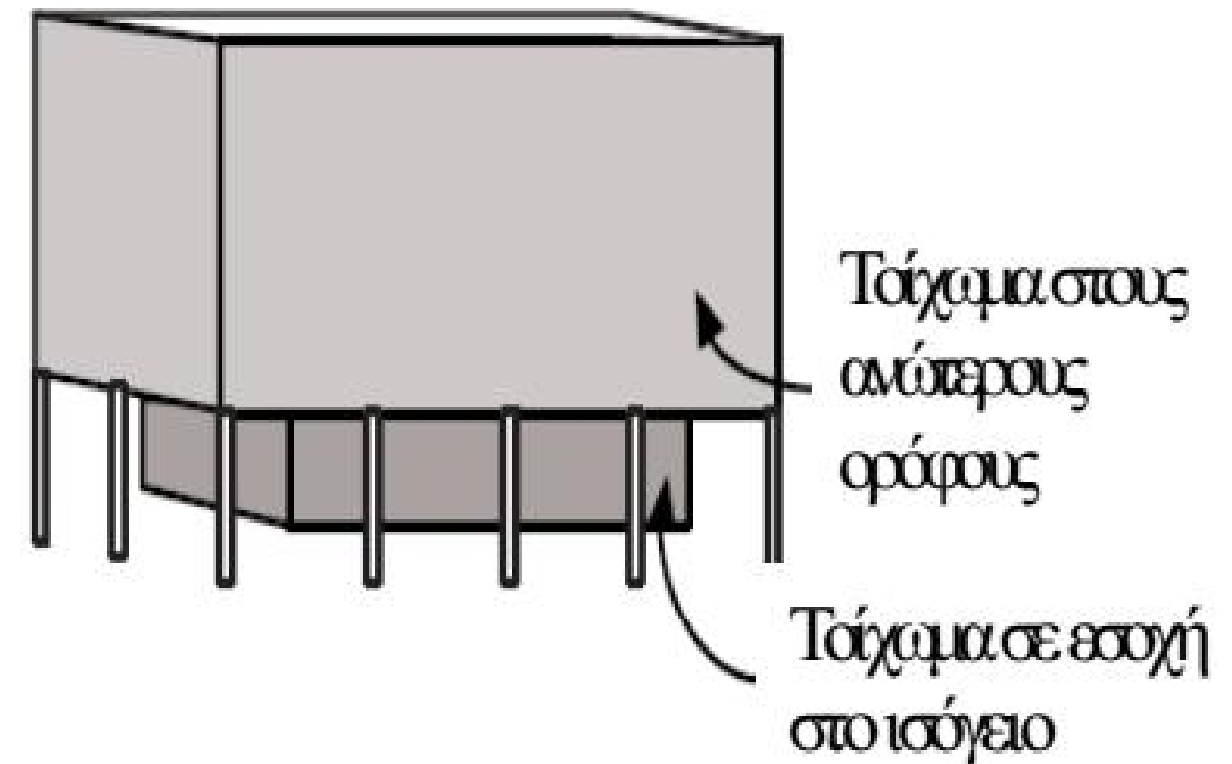
1. Η εφαρμογή της στατικής ελαστικής μεθόδου επιτρέπεται (για στάθμες επιτελεστικότητας Β ή Γ) όταν ικανοποιείται το σύνολο των παρακάτω συνθηκών
 - Για όλα τα κύρια στοιχεία προκύπτει $\lambda \leq 2.5$, ή για ένα ή περισσότερα από αυτά προκύπτει $\lambda > 2.5$ και το κτίριο είναι μορφολογικά κανονικό (λ : δείκτης ανεπάρκειας)
 - Η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος του κτιρίου T_0 είναι μικρότερη του $4T_c$ ή $2s$
 - Ο λόγος της οριζόντιας διάστασης σε έναν όροφο προς την αντίστοιχη διάσταση σε έναν γειτονικό όροφο δεν υπερβαίνει το 1.5 (εξαιρούνται ο τελευταίος όροφος και τα προσαρτήματα).
 - Το κτίριο δεν παρουσιάζει έντονα ασύμμετρη κατανομή της δυσκαμψίας σε κάτοψη, σε οποιονδήποτε όροφο
 - ο κτίριο σε καθ' ύψος τομή δεν παρουσιάζει ασύμμετρη κατανομή της μάζας ή της δυσκαμψίας
 - Το κτίριο διαθέτει σύστημα ανάληψης σεισμικών δράσεων σε δύο περίπου κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις
2. Εφόσον δεν υπάρχουν ουσιώδεις βλάβες, επιτρέπεται για τους σκοπούς (μόνον) της αποτίμησης η εφαρμογή της ελαστικής στατικής μεθόδου

