

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΥΠΟΔΟΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ  
ΓΕΝΙΚΗ ΓΡΑΜΜΑΤΕΙΑ ΥΠΟΔΟΜΩΝ  
ΓΕΝΙΚΗ ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗΣ  
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΑΝΟΝΩΝ ΚΑΙ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ (ΔΚΠ)  
ΤΜΗΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ  
ΜΕΛΕΤΩΝ – ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΜΟΡΦΩΣΗΣ (Τμήμα Γ')

## ΕΝΗΜΕΡΩΤΙΚΗ ΗΜΕΡΙΔΑ

Κανονισμός Επεμβάσεων σε Κτήρια από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα (ΚΑΝ.ΕΠΕ).  
Ο ρόλος του στη διατήρηση και ενίσχυση της ποιότητας

ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΠΡΙΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑ ΤΗΝ ΕΠΕΜΒΑΣΗ  
**ΑΝΑΛΥΣΕΙΣ ΜΕ ΑΝΕΛΑΣΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΥΣ**

**ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ Χ. ΡΕΠΑΠΗΣ**

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Τ.Ε.  
ΑΕΙ Πειραιά Τ.Τ.



ΑΘΗΝΑ 10/05/2017

# Ανάλυση πριν και μετά την επέμβαση

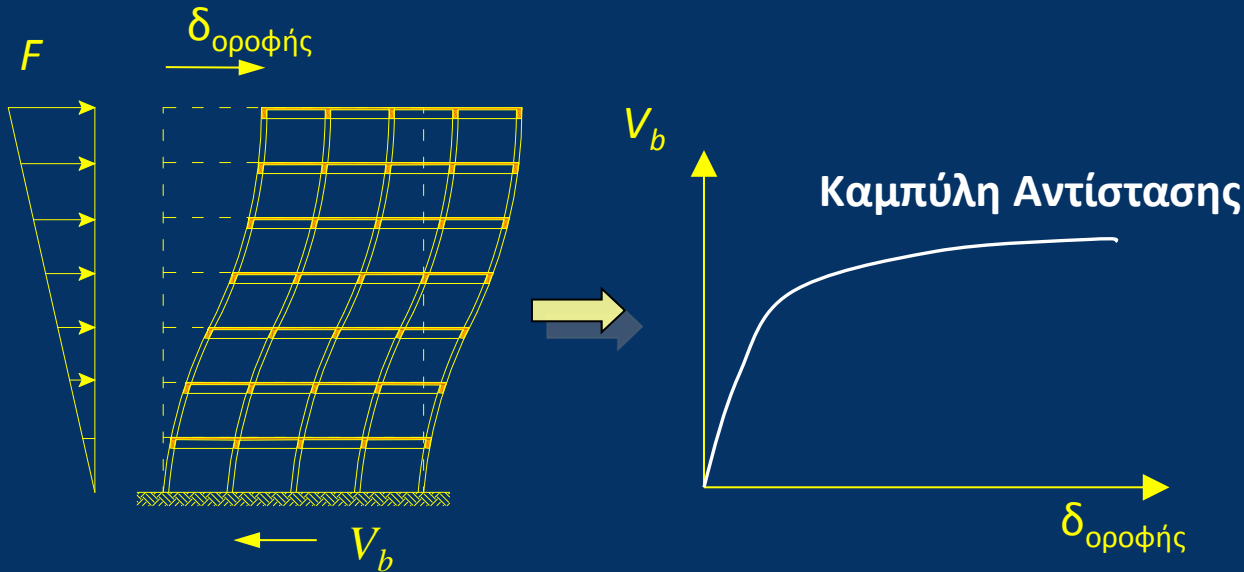
ΚΑΝΕΠΕ – § 5.1.1

Επιτρεπόμενες μέθοδοι ανάλυσης:

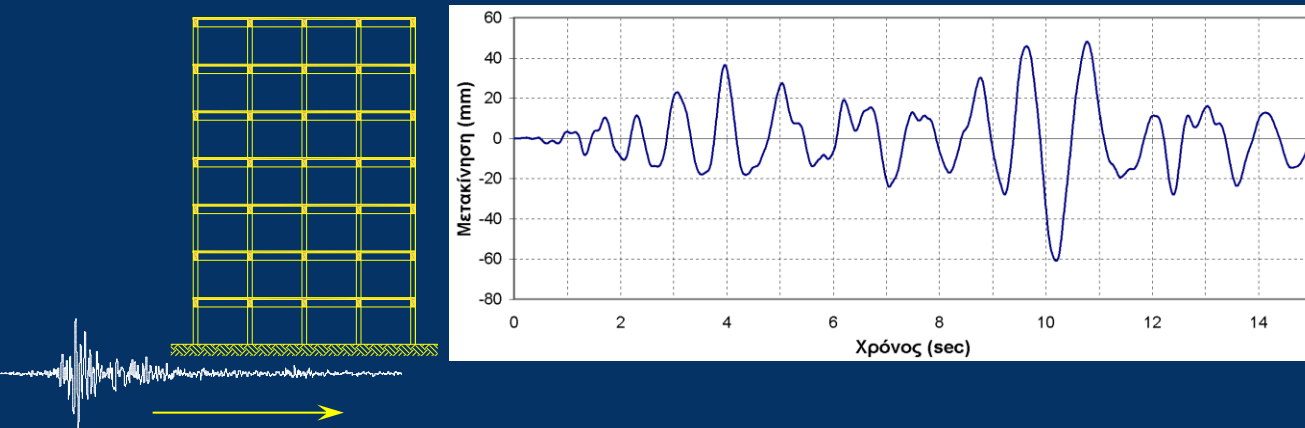
- Ελαστική (ισοδύναμη) στατική
- Ελαστική δυναμική
- Ανελαστική (ελαστοπλαστική) στατική (§ 5.7)
- Ανελαστική δυναμική (ανάλυση χρονοϊστορίας) (§ 5.8)
- Με βάση τα εντατικά μεγέθη και τις παραμορφώσεις που προκύπτουν από την ανάλυση γίνονται οι αντίστοιχοι έλεγχοι ικανοποίησης των κριτηρίων επιτελεστικότητας.

# Μη Γραμμικές Αναλύσεις

- Στατική



- Δυναμική



Από τις ανελαστικές αναλύσεις:

- Φέρουσα ικανότητα κατασκευής
- Αλληλουχία και κατανομή βλαβών
- Μηχανισμό αστοχίας
- Διαθέσιμη υπεραντοχή και πλαστιμότητα
- Συνεισφορά τοιχοπληρώσεων

# Ανελαστική στατική ανάλυση

ΚΑΝΕΠΕ – § 5.7

- **Σκοπός:** Εκτίμηση των ανελαστικών παραμορφώσεων που θα αναπτυχθούν στα δομικά στοιχεία όταν το κτίριο υπόκειται στην σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός. Σύγκριση τους με τις μέγιστες επιτρεπόμενες.

# Ανελαστική στατική ανάλυση

ΚΑΝΕΠΕ – § 5.7.2

## Προϋποθέσεις εφαρμογής

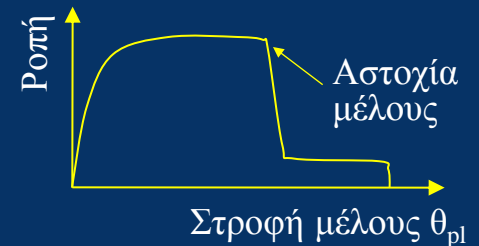
- Συνιστάται να διασφαλίζεται τουλάχιστον «Ικανοποιητική» ΣΑΔ.
- Η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική  
Έλεγχος:
  - Αρχική δυναμική ελαστική ανάλυση στην οποία συνεκτιμώνται οι ανώτερες ιδιομορφές ( $\Sigma M > 90\% M_{ολ}$ )
  - 2<sup>η</sup> δυναμική ελαστική ανάλυση με βάση μόνο την 1<sup>η</sup> ιδιομορφή (σε κάθε διεύθυνση)
  - Σημαντική η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών όταν η τέμνουσα σε κάθε όροφο από την 1<sup>η</sup> ανάλυση  $> 130\%$  της τέμνουσας της 2<sup>ης</sup> ανάλυσης
  - (Δυναμικές αναλύσεις με ελαστικό φάσμα του EC8 για  $q=1$ )

# Ανελαστική στατική ανάλυση

ΚΑΝΕΠΕ – § 5.7.2

Όταν η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών είναι σημαντική:

- Επιτρέπεται να εφαρμόζεται η στατική ανελαστική ανάλυση σε συνδυασμό με μια **συμπληρωματική δυναμική ελαστική** ανάλυση
- Διεξάγονται όλοι οι έλεγχοι και με τις **δύο μεθόδους** ενώ
- Επιτρέπεται μια αύξηση κατά 25% των τιμών των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα κριτήρια ελέγχου
  - Π.χ. στην μέθοδο του καθολικού δείκτη συμπεριφοράς  $q$ , αυτός μπορεί να λαμβάνεται αυξημένος κατά 25%
- **Βασικές Παραδοχές:**
  - Το προσομοίωμα συνεκτιμά τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά του νόμου δύναμης – παραμόρφωσης των στοιχείων
- Προσομοίωμα υπό οριζόντια φορτία κατανεμημένα ανάλογα με τις αδρανειακές δυνάμεις του σεισμού



# Κατανομή οριζοντίων δράσεων

ΚΑΝΕΠΕ – § 5.7.1.2

- Επιβολή Δυνάμεων ή/και Παραμορφώσεων (+/-)
- Σταθερή κατανομή (EC8 → τουλάχιστον 2 κατανομές)

Ομοιόμορφη

$$F_i = \frac{m_i}{\sum_{j=1}^N m_j} V$$

Τριγωνική

$$F_i = \frac{m_i h_i}{\sum_{j=1}^N m_j h_j} V$$

Βάσει της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής

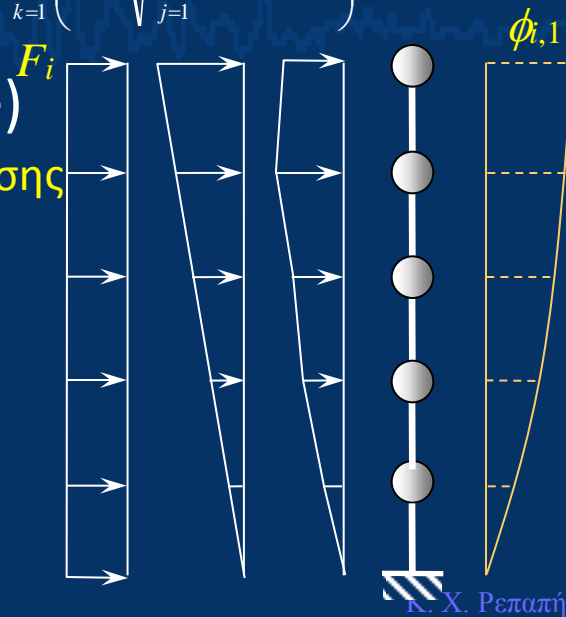
$$F_i = \frac{m_i \phi_{i,1}}{\sum_{j=1}^N m_j \phi_{j,1}} V$$

Επαλληλία ιδιομορφών

$$F_i = \frac{m_i \sqrt{\sum_{j=1}^{nm} (\phi_{i,j} \Gamma_j)^2}}{\sum_{k=1}^N \left( m_j \sqrt{\sum_{j=1}^{nm} (\phi_{k,j} \Gamma_j)^2} \right)} V$$

- Αναπροσαρμοζόμενη κατανομή (adaptive)

