

Α.Τ.Ε.Ι. ΠΕΙΡΑΙΑ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΡΡΟΗΣ ΤΟΥ ΒΑΘΜΟΥ  
ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΜΙΑΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΣΤΟΝ  
ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ  
**ΕΥΘΥΜΙΟΣ Ζ. ΚΟΥΑΛΗΣ**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ  
**ΝΙΚΟΛΕΤΑ ΨΥΛΛΑ**

ΠΕΙΡΑΙΑΣ ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2009

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ .....	III
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ .....	IV
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	V
<b><u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u></b> .....	<b>1</b>
<b><u>2. ΣΤΟΧΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ</u></b> .....	<b>3</b>
2.1. Γενικά.....	3
2.2. Καθορισμός επιπέδου σεισμικής δράσης .....	7
2.3. Περιγραφή σταθμών επιτελεστικότητας.....	9
2.4. Οι στάθμες επιτελεστικότητας όπως διατυπώνονται στην F.E.MA.....	13
2.5. Οι στάθμες επιτελεστικότητας όπως διατυπώνονται στον ΚΑΝΕΠΕ .....	17
2.6. Συνδυασμένες στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής.....	20
<b><u>3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ</u></b> .....	<b>21</b>
3.1. Καμπύλη αντίστασης (capacity curve).....	21
3.2. Καμπύλη $F$ - $\delta$ δομικού στοιχείου ή διατομής.....	22
3.3. Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής.....	25
<b><u>4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ</u></b> .....	<b>27</b>
4.1. Εισαγωγή.....	27
4.2. Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα.....	28
<b><u>5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ</u></b> .....	<b>45</b>

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ευρισκόμενος στο τέλος της πτυχιακής εργασίας , οφείλω να ευχαριστήσω όλους αυτούς που υπήρξαν αρωγοί στη προσπάθεια εκπλήρωσης της .

Πρωτίστως οφείλω να ευχαριστήσω την καθηγήτρια Νικολέτα Ψύλλα η βοήθεια της οποίας υπήρξε καταλυτική σε όλα τα στάδια της πτυχιακής . Είναι βέβαιο ότι δεν θα ήμουν στην ευχάριστη αυτή θέση χωρίς την καθοδήγηση και την πολύτιμη βοήθεια της.

Με μεγάλη χαρά θέλω να ευχαριστήσω εκ των προτέρων τα μέλη της επιτροπής , για την ευγενική προσφορά τους να εξετάσουν την παρούσα πτυχιακή και να αποφανθούν για την πληρότητά της.

Η συμπαράσταση των φίλων υπήρξε ιδιαίτερος σημαντική σε όλα τα στάδια των σπουδών αφού η επιτυχία οφείλεται στην ισορροπία τόσο σε επαγγελματικό όσο και σε φιλικό-προσωπικό επίπεδο .

Φυσικά είναι αυτονόητο ότι η συνεισφορά των γονέων μου υπήρξε καταλυτική στις σπουδές μου . Η εκτίμηση , ευγνωμοσύνη και αγάπη που τους τρέφω δεν μπορεί να εκφρασθεί σε μια παράγραφο και είναι βέβαιο πως θα βρίσκονται πάντα δίπλα μου σε όλες τις δύσκολες στιγμές της ζωής μου .

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1. Καθορισμός στόχων σχεδιασμού.....	4
Σχήμα 2.2. Τυπική Πιθανολογική καμπύλη.....	7
Σχήμα 3.1. Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής.....	21
Σχήμα 3.2. Καμπύλες F-δ δομικών στοιχείων: (α) καμπτική συμπεριφορά, (β) διατμητική συμπεριφορά. ....	23
Σχήμα 3.3. Ιδεατή καμπύλη F-δ δομικών στοιχείων.....	23
Σχήμα 3.4. Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη αντίστασης.....	26
Σχήμα 4.1. Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής και του φάσματος αντίστασης του ισοδύναμου μονοβαθμίου σε ADRS μορφή.....	30
Σχήμα 4.2. Τιμές συντελεστή α για χαρακτηριστικούς τρόπους συμπεριφοράς.....	30
Σχήμα 4.3. Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε ADRS μορφή.....	31
Σχήμα 4.4. Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.....	32
Σχήμα 4.5. Κατασκευή διγραμμικού φάσματος αντίστασης.....	32
Σχήμα 4.6. Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για $\zeta=\zeta_{\text{eff}}$ και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.....	35
Σχήμα 4.7. Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού φάσματος αντίστασης.....	37
Σχήμα 4.8. Κατασκευή ιδεατής διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης αντίστασης.....	39
Σχήμα 4.9. Σύγκριση στοχευόμενης μετακίνησης και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας.....	43
Σχήμα 5.1. Προσομοίωμα τετραώροφου κτιρίου .....	45
Σχήμα 5.2. Πιθανολογική καμπύλη.....	46
Σχήμα 5.3. Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού.....	47
Σχήμα 5.4. ADRS μορφή φάσματος.....	48
Σχήμα 5.5. Καμπύλη αντίστασης του κτιρίου.....	49
Σχήμα 5.6. Φάσμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος .....	50
Σχήμα 5.7. Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.....	51
Σχήμα 5.8. Εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.....	53
Σχήμα 5.9. Καμπύλη αντίστασης του κτιρίου.....	54

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1. Στόχοι σεισμικής ικανότητας κατά Ευρωκώδικα 8 – Μέρος 3.....	3
Πίνακας 2.2. Ενδεικτική περιγραφή αναμενόμενων βλαβών σε κτήρια από Ω.Σ για διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας (πηγή: ATC-40).....	11
Πίνακας 2.3. Μέγιστο επιτρεπτό I.D.R. σύμφωνα με την F.E.M.A.....	15
Πίνακας 2.4. Συνδυασμένοι στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού Κτιρίου σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ (i = 1 ή 2).....	19
Πίνακας 2.5. Συνδυασμένοι στόχοι σεισμικής ικανότητας σύμφωνα με τον EC8.....	20
Πίνακας 4.1. Τύποι συμπεριφοράς κτηρίων.....	34
Πίνακας 4.2. Τιμές διορθωτικού συντελεστή $\kappa$ .....	34
Πίνακας 4.3. Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης.....	34
Πίνακας 4.4. Τιμές του συντελεστή $C_0$ .....	42
Πίνακας 4.5. Τιμές του συντελεστή $C_m^{(*)}$ .....	42
Πίνακας 4.6. Τιμές του συντελεστή $C_2$ .....	42

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η φιλοσοφία των σημερινών αντισεισμικών κανονισμών είναι η αποφυγή της διακινδύνευσης της σωματικής ακεραιότητας ανθρώπων λόγω κατάρρευσης του συνόλου ή τμήματος της κατασκευής για τον σεισμό σχεδιασμού. Παρόλο που η προστασία της ανθρώπινης ζωής κρίνεται ως το βασικότερο κριτήριο των σύγχρονων κανονισμών, οι προηγμένες βιομηχανικά χώρες συνειδητοποίησαν ότι το κόστος επισκευής των βλαβών, διακοπής εργασιών ή μετεγκατάστασης των δραστηριοτήτων είναι πολύ μεγάλο, χωρίς ωστόσο να λαμβάνεται υπόψη το ψυχολογικό κόστος και η αναπόφευκτη κοινωνική αναστάτωση. Επομένως οι επιπτώσεις ενός σεισμού πρέπει να κρίνονται κυρίως από την απώλεια ανθρώπων αλλά επιπλέον και από τις επιπτώσεις που προκαλούν στην οικονομία μιας περιοχής ή ενός κράτους. Χαρακτηριστικότερο παράδειγμα στον Ελληνικό χώρο αποτελεί ο σεισμός της Καλαμάτας το 1986 όπου υπήρξαν 21 ανθρώπινες απώλειες αλλά η οικονομική νέκρωση της πόλης ήταν για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα .

Μια νέα στρατηγική μελέτης αντισεισμικών κατασκευών αναπτύχθηκε στις ΗΠΑ κατά την τελευταία δεκαετία μέσα από τον προβληματισμό που πυροδότησαν οι τεράστιες οικονομικές καταστροφές που προκάλεσαν ισχυροί σεισμοί όπως εκείνος του Northridge. Συνειδητοποιήθηκε, ότι οι κατασκευές σε προηγμένες βιομηχανικές περιοχές προσφέρουν μεν επαρκή προστασία ζωής έναντι ισχυρών σεισμών, το κόστος όμως λόγω επισκευής των βλαβών και διακοπής εργασιών ή μετεγκατάστασης δραστηριοτήτων είναι πολύ μεγάλο , ακόμη κι αν δεν προσμετρηθεί το ψυχολογικό κόστος και η αναπόφευκτη κοινωνική αναστάτωση. Προκύπτει έτσι η ανάγκη ανάπτυξης μίας ευέλικτης αντισεισμικής φιλοσοφίας σχεδιασμού για διάφορες στάθμες σεισμικής επίδοσης (επιτελεστικότητας) των κατασκευών.

Ο αντισεισμικός σχεδιασμός των κατασκευών με στάθμες επιτελεστικότητας (Performance-Based Design) βασίζεται στην **αρχή του καθορισμού αποδεκτού επιπέδου ζημιών (στάθμης επιτελεστικότητας) ανάλογα με την πιθανότητα εμφάνισης της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού, δηλαδή στον καθορισμό ενός επιδιωκόμενου στόχου σεισμικής ικανότητας**. Με άλλα λόγια, η μέθοδος εξετάζει τον πραγματικό τρόπο που θα συμπεριφερθεί η κατασκευή σε διάφορα επίπεδα ισχύος της σεισμικής δόνησης σχεδιασμού και το αντίστοιχο αναμενόμενο επίπεδο ζημιών. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ο καλύτερος συνδυασμός ασφάλειας και οικονομίας.

Αντίθετα, η κλασική μεθοδολογία σχεδιασμού των σύγχρονων αντισεισμικών κανονισμών (μέθοδος των δυνάμεων) εξετάζει μόνο τη συμπεριφορά της κατασκευής μέχρι να αρχίσουν οι ζημιές (ελαστική απόκριση) και δεν ασχολείται με το τι συμβαίνει μετά. Το ελάχιστο απαιτούμενο επίπεδο ασφάλειας εξασφαλίζεται μέσω του συντελεστή συμπεριφοράς που χρησιμοποιείται στη μελέτη. Οι συντελεστές συμπεριφοράς έχουν καθοριστεί από τη γνώση που έχουμε αποκτήσει από προηγούμενους σεισμούς και την πειραματική και αναλυτική έρευνα που έχει γίνει, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η προστασία της ανθρώπινης ζωής και η αποφυγή κατάρρευσης. Σε πολλές περιπτώσεις όμως, ο σχεδιασμός αυτός μπορεί να μην είναι τόσο ασφαλής, όπως π.χ. σε έντονα μη κανονικά κτήρια. Η μεθοδολογία των σταθμών επιτελεσματικότητας σήμερα εφαρμόζεται κυρίως για τον έλεγχο και την ενίσχυση υφιστάμενων κατασκευών και αποτελεί τον βασικό κορμό των διεθνών κανονισμών επεμβάσεων (π.χ. Ευρωκώδικας 8 – Μέρος 3, Ελληνικός Κανονισμός Επεμβάσεων – ΚΑΝ.ΕΠΕ., FEMA 356, ATC-40 κλπ)[7]. Σε νέες κατασκευές, η μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο μιας ήδη διαστασιολογημένης κατασκευής.

Απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου είναι η γνώση του τρόπου συμπεριφοράς της κατασκευής και πέραν της ελαστικής περιοχής, δηλαδή μετά την εμφάνιση των ζημιών έως την οιονεί κατάρρευση. Για το λόγο αυτό, η μέθοδος εφαρμόζεται σε συνδυασμό με μη-γραμμικές (ανελαστικές) αναλύσεις, είτε στατικές (ανάλυση pushover) είτε δυναμικές (αναλύσεις χρονοϊστορίας).

Στα πρώτα κεφάλαια της παρούσας πτυχιακής έχουμε ως σκοπό την κατανόηση των βαθμών επιτελεσματικότητας, δηλαδή ποια η σημασία τους, πως προέκυψαν και σε τι οφελούν τις κατασκευές. Αναφέρονται οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας και οι προϋποθέσεις για να καθοριστούν και διατυπώνονται οι στάθμες επιτελεσματικότητας από διάφορες πηγές ( Ευρωκώδικας 8, ATC-40, F.E.M.A, ΚΑΝΕΠΕ ) και η διαδικασία υπολογισμού τους.

Επίσης μέσα από την εφαρμογή που υπάρχει στο τέλος της εργασίας έχουμε ως σκοπό να υπολογίσουμε την αναμενόμενη μετακίνηση μιας κατασκευής για συγκεκριμένη διάρκεια ζωής του έργου και πιθανότητα επανάληψης, δηλαδή για συγκεκριμένη σεισμική δράση.

## 2. ΣΤΟΧΟΙ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

### 2.1. Γενικά

Οι στόχοι της σεισμικής ικανότητας μιας κατασκευής αποτελούν συνδυασμούς μιας στάθμης επιτελεστικότητας (δηλαδή του αποδεκτού επιπέδου βλαβών) και ενός επιπέδου της σεισμικής δράσης, που συνήθως καθορίζεται από την ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης στη διάρκεια ζωής της κατασκευής ή την ισοδύναμη περίοδο επανάληψης. Δηλαδή, κάθε στόχος σεισμικής ικανότητας καθορίζει μία ανεκτή οριακή κατάσταση βλαβών για συγκεκριμένη ισχύ της σεισμικής δόνησης. Αφού καθοριστεί ο επιθυμητός στόχος σεισμικής ικανότητας, μπορεί στη συνέχεια να γίνει η αποτίμηση μιας υφιστάμενης κατασκευής ή ο ανασχεδιασμός της (ενίσχυσή της) ή ο σχεδιασμός μιας νέας κατασκευής. Οι στόχοι σεισμικής ικανότητας αναφέρονται τόσο στο φέροντα οργανισμό, όσο και στο μη-φέροντα οργανισμό, δηλαδή στο σύστημα που δεν συμμετέχει στην ανάληψη των κατακόρυφων φορτίων. Ο συνολικός στόχος για όλη την κατασκευή προκύπτει από συνδυασμό των στόχων για το φέροντα και το μη-φέροντα οργανισμό.

Στον Πίνακα 2.1 [8] φαίνονται οι στόχοι σχεδιασμού σύμφωνα με τις στάθμες επιτελεστικότητας και τις περιόδους επανάληψης του Ευρωκώδικα 8 [9] – Μέρος 3. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο συνήθης σχεδιασμός με τους σύγχρονους αντισεισμικούς κανονισμούς (π.χ. ΕΑΚ 2000) [10] αντιστοιχεί σε στόχο σχεδιασμού B2.

Πίνακας 2.1 : Στόχοι σεισμικής ικανότητας κατά Ευρωκώδικα 8 [9]– Μέρος 3

		Στάθμη επιτελεστικότητας		
		Περιορισμός βλαβών	Σημαντικές βλάβες	Οιονεί κατάρρευση
Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης σε 50 χρόνια	20% (Περίοδος επανάληψης 225 χρόνια)	A1	B1	Γ1
	10% (Περίοδος επανάληψης 475 χρόνια)	A2	B2	Γ2
	2% (Περίοδος επανάληψης 2475 χρόνια)	A3	B3	Γ3



Ο καθορισμός του στόχου για τον οποίο θα γίνει ο σχεδιασμός εξαρτάται από τον επιθυμητό συνδυασμό ασφάλειας και κόστους, λαμβάνοντας υπόψη και τη σπουδαιότητα της κατασκευής. Σχηματικά, η φιλοσοφία σχεδιασμού φαίνεται στο Σχ. 2.1, [1] όπου κάθε τετράγωνο αντιπροσωπεύει ένα στόχο σχεδιασμού, ενώ οι διαγώνιες γραμμές αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα κριτήρια σχεδιασμού. Έτσι, η γραμμή 1-3 καθορίζει τον βασικό σχεδιασμό συνήθων κατασκευών, η γραμμή 2-3 αντιστοιχεί σε ένα σχεδιασμό με μικρότερο σεισμικό κίνδυνο και θα μπορούσε να αντιστοιχεί σε κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας (π.χ. Σ3 κατά ΕΑΚ) [10] και η γραμμή 3-3 σε ένα πολύ ασφαλή (αλλά και πολύ αντικοινωνικό) σχεδιασμό που θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε μία κατασκευή πολύ μεγάλης σπουδαιότητας (Σ 4 κατά ΕΑΚ).[10]

Οι στόχοι που αντιστοιχούν στα τετράγωνα δεξιά της γραμμής 1-3 δεν είναι αποδεκτοί .

		Στάθμη επιτελεστικότητας		
		Άμεση χρήση	Προστασία ζωής	Οιονεί κατάρρευση
Συχνότητα εμφάνισης σεισμικής δράσης	Μεγάλη (συχνοί σεισμοί)	1		Μη αποδεκτοί στόχοι
	Μικρή (σπάνιοι σεισμοί)	2		
	Πολύ μικρή (πολύ σπάνιοι σεισμοί)	3	3	3

Σχ. 2.1 : Καθορισμός στόχων σχεδιασμού.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό των περισσότερων συνήθων οικοδομικών έργων, που αντιστοιχούν σε κατηγορία σπουδαιότητας Σ2 με βάση τον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό (ΕΑΚ 2000)[10], επιλέγεται η δεύτερη στάθμη επιτελεστικότητας. Για κατασκευές υψηλής σπουδαιότητας συνιστάται η υιοθέτηση αυστηρότερων κριτηρίων επιτελεστικότητας σε συνεργασία με τον Κύριο του Έργου. Το επίπεδο της σεισμικής δράσης σχεδιασμού για την ανάλυση της κατασκευής καθορίζεται με βάση διάφορα οικονομικοκοινωνικά κριτήρια, όπως είναι η σπουδαιότητα του κτιρίου, οι επιπτώσεις από ενδεχόμενη διακοπή της λειτουργίας του και οι διαθέσιμοι οικονομικοί πόροι για την ενίσχυσή του. Για τον υπολογισμό της σεισμικής δράσης χρησιμοποιούνται είτε φάσματα σχεδιασμού, είτε χρονοϊστορίες επιταχύνσεων .

Ανάλογα με την επιλεγείσα στάθμη επιτελεστικότητας και θεωρώντας ότι η συμβατική διάρκεια ζωής μίας κατασκευής είναι 50 έτη, η σεισμική δράση σχεδιασμού μπορεί να έχει πιθανότητα υπέρβασης είτε 10% στα 50 έτη είτε 50% στα 50 έτη. Η πρώτη πιθανότητα υπέρβασης αντιστοιχεί σε περίοδο επαναφοράς 475 έτη, ενώ η δεύτερη σε περίοδο επαναφοράς 72 έτη. Για κατασκευές ιδιαίτερης σπουδαιότητας, ως σεισμός σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί και δράση με πιθανότητα υπέρβασης 5% στα 50 χρόνια. Πρέπει να σημειωθεί ότι οι σεισμικές δράσεις που υπολογίζονται με βάση τον ισχύοντα αντισεισμικό κανονισμό με τη βοήθεια φασμάτων απόκρισης σε όρους επιτάχυνσης αντιστοιχούν σε πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 έτη .

Οι σεισμικές δράσεις για πιθανότητα υπέρβασης 50% στα 50 έτη προσδιορίζονται με χρήση κάποιας από τις επιστημονικά αποδεκτές μεθόδους της σεισμολογίας. Απλοποιητικά μπορούν να λαμβάνονται ίσες με το 50% αυτών που αντιστοιχούν σε πιθανότητα υπέρβασης 10% στα 50 έτη. Πριν την επιλογή των κριτηρίων επιτελεστικότητας είναι απαραίτητο να γίνει ο διαχωρισμός των στοιχείων της κατασκευής που φορτίζονται λόγω των μετακινήσεων που επιβάλλονται στην κατασκευή από τα σεισμικά φορτία σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα. Ως πρωτεύοντα χαρακτηρίζονται τα στοιχεία και οι φορείς που συμβάλλουν ουσιαστικά στην αντοχή του κτιρίου έναντι κατάρρευσης υπό σεισμική δράση λόγω κίνησης του εδάφους σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Πρωτεύοντα στοιχεία είναι τα υποστυλώματα, τα τοιχώματα, κτλ. Όλα τα υπόλοιπα στοιχεία, όπως π.χ. οι τοίχοι πλήρωσης κτλ., χαρακτηρίζονται ως δευτερεύοντα . [6]

Ο χαρακτηρισμός ενός στοιχείου ως δευτερεύοντος αποδίδεται σε στοιχεία των οποίων η συνεισφορά στην ανάληψη των σεισμικών δράσεων, είτε δεν είναι σημαντική, είτε δεν μπορεί να καθοριστεί με βεβαιότητα λόγω χαμηλής δυσκαμψίας, αντοχής ή πλαστιμότητας. Ο διαχωρισμός των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα επιτρέπει στο μηχανικό να διακρίνει τη συμπεριφορά των στοιχείων που είναι κρίσιμα για την αποφυγή της κατάρρευσης λόγω σεισμού, από τη συμπεριφορά αυτών που δεν είναι κρίσιμα. Για μία δεδομένη στάθμη επιτελεστικότητας, οι περιορισμοί που ισχύουν για τα πρωτεύοντα στοιχεία όσον αφορά στα μεγέθη πλαστικής στροφής και απομένουσας αντοχής, είναι πολύ αυστηρότεροι από αυτούς που ισχύουν για τα δευτερεύοντα, τα οποία επιτρέπεται να υποστούν μεγαλύτερες παραμορφώσεις και βλάβες .

