ΡΑΦ

ΣΤΑΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ
Εκδ. 4.xx

ΥΠΟΜΟΝΑΔΑ 'ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ'

ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ ΕΚ 8.1 , ΕΚ 8.3 ΚΑΙ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ & ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ

ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΟΙΚΟΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
www.tol.com.gr

Μαϊος 2013

ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΟΙΚΟΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ

Καρτερού 60, 71201 Ηράκλειο - Τηλ.: 2810.332684
www.tol.com.gr info@tol.com.gr

Copyright © 2008-2013

Απαγορεύεται οποιαδήποτε μερική ή ολική ανατύπωση, αναδημοσίευση, φωτοτύπηση ή αναπαραγωγή με άλλο τρόπο ολόκληρου του παρόντος ή μέρους του, χωρίς την σύμφωνη γνώμη και την γραπτή άδεια του εκδότη.
Το περιεχόμενο του κειμένου, αντιστοιχεί στην τελική έκδοση του προϊόντος λογισμικού που συνοδεύει, όποτε αυτό είναι δυνατό. Το περιεχόμενο του τεύχους αυτού είναι δυνατό να αλλάξει από τον εκδότη χωρίς προειδοποίηση. Ο εκδότης δεν φέρει καμία ευθύνη για την πληρότητα ή και την ορθότητα του κειμένου και δεν φέρει καμία ευθύνη για τυχόν ζημία ή απώλεια οποιουδήποτε είδους που οφείλεται στο περιεχόμενο αυτού του τεύχους.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ 8

1.1 Οι βασικές έννοιες της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης 8

1.2 Αδυναμίες, περιορισμοί και δυνατότητες της υπερωθητικής ανάλυσης 10

1.3 Οι στόχοι και η γενική περιγραφή της υπερωθητικής ανάλυσης στους εφαρμοζόμενους κανονισμούς στην Ελλάδα: EN1998-1, EN1998-3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ. 13

2. ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ 18

2.1 ΒΗΜΑ 1: Ελαστική και αδρανειακή διακριτοποίηση 20

2.2 ΒΗΜΑ 2: Προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων της κατασκευής 20

2.2.1 Διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων 24

2.2.2 Διαγράμματα ροπών-στροφών των πλαστικών αρθρώσεων 30

2.2.3 Διαγράμματα ροπής-στροφής χορδής δομικών στοιχείων 34

2.2.4 Ενεργός δυσκαμψία δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος 40

2.2.5 Επιρροή των φαινομένων p-δ 42

2.3 ΒΗΜΑ 3: Επιλογή της καθ' ύψος κατανομής των οριζοντίων στατικών δυνάμεων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις της σεισμικής διέγερσης 43

2.4 ΒΗΜΑ 4: Προοδευτική εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων και σχεδίαση της υπερωθητικής καμπύλης (ΥΚ) 44

2.4.1 Καθορισμός του κόμβου ελέγχου 44

2.4.2 Σύντομη περιγραφή της επαυξητικής διαδικασίας 45

2.4.3 Οι έλεγχοι διατμητικής αστοχίας 47

2.5 ΒΗΜΑ 5: Προσδιορισμός της απαίτησης – Υπολογισμός της «μετακίνησης-στόχου» 52

2.5.1 Περιγραφή των μεθόδων του EN1998-1 και του ΚΑΝ.ΕΠΕ. 52

2.5.2 Αριθμητικές εφαρμογές 58

2.6 ΒΗΜΑ 6: Αποτίμηση της συμπεριφοράς της κατασκευής 64

2.6.1 Υπολογισμός μεγεθών απόκρισης για την αποτίμηση 64

2.6.2 Έλεγχοι επιτελεστικότητας 68

3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ 82

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 85

5. ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ 89

5.1 Εισαγωγή Δεδομένων 89

5.2 Χειρισμοί Υπερωθητικής Ανάλυσης 93

5.2.1 Πίνακας Χειρισμών Υπερωθητικής Ανάλυσης 93

5.3 Αποτελέσματα Υπερωθητικής Ανάλυσης 99

5.3.1 Καμπύλη Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας 99

5.3.2 Υπολογισμός Καμπύλης Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας 102

5.3.3 Αλληλουχία Διαρροών 103

5.3.4 Έλεγχος Επάρκειας Δομικών Στοιχείων μη Γραμμικής Ανάλυσης 105

5.4 Τεύχος Υπολογισμών 109

5.4.1 Υπερωθητική ανάλυση 109

ΡΑΦ

Στατική Υπερωθητική Ανάλυση

ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΘΕΩΡΗΤΙΚΗΣ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ

ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ – ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟΥΣ EN1998-1,-3 & ΚΑΝ.ΕΠΕ.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Οι βασικές έννοιες της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης

Με τον όρο «στατική υπερωθητική ανάλυση» αποδίδεται στα ελληνικά ο αγγλικός όρος «static pushover analysis» και σημαίνει τη διενέργεια της υλικώς (αλλά ενδεχομένως και γεωμετρικώς) μη-γραμμικής ανάλυσης για μονότονη και σταδιακά αυξανόμενη στατική φόρτιση (επαυξητική διαδικασία) μέχρι την έλευση της κατάρρευσης του κτιρίου που αναλύεται. Στην αρχική της μορφή η υπερωθητική ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ως μία μέθοδος προσδιορισμού του οριακού φορτίου, στα πλαίσια της οποίας μετά από την διενέργεια της επαυξητικής διαδικασίας λαμβάνονταν μία καμπύλη εξωτερικών φορτίων-μετακινήσεων (*υπερωθητική καμπύλη*).

Προκειμένου να γίνει κατανοητό το βασικό υπόβαθρο επί του οποίου στηρίζεται ο υπολογισμός στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης, θα πρέπει να γίνει μία αρχική αναφορά στις θεμελιώδεις έννοιες της. Οι έννοιες αυτές είναι η **απαίτηση** και η **ικανότητα** κυρίως αλλά και η επιπροσθέτως η **συμπεριφορά**. Η συμπεριφορά της κατασκευής εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο η ικανότητα μπορεί να ικανοποιεί ή όχι την απαίτηση. Δηλαδή θα πρέπει η κατασκευή να έχει την ικανότητα να αντιστέκεται στην απαίτηση που επιβάλλει η σεισμική διέγερση έτσι ώστε η συμπεριφορά της να είναι συμβατή με της στόχους που ενδεχομένως έχουν μπει για τον ανασχεδιασμό της. Επιπλέον η διερεύνηση του «μεγέθους» της απαίτησης σε σχέση με το «μέγεθος» της ικανότητας παρέχει πληροφορία για την αναμενόμενη συμπεριφορά της υπάρχουσας κατασκευής με δεδομένη σχεδίαση φέροντος οργανισμού γενικότερα και δομικών στοιχείων ειδικότερα.

Η υπερωθητική ανάλυση ως μια απλοποιημένη ανελαστική μέθοδος που στηρίζεται στον έλεγχο των μετακινήσεων απαιτεί τον προσδιορισμό τριών βασικών παραμέτρων δηλ. της ικανότητας, της απαίτησης σε μετακίνηση και της συμπεριφοράς.

(α) ***Ικανότητα***: Η ικανότητα της κατασκευής προκύπτει από την ικανότητα των επιμέρους δομικών στοιχείων που την αποτελούν. Ο προσδιορισμός της ικανότητας της κατασκευής σε συνθήκες της οποίες διάφορες περιοχές των δομικών στοιχείων της έχουν εισέλθει στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς, απαιτεί την γνώση της συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων πέρα από το όριο

διαρροής. Επομένως αποτελεί βασικό δεδομένο της υπερωθητικής ανάλυσης η εισαγωγή στο υπολογιστικό προσομοίωμα των ανελαστικών χαρακτηριστικών των διατομών των δομικών στοιχείων (π.χ. διαγράμματα Μ-κ, διαγράμματα αλληλεπίδρασης ροπών-αξονικών δυνάμεων). Παρακάτω θα δοθεί αναλυτικά η περιγραφή της μεθόδου με την οποία επιτυγχάνεται προσδιορισμός της ικανότητας που στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης εκφράζεται μέσω της σχεδίασης της **υπερωθητικής καμπύλης** (ή καμπύλης ικανότητας). Η υπερωθητική καμπύλη είναι η γραφική παράσταση της σχέσης που συνδέει την τέμνουσα βάσης μιας κατασκευής με την μετακίνηση σε ένα προκαθορισμένο σημείο κατά κανόνα στην κορυφή της. Αυτονόητο είναι ότι η επιλεχθείσα μετακίνηση θα πρέπει να έχει την ίδια διεύθυνση με την διεύθυνση εισαγωγής των σεισμικών φορτίων της της και ότι η τέμνουσα βάσης συντίθεται από της δυνάμεις των κατακόρυφων στοιχείων της κατασκευής στη βάση της κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση εισαγωγής των σεισμικών φορτίων.

(β) ***Απαίτηση***: Είναι γνωστό ότι κατά τη διάρκεια της σεισμικής διέγερσης η κίνηση του εδάφους προκαλεί σύνθετες μετακινήσεις της ανωδομές των κατασκευών οι οποίες είναι μεταβαλλόμενες με το χρόνο. Για την παρακολούθηση της μεταβολής των μετακινήσεων αυτών απαιτείται προσομοίωση των δράσεων που επιβάλλει η σεισμική διέγερση. Στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται ένα σύνολο πλευρικών μετακινήσεων. Έτσι για μία δεδομένη κατασκευή αλλά και για μία δεδομένη σεισμική διέγερση η απαίτηση σε μετακίνηση αποτελεί εκτίμηση της μέγιστης αναμενόμενης σεισμικής απόκρισης της κατασκευής. Αυτή η εκτιμώμενη απαίτηση σε μετακίνηση εκφράζεται μέσω του υπολογισμού της **μετακίνησης-στόχου** του σημείου που έχει επιλεγεί για τον σχεδιασμό της καμπύλης ικανότητας. Για τον υπολογισμό της της μετακίνησης-στόχου δίνονται διάφορες μεθοδολογίες στα σχετικά κανονιστικά κείμενα (βλ. π.χ. ATC-40, FEMA356, EN1998-1,3, ΚΑΝ.ΕΠΕ).

(γ) **Συμπεριφορά**: Έχοντας ήδη καθορίσει την ικανότητα (με βάση τη σχεδίαση της υπερωθητικής καμπύλης), και την απαίτηση (μέσω του υπολογισμού της μετακίνησης-στόχου) το επόμενο βήμα είναι ο έλεγχος της συμπεριφοράς της κατασκευής. Με τον έλεγχο αυτό επιχειρείται η εξασφάλιση ότι τα φέροντα αλλά και τα μη φέροντα στοιχεία δεν έχουν υποστεί βλάβες πέρα από τα επιτρεπτά όρια για το δεδομένο επίπεδο συμπεριφοράς (**στάθμη επιτελεστικότητας**) για το

οποίο έγινε η αποτίμηση της κατασκευής θεωρώντας πάντα ότι η κατασκευή υποβάλλεται σε μετακινήσεις που αντιστοιχούν στην απαίτηση που τέθηκε για την μετακίνηση.

1.2 Αδυναμίες, περιορισμοί και δυνατότητες της υπερωθητικής ανάλυσης

Της τονίστηκε στην παράγραφο 1.1, και – κυρίως – με βάση τα σύγχρονα κανονιστικά κείμενα, η υπερωθητική ανάλυση αποτελεί το πλέον διαδεδομένο υπολογιστικό «εργαλείο» για την αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας υφιστάμενων αλλά και νέων κτιρίων. Η δυνατότητα της να δίνει αποτελέσματα και πληροφορίες της οποίες δεν είναι δυνατό να έχει ο μελετητής από της κλασσικές ελαστικές αναλύσεις δεν πρέπει να αποτελεί επιχείρημα για την απόκρυψη των αδυναμιών και των περιορισμών που τίθενται κατά την εφαρμογή της. Η παρουσίαση των αδυναμιών αυτών αποτελεί υποχρέωση της της μηχανικούς που θα κληθούν να την εφαρμόσουν διότι θα της προφυλάξει από την εσφαλμένη εντύπωση που πιθανώς θα δημιουργηθεί για την αξιοπιστία και τα όρια εφαρμογής της μεθόδου. *Μια γενική αρχή που θα πρέπει να έχει κανείς κατά νου είναι ότι τα αποτελέσματα της υπερωθητικής ανάλυσης έχουν μεγαλύτερη ποιοτική παρά ποσοτική αξία*. Έτσι με βάση τη λογική που εκτέθηκε, ακολούθως παρουσιάζονται οι βασικές αδυναμίες της υπερωθητικής ανάλυσης οι οποίες είναι εν συντομία οι εξής:

(α) Η υπερωθητική ανάλυση στηρίζεται στην σημαντική παραδοχή ότι η απόκριση της πολυβάθμιου συστήματος σχετίζεται με την απόκριση της ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Αν εξαιρεθούν κάποια συστήματα στα οποία η θεμελιώδης ιδιομορφή είναι κυρίαρχη στην απόκριση, η παραπάνω παραδοχή δεν μπορεί να έχει γενική ισχύ. Πέραν τούτου της εφόσον η υπερωθητική ανάλυση είναι ανελαστική ανάλυση κατά την εκτέλεση της πλαστικοποιούνται διάφορα σημεία της φορέα με συνέπεια η θεμελιώδης ιδιομορφή να μεταβάλλεται συνεχώς. Παρόλα αυτά η επαύξηση των φορτίων γίνεται με βάση την θεμελιώδη ιδιομορφή του ελαστικού συστήματος (δηλ. του αρχικού συστήματος πριν της πλαστικοποιήσεις).

(β) Λόγω του γεγονότος ότι η υπερωθητική ανάλυση λαμβάνει υπόψη την πρώτη μόνον ιδιομορφή ταλάντωσης για την κατανομή των στατικού τύπου σεισμικών φορτίων, υπάρχει περίπτωση να εμφανιστούν σοβαρές αποκλίσεις

από την πραγματική απόκριση αν σε κάποια κτίρια η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών στη συνολική απόκριση είναι ιδιαίτερα σημαντική. Για τον λόγο αυτό στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνεται σε κτίρια της της κατηγορίας η ταυτόχρονη εκτέλεση και δυναμικής φασματικής ανάλυσης, και ταυτόχρονη επεξεργασία των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από της δύο μεθόδους.

(γ) Η υπερωθητική ανάλυση αναπτύχθηκε με βάση τη θεώρηση επίπεδων συστημάτων. Έτσι η εφαρμογή της σε χωρικά συστήματα αποτελεί θέμα προβληματισμού σε ερευνητικό επίπεδο. Κάποια ερωτήματα που προκύπτουν εύλογα στην περίπτωση αυτή αφορούν στην βέλτιστη κατανομή δυνάμεων, στην κατάλληλη διεύθυνση της αλλά και στην επιλογή του μεγέθους μετακίνησης που μπορεί να θεωρηθεί ως μετακίνηση στόχος. Τα κανονιστικά κείμενα που ισχύουν δίνουν οδηγίες για κάποια από αυτά τα ερωτήματα χωρίς της να τα αντιμετωπίζουν με επαρκή τεκμηρίωση.

(δ) Στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης δεν αντιμετωπίζεται η προοδευτική απομείωση της δυσκαμψίας λόγω της ανακυκλιζόμενης φόρτισης του σεισμού, η οποία παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην δυναμική απόκριση της κατασκευής κατά τη διάρκεια της σεισμού. Της ο στατικός χαρακτήρας της υπερωθητικής ανάλυσης εμποδίζει τη θεώρηση της απορρόφησης ενέργειας από την κατασκευή λόγω της δυναμικής απόκρισης (π.χ. ιξώδης απόσβεση) και θεωρεί μόνον την απορρόφηση ενέργειας μέσω των παραμορφώσεων.

(ε) Θεωρείται μόνον η οριζόντια σεισμική φόρτιση. Η κατακόρυφη συνιστώσα της σεισμικής διέγερσης που ενδεχομένως σε ειδικές περιπτώσεις έχει μεγάλη επιρροή στην απόκριση δεν λαμβάνεται υπόψη. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δηλώνει ότι στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης μπορεί να αγνοηθεί η επιρροής της κατακόρυφης συνιστώσας. Ενδεχομένως τεχνικές θεώρησης της κατακόρυφης σεισμικής συνιστώσας στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης να είναι διαθέσιμες της σε ερευνητικό επίπεδο και χωρίς να έχουν την επαρκή τεκμηρίωση.