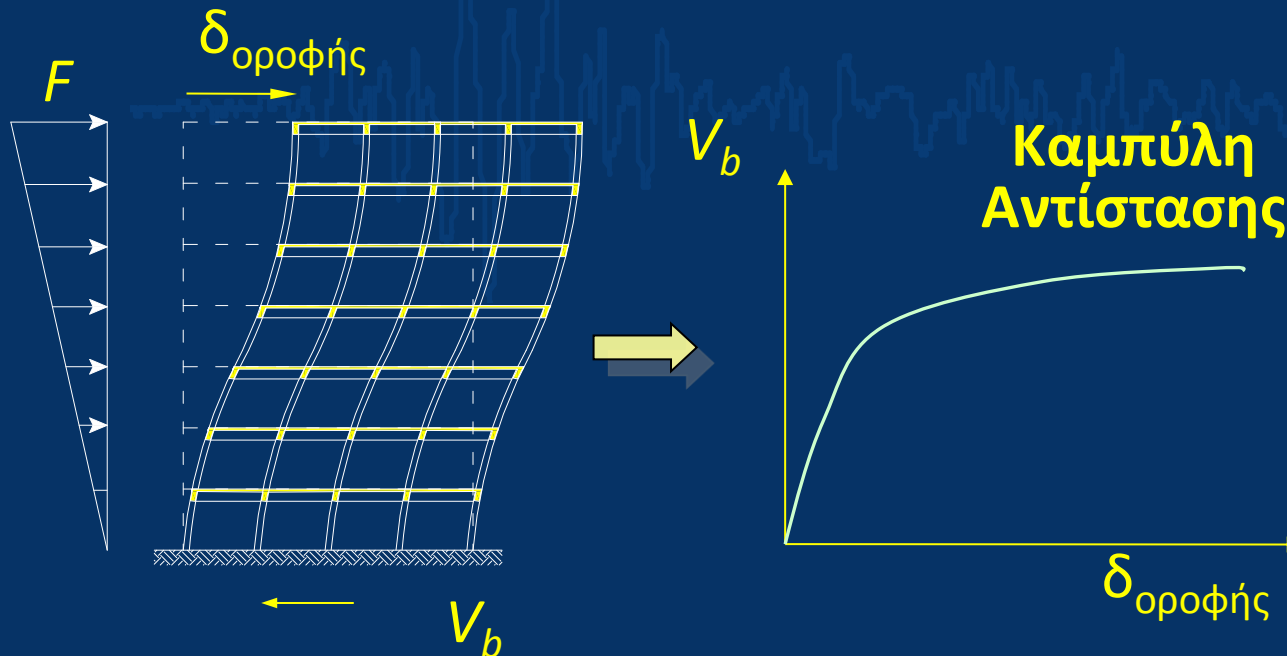
- Ανανέωση της κατανομής σε κάθε βήμα της ανάλυσης ώστε να ληφθεί υπόψη η σταδιακή μείωση της δυσκαμψίας και αύξηση της ιδιοπεριόδου η οποία συμβαίνει κατά την ανακυκλιζόμενη μη γραμμική σεισμική φόρτιση.
- Ανάλογα με το παραμορφωμένο σχήμα.
- Ανάλογα με τις τέμνουσες στον κάθε όροφο.
- Ανάλογα με την μεταβολή της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής.



# Ανελαστική στατική ανάλυση

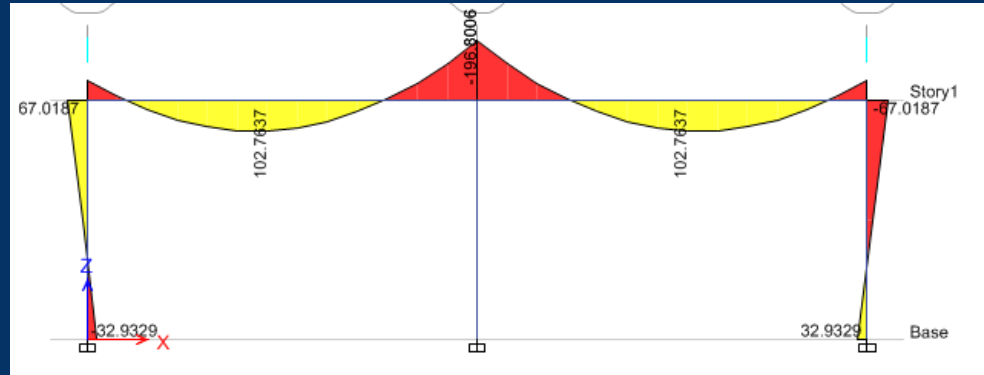
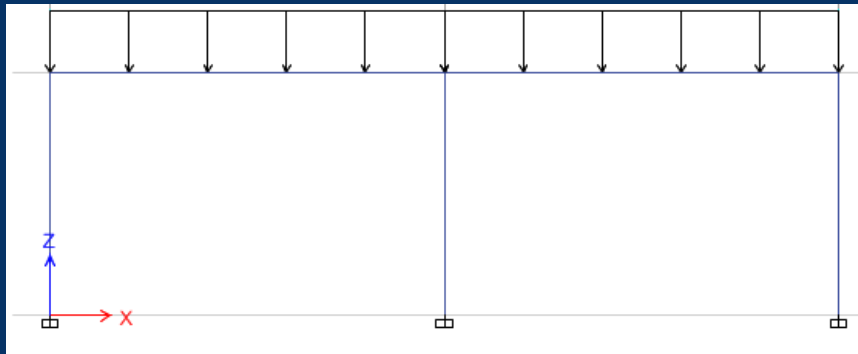
ΚΑΝΕΠΕ – § 5.7.1

- Από την ανάλυση προκύπτει η **καμπύλη αντίστασης** του κτιρίου, σε όρους τέμνουσας βάσης – μετακίνησης οροφής (μετακίνηση χαρακτηριστικού σημείου του κτιρίου: κόμβου ελέγχου → συνήθως στο κέντρο μάζας της οροφής)

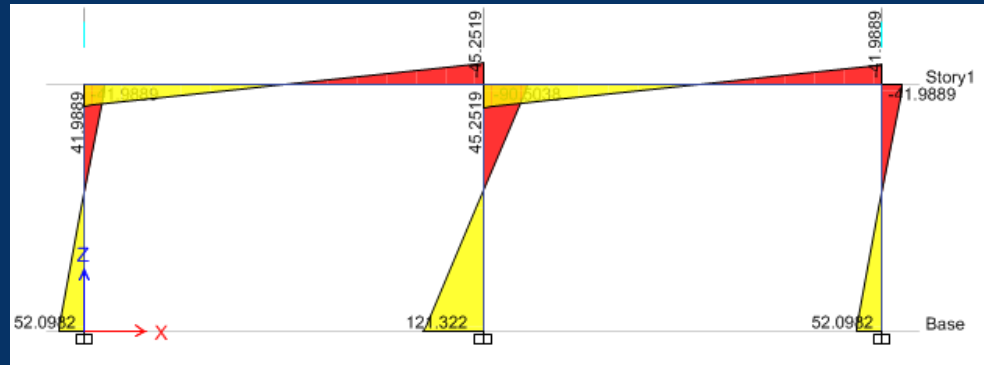
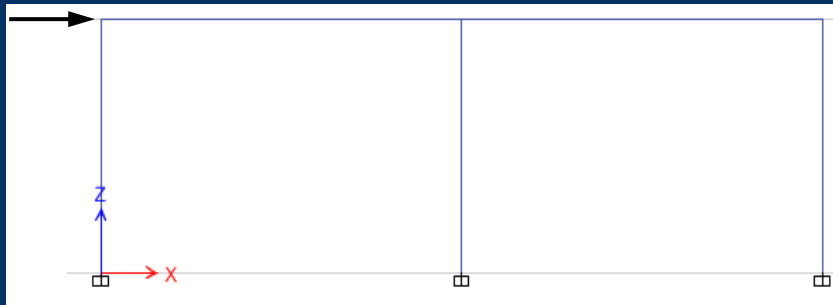




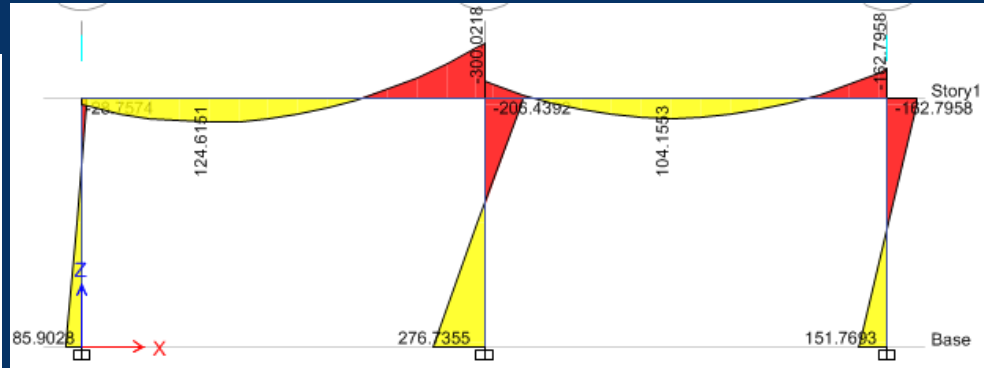
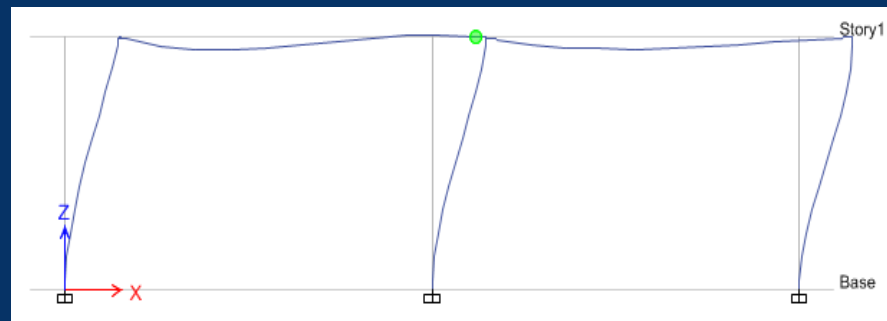
## Κατακόρυφα φορτία



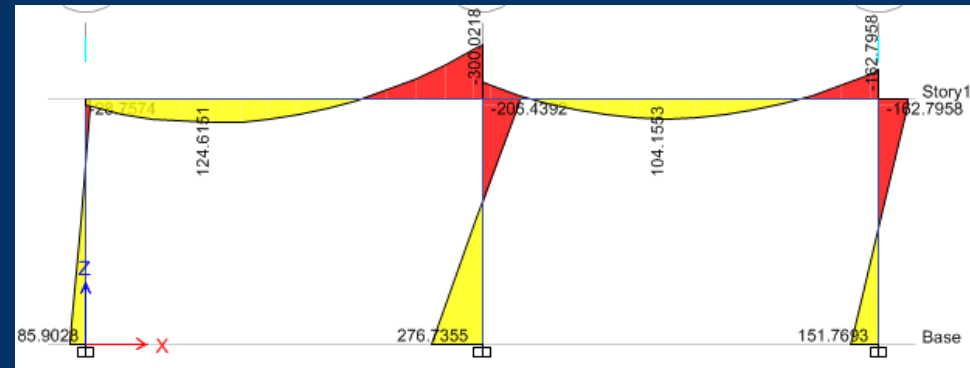
## Οριζόντιο φορτίο



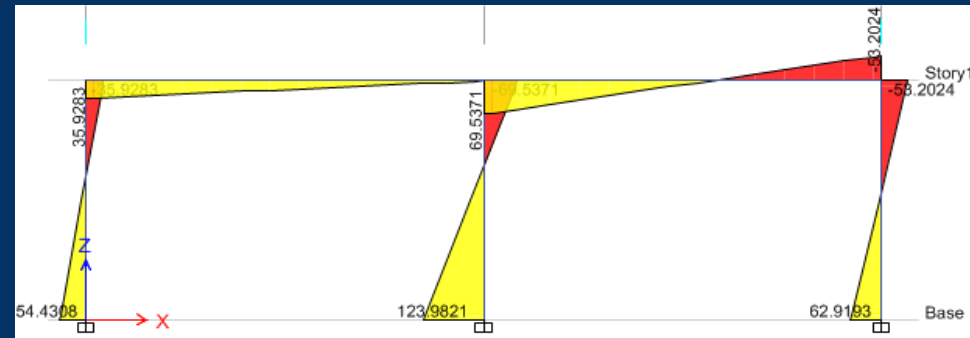
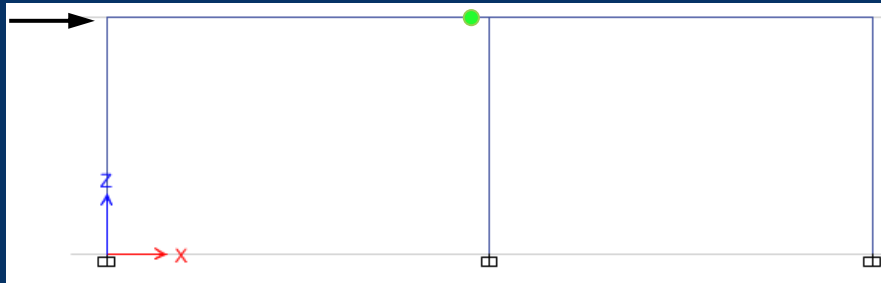
## Επαλληλία – 1<sup>η</sup> πλαστική άρθρωση



