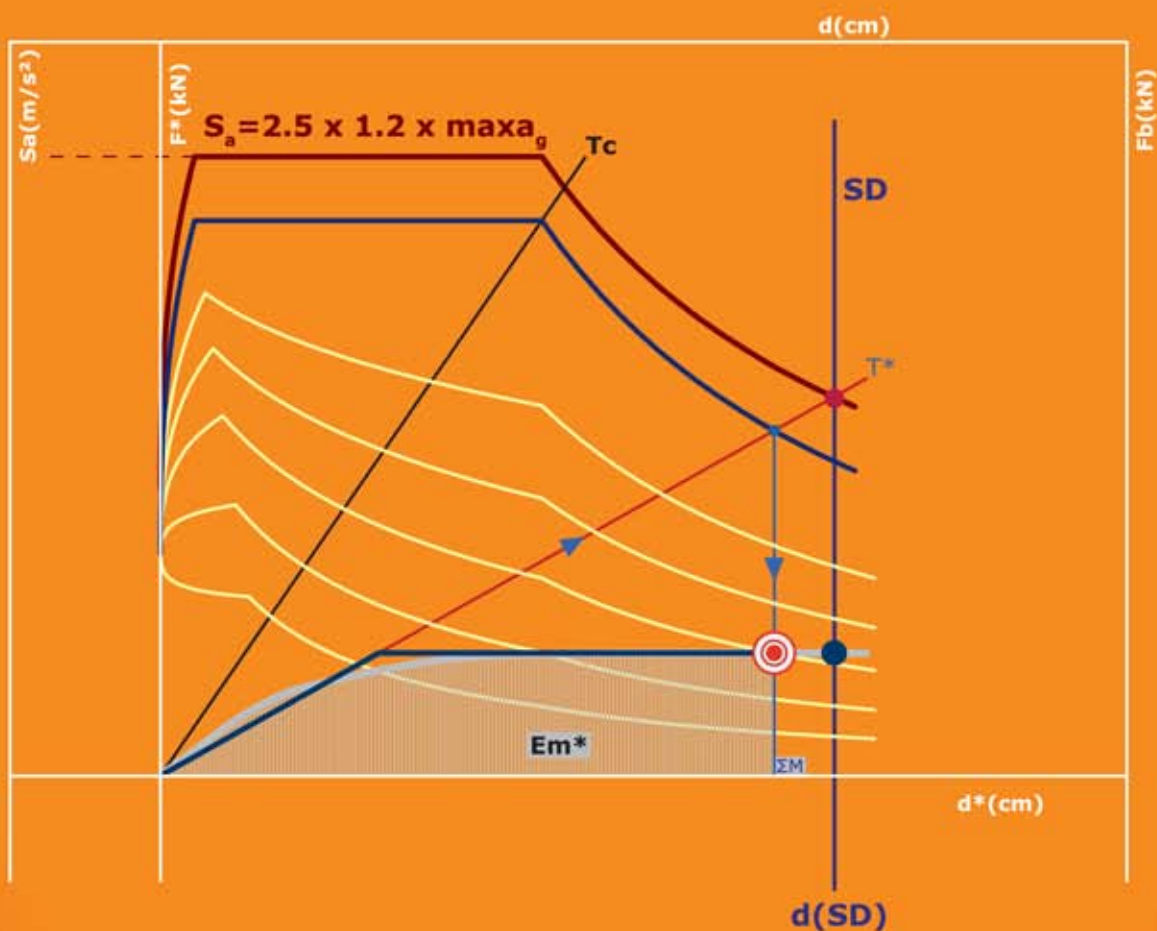


Υπολογισμός στοχευόμενης μετατόπισης & μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης

θεωρία & παραδείγματα



FESPA R

*Υπολογισμός στοχευόμενης
μετατόπισης & μέγιστης σεισμικής
επιτάχυνσης*

Θεωρία & Παραδείγματα



Αθήνα, Μάρτιος 2016

Version 1.18

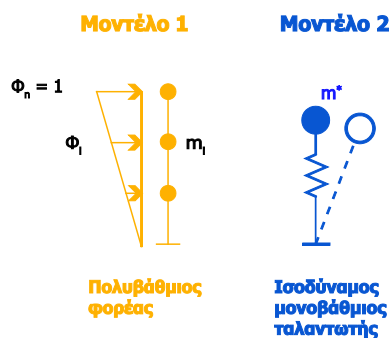
1	ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ, ΜΕΘΟΔΟΣ Ν2.....	3
1.1	Μετατροπή του πολυβάθμιου συστήματος σε σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας.....	3
1.2	Προσδιορισμός διγραμμικής καμπύλης ικανότητας.....	5
1.3	Δείκτες πλαστιμότητας μ_d και συμπεριφοράς q_u	6
1.4	Ανελαστικά φάσματα απαίτησης.....	7
1.5	Προσδιορισμός στοχευόμενης μετατόπισης.....	9
1.6	Υπολογισμός μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης που αντέχει το κτίριο.....	11
1.7	Επιρροή των τοιχοπληρώσεων.....	12
1.8	Ερμηνεία διαγραμμάτων.....	18
2	ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	22
2.1	Κτίριο χωρίς τοιχοπληρώσεις.....	22
2.2	Κτίριο με τοιχοπληρώσεις.....	29
3	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	36

Προσδιορισμός στοχευόμενης μετατόπισης, μέθοδος N2

Η μέθοδος προσδιορισμού της στοχευόμενης μετατόπισης N2 (nonlinear - 2 models) όπως περιγράφεται στον EC8-1 Παρ. B αναφέρεται σε δύο μοντέλα, ένα πολυβάθμιο και ένα μονοβάθμιο ισοδύναμο μεταξύ τους (Fajfar 2000), (Σχήμα 1.1).

1.1 Μετατροπή του πολυβάθμιου συστήματος σε σύστημα ενός βαθμού ελευθερίας

Προκειμένου να γίνει δυνατή η σύγκριση της καμπύλης ικανότητας της κατασκευής με τη σεισμική απαίτηση όπως ορίζεται από το ελαστικό σεισμικό φάσμα απαιτήσεων είναι αναγκαία η μετατροπή της απόκρισης του πολυβάθμιου συστήματος στην αντίστοιχη ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου (Σχήμα 1.1).



Σχήμα 1.1: Μετατροπή πολυβάθμιου συστήματος σε ισοδύναμο μονοβάθμιο ταλαντωτή.

Οι σχέσεις που συνδέουν το μονοβάθμιο με το αντίστοιχο πολυβάθμιο σύστημα είναι:

$$F^* = \frac{F_b}{\Gamma}, \quad d^* = \frac{d}{\Gamma} \quad (1.1)$$

Όπου

Γ ο συντελεστής μετατροπής που δίνεται από την ακόλουθη σχέση [EC8- (B.3)]:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} \quad (1.2)$$

$m^* = \sum m_i \Phi_i$ η μάζα του ισοδύναμου συστήματος **ενός βαθμού ελευθερίας**

d^*, F^* η μετατόπιση και η ισοδύναμη δύναμη του **μονοβάθμιου συστήματος**

d, F_b η μετατόπιση του κόμβου ελέγχου και η συνολική τέμνουσα βάση του **πολυβάθμιου συστήματος**

Προκειμένου να γίνει η σύγκριση των απαιτούμενων με τις διαθέσιμες μετακινήσεις καταρτίζεται φασματικό διάγραμμα επιταχύνσεων – μετακινήσεων (ADRS).

Για τη μετατροπή του διαγράμματος δύναμης – μετακίνησης της Pushover χρησιμοποιούνται οι σχέσεις (Σχήμα 1.2):

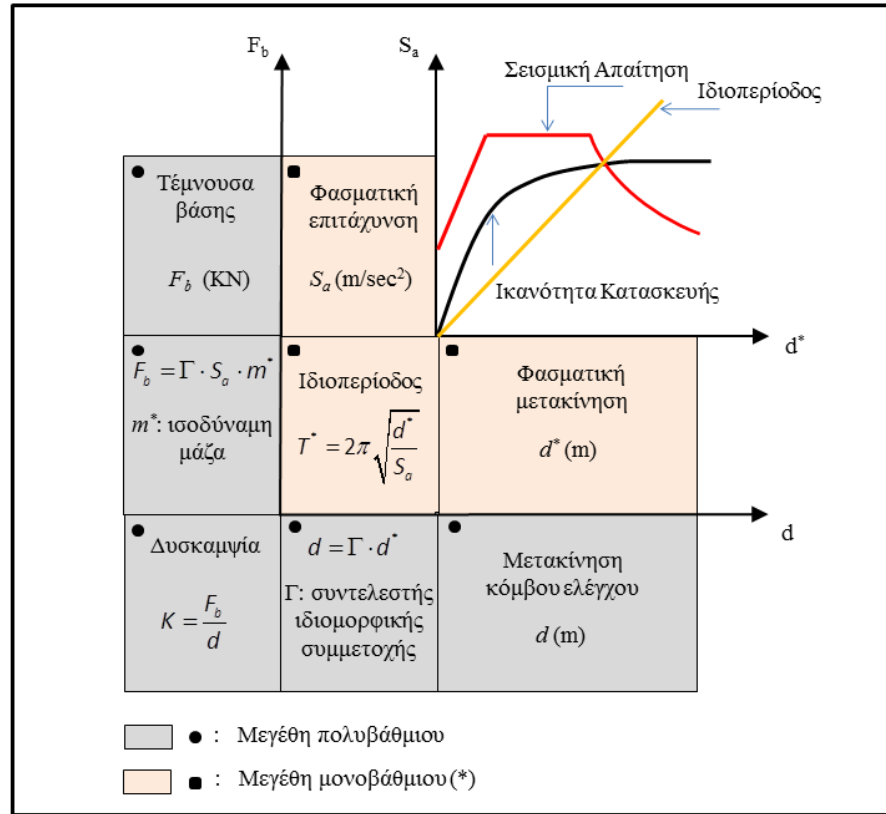
$$S_a = \frac{F_b}{\Gamma \cdot m^*} = \frac{F^*}{m^*} \quad (1.3)$$

$$d^* = \frac{d}{\Gamma} \quad (1.4)$$

Για τη μετατροπή του ελαστικού φάσματος απαίτησης από μορφή επιτάχυνσης - περιόδων $S_a - T$ σε μορφή επιτάχυνσης – μετακινήσεων $S_a - d^*$ χρησιμοποιείται η σχέση (1.5):

$$d^* = S_e(T) \cdot \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (1.5)$$

Στο Σχήμα 1.2 συνοψίζεται η διαδικασία μετατροπής της καμπύλης ικανότητας του κτιρίου σε φάσμα ικανότητας.



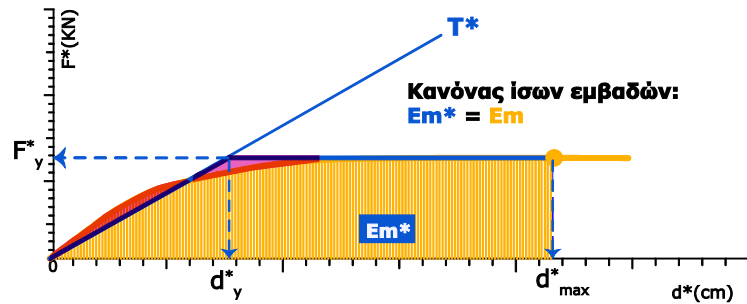
Σχήμα 1.2: Μετατροπή μεγεθών από το πολυβάθμιο σύστημα για τη δημιουργία του διαγράμματος ADRS.