Ελαστική στατική ανάλυση – Προϋποθέσεις εφαρμογής

Παραδείγματα μή-κανονικότητας καθύψος



Διακοπή φορέα καθύψος



εκτός επιπέδου εσοχή

Ελαστική δυναμική ανάλυση – Προϋποθέσεις εφαρμογής



1. Το πεδίο εφαρμογής της δυναμικής ελαστικής μεθόδου ορίζεται από τη συνθήκη πως για όλα τα κύρια στοιχεία προκύπτει $\lambda \leq 2,5$ ή για ένα ή περισσότερα από αυτά προκύπτει $\lambda > 2.5$ και το κτίριο είναι μορφολογικά κανονικό
2. Εφόσον δεν υπάρχουν ουσιώδεις βλάβες, επιτρέπεται για τους σκοπούς (μόνον) της αποτίμησης η εφαρμογή της δυναμικής ελαστικής μεθόδου

Ανελαστική στατική ανάλυση – Προϋποθέσεις εφαρμογής

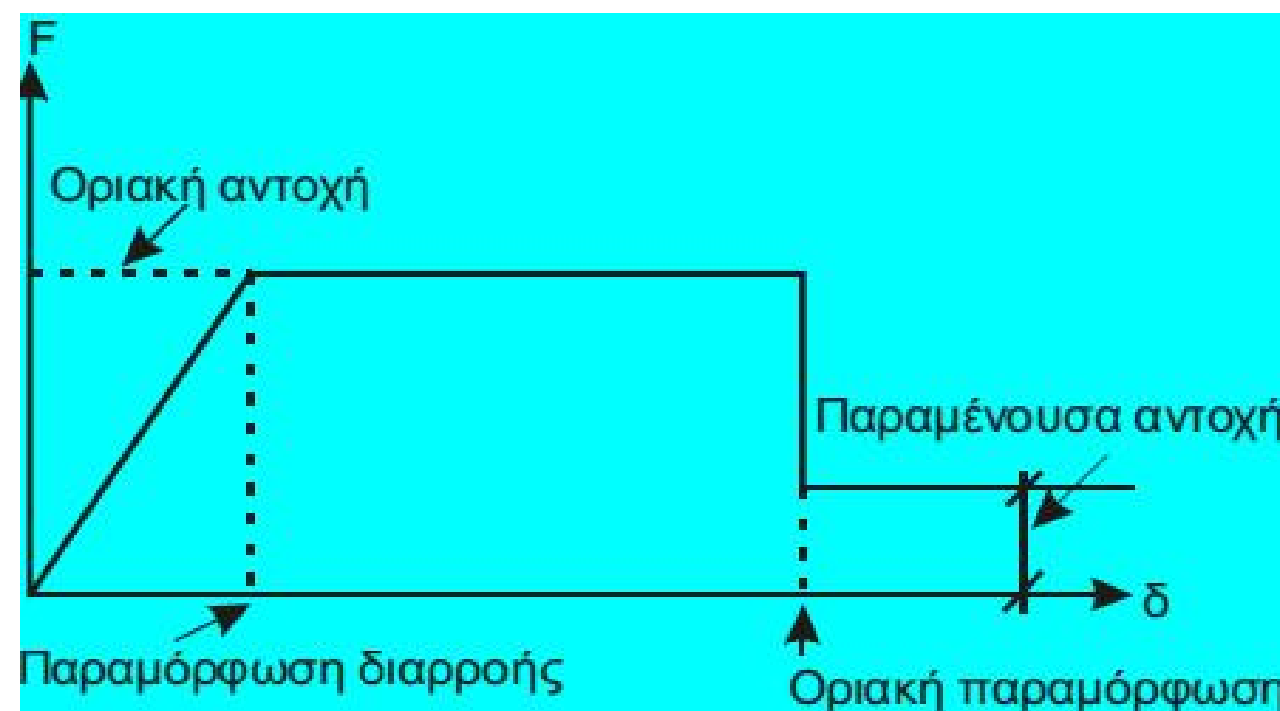
- Συνιστάται όταν εφαρμόζεται η ανελαστική στατική μέθοδος, να διασφαλίζεται τουλάχιστον «Ικανοποιητική» Στάθμη Αξιοπιστίας Δεδομένων (ΣΑΔ).
- Η στατική ανελαστική μέθοδος εφαρμόζεται σε κτίρια στα οποία η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική.
- Όταν η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική, επιτρέπεται να εφαρμόζεται η στατική ανελαστική ανάλυση, υπό τον όρο ότι θα εφαρμόζεται σε συνδυασμό με μια συμπληρωματική δυναμική ελαστική ανάλυση