(στ) Κατά την εφαρμογή της υπερωθητικής ανάλυσης διαχωρίζεται εμφανώς η ικανότητα (σχεδίαση της υπερωθητικής καμπύλης) και της απαίτησης (υπολογισμός της μετακίνησης-στόχου η οποία επιβάλλεται από μία σεισμική διέγερση). Αυτό της δεν είναι ακριβές αφού η ανελαστική απόκριση της κατασκευής εξαρτάται σαφώς από τη σεισμική διέγερση και αντίστοιχα η

ικανότητα της κατασκευής σχετίζεται πάντα με την απαίτηση της της της κατασκευής δηλ. από την παραμόρφωση που «απαιτεί» η εκάστοτε σεισμική διέγερση.

Παρά της αδυναμίες που εκτέθηκαν πιο πάνω η συνεισφορά της υπερωθητικής ανάλυσης στο πεδίο που κατά κανόνα εφαρμόζεται (δηλ. στα πλαίσια της αποτίμησης και της ενδεχόμενης ενίσχυσης υφιστάμενων κατασκευών) είναι μεγάλη καθώς οι πληροφορίες που παρέχει είναι σύμφωνα με της Krawinkler και Seneviratha (1998) οι εξής:

(α) Δίνει μία πιο ρεαλιστική εκτίμηση της κατανομής της έντασης σε μια κατασκευή αφού έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των δυνάμεων που αναπτύσσονται στα δομικά στοιχεία, στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς, δυνατότητα που ως γνωστό δεν μπορούν να έχουν οι ελαστικές μέθοδοι ανάλυσης.

(β) Εκτιμά της απαιτούμενες παραμορφώσεις των δομικών στοιχείων που μέσω της ανελαστικής της συμπεριφοράς απορροφούν σεισμική ενέργεια.

(γ) Δίνει πολύτιμες πληροφορίες για την επιρροή της απομείωσης της αντοχής αλλά και για επιρροής της αστοχίας μεμονωμένων δομικών στοιχείων στην συνολική αντοχή του συστήματος.

(δ) Βοηθά στον εντοπισμό των κρίσιμων-ευαίσθητων περιοχών των κατασκευών όπου αναμένεται αυξημένη απαίτηση για την ανάπτυξη πλαστικών παραμορφώσεων.

(ε) Βοηθά στον εντοπισμό των τυχών ασθενών ορόφων ή τμημάτων του φορέα.

(στ) Εκτιμά της γωνιακές παραμορφώσεις γειτονικών ορόφων οι οποίες σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να εμφανίζουν ασυνέχειες αντοχής ή/και δυσκαμψίας. Άρα είναι δυνατό να ελεγχθεί το επίπεδο των βλαβών σε μη φέροντα στοιχεία αλλά και η σοβαρή επιρροή ή όχι των φαινομένων P-δ.

(ζ) Δίνει τη δυνατότητα ελέγχου για την επάρκεια των φερόντων δομικών στοιχείων για την ασφαλή μεταφορά των φορτίων της στη θεμελίωση, κάτι που αποτελεί και αντικείμενο των σχετικών κανονιστικών κειμένων που αναφέρονται στην αποτίμηση και (ενδεχομένως και) στον ανασχεδιασμό υφιστάμενων κατασκευών.

1.3 Οι στόχοι και η γενική περιγραφή της υπερωθητικής ανάλυσης στους εφαρμοζόμενους κανονισμούς στην Ελλάδα: EN1998-1, EN1998-3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στο σημείο αυτό και πριν να γίνει αναλυτική αναφορά στα βήματα με τα οποία εκτελείται η υπερωθητική ανάλυση κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία αναφορά στον τρόπο με τον οποίο εισάγεται στα ισχύοντα κανονιστικά κείμενα με τα οποία θα πρέπει να γίνει η εφαρμογή της στην Ελλάδα.

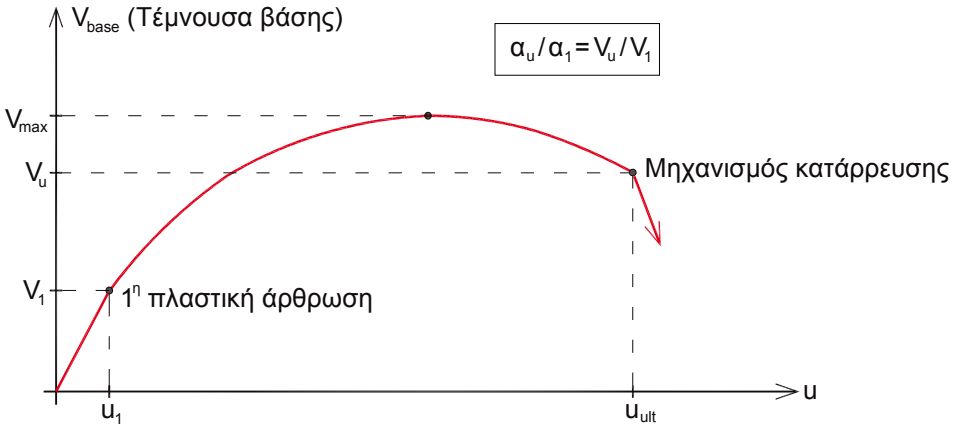
EN1998-1

Στο εδάφιο 4.3.3.4.2.1(1) δίνεται της γενικού τύπου ορισμός της υπερωθητικής ανάλυσης η οποία σύμφωνα με το συγκεκριμένο κείμενο είναι μία ανάλυση η οποία εκτελείται υπό την δράση σταθερών φορτίων βαρύτητας και μονοτονικά αυξανόμενων οριζόντιων φορτίων. Η εφαρμογή της μπορεί να γίνει τόσο σε υφιστάμενες όσο και σε νέες κατασκευές για τον έλεγχο της στατικής της συμπεριφοράς και πιο συγκεκριμένα:

(α) για τον έλεγχο ισχύος ή την αναθεώρηση του λόγου υπεραντοχής (α_u/α_1) ο οποίος είναι πολύ σημαντικός στα πλαίσια της αποτίμησης υφισταμένων κατασκευών αλλά και στα πλαίσια ελέγχου της ορθής σχεδίασης νέων κατασκευών. Οι ορισμοί των παραμέτρων του λόγου υπεραντοχής (α_u/α_1) δίνονται στο εδάφιο 5.2.2.2(4) του EN1998-1 και είναι οι εξής:

α_1 είναι η τιμή με την οποία πρέπει να πολλαπλασιαστεί η οριζόντια σεισμική δράση σχεδιασμού ώστε να σχηματιστεί η πρώτη πλαστική άρθρωση σε κάποια διατομή στοιχείου της κατασκευής (δηλ. να γίνει υπέρβαση της ροπής διαρροής) ενώ διατηρούνται σταθερές οι τιμές των υπολοίπων δράσεων που συνθέτουν τον συνδυασμό των δράσεων σχεδιασμού.

A_u είναι η τιμή με την οποίαν πρέπει να πολλαπλασιαστεί η οριζόντια σεισμική δράση σχεδιασμού έτσι ώστε να σχηματιστούν πλαστικές αρθρώσεις σε τόσες θέσεις της κατασκευής ώστε να σχηματιστεί πλήρως πλαστικός μηχανισμός, ενώ διατηρούνται σταθερές οι τιμές των υπολοίπων δράσεων που συνθέτουν τον συνδυασμό των δράσεων σχεδιασμού.



(β) για την εκτίμηση των αναμενόμενων πλαστικών μηχανισμών, της κατανομής των πλαστικοποιήσεων και κατά συνέπεια για την εκτίμηση της κατανομής των βλαβών.

(γ) για την αποτίμηση της στατικής συμπεριφοράς υφιστάμενων ή νέων κατασκευών η οποία αποτελεί στόχο του EN1998-3.

(δ) για να αποτελέσει την εναλλακτική λύση έναντι της γραμμικής ελαστικής ανάλυσης με τον συντελεστή συμπεριφοράς q.

EN1998-3

Ο EN1998-3 στο εδάφιο 4.4.4(1)P δίνει για τη υπερωθητική ανάλυση τον ίδιο ορισμό με τον EN1998-1. Επιπλέον αυτού δεν έχει κάποια άλλη αναφορά της στόχους της μεθόδου. Σημαντική της αναφορά του κανονισμού για τον τρόπο εφαρμογής της μεθόδου δίνεται στο εδάφιο 4.4.4.4(2) και αφορά της προϋποθέσεις και στην αναγκαιότητα συνυπολογισμού των επιδράσεων των ανώτερων ιδιομορφών. Στο σημείο αυτό ο EN1998-3 αναγνωρίζοντας την αδυναμία της υπερωθητικής ανάλυσης η οποία βάσει της διατύπωσης της δεν μπορεί να λάβει υπόψη της την επιρροή ανώτερων ιδιομορφών, προτείνει για κατασκευές οι οποίες δεν πληρούν το α) κριτήριο εφαμορμοσιμότητας της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης που δίνεται στην παράγραφο 4.3.3.2.1(2) του EN1998-1 δηλ.:

$$T_1 = T_{\text{θεμελιώδης}} \le \begin{cases} 4 \cdot T_C \\ 2.0 \text{ sec} \end{cases}$$

να εκτελείται ανάλυση χρονοϊστορίας (time-history analysis) ή να γίνεται κάποια ειδική προσαρμογή στη εφαρμογή της υπερωθητικής ανάλυσης. Για την μορφή της προσαρμογής που πρέπει να γίνει, το κείμενο του EN1998-3 παραπέμπει στα

κείμενα των Εθνικών προσαρτημάτων. Έτσι για τον Ελληνικό χώρο μπορούμε να λάβουμε της σχετικές οδηγίες από το κείμενο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για το οποίο γίνεται αναφορά παρακάτω.

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

- *Παράγραφος 5.7.1.1*: Κύριος στόχος της υπερωθητικής ανάλυσης είναι η εκτίμηση του μεγέθους των ανελαστικών παραμορφώσεων (αλλά και των εντασιακών μεγεθών) που αναπτύσσονται σε δομικά στοιχεία κατασκευών όταν αυτές υπόκεινται σε σεισμική δράση. Στόχο της της εκτίμησης αποτελεί η αποτίμηση της συμπεριφοράς της και ενδεχόμενος ανασχεδιασμός.
- *Παράγραφος 5.7.1.2*: Στο εδάφιο αυτό δίνονται οι βασικές παραδοχές εφαρμογής της μεθόδου:

  (α) Η εφαρμογή της υπερωθητικής ανάλυσης απαιτεί την άμεση προσομοίωση των μη γραμμικών νόμων δυνάμεων-παραμορφώσεων των δομικών στοιχείων.

  (β) Μετά την κατάστρωση του προσομοιώματος της κατασκευής ακολουθεί η υποβολή του σε οριζόντια κατανεμημένα φορτία με τέτοια κατανομή που είναι ανάλογη των αδρανειακών δυνάμεων λόγω του σεισμού. Η υποβολή των φορτίων αυτών γίνεται με σταδιακά ΜΕΧΡΙ ΠΟΥ ΚΑΠΟΙΟ ΤΗΣ ΤΑ ΔΟΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΝ ΜΠΟΡΕΙ ΠΛΕΟΝ ΝΑ ΦΕΡΕΙ ΤΑ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ.

  (γ) Από την σταδιακή αυτή εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων προκύπτει η ΚΑΜΠΥΛΗ ΑΝΤΙΣΤΑΣΗΣ (ή με άλλη διατύπωση η ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΚΑΜΠΥΛΗ (ΥΚ)). Η καμπύλη αυτή σχεδιάζεται σε όρους τέμνουσας βάσης-μετακίνησης της κατάλληλα εκλεγμένου χαρακτηριστικού σημείου της κατασκευής (δηλαδή της κόμβου του προσομοιώματος) το οποίο κατά κανόνα βρίσκεται στην κορυφή του. Η ΚΑΜΠΥΛΗ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΙ ΤΗ ΒΑΣΗ ΓΙΑ ΟΛΟΥΣ ΤΗΣ ΕΛΕΓΧΟΥΣ ΠΟΥ ΑΠΑΙΤΟΥΝΤΑΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΩΝ ΚΡΙΤΗΡΙΩΝ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.

  (δ) Μετά την επιλογή της σεισμικής δράσης με την οποία θα γίνει ο έλεγχος της κατασκευής (δηλ. η αποτίμηση ή ο ανασχεδιασμός) ακολουθεί ο έλεγχος των κριτηρίων επιτελεστικότητας ο οποίος ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΓΙΝΕΙ ΓΙΑ

ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΜΒΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥ ΙΣΗ ΜΕ ΤΗ ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ ΠΟΥ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΕΙ ΣΤΗΝ ΕΠΙΛΕΓΟΜΕΝΗ ΣΕΙΣΜΙΚΗ ΔΡΑΣΗ (πιο συγκεκριμένα ελέγχεται ότι για τη μετακίνηση αυτή η παραμόρφωση των πλάστιμων δομικών στοιχείων της κατασκευής δεν συνεπάγεται βαθμό βλάβης μεγαλύτερο από εκείνον που γίνεται ανεκτός για την επιλεγμένη στάθμη επιτελεστικότητας).

(ε) Η μετακίνηση του κόμβου ελέγχου που αντιστοιχεί στην επιλεγόμενη σεισμική δράση για την οποία γίνεται η αποτίμηση και ο ανασχεδιασμός (*μετακίνηση στόχος*) μπορεί να υπολογιστεί μία σειρά από τεκμηριωμένες μεθόδους της αυτή που περιγράφει ο της ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. στην παράγραφο 5.7.4.2. ή ο EN1998-1 στο παράρτημα Β (η συγκεκριμένη μεθοδολογία του EN1998-1 θα περιγραφεί αναλυτικά σε άλλο σημείο του παρόντος εγχειριδίου).

- *Παράγραφος 5.7.2*: Στην παράγραφο αυτή δίνονται οι προϋποθέσεις εφαρμογής της υπερωθητικής ανάλυσης. Αυτές μπορούν να συνοψιστούν σε τρία σημεία:

(α) Συνίσταται της η εφαρμογή της υπερωθητικής ανάλυσης γίνεται όταν τα δεδομένα της κατασκευής είναι γνωστά με τουλάχιστον ικανοποιητική στάθμη αξιοπιστίας (οι στάθμες αξιοπιστίας δεδομένων αναλύονται στην παράγραφο 3.6 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. ενώ αντίστοιχοι ορισμοί δίνονται και στον EN1998-3 στην παράγραφο 3.3 όπου ορίζονται τα επίπεδα γνώσης των δεδομένων της κατασκευής). Η υπερωθητική ανάλυση της και οι υπόλοιπες μέθοδοι ανάλυσης είναι ευαίσθητες στο επίπεδο της αξιοπιστίας των δεδομένων της. Ωστόσο ειδικά η υπερωθητική ανάλυση η οποία είναι μία μέθοδος από την οποία αναμένεται η εξαγωγή πιο υψηλής αξίας αποτελεσμάτων είναι καλό να εκτελείται με δεδομένα τα οποία είναι τουλάχιστον ικανοποιητικά αξιόπιστα.

(β) Η υπερωθητική ανάλυση θα πρέπει να εφαρμόζεται σε κτίρια στα οποία η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών δεν είναι σημαντική. Για να διερευνηθεί η ισχύς ή όχι της προϋπόθεσης της θα πρέπει να γίνεται πάντα μία ελαστική δυναμική ανάλυση κατά την οποία θα λαμβάνονται υπόψη τόσες ιδιομορφές όσες είναι απαραίτητες έτσι ώστε να ενεργοποιείται τουλάχιστον το 90% της μάζας. Κατόπιν θα πρέπει να γίνεται και μία δεύτερη ελαστική δυναμική ανάλυση στην οποία θα λαμβάνεται υπόψη

μόνον η πρώτη ιδιομορφή. Η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών θεωρείται σημαντική όταν η τέμνουσα που προκύπτει σε κάθε όροφο από την πρώτη δυναμική ανάλυση είναι μεγαλύτερη από το 130% της που προκύπτει από τη δεύτερη δυναμική ανάλυση. Για της αναλύσεις αυτές θα πρέπει να γίνει χρήση του ελαστικού φάσματος σχεδιασμού του EN1998-1 (δηλ. με q=1).

(γ) Όταν η επιρροή των ανωτέρων ιδιομορφών είναι σημαντική η υπερωθητική ανάλυση μπορεί να εφαρμοστεί μόνον σε συνδυασμό με μία συμπληρωματική ελαστική δυναμική ανάλυση. Σε μία τέτοια περίπτωση όλοι οι απαιτούμενοι έλεγχοι επιτελεστικότητας θα διεξάγονται και με της δύο μεθόδους και επιτρέπεται η αύξηση κατά 25% των τιμών των παραμέτρων που υπεισέρχονται στα κριτήρια ελέγχου των δύο μεθόδων.

Σε όλο το κείμενο που ακολουθεί θα δίνονται στα κατάλληλα σημεία και της οι υπόλοιπες οδηγίες των EN1998-1, EN1998-3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την εφαρμογή της υπερωθητικής ανάλυσης.

2. ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΒΗΜΑΤΑ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στην παρούσα παράγραφο θα γίνει περιγραφή των βημάτων που απαιτούνται προκειμένου να γίνει η ανάλυση της κατασκευής με τη εφαρμογή της υπερωθητική ανάλυση. Θα παρουσιαστεί αρχικά ένα συνοπτικό διάγραμμα ροής των απαραίτητων υπολογισμών και εν συνεχεία τα βήματα του συγκεκριμένου διαγράμματος θα αναλυθούν προκειμένου να δοθούν επιπλέον διευκρινήσεις επ' αυτών. Της ήδη τονίστηκε σε προηγούμενη παράγραφο η κεντρική ιδέα επί της οποίας στηρίζεται η υπερωθητική ανάλυση είναι η συσχέτιση της ανελαστικής απόκρισης του υπό ανάλυση κτιρίου που είναι της πολυβάθμιος ταλαντωτής με την απόκριση της «ισοδύναμου» μονοβάθμιου ταλαντωτή. Επομένως γίνεται η βασική παραδοχή ότι η απόκριση του μελετούμενου πολυβάθμιου συστήματος εξαρτάται από μία και μόνη ιδιομορφή (την πρώτη) για την οποία γίνεται επιπλέον και η παραδοχή ότι παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της σεισμικής επιπόνησης ανεξαρτήτως της διαφοροποίησης που υφίσταται η δυναμική συμπεριφορά της κατασκευής λόγω των διαδοχικών πλαστικοποιήσεων των διαφόρων μελών της. Η όλη διαδικασία υπολογισμού της υπερωθητικής ανάλυσης επηρεάζεται από την βασική αυτή παραδοχή. Τα βήματα της διαδικασίας της σε πολύ γενικές γραμμές δίνονται από το διάγραμμα ροής του επόμενου σχήματος:

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑΣ

ΒΗΜΑ 1: Ελαστική και αδρανειακή προσομοίωση της κατασκευής

↓

ΒΗΜΑ 2: Προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων της κατασκευής

↓

ΒΗΜΑ 3: Επιλογή – με βάση κατά κανόνα τον εφαρμοζόμενο κανονισμό – της καθ' ύψος κατανομής των οριζοντίων στατικών δυνάμεων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις της σεισμικής διέγερσης.

↓

ΒΗΜΑ 4-1: Προοδευτική εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων στην κατασκευή ξεκινώντας από μικρές τιμές και με κατανομή αυτή που επελέγη κατά το ΒΗΜΑ 3. Το βήμα αύξησης των φορτίων θα πρέπει να είναι επαρκώς μικρό προκειμένου να εντοπιστεί μεμονωμένα η πρώτη διαρροή, χωρίς να προκύψουν ταυτόχρονα πολλές. Πριν την έναρξη της εισαγωγής των οριζοντίων φορτίων εισάγονται τα κατακόρυφα φορτία του συνδυασμού $G+\psi_2 Q$.

↓

ΒΗΜΑ 4-2: Επαυξητική διαδικασία και σχεδίαση της υπερωθητικής καμπύλης (ΥΚ). Σε κάθε βήμα:

(α) Ελέγχονται όλες οι κρίσιμες διατομές δηλ. οι διατομές οι οποίες θεωρούνται ως πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων. Εφόσον συμβεί ο σχηματισμός μίας πλαστικής άρθρωσης σε μία διατομή το προσομοίωμα της κατασκευής τροποποιείται τοποθετώντας στο σημείο αυτό ένα μη γραμμικό στροφικό ελατήριο. Αν όχι το προσομοίωμα παραμένει ίδιο για το επόμενο βήμα.

(β) Επανάληψη της διαδικασίας 4-2(α) έως ότου προκύψει είτε καθολική αστοχία (μηχανισμός κατάρρευσης) είτε τοπική αστοχία είτε η οριζόντια μετατόπιση λάβει κάποια προκαθορισμένη τιμή.

(δ) Σχεδίαση της ΥΚ ως διαγράμματος της τέμνουσας βάσης και της μετακίνησης σε επιλεγμένο σημείο (σημείο ελέγχου).

↓

ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΑΙΤΗΣΗΣ*

ΒΗΜΑ 5-1: Μετατροπή της ΥΚ του πολυβάθμιου συστήματος (δηλ. της κατασκευής) σε διγραμμικοποιημένη ΥΚ ενός ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος (ΙΜΣ).

↓

ΒΗΜΑ 5-2: Εισαγωγή φάσματος (απόκρισης ή σχεδιασμού) και επιλογή του ποσοστού απόσβεσης. Υπολογισμός ιδιοπεριόδου του ΙΜΣ.

↓

ΒΗΜΑ 5-3: Με βάση το ΙΜΣ υπολογίζεται η τιμή της μετακίνησης-στόχου u_{target} για το σημείο ελέγχου ξεχωριστά για τη διεύθυνση Χ και τη διεύθυνση Υ.

↓

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

ΒΗΜΑ 6-1: Υπολογισμός των μεγεθών απόκρισης για μετακίνηση του σημείου ελέγχου ίση με τη μετακίνηση-στόχο. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με ταυτόχρονη θεώρηση των οριζοντίων φορτίων κατά Χ και Υ (και αντιστοίχως κατά (-Χ) και (-Υ)) ειδικά για μετακίνηση του σημείου ελέγχου ίση με τη μετακίνηση-στόχο διαδοχικά και ξεχωριστά κατά Χ και κατά Υ (Χωρική επαλληλία)

↓

ΒΗΜΑ 6-2: Με τα μεγέθη που προκύπτουν από το βήμα 6-1 γίνεται έλεγχος για την εκπλήρωση ή όχι των κριτηρίων που θα πρέπει να εκπληρώνονται για το επιλεγμένο στόχο επίδοσης (στάθμη επιτελεστικότητας).

↓

ΒΗΜΑ 7: Επανάληψη των βημάτων 3 έως και 6 για διαφορετική κατανομή οριζοντίων φορτίων.

* Με βάση την μέθοδο τροποποίησης της μετακίνησης όπως περιγράφεται στο παράρτημα Β του EN1998-1. Η μέθοδος αυτή όπως και η αντίστοιχη του ΚΑΝ.ΕΠΕ. περιγράφονται παρακάτω.

Σχήμα 1.1. Γενικό διάγραμμα ροής των απαιτούμενων υπολογισμών της υπερωθητικής ανάλυσης

2.1 ΒΗΜΑ 1: Ελαστική και αδρανειακή διακριτοποίηση

Το πρώτο βήμα της διαδικασίας συνίσταται στην ελαστική και αδρανειακή διακριτοποίηση της υπό μελέτη κατασκευής. Πρόκειται στην ουσία για την διαμόρφωση του χωρικού προσομοιώματος της κατασκευής καθώς και τον υπολογισμό των κατακορύφων φορτίων και των μαζών του. Σύμφωνα με τον EN1998-1 (παρ. 4.3.1) θα πρέπει να προσομοιώνεται και η θεμελίωση της και η ενδοσιμότητα του εδάφους. Οι λεπτομέρειες και οι οδηγίες για το βήμα αυτό δεν διαφέρουν από της αντίστοιχες λεπτομέρειες και οδηγίες οι οποίες δίνονται και στην περίπτωση που η μελέτη γίνεται με εφαρμογή της ελαστικής μεθόδου ανάλυσης. Έτσι οι οδηγίες για την εκτέλεση του βήματος αυτού μπορούν να αντληθούν από το εγχειρίδιο θεωρητικής τεκμηρίωσης του ΡΑΦ. Οδηγίες για την ορθή ελαστική και αδρανειακή διακριτοποίηση δίνονται και στον EN1998-1 (παρ. 4.3.1).

2.2 ΒΗΜΑ 2: Προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων της κατασκευής

Στο δεύτερο βήμα εμφανίζεται η σημαντική διαφοροποίηση που εισάγει σε επίπεδο προσομοίωσης η υπερωθητική ανάλυση έναντι των κλασσικών ελαστικών αναλύσεων. Πρόκειται για την επιπλέον απαίτηση για ορθή απόδοση στο προσομοίωμα των χαρακτηριστικών που διέπουν την συμπεριφορά των δομικών στοιχείων της κατασκευής μετά τη διαρροή των κρίσιμων διατομών της. Η προσομοίωση αυτή αποτελεί ένα πολύ καθοριστικό δεδομένο καθώς το κύριο χαρακτηριστικό της υπερωθητική ανάλυση είναι η δυνατότητα της να παρέχει στον μελετητή την εικόνα της απόκρισης εντός της ανελαστικής περιοχής συμπεριφοράς. Για να είναι εφικτή η δόκιμη προσομοίωσης της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων θα πρέπει να είναι διαθέσιμη και να αποδοθεί όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστα η διάταξη όπλισης όλων εκείνων των περιοχών (δηλ. των διατομών) της οποίες αναμένεται να υπερβούν τα όρια διαρροής της τα υλικά κατασκευής (σκυρόδεμα και χάλυβας). Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να είναι διαθέσιμα με όσο το δυνατό πιο αξιόπιστες τιμές δεδομένα της:

- Οι διαστάσεις των διατομών σκυροδέματος,
- Ο αριθμός, οι θέσεις και οι διάμετροι των ράβδων οπλισμού των διατομών,

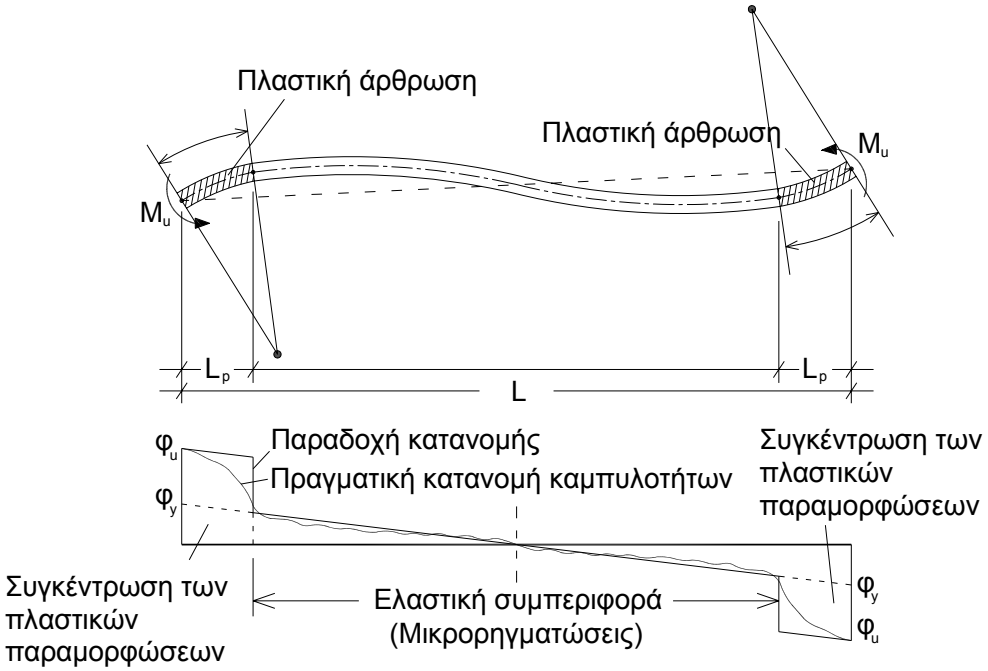
- Τα δεδομένα του σκυροδέματος (αντοχή, παραμόρφωση διαρροής και θραύσης),
- Τα δεδομένα του χάλυβα (αντοχή, παραμόρφωση διαρροής και θραύσης).

Όσον αφορά στα δύο πρώτα δεδομένα, η αξιόπιστη γνώση της εξαρτάται από την ύπαρξη των αντίστοιχων στοιχείων δηλ. των κατασκευαστικών σχεδίων, της και η εφαρμογή της υπερωθητική ανάλυση απαιτείται κατά κανόνα στην περίπτωση υφιστάμενων κατασκευών οι οποίες της φορές είναι πολύ παλιές. Φυσικά εφόσον δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία η λύση είναι η επιτόπου αποτύπωση η οποία προβλέπεται από της κανονισμούς (π.χ. EN1998-1 και ΚΑΝ.ΕΠΕ.) αλλά το επίπεδο της αξιοπιστίας στην περίπτωση αυτή είναι μειωμένο. Βέβαια ακόμα και στην περίπτωση ύπαρξης επαρκών κατασκευαστικών σχεδίων, η τεκμηρίωση της με επισκέψεις της κατασκευές κρίνεται σκόπιμη εφόσον δεν είναι πάντα σίγουρη η τήρηση των στοιχείων των σχεδίων κατά την κατασκευή.

Όσον αφορά στα δύο επόμενα δεδομένα η αξιόπιστη γνώση της στηρίζεται στην ύπαρξη των σχετικών δεδομένων από της στατικές μελέτες εφόσον αυτές υπάρχουν. Της κρίνεται σκόπιμο να γίνεται επιπλέον και μια πειραματική επιβεβαίωση των δεδομένων των υλικών, καθώς οι διάφορες φθορές που οφείλονται σε κακοτεχνίες αλλά και στην φθοροποιό δράση του χρόνου μπορούν να τα διαφοροποιήσουν σημαντικά.

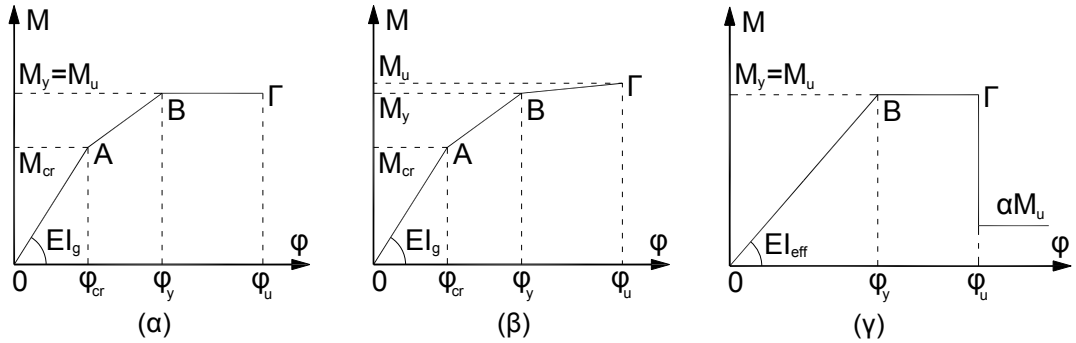
Η όσο το δυνατό πιο αξιόπιστη γνώση των δεδομένων που περιγράφησαν πιο πάνω αποτελεί το πρώτο στάδιο του δευτέρου βήματος. Το επόμενο στάδιο αφορά στην προσομοίωση της μη γραμμικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων. Η προσομοίωση αυτή στα πλαίσια της εφαρμογής της υπερωθητικής ανάλυσης με βάση τα σχετικά κανονιστικά κείμενα στηρίζεται της εξής παραδοχές:

(α) Οι ανελαστικές παραμορφώσεις θεωρούνται συγκεντρωμένες της κρίσιμες (της χαρακτηρίζονται) περιοχές των ραβδωτών δομικών στοιχείων (μοντέλο σημειακής πλαστικότητας) ενώ το υπόλοιπο τμήμα της θεωρείται ότι συμπεριφέρεται ελαστικά. Αυτές οι περιοχές που ορίζονται και ως πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών («σημειακών») αρθρώσεων είναι κατά κανόνα τα άκρα των δοκών (βλ. ακόλουθο σχήμα 2.1.), οι κεφαλές και οι πόδες των υποστυλωμάτων αλλά και οι βάσεις των τοιχωμάτων (εφόσον της τα τοιχώματα είναι σχεδιασμένα με βάση της προδιαγραφές των σύγχρονων κανονισμών).



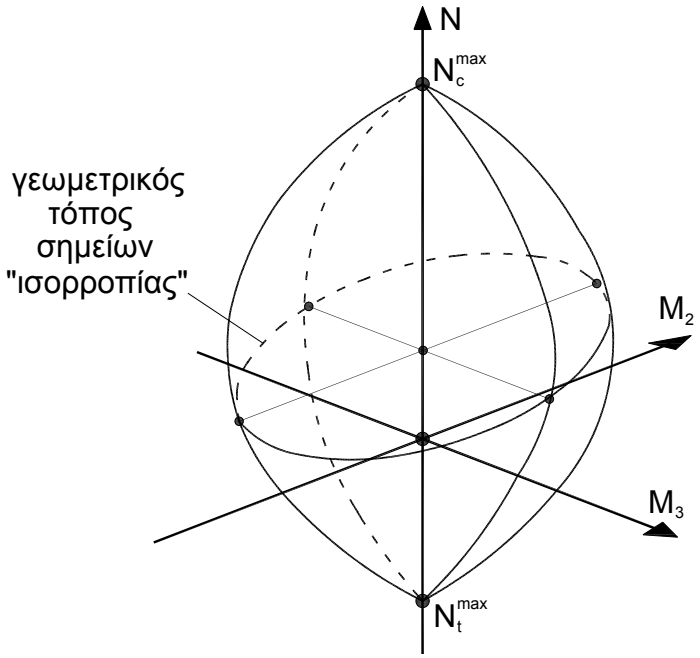
Σχήμα 2.1. Στοιχείο δοκού υπό σεισμική φόρτιση με ροπές ίσες με της οριακές. Προσομοίωση με το μοντέλο σημειακής πλαστικότητας. Πραγματική κατανομή καμπυλοτήτων και η αντίστοιχη παραδοχή.