1.2 Προσδιορισμός διγραμμικής καμπύλης ικανότητας

Σύμφωνα με το Παράρτημα Β του EC8-1 η διγραμμική καμπύλη ικανότητας προκύπτει από την καμπύλη δύναμης – μετακίνησης (F_b-d) της Pushover με την ακόλουθη μέθοδο (Σχήμα 1.3):

- Ο μετελαστικός κλάδος είναι οριζόντιος.
- Ως φορτίο διαρροής F^* , λαμβάνεται το φορτίο το οποίο απαιτείται για να δημιουργηθεί μηχανισμός κατάρρευσης.

- Ως μετακίνηση διαρροής d_y^* λαμβάνεται εκείνη που παράγει ίσα εμβαδά κάτω από τη φασματική καμπύλη πολυβαθμίου συστήματος και τη διγραμμική καμπύλη.



Σχήμα 1.3: Προσδιορισμός της διγραμμικής καμπύλης ικανότητας του ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.

$$d_y^* = 2 \cdot \left(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \quad (1.6)$$

Όπου

d_m^* η μετακίνηση μέχρι την οποία γίνεται η θεώρηση ίσων εμβαδών

Η ιδιοπερίοδος T^* του ιδεατού πλήρως ελαστοπλαστικού συστήματος ενός βαθμού ελευθερίας προκύπτει από την ελαστική δυσκαμψία της ιδεατής καμπύλης [EC8-1 (B.7)]:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{d_y^*}{S_{ay}}} = 2\pi \sqrt{\frac{m^* \cdot d_y^*}{F_y^*}} \quad (1.7)$$

1.3 Δείκτες πλαστιμότητας μ_d και συμπεριφοράς q_u

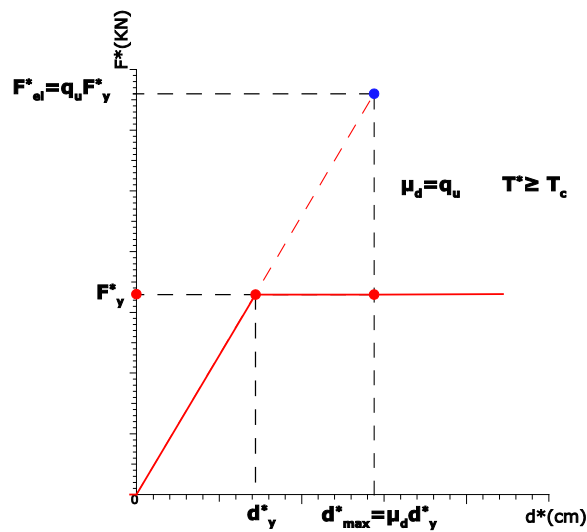
Ορισμοί για μονοβάθμιο σύστημα:

$$\mu_d = \frac{d_{max}^*}{d_y^*}, \quad q_u = \frac{F_{el}^*}{F_y^*} \quad (1.8)$$

Όπου:

d_{max}^*	μετατόπιση του συστήματος	η μέγιστη
d_y^*	η μετατόπιση διαρροής του συστήματος	
F_{el}^*	η μέγιστη δύναμη που μπορεί να παραλάβει το μονοβάθμιο σύστημα αν αποκρινόταν στο σεισμό ελαστικά	

Καθώς στις μεγάλες περιόδους $T^* > T_c$ ελαστικές και ανελαστικές κατασκευές αποκρίνονται με την ίδια μετατόπιση, ισχύουν τα παρουσιαζόμενα στο Σχήμα 1.4.



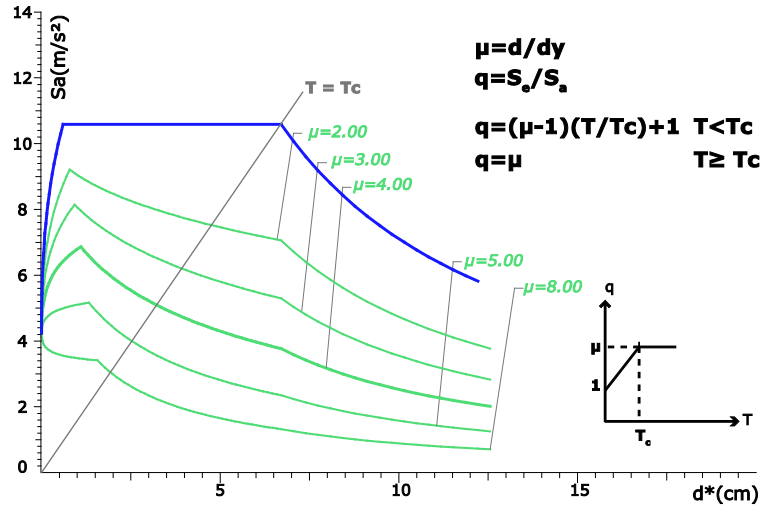
Σχήμα 1.4: Ισοδυναμία των δεικτών πλαστιμότητας και συμπεριφοράς με θεώρηση ίσων μετακινήσεων.

Ισχύει:

$$\begin{aligned} \mu_d &= q_u, & T^* &\geq T_c \\ \mu_d &= 1 + (q_u - 1) \cdot \frac{T_c}{T^*}, & T^* &< T_c \end{aligned} \quad (1.9)$$

1.4 Ανελαστικά φάσματα απαίτησης

Με βάση το ελαστικό φάσμα απαίτησης S_e μπορούν να παραχθούν τα ανελαστικά φάσματα απαίτησης S_a (Σχήμα 1.5).



Σχήμα 1.5: Ανελαστικά φάσματα επιταχύνσεων.

Γιατί χρειάζονται τα ανελαστικά φάσματα;

Επειδή απαιτείται να συγκριθούν οι σεισμικές απαιτήσεις με την ικανότητα της κατασκευής η οποία είναι ανελαστική.

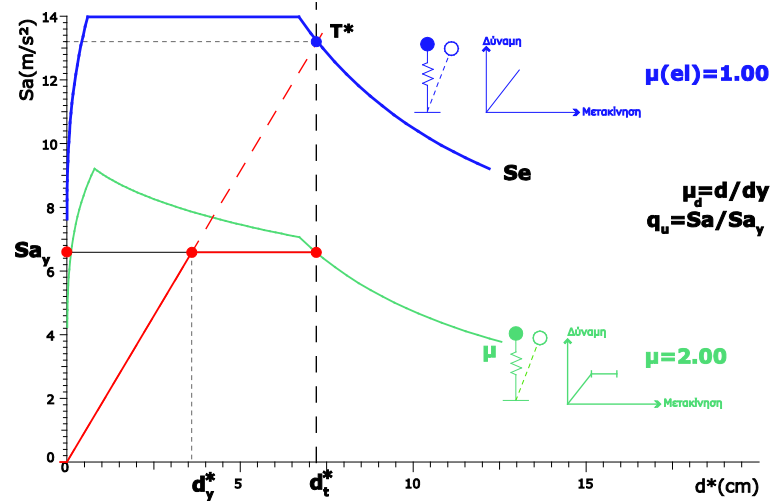
Οι τετμημένες και οι αντίστοιχες τεταγμένες της καμπύλης προκύπτουν για διάφορες τιμές περιόδων T ως εξής (Σχήμα 1.6):

$$S_a(T) = \frac{S_e(T)}{q_u} \quad (1.10)$$

$$d^* = \frac{\mu_d}{q_u} \cdot S_e(T) \cdot \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 = \mu_d \cdot \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \cdot S_a(T) \quad (1.11)$$

Όπου:

$$\begin{aligned}
 q_u &= \mu_d, & T &\geq T_c \\
 q_u &= (\mu_d - 1) \cdot \frac{T}{T_c} + 1, & T &< T_c
 \end{aligned} \quad (1.12)$$



Σχήμα 1.6: Φασματική ικανότητα και σεισμική απαίτηση της κατασκευής.

1.5 Προσδιορισμός στοχευόμενης μετατόπισης

Σε κάθε σημείο της καμπύλης ικανότητας αντιστοιχεί ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής με ιδιοπερίοδο $T_{ικαν}^*$, όπως καθορίζεται από την απαίτηση των ίσων εμβადών.

Σε κάθε σημείο της καμπύλης του ανελαστικού φάσματος απαίτησης αντιστοιχεί ένας μονοβάθμιος ταλαντωτής με ιδιοπερίοδο $T_{απαιτ}^*$, όπως καθορίζεται από την απαίτηση πλαστιμότητας μ .

Το σημείο επιτελεστικότητας (στοχευόμενης μετακίνησης) είναι το σημείο στο οποίο συμπίπτουν οι δύο ταλαντωτές ($T_{ικαν}^* = T_{απαιτ}^*$).

Τελικά, η στοχευόμενη μετατόπιση d_t^* προκύπτει ως εξής:

$$d_t^* = S_e(T^*) \cdot \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2, \quad T^* \geq T_c \quad (1.13)$$

$$d_t^* = S_e(T^*) \cdot \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 \cdot C_1, \quad T^* < T_c \quad (1.14)$$

Όπου:

$$q_u = \frac{S_e(T^*)}{F_y^*/m^*} \geq 1.0, \quad \mu_d = 1 + (q_u - 1) \cdot \frac{T_c}{T^*} > q_u \quad (1.15)$$

$$C_l = \frac{\mu_d}{q_u} \quad (1.16)$$

$q_u = q_\pi = R$

ο δείκτης (παράγων) πλαστιμότητας που εκφράζεται σε όρους παραμόρφωσης [KAN.ΕΠΕ. Παράρτημα 4.2 & §5.7.4.2, EC8-1 (B.11)]

μ_d

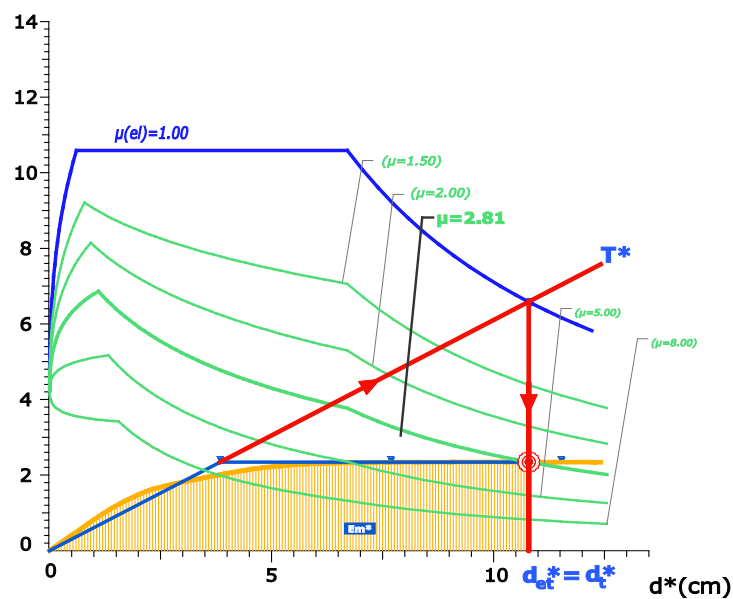
ο δείκτης απαιτούμενης πλαστιμότητας μετακινήσεων (EC8-1 §5.2.3.4(3), KAN.ΕΠΕ. §5.7.4.2)

C_l

ο λόγος ανελαστικών παραμορφώσεων

Παρατήρηση: Οι διάφορες ονομασίες για το λόγο ελαστικής απαίτησης αφορούν διαφορετικούς κανονισμούς. Έτσι, η ονομασία q_u συναντάται στον EC8-1, q_π στον KAN.ΕΠΕ ενώ R στους Αμερικάνικους κανονισμούς της FEMA.