Ανελαστική δυναμική ανάλυση – Προϋποθέσεις εφαρμογής

- Αξιόπιστη γνώση αντοχών υλικών. ($\Sigma A \Delta \geq 1$).
- Επαρκής εμπειρία και εξειδίκευση του μηχανικού
- Χρήση τουλάχιστον 3 σεισμικών διέγέρσεων (επιταχυνσιογραφήμάτων)

Ανελαστική στατική ανάλυση – Σκοπός της ανάλυσης

- Κύριος στόχος της ανελαστικής στατικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο υπόκειται στη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός.
- Για κατ' εξοχήν πλάστιμα στοιχεία, οι τιμές των παραμορφώσεων αυτών συγκρίνονται απευθείας με τις αντίστοιχες τιμές σχεδιασμού (Κεφ. 9)
- Άμεση προσομοίωση μη-γραμμικών χαρακτηριστικών έντασης-παραμόρφωσης



Ανελαστική στατική ανάλυση – Πλεονεκτήματα

ΑΣΑ παρέχει πολύτιμες πληροφορίες που δεν μπορούν να δοθούν από τις ελαστικές μεθόδους, συγκεκριμένα:

- Ρεαλιστική εκτίμηση των δυνάμεων σε σχετικώς ψαθυρά στοιχεία, π.χ. αξονικές δυνάμεις σε υποστυλώματα, ροπές και τέμνουσες κόμβων, κλπ.
- Το μέγεθος των πλαστικών παραμορφώσεων (θ_p) στα στοιχεία που διαρρέουν (σε υφιστάμενα κτίρια μπορεί να είναι και κατακόρυφα)
- Αναγνώριση των αδύνατων-κρίσιμων περιοχών καθύψος ή σε κάτοψη (ασυνέχειες αντοχής), όπου συγκεντρώνονται και οι απαιτήσεις θ_p
- Αναγνώριση των συνεπειών της μείωσης της αντοχής (‘αστοχία’) των πιο αδύνατων στοιχείων στην απόκριση του φορέα ως σύνολο
- Δυνατότητα ελέγχου της πληρότητας και επάρκειας του τρόπου ροής των δυνάμεων στο φορέα, προσομοιώνοντας όλα τα στοιχεία που την επηρεάζουν (και τις τοιχοποιίες πλήρωσης)