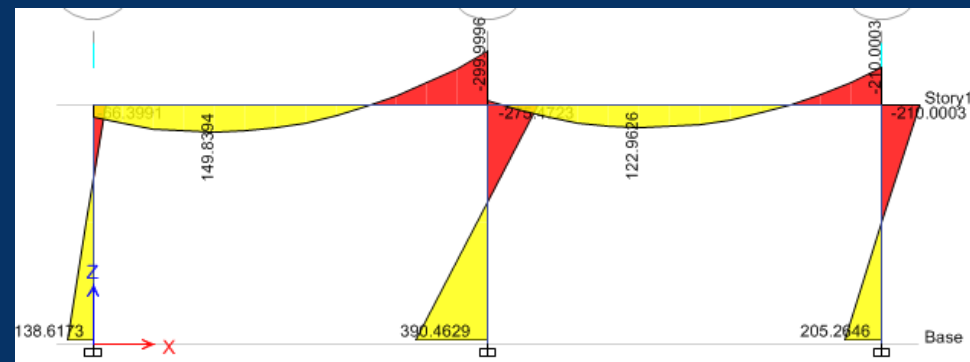
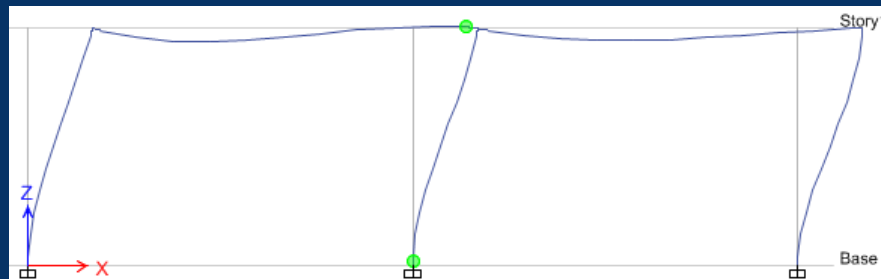
# Προηγούμενη κατάσταση

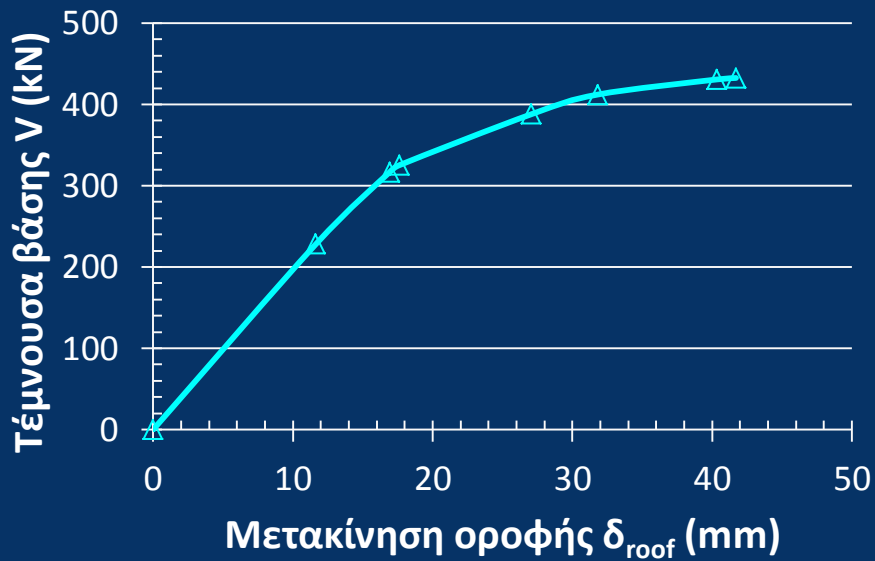


## Οριζόντιο φορτίο

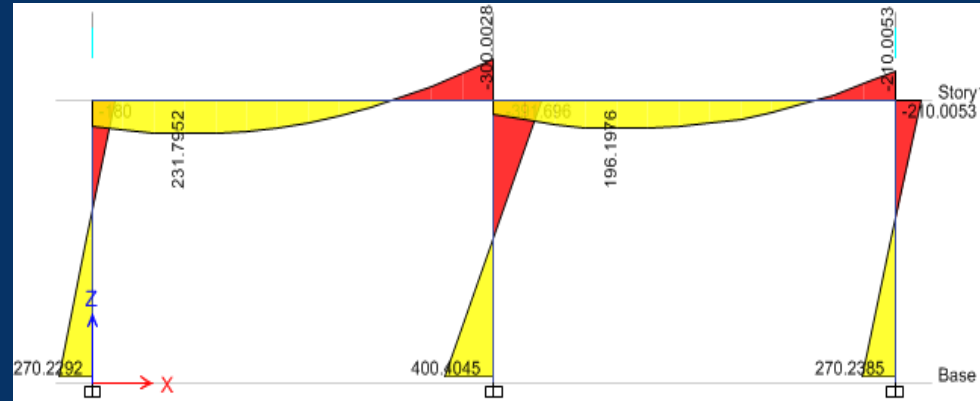


## Επαλληλία – 2<sup>η</sup> πλαστική άρθρωση

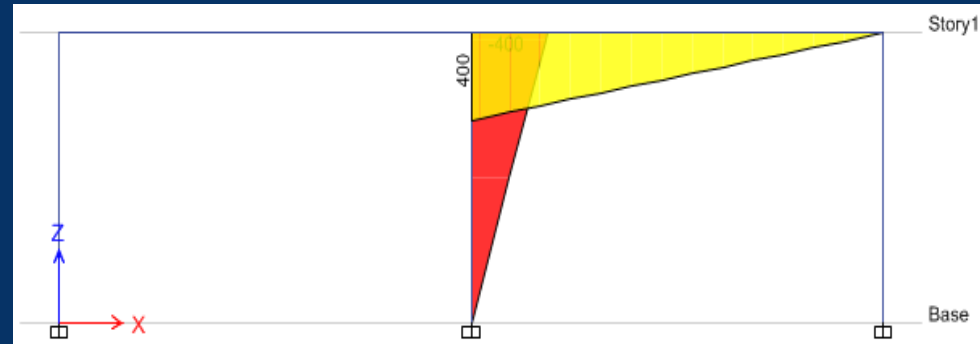
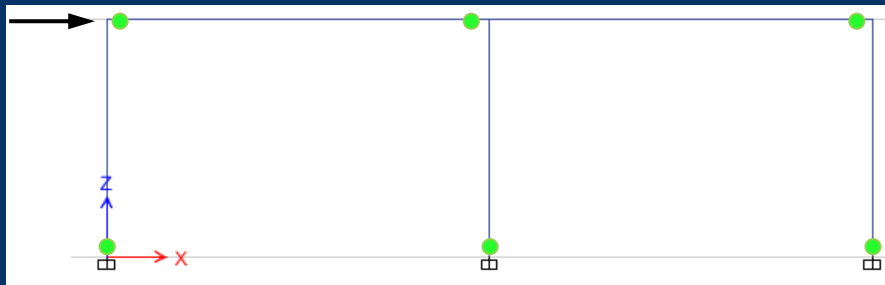




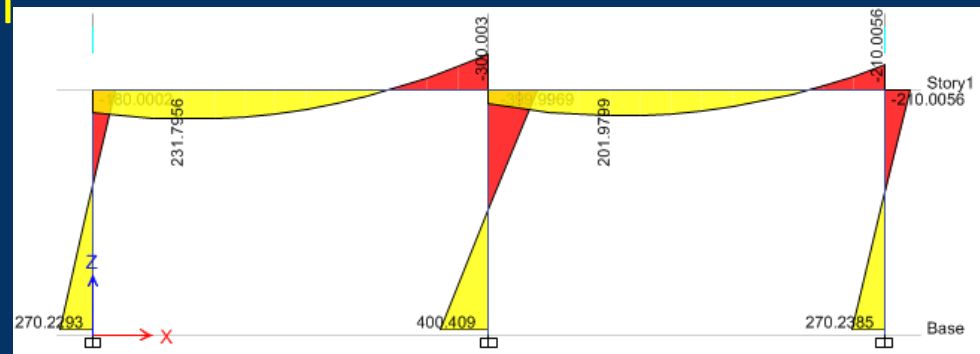
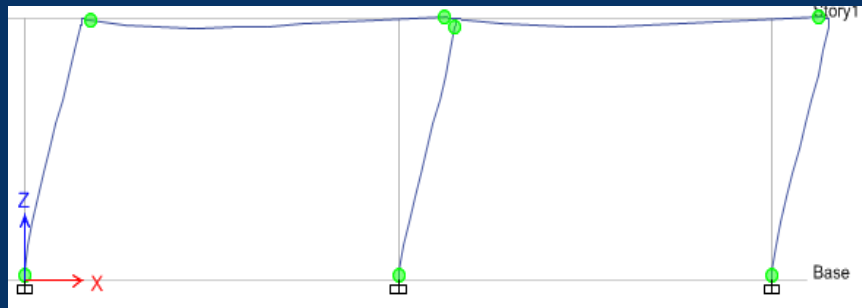
Προηγούμενη κατάσταση  
(με 6 πλαστικές αρθρώσεις)



Οριζόντιο φορτίο



Επαλληλία – 7<sup>η</sup> πλαστική άρθρωση



# Στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού

ΚΑΝΕΠΕ – § 2.2.1

- Σχεδιασμός/Αποτίμηση με Στάθμες Επιτελεστικότητας (Performance Based Design)
- Βασίζεται στην αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου βλαβών (στάθμης επιτελεστικότητας) ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού (στάθμη σεισμικής δράσης),  
→ δηλαδή στον καθορισμό του επιδιωκόμενου στόχου σεισμικής ικανότητας.
- Η κλασσική μεθοδολογία σχεδιασμού (μέθοδος δυνάμεων) εξετάζει μόνο την συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι να αρχίσουν οι βλάβες (ελαστική απόκριση) και δεν ασχολείται με το τι συμβαίνει μετά.

# Στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού

## Στάθμες Σεισμικής Συμπεριφοράς

Στάθμες Αντισεισμικού Σχεδιασμού  
(Συχνότητα εμφάνισης σεισμικής δράσης)

	άμεση χρήση	περιορισμός βλαβών	προστασία ζωής	αποφυγή κατάρρευσης
συχνοί σεισμοί (43 χρόνια)			μη αποδεκτή συμπεριφορά (για νέα κτίρια)	
περιστασιακοί σεισμοί (72 χρόνια)	Συμπεριφορά	Συμπεριφορά	συνήθων κτιρίων	
σπάνιοι σεισμοί (475 χρόνια)	Συμπεριφορά	Συμπεριφορά	σημαντικών κτιρίων	
πολύ σπάνιοι σεισμοί (970 χρόνια)	Συμπεριφορά	Συμπεριφορά	πολύ σημαντικών κτιρίων	