Τα παραπάνω παρουσιάζονται εποπτικά στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7: Προσδιορισμός στοχευόμενης μετακίνησης.

Βηματική διαδικασία (Βλ. αριθμητικό παράδειγμα 1)

Εάν η στοχευόμενη μετακίνηση d^* , όπως προσδιορίζεται πιο πάνω διαφέρει σημαντικά από τη μέγιστη μετακίνηση του μονοβαθμίου d^*_{max} (Σχήμα 1.3), πρέπει να εφαρμοστεί βηματική διαδικασία στην οποία υπολογίζεται πάλι το διγραμμικό διάγραμμα όπου πλέον αντί της d^*_{max} χρησιμοποιείται η d^* (και η αντίστοιχη F^*_y). Στο παράδειγμα 1 (§2.1) φαίνονται τα βήματα που χρειάζονται μέχρι τη σύγκλιση της περιγραφόμενης διαδικασίας.

Μέθοδος των συντελεστών του ΚΑΝ.ΕΠΕ

Στη μέθοδο των συντελεστών του ΚΑΝ.ΕΠΕ (§5.7.4.1) η στοχευόμενη μετακίνηση της κατασκευής δίνεται από τη σχέση:

$$d = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_e(T_e) \cdot \frac{T_e^2}{4 \cdot \pi^2}$$

Η μέθοδος αυτή προσεγγίζει τη μέθοδο N2 του EC8-1 καθώς για τα παραπάνω μεγέθη ισχύουν εν γένει οι εξής αντιστοιχίες:

$$C_0 = \Gamma, \quad C_1 = C_1, \quad T_e^* = T^*, \quad C_2 = C_3 = 1$$

Συνεπώς, η στοχευόμενη μετακίνηση, κάνοντας χρήση των σχέσεων (1.5), (1.14), μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$d = \Gamma \cdot C_1 \cdot S_e(T_e) \cdot \left(\frac{T^*}{2 \cdot \pi} \right)^2 = \Gamma \cdot C_1 \cdot d_{et} = \Gamma \cdot d^*$$

Υπολογισμός απαιτούμενης περίσφιξης

Από τον απαιτούμενο δείκτη πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων μ_d , υπολογίζεται η απαιτούμενη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων $\mu_{1/r}$ ως εξής (ΚΑΝΕΠΕ §8.2.3.δ):

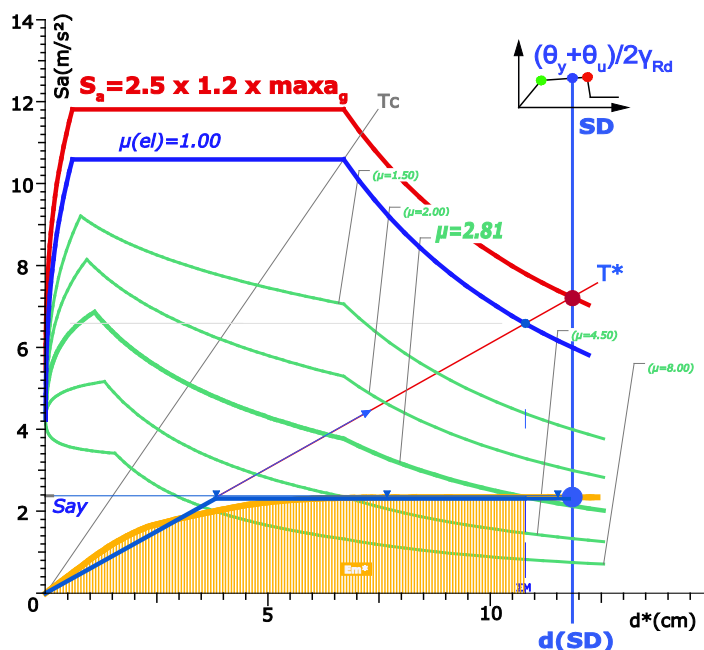
$$\frac{\mu_{1/r} - 1}{\mu_d - 1} = 3 \quad (1.17)$$

Με βάση το δείκτη $\mu_{1/r}$ μπορεί να υπολογιστεί η απαίτηση περίσφιξης, είτε χαλύβδινη (μεταλλικός κλωβός), είτε με ΙΟΠ ινών άνθρακα/γυαλιού (ΚΑΝΕΠΕ §8.2.3).

1.6 Υπολογισμός μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης που αντέχει το κτίριο

Με βάση την παραπάνω μεθοδολογία είναι δυνατός ο προσεγγιστικός υπολογισμός της μέγιστης επιτάχυνσης a_{gmax} που μπορεί να αντέξει η κατασκευή. Πιο συγκεκριμένα, ως μέγιστη επιτάχυνση ορίζεται εκείνη η οποία προκαλεί μέγιστο λόγο ανεπάρκειας ίσο με τη μονάδα ($\lambda=1$) για την

εξεταζόμενη στάθμη επιτελεστικότητας. Γενικά, για την ακριβή εύρεση της μέγιστης σεισμικής επιτάχυνσης μπορεί να εφαρμοστεί η επαναληπτική μέθοδος της §1.8.3 «Εύρεση του μέγιστου σεισμικού συντελεστή που αντιστοιχεί σε κάθε στάθμη επιτελεστικότητας» του βιβλίου της LH Λογισμική «Θεωρητικά στοιχεία της Pushover».



Σχήμα 1.8: Υπολογισμός μέγιστης σεισμικής μετακίνησης.

Έχοντας ως δεδομένο τη μετατόπιση στην οποία παρατηρείται για 1^η φορά υπέρβαση της στάθμης επιτελεστικότητας ($\lambda=1$), προσδιορίζεται ο δείκτης πλαστιμότητας μ_d του κτιρίου που αντιστοιχεί στη μετακίνηση αυτή. Έπειτα από τη σχέση (1.15) υπολογίζεται ο καθολικός δείκτης πλαστιμότητας q_u και στη συνέχεια το σημείο του νέου ελαστικού φάσματος για τη δεδομένη ισοδύναμη ιδιοπερίοδο $S_e(T^*) = q_u \cdot S_{ay}(T^*)$. Τέλος, μέσω των τύπων του ελαστικού φάσματος υπολογίζεται η μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $a_{g\max}$ που αντιστοιχεί στο σημείο αυτό όπως περιγράφεται γραφικά στο Σχήμα 1.8.

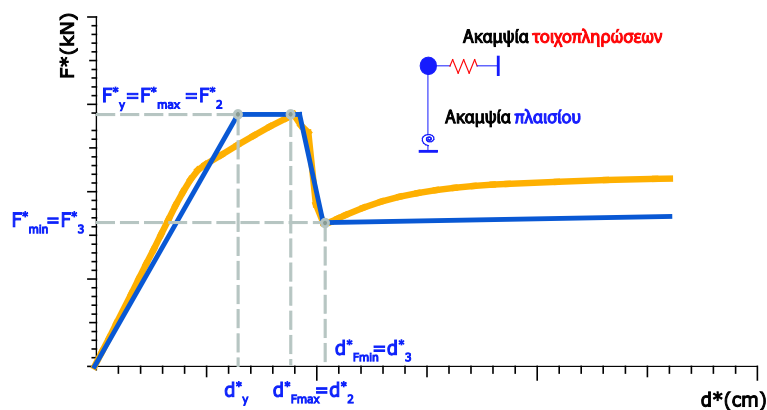
1.7 Επιρροή των τοιχοπληρώσεων

Η επίδραση των τοιχοπληρώσεων έγκειται στον προσδιορισμό του ισοδύναμου ελαστοπλαστικού συστήματος, όπου η καμπύλη αντίστασης προσεγγίζεται

πλέον με μία τετραγραμμική καμπύλη δύναμης – μετακίνησης. Η διαδικασία αυτή εφαρμόζεται μόνο για ανελαστική απόκριση και μόνο εάν η συνεισφορά των τοιχοπληρώσεων στην αντοχή και στην δυσκαμψία της κατασκευής είναι σημαντική συγκριτικά με αυτή του πλαισίου.

Η τετραγραμμική καμπύλη προκύπτει ως το άθροισμα δύο ιδεατών παράλληλων συστημάτων που μαζί αντιπροσωπεύουν το γενικευμένο μονοβάθμιο σύστημα πλαισίου – τοιχοπληρώσεων (Σχήμα 1.9). Το κάθε επιμέρους σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί από ένα μη-γραμμικό ελατήριο το οποίο περιγράφει την αντίστοιχη μη-γραμμική σχέση δύναμης-μετατόπισης (στροφικό ελαστήριο για το πλαίσιο και μετακινησιακό για τις τοιχοπληρώσεις).

Αντίστοιχα με την διγραμμική καμπύλη, η **ιδεατή** τετραγραμμική καμπύλη δύναμης – μετακίνησης του μονοβάθμιου συστήματος προκύπτει από την καμπύλη αντίστασης εξισώνοντας τις ενέργειες παραμόρφωσης μέχρι την εξεταζόμενη κάθε φορά μετακίνηση. Οι σχέσεις που περιγράφονται στη συνέχεια έχουν προκύψει σε όρους δυνάμεων, ενώ μπορούν ισοδύναμα, να διατυπωθούν και σε όρους επιταχύνσεων.



Σχήμα 1.9: Τετραγραμμική καμπύλη ισοδύναμου μονοβάθμιου ταλαντωτή.

Για τον προσδιορισμό της τετραγραμμικής καμπύλης γίνεται ο υπολογισμός των εξής τριών σημείων (Dolsek & Fajfar 2004):

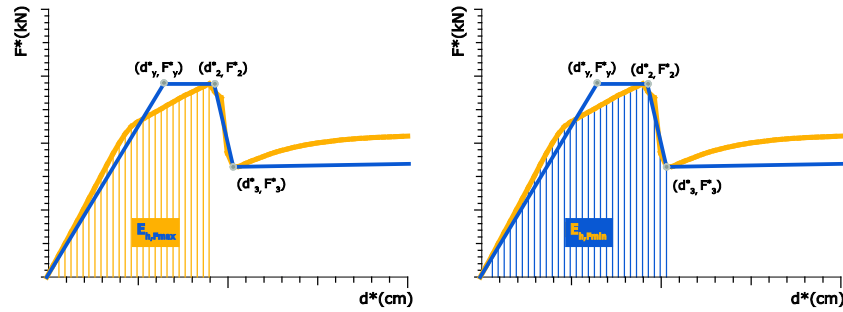
1. **Σημείο διαρροής** (d_y^*, F_y^*) . Η μετακίνηση διαρροής προκύπτει εξισώνοντας τις ενέργειες παραμόρφωσης $E_{h,Fmax}^*$ της καμπύλης αντίστασης και της ιδεατής καμπύλης μέχρι την μετακίνηση d_{Fmax}^* στην οποία σημειώνεται η μέγιστη δύναμη στην καμπύλη αντίστασης F_{max}^* (Σχήμα 1.10). Για την διγραμμικοποίηση μέχρι τη μετακίνηση d_{Fmax}^* γίνεται η θεώρηση πως η δύναμη διαρροής F_y^* του ιδεατού πλήρως ελαστοπλαστικού συστήματος είναι ίση με F_{max}^* . Τελικά:

$$d_y^* = d_1^* = 2 \cdot \left(d_{F \max}^* - \frac{E_{h,F \max}^*}{F_{\max}^*} \right) \quad (1.18)$$

2. **Αρχικό σημείο πτωτικού κλάδου** (d_2^*, F_2^*) . Ορίζεται ως το σημείο στην αρχή της πτώσης αντοχής των τοιχοπληρώσεων $(F_2^* = F_{\max}^*)$. Η μετακίνηση d_2^* προκύπτει εξισώνοντας τις ενέργειες παραμόρφωσης $E_{h,F \min}^*$ της καμπύλης αντίστασης και της ιδεατής καμπύλης μέχρι τη θέση της ελάχιστης δύναμης $(d_{F \min}^*, F_{\min}^*)$ (Σχήμα 1.10).

$$d_2^* = \frac{2}{F_{\max}^* - F_{\min}^*} \cdot \left(E_{h,F \min}^* - E_{h,F \max}^* + F_{\max}^* \cdot d_{F \max}^* - d_{F \min}^* \cdot \frac{(F_{\max}^* + F_{\min}^*)}{2} \right) \quad (1.19)$$

3. **Σημείο ελάχιστης αντοχής** (d_3^*, F_3^*) . Είναι το σημείο που αντιστοιχεί στην πλήρη απώλεια αντοχής των τοιχοπληρώσεων $(F_3^* = F_{\min}^*, d_3^* = d_{F \min}^*)$.
4. Μετά από αυτό το σημείο μόνο το πλαίσιο παραλαμβάνει τα πλευρικά φορτία με δυσκαμψία η οποία θεωρείται ίση με το 1% της αρχικής, χωρίς ωστόσο η μετελαστική αυτή δυσκαμψία να επηρεάζει τη συνολική πλαστιμότητα του συστήματος (Dolsek & Fajfar 2004).