(β) Για την προσομοίωση αυτών των κρίσιμων περιοχών (πλαστικών αρθρώσεων) χρησιμοποιούνται απλοποιημένα διγραμμικά ή πολυγραμμικά (βλ. σχήμα 2.2.) διαγράμματα μεγεθών έντασης μετακίνησης ή έντασης-παραμόρφωσης (η επιλογή των μεγεθών αυτών γίνεται με βάση την κατά περίπτωση αναμενόμενη προέχουσα μορφή αστοχίας της π.χ. ορίζει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.).



Σχήμα 2.2. Χαρακτηριστικοί τύποι διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων: (α) Τριγραμμικό με οριζόντιο κλάδο μετά την διαρροή (M_u=M_Y), (β) Τριγραμμικό με μικρή απομένουσα δυσκαμψία μετά τη διαρροή (M_u=M_y), (γ) Διγραμμικό διάγραμμα με παραμένουσα αντοχή μετά την ανάπτυξη της καμπυλότητας αστοχίας (προτεινόμενο από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.)

Έτσι π.χ. για την περίπτωση που ζητείται η προσομοίωση της καμπτικής ανελαστικής συμπεριφοράς η συγκεκριμένη προσομοίωση μπορεί να γίνει μέσω διαγραμμάτων ροπών-στροφών διατομής (M-θ), ή ροπών-στροφών χορδής (M-θ_χ) ή ροπών-καμπυλοτήτων (M-φ). Ειδικά στην περίπτωση αξονικώς φορτισμένων στοιχείων επιβάλλεται να ληφθεί υπόψη και η αλληλεπίδραση της αξονικής με την καμπτική λειτουργία. Αυτό επιτυγχάνεται με το σχηματισμό των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης ροπών M (σε δύο επίπεδα) – αξονικών δυνάμεων N (βλ. σχήμα 2.3.). Η προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς διατμητικού τύπου δεν λαμβάνεται συνήθως υπόψη. Ο πιο βασικός λόγος είναι ότι κατά την αποτίμηση της συμπεριφοράς της κατασκευής πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα έτσι ώστε να εντοπίζονται άμεσα οι υπερβάσεις των διατμητικών αντοχών (που οδηγούν σε ανεπιθύμητες ψαθυρές μορφές αστοχίας) και να διακόπτεται η ανάλυση ή έστω να απομονώνονται τα στοιχεία που αστοχούν διατμητικά. Επομένως θα πρέπει σε κάθε βήμα της επαυξητικής διαδικασίας να ελέγχονται οι κρίσιμες διατομές όχι μόνον για τα μεγέθη καμπτικής συμπεριφοράς αλλά και για τον αν υπερβαίνουν οι όχι της διατμητικές της αντοχές.



Σχήμα 2.3. Χαρακτηριστική μορφή διαγράμματος αλληλεπίδρασης αξονικής δύναμης και ροπών.

Η ορθή απόδοση των δύο παραπάνω βασικών παραδοχών για την προσομοίωση της ανελαστικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων προϋποθέτει:

(I) Τη δυνατότητα εισαγωγής στο χωρικό προσομοίωμα της κατασκευής των κρίσιμων περιοχών των δομικών στοιχείων. Η δυνατότητα αυτή στα πλαίσια της θεώρησης του μοντέλου σημειακής πλαστικότητας μεταφράζεται (κατά μία προσέγγιση του προβλήματος) στη δυνατότητα τοποθέτησης μηχανικών αρθρώσεων στα σημεία εμφάνισης πλαστικών αρθρώσεων και με παράλληλη μέριμνα για την εξασφάλιση του επιπέδου της έντασης που αναπτύσσεται μετά την μετάβαση της κρίσιμης περιοχής στην ανελαστική περιοχή συμπεριφοράς (δηλ. μετά την υπέρβαση της ροπής διαρροής της διατομής).

(II) Την δυνατότητα υπολογισμού/σχηματισμού των διαγραμμάτων M-φ και των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης M-N. Η δυνατότητα αυτή ικανοποιείται μέσω ανάλυσης που είναι γνωστή ως «ανάλυση διατομής».

2.2.1 Διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων

Το διάγραμμα καμπυλοτήτων M-φ είναι το υπολογιστικό «εργαλείο» για την μη γραμμική ανάλυση σε επίπεδο διατομής. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει η διαθέσιμη πλαστική καμπυλότητα της διατομής. Σε επίπεδο ορισμού, τα διαγράμματα ροπών-καμπυλοτήτων εκφράζουν τη συσχέτηση της ροπής M που καταπονεί μία διατομή, με την αντίστοιχη καμπυλότητα φ=1/r (r η ακτίνα καμπυλότητας). Της είναι γνωστό από την θεωρία των απειροστών παραμορφώσεων, η καμπυλότητα σε μία διατομή της καμπτόμενου στοιχείου είναι ίση με τον αντίστροφο της ακτίνας καμπυλότητας r, και εξ ορισμού ισχύει:

$$\varphi = \frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz} \tag{2.1}$$

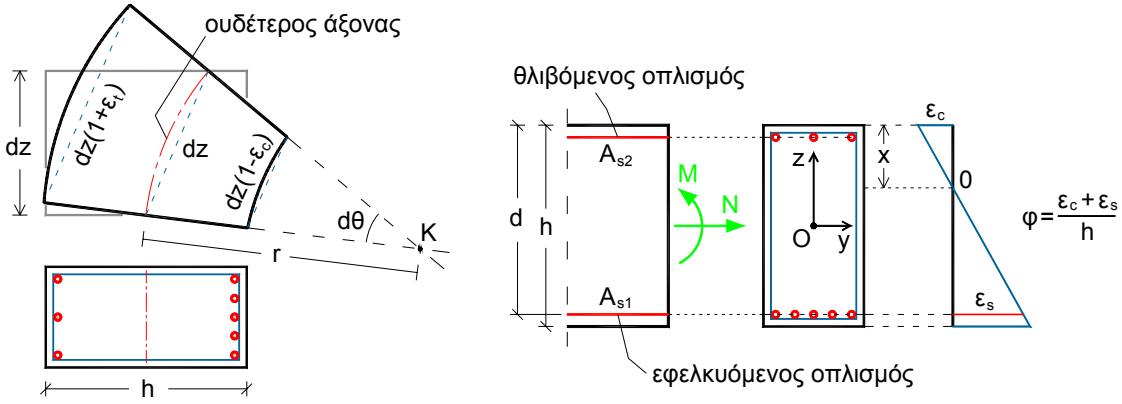
Όπου θ είναι η γωνία στροφής της διατομής, και dθ είναι η μεταβολή της εντός του παραμορφωμένου στοιχειώδους τμήματος dz. Έτσι αναφερόμενοι (μόνον και μόνον για λόγους καλύτερης εποπτείας) σε μονοαξονικά καμπτόμενο δομικό στοιχείο με διατομή ύψους h η παραπάνω σχέση (με βάση αρχές της διαφορικής γεωμετρίας) παίρνει διαδοχικά την παρακάτω μορφή (βλ. σχήμα 2.4.) η οποία ισχύει τόσο στην ελαστική όσο και την ανελαστική περιοχή:

$$\varphi = \frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz} = \frac{1+\varepsilon_t}{r+h-x} = \frac{1-\varepsilon_c}{r-x} = \frac{\varepsilon_c}{x} = \frac{\varepsilon_c+\varepsilon_t}{h} \tag{2.2}$$

Όπου ε_t είναι η επιμύκηνση της ακραίας εφελκυόμενης ίνας της διατομής, και ε_c είναι η επιβράχυνση της ακραίας θλιβόμενης ίνας της διατομής.

Επομένως η καμπυλότητα της διατομής μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των παραμορφώσεων (επιμυκήνσεων και επιβραχύνσεων) των δύο ακραίων ινών της.

Επικεντρώνοντας τώρα στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται μία διατομή καμπτόμενης δοκού (θεωρούμε και εδώ για λόγους απλοποίησης την περίπτωση μονοαξονικής κάμψης που είναι ευκολότερο να παρουσιαστεί εποπτικά). Της γίνεται κατανοητό, στη περίπτωση διατομών οπλισμένου σκυροδέματος η καμπυλότητα εξαρτάται από την παραμόρφωση του εφελκυόμενου χάλυβα και του θλιβόμενου σκυροδέματος στην ακραία θλιβόμενη ίνα.



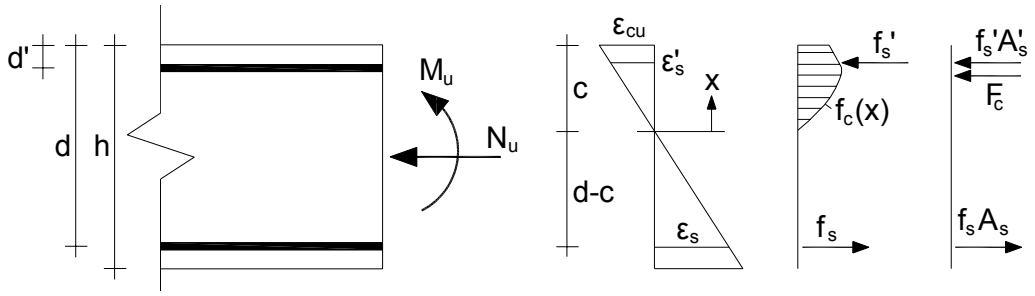
Σχήμα 2.4. Ορισμός της καμπυλότητας και ειδίκευση της για στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος

Ο συσχετισμός της καμπυλότητας φ με την ροπή M ο οποίος εκφράζεται μέσω της διαγράμματος M-φ ορίζεται διαφορετικά στην ελαστική περιοχή συμπεριφοράς, και διαφορετικά στην ανελαστική. Στην ελαστική περιοχή συμπεριφοράς ισχύει η κλασσική από την αντοχή υλικών σχέση:

$$\varphi = \frac{1}{r} = \frac{d\theta}{dz} = \frac{M}{EI} \tag{2.3}$$

Ωστόσο η εφαρμογή της παραπάνω σχέσης είναι επιτρεπτή με σταθερή τιμή δυσκαμψίας (EI) μόνον πριν την εμφάνιση ρηγματώσεων. Μετά την εμφάνιση των ρηγματώσεων παρατηρείται μια διαδοχική απομείωση της δυσκαμψίας, και έτσι η παραπάνω σχέση εφαρμόζεται με διαδοχικά απομειούμενη τιμή του EI (για τον λόγο αυτό γίνεται πολύ συχνά χρήση και τριγραμμικών διαγραμμάτων M-φ όπου

μετά την αρχική κλίση του διαγράμματος που ισούται με την αρηγμάτωτη δυσκαμψία EI_g και πριν τη διαρροή, παρεμβάλλεται της ακόμα κλάδος με μειωμένη κλίση προκειμένου να ληφθεί υπόψη η ρηγμάτωση της διατομής πριν τη διαρροή της). Επιπλέον, μετά τη εμφάνιση της διαρροής στη διατομή η συσχέτιση των ροπών με της καμπυλότητες δεν μπορεί πλέον να γίνει μέσω της κλειστής σχέσης. Απαιτείται ο προσδιορισμός – μετά από δοκιμές – της θέσης του ουδέτερου άξονα (σημειώνεται στο σχήμα 2.4. με x), και εν συνεχεία η εφαρμογή της σχέσης (ΙΙ) προκειμένου να υπολογιστεί η καμπυλότητα φ. Η αντίστοιχη ροπή Μ υπολογίζεται ως η ροπή των θλιπτικών τάσεων του σκυροδέματος και των εφελκυστικών δυνάμεων των οπλισμών ως της τον ουδέτερο άξονα της ενδεικτικά παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα το οποίο ισχύει για την περίπτωση υπολογισμού των μεγεθών του διαγράμματος για το σημείο αστοχίας της διατομής:



$$M_u = \int_0^x \left[f_c \cdot b \cdot \left(\frac{h}{2} - c + x \right) \right] dx - A'_s \cdot f'_s \cdot \left(\frac{h}{2} - d' \right) + A_s \cdot f_s \cdot \left(d - \frac{h}{2} \right)$$

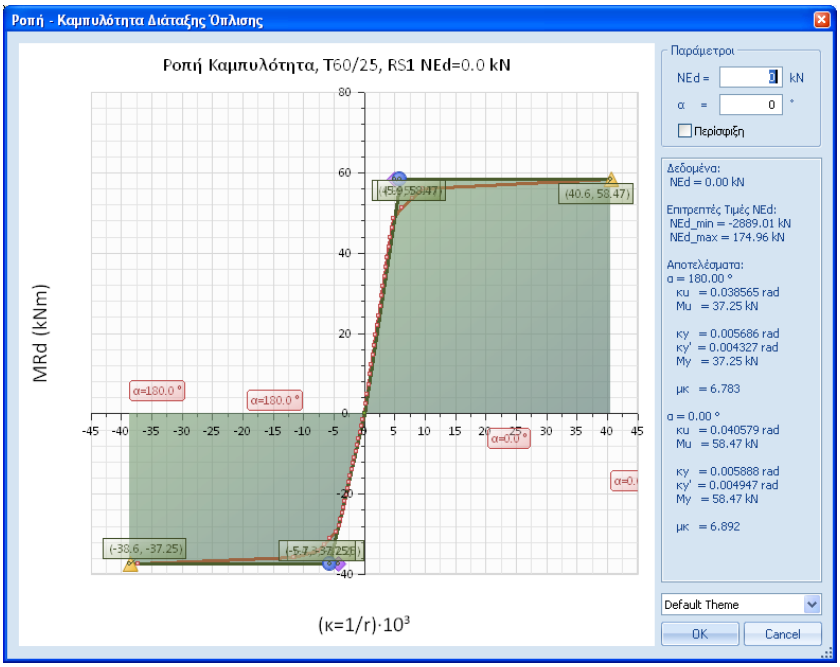
$$N_u = \int_0^x \left(f_c \cdot b \right) dx + A'_s \cdot f'_s + A_s \cdot f_s$$

$$\varphi_u = \frac{\varepsilon_{cu}}{c} = \frac{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_s}{d}$$

Σχήμα 2.5. Διαδικασία υπολογισμού του ζεύγους σημείων (M_u, φ_u) του διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής για δεδομένη αξονική φόρτιση (ανάλογη είναι η διαδικασία και για τον υπολογισμό των άλλων σημείων). Με τη διαδικασία αυτή υπολογίζεται και το διάγραμμα αλληλεπίδρασης καμπτικών ροπών-αξονικών δυνάμεων.

Η διαδικασία του παραπάνω σχήματος όταν αναφέρεται σε διαξονική κάμψη απλών ή πιο σύνθετων διατομών απαιτεί την ανάπτυξη ειδικού λογισμικού καθώς ο μεγάλος όγκος των απαιτούμενων υπολογισμών δεν μπορεί να γίνει με άλλο τρόπο παρά μόνον σε πολύ απλές περιπτώσεις. Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα

χαρακτηριστικό διάγραμμα ροπών καμπυλοτήτων της διατομής της προκύπτει από την σχετική υπομονάδα του ΡΑΦ.



Σχήμα 2.6. Τυπικό διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων της επιφάνειας εργασίας του ΡΑΦ

Με βάση τα όσα εκτέθηκαν πιο πάνω, δύο είναι τα χαρακτηριστικά σημεία της διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων:

- Σημείο: (M_y,φ_y) → Αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο εμφανίζεται η διαρροή της διατομής. Η διαρροή μπορεί να προέλθει είτε όταν η παραμόρφωση του εφελκυόμενου χάλυβα φτάσει στην τιμή διαρροής ε_{sy} ($=f_y/E_s$ όπου f_y είναι η τάση διαρροής και E_s το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα), είτε όταν η παραμόρφωση της θλιβόμενης ίνας του σκυροδέματος ε_c φτάσει την τιμή διαρροής του (περισφιγμένου ή απερίσφικτου όταν δεν υπάρχει επαρκής περίσφιγξη) σκυροδέματος.
- Σημείο: (M_u,φ_u) → Αντιστοιχεί στο σημείο στο οποίο εμφανίζεται αστοχία της διατομής (οφείλεται στην ανάπτυξη της ροπής αστοχίας M_u).