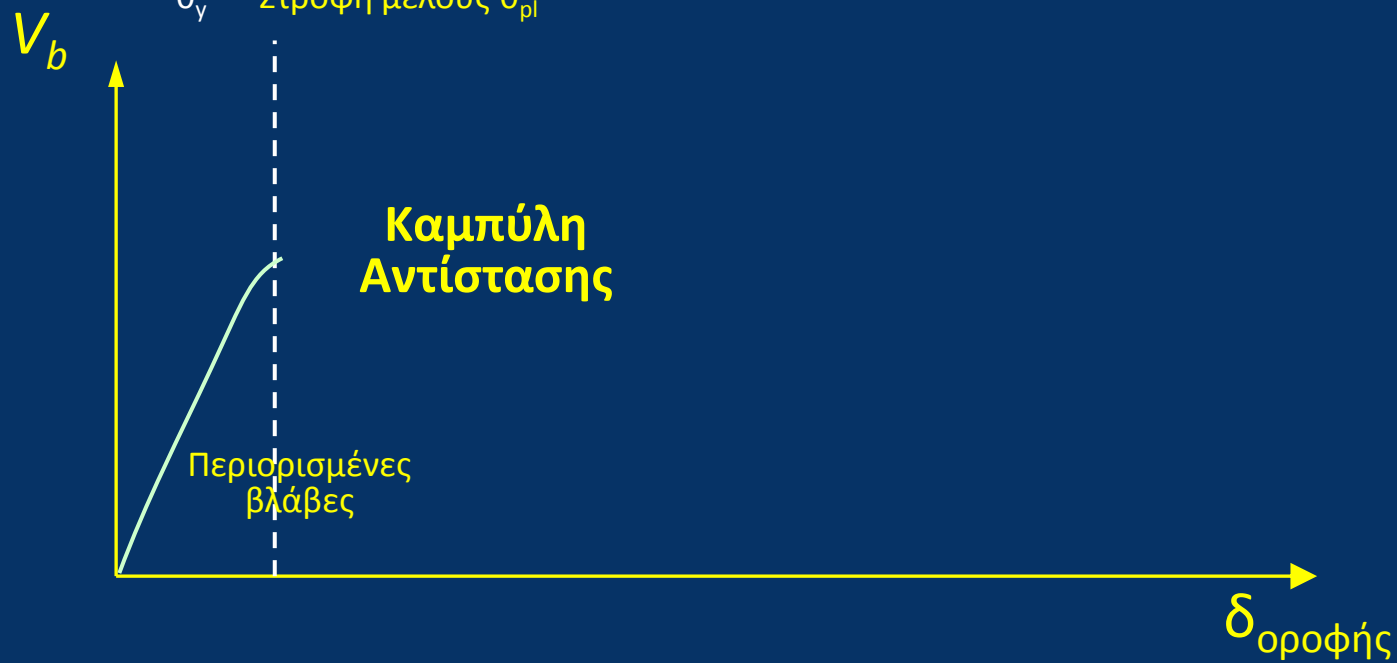
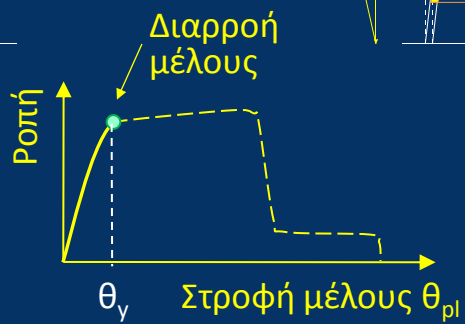
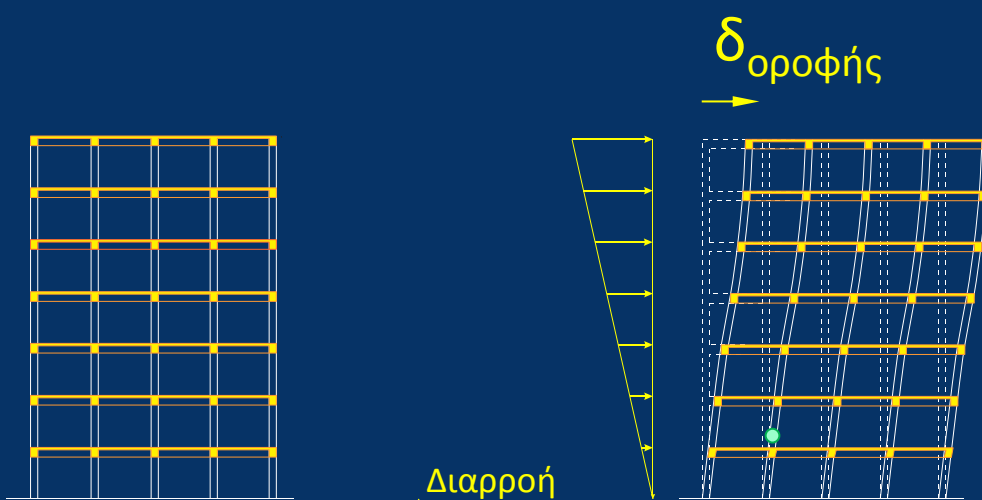
Πίνακας σεισμικού σχεδιασμού με στάθμες επιτελεστικότητας SEAOC [1995]

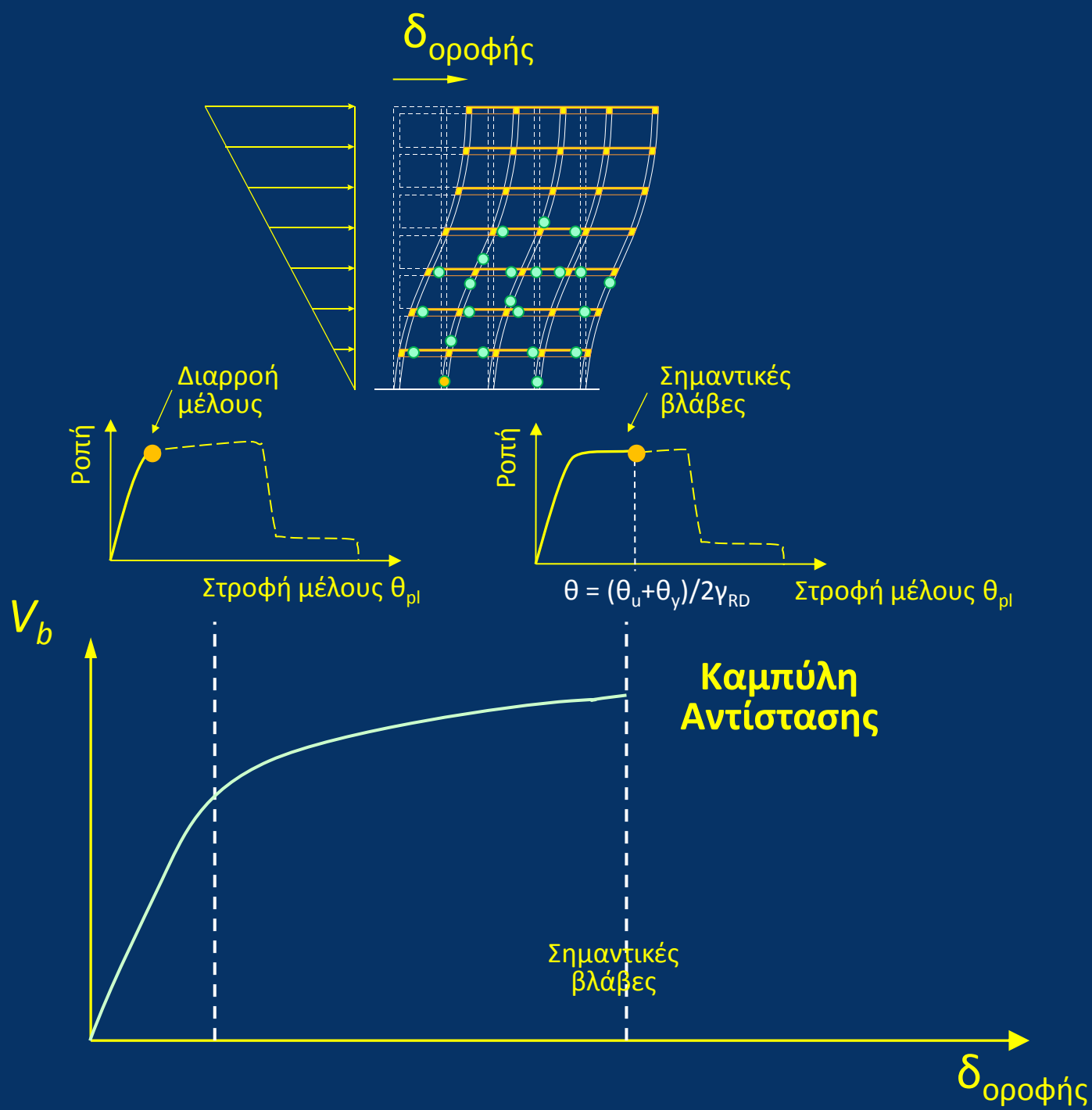
# Στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού

ΚΑΝΕΠΕ – § 2.2.1

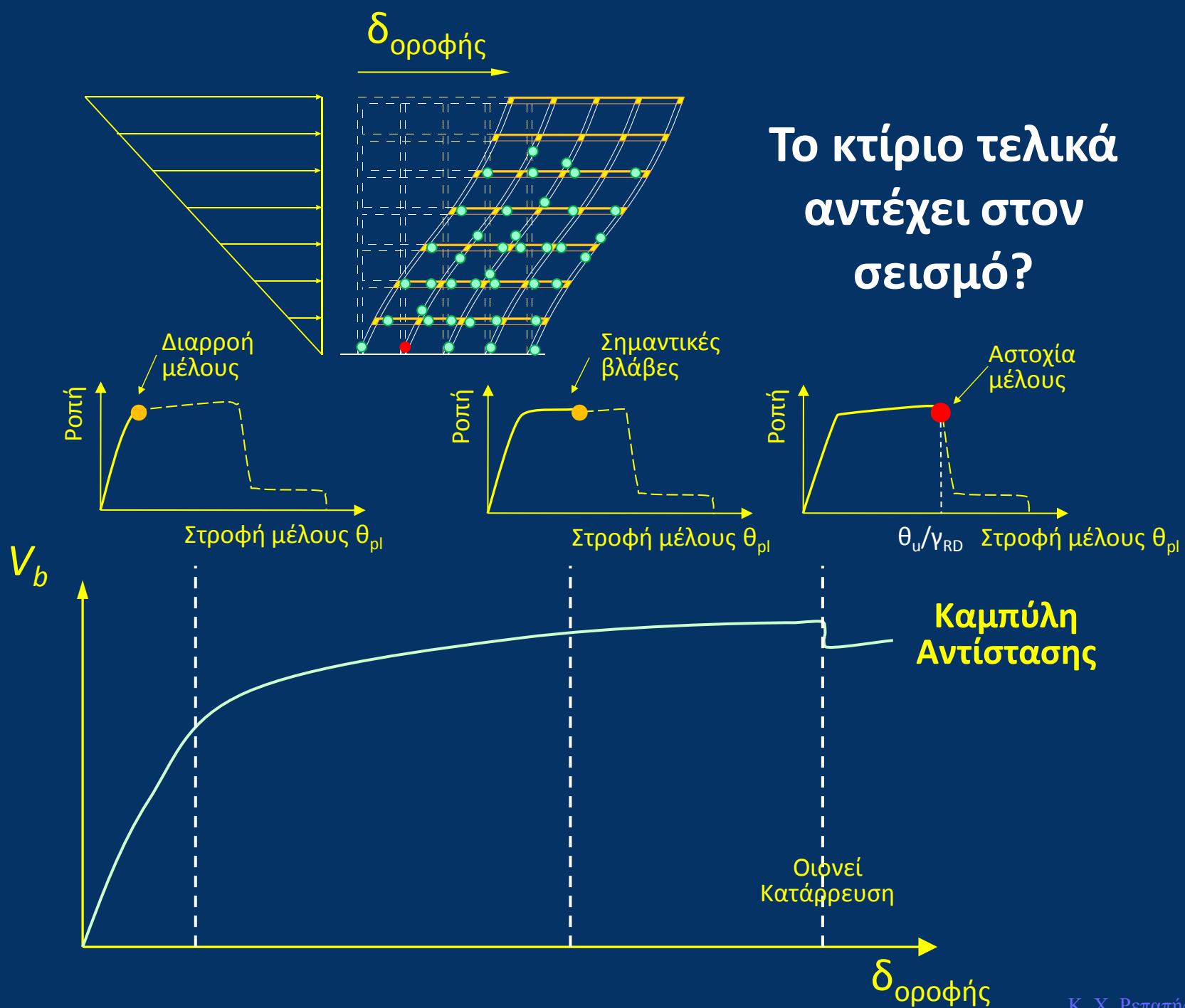
## Στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού φέροντος οργανισμού

Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Περιορισμένες βλάβες	Σημαντικές βλάβες	Οιονεί κατάρρευση
10%	A1	B1	Γ1
50%	A2	B2	Γ2