Σχήμα 1.10: Κατασκευή ιδεατής τετραγραμμικής καμπύλης αντίστασης.

Μετά την κατασκευή της τετραγραμμικής καμπύλης μπορούν να υπολογιστούν τα παρακάτω μεγέθη (Σχήμα 1.11):

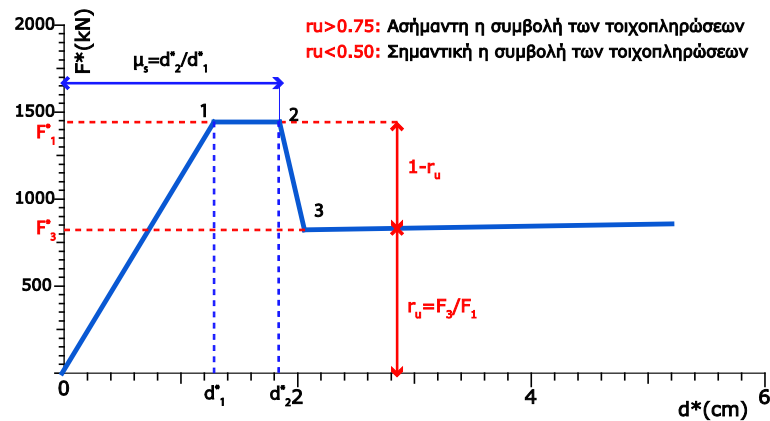
r_u : Το ποσοστό αντοχής που αναλαμβάνει το γυμνό πλαίσιο, δηλαδή ο λόγος της δύναμης όπου οι τοιχοπληρώσεις αστοχούν πλήρως προς την μέγιστη αντοχή της κατασκευής:

$$r_u = \frac{F_3^*}{F_1^*} = \frac{F_3^*}{F_y^*} = \frac{S_{a3}}{S_{ay}}, \quad 0.5 \leq r_u \leq 0.75 \quad (1.20)$$

Παρατήρηση: Για τιμές του συντελεστή $r_u > 0.75$ η συμβολή των τοιχοπληρώσεων θεωρείται μικρή και ακολουθείται διγραμμικοποίηση της καμπύλης αντίστασης. Αντίθετα, όταν $r_u < 0.50$ οι τοιχοπληρώσεις αποτελούν το κύριο σύστημα ανάλυσης των οριζόντιων φορτίων, π.χ. οπλισμένες τοιχοπληρώσεις, τοιχωματοποίηση πλαισίου, κτλ.

μ_s : Η πλαστιμότητα μετακινήσεων που αντιστοιχεί στην παραμόρφωση στην αρχή απώλειας αντοχής των τοιχοπληρώσεων (αρχή καθοδικού κλάδου)

$$\mu_s = \frac{d_2^*}{d_1^*} = \frac{d_y^*}{d_1^*}, \quad 1.5 \leq \mu_s \leq 2.5 \quad (1.21)$$



Σχήμα 1.11: Φυσική ερμηνεία της τετραγραμμικής καμπύλης.

Η εξιδανικευμένη συσχέτιση $R-\mu_d-T$ εκφράζεται θεωρώντας σταθερό συντελεστή συμπεριφοράς ($q_u=R$). Εφαρμόζοντας το παρακάτω τυπολόγιο προκύπτει η πλαστιμότητα μετακινήσεων μ_d για διάφορες τιμές περιόδων T .

$$\mu_d = \frac{1}{c}(R - R_0) + \mu_0 \quad (1.22)$$

Όπου

q_u ή R ο συντελεστής συμπεριφοράς ο οποίος προκύπτει από την μέγιστη δύναμη F_1 , η οποία αντιστοιχεί στην επιτάχυνση διαρροής $S_{ay} = F_1^* / m^*$

$$q_u \equiv q_\pi \equiv R = \frac{S_e(T^*)}{S_{ay}} \quad (1.23)$$

- c ο σταθερός συντελεστής που εκφράζει την κλίση της σχέσης R - μ και εξαρτάται από την αρχική ιδιοπερίοδο T^* , τον λόγο r_u , το συντελεστή συμπεριφοράς q_u και τις χαρακτηριστικές ιδιοπεριόδους T_C και T_D^* .

$$c = \begin{cases} 0.7 \cdot \left(\frac{T^*}{T_C} \right) & \dots R \leq R(\mu_s), \quad T^* \leq T_C \\ 0.7 + 0.3 \cdot \Delta T & \dots R \leq R(\mu_s), \quad T_C < T^* \leq T_D^* \\ 0.7 \cdot \sqrt{r_u} \cdot \left(\frac{T^*}{T_C} \right)^{1/\sqrt{r_u}} & \dots R > R(\mu_s), \quad T^* \leq T_C \\ 0.7 \cdot \sqrt{r_u} \cdot (1 - \Delta T) + \Delta T & \dots R > R(\mu_s), \quad T_C < T^* \leq T_D^* \\ 1 & \dots T^* > T_D^* \end{cases} \quad (1.24)$$

$$T_D^* = T_D \cdot \sqrt{2 - r_u}, \quad \Delta T = \frac{T^* - T_C}{T_D \cdot \sqrt{2 - r_u} - T_C} \quad (1.25)$$

$$\mu_0 = \begin{cases} 1 & \dots R \leq R(\mu_s) \\ \mu_s & \dots R > R(\mu_s) \end{cases} \quad (1.26)$$

$$R_0 = \begin{cases} 1 & \dots R \leq R(\mu_s) \\ R(\mu_s) & \dots R > R(\mu_s) \end{cases} \quad (1.27)$$

Όπου:

$$R(\mu_s) = \begin{cases} 0.7 \cdot \left(\frac{T^*}{T_C} \right) \cdot (\mu_s - 1) + 1 & \dots T^* \leq T_C \\ (0.7 + 0.3 \cdot \Delta T) \cdot (\mu_s - 1) + 1 & \dots T_C < T^* \leq T_D^* \\ \mu_s & \dots T^* > T_D^* \end{cases} \quad (1.28)$$

Προκειμένου να σχεδιαστεί το ανελαστικό φάσμα απαίτησης που αντιστοιχεί σε σταθερό δείκτη πλαστιμότητας μετακινήσεων μ_d οι περιοχές που ορίζονται βάσει του συντελεστή συμπεριφοράς $R \leq R(\mu_s)$ και $R > R(\mu_s)$ και για τον οποίο υπολογίζονται οι συντελεστές c , R_0 και μ_0 [σχέσεις (1.24) - (1.27)] χρειάζεται να αντικατασταθούν από τα διαστήματα $\mu_d \leq \mu_s$ και $\mu_d > \mu_s$ αντίστοιχα. Επιπλέον, η σχέση (1.22) μπορεί να γραφεί στη μορφή:

$$q_u = R = c \cdot (\mu_d - \mu_s) + R_0 \quad (1.29)$$

Τέλος, οι ανελαστικές μετατοπίσεις dt^* του μονοβάθμιου συστήματος προκύπτουν από τις ελαστικές d_{et}^* , μέσω του λόγου ανελαστικών παραμορφώσεων C_I ως εξής:

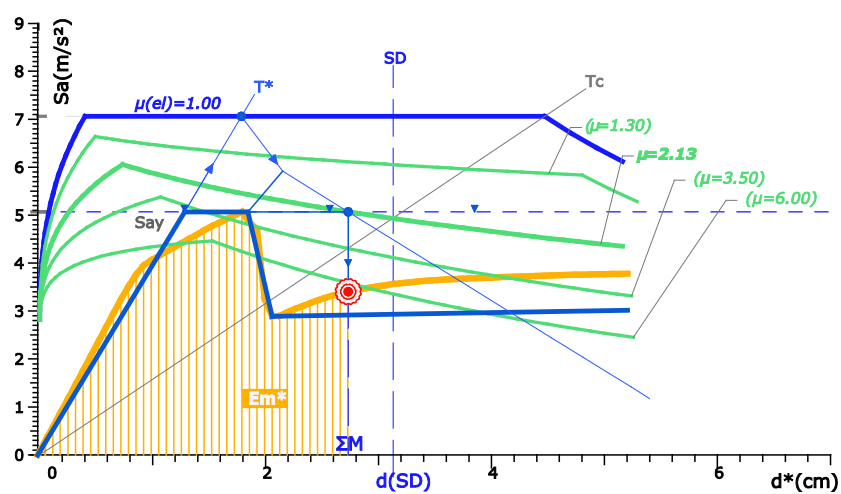
$$d_t^* = C_1 \cdot d_{et}^* \quad (1.30)$$

Όπου

$$C_1 = \frac{\mu_d}{q_u} \quad (1.31)$$

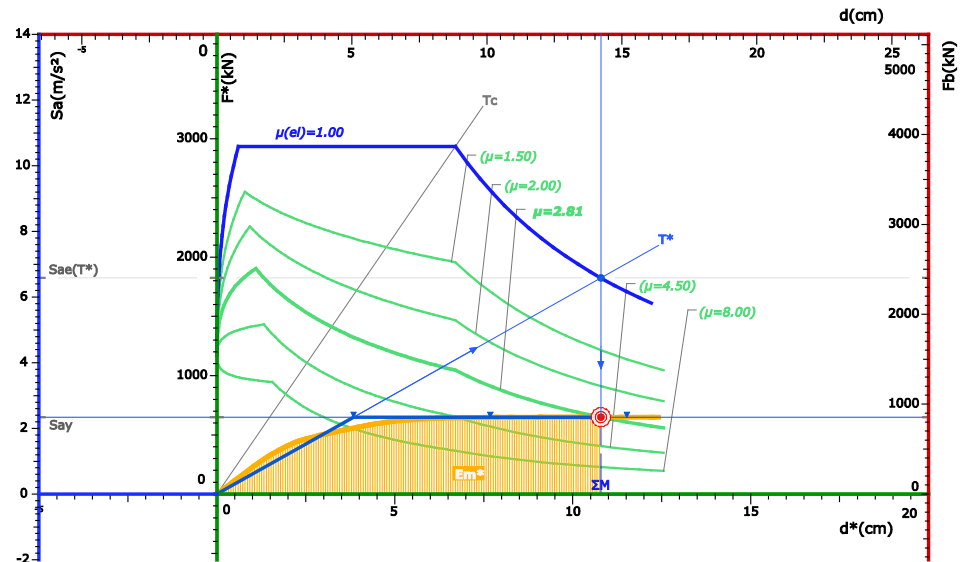
$$d_e^* = S_e(T) \cdot \left[\frac{T}{2\pi} \right]^2 \quad (1.32)$$

Όλα τα παραπάνω βήματα παρουσιάζονται γραφικά στο Σχήμα 1.12.