## 2.2. Καθορισμός επιπέδου σεισμικής δράσης

Το επίπεδο της σεισμικής δράσης που θα ληφθεί υπόψη κατά τον καθορισμό των στόχων της σεισμικής ικανότητας μιας κατασκευής καθορίζεται από την εκάστοτε επιλεγείσα ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης κάποιας εδαφικής παραμέτρου (συνήθως της εδαφικής επιτάχυνσης στην διάρκεια ζωής της κατασκευής) . Για τον σκοπό αυτό συνήθως συντάσσεται μια μελέτη σεισμικής επικινδυνότητας με την οποία θα καθορίσουμε την μέγιστη αναμενόμενη επιτάχυνση του εδάφους σε αναλογία με την περίοδο επανάληψης του σεισμού.[2]

$$\text{Ισχύει } T_E = \frac{-\Delta t}{\ln(1-p)} \quad \text{ή σε συχνότητα } V = \frac{1}{T}$$

Όπου  $\Delta t$  = διάρκεια ζωής του έργου

$p$  = πιθανότητα υπέρβασης

Στο διάγραμμα 2.2 βλέπουμε μια τυπική πιθανολογική καμπύλη η οποία μας δείχνει για συγκεκριμένη περίοδο επανάληψης την επιτάχυνση του έργου.

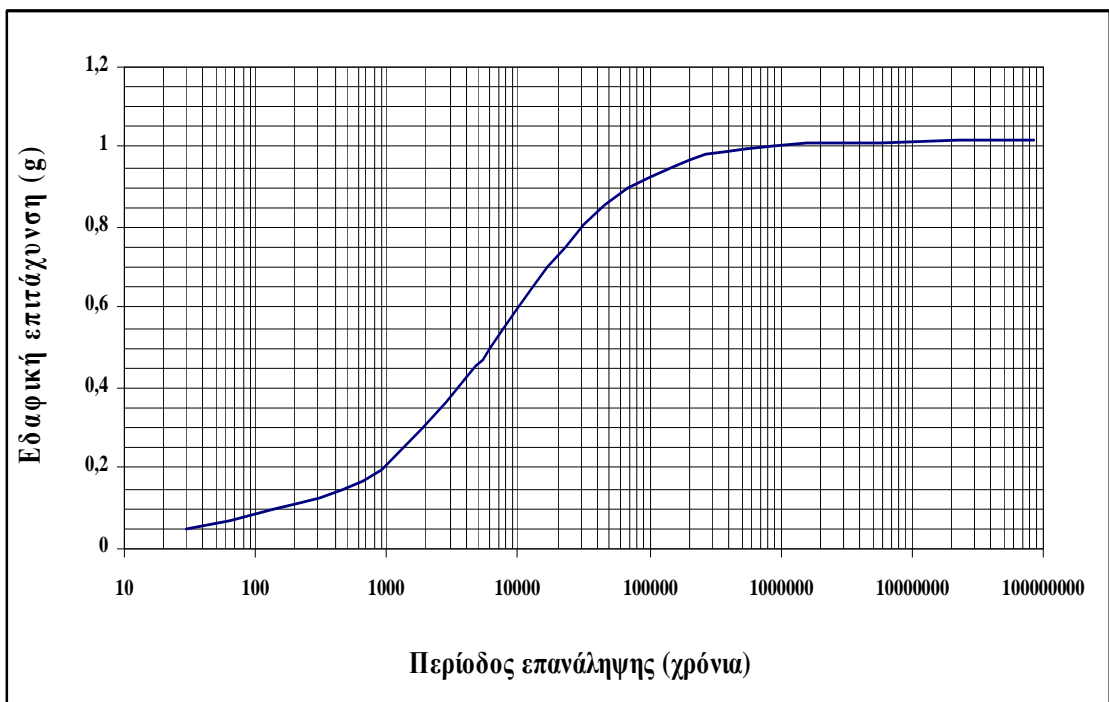
Σαν σεισμική επικινδυνότητα (μιας θέσης) , μπορούμε να ορίσουμε την πιθανότητα να ξεπεράσει κάποια εδαφική παράμετρος, (συνήθως η εδαφική επιτάχυνση) μέσα σε δεδομένο χρονικό διάστημα, κάποια δεδομένη τιμή. Η ανάλυση της σεισμικής επικινδυνότητας συνεκτιμά τα σεισμοτεκτονικά στοιχεία του περιβάλλοντος χώρου για να αποδώσει ποσοτικά πόσο εκτεθειμένη είναι μια θέση σε σεισμούς.

Η ποσοτική απόδοση γίνεται ως προς τις παραμέτρους αντισεισμικού σχεδιασμού του συγκεκριμένου έργου. Το αναμενόμενο τελικό αποτέλεσμα της επίδρασης των σεισμικών κυμάτων σε μια θέση είναι ο σεισμικός κίνδυνος και εξαρτάται τόσο από τη σεισμική επικινδυνότητα της θέσης όσο και από την τρωτότητα των κατασκευών.

Η εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας είναι μια πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες , οι κυριότεροι από τους οποίους είναι α) η σεισμικότητα της περιοχής , β) η επίδραση του μέσου διάδοσης από τη θέση της σεισμικής ενέργειας στη θέση ενδιαφέροντος και γ) η επίδραση των τοπικών συνθηκών[3]. Γενικά , η πιθανολογική εκτίμηση της σεισμικής επικινδυνότητας σε μια θέση με παράμετρο τις μέγιστες τιμές της εδαφικής κίνησης μπορεί να χωριστεί σε τέσσερα στάδια :

- Καθορισμός των σεισμικών πηγών
- Εύρεση του στατιστικού μοντέλου που περιγράφει τις σεισμικές πηγές και καθορισμός των μέγιστων αναμενόμενων ανά σεισμική πηγή μεγεθών.
- Εκλογή του κατάλληλου νόμου απόσβεσης των σεισμικών πηγών .
- Υπολογισμός της πιθανότητας να μην γίνει υπέρβαση κάποιας τιμής των εδαφικών παραμέτρων χρησιμοποιώντας κατάλληλο πιθανολογικό μοντέλο και το θεώρημα της ολικής πιθανότητας .

Το αποτέλεσμα μιας μελέτης σεισμικής επικινδυνότητας δεν αναφέρεται στις αναμενόμενες πιθανές κινήσεις από κάποιο συγκεκριμένο ρήγμα ή ρηξιγενή ζώνη , αλλά περιλαμβάνει όλες τις πιθανές περιπτώσεις που συντελούν στο να ξεπεράσει ή όχι η εδαφική κίνηση στη θέση ενδιαφέροντος κάποια τιμή με ορισμένη πιθανότητα, έχει δηλαδή έναν έντονο στοχαστικό χαρακτήρα .



Σχ. 2.2 : Τυπική Πιθανολογική καμπύλη

### 2.3. Περιγραφή σταθμών επιτελεστικότητας

Οι στάθμες επιτελεστικότητας όπως διατυπώνονται σε συνήθως στους κανονισμούς με μικροδιαφορές είναι οι εξής[1] :

#### *A. Άμεση χρήση μετά το σεισμό (Immediate occupancy)*

Όσον αφορά στο φέροντα οργανισμό (στάθμη A), το επίπεδο βλαβών είναι τέτοιο ώστε καμμία λειτουργία να μη διακόπτεται κατά τη διάρκεια του σεισμού ή μετά από αυτόν, εκτός ενδεχομένως από δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επιτρέπονται μόνο μερικές αραιές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα, οι οποίες δεν επηρεάζουν την ικανότητα της κατασκευής να φέρει τα κατακόρυφα και τα οριζόντια φορτία, στον ίδιο βαθμό, όπως και πριν το σεισμό. Επίσης, ο κίνδυνος τραυματισμού ατόμων από τις βλάβες είναι πρακτικά αμελητέος.

Όσον αφορά στα μη-φέροντα στοιχεία (στάθμη α), επιτρέπονται μικρές μόνο βλάβες, οι οποίες δεν επηρεάζουν τις βασικές λειτουργίες. Οι προσβάσεις και τα συστήματα ασφαλείας (π.χ. κλιμακοστάσια, πόρτες, ανελκυστήρες, συστήματα πυρασφάλειας, γεννήτριες κλπ) πρέπει να παραμείνουν σε λειτουργία, εκτός εάν υπάρχει γενική διακοπή ηλεκτροδότησης στην περιοχή, η οποία τα επηρεάζει.

Στον Ευρωκώδικα 8[9] – Μέρος 3, ως πρώτη στάθμη επιτελεστικότητας χρησιμοποιείται η Οριακή κατάσταση περιορισμού βλαβών (Limit state of damage limitation), η οποία δεν ταυτίζεται ακριβώς με τη στάθμη Άμεση χρήση, αλλά αναφέρεται σε λίγο μεγαλύτερες βλάβες. Για το σχεδιασμό συνήθων κατασκευών, η στάθμη Άμεση χρήση συνδυάζεται με σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 72 χρόνια (50% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια) ενώ η στάθμη Περιορισμού βλαβών με σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 225 χρόνια (20% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια).

Στον Πίνακα 2.2[1] δίνεται μία ενδεικτική περιγραφή των αναμενόμενων βλαβών στα βασικά στοιχεία ενός κτηρίου από Ω.Σ. για τις στάθμες επιτελεστικότητας Άμεση χρήση και Περιορισμός βλαβών.

### *B. Προστασία ζωής (Life safety)*

Όσον αφορά στο φέροντα οργανισμό (στάθμη Β), αναμένεται να εμφανιστούν βλάβες, οι οποίες είναι επισκευάσιμες και δεν αποτελούν αιτία απώλειας της στατικής ευστάθειας της κατασκευής ή σοβαρού τραυματισμού ατόμων (μικροί τραυματισμοί, οι οποίοι όμως δεν αποτελούν κίνδυνο απώλειας ζωής, μπορεί να συμβούν) ή σημαντικών ζημιών σε αντικείμενα που βρίσκονται στην κατασκευή. Για τη επανάχρηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτείται να επισκευαστούν οι βλάβες.

Όσον αφορά στα μη-φέροντα στοιχεία (στάθμη β), αναμένονται βλάβες, οι οποίες όμως δεν αποτελούν κίνδυνο για άτομα εντός ή εκτός της κατασκευής, είτε λόγω πτώσης αντικειμένων είτε λόγω δευτερογενών αιτιών, όπως διαφυγή τοξικών ουσιών, αστοχία συστημάτων υψηλής πίεσης, κίνδυνος πρόκλησης πυρκαϊάς, κλπ. Η στάθμη αυτή στον Ευρωκώδικα 8[9] – Μέρος 3 αναφέρεται ως Οριακή κατάσταση σημαντικών βλαβών (Limit state of significant damage). Στον Πίνακα 2.2[1] δίνεται μία ενδεικτική περιγραφή των αναμενόμενων βλαβών στα βασικά στοιχεία ενός κτηρίου από Ω.Σ. για τη στάθμη επιτελεστικότητας Προστασία ζωής.

### *Γ. Οιονεί κατάρρευση (Structural stability)*

Όσον αφορά στο φέροντα οργανισμό (στάθμη Γ), αναμένεται να εμφανιστούν εκτεταμένες, μη-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα βλάβες. Ο φέρων οργανισμός έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα κατακόρυφα φορτία, αλλά η οριζόντια δυσκαμψία και η ικανότητα αντίστασης σε οριζόντια φορτία έχουν μειωθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα η κατασκευή να μη διαθέτει άλλα περιθώρια ασφάλειας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης. Ο κίνδυνος σοβαρού τραυματισμού ατόμων από πτώσεις στοιχείων της κατασκευής είναι μεγάλος, εντός και εκτός αυτής. Για τη επανάχρηση της κατασκευής μετά το σεισμό απαιτούνται εκτεταμένες επιδιορθώσεις, ενώ είναι πιθανόν να μην είναι τεχνικά ή οικονομικά δυνατή η επισκευή της.

Όσον αφορά στα μη-φέροντα στοιχεία (στάθμη γ), αναμένονται σημαντικές βλάβες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και την πτώση τους. Εξαιρέση αποτελούν τα υψηλού κινδύνου μη-φέροντα στοιχεία και προσαρτήματα, τα οποία πρέπει να είναι καλά στερεωμένα, ώστε να μην υπάρχει κίνδυνος πτώσης τους σε χώρους συνάθροισης κοινού. Η στάθμη αυτή στον Ευρωκώδικα 8[9] – Μέρος 3 αναφέρεται επίσης ως Οριακή κατάσταση οιονεί κατάρρευσης .

Στον Πίνακα 2.2 [1] δίνεται μία ενδεικτική περιγραφή των αναμενόμενων βλαβών στα βασικά στοιχεία ενός κτηρίου από Ω.Σ. γι' αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας.

Πίνακας 2.2 : Ενδεικτική περιγραφή αναμενόμενων βλαβών σε κτήρια από Ω.Σ.  
για διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας (πηγή: ATC-40[5])

Στοιχείο	Άμεση χρήση	Περιορισμός βλαβών	Προστασία ζωής	Οιονεί κατάρρευση
Υποστυλώματα	<p>Πολύ περιορισμένες καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις χωρίς αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης.</p> <p>Καμμία μόνιμη οριζόντια παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p>	<p>Περιορισμένες καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις χωρίς ή πολύ μικρή αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης.</p> <p>Καμμία μόνιμη οριζόντια παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p>	<p>Πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στο κατώτερο τμήμα του κτηρίου που προκαλούν αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης πάνω και κάτω από τους κόμβους.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 2.0%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p>	<p>Πλαστικές αρθρώσεις σχηματίζονται στο κατώτερο τμήμα του κτηρίου που προκαλούν σημαντική αποκόλληση του σκυροδέματος επικάλυψης πάνω και κάτω από τους κόμβους και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στο εσωτερικό των κόμβων.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 3.5%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων διατηρείται σχεδόν σε όλα τα υποστυλώματα της κατασκευής.</p>
Τοιχώματα	<p>Ασήμαντες διατμητικές ρηγματώσεις στο επίπεδο του τοιχώματος. Καθόλου ή πολύ μικρές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Καμμία μόνιμη παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p>	<p>Ελάχιστες διατμητικές ρηγματώσεις στο επίπεδο του τοιχώματος. Καθόλου ή πολύ μικρές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Καμμία μόνιμη παραμόρφωση.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p>	<p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης και διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις στη βάση του τοιχώματος. Ενδείξεις αστοχιών λόγω διατμητικής ολίσθησης.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 2.0%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.</p>	<p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης και διατμητικές και καμπτικές ρηγματώσεις σε όλο το ύψος του τοιχώματος και ειδικά στις περιοχές με τη μεγαλύτερη μόνιμη παραμόρφωση. Ενδείξεις λυγισμού διαμήκων ράβδων οπλισμού. Ενδείξεις αστοχιών λόγω διατμητικής ολίσθησης στις θέσεις των αρμών σκυροδέτησης και στη βάση του τοιχώματος.</p> <p>Δημιουργούνται μόνιμες οριζόντιες παραμορφώσεις που αντιστοιχούν σε οριζόντια παραμόρφωση ορόφου (interstory drift) 3.5%, που μπορεί να είναι και οριακά μεγαλύτερες σε ορισμένες περιοχές.</p> <p>Η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων διατηρείται σχεδόν σε όλα τα τοιχώματα της κατασκευής.</p>
Δοκοί	<p>Πολύ περιορισμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης γύρω από τους κόμβους. Πολύ περιορισμένες καμπτικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων.</p>	<p>Περιορισμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης γύρω από τους κόμβους. Περιορισμένες καμπτικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων.</p>	<p>Αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης στους κόμβους και τις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων.</p> <p>Καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων, που επεκτείνονται και μέσα</p>	<p>Εκτεταμένες αποκολλήσεις του σκυροδέματος επικάλυψης στους κόμβους και τις περιοχές πλαστικών αρθρώσεων. Εκτεταμένες καμπτικές και διατμητικές ρηγματώσεις στις περιοχές των πλαστικών αρθρώσεων, που</p>



	Καμμία μόνιμη παραμόρφωση. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.	Καμμία μόνιμη παραμόρφωση. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.	στους κόμβους. Επιμήκυνση των συνδετήρων κοντά στους κόμβους. Μόνιμες κατακόρυφες παραμορφώσεις της τάξης του $L/175$ . Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.	επεκτείνονται και μέσα στους κόμβους. Θραύση των συνδετήρων κοντά στους κόμβους. Μόνιμες κατακόρυφες παραμορφώσεις της τάξης του $L/75$ . Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.
Πλάκες	Πολύ περιορισμένες ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.	Περιορισμένες ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.	Ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Διατηρείται η ικανότητα παραλαβής των κατακορύφων φορτίων.	Εκτεταμένες ρηγματώσεις κοντά στις στηρίξεις. Αποκολλήσεις τμημάτων σκυροδέματος μεταξύ των οπλισμών. Κατακόρυφες παραμορφώσεις κοντά στις στηρίξεις της τάξης του $d/4$ ( $d$ =πάχος πλάκας). Όχι κατάρρευση της πλάκας.
Θεμελιώσεις	Καμμία ένδειξη διαφορικής καθίζησης μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων	Καμμία ένδειξη διαφορικής καθίζησης μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων	Διαφορικές καθιζήσεις της τάξης του $L/150$ μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων	Διαφορικές καθιζήσεις της τάξης του $L/60$ μεταξύ γειτονικών υποστρωμάτων
Μη-φέροντα στοιχεία	Δεν υπάρχουν θραύσεις εξωτερικών υαλοπινάκων. Όλες οι πόρτες (εσωτερικές και εξωτερικές) παραμένουν σε λειτουργία. Πολύ περιορισμένες ζημιές σε ψευδοροφές και φωτιστικά σώματα χωρίς καταπτώσεις. Ελάχιστα έπιπλα ανατρέπονται. Πολύ περιορισμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα και επικαλύψεις κλιμάκων. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός παραμένουν σε λειτουργία. Πολύ περιορισμένες βλάβες σε σοφίτες.	Πολύ περιορισμένες θραύσεις εξωτερικών υαλοπινάκων. Όλες οι πόρτες (εσωτερικές και εξωτερικές) παραμένουν σε λειτουργία. Πολύ περιορισμένες ζημιές σε ψευδοροφές και φωτιστικά σώματα χωρίς καταπτώσεις. Μεμονωμένες ανατροπές επίπλων. Περιορισμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα και επικαλύψεις κλιμάκων. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός παραμένουν σε λειτουργία. Περιορισμένες βλάβες σε σοφίτες.	Μερικές θραύσεις υαλοπινάκων. Οι περισσότερες εξωτερικές πόρτες παραμένουν σε λειτουργία, αλλά μερικές εσωτερικές πόρτες μπλοκάρουν. Μερικές ψευδοροφές καταρρέουν και φωτιστικά σώματα καταστρέφονται. Ανατροπές επίπλων. Εκτεταμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα και περιορισμένες ανατροπές. Εκτεταμένες ρηγματώσεις των τοίχων που περικλείουν το κλιμακοστάσιο. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός τίθενται εκτός λειτουργίας. Εκτεταμένες βλάβες σε σοφίτες.	Οι περισσότεροι υαλοπίνακες θραύονται. Οι εξωτερικές και εσωτερικές πόρτες μπλοκάρουν. Οι περισσότερες ψευδοροφές και φωτιστικά σώματα καταρρέουν. Ανατροπές επίπλων. Εκτεταμένες ρηγματώσεις σε εσωτερικά χωρίσματα που ανατρέπονται μερικώς. Εκτεταμένες ρηγματώσεις των τοίχων που περικλείουν το κλιμακοστάσιο. Οι ανελκυστήρες και ο υπόλοιπος μηχανολογικός εξοπλισμός τίθενται εκτός λειτουργίας. Μερική κατάρρευση σε σοφίτες.

#### 2.4. Οι στάθμες επιτελεστικότητας όπως διατυπώνονται στην F.E.MA[8] :

1. Η “λειτουργικότητα κατά τον σεισμό” (operational), δηλαδή μετά το πέρας του σεισμού γίνεται κανονικά η κατοίκηση του κτιρίου .
2. Η “άμεση χρήση” (immediate occupancy) της κατασκευής μετά από προσωρινή διακοπή.
3. Η αποφυγή βλαβών που θα έθεταν έστω και μια ανθρώπινη ζωή σε κίνδυνο, δηλαδή η στάθμη “προστασία ζωής” (life safety)
4. Η “αποφυγή κατάρρευσης” (collapse prevention), όπου το κτίριο έχει υποστεί πάρα πολύ έντονες βλάβες, (χωρίς να καταρρεύσει), και πιθανώς είναι οικονομικά ασύμφορη η επισκευή του.