# Στοχευόμενη Μετακίνηση

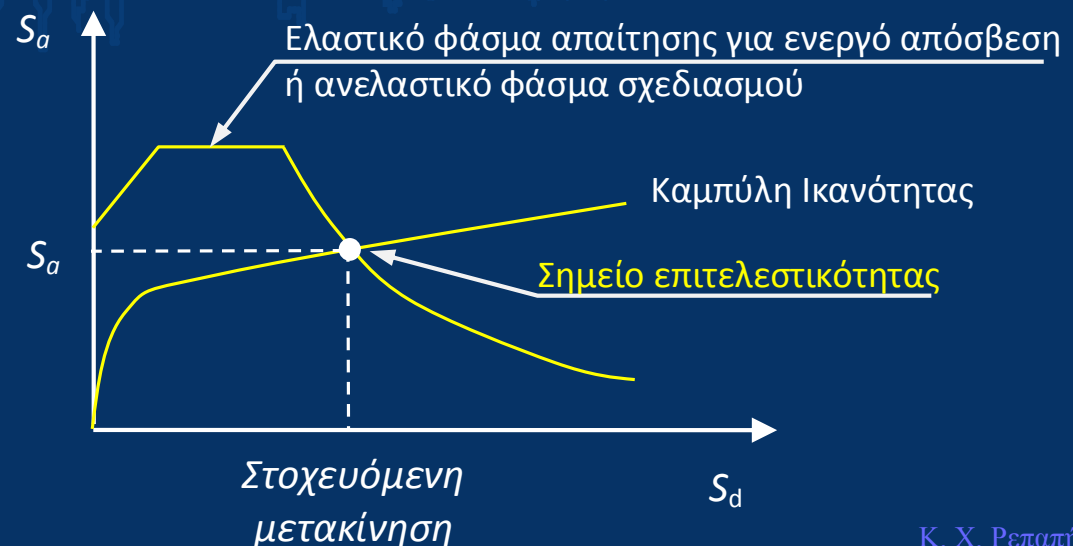
- Μη-γραμμική ανάλυση χρονοϊστορίας
  - Απαιτεί εξειδικευμένα προγράμματα
  - Σημαντικό υπολογιστικό κόστος
  - Αποτελέσματα εξαρτώνται από την επιλογή των σεισμικών διεγέρσεων

Απλοποιητικές μέθοδοι:

- Μέθοδος διαγράμματος Ικανότητας  
(Capacity Spectrum Method, ATC-40 [1996])
- Μέθοδοι με χρήση συντελεστή μεγέθυνσης των μετατοπίσεων  
 $\Delta_i = C \Delta_e$
- Μέθοδος Συντελεστή Μετακίνησης  $\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2}$   
(Displacement Coefficient Method, Fema-273, ΚΑΝΕΠΕ)
- Μέθοδοι με χρήση ανελαστικών φασμάτων
  - N2 Method [Fajfar, 1999], (Μέθοδος EC8)
  - Capacity – Demand – Diagram Method [Chopra & Goel, 1999]

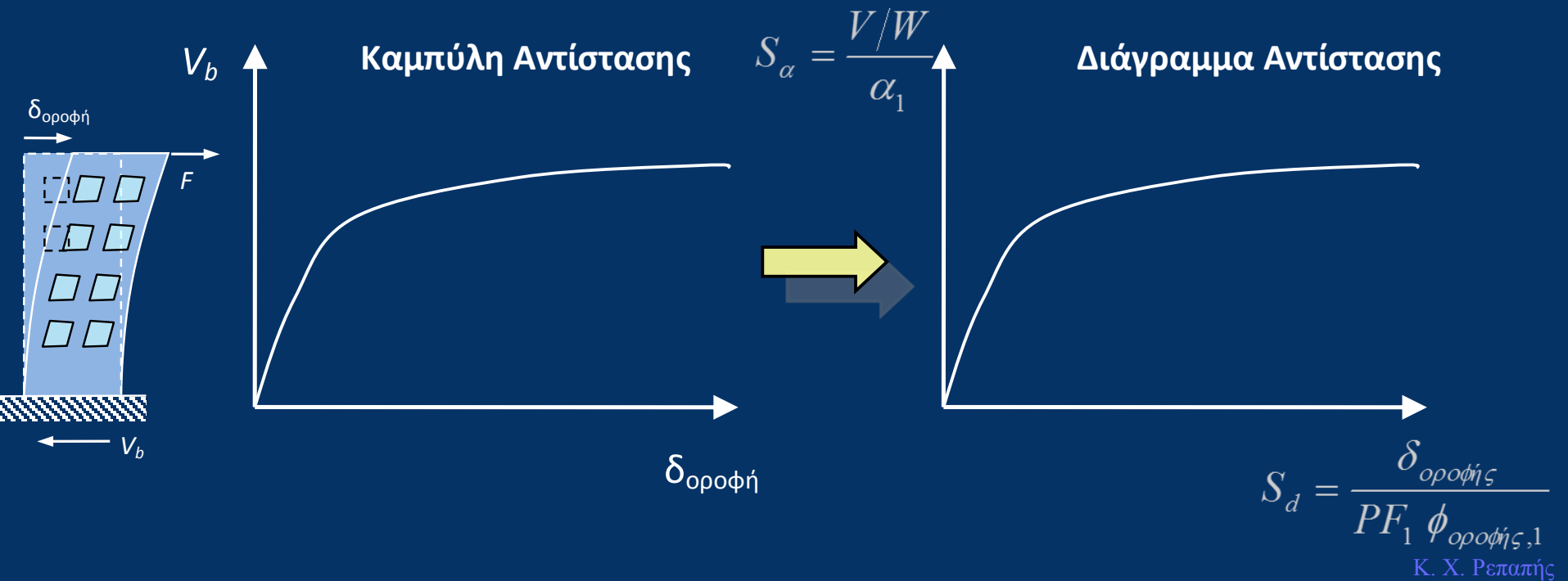
# Στοχευόμενη Μετακίνηση

- Για την στοχευόμενη μετακίνηση η ικανότητα της κατασκευής να παραλαμβάνει σεισμικά φορτία (capacity) πρέπει να είναι ίδια με την αντίστοιχη απαίτηση σύμφωνα με το φάσμα σχεδιασμού (demand)
- Αυτό επιτυγχάνεται βρίσκοντας το σημείο τομής φάσματος ικανότητας και του φάσματος απαίτησης
  - του ανελαστικού φάσματος για την αντίστοιχη πλαστιμότητα ή
  - του ελαστικού φάσματος για την ενεργό απόσβεση



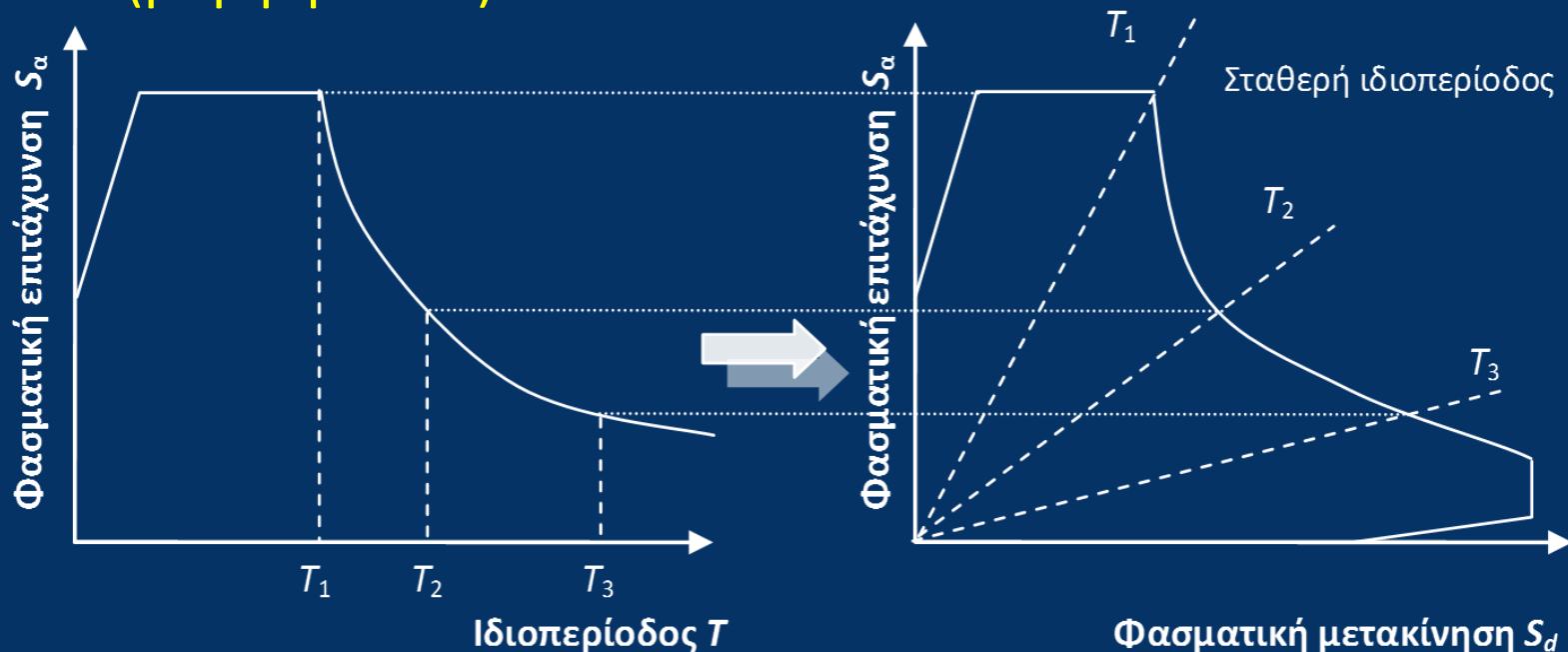
# Μέθοδος Διαγράμματος Ικανότητας

- Μετατροπή της καμπύλης αντίστασης  $V$ - $\delta$  της κατασκευής σε φάσμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβαθμίου, σε όρους  $S_a - S_d$



# Μέθοδος Διαγράμματος Ικανότητας

- Μετατροπή ελαστικού φάσματος απόκρισης σε όρους φασματικής επιτάχυνσης,  $S_a$ , – φασματικής μετακίνησης,  $S_d$  (μορφή ADRS).



$$S_d = \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 S_a$$

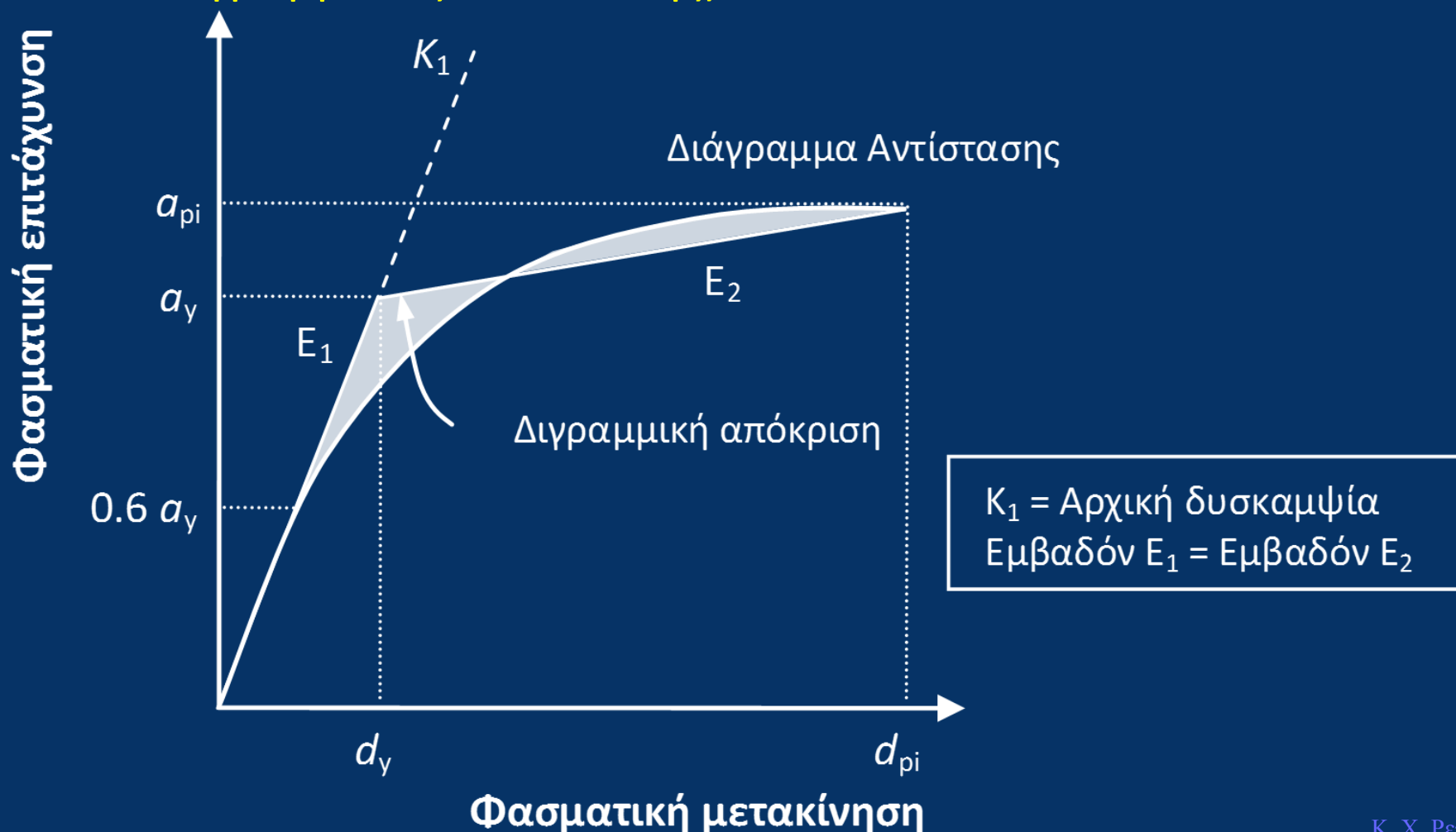
Συνήθης μορφή φάσματος ( $S_a - T$ )