Σχήμα 1.12: Προσδιορισμός στοχευόμενης μετακίνησης λαμβάνοντας υπόψη την επιρροή των τοιχοπληρώσεων.

1.8 Ερμηνεία διαγραμμάτων



Σχήμα 1.13: Παρουσίαση διαγραμμάτων στο Τεύχος αποτελεσμάτων.

Στο Σχήμα 1.13 παρουσιάζεται γραφικά η διαδικασία εύρεσης της στοχευόμενης μετακίνησης όπως τυπώνεται στο Τεύχος του προγράμματος στο φάκελο «Διαγράμματα Απαιτήσης – Ικανότητας». Στο σχήμα συνυπάρχουν 3 συστήματα αξόνων:

1. $F_b \text{ (kN)} - d \text{ (cm)}$: Αναφέρεται στο **πολυβάθμιο** σύστημα σε όρους τένουσας βάσης - μετακίνησης κόμβου ελέγχου.
2. $F^* \text{ (kN)} - d^* \text{ (cm)}$: Αναφέρεται στο **μονοβάθμιο** σύστημα σε όρους ισοδύναμης με το πολυβάθμιο οριζόντιας δύναμης - ισοδύναμης μετακίνησης.
3. $S_a \text{ (m/s}^2\text{)} - d^* \text{ (cm)}$: Αναφέρεται στο **μονοβάθμιο** σύστημα σε όρους φασματικής επιταχυνσης - ισοδύναμης μετακίνησης.

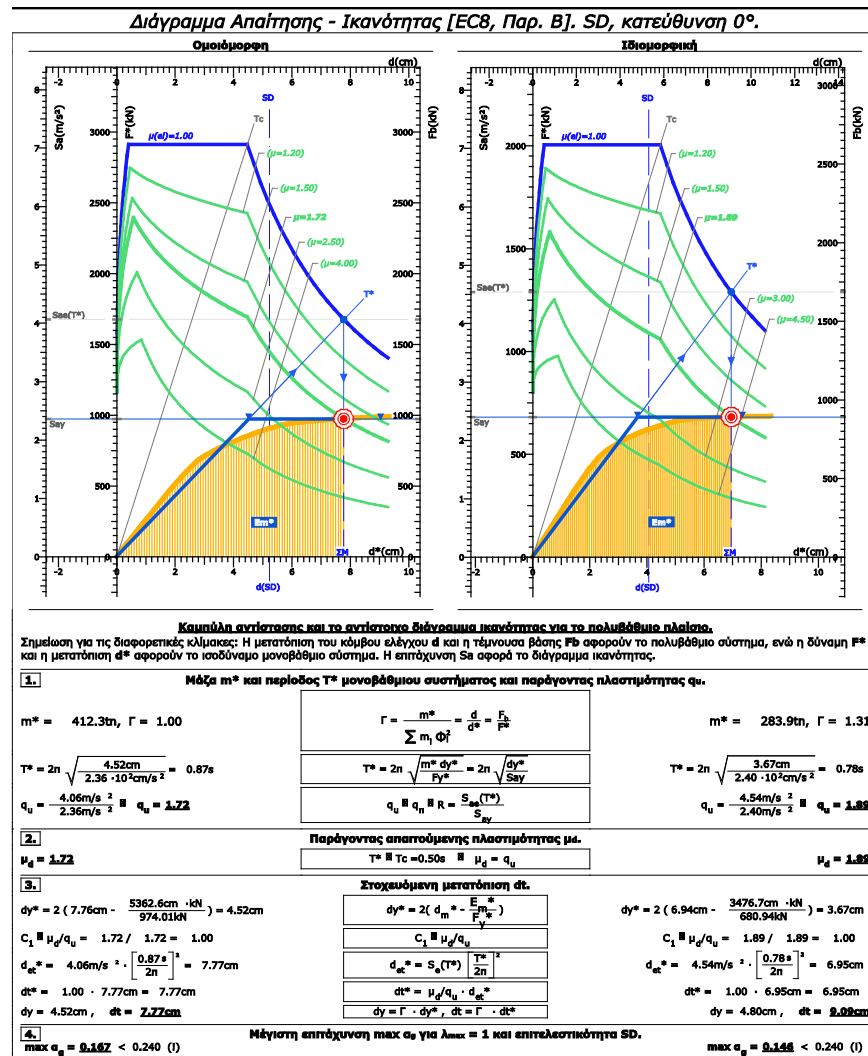
Σε κοινό διάγραμμα παρουσιάζεται η αρχική καμπύλη αντίστασης, η ιδεατή διγραμμική ή τετραγραμμική καμπύλη ανάλογα με την ύπαρξη και την επιρροή των τοιχοπληρώσεων και τα ανελαστικά φάσματα απόκρισης. Ακόμα εμφανίζεται γραφικά η βηματική διαδικασία υπολογισμού της στοχευόμενης μετακίνησης και η επάρκεια ή όχι του κτιρίου. Το πλεονέκτημα των πολλαπλών

αξόνων έγκειται στην άμεση διαθεσιμότητα τόσο της ικανότητας όσο και της σεισμικής απαίτησης της συνολικής πολυβάθμιας κατασκευής. Συνεπώς, για το προηγούμενο παράδειγμα μπορούν να διαβαστούν από το ίδιο διάγραμμα τα εξής αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1.

Αποτέλεσμα	Τιμή
Τέμνουσα βάσης, F_b	850 KN
Ισοδύναμη δύναμη μονοβαθμίου, F^*	650 KN
Φασματική επιτάχυνση, S_a	2.15 m/s ²
Στοχευόμενη μετακίνηση μονοβαθμίου, d_t^*	11.5 cm
Στοχευόμενη μετακίνηση πολυβαθμίου, d_t	14.3 cm
Απαιτούμενη πλαστιμότητα, μ_d	2.81

Πίνακας 1.1: Αριθμητικά αποτελέσματα διαγράμματος.

Τέλος, παράλληλα με το παραπάνω διάγραμμα τυπώνεται αναλυτικά η εφαρμογή του τυπολογίου που περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.14



Σχήμα 1.14: Εκτύπωση διαγραμμάτων απαίτησης-ικανότητας και συνοδευόμενων υπολογισμών στο Τεύχος.

Παράλληλα με την αναλυτική εκτύπωση των διαγραμμάτων και των υπολογισμών για κάθε επιτελεσματικότητα και διεύθυνση φόρτισης, στο «Τεύχος > Μη γραμμική ανάλυση (Pushover) > Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Απαίτησης – Ικανότητας» παρατίθενται συνοπτικά τα δυσμενέστερα αποτελέσματα για κάθε στάθμη όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1.15.

Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Απαίτησης - Ικανότητας

Στάθμη επιτελεστικότητας DL

1. Στοχευόμενη μετακίνηση Δt				
X:	+4.6cm -4.6cm	0°, Ιδιομορφική 180°, Ιδιομορφική	Z:	+4.6cm -4.6cm
				90°, Ιδιομορφική 270°, Ιδιομορφική
2. Απαιτούμενη πλαστικότητα				
Περίοδος μονοβάθμιου συστήματος	T*	0.73s		
Παράγοντας πλαστικότητας	q_u	1.30		
Παράγοντας απαιτούμενης πλαστικότητας	μ_d	1.30		90°, Ιδιομορφική
3. Επικρατούσα ανελαστική συμπεριφορά, [ΚΑΝΕΠΕ], §5.7.4.2				
Λόγος ανελαστικών μετατοπίσεων	$\max C_1$	$= 1.28 / 1.28$	μ_1 / q_u	1.00
				270°, Ιδιομορφική
4. Ικανότητα επιτάχυνσης για $\lambda_{\max} = 1$				
	$\max a_g(DL)$	0.046m/s ²		90°, Ιδιομορφική

Στάθμη επιτελεστικότητας SD

1. Στοχευόμενη μετακίνηση Δt				
X:	+9.1cm -9.2cm	0°, Ιδιομορφική 180°, Ιδιομορφική	Z:	+9.3cm -9.2cm
				90°, Ιδιομορφική 270°, Ιδιομορφική
2. Απαιτούμενη πλαστικότητα				
Περίοδος μονοβάθμιου συστήματος	T*	0.78s		
Παράγοντας πλαστικότητας	q_u	1.96		
Παράγοντας απαιτούμενης πλαστικότητας	μ_d	1.96		180°, Ιδιομορφική
3. Επικρατούσα ανελαστική συμπεριφορά, [ΚΑΝΕΠΕ], §5.7.4.2				
Λόγος ανελαστικών μετατοπίσεων	$\max C_1$	$= 1.95 / 1.95$	μ_1 / q_u	1.00
				270°, Ιδιομορφική
4. Ικανότητα επιτάχυνσης για $\lambda_{\max} = 1$				
	$\max a_g(SD)$	0.124m/s ²		90°, Ιδιομορφική

Στάθμη επιτελεστικότητας NC

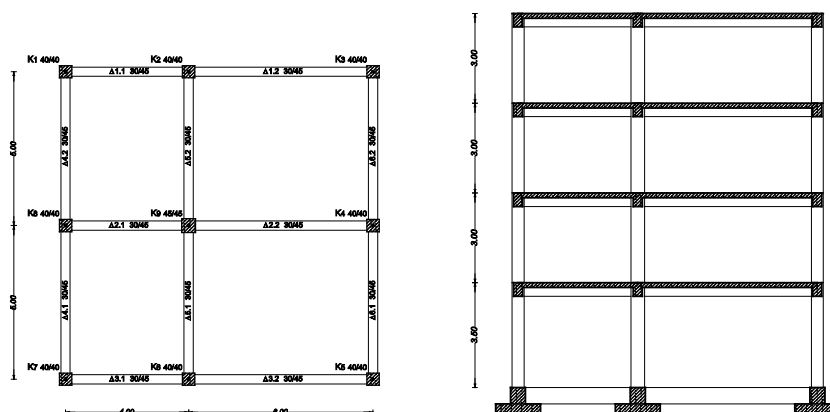
1. Στοχευόμενη μετακίνηση Δt				
X:	+11.6cm -11.8cm	0°, Ιδιομορφική 180°, Ιδιομορφική	Z:	+11.9cm -11.7cm
				90°, Ιδιομορφική 270°, Ιδιομορφική
2. Απαιτούμενη πλαστικότητα				
Περίοδος μονοβάθμιου συστήματος	T*	0.78s		
Παράγοντας πλαστικότητας	q_u	2.45		
Παράγοντας απαιτούμενης πλαστικότητας	μ_d	2.45		270°, Ιδιομορφική
3. Επικρατούσα ανελαστική συμπεριφορά, [ΚΑΝΕΠΕ], §5.7.4.2				
Λόγος ανελαστικών μετατοπίσεων	$\max C_1$	$= 2.45 / 2.45$	μ_1 / q_u	1.00
				270°, Ιδιομορφική
4. Ικανότητα επιτάχυνσης για $\lambda_{\max} = 1$				
	$\max a_g(NC)$	0.155m/s ²		90°, Ιδιομορφική
	$\max a_g(VR)$	0.262m/s ²		0°, Ομοιόμορφη

Σχήμα 1.15: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Απαίτησης – Ικανότητας στο Τεύχος αποτελεσμάτων του προγράμματος.