##### *Λειτουργικότητα κατά τον σεισμό*

Ο φέρον οργανισμός παρουσιάζει πολύ μικρές βλάβες, (σχεδόν ασήμαντες), με πολύ λεπτές ρωγμές. Ο φορέας συμπεριφέρεται σχεδόν ελαστικά, δεν προκαλείται διαρροή των μελών και δεν προκαλούνται μόνιμες παραμορφώσεις. Οι βλάβες στον μη φέροντα οργανισμό εντοπίζονται σε ελαφρά ρηγμάτωση των επιχρισμάτων και των τοιχοπληρώσεων με σχετικά μικρό κόστος επισκευής. Η χρήση του κτιρίου συνεχίζεται κανονικά μετά το πέρας του σεισμού με σχεδόν καμία βλάβη.

##### *Άμεση χρήση*

Ο φέρον οργανισμός παρουσιάζει ελαφριές βλάβες, με τοπική διαρροή σε πολύ λίγα δομικά στοιχεία, δεν εμφανίζονται φαινόμενα λυγισμού ενώ οι παραμένουσες παραμορφώσεις δεν είναι αισθητές. Οι βλάβες στον μη φέροντα οργανισμό εμφανίζονται ως αποκολλήσεις των τοιχοπληρώσεων από το δομικό σύστημα, τοπικές αποκολλήσεις επιστρώσεων και επιχρισμάτων, μετακίνηση ή πτώση ψευδοροφών, θραύση υαλοπινάκων με σημαντικό κόστος επισκευής. Η χρήση του κτιρίου διακόπτεται προσωρινά μέχρι να επισκευασθούν οι βλάβες, οι οποίες μπορούν να γίνουν σε σύντομο χρονικό διάστημα.

### *Προστασία ζωής*

Ο φέρον οργανισμός έχει υποστεί σοβαρές βλάβες με αισθητές παραμένουσες παραμορφώσεις, υπάρχει όμως σημαντικό περιθώριο ασφαλείας έναντι μερικής ή ολικής κατάρρευσής του, δηλαδή τα κατακόρυφα φορτία μπορούν να μεταφερθούν μέσω της παραμένουσας αντοχής. Υφίσταται ο σχηματισμός πλαστικών αρθρώσεων, εμφανίζονται φαινόμενα τοπικού λυγισμού σε μερικές δοκούς, μερικά στοιχεία μπορεί να παρουσιάσουν τοπική θραύση, διάσπαρτοι κόμβοι παρουσιάζουν έντονες παραμορφώσεις ενώ οι διατμητικές συνδέσεις παραμένουν άθικτες. Οι βλάβες στο μη φέροντα οργανισμό εμφανίζονται ως εκτεταμένες ρωγμές και τοπική αστοχία σε θλίψη των τοιχοπληρώσεων χωρίς ωστόσο να αστοχούν σε κάμψη εκτός επιπέδου, δεν προκαλείται η ανατροπή αυτών ή των στηθαίων που θα εγκυμονούσε κίνδυνο ανθρώπινων ζωών, οι επικαλύψεις οι ψευδοροφές και τα επιχρίσματα παρουσιάζουν εκτεταμένες αποκολλήσεις ενώ θραύεται μεγάλο ποσοστό των υαλοστασίων. Η βλάβες είναι μεν σοβαρές άλλα πιθανόν επισκευάσιμες, αν όμως το κόστος επισκευής κριθεί απαγορευτικό προτιμάται η κατεδάφιση της κατασκευής.

### *Αποφυγή κατάρρευσης*

Το σύνολο της κατασκευής έχει υποστεί πολύ σοβαρές βλάβες και έντονες παραμένουσες παραμορφώσεις, αλλά το κτίριο μπορεί να μεταφέρει τα κατακόρυφα φορτία έστω και με πολύ μικρό περιθώριο ασφάλειας. Το κτίριο βρίσκεται σε οριακή κατάσταση έναντι κατάρρευσης και είναι πιθανό να συμβεί σε κάποιον μετασεισμό, ενώ είναι πιθανή η απώλεια ζωής από ανατροπή μη φερόντων στοιχείων όπως τοίχοι στηθαία κτλ. Ο φέρον οργανισμός εμφανίζει εκτεταμένες παραμορφώσεις των δοκών και υποστυλωμάτων, πολλές αστοχίες στις καμπτικές συνδέσεις ενώ παραμένουν άθικτες οι διατμητικές. Οι βλάβες στον μη φέροντα οργανισμό είναι πολύ έντονες. Στις τοιχοπληρώσεις εμφανίζονται διαμπερείς ρωγμές και τοπική αστοχία που μπορεί να οδηγήσει μέχρι την ανατροπή τους, οι επικαλύψεις, τα επιχρίσματα και οι ψευδοροφές έχουν αποκολληθεί σχεδόν στο σύνολο τους. Γενικά το κτίριο δεν θεωρείται επισκευάσιμο και θεωρείται πολύ πιθανή η κατεδάφισή του. Στον πίνακα 2 δίδεται η μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του λόγου σχετικής μετακίνησης ορόφου προς το ύψος του, για κάθε στάθμη επιτελεστικότητας σύμφωνα με την F E M A [8].

Πίνακας 2.3: Μέγιστο επιτρεπτό I.D.R. σύμφωνα με την F.E.M.A.

	$d/h$		
	Άμεση χρήση	Προστασία ζωής	Αποφυγή κατάρρευσης
Προσωρινό	0,7%	2,5%	5%
Μόνιμο	Αμελητέο	1%	5%

Ενδεικτικώς αναφέρονται τα εξής επίπεδα επίδοσης του κτιρίου [FEMA (1997), FEMA (2000)]:

OP : Ανεπηρέαστη συνέχιση λειτουργίας (Operational): (Σχεδόν) μηδενικές βλάβες.

IO : Άμεση χρήση μετά το σεισμό (Immediate Occupancy): Πολύ περιορισμένες βλάβες.

LS: Προστασία ζωής (Life Safety): Σημαντικές βλάβες στα φέροντα στοιχεία, αλλά υπάρχει αρκετή απόσταση από την μερική ή ολική κατάρρευση.

CP: Πρόληψη κατάρρευσης (Collapse Prevention): Εκτεταμένες σοβαρές βλάβες. Το κτίριο βρίσκεται στα πρόθυρα της κατάρρευσης, δυνάμενο να φέρει μόνο τα κατακόρυφα φορτία όχι όμως και οριζόντια.

Οι οριακές αυτές καταστάσεις βλαβών (επίπεδα επίδοσης) ορίζονται περιγραφικά με την μεγαλύτερη δυνατή λεπτομέρεια, τόσο για τα φέροντα όσο και για τα μη φέροντα στοιχεία, ενώ η επίτευξή τους ελέγχεται ποσοτικά με μεθόδους υπολογισμού και αντίστοιχα κριτήρια αποδοχής. Οι παραπάνω επιδόσεις θα πρέπει να επιτευχθούν για συγκεκριμένο επίπεδο σεισμικού κινδύνου (σεισμό σχεδιασμού). Π.χ., αν δεχθούμε δύο επίπεδα σεισμικού κινδύνου (Σεισμός-1 και Σεισμός-2 ) ως ακολούθως :

Επίπεδο σεισμικού κινδύνου .....	Σεισμός 1	Σεισμός 2
Πιθανότητα υπέρβασης σε 50 χρόνια.....	10%	2%
Μέση περίοδος επανάληψης (σε χρόνια) .....	474	2475
προκύπτει το ακόλουθο μητρώο στόχων σχεδιασμού της κατασκευής:		

<i>Επίπεδο σεισμού</i>	<i>Επίπεδο επίδοσης κτιρίου</i>			
	<i>OP</i>	<i>IO</i>	<i>LS</i>	<i>CP</i>
<i>Σεισμός-1</i>	i	j	k	l
<i>Σεισμός-2</i>	m	n	o	p

Ο δίδυμος στόχος k+p μπορεί να θεωρηθεί ως βασικός στόχος ασφάλειας που θα πρέπει να ικανοποιείται σε κάθε περίπτωση. Με τον βασικό αυτόν στόχο καλύπτεται η παραδοσιακή απαίτηση ασφάλειας, όπως ενσωματώνεται στους ισχύοντες αντισεισμικούς κανονισμούς : (α) ασήμαντες βλάβες για συχνούς ασθενείς σεισμούς, (β) επισκευάσιμες βλάβες για τον σπανιότερο ισχυρό σεισμό 1 και (γ) πρόληψη κατάρρευσης για τον πολύ σπάνιο ισχυρότατο σεισμό 2. Με τους άλλους, διευρυμένους (δηλαδή απαιτητικότερους) στόχους, π.χ. m ή n, καλύπτονται απαιτήσεις είτε ειδικών κτιρίων (σχολεία, νοσοκομεία, σταθμοί, κλπ), είτε επιπλέον απαιτήσεις του ιδιοκτήτη του έργου.

## 2.5. Οι στάθμες επιτελεστικότητας όπως διατυπώνονται στον ΚΑΝΕΠΕ [4] :

### *Στάθμες επιτελεστικότητας Φέροντος οργανισμού*

α. «Σχεδόν πλήρης λειτουργικότητα κατά το σεισμό» είναι μια κατάσταση κατά την οποία αναμένεται ότι καμιά λειτουργία του κτιρίου δεν διακόπτεται κατά τη διάρκεια και μετά το σεισμό σχεδιασμού, εκτός ενδεχομένως από σπάνιες δευτερεύουσας σημασίας λειτουργίες. Είναι ενδεχόμενο να παρουσιασθούν μερικές πολύ αραιές τριχοειδείς ρωγμές καμπτικού χαρακτήρα στον φέροντα οργανισμό.

β. «Προστασία ζωής και περιουσίας των ενοίκων» είναι μια κατάσταση κατά την οποία κατά το σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό του κτιρίου, χωρίς όμως να συμβεί θάνατος ή τραυματισμός ατόμων εξαιτίας των βλαβών αυτών, και χωρίς να συμβούν ουσιώδεις φθορές στην οικοσκευή ή τα αποθηκευόμενα στο κτίριο υλικά.

γ. «Οιονεί κατάρρευση» είναι μια κατάσταση κατά την οποία κατά το σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιασθούν εκτεταμένες σοβαρές (μή-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες στον φέροντα οργανισμό, ο οποίος όμως έχει ακόμη την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (κατά, και για ένα διάστημα μετά, το σεισμό), χωρίς πάντως να διαθέτει άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφαλείας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης.

### *Στάθμες επιτελεστικότητας Μή-Φέροντος οργανισμού*

α. «Σχεδόν πλήρης λειτουργικότητα κατά το σεισμό» είναι μια κατάσταση κατά την οποία τα μή-φέροντα στοιχεία και οι εγκαταστάσεις του κτιρίου επιτρέπουν τη διατήρηση όλων των πρό του σεισμού λειτουργιών.

β. «Άμεση χρήση μετά το σεισμό» είναι μια κατάσταση η οποία χαρακτηρίζεται από εμφάνιση βλαβών σε μή-φέροντα στοιχεία, αλλά οι προσβάσεις και τα συστήματα ασφαλείας (συμπεριλαμβανομένων των θυρών, κλιμακοστασίων, ανελκυστήρων, τυχόν γεννητριών, συστημάτων πυρασφάλειας κλπ.) εν γένει παραμένουν λειτουργικά, εφόσον δεν έχει διακοπεί η ηλεκτροδότηση στην περιοχή.

γ. «Προστασία ζωής και περιουσίας των ενοίκων» είναι μια κατάσταση η οποία χαρακτηρίζεται από εμφάνιση βλαβών στα μή- φέροντα στοιχεία, αλλά ο βαθμός τους είναι τέτοιος ώστε να μη προκύπτουν κίνδυνοι για τους εισερχόμενους στο κτίριο.

δ. «Οιονεί κατάρρευση» είναι μια κατάσταση η οποία χαρακτηρίζεται από εμφάνιση τέτοιων βλαβών στα μή-φέροντα στοιχεία οι οποίες μπορεί να προκαλέσουν πτώση τους, αλλά τα υψηλού κινδύνου (βλ. και ΕΑΚ, παρ. 4.2.3) μή-φέροντα στοιχεία και προσαρτήματα είναι καταλλήλως στερεωμένα, και δεν υπάρχει κίνδυνος πτώσης τους σε χώρους συνάθροισης του κοινού. Γι' αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας δεν τίθεται ζήτημα διατήρησης προσβάσεων, προστασίας των συστημάτων πυρασφάλειας κλπ.

*Συνδυασμοί στόχων αποτίμησης ή ανασχεδιασμού Φέροντος και Μή-Φέροντος οργανισμού*

α. Για την αποτίμηση και τον ανασχεδιασμό υφισταμένων κτιρίων συνήθους σπουδαιότητας, είναι δυνατή η θεώρηση ενός από τους «στόχους αποτίμησης ή ανασχεδιασμού» του Πίν. 2.4,[4] δηλαδή συνδυασμού ενός στόχου αποτίμησης ή ανασχεδιασμού του Φέροντος οργανισμού και ενός στόχου αποτίμησης ή ανασχεδιασμού του Μή-Φέροντος οργανισμού

β. Για την αποτίμηση ή τον ανασχεδιασμό υφισταμένων κτιρίων υψηλής σπουδαιότητας συνιστάται η θεώρηση δύο ταυτοχρόνως στόχων αποτίμησης ή ανασχεδιασμού του Πίν. 2.4, π.χ. Α2 - α2, Β1 - αβ1.

Πίνακας 2.4 : Συνδυασμένοι στόχοι αποτίμησης ή ανασχεδιασμού κτιρίου σύμφωνα με τον ΚΑΝΕΠΕ (i = 1 ή 2)

	Στάθμη επιτελεσματικότητας Φέροντος οργανισμού		
Στάθμη επιτελεσματικότητας Μή-Φέροντος οργανισμού	Σχεδόν πλήρης λειτουργικότητα κατά τον σεισμό	Προστασία ζωής και περιουσίας των ενοίκων	Οιονεί κατάρρευση
Σχεδόν πλήρης λειτουργικότητα κατά τον σεισμό	Σχεδόν πλήρης λειτουργικότητα Αi – αι	(*)	(*)
Άμεση χρήση μετά τον σεισμό	Άμεση χρήση Αi - αβi	Βi - αβi	(*)
Προστασία ζωής και περιουσίας των ενοίκων	Αi - βi	Προστασία ζωής Βi - βi	Γi - βi
Οιονεί κατάρρευση	(*)	Βi - γi	Γi - γi

(\*) δεν επιτρέπεται



## 2.6. Συνδυασμένες στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Η στάθμη επιτελεστικότητας της κατασκευής ορίζεται από το συνδυασμό μιας στάθμης επιτελεστικότητας του φέροντος οργανισμού και μιας στάθμης επιτελεστικότητας των μη-φερόντων στοιχείων.

Ένα παράδειγμα αποδεκτών σταθμών επιτελεστικότητας μιας κατασκευής, σύμφωνα με την ορολογία του Ευρωκώδικα 8 [9]– Μέρος 3, φαίνονται στον Πίνακα 2.5. Ο δείκτης “i” αντιστοιχεί στη συχνότητα εμφάνισης του σεισμού σχεδιασμού. Για παράδειγμα, εάν οι στόχοι σχεδιασμού περιγράφονται όπως στον πίνακα 2.1, τότε ο δείκτης i παίρνει τιμές: i=1,2, 3 (i=1 δηλώνει σεισμό με περίοδο επανάληψης 225 χρόνια, i=2 δηλώνει σεισμό με περίοδο επανάληψης 475 χρόνια, i=3 δηλώνει σεισμό με περίοδο επανάληψης 2475 χρόνια). Με αυτό τον τρόπο προκύπτει ο συνδυασμένος στόχος επιτελεστικότητας της κατασκευής. Για κατασκευές υψηλής σπουδαιότητας, μπορεί να εφαρμόζονται δύο στόχοι, π.χ. B3-β3 και A2- α2 (βλ. πίνακα 2.1).

Πίνακας 2.5 : Συνδυασμένοι στόχοι σεισμικής ικανότητας σύμφωνα με τον EC8

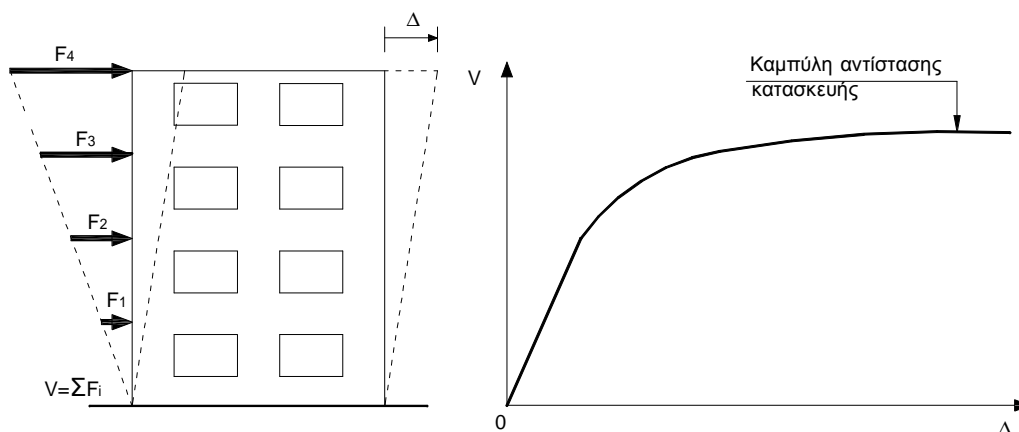
		Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
		Περιορισμός βλαβών (A)	Σημαντικές βλάβες (B)	Οιονεί κατάρρευση (Γ)
Στάθμη επιτελεστικότητας μη-φερόντων στοιχείων	Περιορισμός βλαβών (α)	Ai – αι Συνιστάται για κατασκευές μεγάλης σπουδαιότητας σε συνδυασμό με Bi-βι	Bi - αι	Δεν συνιστάται
	Σημαντικές βλάβες (β)	Ai - βι	Bi – βι Συνιστάται για κατασκευές συνήθους σπουδαιότητας	Γi - βι
	Οιονεί κατάρρευση (γ)	Δεν συνιστάται	Bi - γι	Γi - γι

### 3. ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

#### 3.1. Καμπύλη αντίστασης (capacity curve)

Ο καθορισμός των διάφορων σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται πάνω στην καμπύλη αντίστασης της κατασκευής, η οποία εκφράζει τη μη-γραμμική σχέση μεταξύ του επιβαλλόμενου οριζόντιου φορτίου και της μετατόπισης της κορυφής. Η κατασκευή της καμπύλης αντίστασης γίνεται με υπολογισμό της ανελαστικής μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές του οριζόντιου φορτίου, με δεδομένη κατανομή φορτίων στους ορόφους (Σχ.3.1)[1].

Ως κατανομή των φορτίων καθ' ύψος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τριγωνική κατανομή, η πρώτη ιδιομορφή ή ακόμη και περισσότερο πολύπλοκοι συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών. Για την κατασκευή αυτής της καμπύλης γίνονται πολλές στατικές επιλύσεις, με σταδιακή αύξηση της τέμνουσας βάσης και υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής σε κάθε βήμα (μεθοδολογία pushover), λαμβάνοντας υπόψη τη μειωμένη δυσκαμψία των στοιχείων που έχουν διαρρεύσει.



Σχ.3.1 : Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής.

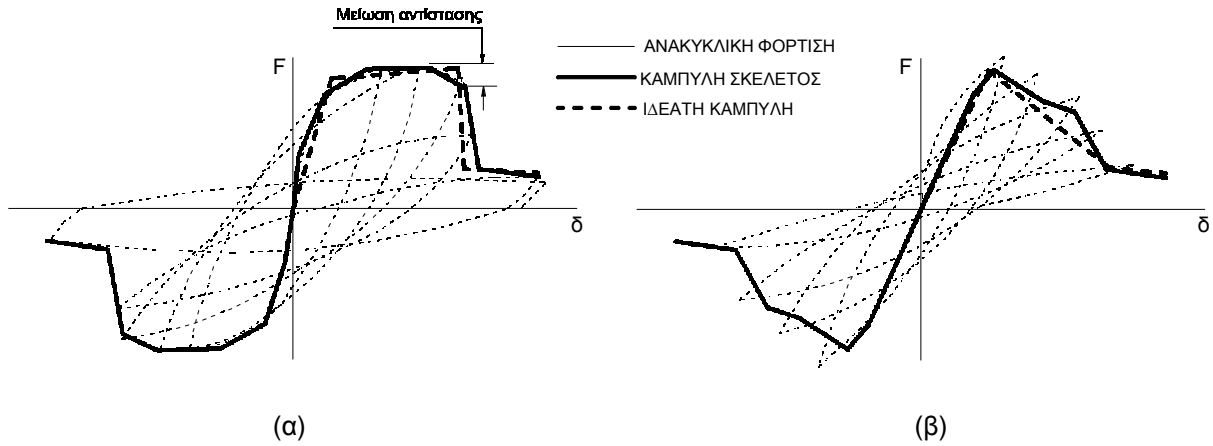
### 3.2. Καμπύλη $F$ - $\delta$ δομικού στοιχείου ή διατομής

Το πρώτο βήμα της παραπάνω διαδικασίας είναι ο καθορισμός των νόμων που διέπουν την ανελαστική συμπεριφορά των μελών της κατασκευής, οι οποίοι περιγράφονται μέσω διαγραμμάτων που σχετίζουν εντατικά μεγέθη, " $F$ ", με παραμορφώσεις ή σχετικές μετακινήσεις, " $\delta$ ". Τα μεγέθη  $F$  μπορούν να είναι δυνάμεις ή ροπές και οι σχετικές μετακινήσεις  $\delta$  παραμορφώσεις, καμπυλότητες, ή στροφές. Εάν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, τότε κατάλληλα μεγέθη  $F$  και  $\delta$  είναι η ροπή κάμψης,  $M$  και η καμπυλότητα,  $C$  (ή  $1/r$ ), αντίστοιχα. Εάν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, τότε κατάλληλα μεγέθη  $F$  και  $\delta$  είναι η διατμητική δύναμη,  $V$  και η διατμητική παραμόρφωση,  $\gamma$ , αντίστοιχα.