Ανελαστική στατική ανάλυση – Περιορισμοί

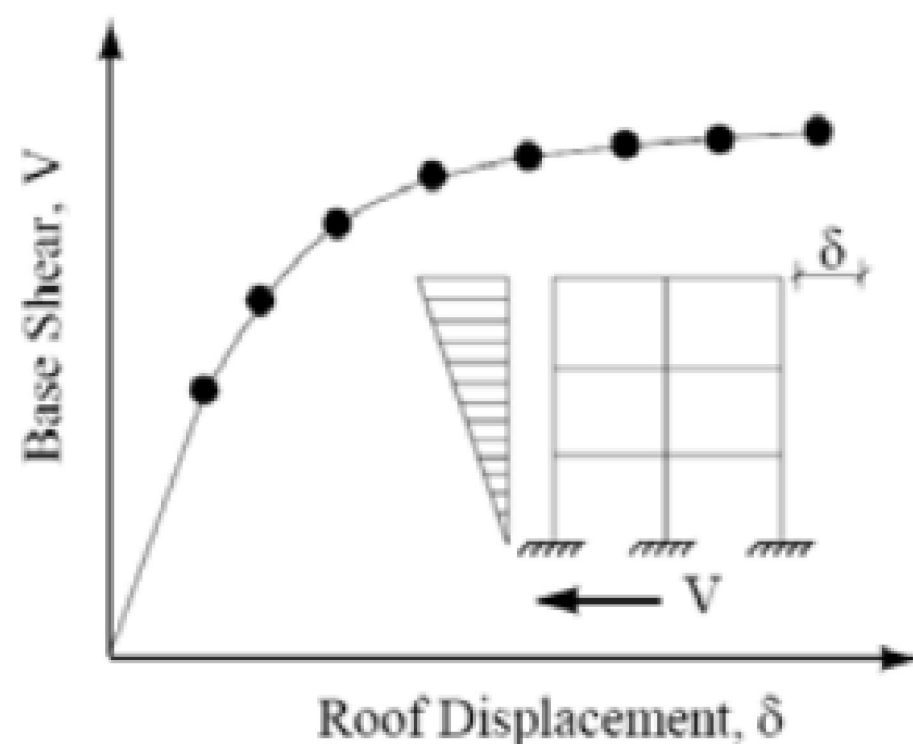
Πρέπει να είναι σαφές ότι η ΑΣΑ είναι εκ φύσεως προσεγγιστική, καθώς βασίζεται σε στατική φόρτιση. Ως τέτοια, δεν μπορεί να προσομοιώσει επαρκώς τα δυναμικά φαινόμενα, συγκεκριμένα:

- Οι υπολογιζόμενες παραμορφώσεις μπορεί να είναι πολύ ανακριβείς όταν η επιρροή των ανώτερων ιδιομορφών είναι σημαντική (ψηλά κτίρια ή και κακές μορφολογίες)
- Αδυναμία να αναγνωρίσει μηχανισμούς αστοχίας που δημιουργούνται μετά τον αρχικό
- Δυσχερής εφαρμογή σε χωρικούς φορείς με προβλήματα κανονικότητας. προβλήματα όπως:
 - κατάλληλος ορισμός της εκκεντρότητας των φορτίων (με συνεκτίμηση της δυναμικής επιρροής)
 - κατάλληλο λογισμικό
- Η χρήση πολλών κατανομών δυνάμεων (συμπεριλαμβανομένων των ιδιομορφικών) περιορίζει, αλλά δεν εξαλείφει την ανακρίβεια

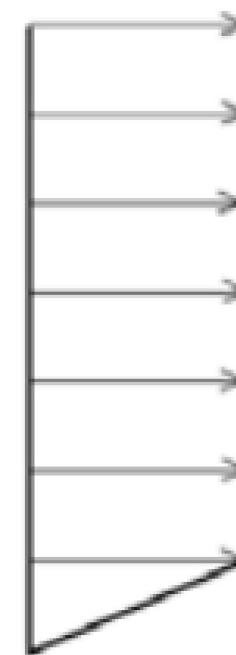
Ανελαστική στατική ανάλυση – Κανανομή δυνάμεων

Σύμφωνα με τον EC8 (και τη FEMA356) πρέπει να εφαρμόζονται τουλάχιστον δύο διαφορετικές κατανομές των οριζόντιων (σεισμικών) δυνάμεων:

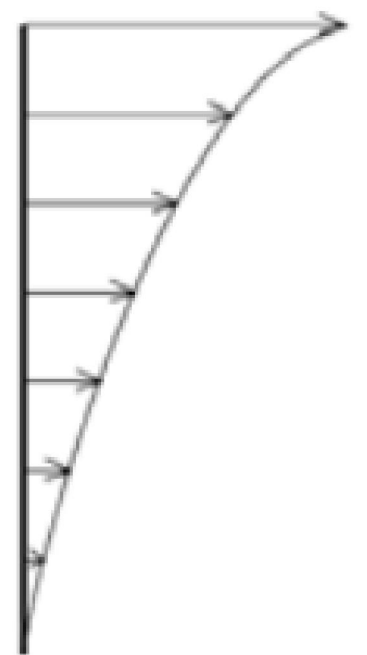
- “ομοιόμορφη” κατανομή: πλευρικά φορτία ανάλογα προς τη μάζα (σταθερή επιτάχυνση καθ ύψος)
- “ιδιομορφική” κατανομή: πλευρικά φορτία συμβατά με τα δυναμικά φορτία (π.χ. 1ης ιδιομορφής) που προέκυψαν από ελαστική ιδιομορφική ανάλυση



a) *Triangular profile*



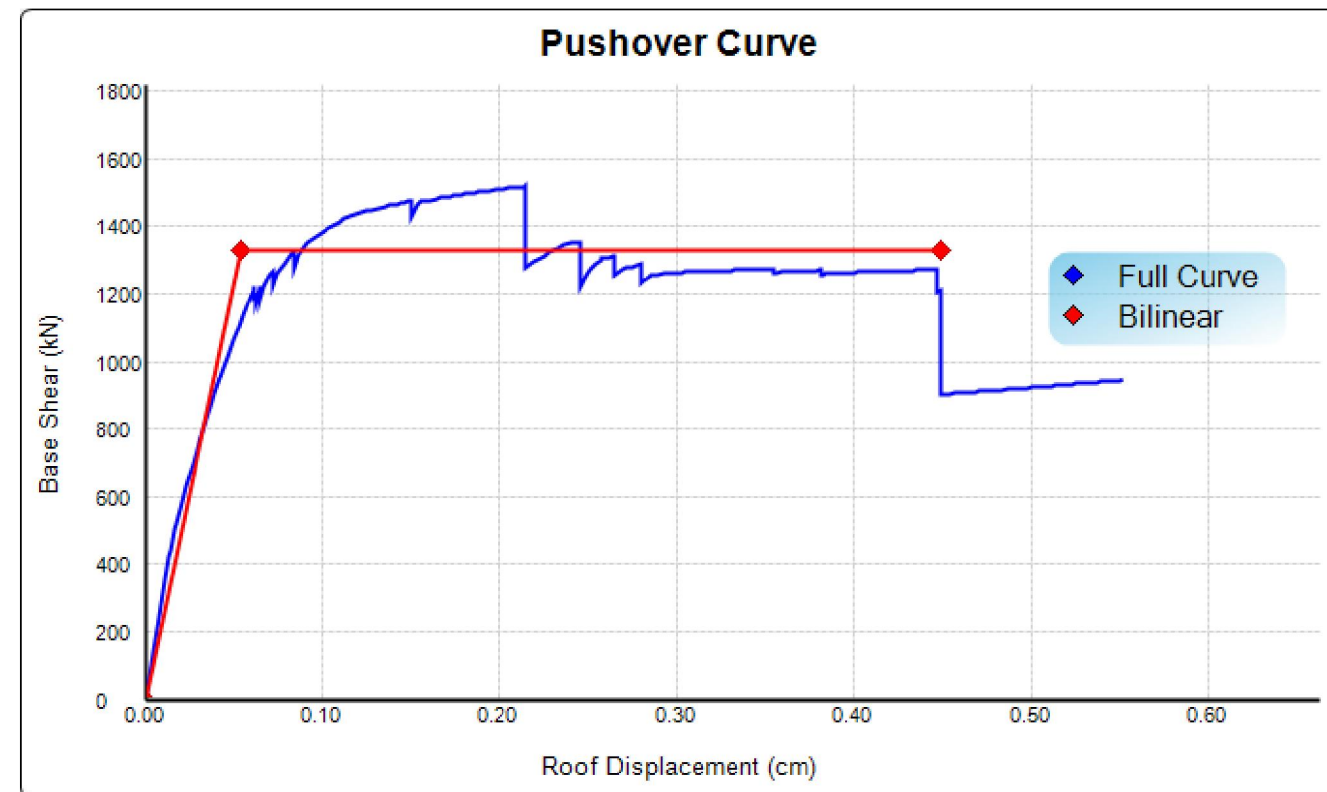
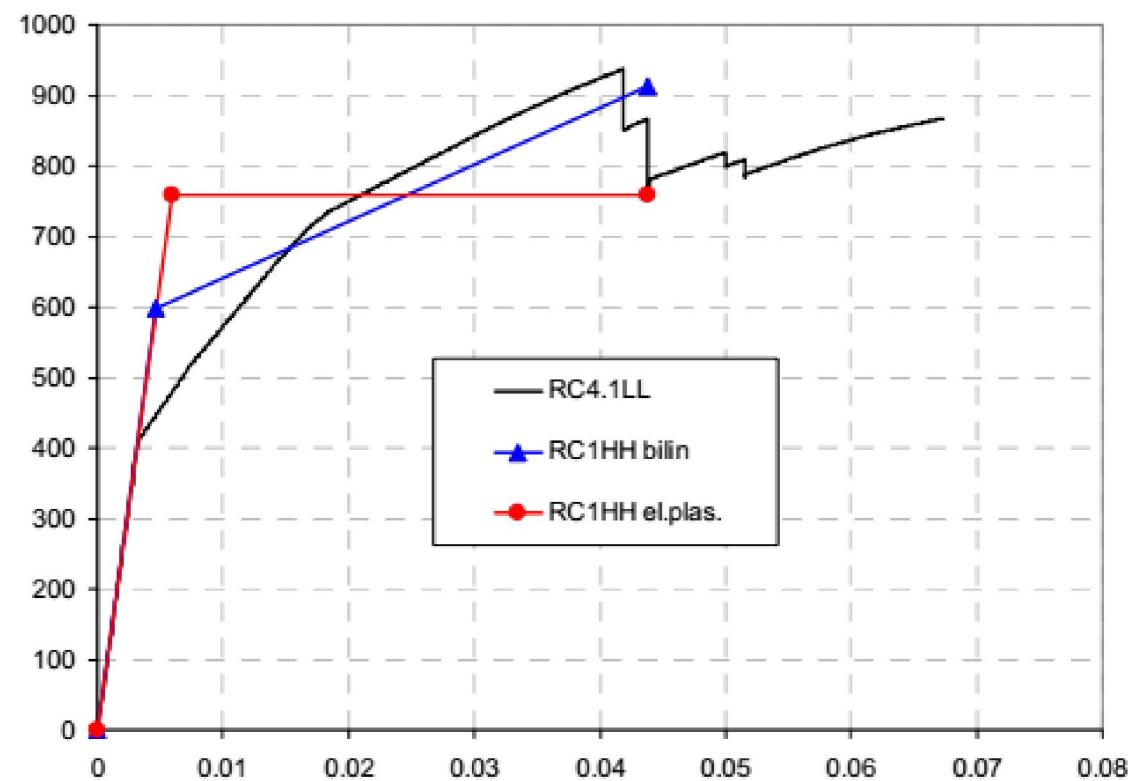
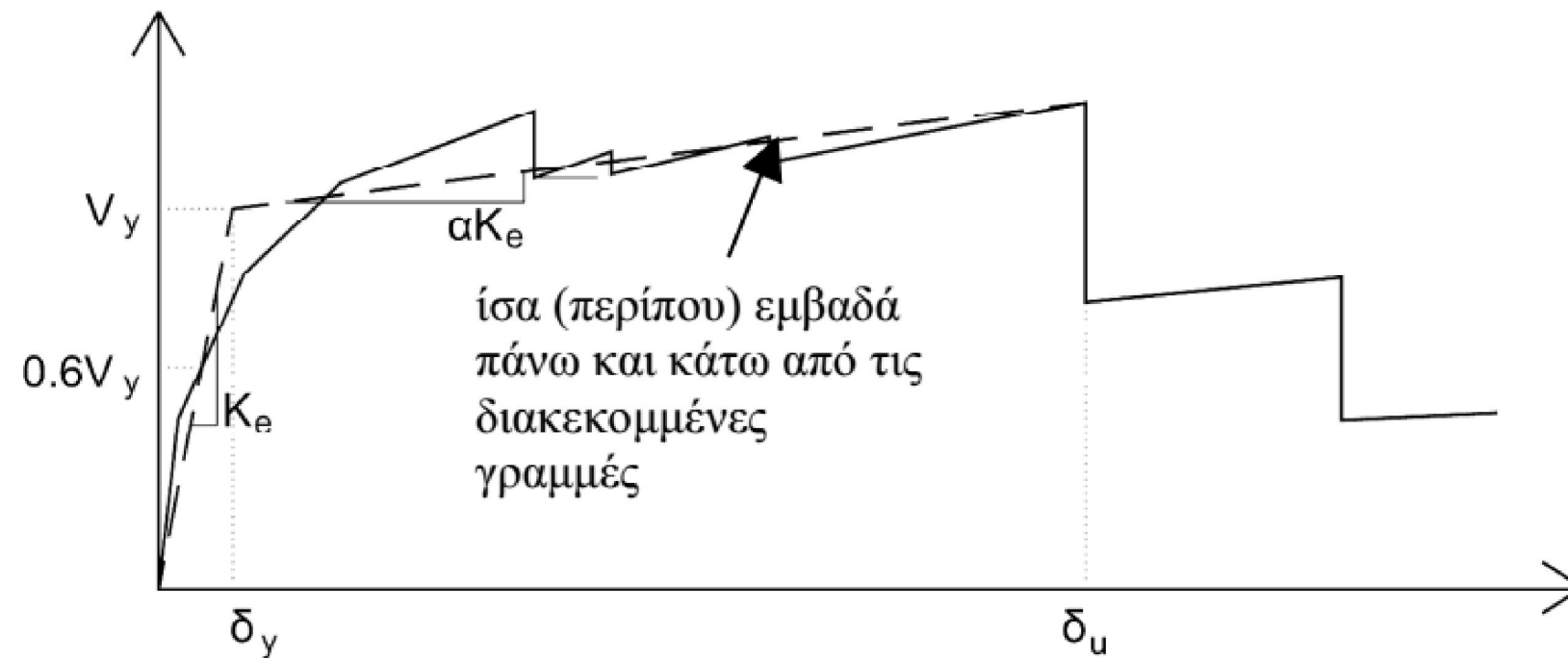
b) *Uniform profile*