Αριθμητικά παραδείγματα

2.1 Κτίριο χωρίς τοιχοπληρώσεις

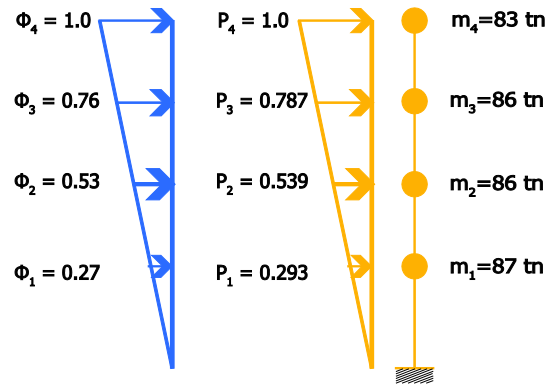
Για την τεκμηρίωση της μεθόδου προσδιορισμού στοχευόμενης μετακίνησης επιλύεται το κτίριο (Fajfar 1999, 2000) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1: Κάτοψη και τομή κτιρίου παραδείγματος χωρίς τοιχοπληρώσεις.

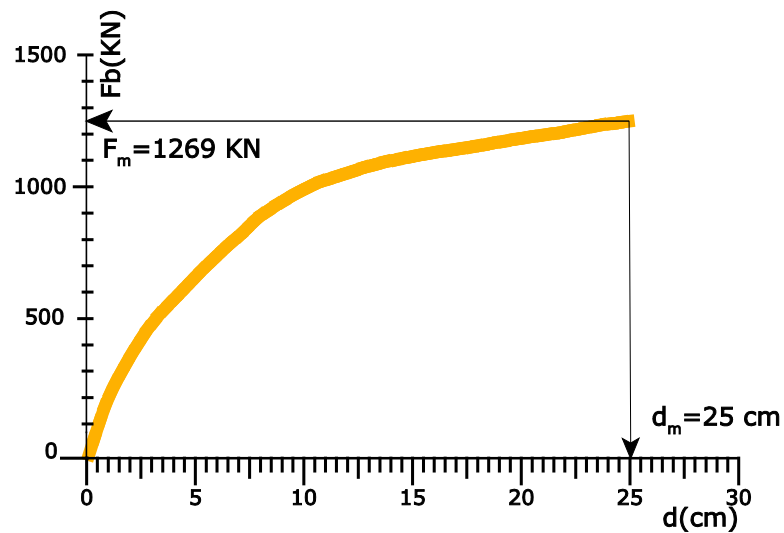
Πρόκειται για ένα τριόροφο κτίριο σχεδιασμένο σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες 2 και 8 για μέγιστη σεισμική επιτάχυνση $a_g = 0.3g$ και εδαφικές συνθήκες της Β κλάσης. Επιπλέον, οι μάζες των διαφραγμάτων είναι 87, 86, 86, και 83 tn αντίστοιχα (Σχήμα 2.2).

Στο παρόν παράδειγμα θα υπολογιστεί η στοχευόμενη μετακίνηση της κορυφής του κτιρίου για σεισμικό γεγονός που περιγράφεται από το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού του Ευρωκώδικα 8 με μέγιστη σεισμική επιτάχυνση ίση με την επιτάχυνση σχεδιασμού ($a_g = 0.3g$). Για τη διενέργεια της ανάλυσης Pushover θεωρείται γραμμική ιδιομορφική κατανομή μετακινήσεων και πλευρικών δυνάμεων σύμφωνα με το παρακάτω Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2: Κατανομή πλευρικών φασματικών μετακινήσεων και δυνάμεων για ανάλυση Pushover.

Η καμπύλη αντίστασης που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: Καμπύλης αντίστασης πολυβάθμιου συστήματος.

Για τον προσδιορισμό της καμπύλης αντίστασης αρχικά, γίνεται ο προσδιορισμός του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος με βάση τις παρακάτω σχέσεις:

- Μάζα ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος:

$$m^* = \sum_{i=1}^4 m_i \cdot \varphi_i = 1.0 \cdot 83 + 0.76 \cdot 86 + 0.52 \cdot 86 + 0.28 \cdot 87 = 217.44 \text{ tn}$$

- Συντελεστής μετατροπής Γ (σχέση (1.2)):

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{217.44}{162.75} = 1.34$$

Συνεπώς η καμπύλη αντίστασης πολυβαθμίου ($F_b - d$) μετατρέπεται σε ισοδύναμη καμπύλη αντίστασης μονοβάθμιου συστήματος ($F^* - d^*$) καθώς

$$\text{ισχύει } \Gamma = \frac{d}{d^*} = \frac{F_b}{F^*} = 1.34$$

Στη συνέχεια γίνεται ο προσδιορισμός της ιδεατής ελαστοπλαστικής σχέσης δύναμης μετακίνησης μέσω διγραμμικοποίησης της καμπύλης ($F^* - d^*$). Γίνεται παραδοχή ίσων εμβαδών μέχρι τη μετακίνηση όπου τερματίζεται η ανάλυση Pushover $d_m^* = 25 / 1.34 = 18.66 \text{ cm}$ θεωρώντας αρχική δύναμη διαρροής τη μέγιστη τέμνουσα βάσης $F_y^* = F_{\max}^* = 945 \text{ KN}$. Με βάση αυτά υπολογίζονται τα εξής:

- Εμβαδόν που περικλύει η καμπύλη αντίστασης: $E_m^* = 13292 \text{ KN} \cdot \text{cm}$ (ενέργεια)
- Μετακίνηση διαρροής του μονοβάθμιου συστήματος σύμφωνα με τη σχέση (1.6):

$$d_y^* = 2 \cdot \left(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) = 2 \cdot \left(18.66 - \frac{13292}{945} \right) = 9.19 \text{ cm}$$

Ιδιοπερίοδος T^* του μονοβάθμιου συστήματος σύμφωνα με τη σχέση (1.7):

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* \cdot d_y^*}{F_y^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{217.44 \cdot 0.0919}{945}} = 0.91 \text{ sec}$$

Έπειτα γίνεται η μετατροπή του ιδεατού διγραμμικοποιημένου συστήματος σε όρους φασματικής επιτάχυνσης – φασματικής μετακίνησης (ADRS) κάνοντας χρήση της σχέσης (1.3) για τις επιταχύνσεις:

$$S_{ay} = \frac{F_y^*}{m^*} = \frac{945}{217.44} = 4.35 \text{ m/s}^2$$

Με βάση το ελαστικό φάσμα απόκρισης για ιδιοπερίοδο T^* υπολογίζεται ο λόγος ελαστικής απαίτησης από τη σχέση (1.10):

Επειδή η στοχευόμενη μετακίνηση d^*_t διαφέρει αισθητά από τη μέγιστη d^*_m ($18.66-10.22 > 0.01$) η οποία χρησιμοποιήθηκε στη διγραμμικοποίηση, σύμφωνα με το Παράρτημα Β του EC8-1 διενεργείται βηματική διαδικασία, όπου σε κάθε βήμα η δύναμη διαρροής του διγραμμικού συστήματος F^*_y ισούται με τη δύναμη που αντιστοιχεί στην ανανεωμένη μετακίνηση στόχο d^*_t .

Τα αποτελέσματα της βηματικής διαδικασίας συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 2.1 Βήμα	E^*_m (KNm)	F^*_y (KN)	d^*_y (cm)	T^* (sec)	$Se(T^*)$ (m/s ²)	q_u	d^*_t (cm)
1	13292	945.38	9.19	0.91	4.83	1.11	10.22
2	5771	831.28	6.54	0.82	5.36	1.40	9.19
3	4933	807.83	6.17	0.81	5.44	1.46	9.05
4	4823	804.05	6.11	0.80	5.46	1.47	9.04

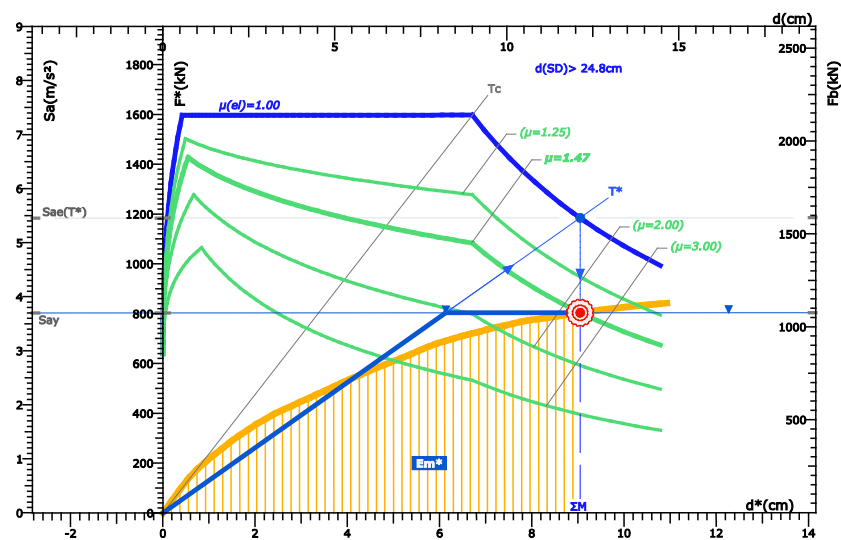
Πίνακας 2.1: Αποτελέσματα βηματικής διαδικασίας υπολογισμού στοχευόμενης μετακίνησης.

Τέλος, η στοχευόμενη μετακίνηση του μονοβαθμίου d^*_t μετατρέπεται στη ζητούμενη μετακίνηση του κόμβου ελέγχου της πολυβάθμιας κατασκευής μέσω της σχέσης (1.2):

$$d_t = \Gamma \cdot d^*_t = 1.34 \cdot 9.04 = 12.11 \text{ cm}$$

Παρατήρηση: Η στοχευόμενη μετακίνηση που προσδιορίστηκε από το Fespa ($d_t=12.13 \text{ cm}$) (Σχήμα 2.6) διαφέρει ελάχιστα από την αντίστοιχη που υπολογίζεται στα άρθρα του Fajfar (1999, 2000) ($d_t=11.93 \text{ cm}$). Αυτό συμβαίνει καθώς ο Fajfar χρησιμοποιεί μια παραλαγή της μεθόδου N2 του EC8-1 όπου ο 1^{ος} κλάδος της διγραμμικής καμπύλης τέμνει την καμπύλη αντίστασης στο 60% της δύναμης διαρροής F^*_y , ενώ δεν απαιτούνται επαναλήψεις.

Τα τελικά αποτελέσματα του προγράμματος Fespa παραθέτονται στη συνέχεια (Σχήμα 2.5) όπως τυπώνονται στο Τεύχος του προγράμματος:



Σχήμα 2.5: Σχηματικό αποτέλεσμα όπως τυπώνεται στο Τεύχος του Fespa.

Συστήματα αξόνων

- ① $F_b - d$: Τένουσας βάση - μετακίνηση κόμβου ελέγχου πολυβάθμιας κατασκευής.
- ② $F^* - d^*$: Ισοδύναμη οριζόντια δύναμη – ισοδύναμη μετακίνηση μονοβάθμιου συστήματος
- ③ $S_a - d^*$: Φασματικής επιταχυνση – ισοδύναμη μετακίνηση μονοβάθμιου συστήματος.

Επίσης, στο τεύχος τυπώνονται και όλοι οι σχετικοί υπολογισμοί όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.6.

Καμπύλη pushover και η αντίστοιχη δυναμική καμπύλη ικανότητας.