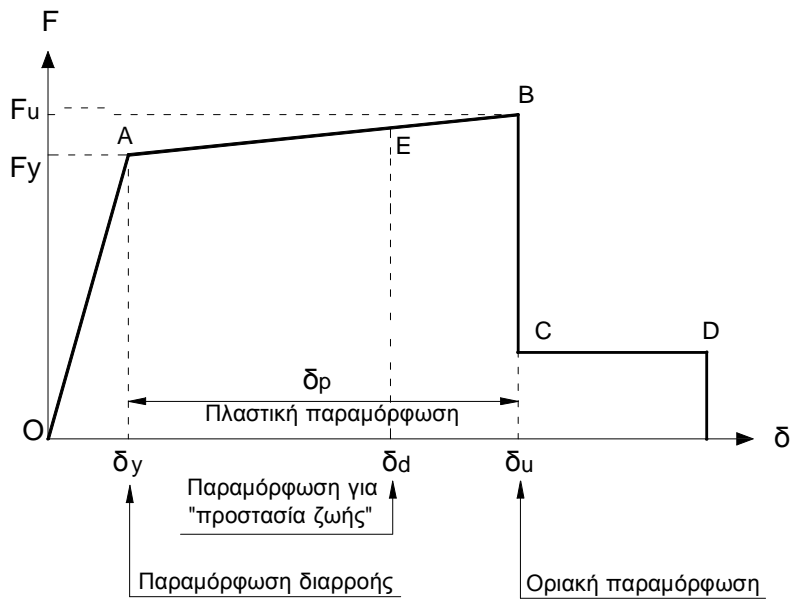
Επειδή στα στοιχεία από Ω.Σ. οι καμπτικές και οι διατμητικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν, ενώ οι στροφές των ακραίων διατομών των στοιχείων επηρεάζονται και από την εξόλκευση των οπλισμών στις αγκυρώσεις, η καταλληλότερη επιλογή  $F$  και  $\delta$  είναι η ροπή κάμψης,  $M$  και η γωνία στροφής χορδής,  $\theta$ , στα άκρα του στοιχείου. Η γωνία  $\theta$  ορίζεται ως η γωνία μεταξύ της εφαπτομένης στον άξονα του στοιχείου στο άκρο υπό διαρροή και της χορδής που συνδέει το άκρο αυτό με το άκρο του ανοίγματος διάτμησης, δηλ. το σημείο μηδενισμού των ροπών. Με άλλα λόγια, η γωνία  $\theta$  ορίζεται ως η γωνία στροφής της χορδής που ενώνει τη βάση με την κορυφή ενός θεωρητικού προβόλου μήκους ίσου με το διατμητικό μήκος  $L_V$ , δηλαδή,  $\theta = \delta_V / L_V$ , όπου:  $L_V = M/V$  ( $M$ =ροπή στη βάση,  $V$ =τέμνουσα) και  $\delta_V$  είναι η μετατόπιση στην κορυφή του θεωρητικού προβόλου.[1]

Η κατασκευή των διαγραμμάτων  $F$ - $\delta$  των στοιχείων έχει συνήθως ιδεατή μορφή, η οποία βασίζεται στην καμπύλη σκελετό της συμπεριφοράς σε ανακυκλική φόρτιση, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2. Στο Σχ. 3.2(α) φαίνεται η ανελαστική συμπεριφορά ενός στοιχείου σε καμπτική καταπόνηση και στο Σχ. 3.2(β) σε διατμητική καταπόνηση.

Η γενική μορφή των διαγραμμάτων  $F-\delta$  λαμβάνεται συνήθως όπως φαίνεται στο Σχ. 3.2.[1] Στους διάφορους κανονισμούς δίνονται οδηγίες υπολογισμού των χαρακτηριστικών σημείων. Γενικώς, οι κλάδοι αυτού του διαγράμματος ορίζονται ως εξής:



Σχ. 3.2 :Καμπύλες  $F-\delta$  δομικών στοιχείων: (α) καμπτική συμπεριφορά, (β) διατμητική συμπεριφορά.



Σχ. 3.3. Ιδεατή καμπύλη  $F-\delta$  δομικών στοιχείων.

Τμήμα ΟΑ:

Αντιπροσωπεύει την ελαστική συμπεριφορά μέχρι το θεωρητικό σημείο διαρροής. Η κλίση της ευθείας ΟΑ ορίζει την τέμνουσα δυσκαμψία που πρέπει να ληφθεί υπόψη στην ελαστική ανάλυση.

Σημειώνεται ότι εάν η παραμόρφωση δίνεται σε όρους στροφής χορδής, η τιμή της  $\delta_y = \theta_y$  πρέπει να υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο την καμπυλότητα διαρροής  $C_y$  ή  $(1/r)_y$  αλλά και τη συμμετοχή των διατμητικών

παραμορφώσεων και της πιθανής ολίσθησης οπλισμού στις αγκυρώσεις. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.[4] και τον Ευρωκώδικα 8 – Τμήμα 3 δίνονται σχέσεις για τον υπολογισμό της  $\theta_y$  για συνήθεις διατομές από Ω.Σ., λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα φαινόμενα.

#### Τμήμα AB:

Αντιπροσωπεύει τη μετελαστική συμπεριφορά του στοιχείου μέχρι τη θεωρητική αστοχία (σημείο B). Το σημείο B καθορίζεται από την οριακή παραμόρφωση αστοχίας,  $\delta_u$ , που ορίζεται ως η παραμόρφωση για την οποία έχει συμβεί ουσιαστική μείωση της αντίστασης. Συνήθως, το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε μείωση της αντίστασης (δηλαδή του μεγέθους  $F$ ) κατά 20% σε σύγκριση με τη μέγιστη τιμή της [βλ. Σχ. 3.2(α)]. Στον ΚΑΝ.ΕΠΕ.[4] και τον Ευρωκώδικα 8[9] – Τμήμα 3 δίνονται σχέσεις για τον υπολογισμό της οριακής γωνίας στροφής χορδής,  $\theta_u$ , για συνήθεις διατομές από Ω.Σ.

Πολλές φορές, η κλίση του κλάδου AB λαμβάνεται οριζόντια. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίσταση διαρροής  $F_y$  μπορεί να ληφθεί ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας. Η παραμόρφωση  $\delta_u$  ορίζει και την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης, η οποία ορίζεται από το μετελαστικό τμήμα της παραμόρφωσης μέχρι την αστοχία, δηλαδή:  $\delta_p = \delta_u - \delta_y$ .

#### Τμήμα CD:

Αντιπροσωπεύει την απομένουσα αντίσταση του στοιχείου. Συνήθως, μετά την παραμόρφωση αστοχίας,  $\delta_u$ , η ικανότητα ενός μέλους να παραλάβει σεισμικά φορτία μειώνεται σημαντικά, αλλά δεν μηδενίζεται και έτσι το στοιχείο μπορεί να εξακολουθήσει να παραλαμβάνει κατακόρυφα φορτία. Στο σημείο D, θεωρούμε ότι το στοιχείο χάνει την ικανότητα να παραλαμβάνει και κατακόρυφα φορτία. Η τιμή της απομένουσας αντίστασης είναι δύσκολο να εκτιμηθεί. Συνήθως λαμβάνεται ίση με το 20% της οριακής αντοχής.

#### Στάθμες επιτελεστικότητας, E:

Στην καμπύλη  $F-\delta$  του δομικού στοιχείου ορίζονται οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τις αντίστοιχες παραμορφώσεις,  $\delta_d$ . Στο Σχ. 3.3, το σημείο E αντιστοιχεί στη στάθμη επιτελεστικότητας *προστασία ζωής*.

Ο ορισμός των σημείων επιτελεστικότητας, E, δίνεται στους διάφορους κανονισμούς ανάλογα με το είδος του στοιχείου (υποστυλώματα, δοκοί, κλπ),

τον τρόπο αστοχίας (δηλαδή εάν η συμπεριφορά είναι πλάστιμη ή ψαθυρή) και την κατηγοριοποίηση του στοιχείου σε *πρωτεύον* ή *δευτερεύον*. Ο διαχωρισμός των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα εξηγείται παρακάτω και γίνεται με κριτήριο το κατά πόσον η συμμετοχή του στην παραλαβή των σεισμικών φορτίων είναι περισσότερο ή λιγότερο σημαντική.

Σε περιπτώσεις πλάστιμων στοιχείων (γενικώς, όταν το στοιχείο διαρρέει σε κάμψη πριν να διαρρεύσει σε διάτμηση), κρίσιμες είναι οι παραμορφώσεις, γι' αυτό ο ορισμός των σταθμών επιτελεστικότητας γίνεται σε όρους παραμορφώσεων. Αντίθετα, σε περιπτώσεις ψαθυρών στοιχείων (η διαρροή σε διάτμηση προηγείται αυτής σε κάμψη) ορισμός γίνεται σε όρους δυνάμεων. Παράδειγμα: ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.[4] ορίζει ως εξής τις παραμορφώσεις  $\delta_d$  που αντιστοιχούν σε πλάστιμα στοιχεία στη στάθμη επιτελεστικότητας *προστασία ζωής*:

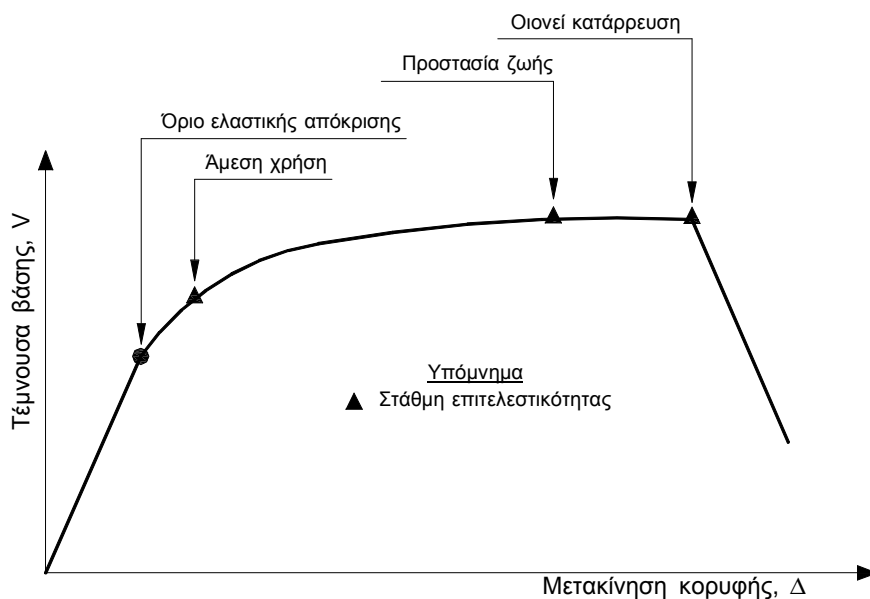
③ Πρωτεύοντα στοιχεία:  $\delta_d = 0.5(\delta_y + \delta_u) / \gamma_{Rd}$

③ Δευτερεύοντα στοιχεία:  $\delta_d = \delta_u / \gamma_{Rd}$

όπου  $\gamma_{Rd}$  είναι ο συντελεστής ασφαλείας.

### 3.3. Στάθμες επιτελεστικότητας κατασκευής

Αφού καθοριστούν οι καμπύλες  $F-\delta$  που περιγράφουν τη συμπεριφορά των στοιχείων της κατασκευής και οι στάθμες επιτελεστικότητας κάθε στοιχείου πάνω στην αντίστοιχη καμπύλη, μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη αντίστασης όλης της κατασκευής και να τοποθετηθούν πάνω σε αυτή τα σημεία που αντιστοιχούν στις διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας συνολικά για όλη την κατασκευή, όπως φαίνεται στο Σχ. 3.4.[1] Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο καθορισμός των σημείων επιτελεστικότητας πάνω στην καμπύλη αντίστασης, δηλαδή των μετακινήσεων κορυφής που αντιστοιχούν στα αντίστοιχα επίπεδα βλαβών, δεν είναι προφανής και συνήθως απαιτεί καλή κρίση μηχανικού. Αυτό συμβαίνει γιατί μία στάθμη επιτελεστικότητας για την κατασκευή ως σύνολο δεν αντιστοιχεί πάντοτε στο σημείο που το πρώτο στοιχείο της κατασκευής φτάνει σε αυτή τη στάθμη επιτελεστικότητας. Επειδή η κατασκευή αποτελείται από πολλά στοιχεία, είναι πιθανόν ένα μικρό ποσοστό των στοιχείων να έχει περάσει κάποια στάθμη επιτελεστικότητας, αλλά η κατασκευή ως σύνολο να βρίσκεται ακόμη κάτω από αυτή τη στάθμη. Επομένως, ο μηχανικός θα πρέπει να αξιολογήσει τη σημασία που έχει η εμφάνιση βλαβών σε κάποιο στοιχείο στη συνολική συμπεριφορά της κατασκευής.



Σχ. 3.4. Ορισμός σταθμών επιτελεστικότητας στην καμπύλη αντίστασης.

Σε αυτό το πνεύμα γίνεται ο διαχωρισμός των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, ώστε να βοηθηθεί ο μηχανικός σε τέτοιου είδους κρίσεις. Γενικώς, ως πρωτεύοντα ορίζονται τα στοιχεία που συμβάλλουν στην αντοχή και την ευστάθεια της κατασκευής υπό σεισμικά φορτία, ενώ όλα τα υπόλοιπα χαρακτηρίζονται ως δευτερεύοντα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο διαχωρισμός των στοιχείων της κατασκευής σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα υπάρχει και στο βασικό κείμενο του Ευρωκώδικα 8 και εφαρμόζεται και στον αντισεισμικό σχεδιασμό νέων κατασκευών με τη μέθοδο των δυνάμεων.

Για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας, οι παραμορφώσεις και οι αναμενόμενες βλάβες που αντιστοιχούν στα δευτερεύοντα στοιχεία είναι γενικώς μεγαλύτερες από αυτές των πρωτευόντων. Εάν κατά την κατασκευή της καμπύλης αντοχής προκύψει ότι ένα μικρό μόνο ποσοστό των στοιχείων της κατασκευής υπερβαίνει μία στάθμη επιτελεστικότητας, ο μηχανικός έχει τη δυνατότητα να ορίσει αυτά τα στοιχεία ως δευτερεύοντα, αυξάνοντας έτσι το όριο της παραμόρφωσης της κατασκευής που αντιστοιχεί σε αυτό το επίπεδο επιτελεστικότητας. Για παράδειγμα, είναι γνωστό ότι οι δοκοί που συνδέουν συζευγμένα τοιχώματα υφίστανται σημαντικές βλάβες ακόμη και για σχετικά μικρές παραμορφώσεις της κατασκευής, χωρίς όμως αυτό να επηρεάζει την ικανότητα της κατασκευής να παραλάβει σεισμικά φορτία. Επομένως, οι δοκοί σύζευξης μπορούν να οριστούν ως δευτερεύοντα στοιχεία. Μετά τον διαχωρισμό των στοιχείων σε πρωτεύοντα και δευτερεύοντα, μπορούν να οριστούν οι στάθμες επιτελεστικότητας της κατασκευής, π.χ. ως τα σημεία πάνω στην καμπύλη αντίστασης που το πρώτο πρωτεύον στοιχείο φθάνει στην αντίστοιχη στάθμη.

## 4. ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΣΤΟΧΕΥΟΜΕΝΗΣ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗΣ

### 4.1. Εισαγωγή

Για δεδομένη περίοδο επανάληψης του σεισμού σχεδιασμού, υπολογίζεται κατ' αρχην η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής που ορίζει το σημείο επιτελεστικότητας της κατασκευής γι' αυτό το σεισμο. Ο ακριβέστερος τρόπος υπολογισμού αυτής της μετακίνησης είναι με μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας. Όταν δεν γίνονται μη-γραμμικές αναλύσεις χρονοϊστορίας, η στοχευόμενη μετακίνηση, που αντιστοιχεί σε κάποια σεισμική διέγερση με δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού, μπορεί να υπολογιστεί με εφαρμογή προσεγγιστικών μεθόδων, όπως η μέθοδος των συντελεστών και η στατική μη-γραμμική ανάλυση, γνωστή και ως μεθοδολογία pushover.

Η ακρίβεια που επιτυγχάνεται με αυτές τις “στατικές” μεθόδους δεν είναι γενικά ικανοποιητική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι βασίζονται στην απόκριση ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος και ο υπολογισμός της απόκρισης της κατασκευής σε κάθε όροφο γίνεται με βάση την παραμόρφωσή της για συγκεκριμένη κατανομή φορτίων καθ' ύψος. Η φιλοσοφία καθορισμού του σημείου επιτελεστικότητας βασίζεται στον υπολογισμό του σημείου που αντιστοιχεί στην εξισορρόπηση της απαίτησης (demand), σύμφωνα με το επιθυμητό φάσμα σχεδιασμού, και της αντοχής (capacity) της κατασκευής. Σε διάγραμμα ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum), η εξισορρόπηση αυτή για το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα συμβαίνει στο σημείο τομής της καμπύλης αντίστασης και του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί στην ενεργό απόσβεση για τη μέγιστη μετακίνηση (η ενεργός απόσβεση υπολογίζεται με βάση την πλαστιμότητα που αντιστοιχεί στη μέγιστη μετακίνηση) ή του αντίστοιχου ανελαστικού φάσματος. Εναλλακτικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν την ελαστική μετακίνηση με την ανελαστική.[1]

Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του σημείου επιτελεστικότητας σύμφωνα με τη μεθοδολογία ATC-40, τη μέθοδο N2 και τη μέθοδο των συντελεστών. Σε όλες τις μεθόδους, η μετακίνηση της κατασκευής υπολογίζεται από τη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.



## 4.2 Ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα[1]

Το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα εξαρτάται από την κατανομή των φορτίων καθ' ύψος που λαμβάνονται υπόψη στον υπολογισμό της καμπύλης αντίστασης . Για την κατανομή των φορτίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί τριγωνική κατανομή, ομοιόμορφη κατανομή, κατανομή σύμφωνα με την πρώτη ιδιομορφή ή περισσότερο πολύπλοκοι συνδυασμοί με συμμετοχή ανώτερων ιδιομορφών.

Γενικά , μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κατανομή των φορτίων στους ορόφους γίνεται σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$F_i = V \frac{m_i \varphi_i}{\sum_j m_j \varphi_j} \quad (4.1)$$

όπου ,  $V = \sum F_i$  είναι τέμνουσα βάσης. Οι συντελεστές  $\varphi_i$  δηλώνουν την κατανομή των μετακινήσεων στους ορόφους και συνήθως λαμβάνονται ίσοι με τις αντίστοιχες τιμές της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής. Σημειώνεται, όμως, ότι αντί της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφής θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και οποιαδήποτε άλλη κατανομή μετακινήσεων , αντιπροσωπευτική της αναμενόμενης παραμόρφωσης της κατασκευής. Συνήθως, οι τιμές των  $\varphi_i$  κανονικοποιούνται έτσι ώστε η τιμή στην κορυφή να ισούται με μονάδα:  $\varphi_{top}=1$ .