[Διάφοροι κανονισμοί, μεταξύ των οποίων και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δέχονται ότι μετά την υπέρβαση της καμπυλότητας αστοχίας σε μία διατομή είναι δυνατή η θεώρηση

της εναπομένουσας αντοχής ίσης με ένα ποσοστό (π.χ. 20%) της ροπής αστοχίας M_u (βλ. Παράρτημα 4.4 του ΚΑΝ.ΕΠΕ.)].

Για τη σχεδίαση της διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων απαιτείται η γνώση των παρακάτω δεδομένων:

(α) Γεωμετρία της διατομής του σκυροδέματος,

(β) Θέσεις (συντεταγμένες των ΚΒ) των ράβδων οπλισμού εντός της διατομής και οι διάμετροι της,

(γ) Νόμος συμπεριφοράς του περισφιγμένου και του απερίσφικτου σκυροδέματος (πρόκειται για τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων τα οποία αποτελούν μοντέλα συμπεριφοράς του σκυροδέματος που προκύπτουν κατά κανόνα από επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων και είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία σε της πηγές από της οποίες ενδεικτικά αναφέρονται: Penelis and Kappos (1997), Μπισκίνης Δ.Ε. (2007)).

(δ) Νόμος συμπεριφοράς χάλυβα (της και στην περίπτωση του σκυροδέματος πρόκειται για διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, βλ. π.χ. Penelis and Kappos (1997)).

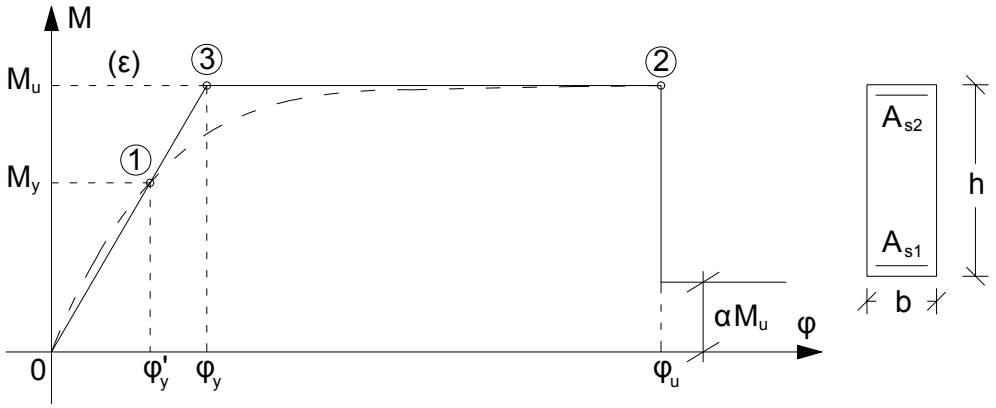
(ε) Το επίπεδο (δηλαδή η τιμή) της αξονικής δύναμης Ν που καταπονεί τη διατομή, διότι της είναι γνωστό η μηχανική συμπεριφορά δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος εξαρτάται και από αυτήν. Αυτό σημαίνει ότι θα πρέπει να είναι διαθέσιμα τα διαγράμματα Μ-φ για το κάθε επίπεδο αξονικής δύναμης που μπορεί να προκύψει σε μία διατομή κατά την διάρκεια εκτέλεσης της επαυξητικής διαδικασίας.

Διγραμμικοποίηση του διαγράμματος Ροπών-Καμπυλοτήτων

Ο υπολογισμός με τη υπερωθητική ανάλυση της περιγράφεται στα σύγχρονα κανονιστικά κείμενα απαιτεί το σχεδιασμό και τη χρήση διγραμμικών διαγραμμάτων ροπών-καμπυλοτήτων με ένα αρχικό κλάδο η κλίση του οποίου είναι ίση με την ορισμένη στη βιβλιογραφία ως «ενεργό δυσκαμψία» της διατομής, και έναν οριζόντιο κλάδο. Επιπλέον, της τονίστηκε και πιο πάνω, ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. της και άλλοι αντίστοιχοι κανονισμοί δέχονται ότι μετά την υπέρβαση της καμπυλότητας αστοχίας σε μία διατομή είναι δυνατή η θεώρηση της εναπομένουσας αντοχής ίσης με ένα ποσοστό της ροπής αστοχίας M_u. Το γεγονός αυτό επιβάλλει την μετατροπή (διγραμμικοποίηση) του διαγράμματος Μ-

φ που προκύπτει από την διαδικασία που περιγράφηκε προηγουμένως. Μια μέθοδος διγραμμικοποίησης που είναι γνωστή στη βιβλιογραφία είναι η ακόλουθη (βλ. π.χ. Priestley M.J.N., 2003):

Η διαδικασία αυτή αφορά σε διατομές ο/σ οι οποίες υπόκεινται σε συνδυασμένη δράση αξονικής δύναμης (με συγκεκριμένη τιμή) και ροπής κάμψης με συγκεκριμένη φορά και συγκεκριμένη γωνία του διανύσματος ως της το τοπικό σύστημα αξόνων της αλλά με μονότονα αυξανόμενη τιμή.



Σχήμα 2.7. Διαδικασία διγραμμικοποίησης διαγράμματος ροπών-καμπυλοτήτων

Η διαδικασία της διγραμμικοποίησης ξεκινά με δεδομένο το πραγματικό διάγραμμα Μ-φ το οποίο προκύπτει από την ανάλυση της διατομής (διακεκομμένη καμπύλη). Από το διάγραμμα αυτό λαμβάνουμε τα εξής σημεία:

<u>Σημείο 1</u>: Είναι το σημείο που αντιστοιχεί της συντεταγμένες (φ'_y,M_y). Στο σημείο αυτό έχουμε είτε διαρροή του χάλυβα που βρίσκεται στην πλέον εφελκυόμενη ζώνη της διατομής (δηλ. παραμόρφωση ίση με $\varepsilon_s=f_y/E_s$) είτε παραμόρφωση στο σκυρόδεμα στην πλέον θλιβόμενη ίνα ίση με $\varepsilon_c=\varepsilon_{cy}$, ότι από τα δύο συμβεί πρώτο.

<u>Σημείο 2</u>: Είναι το σημείο που αντιστοιχεί της συντεταγμένες (κ_u,M_u). Στο σημείο αυτό έχουμε είτε ανάπτυξη οριακής θλιβόμενης παραμόρφωσης ε_{cu}=0.0035 στο σκυρόδεμα είτε ανάπτυξη οριακής εφελκυόμενης παραμόρφωσης στον χάλυβα ε_{su}=0.002, ότι από τα δύο συμβεί πρώτο.

Κατόπιν πρέπει να γίνουν τα ακόλουθα βήματα:

Α ΒΗΜΑ: Χαράσσεται η ευθεία 0-1 που συνδέει το σημείο 0 της αρχής των αξόνων, με το σημείο 1 που αντιστοιχεί στην διαρροή.

Β ΒΗΜΑ: Χαράσσεται η ευθεία (ε) η οποία είναι παράλληλη με τον άξονα των καμπυλοτήτων φ και σε απόσταση ίση με M_u από αυτόν.

Γ ΒΗΜΑ: Προεκτείνεται η ευθεία 0-1 μέχρι το σημείο τομής της με την ευθεία (ε). Έτσι ορίζεται το σημείο 3. Σε γεωμετρικούς όρους, με αυτή τη διαδικασία ορίζεται το συμβατικό σημείο διαρροής (φ_y,M_u). Επομένως ισχύει:

$$\varphi_y = \varphi'_y \cdot \left(\frac{M_u}{M_y}\right)$$

Μετά την ανάπτυξη της οριακής καμπυλότητας κ_u, μπορούμε να δεχθούμε σύμφωνα π.χ. με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. μία παραμένουσα αντοχή αM_u, όπου το α λαμβάνει τιμή που εξαρτάται από την κρίση του μελετητή. Μία προτεινόμενη τιμή είναι η τιμή 0.2.

Έτσι από το διγραμμικοποιημένο πλέον διάγραμμα Μ-φ υπολογίζεται άμεσα η διαθέσιμη πλαστική καμπυλότητα της διατομής από τη σχέση:

$$\varphi_{pl} = \varphi_u - \varphi_y \tag{2.4}$$

2.2.2 Διαγράμματα ροπών-στροφών των πλαστικών αρθρώσεων

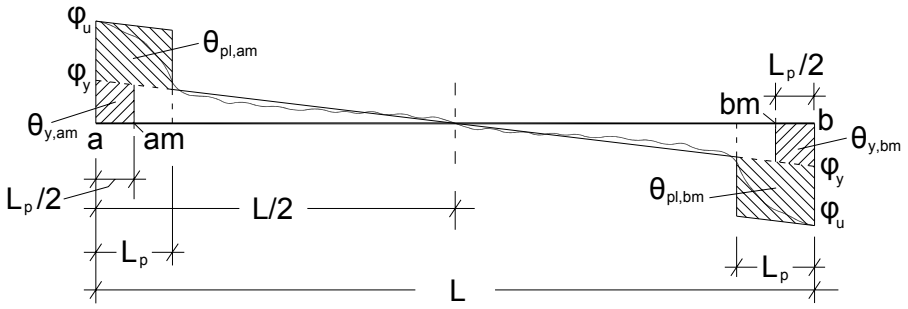
Της παρουσιάστηκε προηγουμένως, το διάγραμμα Μ-φ είναι το υπολογιστικό «εργαλείο» για την μη γραμμική ανάλυση σε επίπεδο διατομής. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει η διαθέσιμη πλαστική καμπυλότητα των διατομών. Το αντίστοιχο εργαλείο για την μη γραμμική ανάλυση σε επίπεδο δομικού στοιχείου είναι το διάγραμμα ροπών στροφών της πλαστικής άρθρωσης Μ-θ. Από το διάγραμμα αυτό προκύπτει αντίστοιχα η διαθέσιμη πλαστική στροφή των πλαστικών αρθρώσεων. Για τη σχεδίαση του διαγράμματος Μ-θ θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η γενική σχέση που συνδέει της καμπυλότητες φ με της στροφές θ:

$$\theta = \int_{x1}^{x2} \varphi(x)\,dx \tag{2.5}$$

Δηλαδή η σχετική στροφή δύο σημείων 1 και 2 επί του άξονα της ραβδωτού στοιχείου που έχουν αντίστοιχα θέσεις που ορίζονται από της τοπικές συντεταγμένες x1 και x2, είναι ίση με το ολοκλήρωμα των καμπυλοτήτων των διατομών στο συγκεκριμένο τμήμα του στοιχείου (που έχει μήκος l=x2-x1). Η ολοκλήρωση αυτή για της ανάγκες της υπερωθητικής ανάλυσης θα πρέπει να γίνει εντός των κρίσιμων περιοχών των στοιχείων δηλ. εντός του μήκους των πιθανών πλαστικών αρθρώσεων. Επομένως θα πρέπει να είναι γνωστά αφενός

το μήκος της πλαστικής άρθρωσης («ενεργό μήκος πλαστικής άρθρωσης»), και αφετέρου η κατανομή των καμπυλοτήτων εντός του μήκους αυτού δηλ. η συνάρτηση φ(x).

Η κατανομή των καμπυλοτήτων φ(x) εξαρτάται και από την φόρτιση της στοιχείου και επομένως δεν είναι πάντοτε η ίδια. Στην γενική περίπτωση της αντισυμμετρικής φόρτισης της στοιχείου (η οποία προσεγγίζει την περίπτωση φόρτισης από σεισμικά φορτία) της φαίνεται και στο σχήμα 2.8. μπορεί να οριστεί με απλό σχετικά τρόπο η γωνία στροφής του κέντρου της πλαστικής άρθρωσης στην κατάσταση διαρροής.



Σχήμα 2.8. Υπολογισμός στροφής διαρροής και πλαστικής στροφής σε δομικό στοιχείο υπό αντισυμμετρική φόρτιση

Πράγματι θεωρώντας ότι μέχρι τη στιγμή της διαρροής της ακραίες διατομές του στοιχείου η κατανομή των καμπυλοτήτων είναι γραμμική, και ταυτόχρονα ότι οι ροπές και οι καμπυλότητες διαρροής της ακραίες διατομές είναι ίσες, είναι δυνατός ο υπολογισμός της στροφής διαρροής των πλαστικών αρθρώσεων με εφαρμογή της σχέσης (2.5). Πιο συγκεκριμένα για το άκρο a επί παραδείγματι ισχύει:

$$\theta_{y,am} = \int_0^{(L_p/2)} \left(1-\frac{2x}{L}\right)\varphi_y dx = \varphi_y \frac{L_p}{2}\left(1-\frac{L_p}{2L}\right) \qquad (2.6)$$

Στην παραπάνω σχέση η συνάρτηση του φ εντός του συμβόλου της ολοκλήρωσης προκύπτει από την θεώρηση ότι για x=0, $\varphi=\varphi_y$ και ότι για x=L/2, φ=0. Ανάλογη σχέση ισχύει και για το άλλο άκρο. (Στην περίπτωση προβόλου με πλαστική άρθρωση μόνον στη βάση, ισχύει η παραπάνω σχέση αν όπου L θέσουμε το διπλάσιο μήκος του προβόλου).

Όσον αφορά στην στροφή της πλαστικής άρθρωσης κατά τη στιγμή της αστοχίας θα γίνεται η επιπλέον παραδοχή ότι εντός του μήκους της η διαφορά μεταξύ της καμπυλότητας αστοχίας φ_u και της καμπυλότητας διαρροής φ_y είναι σταθερή και ίση με την αντίστοιχη διαφορά στην ακραία διατομή του στοιχείου [*Σημ.*: κάτι τέτοιο δεν είναι σωστό γιατί εντός του μήκους του στοιχείου που έχει διαρρεύσει – και είναι στην ουσία το εύρος της πλαστικής άρθρωσης – η κατανομή των καμπυλοτήτων δεν έχει την συγκεκριμένη μορφή. Για να γίνει αυτή η παραδοχή θα πρέπει να θεωρηθεί ένα ισοδύναμο μήκος πλαστικής άρθρωσης – έστω L'_P – εντός του οποίου το διάγραμμα καμπυλοτήτων για το οποίο ισχύει φ_u-φ_y=σταθ., έχει το ίδιο εμβαδόν με το πραγματικό (βλ. π.χ. Μπισκίνης Δ.Ε. (2007)). Ωστόσο για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών δεχόμαστε ότι κατά προσέγγιση ισχύει έστω $L'_P=L_P$]. Επομένως δεχόμαστε ότι κατά την αστοχία το τμήμα της στροφής της πλαστικής άρθρωσης που οφείλεται της πλαστικές παραμορφώσεις είναι ίσο με (βλ. και το παραπάνω σχήμα):

$$\theta_{pl} = \left(\varphi_u - \varphi_y\right) L_p \tag{2.7}$$

Συνεπώς η συνολική στροφή της πλαστικής άρθρωσης κατά τη στιγμή της αστοχίας θα πρέπει να είναι ίση με:

$$\theta_{u,a} = \theta_{u,am} + \theta_{pl,a} = \varphi_y \frac{L_p}{2}\left(1 - \frac{L_p}{2L}\right) + \left(\varphi_u - \varphi_y\right) L_p \tag{2.8}$$

Όσον αφορά στο μήκος της πλαστικής άρθρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση των Paulay and Priestley (1992):

$$L_p = 0.08 \cdot L_0 + 0.022 \cdot d_p \cdot f_y \tag{2.9}$$

Όπου: L_0=η απόσταση (σε m) από το σημείο της μέγιστης ροπής (κατά κανόνα στο άκρο του στοιχείου) έως το σημείο μηδενισμού της ροπής (σημείο αντιστροφής της καμπυλότητας) δηλ. το μήκος διάτμησης L_V, d_p είναι η διάμετρος (ή η μέση διάμετρος σε περίπτωση ράβδων διαφόρων διαμέτρων) των ράβδων οπλισμού (σε m), και f_y είναι η τάση διαρροής του χάλυβα του οπλισμού (σε Mpa). Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης αντιστοιχεί στην επέκταση της πλαστικής άρθρωσης πέρα από την κρίσιμη διατομή λόγω κράτυνσης του χάλυβα κλπ. Ο δεύτερος όρος λαμβάνει υπόψη τη διείσδυση της διαρροής μέσα στο στηρίζων μέλος (π.χ. στο στύλο που στηρίζει ένα άκρο δοκού) δηλαδή την καταστροφή της

συνάφειας, και είναι συνάρτηση της διαμέτρου του διαμήκους οπλισμού. Της φορές για λόγους απλότητας το L_0 λαμβάνεται ίσο με το ήμισυ του καθαρού μήκους του στοιχείου, δηλ. L_0=L/2.