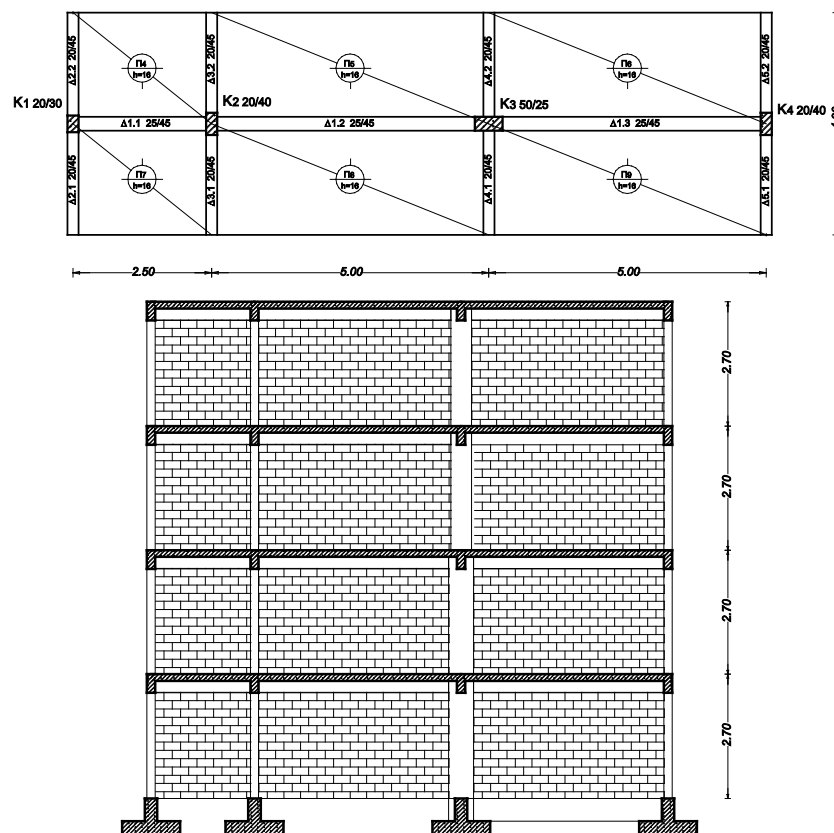
Σημείωση για τις διαφορετικές κλίμακες: Η μετατόπιση του κόμβου ελέγχου d και η τέμνουσα βάσης F_b αφορούν το πολυβάθμιο σύστημα, ενώ η δύναμη F^* και η μετατόπιση d^* αφορούν το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.

1. Μάζα m^* και περίοδος T^* μονοβάθμιου συστήματος και παράγοντας πλαστικότητας q_u. $m^* = 217.0 \text{tn}, \Gamma = 1.34$ $T^* = 2\pi \sqrt{\frac{6.14 \text{cm}}{3.70 \cdot 10^2 \text{cm/s}^2}} = 0.81 \text{s}$ $q_u = \frac{5.46 \text{m/s}^2}{3.70 \text{m/s}^2} \quad q_u = \mathbf{1.47}$	$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i} = \frac{d}{d^*} = \frac{F_b}{F^*}$ $T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* dy^*}{Fy^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{dy^*}{S_{ay}}}$ $q_u, q_n, R = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}}$
2. $\mu_d = \mathbf{1.47}$	Παράγοντας απαιτούμενης πλαστικότητας μ_d. $T^* > T_c = 0.60 \text{s} \quad \mu_d = q_u$
3. $dy^* = 2 \left(9.07 \text{cm} - \frac{4821.4 \text{cm} \cdot \text{kN}}{802.85 \text{kN}} \right) = 6.14 \text{cm}$ $C_1 = \mu_d / q_u = 1.47 / 1.47 = 1.00$ $d_{et}^* = 5.46 \text{m/s}^2 \cdot \left[\frac{0.81 \text{s}}{2\pi} \right]^2 = 9.05 \text{cm}$ $dt^* = 1.00 \cdot 9.05 \text{cm} = 9.05 \text{cm}$ $dy = 8.22 \text{cm}, \quad dt = \mathbf{12.13 \text{cm}}$	Στοχευόμενη μετατόπιση dt. $dy^* = 2 \left(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right)$ $C_1 = \mu_d / q_u$ $d_{et}^* = S_e(T^*) \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2$ $dt^* = \mu_d / q_u \cdot d_{et}^*$ $dy = \Gamma \cdot dy^*, \quad dt = \Gamma$

Σχήμα 2.6: Υπολογισμοί στοχευόμενης μετακίνησης στο Τεύχος του *Fespa*.

2.2 Κτίριο με τοιχοπληρώσεις

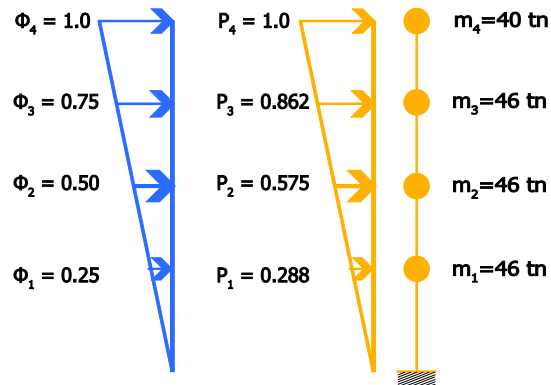
Στο παρόν παράδειγμα πραγματοποιείται έλεγχος και τεκμηρίωση της μεθοδολογίας προσδιορισμού της στοχευόμενης μετακίνησης σε κτίριο με τοιχοπληρώσεις. Για το σκοπό αυτό επιλέγεται το κτίριο -πλαίσιο του Σχήμα 2.7 (Dolsek & Fajfar, 2004), το οποίο αναπαριστά μια υπάρχουσα κατασκευή σχεδιασμένη με παλαιούς κανονισμούς του 54 (σκυροδέματος) και 59 (αντισεισμικός). Επίσης, το πλαίσιο περιλαμβάνει ομοιόμορφη τοιχοπλήρωση καθ' ύψος όλων των ορόφων.



Σχήμα 2.7: Κάτοψη και τομή κτιρίου με τοιχοπληρώσεις.

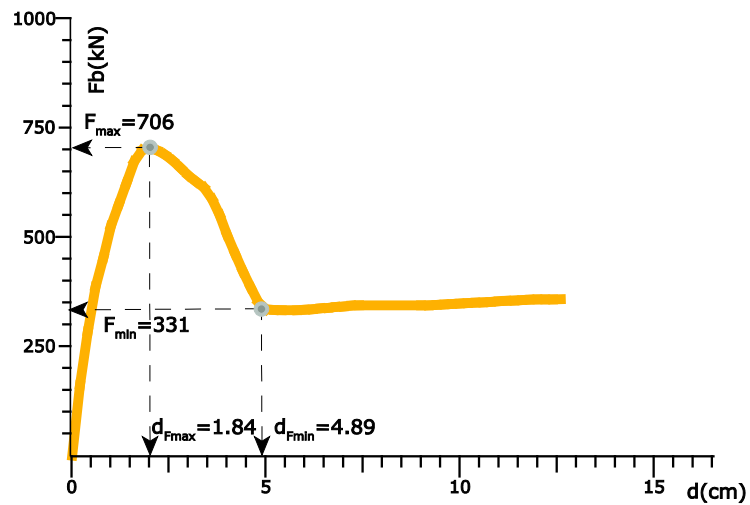
Το κτίριο αναλύεται για μέγιστη εδαφική επιτάχυνση $a_g = 0.45g$ και συντελεστή μεγέθυνσης $\beta=2.39$, ενώ η χαρακτηριστική περίοδος ανάμεσα στις περιοχές σταθερών ταχυτήτων – επιταχύνσεων είναι $T_c=0.55 \text{ sec}$. Η ανάλυση

Pushover εκτελείται με βάση την τριγωνική κατανομή πλευρικών φορτίων του Σχήματος 2.8. Στο ίδιο σχήμα παρουσιάζονται και η κατανομή των ιδιομορφικών μετακινήσεων καθώς και των μαζών καθ' ύψος του κτιρίου.



Σχήμα 2.8: Κατανομή πλευρικών φασματικών μετακινήσεων και δυνάμεων για ανάλυση Pushover.

Η καμπύλη αντίστασης που προκύπτει παρουσιάζεται στο παρακάτω Σχήμα 2.9:



Σχήμα 2.9: Καμπύλης αντίστασης κατασκευής.

Στο ίδιο γράφημα φαίνονται το μέγιστο και το ελάχιστο σημείο αντοχής του κτιρίου τα οποία θα χρειαστούν για την κατασκευή της τετραγραμμικής καμπύλης στη συνέχεια.

Αρχικά, υπολογίζεται η ισοδύναμη μάζα του μονοβάθμιου συστήματος m^* και ο συντελεστής μετατροπής Γ :

$$m^* = \sum_{i=1}^4 m_i \cdot \varphi_i = 1.0 \cdot 40 + 0.75 \cdot 46 + 0.50 \cdot 46 + 0.25 \cdot 46 = 109.0 \text{ tn}$$

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{109.0}{80.25} = 1.36$$

Συνεπώς, το μέγιστο και ελάχιστο σημείο αντοχής μετατρέπεται σε όρους μονοβάθμιου συστήματος:

$$F_{max}^* = \frac{F_{b,max}}{\Gamma} = 519.71 \text{ KN}, \quad d_{F,max}^* = \frac{d_{F,max}}{\Gamma} = 1.35 \text{ cm}$$

$$F_{min}^* = \frac{F_{b,min}}{\Gamma} = 243.38 \text{ KN}, \quad d_{F,min}^* = \frac{d_{F,min}}{\Gamma} = 3.60 \text{ cm}$$

Στη συνέχεια κατασκευάζεται η τετραγραμμική καμπύλη του μονοβάθμιου συστήματος ως εξής:

Σημείο διαρροής

- Δύναμη διαρροής: $F_y^* = F_{max}^* = 519.71 \text{ KN}$
- Μετακίνηση διαρροής (σχέση (1.18)):

$$d_y^* = d_l^* = 2 \cdot \left(d_{F,max}^* - \frac{E_{h,F,max}^*}{F_{max}^*} \right) = 2 \cdot \left(1.35 - \frac{437.6}{519.71} \right) = 1.02 \text{ cm}$$

- Ελαστική ιδιοπερίοδος:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* \cdot d_y^*}{F_y^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{109.0 \cdot 0.0102}{519.71}} = 0.29 \text{ sec}$$