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}}$$

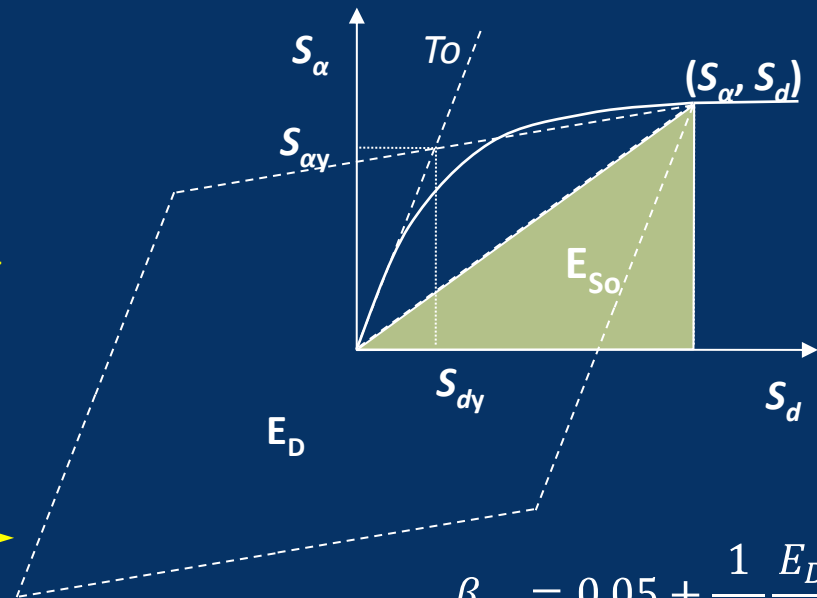
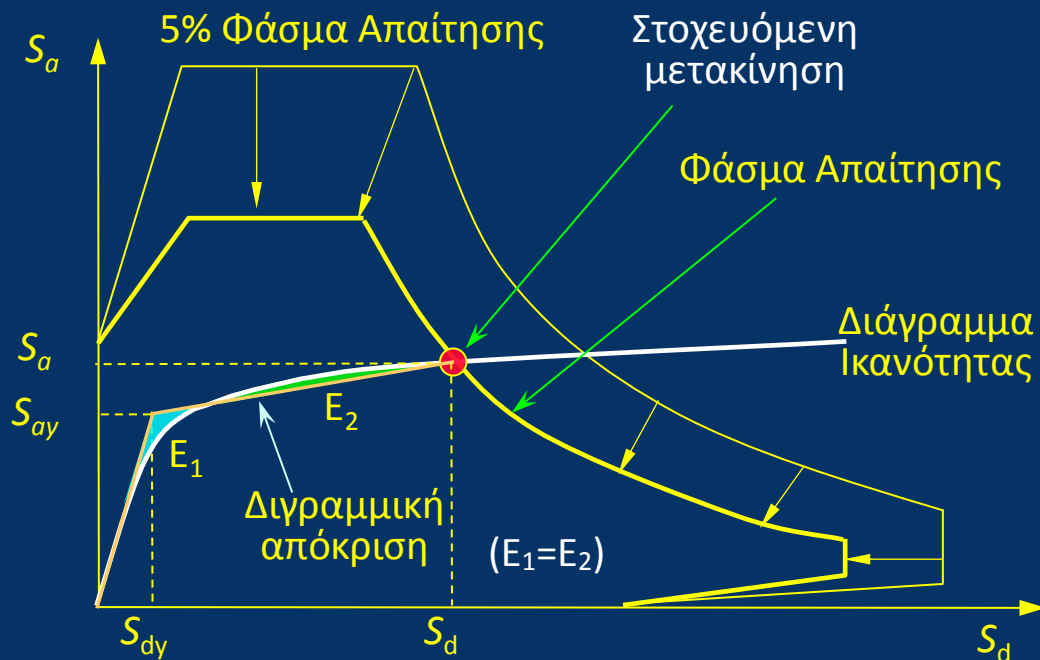
Φάσμα σε όρους  $S_a - S_d$  (μορφή ADRS)

# Μέθοδος Διαγράμματος Ικανότητας

- Κατασκευή εξιδανικευμένης καμπύλης (διγραμμικό διαγράμματος αντίστασης)

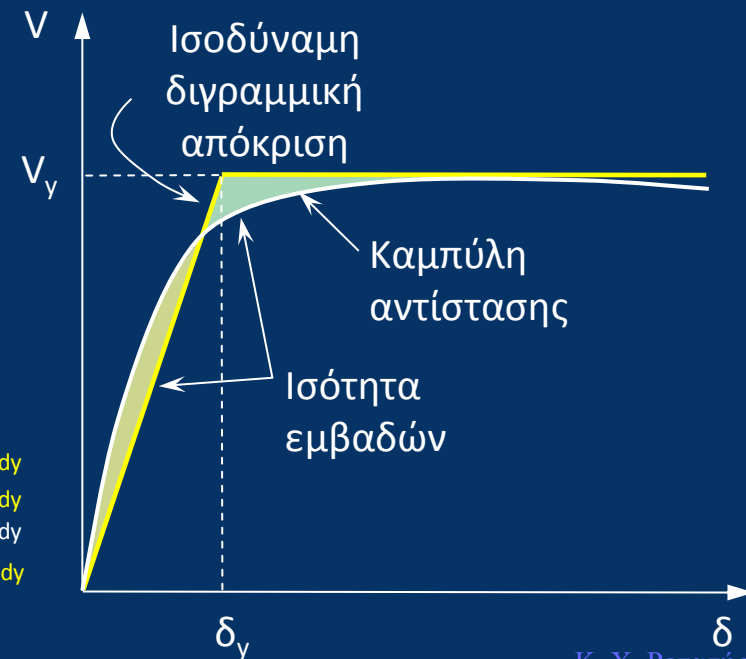
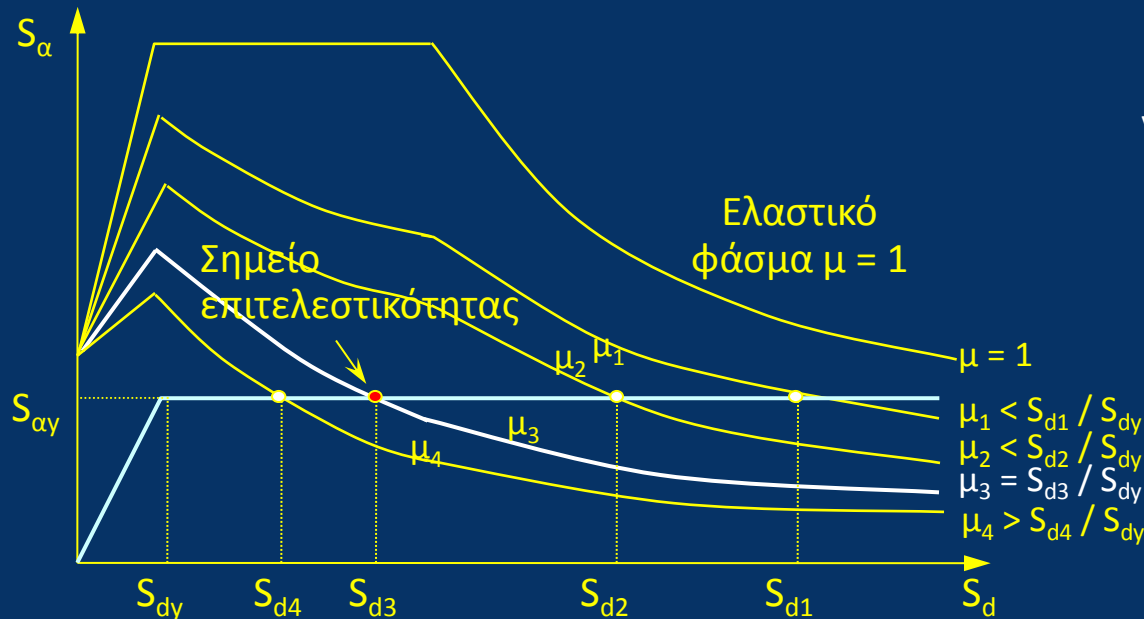


- Σχεδιάζεται το φάσμα απαίτησης μαζί με το φάσμα αντίστασης και προσδιορίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση.
  - Υπολογισμός υστερητικής απόσβεσης του συστήματος
  - Απομείωση του φάσματος απαίτησης
- Έλεγχος συμπεριφοράς: Για **όλα τα μέλη** πραγματοποιείται σύγκριση μεταξύ των τοπικών ανελαστικών στροφών ή μετατοπίσεων οι οποίες αντιστοιχούν στο σημείο συμπεριφοράς και των αντιστοίχων αποδεκτών μεγεθών τα οποία υπαγορεύονται από την επιλεγείσα στάθμη επιτελεστικότητας.



# Μέθοδος N2 (EC8)

- Μετατροπή της καμπύλης αντίστασης  $V$ - $\delta$  της κατασκευής σε φάσμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβαθμίου, σε όρους  $S_a - S_d$
- Μετατροπή του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε μονάδες φασματικής επιτάχυνσης και μετατόπισης,  $S_a - S_d$
- Σχεδιάζονται τα ανελαστικά φάσματα απαίτησης μαζί με το φάσμα αντίστασης και προσδιορίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση,
  - ως το σημείο τομής του διαγράμματος αντίστασης και του ανελαστικού φάσματος, ώστε το ανελαστικό φάσμα να έχει την ίδια πλαστιμότητα με την πλαστιμότητα της κατασκευής





# Μέθοδος του Συντελεστή Μετακίνησης

- Η στοχευόμενη μετακίνηση

$$\delta_t = C_0 C_1 C_2 C_3 S_a \frac{T_e^2}{4\pi^2}$$

- $T_e$  : ενεργός θεμελιώδης ιδιοπερίοδος
- $C_0$  : συντελεστής που συσχετίζει την φασματική μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβαθμίου με την μετακίνηση οροφής του φορέα  
 $C_0 = 1.0, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5$ , για αριθμό ορόφων 1, 2, 3, 5, και  $\geq 10$ , αντίστοιχα  
 (Ισούται με τον συντελεστή συμμετοχής επί την ιδιοτιμή στην οροφή)
- $C_1$  : συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού.  $C_1 = \frac{\delta_{inel}}{\delta_{el}}$
- $C_2$  : Συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή του σχήματος του βρόχου υστέρησης στη μέγιστη μετακίνηση. Δίνεται στον Πίνακα:

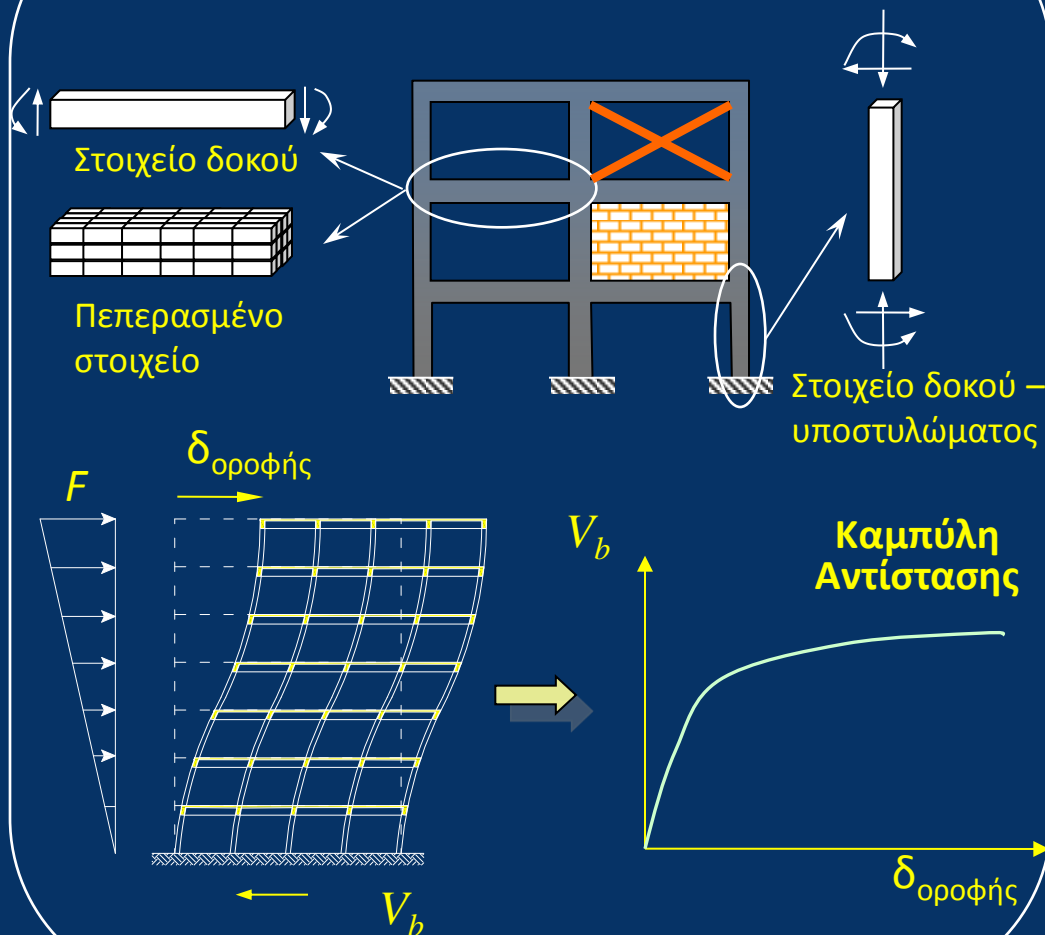
Στάθμη επιτελεστικότητας	T < 0.1 sec		T > Tc	
	Φορέας τύπου 1	Φορέας τύπου 2	Φορέας τύπου 1	Φορέας τύπου 2
Περιορισμένες βλάβες	1.0	1.0	1.0	1.0
Σημαντικές βλάβες	1.3	1.0	1.1	1.0
Οιονεί κατάρρευση	1.5	1.0	1.2	1.0

- $C_3 = 1$  για συνήθη κτίρια Ω.Σ. και τοιχοποιίας με  $\theta < 0.1$

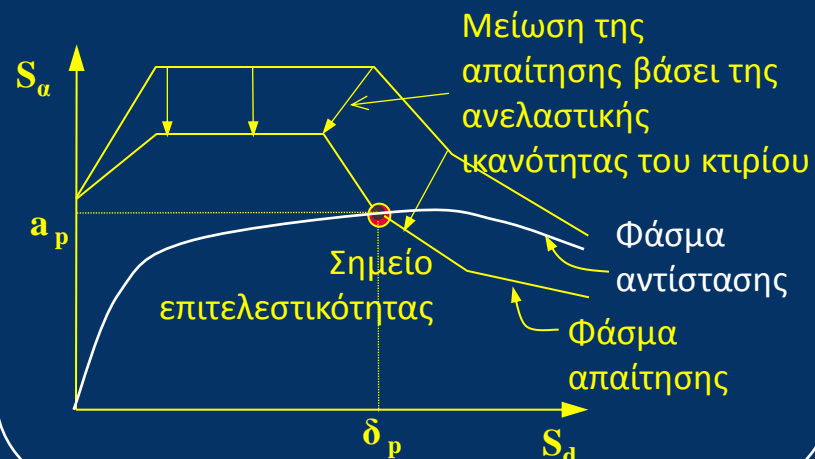
# Ανελαστική στατική ανάλυση

- ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ > ΑΠΑΙΤΗΣΗ

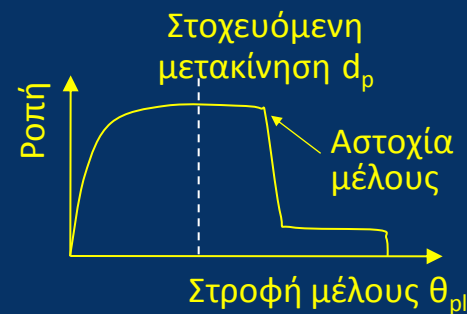
## ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ



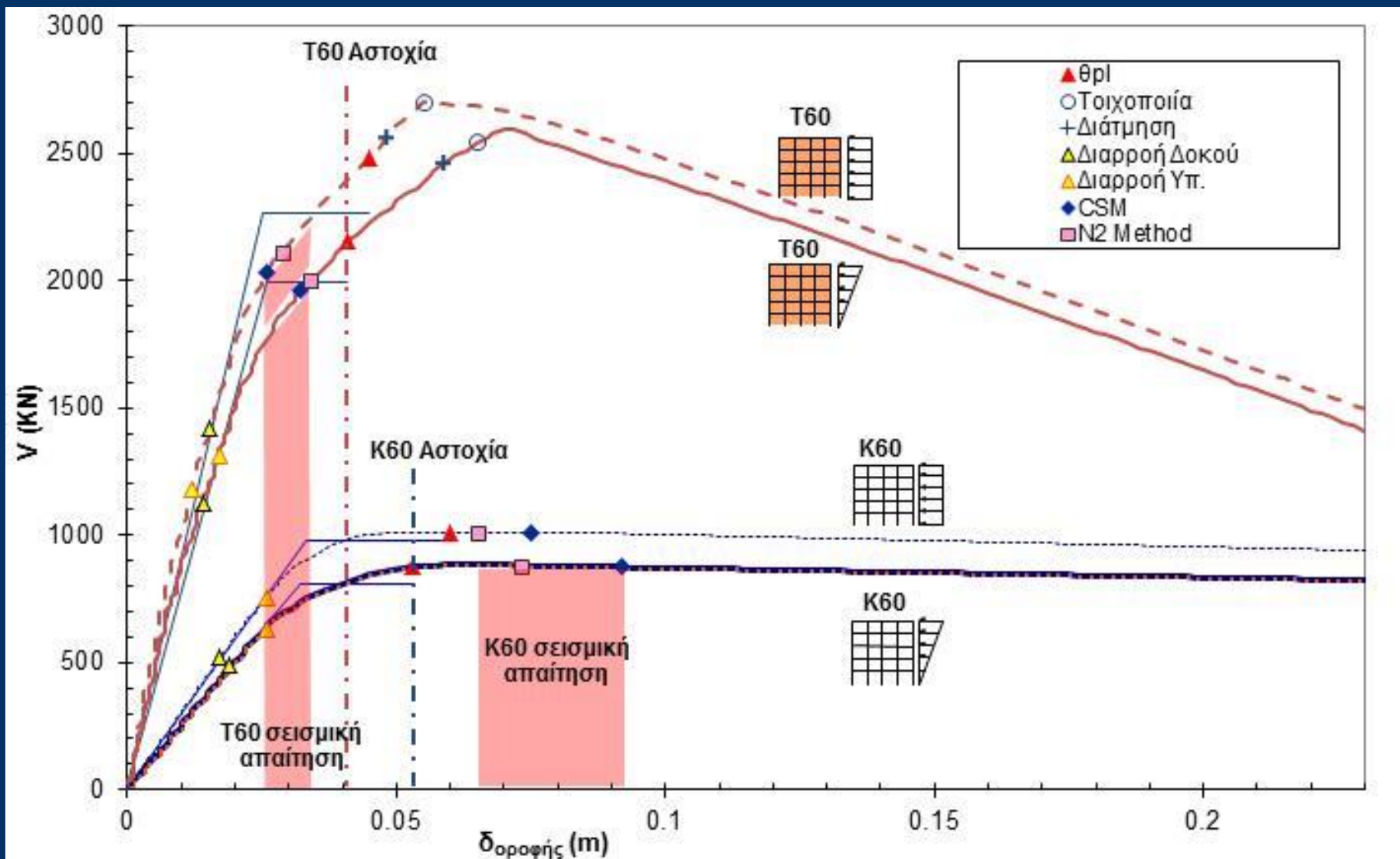
## ΑΠΑΙΤΗΣΗ

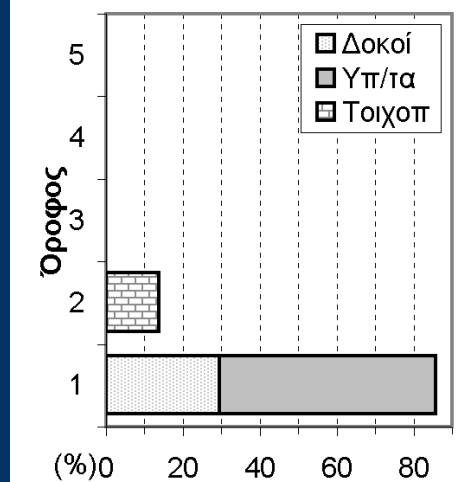
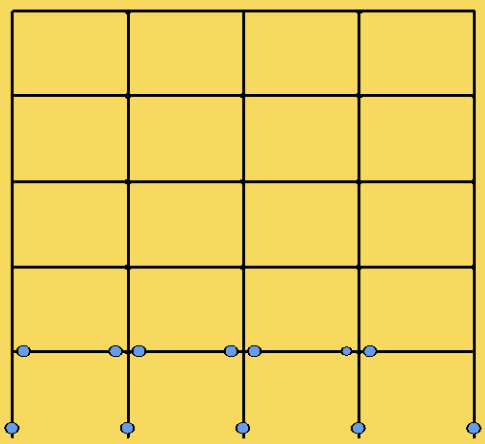
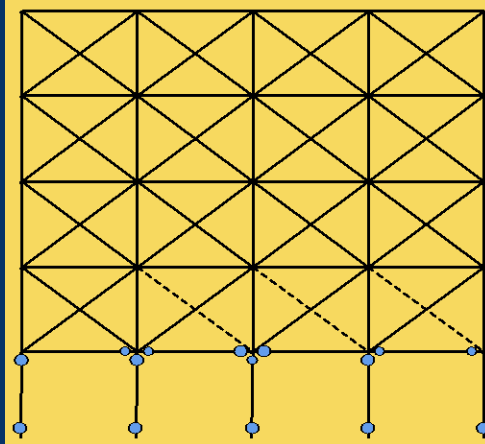
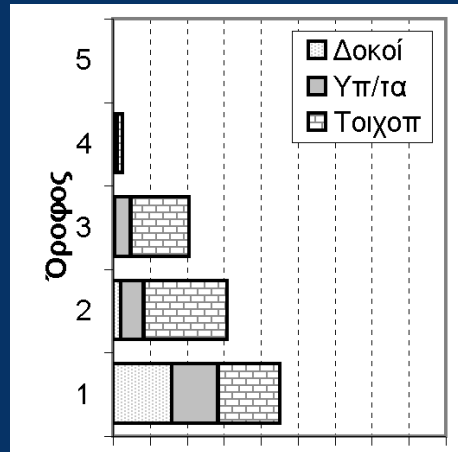
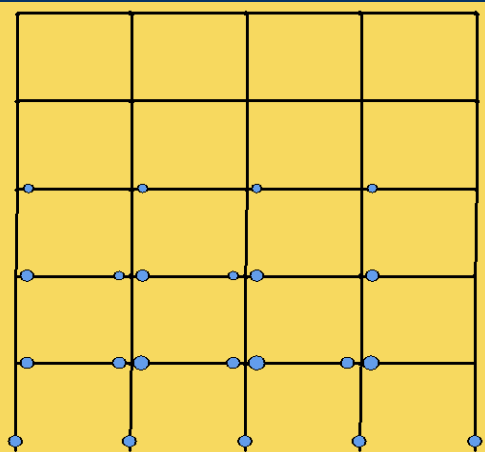
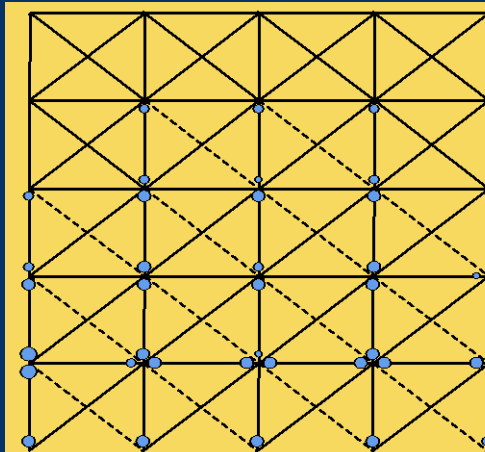
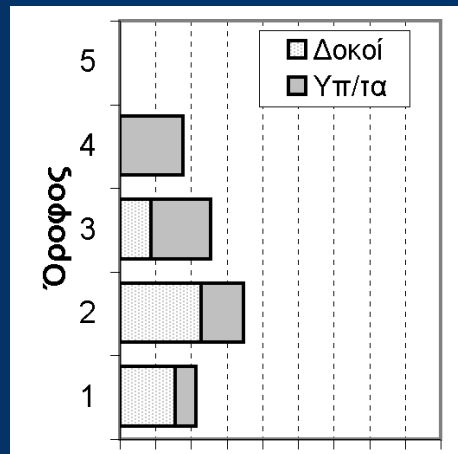
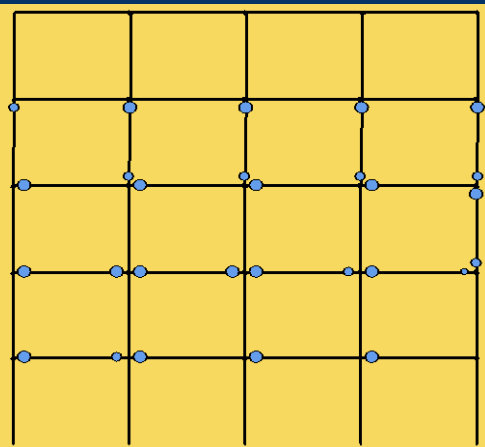
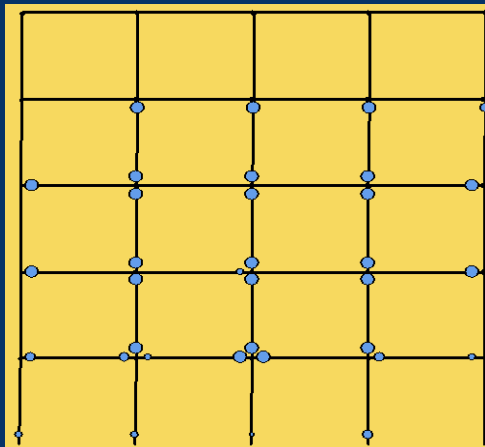