Η παραπάνω σχέση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για στοιχεία δοκών και υποστυλωμάτων. Για την περίπτωση των τοιχωμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και πάλι μία σχέση των Paulay and Priestley (1992), η οποία είναι:

$$L_p = 0.2 \cdot L_w + 0.044 \cdot h_w \leq 0.8 \cdot L_w \qquad (2.10)$$

Όπου: L_w=το μήκος της διατομής του τοιχώματος και h_w είναι το συνολικό του ύψος. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση αυτή εφαρμόζεται στην περίπτωση όπου η μοναδική πιθανή θέση σχηματισμού πλαστικής άρθρωσης σε όλο το ύψος του τοιχώματος είναι η διατομή στη στάθμη της θεμελίωσης του.

Της μπορεί να χρησιμοποιηθούν οι σχέσεις που προτείνει ο EN1998-3 στο παράρτημα A:

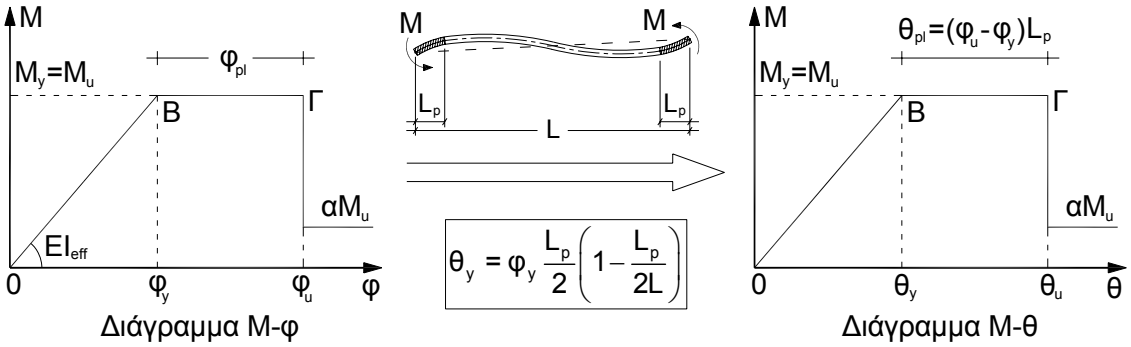
$$L_p = \frac{L_V}{30} + 0.2h + 0.11\left(\frac{d_{bl} f_y}{\sqrt{f_c}}\right) \qquad (2.11)$$

Όπου L_V=ο λόγος της ροπής M της την τέμνουσα V στο άκρο του στοιχείου (δηλ. ο λόγος διάτμησης) σε m, h είναι το ύψος της διατομής σε m, d_{bl} είναι η (μέση) διάμετρος του εφελκυόμενου οπλισμού σε m, και f_y, f_c οι αντοχές χάλυβα και σκυροδέματος αντίστοιχα σε Mpa.

Εναλλακτικά και με βάση διαφορετικό μοντέλο προσομοίωσης της συμπεριφοράς του σκυροδέματος ο EN1998-3 προτείνει και την ακόλουθη σχέση:

$$L_p = 0.1L_V + 0.17h + 0.24\left(\frac{d_{bl} f_y}{\sqrt{f_c}}\right) \qquad (2.12)$$

Έχοντας επομένως όλα τα απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή των σχέσεων (2.6) και (2.8) μπορεί να σχεδιαστεί το διάγραμμα M-θ της πλαστικής άρθρωσης με βάση το διάγραμμα M-φ των διατομών του στοιχείου στην περιοχή της πλαστικής άρθρωσης. Της ο υπολογισμός δίνεται συμβολικά στο ακόλουθο σχήμα:

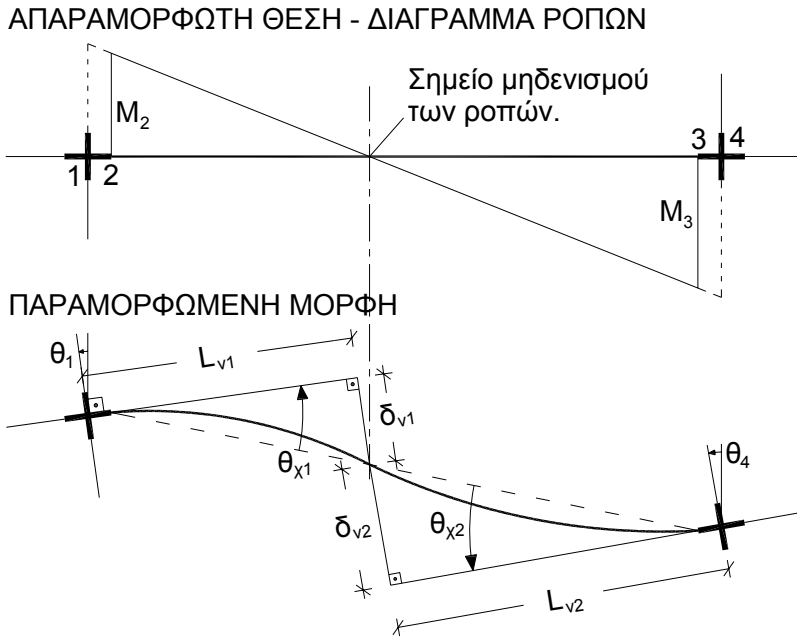


Σχήμα 2.9. Διαδικασία σχηματισμού διαγράμματος M-θ από το διάγραμμα M-φ

2.2.3 Διαγράμματα ροπής-στροφής χορδής δομικών στοιχείων

Τα διαγράμματα M-φ και M-θ για τα οποία έγινε αναφορά της προηγούμενες παραγράφους, περιγράφουν την μη γραμμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σε επίπεδο διατομής και μέλους αντίστοιχα με τη βασική παραδοχή ότι καθοριστική παράμετρος της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη. Αν αντίστοιχα θεωρηθεί ότι καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς των στοιχείων είναι η διάτμηση τότε το καταλληλότερο διάγραμμα για την περιγραφή της είναι ένα διάγραμμα διατμητικής δύναμης V και διατμητικής παραμόρφωσης γ (δηλ. ένα διάγραμμα V-γ). Της στα στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος συνυπάρχουν κατά κανόνα οι καμπτικές και οι διατμητικές παραμορφώσεις και επομένως τόσο η ροπή M όσο και η τέμνουσα V είναι καθοριστικές για την περιγραφή της ανελαστικής συμπεριφοράς της. Έτσι για να γίνει δυνατός ο συνυπολογισμός των ροπών και των τεμνουσών στην διαδικασία της ανάλυσης, τόσο ο EN1998-3 όσο και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. εισάγουν και προτείνουν την χρήση του διαγράμματος ροπών M – στροφών χορδής θ_χ των άκρων των δομικών στοιχείων ως του διαγράμματος με το οποίο θα γίνει η μελέτη της συμπεριφορά της υπό σεισμική διέγερση, και άρα η αποτίμηση της. Τα κείμενα των συγκεκριμένων κανονισμών δίνουν σχέσεις υπολογισμού τόσο της οριακής τιμής της στροφής χορδής κατά το στάδιο της διαρροής όσο και την αντίστοιχη οριακή τιμή της στροφής χορδής κατά το στάδιο της αστοχίας. Της σχέσεις αυτές (της θα δούμε παρακάτω) υπεισέρχονται οι παραμορφώσεις όχι μόνον λόγο κάμψης και διάτμησης αλλά και οι παραμορφώσεις λόγω της εξόλκευσης του τμήματος των

ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου. Ακολούθως θα γίνει μία σύντομη επεξήγηση του όρου στροφή χορδής στο άκρο της δομικού στοιχείου και θα δοθεί μία περιγραφή του τρόπου με τον υπολογίζεται το τμήμα της στροφής χορδής που αντιστοιχεί στην καμπτική παραμόρφωση.

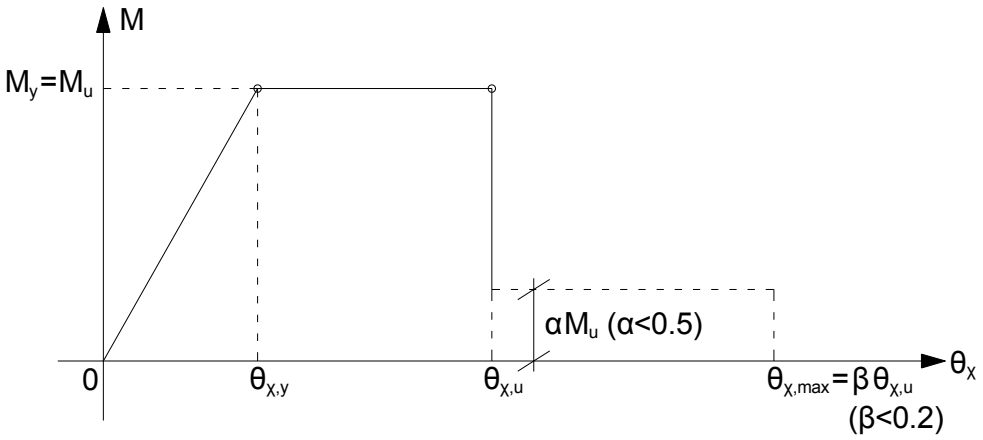


Σχήμα 2.10. Ορισμός της στροφής χορδής δομικού στοιχείου

Της γίνεται φανερό από την μελέτη του παραπάνω σχήματος, η στροφή χορδής σε ένα άκρο της δομικού στοιχείου είναι ίση με τη γωνία που σχηματίζει η εφαπτομένη στον άξονα του στοιχείου στο συγκεκριμένο άκρο και του ευθύγραμμου τμήματος που ενώνει το άκρο του στοιχείου με το πέρας του μήκους διάτμησης στο άκρο αυτό (βλ. π.χ. Ψυχάρης (2010)). Δηλαδή είναι ίση με το λόγο δ_v/L_v. Όπου L_v=M/V είναι ο λόγος της καμπτικής ροπής της την τέμνουσα δύναμη στο υπό μελέτη άκρο. Το δ_v είναι η σχετική μετατόπιση του πέρατος του άκρου διάτμησης ως της το άκρο του στοιχείου σε διεύθυνση κάθετη της την εφαπτομένη στον παραμορφωμένο άξονα στην αρχή του στοιχείου.

Έχοντας υπολογιστεί η τιμή της στροφής χορδής που αντιστοιχεί στη διαρροή της άκρου (δηλ. της $\theta_{\chi,y}$) αλλά και η τιμή της στροφής χορδής που αντιστοιχεί στην αστοχία (δηλ. της $\theta_{\chi,u}$) είναι δυνατός ο σχηματισμός του διαγράμματος ροπών-στροφών χορδής για τα άκρα των δομικών στοιχείων. Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνει τη γενική

μορφή της καμπύλης του διαγράμματος M-θ_χ η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί της υπολογισμούς. Η μορφή αυτή είναι ανάλογη της του διαγράμματος ροπών-στροφών και δίνεται ενδεικτικά στο ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 2.11. Ενδεικτική μορφή διαγράμματος ροπών-στροφών χορδής σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Ο συσχετισμός της στροφής χορδής σε ένα άκρο υπό διαρροή λαμβάνοντας υπόψη μόνον της καμπτικές παραμορφώσεις, με την καμπυλότητα διαρροής της διατομής στο συγκεκριμένο άκρο μπορεί να γίνει ως ακολούθως:

Θεωρώντας γραμμική κατανομή των καμπυλοτήτων φ μέχρι τη διαρροή της διατομής του άκρου ($\varphi=\varphi_y$) και λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καμπυλότητες μηδενίζονται στο πέρας του μήκους διάτμησης L_v το πρόβλημα ανάγεται στον υπολογισμό της σχετικής μετακίνησης δ_v (βλέπε σχήμα 2.10.), διότι της αναφέρθηκε και πιο πάνω $\theta_{\chi,y}=\delta_{v,y}/L_v$. Της είναι γνωστό η μετακίνηση στο άκρο της προβόλου (που αποτελεί το ισοδύναμο σύστημα που αντιστοιχεί στο τμήμα του στοιχείου που έχει μήκος ίσο με το μήκος διάτμησης) δίνεται από το διπλό ολοκλήρωμα των καμπυλοτήτων εντός του συγκεκριμένου μήκους. Δηλαδή:

$$\delta_v = \int_0^{L_v}\int_0^{L_v} \varphi(x)\,dx\,dx = \frac{\varphi_y L_v^2}{3} \tag{2.13}$$

Και επειδή $\theta_y=\delta_v/L_v$ έχουμε τελικώς:

$$\theta_{\chi,y} = \delta_{v,y}/L_v = \frac{\varphi_y L_v}{3} \tag{2.14}$$

Της της τονίστηκε και στην αρχή της παραγράφου, ο EN1998-3 και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνουν συγκεκριμένες σχέσεις για την στροφή της χορδής δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος στο στάδιο της διαρροής.

EN1998-3

Στην παράγραφο Α.3.2.4 του παραρτήματος Α ο EN1998-3 προτείνει σχέσεις για τον υπολογισμό της τιμής της στροφής χορδής στα άκρα δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος στο στάδιο της διαρροής, αναλόγως του τύπου της:

- Για δοκούς και υποστυλώματα:

$$\theta_{\chi,y} = \varphi_y\left(\frac{L_v + a_v z}{3}\right) + 0.0013\left(1 + 1.5\frac{h}{L_v}\right) + 0.13\varphi_y\left(\frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}\right) \qquad (2.15\alpha)$$

- Για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής, διατομής Της ή με εσοχές:

$$\theta_{\chi,y} = \varphi_y\left(\frac{L_v + a_v z}{3}\right) + 0.002\left(1 - 0.125\frac{L_v}{h}\right) + 0.13\varphi_y\left(\frac{d_b f_y}{\sqrt{f_c}}\right) \qquad (2.15\beta)$$

Όπου:

L_v ο λόγος ροπής της τέμνουσα στο άκρο του στοιχείου M/V (μήκος διάτμησης).

Φ_y η καμπυλότητα διαρροής της ακραίας διατομής του στοιχείου.

$A_v z$ είναι το μήκος μετατόπισης του διαγράμματος των ροπών κάμψης (βλ. EN1992-1-1, παράγραφο 9.2.1.3(2)).

Z είναι το μήκος του εσωτερικού μοχλοβραχίονα των δυνάμεων των διατομών το οποίο μπορεί να ληφθεί ίσο με (d-d') [όπου d το στατικό ύψος της διατομής και d' η απόσταση του κέντρου βάρους του θλιβόμενου οπλισμού από την ακραία θλιβόμενη ίνα] για διατομές δοκών και υποστυλωμάτων ή τοιχωμάτων με διατομή Της ή εσοχές, ή να ληφθεί ίσο με 0.8h για ορθογωνικές διατομές τοιχωμάτων.

A_v η τιμή του συντελεστή αυτού εξαρτάται από το αν η διατμητική ρηγμάτωση αναμένεται να προηγηθεί της καμπτικής διαρροής στην ακραία διατομή ή όχι. Αυτό ελέγχεται με την σύγκριση της ροπής διαρροής M_y με το γινόμενο ($L_v \bullet V_{R,c}$), όπου $V_{R,c}$ είναι η διατμητική αντοχή του υπό μελέτη μέλους εφόσον δεν ληφθεί υπόψη ο οπλισμός διάμτησης (βλ. EN1992-1-1 παράγραφος 6.2.2(1)). Έτσι αν:

$M_y > (L_v \bullet V_{R,c})$ τότε $a_v = 1$

$M_y < (L_v \bullet V_{R,c})$ τότε $a_v = 0$

h είναι το ύψος της διατομής

d_b είναι η μέση διάμετρος του εφελκυόμενου οπλισμού

f_y και f_c είναι η τάση διαρροής του χάλυβα και του σκυροδέματος (σε Mpa) αντίζτοιχα της προκύπτουν από μέσες τιμές από επιτόπου δοκιμές και

διαιρεμένες κατάλληλα με της συντελεστές εμπιστοσύνης της αυτοί ορίζονται στο εδάφιο 3.5(1)P του EN1998-3 και τον πίνακα 3.1 λαμβάνοντας υπόψη και το επίπεδο της αποκτηθείσας γνώσης.