Αρχικό σημείο πτωτικού κλάδου

- Δύναμη έναρξης καθοδικού κλάδου: $F_2^* = F_{max}^* = 519.71 \text{ KN}$
- Εμβαδόν καμπύλης μέχρι τη μέγιστη αντοχής: $E_{h,F,max}^* = 437.6 \text{ KN} \cdot \text{cm}$
- Εμβαδόν καμπύλης μέχρι την ελάχιστη αντοχή:
 $E_{h,F,min}^* = 1383.1 \text{ KN} \cdot \text{cm}$
- Μετακίνηση έναρξης καθοδικού κλάδου (σχέση (1.19)):

$$d_2^* = \frac{2}{519.71 - 243.38} \cdot \left(1383.1 - 437.6 + 519.71 \cdot 1.35 - 3.60 \cdot \frac{(519.71 + 243.38)}{2} \right)$$

$$= 1.98 \text{ cm}$$

Σημείο ελάχιστης αντοχής

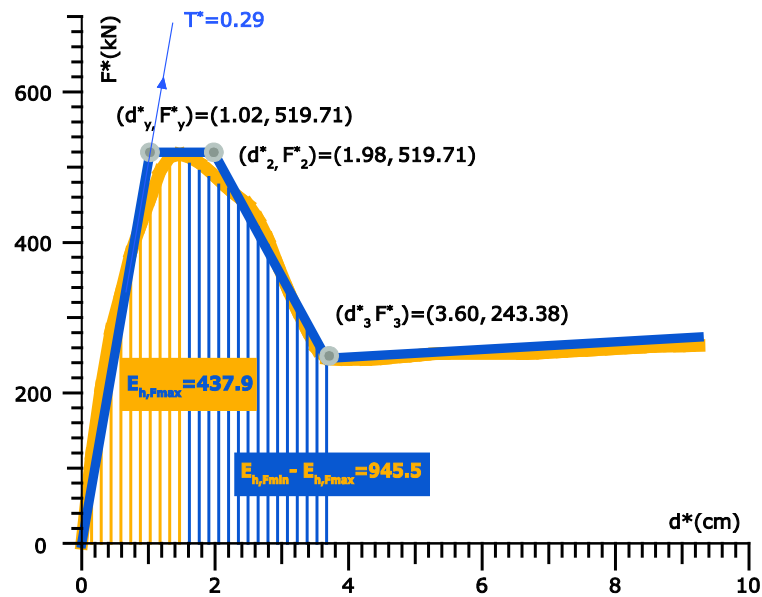
- Ελάχιστη δύναμη αντοχής $F_3^* = F_{min}^* = 243.38 \text{ KN}$
- Ελάχιστη μετακίνηση αντοχής $d_3^* = d_{Fmin}^* = 3.60 \text{ cm}$

Έπειτα, υπολογίζονται οι παρακάτω συντελεστές (σχέσεις (1.20), (1.21)):

$$r_u = \frac{F_3^*}{F_y^*} = \frac{243.38}{519.71} = 0.47$$

$$\mu_s = \frac{d_2^*}{d_y^*} = \frac{1.98}{1.02} = 1.94$$

Η τετραγραμμικοποίηση της καμπύλης αντίστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Τετραγραμμικοποίηση καμπύλης αντίστασης.

Ισχύει $r_u < 0.5$, συνεπώς οι τοιχοπληρώσεις αποτελούν τον κύριο μηχανισμό ανάλυσης πλευρικών δυνάμεων, κάτι που είναι αναμενόμενο καθώς τα

υποστυλώματα είναι μικρά και προσανατολισμένα στη μικρή διεύθυνση για τη συγκεκριμένη φορά των πλευρικών φορτίων.

Ο συντελεστής συμπεριφοράς υπολογίζεται από τη σχέση (1.23):

$$R = \frac{S_e(T^*)}{S_{ay}} = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*} = \frac{10.55 \cdot 109.0}{519.71} = 2.21$$

Ισχύει $T^* = 0.29 < T_C = 0.55 \text{ sec}$, συνεπώς σύμφωνα με τη σχέση (1.28) υπολογίζουμε το συντελεστή συμπεριφοράς συναρτήσει της πλαστιμότητας μετακινήσεων:

$$R(\mu_s) = 0.7 \cdot \left(\frac{T^*}{T_C} \right) \cdot (\mu_s - 1) + 1 = 0.7 \cdot \left(\frac{0.29}{0.55} \right) \cdot (1.94 - 1) + 1 = 1.35$$

Επίσης, ισχύει $T^* < T_C$ και $R > R(\mu_s)$ οπότε σύμφωνα με τη σχέση (1.24) ο σταθερός συντελεστής c προκύπτει:

$$c = 0.7 \cdot \sqrt{r_u} \cdot \left(\frac{T^*}{T_C} \right)^{1/\sqrt{r_u}} = 0.7 \cdot \sqrt{0.47} \cdot \left(\frac{0.29}{0.55} \right)^{1/\sqrt{0.47}} = 0.19$$

Ακόμα, λόγω του ότι $R > R(\mu_s)$ ισχύει (σχέσεις (1.26) και (1.27)):

$$\mu_0 = \mu_s = 1.94$$

$$R_0 = R(\mu_s) = 1.35$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η πλαστιμότητα μετακινήσεων μ_d από τη σχέση (1.22):

$$\mu_d = \frac{1}{c} (R - R_0) + \mu_0 = \frac{1}{0.19} (2.21 - 1.35) + 1.94 = 6.46$$

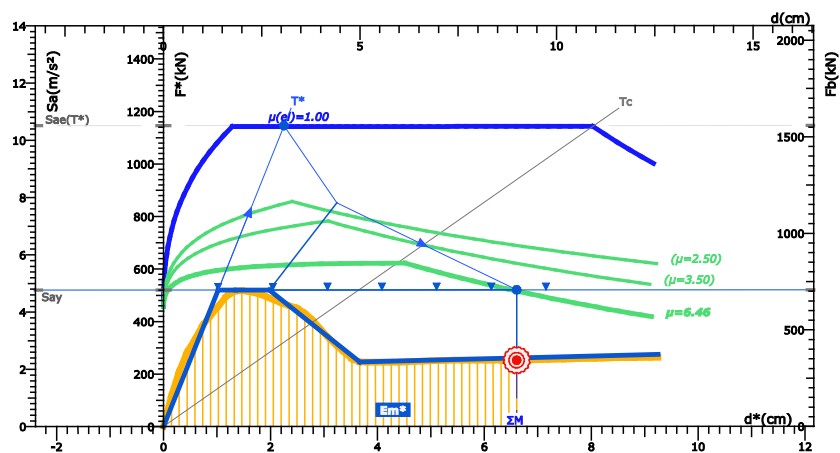
Τέλος, η στοχευόμενη μετακίνηση μονοβαθμίου προκύπτει μέσω του συντελεστή ανελάστικών μετακινήσεων C_I και της ελαστικής μετακίνησης ως εξής (σχέσεις (1.30) - (1.32)):

$$d_i^* = C_I \cdot d_{ei}^* = \frac{\mu_d}{q_u} \cdot S_e(T) \cdot \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2 = \frac{6.46}{2.21} \cdot 10.51 \cdot \left[\frac{0.29}{2\pi} \right]^2 = 6.61 \text{ cm}$$

Η στοχευόμενη μετακίνηση της πολυβάθμιας κατασκευής υπολογίζεται μέσω της σχέσης (1.2):

$$d_i = \Gamma \cdot d_i^* = 1.36 \cdot 6.61 = 8.98 \text{ cm}$$

Όλα τα παραπάνω συνοψίζονται σε τρία συστήματα αξόνων, στο ίδιο Σχήμα 2.11, όπως τυπώνεται στο Τεύχος του προγράμματος:



Σχήμα 2.11: Σχηματικό αποτέλεσμα όπως τυπώνεται στο Τεύχος του Fespa.

Συστήματα αξόνων

- ① $F_b - d$: Τένουσας βάση - μετακίνηση κόμβου ελέγχου πολυβάθμιας κατασκευής.
- ② $F^* - d^*$: Ισοδύναμη οριζόντια δύναμη - ισοδύναμη μετακίνηση μονοβάθμιου συστήματος
- ③ $S_a - d^*$: Φασματικής επιταχυνση - ισοδύναμη μετακίνηση μονοβάθμιου συστήματος.

Επίσης, στο τεύχος τυπώνονται και όλοι οι σχετικοί υπολογισμοί όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.12.

1. Μάζα m^* και περίοδος T^* μονοβάθμιου συστήματος και παράγοντας πλαστιμότητας q_u.	
$m^* = 109.0 \text{ tn}, \Gamma = 1.36$	$\Gamma = \frac{m^*}{\sum m_i \Phi_i^2} = \frac{d}{d^*} = \frac{F_b}{F^*}$
$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{1.02 \text{ cm}}{4.77 \cdot 10^2 \text{ cm/s}^2}} = 0.29 \text{ s}$	$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{m^* dy^*}{F y^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{dy^*}{S_{ay}}}$
$q_u = \frac{10.51 \text{ m/s}^2}{4.77 \text{ m/s}^2}, \quad q_u = \mathbf{2.21}$	$q_u = q_n = R = \frac{S_{ae}(T^*)}{S_{ay}}$
2. Παράγοντας απαιτούμενης πλαστιμότητας μ_d.	
$\mu_s = \frac{1.98 \text{ cm}}{1.02 \text{ cm}} = 1.94, \quad r_u = \frac{2.26 \text{ m/s}^2}{4.77 \text{ m/s}^2} = 0.47$	$\mu_s = \frac{d^*}{d^* y}, \quad r_u = \frac{S_{a3}}{S_{a1}}$
$R(\mu_s) = 0.7 \left(\frac{0.29 \text{ s}}{0.55 \text{ s}} \right) (1.94 - 1) + 1 = 1.35$	$T^* < T_c = 0.55 \text{ s}, \quad R(\mu_s) = 0.7 \left(\frac{T^*}{T_c} \right) (\mu_s - 1) + 1$
$R_0 = 1.35$	$R > R(\mu_s), \quad R_0 = R(\mu_s)$
$\mu_0 = 1.94$	$R > R(\mu_s), \quad \mu_0 = \mu_s$
$c = 0.7 \sqrt{0.47} \left(\frac{0.29 \text{ s}}{0.55 \text{ s}} \right)^{\frac{1}{0.47}} = 0.19$	$R > R(\mu_s), T^* < T_c, \quad c = 0.7 \sqrt{r_u} \left(\frac{T^*}{T_c} \right)^{\frac{1}{r_u}}$
$\mu_d = \frac{1}{0.19} (2.21 - 1.35) + 1.94 \quad \mu_d = \mathbf{6.46}$	$\mu_d = \frac{1}{c} (R - R_0) + \mu_0$
3. Στοχευόμενη μετατόπιση dt.	
$dy^* = 2 \left(1.35 \text{ cm} - \frac{437.6 \text{ cm} \cdot \text{kN}}{519.71 \text{ kN}} \right) = 1.02 \text{ cm}$	$dy^* = 2 \left(d_{F_{\max}}^* - \frac{E_p F_{\max}^*}{F_{\max}^*} \right)$
$C_1 = \mu_d / q_u = 6.46 / 2.21 = 2.93$	$C_1 = \mu_d / q_u$
$d_{et}^* = 10.51 \text{ m/s}^2 \cdot \left[\frac{0.29 \text{ s}}{2\pi} \right]^2 = 2.25 \text{ cm}$	$d_{et}^* = S_e(T^*) \left[\frac{T^*}{2\pi} \right]^2$
$dt^* = 2.93 \cdot 2.25 \text{ cm} = 6.61 \text{ cm}$	$dt^* = \mu_d / q_u \cdot d_{et}^*$
$dy = 1.39 \text{ cm}, \quad dt = \mathbf{8.98 \text{ cm}}$	$dy = \Gamma \cdot dy^*, \quad dt = \Gamma$

Σχήμα 2.12: Υπολογισμοί στοχευόμενης μετακίνησης στο Τεύχος του Fespa

Βιβλιογραφία

- [1] ΕΛΟΤ **EN 1998-1**, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών - Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια.
- [2] ΕΛΟΤ **EN 1998-3**, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών - Μέρος 3: Αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας κτιρίων και επεμβάσεις.
- [3] **Fajfar P.** "Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra", Earthquake Engng. Struct. Dyn. 1999; 28: 979-993.
- [4] **Fajfar P.** "A nonlinear analysis method for performance-based seismic design", Earthquake Spectra 2000; 6: 573-592.
- [5] **Dolsek M., Fajfar P.** "Inelastic spectra for infilled reinforced concrete frames", Earthquake Engng Struct. Dyn. 2004; 33: 1395-1416.
- [6] **Dolsek M., Fajfar P.** "Simplified non-linear seismic analysis of infilled reinforced concrete frames", Earthquake Engng Struct. Dyn. 2005; 34:49-66.