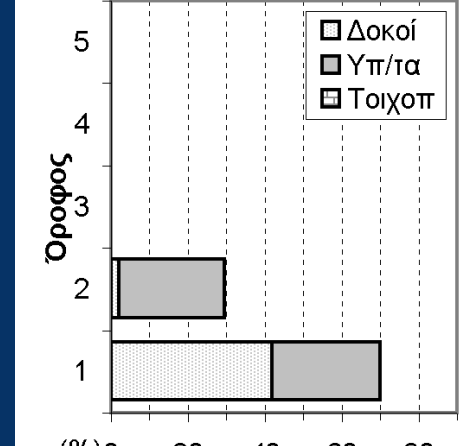
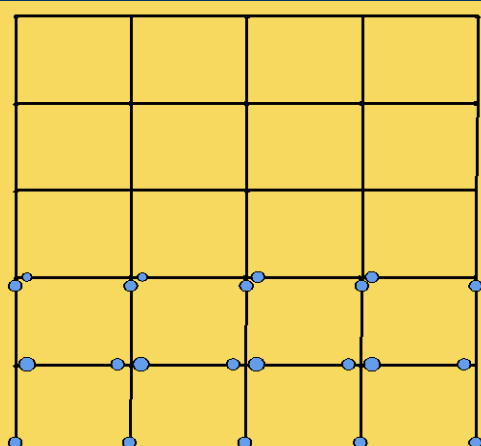
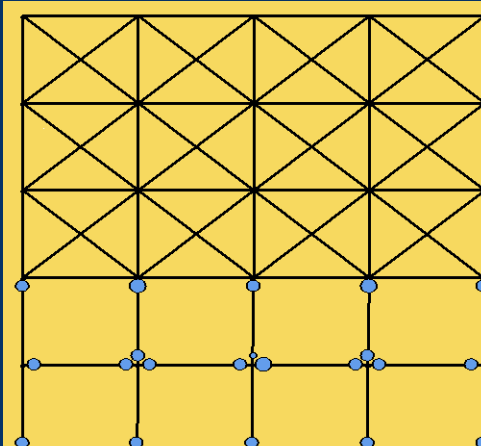
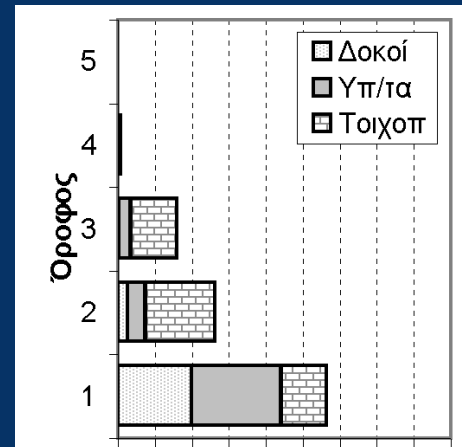
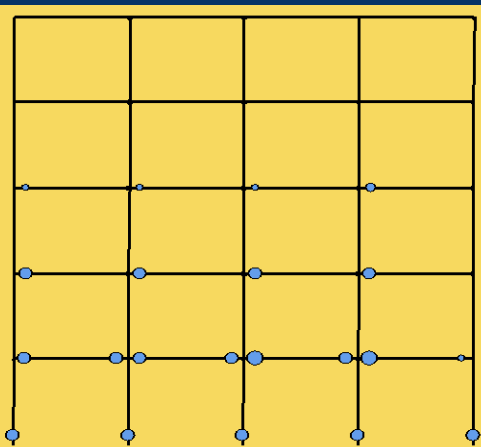
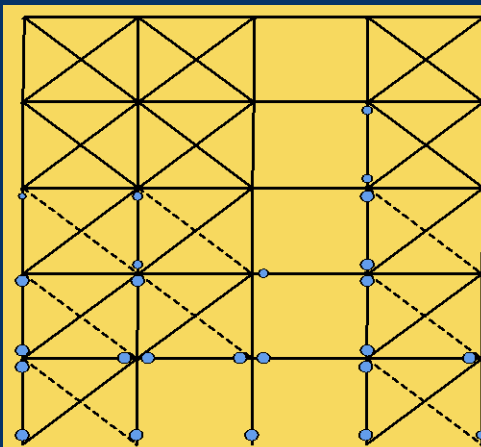
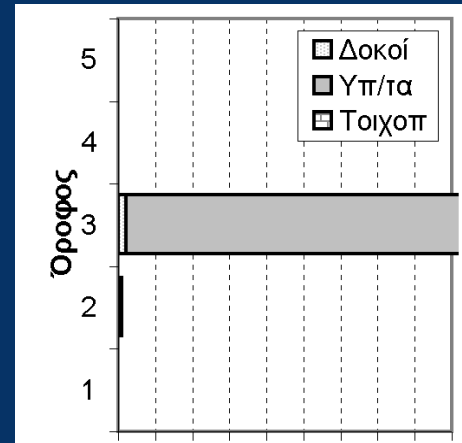
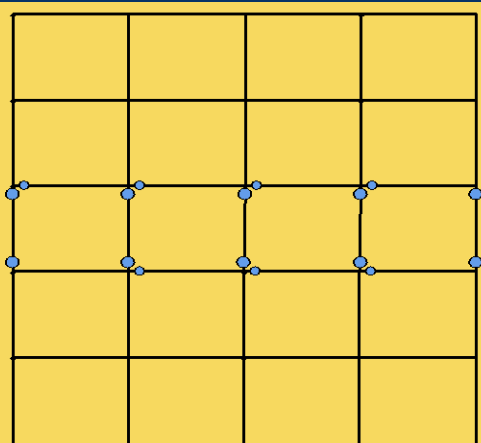
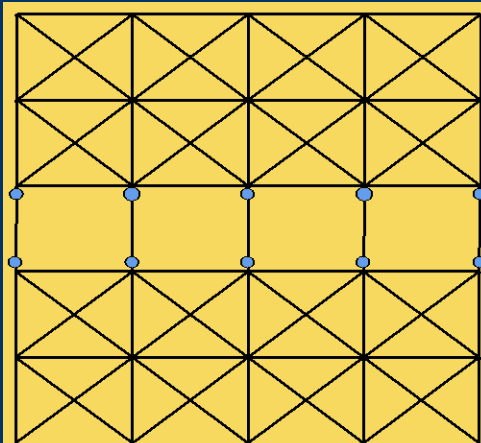
## ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



# Τοιχοπληρώσεις







# Ανελαστική δυναμική ανάλυση

ΚΑΝΕΠΕ – § 5.8

## Προϋποθέσεις εφαρμογής

- Επαρκής εμπειρία και εξειδίκευση του Πολ. Μηχανικού
- Συνιστάται να διασφαλίζεται «Ικανοποιητική» ΣΑΔ

## Βάσεις μεθόδου:


- Το προσομοίωμα συνεκτιμά άμεσα τα μη γραμμικά χαρακτηριστικά της σχέσης έντασης – παραμόρφωσης των στοιχείων του κτιρίου
- Υποβάλλεται σε σεισμική δράση (χρονοϊστορία επιταχύνσεων βάσεως - επιταχυνσιογραφήματα) κατά EC8
  - Πραγματικές καταγραφές ή συνθετικά επιταχυνσιογραφήματα
- Πραγματικά επιταχυνσιογραφήματα πρέπει να αναχθούν σε ένταση της σεισμικής δράσης που επιλέχθηκε

# Ανελαστική δυναμική ανάλυση

ΚΑΝΕΠΕ – § 5.8


- Σκόπιμο τα αποτελέσματα της ανελαστικής δυναμικής ανάλυσης να ελέγχονται και με βάση τα αποτελέσματα μιας ανελαστικής στατικής ανάλυσης
- Τα εντατικά μεγέθη και μετακινήσεις από την ανάλυση συγκρίνονται με τα κριτήρια επιτελεστικότητας

# Επιλογή επιταχυνσιογραφήματος

- 
- Η επιλογή των επιταχυνσιογραφημάτων αποτελεί σημαντικό στοιχείο για την επιτυχή εφαρμογή μη γραμμικών δυναμικών αναλύσεων.
  - Τα αποτελέσματα της δυναμικής ανάλυσης επηρεάζονται από πολλές παραμέτρους της εδαφικής διέγερσης, όπως είναι
    - η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση,
    - η ενέργεια του επιταχυνσιογραφήματος,
    - το φάσμα του,
    - ο αριθμός των κύκλων του,
    - η διάρκεια του



# Επιλογή επιταχυνσιογραφήματος

- 
- Η επιλογή γίνεται με βάση τα εξής:
    - Μέγεθος
    - Διάρκεια επιταχυνσιογραφήματος
    - Μηχανισμός γένεσης σεισμού
    - Απόσταση από το επίκεντρο
  - Να μας δίνει τιμές κοντά σε αυτές που μας δίνει το φάσμα σχεδιασμού για τις συγκεκριμένες ιδιομορφές που έχει το έργο.
  - Επιλογή που γίνεται με την μέγιστη επιτάχυνση  $rga$  δεν είναι πάντα αξιόπιστη, γιατί δεν εκφράζει την ενέργεια του σεισμού.
  - Η εδαφική κίνηση που προκαλείται από ένα σεισμό μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας το πλάτος, το συχνотικό περιεχόμενο και τη διάρκεια.