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Οι αντίστοιχες σχέσεις που προτείνονται από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. στην παράγραφο 7.2.2 είναι οι ακόλουθες:

- Για δοκούς και υποστυλώματα:

$$\theta_{\chi,y} = \varphi_y \left(\frac{L_v + a_v z}{3} \right) + 0.0014 \left(1 + 1.5 \frac{h}{L_v} \right) + \varphi_y \left(\frac{d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \right) \qquad (2.16\alpha)$$

- Για τοιχώματα ορθογωνικής διατομής:

$$\theta_{\chi,y} = \varphi_y \left(\frac{L_v + a_v z}{3} \right) + 0.013 + \varphi_y \left(\frac{d_b f_y}{8\sqrt{f_c}} \right) \qquad (2.16\beta)$$

Ερχόμενοι τώρα στον υπολογισμό της στροφής χορδής κατά το στάδιο της αστοχίας στην ακραία διατομή θα πρέπει υπολογίσουμε – της και στην αντίστοιχη περίπτωση του σταδίου διαρροής – τη σχετική μετακίνηση $\delta_{v,u}$ στο πέρας του μήκους διάτμησης L_v. Για τον υπολογισμό αυτό θα πρέπει να προσθέσουμε την μετακίνηση $\delta_{v,y}$ που αναπτύσσεται στο στάδιο της διαρροής (η οποία της είδαμε υπολογίζεται από τη σχέση (2.13)) στην μετακίνηση που οφείλεται στην πλαστική στροφή της πλαστικής άρθρωσης. Για τον υπολογισμό της τελευταίας θα πρέπει να λάβουμε υπόψη ότι η πλαστική στροφή της πλαστικής άρθρωσης συμπίπτει με την πλαστική στροφή χορδής του μήκους διάτμησης γύρω από το κέντρο της πλαστικής άρθρωσης, δηλαδή σε απόσταση $L_p/2$ από το άκρο του δομικού στοιχείου. Άρα εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα ότι η μετακίνηση στο άκρο του μήκους διάτμησης είναι ίσο με $\theta_{pl}[L_v-(L_p/2)]$. Της της είδαμε στην παράγραφο που αναφέρεται στον σχηματισμό του διαγράμματος ροπών-στροφών η πλαστική στροφή της πλαστικής άρθρωσης είναι ίση με:

$$\theta_{pl} = \left(\varphi_u - \varphi_y \right) L_p \qquad (2.17)$$

Άρα:

$$\delta_{v,pl} = \left(\varphi_u - \varphi_y\right) L_p \left(L_v - \frac{L_p}{2}\right) \tag{2.18}$$

Και τελικά:

$$\theta_{\chi,pl} = \frac{\delta_{v,pl}}{L_v} = \left(\varphi_u - \varphi_y\right) L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L_v}\right) \tag{2.19}$$

Συνεπώς η ζητούμενη στροφή χορδής στο στάδιο της αστοχίας είναι ίση με:

$$\theta_{\chi,u} = \theta_{\chi,y} + \theta_{\chi,pl} = \frac{\varphi_y L_v}{3} + \left(\varphi_u - \varphi_y\right) L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L_v}\right) \tag{2.20}$$

Η σχέση αυτή είναι αντίστοιχη της σχέσης (Α.4) του ΕΝ1998-3 αν αντί της έκφρασης ($\varphi_y L_v/3$) για την στροφή χορδής στη διαρροή τεθεί η σχέση (Α.11) του ίδιου κανονισμού στην οποία λαμβάνονται υπόψη όχι μόνον οι καμπτικές αλλά και οι διατμητικές παραμορφώσεις της και οι παραμορφώσεις λόγω της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων οπλισμού πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου.

Για την εφαρμογή της παραπάνω σχέσης θα πρέπει να γίνει κατάλληλος υπολογισμός του μήκους πλαστικής άρθρωσης L_p με βάση τη σχέση (2.11) ή τη σχέση (2.12) που παρουσιάστηκαν προηγουμένως. Οι προϋποθέσεις εφαρμογής των σχέσεων αυτών παρουσιάζονται στην παράγραφο Α.3.2.2(6),(7),(8) του ΕΝ1998-3.

Κλείνοντας την αναφορά στο διάγραμμα ροπών-στροφών χορδής θα πρέπει να γίνει μία πολύ σημαντική επισήμανση. Η επισήμανση αυτή αφορά στην συσχέτιση του διαγράμματος αυτού με το επίπεδο αξονικής φόρτισης του κάθε στοιχείου και κυρίως του κάθε κατακόρυφου στο οποίο το επίπεδο της αξονικής δύναμης είναι σημαντικό. Επιπλέον θα πρέπει να σημειωθεί ότι στα κατακόρυφα στοιχεία η μεταβολή της αξονικής δύναμης είναι σημαντική λόγω των πρόσθετων (και διαρκώς μεταβαλλόμενων) αξονικών δυνάμεων που προκύπτουν από τη σεισμική δράση. Αναγνωρίζοντας την επίδραση των αξονικών δυνάμεων και λόγω του μεγέθους της και λόγω της μεταβολής της λόγω της σεισμικής φόρτισης και ο ΕΝ1998-1 και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. αναφέρονται στην επιρροή της επί των διαγραμμάτων δυνάμεων-παραμορφώσεων.

Πιο συγκεκριμένα ο ΕΝ1998-1 στο εδάφιο 4.3.3.4.1(6) συστήνει την θεώρηση των αξονικών δυνάμεων μόνον λόγω των φορτίων βαρύτητας (δηλαδή του συνδυασμού $G+\psi_2 Q$) στον σχηματισμό των σχέσεων/διαγραμμάτων δύναμης-παραμόρφωσης για όλα τα φέροντα στοιχεία. Αντίστοιχα ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. στο εδάφιο

7.1.2.2(δ) σημειώνει ότι οι χαρακτηριστικές παράμετροι των διαγραμμάτων δύναμης-παραμόρφωσης μπορούν να υπολογιστούν λαμβάνοντας υπόψη μόνον την επιρροή των φορτίων βαρύτητας επί των αξονικών δυνάμεων των στοιχείων και αγνοώντας την επιρροή της σεισμικής δράσης. Με της διατάξεις αυτές τόσο ο EN1998-1 όσο και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. επιχειρούν να απλοποιήσουν την διαδικασία συνυπολογισμού των αξονικών δυνάμεων στα διαγράμματα δύναμης-παραμόρφωσης συστήνοντας στην ουσία τον σχηματισμό της μόνον για ένα επίπεδο αξονικής δύναμης. Σε αντίθετη περίπτωση θα πρέπει να γίνεται ξεχωριστός υπολογισμός/σχηματισμός των διαγραμμάτων δυνάμεων-παραμορφώσεων για κάθε επίπεδο αξονικής φόρτισης στο οποίο υποβάλλεται κάθε στοιχείο κατά τη διάρκεια της φόρτισης του από σεισμικές δράσεις.

2.2.4 Ενεργός δυσκαμψία δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος

Ο υπολογισμός της ροπής διαρροής M_y των διατομών της θέσεις των πλαστικών αρθρώσεων αλλά και των στροφών χορδής των δομικών στοιχείων κατά τη διαρροή $\theta_{\chi,y}$, εκτός από την αξιοποίηση του κατά την διαδικασία αποτίμησης (για την οποία θα γίνει αναφορά σε επόμενη παράγραφο) αξιοποιείται και για τον υπολογισμό της ενεργού δυσκαμψίας των δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος. Η ενεργός δυσκαμψία είναι η δυσκαμψία η οποία θα πρέπει να δοθεί στα δομικά στοιχεία της κατασκευής προκειμένου να ξεκινήσει η διαδικασία της υπερωθητικής ανάλυσης. Για τον υπολογισμό της ενεργού δυσκαμψίας δίνονται οδηγίες τόσο από τον EN1998-3 όσο και από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ.

EN1998-3

Στο εδάφιο Α.3.2.4(5) προτείνεται η ακόλουθη σχέση υπολογισμού της ενεργού δυσκαμψίας:

$$K_{eff} = \frac{M_y \bullet L_v}{3 \bullet \theta_{\chi,y}} \qquad (2.21)$$

Στην παραπάνω σχέση το L_v είναι το άνοιγμα διάτμησης το οποίο μπορεί να λαμβάνεται ως ίσο με το μισό του μήκους του στοιχείου. Της, η σχέση θα πρέπει να εφαρμόζεται με τα δεδομένα και των δύο άκρων του στοιχείου και να λαμβάνεται ως ενεργός δυσκαμψία η μέση τιμή.

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνει οδηγίες για τον υπολογισμό της ενεργού δυσκαμψίας στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος στην παράγραφο 7.2.3. Η σχέση που προτείνεται είναι ανάλογη της του EN1998-3:

$$K_{eff} = \frac{M_y \bullet L_S}{3 \bullet \theta_{\chi,y}} \tag{2.22}$$

Στην παραπάνω σχέση, το L_S ορίζεται με διαφορετικό τρόπο βάσει των ακόλουθων περιπτώσεων:

2. Σε δοκούς που συνδέονται και στα δύο της άκρα με κατακόρυφα στοιχεία το L_s μπορεί να λαμβάνεται ίσο με το μισό του καθαρού ανοίγματος.
3. Σε δοκούς που συνδέονται με κατακόρυφο στοιχείο μόνον στο ένα άκρο της το L_s μπορεί να λαμβάνεται ίσο με το σύνολο του καθαρού ανοίγματος.
4. Σε υποστυλώματα το L_s μπορεί να λαμβάνεται ως το μισό του καθαρού ύψους μεταξύ των δοκών με της οποίες συνδέεται μέσα στο υπόψη επίπεδο της κάμψης.
5. Στα τοιχώματα το L_s μπορεί να λαμβάνεται σε κάθε όροφο διαφορετικό και ίσο με το μισό της απόστασης της διατομής βάσης ορόφου από την κορυφή του τοιχώματος στο κτίριο.

Η ενεργός δυσκαμψία για το συνολικό μήκος της στοιχείου μπορεί να λαμβάνεται ίση με το μέσο όσο των τιμών που υπολογίζονται από την (2.22) για της δύο ακραίες διατομές του. Σε περίπτωση μάλιστα που η διατομή του στοιχείου έχει μη συμμετρικό σχήμα ή/και οπλισμό θα λαμβάνονται οι μέσοι όροι των τιμών του K_{eff} από την (2.22) για δύο φορές της κάμψης (θετική ή αρνητική). Επομένως για στοιχεία με μη συμμετρικές διατομές η τελική τιμή της ενεργού δυσκαμψίας θα προκύπτει από τον μέσο όρο τεσσάρων τιμών δηλ. δύο τιμών σε κάθε μία από της δύο ακραίες διατομές.

ΤΟ ΡΑΦ ΕΦΑΡΜΟΖΕΙ ΤΟ ΣΥΝΟΛΟ ΤΩΝ ΣΧΕΣΕΩΝ ΤΟΥ EN1998-3 ΤΟΣΟ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΟΡΙΑΚΩΝ ΤΙΜΩΝ ΤΩΝ ΓΩΝΙΩΝ ΣΤΡΟΦΩΝ ΧΟΡΔΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΣΟ ΚΑΙ ΓΙΑ ΤΟΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟ ΤΩΝ ΜΗΚΩΝ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΑΡΘΡΩΣΗΣ. ΕΠΙΣΗΣ ΤΟ ΡΑΦ ΥΠΟΛΟΓΙΖΕΙ ΤΑ ΔΙΓΡΑΜΜΙΚΟΠΟΙΗΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΡΟΠΩΝ-ΣΤΡΟΦΩΝ ΧΟΡΔΗΣ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΗΣ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΤΗΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΣΕ ΤΗΣ ΒΗΜΑ ΤΗΣ ΣΤΑΔΙΑΚΗΣ ΕΙΣΑΓΩΓΗΣ ΤΩΝ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ.

2.2.5 Επιρροή των φαινομένων p-δ

Πέραν της προσομοίωσης της μη υλικώς μη γραμμικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων – η οποία παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους – θα πρέπει να προσομοιωθεί και η γεωμετρικώς μη γραμμική συμπεριφορά τους. Η γεωμετρικώς μη γραμμική συμπεριφορά προκαλεί επαύξηση των μεγεθών έντασης των δομικών στοιχείων λόγω της επιρροής της παραμόρφωσης τους στις συνθήκες ισορροπίας εσωτερικών-εξωτερικών δυνάμεων, και μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να γίνει πολύ σημαντική έως και κρίσιμη για την ορθή περιγραφή της συνολικής συμπεριφοράς μίας κατασκευής. Για τον λόγο αυτό τόσο ο ΕΝ1998-1 όσο και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. κάνουν ειδική αναφορά και δίνουν συγκεκριμένες οδηγίες τόσο για το πότε όσο και για το πώς θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η επιρροή των φαινομένων της γεωμετρικής μη-γραμμικότητας στους υπολογισμούς.

ΕΝ1998-1: Ο ΕΝ1998-1 στην παράγραφο 4.4.2.2(2) παρουσιάζει τη διαδικασία σύμφωνα με την οποία εκτιμάται το πότε είναι σημαντική και με ποιο τρόπο θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η επιρροή των φαινομένων β' τάξης στα πλαίσια των γραμμικών αναλύσεων. Η διαδικασία στηρίζεται στον υπολογισμό του συντελεστή ευαισθησίας σχετικής μετακίνησης ορόφου θ (βλ. ΕΝ1998-1, και για περισσότερες λεπτομέρειες εφαρμογής το εγχειρίδιο θεωρητικής τεκμηρίωσης του ΡΑΦ).

ΚΑΝ.ΕΠΕ.: Στην παράγραφο 5.4.7 ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. κάνει αναφορά στον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι στατικές επιρροές β' τάξης στα πλαίσια των ανελαστικών αναλύσεων. Πιο συγκεκριμένα στις ανελαστικές αναλύσεις οι στατικές επιρροές β' τάξης θα πρέπει να συνεκτιμώνται στα πλαίσια της ανάλυσης ενσωματώνοντας στον κώδικα της ανάλυσης τη μη γραμμική σχέση έντασης παραμόρφωσης για όλα τα στοιχεία που φέρουν αξονικά φορτία. Επομένως ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. προτείνει την εισαγωγή της γεωμετρικής μη γραμμικότητας στους υπολογισμούς μέσω της χρήσης κατάλληλων μητρώων δυσκαμψίας και φόρτισης (βλέπε π.χ. Αβραμίδης (1982)). Επιπλέον συνιστά και τον έλεγχο για τον περιορισμό της σχετικής μεταθετότητας όπως και στην περίπτωση των ελαστικών αναλύσεων.

2.3 ΒΗΜΑ 3: Επιλογή της καθ' ύψος κατανομής των οριζοντίων στατικών δυνάμεων σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις της σεισμικής διέγερσης

Μετά την προσομοίωση της κατασκευής (ΒΗΜΑ 1 και ΒΗΜΑ 2) ακολουθεί ένα επίσης σημαντικό βήμα της υπερωθητικής ανάλυσης. Πρόκειται για την επιλογή της καθ' ύψος κατανομής των φορτίων που θα χρησιμοποιηθούν για την επαυξητική διαδικασία. Από την φύση της η υπερωθητική ανάλυση είναι συνδεδεμένη με την μορφή των οριζοντίων φορτίων και τα αποτελέσματα της εξαρτώνται σε πολύ μεγάλο βαθμό από αυτήν. Για τον λόγο αυτό καθώς και για το γεγονός ότι υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα για το ποια είναι η καταλληλότερη κατανομή των οριζοντίων στατικών φορτίων τόσο ο EN1998-1,3 (παρ. 4.3.3.4.2.2 και 4.4.4.1 αντίστοιχα) όσο και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (παρ. 5.7.3.3) δίνουν συγκεκριμένες οδηγίες και συνιστούν την εφαρμογή δύο τουλάχιστον καθ' ύψος κατανομών. Οι οδηγίες αυτών των κειμένων συμπίπτουν και είναι οι εξής:

- «Ομοιόμορφη» κατανομή. Δηλαδή κατανομή βασισμένη σε δυνάμεις οι οποίες είναι ανάλογες με τη μάζα ανεξαρτήτως από τη θέση της στάθμης.
- «Ιδιομορφική» κατανομή. Δηλαδή κατανομή ανάλογη με οριζόντιες δυνάμεις συμβατές με την κατανομή οριζοντίων δυνάμεων όπως προκύπτει από την ελαστική ανάλυση. Στην παράγραφο 4.3.3.4.2.2 του EN1998-1 δίνονται κάποιες περαιτέρω οδηγίες για την κατανομή αυτή, και πιο συγκεκριμένα ότι μπορεί να γίνει με βάση τις σχέσεις που ισχύουν για την κατανομή των οριζοντίων φορτίων στα πλαίσια της μεθόδου ανάλυσης οριζόντιας φόρτισης (παρ. 4.3.3.2 του EN1998-1). Δηλαδή βάσει μίας από τις σχέσεις:

$$F_i = F_b \cdot \frac{s_i \cdot m_i}{\Sigma\, s_j \cdot m_j} \qquad (2.23\alpha)$$

$$F_i = F_b \cdot \frac{z_i \cdot m_i}{\Sigma\, z_j \cdot m_j} \qquad (2.23\beta)$$

F_i είναι το οριζόντιο φορτίο στον όροφο i,

F_b είναι η σεισμική τέμνουσα βάσεως όπως υπολογίζεται στα πλαίσια της μεθόδου με βάση το ελαστικό φάσμα του EN1998-1

s_i, s_j είναι οι μετακινήσεις των μαζών m_i, m_j που αντιστοιχούν στην θεμελιώδη ιδιομορφή,

m_i, m_j είναι οι μάζες ορόφων που υπολογίζονται σύμφωνα με τις οδηγίες του EN1998-1,

z_i, z_j είναι τα ύψη των μαζών m_i m_j πάνω από το επίπεδο εφαρμογής της σεισμικής δράσης (θεμελίωση ή άνω επιφάνεια άκαμπτου υπογείου).