Εάν η κατανομή των φορτίων γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση (4.1) και  $\varphi_{top}=1$ , η αντιστοιχία μεταξύ του πολυβάθμιου συστήματος και του ισοδύναμου μονοβαθμίου για όλα τα μεγέθη (δυνάμεις, μετακινήσεις, ενέργεια, κλπ) γίνεται με τη σχέση:

$$Q = \Gamma \cdot Q^* \quad (4.2)$$

όπου

$Q^*$  = μέγεθος στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (π.χ. δύναμη  $F^*$ , μετακίνηση  $\delta^*$ )

$Q$  = αντίστοιχο μέγεθος στο πολυβάθμιο σύστημα (π.χ. τέμνουσα βάσης  $V$ , μετακίνηση κορυφής  $\Delta$ )

$\Gamma$  = συντελεστής συμμετοχής που δίνεται από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2} \quad (4.3)$$

Ο αριθμητής της παραπάνω σχέσης ισούται με τη μάζα του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, δηλαδή,

$$m^* = \sum m_i \varphi_i \quad (4.4)$$

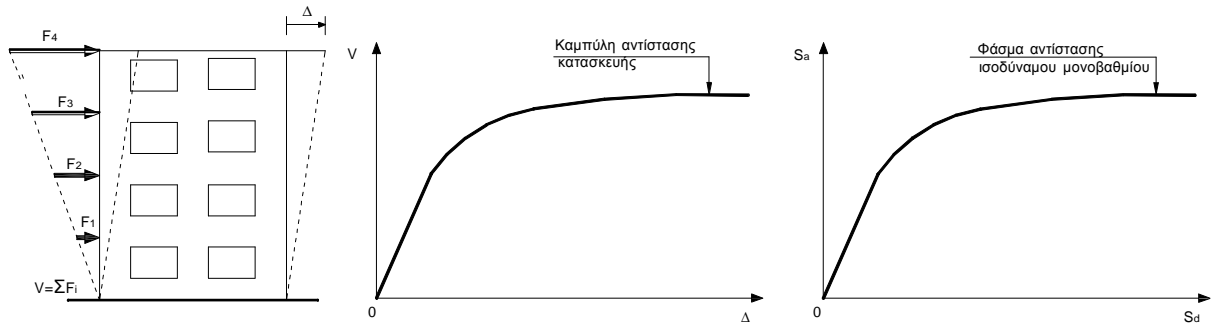
Σημειώνεται ότι, εφόσον τόσο οι δυνάμεις όσο και οι μετακινήσεις ακολουθούν τον ίδιο κανόνα μετασηματισμού [σχέση (4.2)], η δυσκαμψία του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ισούται με αυτή του πολυβαθμίου. Η ιδιοπερίοδος όμως του ισοδύναμου μονοβαθμίου δεν ισούται με την 1<sup>η</sup> ιδιοπερίοδο του πολυβαθμίου, ακόμη και εάν οι συντελεστές  $\varphi_i$  ισούνται με τις αντίστοιχες τιμές του 1<sup>ου</sup> ιδιοδιανύσματος.

Η σχέση (4.2) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή της καμπύλης αντίστασης του κτηρίου σε φάσμα αντίστασης (capacity spectrum) του ισοδύναμου μονοβαθμίου σε ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectrum) μορφή (Σχ. 4.1). Η μετατροπή αυτή γίνεται χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_a = \frac{V}{\alpha \cdot m_{o\lambda}}$$

$$S_d = \frac{\Delta}{\Gamma} \quad [\text{ή} \quad S_d = \frac{\Delta}{\Gamma \cdot \varphi_{top}} \quad \text{εάν} \quad \Phi_{top} \neq 1]$$

όπου:



Σχ.4.1. Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής και του φάσματος αντίστασης του ισοδύναμου μονοβαθμίου σε ADRS μορφή.

$V$  = τέμνουσα βάσης πολυβαθμίου

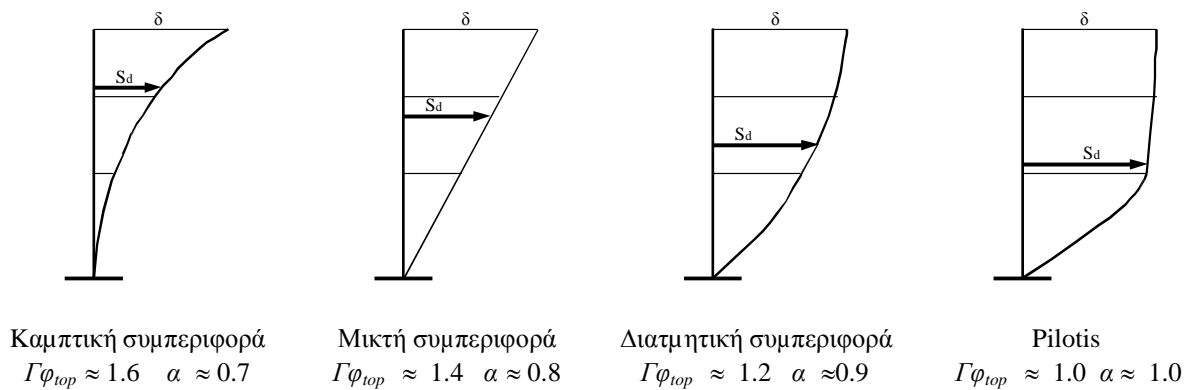
$m_{ολ}$  = συνολική μάζα πολυβαθμίου

$\alpha$  = ποσοστό συνολικής μάζας που συμμετέχει στη δυναμική απόκριση της κατασκευής για την αναμενόμενη μορφή παραμόρφωσης, που δίνεται από τη σχέση:

$$\alpha = \frac{[\sum m_i \varphi_i]^2}{m_{ολ} \cdot \sum m_i \varphi_i} = \frac{\Gamma \cdot \sum m_i \varphi_i}{m_{ολ}} = \Gamma \frac{m^*}{m_{ολ}} \quad (4.7)$$

$\Delta$  = μετακίνηση κορυφής

Ενδεικτικές τιμές των συντελεστών  $\alpha$  για διάφορους τρόπους συμπεριφοράς κτηρίων παρουσιάζονται στο Σχ. 4.2.



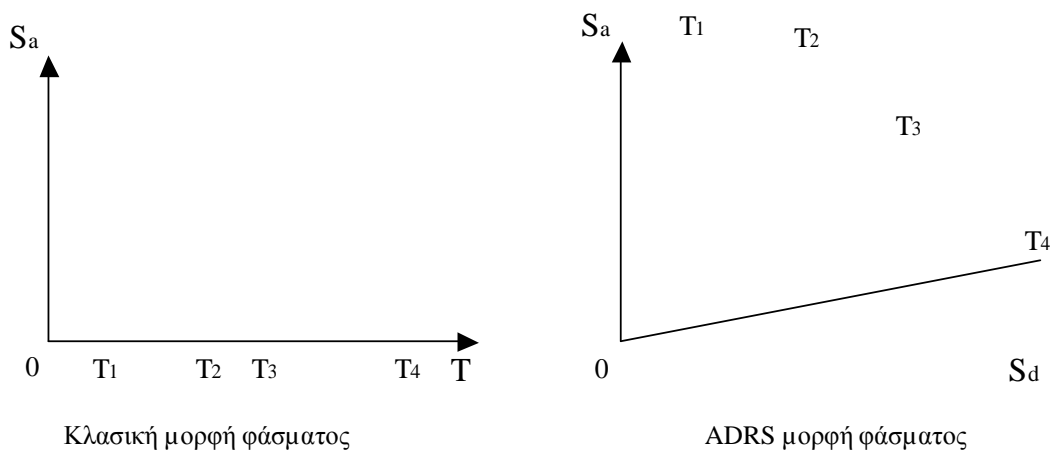
Σχ.4.2. Τιμές συντελεστή  $\alpha$  για χαρακτηριστικούς τρόπους συμπεριφοράς.

## Μεθοδολογία ATC- 40 :

Στο ATC-40[5] προτείνονται τρεις μεθοδολογίες υπολογισμού με παραπλήσια αποτελέσματα. Παρακάτω περιγράφεται με βήματα η διαδικασία υπολογισμού της πρώτης μεθοδολογίας, η οποία είναι και η περισσότερο αναλυτική, σε αντίθεση με την τρίτη, η οποία είναι γραφική.

**Βήμα 1:** Μεταφορά του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta=5\%$  στο πεδίο επιτάχυνση-μετακίνηση (μορφή ADRS).

Η διαδικασία μετατροπής είναι απλή και φαίνεται στο Σχ. 4.3.



$$S_a = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d$$
$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a$$

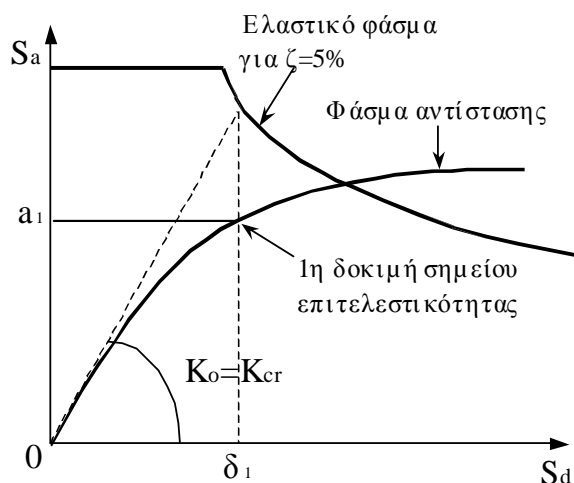
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \quad S$$

Σχ.4.3. Μετατροπή ελαστικού φάσματος σχεδιασμού σε ADRS μορφή.

**Βήμα 2:** Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης (capacity curve) και του φάσματος αντίστασης (capacity spectrum). Η κατασκευή της καμπύλης αντίστασης γίνεται με υπολογισμό της μετακίνησης της κορυφής για διάφορες τιμές της τέμνουσας βάσης. Στη συνέχεια, η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα αντίστασης του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος.

**Βήμα 3:** Εύρεση 1<sup>ο</sup> σημείου δοκιμών (Σχ. 4.4).

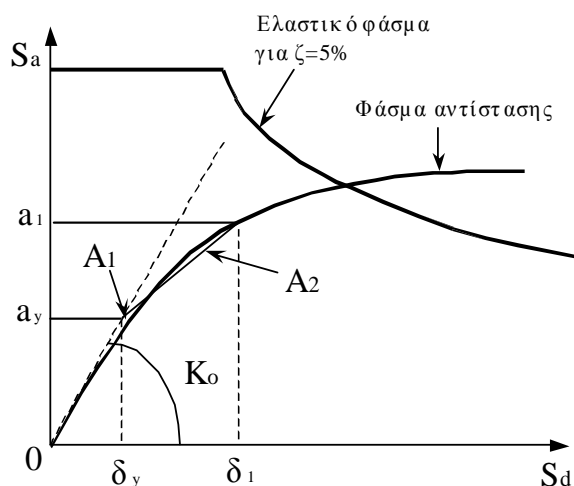
Στην παρακάτω διαδικασία, για λόγους απλοποίησης, τα μεγέθη (μετακίνηση, επιτάχυνση) που αφορούν στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα παρουσιάζονται χωρίς αστερίσκο.



Σχ.4.4. Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών.

Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση  $\zeta=5\%$  υπολογίζεται η μετακίνηση  $\delta_1$  για τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής). Για τη μετακίνηση  $\delta_1$  υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας πάνω στο φάσμα αντίστασης και η αντίστοιχη επιτάχυνση  $a_1$ . Η μετακίνηση  $\delta_1$  είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και ανελαστικού συστήματος.

Βήμα 4: Κατασκευή διγραμμικού φάσματος αντίστασης (Σχ. 4.5)



Σχ.4.5. Κατασκευή διγραμμικού φάσματος αντίστασης.

Από το 1<sup>ο</sup> σημείο δοκιμής φέρνουμε ευθεία, έτσι ώστε τα εμβαδά  $A_1$  και  $A_2$  να είναι περίπου ίσα και ορίζουμε το σημείο τομής με την ευθεία που αντιστοιχεί στην αρχική δυσκαμψία. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη διαρροή σύμφωνα με τη διγραμμική καμπύλη συμπεριφοράς και η προβολή του στους άξονες  $S_a$  και  $S_d$  ορίζει την επιτάχυνση διαρροής,  $a_y$  και τη μετακίνηση διαρροής,  $\delta_y$  αντίστοιχα.

### Βήμα 5: Υπολογισμός ενεργούς απόσβεσης

Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\zeta_{eff} = \zeta_{ελ} + \zeta_{υστ} \quad (4.8)$$

όπου:  $\zeta_{ελ}$  = απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά (= 0.05 για Ω.Σ.)

$\zeta_{υστ}$  = υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς.

Για τον υπολογισμό της υστερητικής απόσβεσης προτείνεται η σχέση του Chopra (1995) , η οποία βασίζεται στη σχέση των ενεργειών του ελαστοπλαστικού και του ισοδυναμου ελαστικού συστήματος :

$$\zeta_{υστ} = \frac{1}{4\pi} * \frac{E_D}{E_{Sd}} \rightarrow \zeta_{υστ} = \frac{0.637 * (\alpha_y * \delta_u - \delta_y * \alpha_u)}{\alpha_u * \delta_u} \quad (4.9)$$

Η σχέση του Chopra *υπερεκτιμά* την υστερητική απόσβεση για σεισμούς μεγάλης διάρκειας και κατασκευές χωρίς καλή πλάστιμη συμπεριφορά. Γι' αυτό, στο ATC-40 προτείνεται η χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή  $\kappa$ , ανάλογα με την ποιότητα της κατασκευής σε συνδυασμό με την αναμενόμενη σεισμική διέγερση. Οι τύποι συμπεριφοράς δίνονται στον πίνακα 4.1 και οι συντελεστές  $\kappa$  στον πίνακα 4.2. Θέτοντας στη σχέση (4.9)  $\alpha_u = \alpha_1$  και  $\delta_u = \delta_1$  προκύπτει:

$$\zeta_{eff}(\%) = 5 + \frac{63,7 * \kappa * (\alpha_y * \delta_1 - \delta_y * \alpha_1)}{\alpha_1 * \delta_1} \quad (4.10)$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση  $\zeta = \zeta_{eff}$  με πολλαπλασιασμό των τιμών του φάσματος για  $\zeta = 5\%$  με τους συντελεστές  $SR_A$  και  $SR_V$  (βλ. Σχ.4.7 ):

Πίνακας 4.1 Τύποι συμπεριφοράς κτηρίων.

Διάρκεια σεισμού	Νέες, καλές αντισεισμικές κατασκευές	Μέτριες αντισεισμικά κατασκευές	Φτωχές αντισεισμικά κατασκευές
Μικρή (κοντά στο επίκεντρο)	A	B	C
Μεγάλη (μακριά από επίκεντρο, γενικώς για ζώνες III & IV)	B	C	C

Πίνακας 4.2 Τιμές διορθωτικού συντελεστή κ.

Τύπος συμπεριφοράς	$\zeta_{\text{ιστ}}$ (%)	$\kappa$
A	$\leq 16.25$	1.00
	$> 16.25$	$1.13 - \frac{0.51 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$
B	$< 25$	0.67
	$> 25$	$0.845 - \frac{0.446 \cdot (a_y \cdot \delta_u - \delta_y \cdot a_u)}{a_u \cdot \delta_u}$
C	Όλες οι τιμές	0.33

Πίνακας 4.3 Ελάχιστες τιμές μειωτικών συντελεστών απόσβεσης

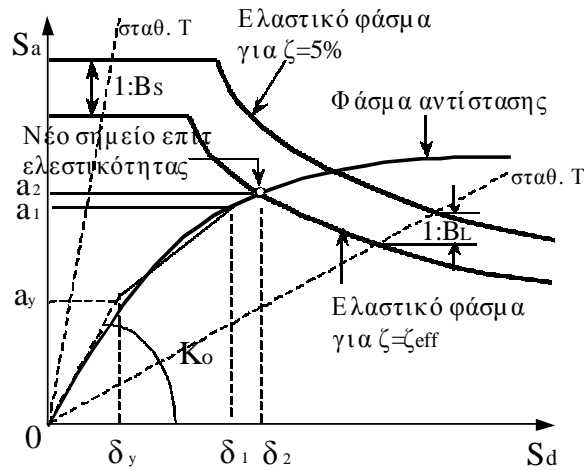
Τύπος συμπεριφοράς	$SR_{A,min}$	$SR_{V,min}$
A	0.33	0.50
B	0.44	0.56
C	0.56	0.67

$$SR_A = \frac{1}{B_S} = \frac{3.21 - 0.68 \cdot \ln \zeta_{\text{eff}}}{2.12} \geq SR_{A,min}$$

$$SR_A = \frac{1}{B_L} = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln \zeta_{\text{eff}}}{1.65} \geq SR_{A,min}$$

Στα τμήματα που αντιστοιχούν σε σταθερή επιτάχυνση και σταθερή ταχύτητα, αντίστοιχα. οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών δίνονται στον πίνακα 4.3.[1]

Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta = \zeta_{\text{eff}}$  και του φάσματος αντίστασης ορίζει το νέο σημείο επιτελεστικότητας. Η προβολή αυτού του σημείου στους άξονες  $S_a$  και  $S_d$  ορίζει την νέα επιτάχυνση,  $a_2$  και τη νέα μετακίνηση,  $\delta_2$  αντίστοιχα.



Σχ.4.6. Κατασκευή ελαστικού φάσματος απόκρισης για  $\zeta = \zeta_{eff}$  και εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας.

**Βήμα 6:** Έλεγχος σύγκλισης

Η μέθοδος βασίζεται σε μία επαναληπτική διαδικασία μέχρι να επιτευχθεί σύγκλιση. Θεωρούμε ότι η σύγκλιση έχει επιτευχθεί εάν:

$$0.95 \cdot \delta_1 < \delta_2 < 1.05 \cdot \delta_1 \tag{4.13}$$

Εάν το κριτήριο δεν ικανοποιείται, θέτουμε  $a_1 = a_2$  και  $\delta_1 = \delta_2$  και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία από το 5<sup>ο</sup> βήμα. Εάν το κριτήριο ικανοποιείται, η μετακίνηση  $\delta_2$  αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση  $\delta^*$  του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (στοχευόμενη μετακίνηση).

**Βήμα 7:** Στοχευόμενη μετακίνηση κατασκευής

Η μετακίνηση της κορυφής,  $\Delta$ , που αντιστοιχεί στη μετακίνηση  $\delta^*$  του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, υπολογίζεται από τη σχέση (4.6), επιλύοντας ως προς  $\Delta$  και θέτοντας  $S_d = \delta^*$ .

**Μέθοδος N2**

Η μέθοδος N2 προτάθηκε από τον Fajfar (1996, 1999) και βασίζεται σε εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το συντελεστή συμπεριφοράς με την πλαστιμότητα. Έτσι, αντί να χρησιμοποιούνται ελαστικά φάσματα για την ισοδύναμη απόσβεση που αντιστοιχεί στην αναπτυσσόμενη πλαστιμότητα, όπως γίνεται στη μεθοδολογία ATC-40,[40] υπολογίζεται απ' ευθείας η ανελαστική επιτάχυνση. Η ανελαστική φασματική επιτάχυνση,  $S_a$ , συνδέεται με την αντίστοιχη ελαστική,  $S_{ae}$ , με τη σχέση:



$$S_a = \frac{S_{ae}}{R_\mu} \quad (4.14)$$

όπου  $R_\mu$  είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς (reduction factor) λόγω της ανελαστικής απόκρισης. Σημειώνεται ότι ο όρος  $R_\mu$  αντιστοιχεί στο συντελεστή συμπεριφοράς χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η υπεραντοχή, δηλαδή στον όρο  $q_d$  κατά ΕΑΚ. Υπενθυμίζεται ότι στον ΕΑΚ ο συντελεστής συμπεριφοράς  $q$  ορίζεται ως:  $q=q_0 \cdot q_d$ , όπου  $q_0$  είναι ο συντελεστής υπεραντοχής.

Αντίστοιχα, η ανελαστική φασματική μετακίνηση,  $S_d$ , συνδέεται με τη μετακίνηση διαρροής,  $S_{dy}$ , με τη σχέση:

$$S_d = \mu * S_{dy} \quad (4.15)$$

Για ένα ελαστικό – τελείως πλαστικό σύστημα (δηλ. χωρίς κράτυνση), ισχύει  $S_a=S_{ay}$ , όπου  $S_{ay}$ =επιτάχυνση διαρροής. Επειδή  $S_{ae}=\omega^2 \cdot S_{de}$  και  $S_{ay}=\omega^2 \cdot S_{dy}$ , όπου  $\omega$  είναι η ιδιοπερίοδος του ελαστικού συστήματος, οι εξισώσεις (4.14) και (4.15) οδηγούν στην παρακάτω σχέση μεταξύ της ελαστικής και της ανελαστικής μετακίνησης:

$$S_d = \frac{\mu}{R_\mu} S_{de} \quad (4.16)$$

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν πολλοί εμπειρικοί τύποι που δίνουν τη σχέση μεταξύ της πλαστιμότητας,  $\mu$ , και του συντελεστή συμπεριφοράς,  $R_\mu$ . Στις εργασίες του Fajfar χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις:

$$R_\mu = (\mu - 1) \frac{T}{T_0} + 1 \quad \text{για } T \leq T_0 \quad (4.17)$$

$$R_\mu = \mu \quad \text{για } T \geq T_0$$

$$T_0 = 0.65 * \mu^{0.3} * T_c \leq T_c \quad (4.18)$$

Στην παραπάνω σχέση,  $T$  είναι η ιδιοπερίοδος του μονοβάθμιου ταλαντωτή και  $T_c$  η χαρακτηριστική περίοδος της εδαφικής κίνησης. Για φάσματα σχεδιασμού της μορφής του ΕΑΚ ή του EC8, η περίοδος  $T_c$  ορίζεται συνήθως από το σημείο τομής του τμήματος που αντιστοιχεί σε σταθερή επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος), δηλαδή  $T_c=T_2$  κατά ΕΑΚ και  $T_c=T_C$  κατά EC8.