c) *Higher-mode profile*

Ανελαστική στατική ανάλυση – Καμπύλη αντίστασης

Καμπύλη αντίστασης: Διάγραμμα τέμνουσας βάσης – μετακίνησης στην κορυφή



Διγραμμικές προσεγγίσεις με εντοπισμό των σημείων διαρροής και 'αστοχίας'

Ανελαστική στατική ανάλυση – Στοχευόμενη μετακίνηση

Η στάθμη της σεισμικής διέγερσης εισάγεται μέσω της κατάλληλης στοχευόμενης μετακίνησης στο κέντρο μάζας της οροφής της κατασκευής δ_t

Εφόσον δεν χρησιμοποιείται ακριβέστερη προσέγγιση, η στοχευόμενη μετακίνηση δ_t επιτρέπεται να υπολογίζεται με βάση την παρακάτω σχέση

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 (T_e^2 / 4\pi^2) S_e(T)$$

όπου $S_e(T)$ η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση (από το φάσμα του ΕΚ 8-1) που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο της κατασκευής T_e (υπολογιζόμενη με βάση το σημείο καμπής του διαγράμματος δυνάμεων – μετακινήσεων του φορέα, όπως ορίζεται στην §5.7.3.4), και C_0 , C_1 , C_2 και C_3 διορθωτικοί συντελεστές που ορίζονται ως εξής:

$$T_e = T \sqrt{\frac{K_0}{K_e}}$$

όπου T η ελαστική κυριαρχούσα ιδιοπερίοδος στη θεωρούμενη διεύθυνση που υπολογίζεται με βάση μια ελαστική δυναμική ανάλυση, K_0 η αντίστοιχη ελαστική πλευρική δυσκαμψία, ενώ η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία K_e υπολογίζεται σύμφωνα με τη §5.7.3.4.