Για κατασκευές με μικρές περιόδους, η ισότητα αυτή δεν ισχύει, όπως δηλώνει η εξίσωση (4.17).[1] Η περίοδος  $T_0$ , που καθορίζει το όριο μεταξύ των περιοχών ισχύος κάθε εξίσωσης, εξαρτάται από την πλαστιμότητα, όπως φαίνεται από τη σχέση (4.18). Η περίοδος  $T_0$  δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από τη χαρακτηριστική περίοδο του φάσματος σχεδιασμού,  $T_c$ . Επειδή η εξάρτηση της περιόδου  $T_0$  από την πλαστιμότητα απαιτεί επαναληπτική διαδικασία για τον υπολογισμό του σημείου επιτελεστικότητας, προτείνεται η απλοποίηση:

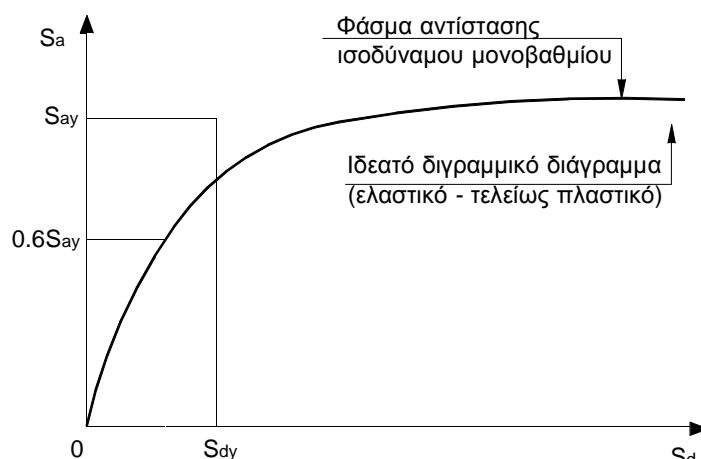
$$T_0 = T_c \quad (4.19)$$

Η μέθοδος σε βήματα περιγράφεται ως εξής:

**Βήμα 1:** Κατασκευή της καμπύλης αντίστασης της κατασκευής και του αντίστοιχου φάσματος αντίστασης του ισοδύναμου μονοβαθμίου συστήματος σε μορφή ADRS. Η διαδικασία είναι ίδια με τη μέθοδο ATC-40.

**Βήμα 2:** Κατασκευή του αντίστοιχου ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος.

Το διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης κατασκευάζεται χωρίς κράτυνση, δηλαδή ο μετελαστικός κλάδος είναι οριζόντιος. Αυτό γίνεται γιατί έχει αποδειχθεί ότι μία συνήθης (μικρή) κράτυνση δεν έχει σημαντική επίδραση στην τιμή της ανελαστικής μετακίνησης.



Σχ.4.7 . Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού φάσματος αντίστασης.

Το διάγραμμα συνήθως κατασκευάζεται με κλίση ελαστικού κλάδου ίση με την τέμνουσα δυσκαμψία που αντιστοιχεί στο 60% της επιτάχυνσης διαρροής και έτσι ώστε τα εμβαδά που αποκόπτονται πάνω και κάτω από την αρχική καμπύλη να είναι ίσα.

Από το διγραμμικό διάγραμμα αντίστασης καθορίζονται η επιτάχυνση διαρροής,  $S_{ay}$  και η μετακίνηση διαρροής,  $S_{dy}$ . Έτσι, για το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα η δύναμη διαρροής είναι  $F^* = m^* S_{ay}$  και η μετακίνηση διαρροής διαρροής.

Στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η ιδιοπερίοδος του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος από τη σχέση:

$$T^* = 2\pi \sqrt{\frac{S_{dy}}{S_{ay}}} = 2\pi \sqrt{\frac{m^* \delta_y^*}{F_y^*}} \quad (4.20)$$

Βήμα 3: Υπολογισμός της ανελαστικής μετακίνησης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος.

Για την περίοδο  $T^*$ , υπολογίζονται η ελαστική επιτάχυνση,  $S_{ae}$  και η ελαστική μετακίνηση,  $S_{de}$ , από το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού. Ο απαιτούμενος συντελεστής συμπεριφοράς ισούται με:

$$R_\mu = S_{ae} / S_{ay}.$$

Διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

(α) Εάν  $T^* \geq T_0$ , η ανελαστική μετακίνηση ισούται με την ελαστική και επομένως:  
 $\delta^* = S_d = S_{de}$  (4.21)

Η χαρακτηριστική περίοδος,  $T_0$ , υπολογίζεται από την (4.18) ή την απλοποιημένη (4.19). Σε αυτή την περίπτωση,  $\mu = R_\mu$ .

(β) Εάν  $T^* < T_0$ , η πλαστιμότητα,  $\mu$ , υπολογίζεται από το συντελεστή συμπεριφοράς,  $R_\mu$ , από τη σχέση (4.17α), η οποία δίνει:

$$\mu = (R_\mu - 1) \frac{T_0}{T^*} + 1$$

Εάν για τον υπολογισμό της  $T_0$  χρησιμοποιηθεί η σχέση (4.18), απαιτείται επαναληπτική διαδικασία, ενώ εάν ο υπολογισμός γίνει σύμφωνα με την απλοποιημένη σχέση (4.19), ο υπολογισμός του  $\mu$  είναι άμεσος, χωρίς να απαιτούνται επαναλήψεις. Μετά τον υπολογισμό της πλαστιμότητας, η ανελαστική μετακίνηση προκύπτει από τη σχέση:

$$\delta^* = S_d = \mu \cdot S_{dy} \quad (4.23)$$

Και στις δύο περιπτώσεις, η ανελαστική μετακίνηση αντιστοιχεί στο σημείο τομής του διγραμμικού φάσματος αντίστασης με το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί

σε πλαστιμότητα  $\mu$ . Σημειώνεται ότι με την παραπάνω διαδικασία υπολογίζεται η μετακίνηση χωρίς να χρειάζεται να κατασκευαστεί το ανελαστικό φάσμα σχεδιασμού.

#### Βήμα 4: Στοχευόμενη μετακίνηση κατασκευής

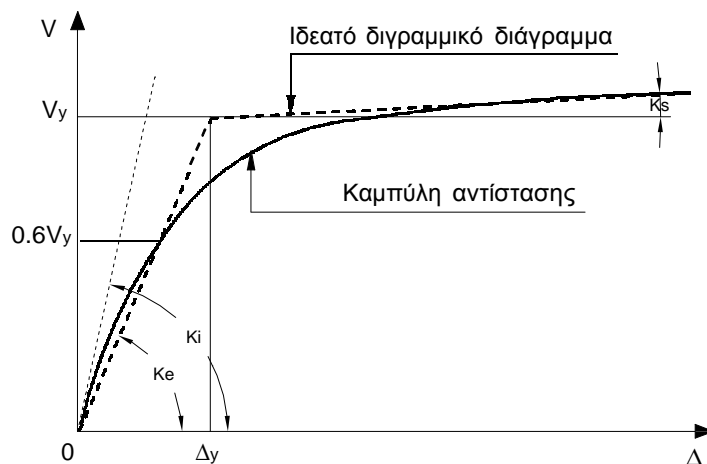
Όπως και στη μέθοδο ATC-40, η μετακίνηση της κορυφής,  $\Delta$ , που αντιστοιχεί στη μετακίνηση  $\delta^*$  του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τη σχέση (4.6), με αντικατάσταση της  $S_d$  με τη  $\delta^*$ .

#### **Μέθοδος των συντελεστών**

Ο υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης της κατασκευής με τη μέθοδο των συντελεστών περιγράφεται στη FEMA 356 και τον ATC-40. Και αυτή η μέθοδος βασίζεται στο ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα, το οποίο όμως χρησιμοποιείται χωρίς να αναφέρεται ρητά.

#### Βήμα 1: Κατασκευή ιδεατού διγραμμικού διαγράμματος για την καμπύλη αντίστασης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται κατ' αρχήν η μετατροπή της καμπύλης αντίστασης σε διγραμμικό διάγραμμα. Σε αντίθεση με τη μέθοδο N2, η κλίση του μετελαστικού κλάδου δεν λαμβάνεται μηδενική, αλλά έχει τιμή  $K_s$ . Ο τρόπος κατασκευής του διγραμμικού διαγράμματος είναι παρόμοιος με αυτόν της μεθόδου N2 με μικρή διαφοροποίηση. Στον ATC-40 προτείνεται η εξής διαδικασία (βλ. Σχ. 4.9):



Σχ.4.8. Κατασκευή ιδεατής διγραμμικής απεικόνισης της καμπύλης αντίστασης.

- Κατασκευάζεται ο μετελαστικός κλάδος, ορίζοντας τη δυσκαμψία,  $K_s$ , κατά την κρίση του μηχανικού, και θεωρώντας ότι η αντίστοιχη ευθεία διέρχεται από το σημείο που η καμπύλη αντίστασης έχει γίνει περίπου οριζόντια.
- Ορίζεται η ισοδύναμη ελαστική δυσκαμψία,  $K_e$ , από την ευθεία που ενώνει την αρχή των αξόνων με το σημείο πάνω στην καμπύλη αντίστασης που αντιστοιχεί στο 60% της τέμνουσας διαρροής,  $V_y$ . Επειδή αυτή η τιμή δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, απαιτούνται κάποιες δοκιμές.
- Ορίζεται η τέμνουσα διαρροής,  $V_y$ , από το σημείο τομής των ευθειών με κλίση  $K_e$  και  $K_s$ , που αντιστοιχούν στον ελαστικό και τον μετελαστικό κλάδο αντίστοιχα.

Βήμα 2: Υπολογισμός της ενεργούς θεμελιώδους ιδιοπεριόδου,  $T_e$ .

Από δυναμική ανάλυση υπολογίζεται η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος της κατασκευής στη διεύθυνση που εξετάζεται, λαμβάνοντας υπόψη την ελαστική δυσκαμψία,  $K_i$  (βλ. Σχ. 4.9). Για να υπολογίσουμε την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο, που αντιστοιχεί σε δυσκαμψία  $K_e$ , χρησιμοποιούμε τη σχέση:

$$T_e = T_i \sqrt{\frac{K_i}{K_e}} \quad (4.24)$$

Βήμα 3: Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης,  $\Delta_t$ .

Η στοχευόμενη μετακίνηση της κορυφής που αντιστοιχεί σε δεδομένο ελαστικό φάσμα σχεδιασμού (target displacement) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a \cdot \frac{T_e^2}{4\pi^2} \quad (4.25)$$

Οι τιμές των παραμέτρων ορίζονται παρακάτω σύμφωνα με FEMA 356.

$C_0$  = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση της κορυφής,  $\Delta$ , με τη φασματική μετακίνηση,  $S_d$ . Ισχύει:  $\Delta = \Gamma \cdot S_d \cdot \varphi_{top}$ , όπου  $\Gamma$  ο συντελεστής συμμετοχής σύμφωνα με τη σχέση (4.3). Άρα,  $C_0 = \Gamma \cdot \varphi_{top}$ . Εάν  $\varphi_{top} = 1$ , τότε  $C_0 = \Gamma$ . Για τον υπολογισμό του συντελεστή συμμετοχής μπορούν να χρησιμοποιούνται οι τιμές  $\varphi_i$  που αντιστοιχούν στην 1<sup>η</sup> ιδιομορφή ή οι τιμές που αντιστοιχούν στην παραμόρφωση του κτηρίου όταν συμβαίνει η στοχευόμενη μετακίνηση. Εναλλακτικά, η τιμή του συντελεστή  $C_0$  μπορεί να λαμβάνεται απ' ευθείας από τον Πίνακα 4.4.

$C_1$  = Συντελεστής που συνδέει τη μετακίνηση του ανελαστικού συστήματος με αυτή του αντίστοιχου ελαστικού, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$C_1=1.0 \quad \text{για } T_e \geq T_S \quad (4.26\alpha)$$

$$C_1 = \frac{1.0 + (R-1) \cdot T_S / T_e}{R} \quad \text{για } T_e \leq T_S \quad (4.27\beta)$$

Επίσης ισχύει:  $C_1 \leq 1.5$  για  $T_e \leq 1.0$  sec και  $C_1 \geq 1.0$ .

Στις παραπάνω σχέσεις:

$T_S$  = η περίοδος που ορίζεται από το σημείο τομής του τμήματος του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε σταθερή επιτάχυνση (οριζόντιο τμήμα) με αυτό που αντιστοιχεί σε σταθερή ταχύτητα (φθίνων κλάδος), δηλαδή  $T_S = T_2$  κατά ΕΑΚ και  $T_S = T_C$  κατά EC8.

$R$  = ο συντελεστής συμπεριφοράς που εκφράζει το λόγο της ελαστικής απαίτησης προς τη δύναμη διαρροής, ο οποίος υπολογίζεται από τη σχέση:

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

όπου:

$S_a$  = φασματική επιτάχυνση σύμφωνα με το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού για την ενεργό θεμελιώδη ιδιοπερίοδο,  $T_e$ .

$V_y$  = τέμνουσα διαρροής σύμφωνα με τη διγραμμική απεικόνιση της καμπύλης αντίστασης (Σχ. 4.9).

$W$  = συνολικό βάρος της κατασκευής

$C_m$  = συντελεστής που δηλώνει την ενεργό μάζα σύμφωνα με τον πίνακα 4.5. Εναλλακτικά, ο συντελεστής  $C_m$  μπορεί να λαμβάνεται ίσος με το λόγο της 1<sup>ης</sup> ιδιομορφικής μάζας προς τη συνολική μάζα.

$C_2$  = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του τη μορφή των βρόχων υστέρησης της ανελαστικής συμπεριφοράς. Οι τιμές του  $C_2$  για διάφορους τύπους συστημάτων και διάφορες στάθμες επιτελεστικότητας δίνονται στον Πίνακα 4.6. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τιμή  $C_2=1.0$ .

$C_3$  = Διορθωτικός συντελεστής που λαμβάνει υπόψη του την αύξηση των μετακινήσεων λόγω επιρροής  $P$ - $\Delta$ , που ορίζεται ως εξής:

Πίνακας 4.4. Τιμές του συντελεστή  $C_0$

Αριθμός ορόφων	Διατηρητικά κτήρια		Λοιπά κτήρια
	Τριγωνική κατανομή φορτίων	Ομοιόμορφη κατανομή φορτίων	Οποιαδήποτε κατανομή φορτίων
1	1.0	1.0	1.0
2	1.2	1.15	1.2
3	1.2	1.2	1.3
5	1.3	1.2	1.4
10+	1.3	1.2	1.5

Πίνακας 4.5. Τιμές του συντελεστή  $C_m^{(*)}$

Αριθμός ορόφων	Πλαισιακά κτήρια από Ω.Σ.	Τοιχοματικά κτήρια από Ω.Σ.	Κτήρια από Ω.Σ. τύπου ανεστρ. εκκρεμούς	Πλαίσια παραλαβής ροπών από χάλυβα	Πλαίσια από χάλυβα με συνδέσμους χωρίς εκκεντρότητα	Πλαίσια από χάλυβα με έκκεντρους συνδέσμους	Άλλος τύπος
1 - 2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
3+	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	1.0

(\*)  $C_m = 1.0$  για  $T_e > 1.0$  sec.

Πίνακας 4.6. Τιμές του συντελεστή  $C_2$

Στάθμη επιτελεστικότητας	$T_e \leq 0.1$ sec		$T_e \geq T_s$	
	Τύπος κτηρίου 1	Τύπος κτηρίου 2	Τύπος κτηρίου 1	Τύπος κτηρίου 2
Άμεση χρήση	1.0	1.0	1.0	1.0
Προστασία ζωής	1.3	1.0	1.1	1.0
Οιονεί κατάρρευση	1.5	1.0	1.2	1.0

#### Επεξήγηση

Τύπος 1: Κατασκευές στις οποίες περισσότερο από το 30% της τέμνουσας σε κάθε όροφο αναλαμβάνεται από οποιονδήποτε συνδυασμό των εξής στοιχείων: Τυπικά πλαίσια παραλαβής ροπών, πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους, πλαίσια με ημιάκαμπτες συνδέσεις, πλαίσια με μεταλλικούς συνδέσμους που παραλαμβάνουν μόνο εφελκυστικές δυνάμεις, άοπλη τοιχοποιία.

Τύπος 2: Οι κατασκευές που δεν ανήκουν στην κατηγορία 1.

Παρατήρηση: Για ενδιάμεσες τιμές ιδιοπεριόδων γίνεται γραμμική παρεμβολή.

$$C_3 = 1.0 \quad \text{για θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου (} K_S > 0 \text{)}$$

$$C_3 = 1.0 + \frac{|a| \cdot (R - 1)^{3/2}}{T_e} \quad \text{για αρνητική κλίση του μετελαστικού κλάδου (} K_S < 0 \text{)}$$

όπου  $a = K_S / K_e$  (βλ. Σχ. 4.9).

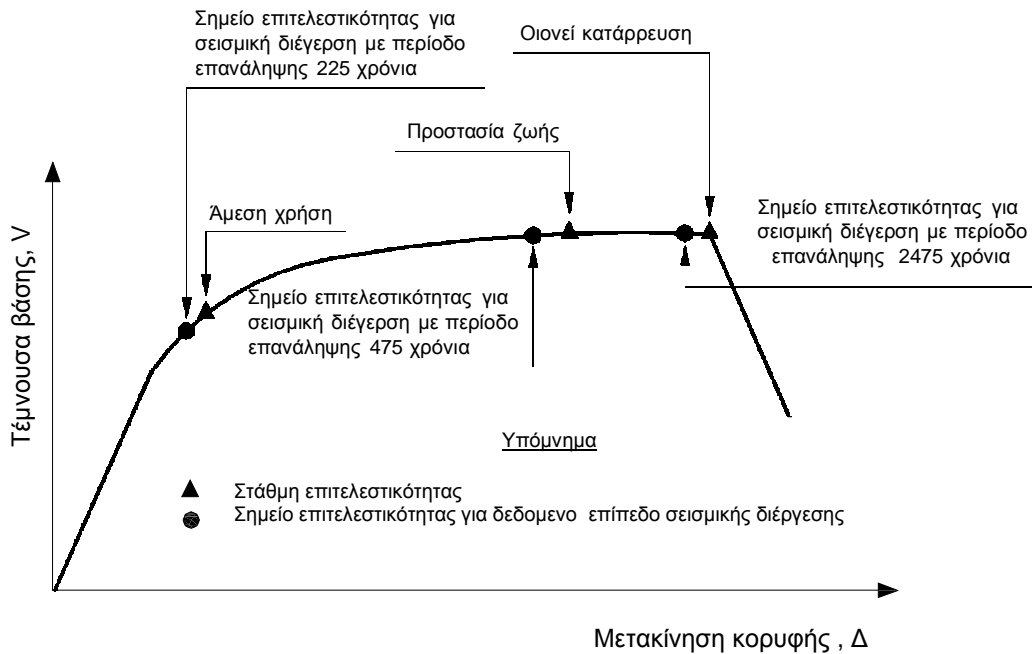
Η τιμή του συντελεστή  $C_3$  δεν χρειάζεται να υπερβαίνει την τιμή:

$$C_3 \leq 1.0 + 5 \frac{(\theta - 1)}{T_e}$$

Όπου  $\theta$  = συντελεστής σχετικής μεταθετότητας, ίσος με τη μέγιστη τιμή των αντίστοιχων συντελεστών των ορόφων,  $\theta_i$ , οι οποίοι ορίζονται από την σχέση:

$$\theta_i = \frac{P_i \cdot \delta_i}{V_{ih_i}} \quad (4.28)$$

Αφού υπολογιστεί η αναμενόμενη μετακίνηση της κατασκευής (μετακίνηση κορυφής) σημειώνεται στην καμπύλη αντίστασης το αντίστοιχο σημείο επιτελεστικότητας, το οποίο συγκρίνεται με την επιθυμητή στάθμη επιτελεστικότητας για τη συγκεκριμένη σεισμική διέγερση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για όλες τις στάθμες επιτελεστικότητας για τις οποίες γίνεται έλεγχος (Σχ. 4.10). Διαπιστώνεται έτσι εάν έχει υπερβληθεί ή όχι κάποιος στόχος σεισμικής ικανότητας (βλ. πίνακα 2.1).



Σχ. 4.9. Σύγκριση στοχευόμενης μετακίνησης και αντίστοιχης στάθμης επιτελεστικότητας.



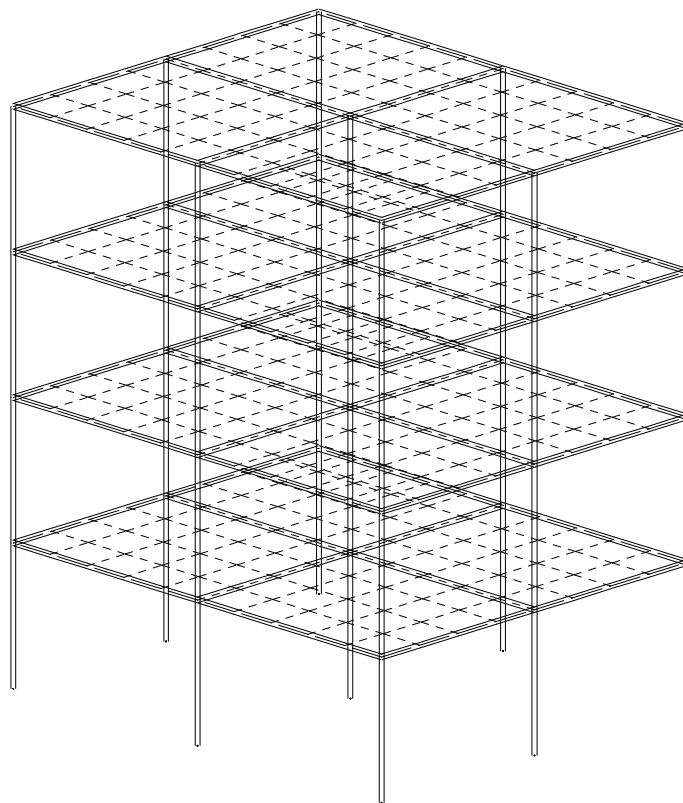
Για τη στοχευόμενη μετακίνηση που αντιστοιχεί σε κάποια στάθμη σεισμικής δόνησης, μπορεί να ελεγχθεί σε ποιά σημείο της δικής του καμπύλης  $F-\delta$  βρίσκεται κάθε στοιχείο. Στοιχεία, στα οποία υπάρχει υπέρβαση της επιθυμητής στάθμης επιτελεστικότητας, πρέπει να ενισχυθούν και η όλη διαδικασία να επαναληφθεί.

## 5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Στην συνέχεια επιχειρείται ο υπολογισμός της αναμενόμενης μετακίνησης μιας κατασκευής για σημείο επιτελεστικότητας με διάρκεια ζωής του έργου  $\Delta t = 50$  χρόνια και πιθανότητα υπέρβασης  $p = 10\%$ . Η περίοδος επανάληψης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$T_E = \frac{-\Delta t}{\ln(1-p)} = \frac{-50}{\ln(1-0.10)} = 475 \text{ χρόνια}$$

Συγκεκριμένα εξετάζεται ένα τετραώροφο κτίριο κατοικίας διαστάσεων κατόψεως  $10 \times 10 \text{ m}$ , με ύψος ορόφου  $3,0 \text{ m}$  πάχος πλακών  $0,15 \text{ m}$  διαστάσεις δοκών  $0,25 \times 0,60 \text{ m}$  διαστάσεις υποστυλωμάτων  $0,35 \times 0,35 \text{ m}$  πλην του κεντρικού υποστυλώματος που έχει διαστάσεις  $0,40 \times 0,40 \text{ m}$ . Σε κάθε στάθμη υπάρχουν 4 τετραέριστες πλάκες διαστάσεων  $5 \times 5 \text{ m}$ . Υπολογίστηκε ότι η πρώτη δεσπόζουσα ιδιοπερίοδος του κτιρίου είναι  $T_1 = 0,33 \text{ sec}$ , δίδεται η πιθανολογική καμπύλη (σχ. 5.2) και η καμπύλη αντίστασης της κατασκευής (σχ. 5.5)



Σχ. 5.1. Προσομοίωμα τετραώροφου κτιρίου

Οι μάζες των ορόφων είναι :  $m_1=m_2=m_3=m_4=110 \text{ Mgr}$

Λαμβάνεται υπόψη η 1<sup>η</sup> ιδιομορφή μόνον με πλήρως τριγωνική κατανομή

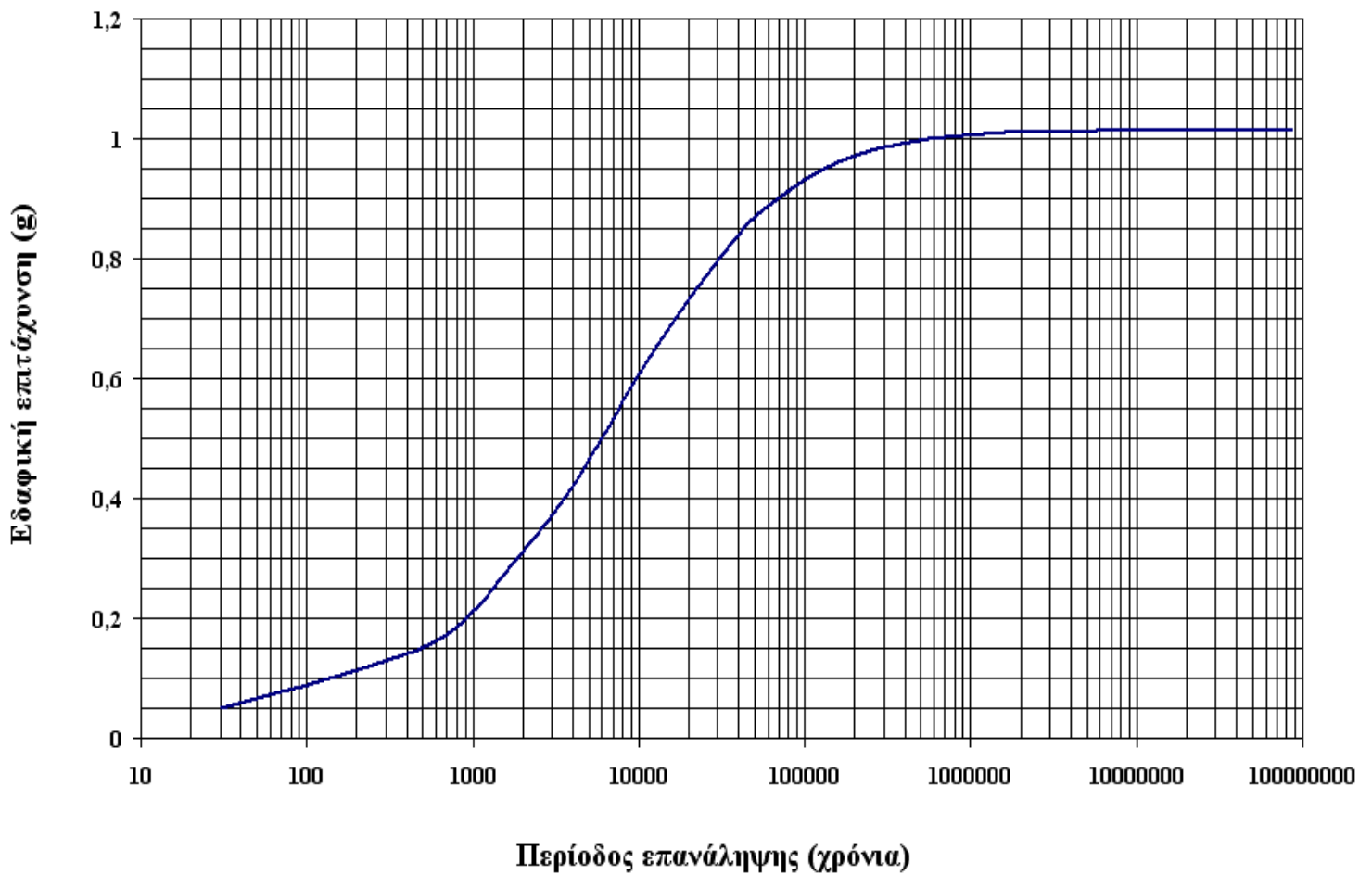
$$\varphi_{41}=1,0$$

$$\varphi_{31}=0,75$$

$$\varphi_{21}=0,50$$

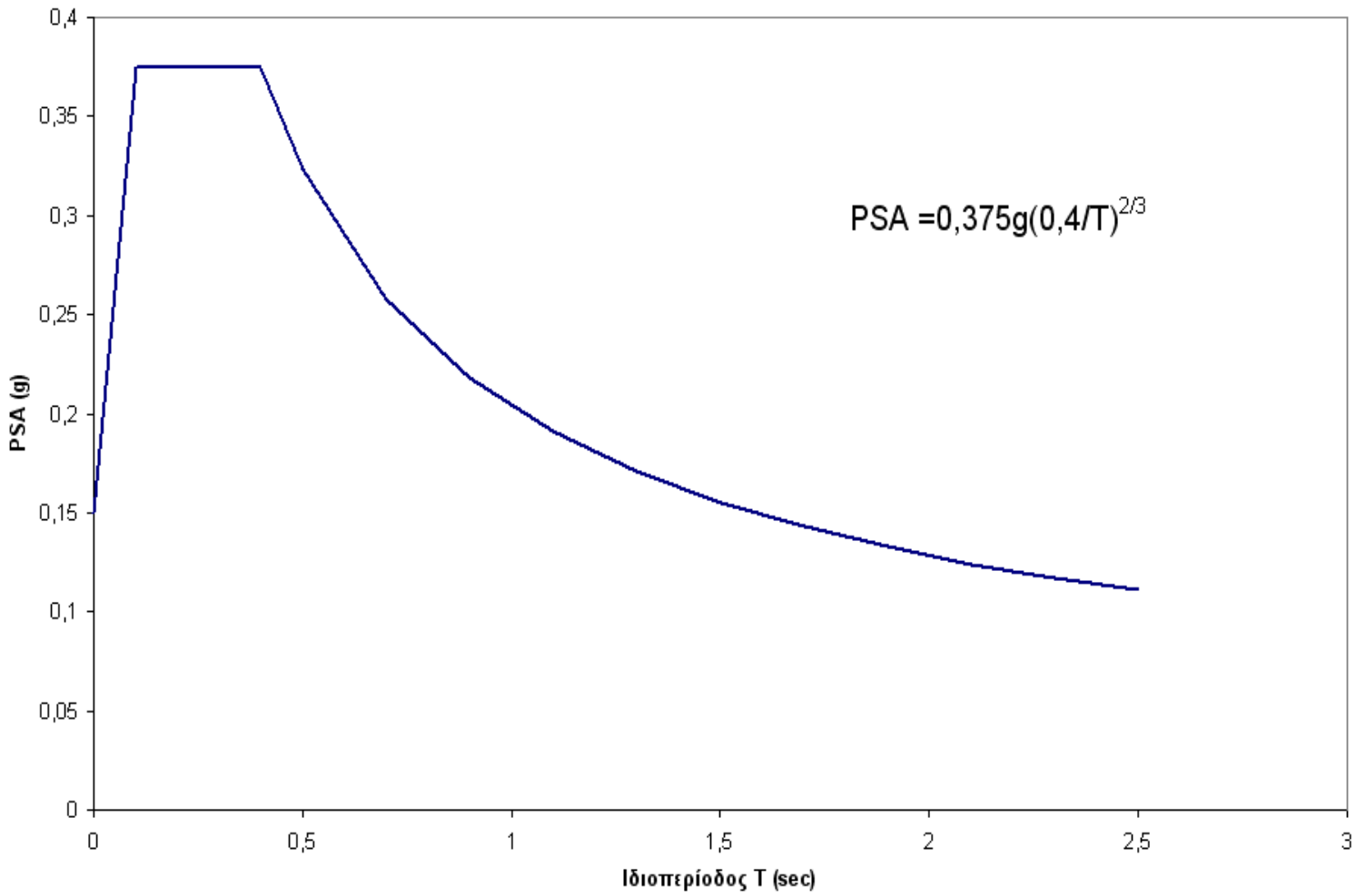
$$\varphi_{11}=0,25$$

Για περίοδο επανάληψης 475 χρόνια λαμβάνεται μέγιστη αναμενόμενη επιτάχυνση εδάφους από την Πιθανολογική καμπύλη (Σχ. 5.2.) 0,15 g



Σχ. 5.2. Πιθανολογική καμπύλη

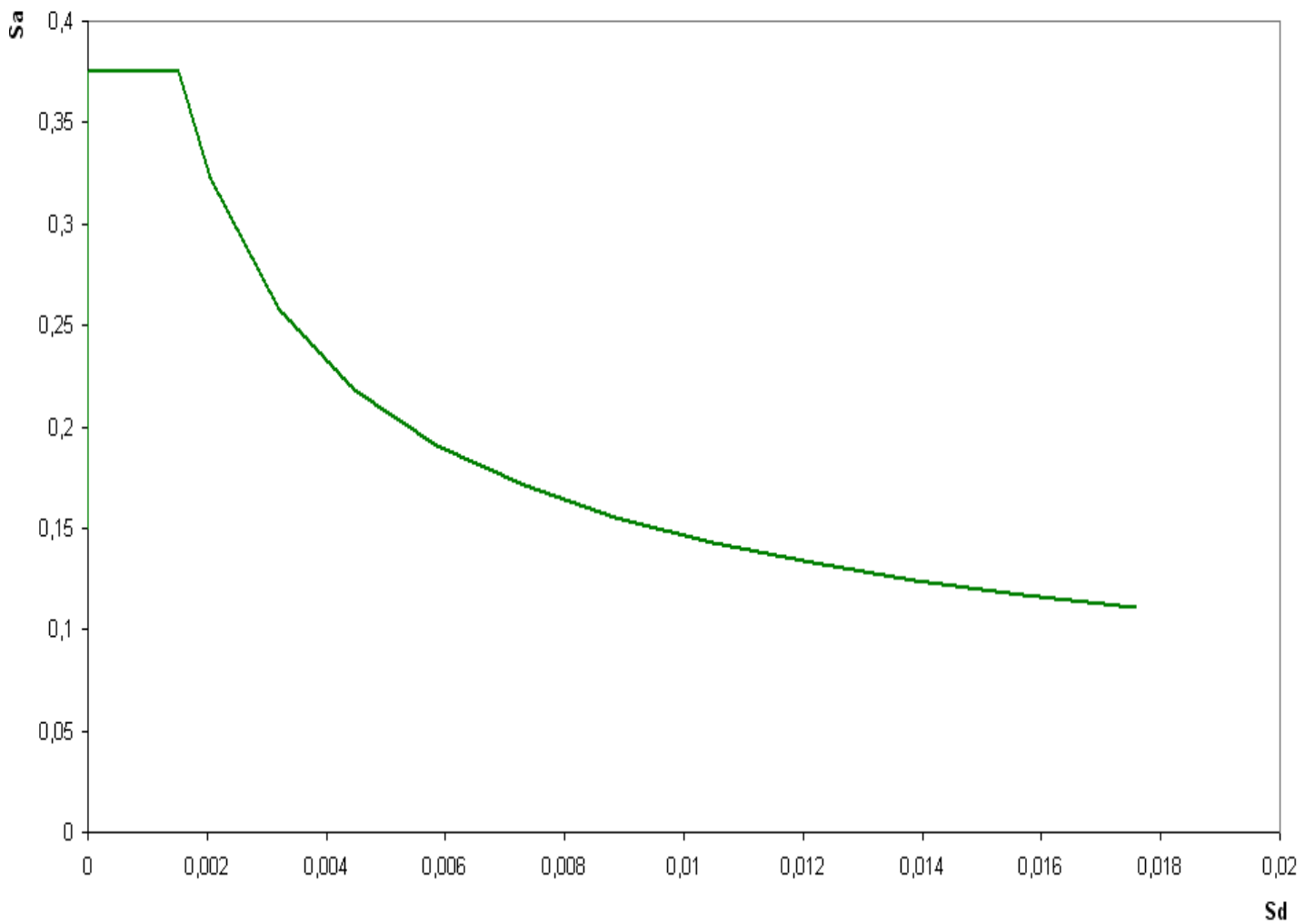
Στην συνέχεια σχεδιάζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού σύμφωνα με την κλασική μορφή που προτείνεται στον ΕΑΚ .



Σχ. 5.3. Ελαστικό φάσμα σχεδιασμού

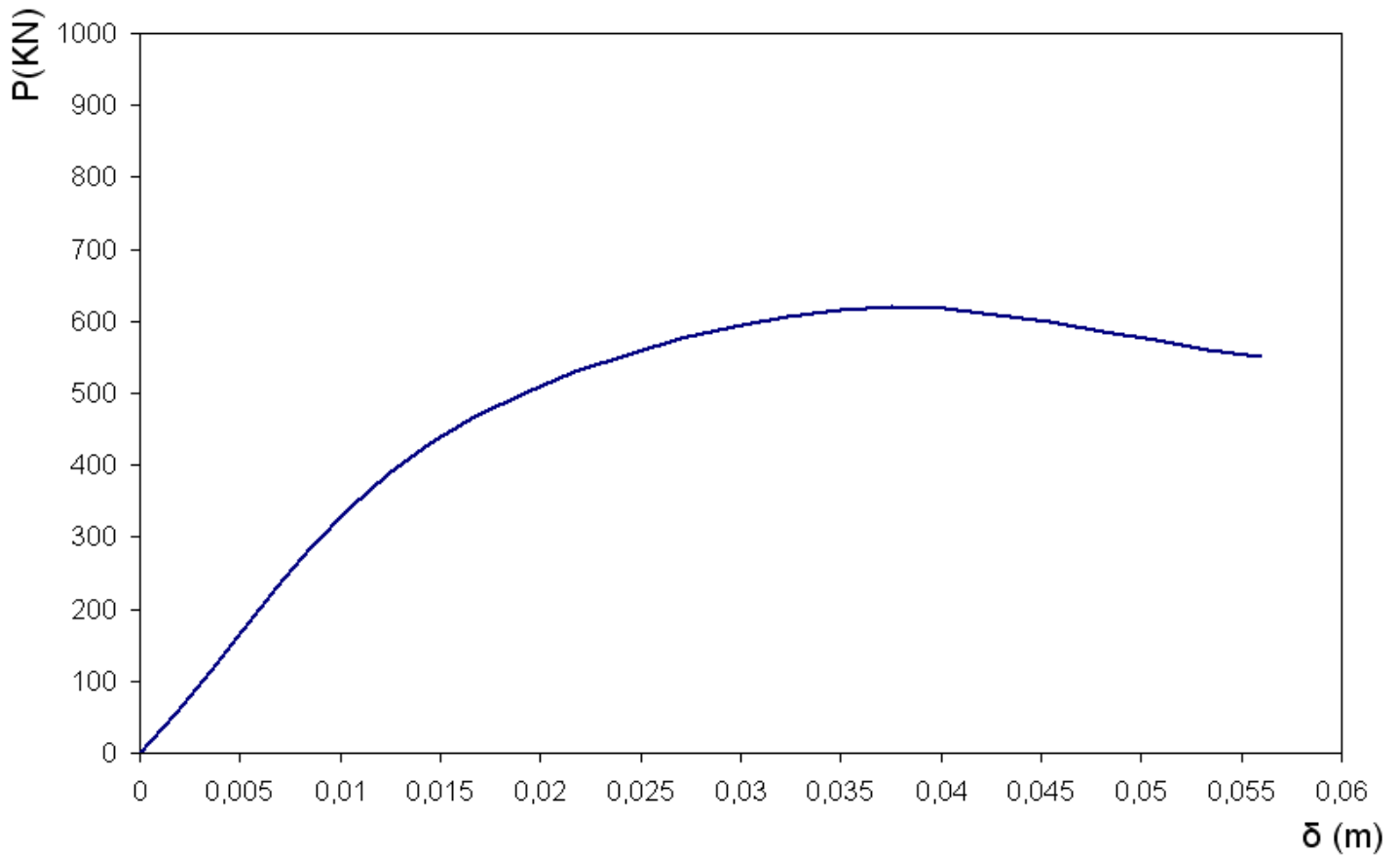
Έπειτα γίνεται η μεταφορά του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta=5\%$  στο πεδίο επιτάχυνση-μετακίνηση μορφή ADRS ( Σχ. 5.4. ), σύμφωνα με την κλασική σχέση

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} * S_a$$



Σχ. 5.4. ADRS μορφή φάσματος

Λαμβάνεται υπόψη η καμπύλη αντίστασης του κτιρίου ( Σχ.5.5.) Η κατασκευή της καμπύλης αντίστασης προέκυψε με χρήση στατικής μη γραμμικής ανάλυσης ( μεθοδολογία pushover ) για συγκεκριμένη κατανομή φορτίων καθ' ύψος όπως αυτή ορίζεται στην 1<sup>η</sup> ιδιομορφή του κτιρίου .