Ανελαστική στατική ανάλυση – Στοχευόμενη μετακίνηση

- C_0 : Συντελεστής που συσχετίζει τη φασματική μετακίνηση του ισοδύναμου ελαστικού φορέα με δυσκαμψία K_e ($S_d = [T_e^2 / 4\pi^2] \cdot S_e$), με την πραγματική μετακίνηση δ_t της κορυφής του ελαστοπλαστικά αποκρινόμενου φορέα. (§5.7.3.4). Οι τιμές του μπορεί να λαμβάνονται ίσες προς 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5, για αριθμό ορόφων 1, 2, 3, 5, και ≥ 10 , αντίστοιχα.
- C_1 : Ο λόγος $C_1 = \delta_{inel} / \delta_{el}$ της μέγιστης ανελαστικής μετακίνησης ενός κτιρίου προς την αντίστοιχη ελαστική επιτρέπεται να λαμβάνεται από τις σχέσεις:
- $C_1 = 1.0$ για $T \geq T_c$, και
- $C_1 = [1.0 + (R - 1)T_c / T] / R$ για $T < T_c$
- όπου T_c η τιμή στην οποία αρχίζει ο κατιών κλάδος του φάσματος απόκρισης (βλ. ΕΚ 8-1) και $R = V_{el} / V_y$ ο λόγος της ελαστικής απαίτησης προς την αντίσταση διαρροής του φορέα.

$$R = \frac{S_e / g}{V_y / W} \cdot C_m$$

Ανελαστική στατική ανάλυση – Στοχευόμενη μετακίνηση

C_2 : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του βρόχου υστέρησης στη μέγιστη μετακίνηση. Οι τιμές του μπορεί να λαμβάνονται από τον Πίνακα Σ5.1. Για τιμές T μεταξύ $0.1s$ και T_c πρέπει να γίνεται γραμμική παρεμβολή.

Στάθμη επιτελεστικότητας	$T \leq 0.1s$		$T \geq T_c$	
	φορέας τύπου 1	φορέας τύπου 2	φορέας τύπου 1	φορέας τύπου 2
«Περιορισμένες βλάβες»	1.0	1.0	1.0	1.0
«Σημαντικές βλάβες»	1.3	1.0	1.1	1.0
«Οιονεί κατάρρευση»	1.5	1.0	1.2	1.0

Ως φορείς τύπου 1 νοούνται οι φορείς χαμηλής πλαστιμότητας (π.χ. κτίρια πριν το 1985, ή κτίρια που η καμπύλη αντίστασής τους χαρακτηρίζεται από διαθέσιμη πλαστιμότητα μετακινήσεων μικρότερη του 2), που αναμένεται να έχουν φτωχότερη υστερητική συμπεριφορά από εκείνους με υψηλή πλαστιμότητα (φορείς τύπου 2, π.χ. κτίρια από το 1985 και έπειτα, ή κτίρια που η καμπύλη αντίστασής τους χαρακτηρίζεται από διαθέσιμη πλαστιμότητα μετακινήσεων μεγαλύτερη του 2).

Δεδομένου ότι η επιρροή της υστερητικής συμπεριφοράς είναι μεγαλύτερη για υψηλότερα επίπεδα μετελαστικής συμπεριφοράς του φορέα, γίνεται στον Πίνακα Σ5.1 διαφοροποίηση του C_2 με τη στάθμη επιτελεστικότητας

Ανελαστική στατική ανάλυση – Στοχευόμενη μετακίνηση

C_3 : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων 2ας τάξεως (P-Δ). Μπορεί να ληφθεί ίσος προς $1+5(\theta-0.1)/T$, όπου θ ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας (βλ. ΕΚ 8-1). Στη συνήθη (για κτίρια από ΟΣ και από τοιχοποιία) περίπτωση, όπου $\theta < 0.1$, λαμβάνεται $C_3=1.0$.