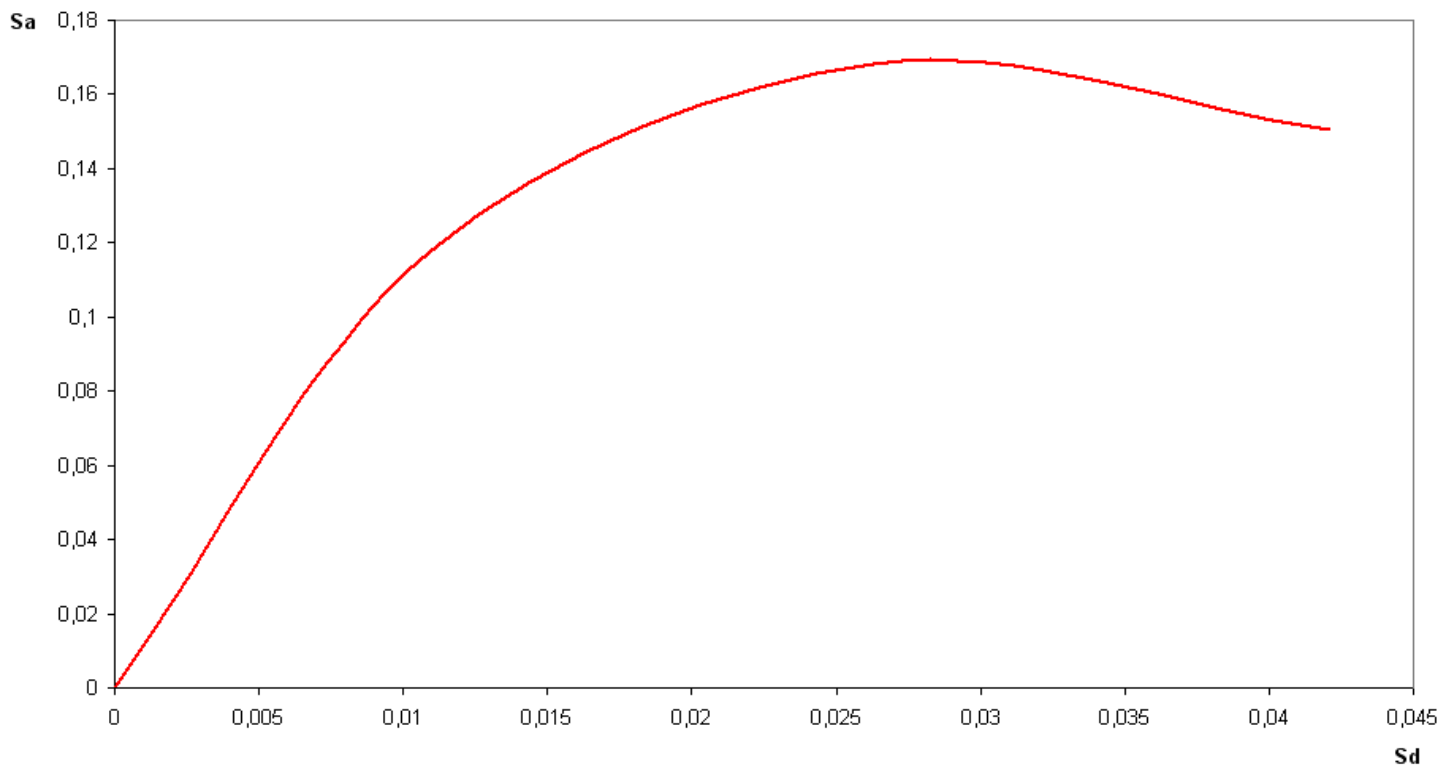


Σχ. 5.5. Καμπύλη αντίστασης του κτιρίου

Έπειτα η καμπύλη αυτή μετατρέπεται σε φάσμα αντίστασης του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος ( Σχ. 5.6. ) , με τις παρακάτω σχέσεις:

$$\Gamma = \frac{\sum m_i \varphi_i}{\sum m_i \varphi_i^2} , \quad S_\alpha = \frac{P}{\alpha * m_{ολ}} , \quad S_d = \frac{\delta}{\Gamma} , \quad \alpha = \frac{\Gamma * \sum m_i \varphi_i}{m_{ολ}}$$

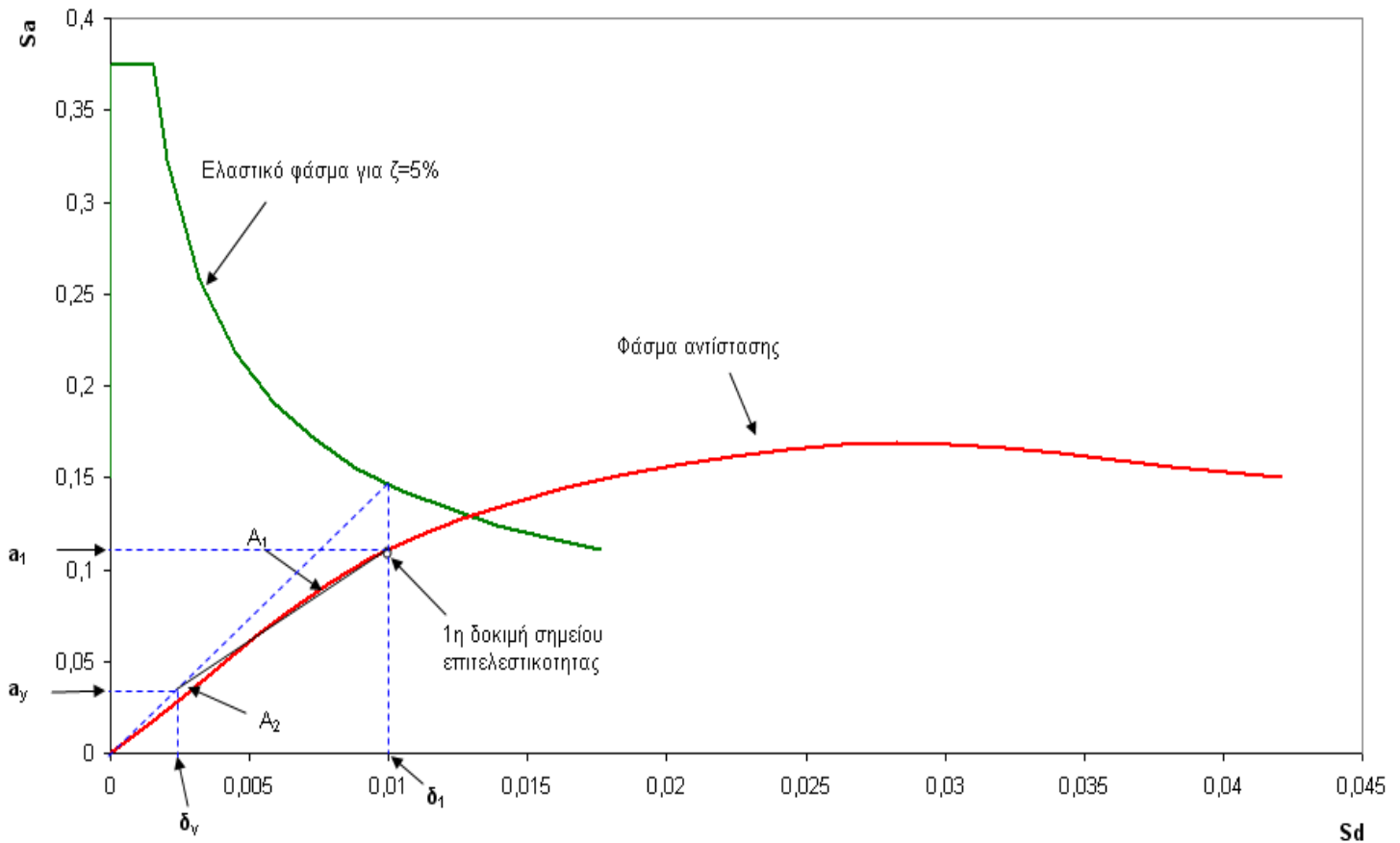
$$\Gamma = \frac{110*0,25+110*0,50+110*0,75+110*1}{110*0,25^2+110*0,50^2+110*0,75^2+110*1^2} = \frac{275}{206,25} = 1,33 , \quad \alpha = \frac{1,33*275}{440} = 0,831$$



Σχ. 5.6. Φάσμα αντίστασης ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος

Στην συνέχεια μεταφέρουμε σε ένα διάγραμμα το ελαστικό φάσμα για  $\zeta=5\%$  και το φάσμα αντίστασης ( Σχ.5.7.) .Από το ελαστικό φάσμα για απόσβεση  $\zeta=5\%$  υπολογίζεται η μετακίνηση  $\delta_1$  για τη δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε ρηγματωμένες διατομές (τέμνουσα δυσκαμψία στο θεωρητικό σημείο διαρροής).

Για τη μετακίνηση  $\delta_1$  υπολογίζεται η πρώτη εκτίμηση του σημείου επιτελεστικότητας πάνω στο φάσμα αντίστασης και η αντίστοιχη επιτάχυνση  $a_1$ . Η μετακίνηση  $\delta_1$  είναι η τιμή που θα προέκυπτε από τη θεώρηση ίσης μετακίνησης μεταξύ του ελαστικού και ανελαστικού συστήματος.



Σχ. 5.7. Εύρεση πρώτου σημείου δοκιμών

Από το 1<sup>ο</sup> σημείο δοκιμής φέρνουμε ευθεία, έτσι ώστε τα εμβαδά  $A_1$  και  $A_2$  να είναι περίπου ίσα και ορίζουμε το σημείο τομής με την ευθεία που αντιστοιχεί στην αρχική δυσκαμψία. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στη διαρροή σύμφωνα με τη διγραμμική καμπύλη συμπεριφοράς και η προβολή του στους άξονες  $S_a$  και  $S_d$  ορίζει την επιτάχυνση διαρροής,  $a_y$  και τη μετακίνηση διαρροής,  $\delta_y$  αντίστοιχα.

$$a_1 = 0,11 \quad , \quad \delta_1 = 0,01$$

$$a_y = 0,025 \quad , \quad \delta_y = 0,0015$$



Υπολογίζουμε την ενεργό απόσβεση

Η ενεργός απόσβεση μπορεί να γραφτεί ως:

$$\zeta_{\text{eff}} = \zeta_{\text{ελ}} + \zeta_{\text{υστ}}$$

όπου:  $\zeta_{\text{ελ}}$  = απόσβεση κατασκευής για ελαστική συμπεριφορά (= 0.05 για Ω.Σ.)

$\zeta_{\text{υστ}}$  = υστερητική απόσβεση λόγω ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς

(Οι τιμές για τον συντελεστή  $\kappa$  για τύπο συμπεριφοράς A δίνονται στον πίνακα 5.2)

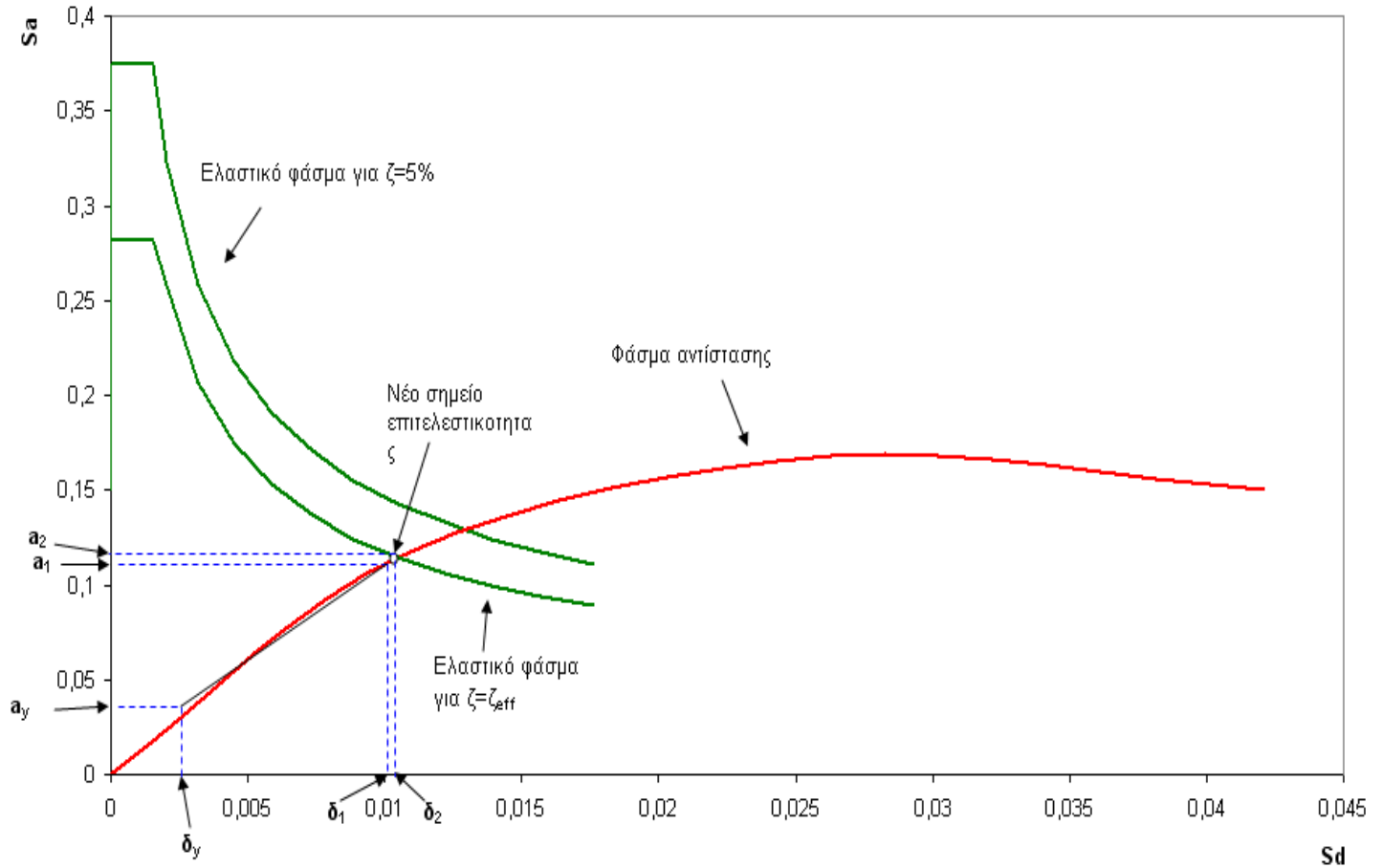
$$\begin{aligned} \zeta_{\text{eff}} (\%) &= 5 + \frac{63,7 * \kappa * (\alpha_y * \delta_1 - \delta_y * \alpha_1)}{\alpha_1 * \delta_1} = \\ &= 5 + \frac{63,7 * 1 * (0,025 * 0,01 - 0,0015 * 0,11)}{0,11 * 0,01} = \\ &= 5 + \frac{63,7 * (0,00030 - 0,00020)}{0,0011} = \\ &= 5 + 5,80 = 10,80 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται το ελαστικό φάσμα σχεδιασμού που αντιστοιχεί σε απόσβεση  $\zeta = \zeta_{\text{eff}}$  με πολλαπλασιασμό των τιμών του φάσματος για  $\zeta = 5\%$  με τους συντελεστές  $SR_A$  και  $SR_V$ . Οι ελάχιστες τιμές των συντελεστών για τύπο συμπεριφοράς A δίνονται στον πίνακα 5.3.

$$SR_A = \frac{1}{B_s} = \frac{3,21 - 0,68 * \ln \zeta_{\text{eff}}}{2,12} = \frac{3,21 - 0,68 * \ln 10,80}{2,12} = 0,75 > SR_{A_{\text{min}}}$$

$$SR_V = \frac{1}{B_L} = \frac{2,31 - 0,41 * \ln \zeta_{\text{eff}}}{1,65} = \frac{2,31 - 0,41 * \ln 10,80}{1,65} = 0,80 > SR_{V_{\text{min}}}$$

Το σημείο τομής μεταξύ του φάσματος σχεδιασμού για  $\zeta=\zeta_{eff}$  και του φάσματος αντίστασης ορίζει το νέο σημείο επιτελεστικότητας. Η προβολή αυτού του σημείου στους άξονες  $S_a$  και  $S_d$  ορίζει την νέα επιτάχυνση,  $a_2$  και τη νέα μετακίνηση,  $\delta_2$  αντίστοιχα.



Σχ. 5.8. Εύρεση νέου σημείου επιτελεστικότητας

$$a_2 = 0,118 \quad \delta_2 = 0,0103$$

Έλεγχος σύγκλισης

$$\text{Πρέπει } 0,95 * \delta_1 < \delta_2 < 1,05 * \delta_1$$

$$0,95 * \delta_1 = 0,95 * 0,01 = 0,0095 > \delta_2$$

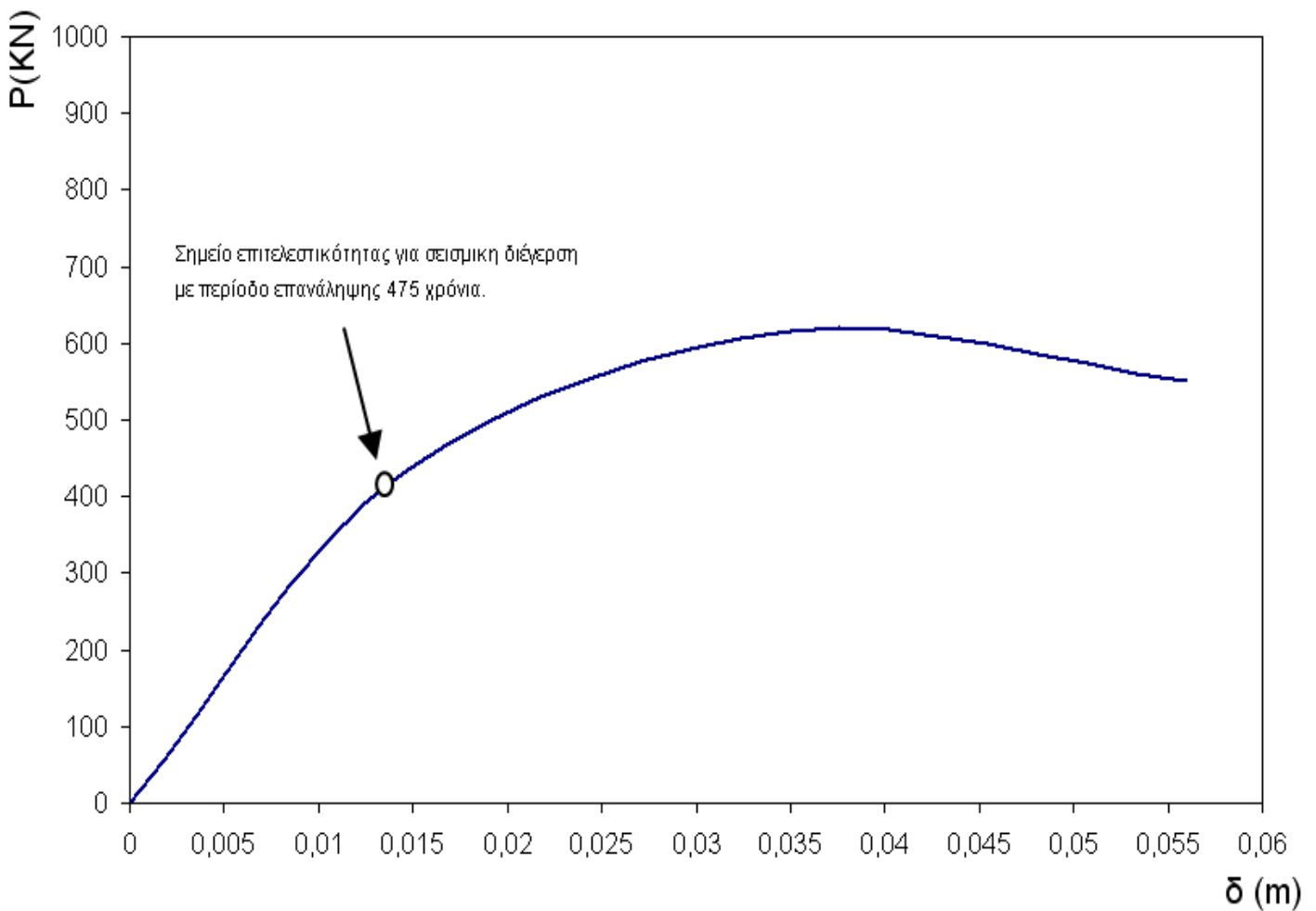
Άρα ισχύει

$$1,05 * \delta_1 = 1,05 * 0,01 = 0,00105 < \delta_2$$

Αφού το κριτήριο ικανοποιείται, η μετακίνηση  $\delta_2$  αντιστοιχεί στη μέγιστη αναμενόμενη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (στοχευόμενη μετακίνηση). Η μετακίνηση της κορυφής  $\delta$  της καμπύλης αντίστασης, που αντιστοιχεί στη μετακίνηση  $\delta_2$  του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος, υπολογίζεται από τη σχέση (4.6).

$$S_d = \frac{\delta}{\Gamma} \rightarrow \delta = \delta_2 * \Gamma \rightarrow \delta = 0,0103 * 1,33 \rightarrow \delta = 0,0137 \text{ m}$$

Άρα για σημείο επιτελεστικότητας για σεισμική διέγερση με περίοδο επανάληψης 475 χρόνια η αναμενόμενη μετακίνηση που επιτρέπεται να πάρει η κατασκευή είναι 0,0137 m



Σχ. 5.9. Καμπύλη αντίστασης του κτιρίου

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

[1] Γιάννης Ν. Ψυχάρης (2007) “Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας ” , Σημειώσεις για το μάθημα του 9<sup>ο</sup> εξαμήνου Αντισεισμική τεχνολογία 2 , Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

[2] Παπασταματίου (1997) “ Τεχνική σεισμολογία ” Αθήνα.

[3] Τσελέντης Α. (1997) “ Σύγχρονη Σεισμολογία , Τόμος β ”, Παπασωτηρίου , Αθήνα.

[4] ΚΑΝ.ΕΠΕ(2009) “Κανονισμός Επεμβάσεων Τελικό κείμενο -3 ”Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.) Αθήνα.

[5] Craig D. Comartin ,Richard W. Niewiarowski, Christopher Rojahn (1996)  
“Applied Technology Council , ATC \_40 ” State of California

[6] Σπυράκος Κ. (2004) “ Ενίσχυση κατασκευών για σεισμικά φορτία ” , Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.

[7]Αβραμίδης Ι.Ε. (2003) “Ανάλυση κατασκευών –Γενική εισήγηση– ”, Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Στατικής , Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

[8] Ugo Morelli, Thomas R. McLane, ( 2000) “ FEMA \_356 ” Federal Emergency Management Agency ,Washington

[9] EC8 (2004) “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance British Standard” , CEN/TC250/SC1

[10]EAK (2000) “ Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός 2000 ”Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας (Ο.Α.Σ.Π.) Αθήνα.