Σύμφωνα με το εδάφιο 4.3.3.4.2.2(2)P του EN1998-1 και το εδάφιο 4.4.4.1(2) του EN1998-3 τα οριζόντια φορτία θα πρέπει να εφαρμόζονται στο προσομοίωμα στις θέσεις των μαζών. Επίσης στα συγκεκριμένα εδάφια δηλώνεται ότι θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τυχηματική εκκεντρότητα, η οποία μπορεί να ληφθεί υπόψη με τον τρόπο που λαμβάνεται και στις γραμμικές μεθόδους ανάλυσης. Δηλαδή μπορεί να ληφθεί υπόψη με μετατόπιση των κόμβων όπου τοποθετούνται τα κέντρα μάζας στις αποστάσεις από τα γεωμετρικά κέντρα βάρους που ορίζει ο EN1998-1.

2.4 ΒΗΜΑ 4: Προοδευτική εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων και σχεδίαση της υπερωθητικής καμπύλης (ΥΚ)

Με τα προηγούμενα τρία βήματα της διαδικασίας σχεδιάστηκε το προσομοίωμα της κατασκευής με δεδομένα κατάλληλα για τους σκοπούς της ανάλυσης και επελέγησαν οι κατανομές των οριζοντίων φορτίων με τα οποία θα φορτιστεί σταδιακά. Με τα βήμα 4 ολοκληρώνεται το τμήμα της υπερωθητικής ανάλυσης το οποίο αφορά στον προσδιορισμό της ικανότητας της κατασκευής. Όπως τονίστηκε και στην εισαγωγή του παρόντος εγχειριδίου η ικανότητα εκφράζεται μέσω της σχεδίασης της υπερωθητικής καμπύλης (ΥΚ). Επειδή όμως η ΥΚ είναι ένα διάγραμμα στο οποίο απεικονίζεται η μεταβολή της τέμνουσας βάσης της κατασκευής συναρτήσει της οριζόντιας μετακίνησης ενός προεπιλεγμένου σημείου/κόμβου θα πρέπει να έχει προηγηθεί η επιλογή του σημείου αυτού. Για την επιλογή του σημείου αυτού οι κανονισμοί δίνουν συγκεκριμένες κατευθύνσεις.

2.4.1 Καθορισμός του κόμβου ελέγχου

- EN1998-1 (Εδάφιο 4.3.3.4.2.3(2)): Στο συγκεκριμένο εδάφιο δηλώνεται ότι το σημείο/κόμβος ελέγχου μπορεί να ληφθεί στο κέντρο μάζας του δώματος του κτιρίου με την προϋπόθεση ότι δώμα ορόφου σε εσοχή δεν πρέπει να θεωρείται δώμα του κτιρίου.
- ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Παράγραφος 5.7.3.2): Στην παράγραφο αυτή δηλώνεται ότι το σημείο/κόμβος ελέγχου θα λαμβάνεται γενικώς στο κέντρο μάζας της οροφής του κτιρίου. Για κτίρια με σοφίτες ή μικρούς οικίσκους στο δώμα, ο κόμβος ελέγχου θα λαμβάνεται στην οροφή του πλήρους υποκείμενου ορόφου.

Επομένως και οι δύο αναφορές των κανονισμών δίνουν την κοινή οδηγία ότι το σημείο/κόμβος ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνεται στο κέντρο μάζας της οροφής του υψηλότερου πλήρους ορόφου.

Το ΡΑΦ ορίζει ως κόμβο ελέγχου τον (μετατοπισμένο κατά την τυχωματική εκκεντρότητα) κόμβο του κέντρου μάζας του υψηλοτέρου πλήρους ορόφου της κατασκευής.

2.4.2 Σύντομη περιγραφή της επαυξητικής διαδικασίας

Στην παρούσα παράγραφο θα δοθεί μία σύντομη περιγραφή των βημάτων που συνθέτουν την αλληλουχία των υπολογισμών που εκτελούνται από το ΡΑΦ προκειμένου να σχεδιαστεί η υπερωθητική καμπύλη (ΥΚ) του κτιρίου καθώς και να υπολογιστούν τα απαραίτητα δεδομένα για την διενέργεια των ελέγχων επιτελεστικότητας για τους οποίους θα γίνει ευρύτερη αναφορά στην παράγραφο 2.6.2. Η διαδικασία που ακολουθείται από το ΡΑΦ συνίσταται από τα εξής βήματα:

1. Υπολογίζονται οι τέμνουσες βάσης από το ελαστικό φάσμα του ΕΝ1998-1, με βάση τις ασύζευκτες ιδιοπεριόδους ταλάντωσης που υπολογίζονται από το ΡΑΦ κατά τη διεύθυνση δύο κάθετων μεταξύ τους αξόνων Χ και Υ.
2. Εισάγονται στο προσομοίωμα τα φορτία του σεισμικού συνδυασμού $G+\psi_2 Q$ και γίνεται η πρώτη επίλυση.
3. Κατανέμονται οι τέμνουσες βάση του κτιρίου (που υπολογίστηκαν κατά το πρώτο βήμα της διαδικασίας) σε κάθε όροφο με βάση τις κατανομές που προβλέπουν ο ΕΝ1998-3 και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (βλ. παράγραφο 2.3 του παρόντος κειμένου).
4. Εισάγονται προοδευτικά με μία σειρά επιλύσεων τα οριζόντια φορτία του προηγούμενου βήματος ως ακολούθως:
   (α) Τα οριζόντια φορτία εισάγονται σε κάθε όροφο σε δύο διευθύνσεις ταυτόχρονα σύμφωνα με την πρόταση του ΚΑΝ.ΕΠΕ. για την χωρική επαλληλία των σεισμικών δράσεων (βλ παράγραφο 2.6.1. του παρόντος κειμένου). Έτσι σε μία από τις δύο διευθύνσεις εισάγεται το 100% της τιμής που αντιστοιχεί στην κατανομή του βήματος 3 κατά τη συγκεκριμένη διεύθυνση, και ταυτόχρονα στη άλλη εισάγεται το 30% της αντίστοιχης τιμής που αντιστοιχεί στην άλλη διεύθυνση.

(β) Η εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων γίνεται στις μετατόπισμενες κατά την τυχηματική εκκεντρότητα θέσεις μάζας σύμφωνα με τις προτάσεις των κανονισμών EN1998-1,3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ.

(γ) Τα οριζόντια φορτία που αντιστοιχούν στις πλήρεις τιμές των τεμνουσών βάση χωρίζονται σε τμήματα ο αριθμός των οποίων επιλέγεται από το χρήστη.

5. Ξεκινά η διαδικασία τμηματικής εισαγωγής των οριζοντίων φορτίων με βάση τον αριθμό των τμημάτων στα οποία κατατμήθηκαν. Σε κάθε βήμα γίνονται οι εξής υπολογισμοί:

(Ι) Ελέγχονται τα άκρα των δομικών στοιχείων που αποτελούν πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων για να διαπιστωθεί αν η στροφή της χορδής τους έχει υπερβεί ή όχι τη στροφή χορδής κατά τη διαρροή $\theta_{\chi,y}$.

(ΙΙ) Αν δεν παρατηρηθεί υπέρβαση της τιμής αυτής σε κανένα άκρο δομικού στοιχείου τότε το προσομοίωμα παραμένει ως έχει και η διαδικασία προχωρά στο επόμενο βήμα της φόρτισης αφού όμως πρώτα:

(α) Αποθηκευτούν όλα τα μεγέθη έντασης και παραμόρφωσης που απαιτούνται για το σχεδιασμό της ΥΚ.

(β) Αποθηκευτούν τα μεγέθη παραμόρφωσης των δομικών στοιχείων προκειμένου να υπάρχουν τα απαραίτητα δεδομένα για τους έλεγχους επιτελεστικότητας των στοιχείων.

(γ) Γίνει έλεγχος των δομικών στοιχείων σε διάτμηση προκειμένου να διασφαλιστεί ότι κατά το τρέχον βήμα της φόρτισης δε εμφανίστηκαν διατμητικές αστοχίες. Αν διαπιστωθεί κάτι τέτοιο η διαδικασία σταματά.

(ΙΙΙ) Εάν σε κάποιο ή κάποια άκρα δομικών στοιχείων διαπιστωθεί υπέρβαση της στροφής χορδής $\theta_{\chi,y}$ τότε:

(Α) Εισάγονται στα σημεία υπέρβασης στροφικά ελατήρια (με βάση τις δυνατότητες του γενικευμένου πεπερασμένου στοιχείου του ΡΑΦ που περιγράφεται πλήρως στο εγχειρίδιο θεωρητικής τεκμηρίωσης του ΡΑΦ) με συγκεκριμένες αρχικές-δοκιμαστικές τιμές για τις ελατηριακές τους σταθερές. Το προσομοίωμα επιλύεται ξανά για το ίδιο επίπεδο οριζόντιας φόρτισης και ελέγχεται σε κάθε άκρο που διέρρευσε αν οι σταθερές των

στροφικών ελατηρίων αποδίδουν στα σημεία που εμφανίστηκε η διαρροή καμπτικές ροπές ίσες με τις ροπές διαρροής.

(Β) Αν σε όλα τα σημεία που διέρρευσαν διαπιστωθεί σύγκλιση ροπών ανάλυσης – ροπών διαρροής τότε η επίλυση προχωρά κατά το επόμενο βήμα (δηλ. αυξάνονται οι τιμές των οριζοντίων φορτίων. Πριν την αύξηση της φόρτισης όμως γίνονται και πάλι οι ενέργειες που περιγράφονται στο βήμα 5(ΙΙ).

(Γ) Εάν έστω και σε ένα από τα σημεία που διέρρευσαν εντοπιστεί απόκλιση μεταξύ τιμής ροπής από την ανάλυση και της ροπής διαρροής μεγαλύτερη από το επιτρεπτό όριο (5%) τότε επαναϋπολογίζονται οι σταθερές <u>όλων</u> των στροφικών ελατηρίων και ο φορέας επιλύεται ξανά για το ίδιο επίπεδο φόρτισης.

(Δ) Επανελέγχεται το επίπεδο σύγκλισης ροπών ανάλυσης/ροπών διαρροής και αν είναι το επιθυμητό τότε η ανάλυση προχωρά με αύξηση των οριζοντίων φορτίων αφού προηγουμένως γίνουν οι ενέργειες που περιγράφονται στο βήμα 5(ΙΙ). Αν το επίπεδο σύγκλισης δεν είναι επιθυμητό τότε υπολογίζονται νέες τιμές για τα ελατήρια και η διαδικασία σταμάτα όταν επιτευχθεί η σύγκλιση, και η διαδικασία προχωρά στο επόμενο επίπεδο οριζόντιας φόρτισης.

2.4.3 Οι έλεγχοι διατμητικής αστοχίας

Η διαδικασία προοδευτικής εισαγωγής των οριζοντίων φορτίων καθώς και η τροποποίηση του προσομοιώματος στα βήματα κατά τα οποία εντοπίζεται υπέρβαση των στροφών χορδής των στοιχείων σε διαρροή ($\theta_{\chi,y}$), προϋποθέτει ότι δεν εμφανίζεται σε κάποια διατομή οποιουδήποτε μέλους υπέρβαση της διατμητικής του αντοχής. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, το συγκεκριμένο μέλος θα έχανε πλήρως την ικανότητα του να φέρει τόσο τα κατακόρυφα φορτία όσο και τις επιπλέον στροφές που επιβάλλει η αύξηση της οριζόντιας φόρτισης. Έτσι σε κάθε βήμα της διαδικασίας αύξησης των οριζοντίων φορτίων θα πρέπει να ελέγχεται αν υπάρχει υπέρβαση της διατμητικής αντοχής σε κάποιο δομικό στοιχείο. Σε περίπτωση μίας τέτοιας υπέρβασης θεωρείται σκόπιμο να διακοπεί η επαυξητική διαδικασία καθώς το στοιχείο που αστοχεί δεν μπορεί να συνεισφέρει καθόλου πλέον όχι μόνον στην παραλαβή κατακορύφων φορτίων αλλά και στην πλαισιακή

λειτουργία του πλαισίου στο οποίο ανήκει. Έτσι η λειτουργία του φορέα είναι τελείως διαφορετική και θα πρέπει να γίνουν ειδικές παραδοχές προκειμένου να συνεχιστεί η ανάλυση χωρίς τη συμμετοχή του στοιχείου που αστόχησε διατμητικά στο προσομοίωμα. Επειδή κάτι τέτοιο κρίνεται ιδιαίτερα επισφαλές, η καλύτερη επιλογή στην περίπτωση αυτή είναι η διακοπή της διαδικασίας με την επισήμανση της ψαθυρού τύπου αστοχίας του δομικού στοιχείου που αστόχησε διατμητικά.

Η διαδικασία ελέγχου υπέρβασης της διατμητικής αντοχής των δομικών στοιχείων που πρέπει να γίνεται σε κάθε βήμα της επαυξητικής διαδικασίας εξαρτάται από την στάθμη επιτελεστικότητας για την οποία γίνεται η αποτίμηση της κατασκευής (αναφορά στις στάθμες επιτελεστικότητας γίνεται στην παρ. 2.6.2 του παρόντος κειμένου). Έτσι ισχύουν τα εξής:

<u>Έλεγχος για στάθμη επιτελεστικότητας</u>: «Οιονεί κατάρρευση»

Δεδομένης της φύσης της σεισμικής φόρτισης οι κανονισμοί λαμβάνουν υπόψη τη διατμητική αντοχή των δομικών στοιχείων (δοκών, υποστυλωμάτων, τοιχωμάτων) που υπόκειται σε ανακυκλιζόμενες παραμορφώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της διατμητικής αντοχής η οποία θα πρέπει να υπολογίζεται με τις κατάλληλες σχέσεις. Η ακόλουθη σχέση είναι η σχέση (Α.12) και προτείνεται στο εδάφιο Α.3.3.1(1) του παραρτήματος Α του EN1998-3. Η ίδια ακριβώς σχέση προτείνεται και από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. στο παράρτημα 7Γ (σχέση (Γ.1)):

$$V_R = \frac{1}{\gamma_{el}} \cdot \left[\left(\frac{h-x}{2 \cdot L_v} \right) \cdot \min\left[N;\left(0.55 A_c f_c\right)\right] + \left[1 - 0.05 \cdot \left(5;\mu_\Delta^{pl}\right)\right] \cdot \right.$$
$$\left. \cdot \left[0.16 \cdot \max\left(0.5;100\rho_{tot}\right) \cdot \left[1 - 0.16 \cdot \min\left(5;\frac{L_v}{h}\right)\right] \cdot \sqrt{f_c} A_c + V_w \right] \right] \qquad (2.24)$$

(*<u>Σημείωση</u>*: Οι μονάδες της παραπάνω εξίσωσης είναι MN και m)

Όπου:

$\mu_\Delta^{pl} = \mu_\Delta - 1$ ο συντελεστής πλαστιμότητας της εγκάρσιας καμπτικής παραμόρφωσης του ανοίγματος διάτμησης ή της στροφής χορδής στο άκρο του μέλους. Μπορεί να υπολογιστεί από το λόγο του πλαστικού μέρους της μέγιστης τιμής της γωνίας στροφής χορδής (δηλαδή της οριακής στροφής χορδής $\theta_{\chi,u}$ μείον την στροφή χορδής στη διαρροή $\theta_{\chi,y}$) προς την γωνία της στροφής χορδής στη διαρροή $\theta_{\chi,y}$. Δηλαδή: $\mu_\Delta^{pl} = (\theta_{\chi,u} - \theta_{\chi,y}) / \theta_{\chi,y}$.

γ_{el} συντελεστής που ισούται με 1.15 για πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία και με 1.0 για τα δευτερεύοντα στοιχεία,

h είναι το ύψος της διατομής (ισούται με τη διάμετρο D στην περίπτωση κυκλικών διατομών)

x είναι το ύψος της θλιβόμενης ζώνης,

N είναι η θλιπτική αξονική δύναμη (θετική, λαμβάνεται ως μηδενική για εφελκυσμό),

L_v είναι ο λόγος ροπής/τέμνουσα M/V στην ακραία διατομή,

A_c είναι η επιφάνεια διατομής η οποία λαμβάνεται ίση με (b_wd) για διατομή με ορθογωνικό κορμό πλάτους b_w και στατικού ύψους d. Για κυκλικές διατομές λαμβάνεται ($\pi D_c^2/4$) με D_c=D-2c-2d_{bw} το οποίο είναι η διάμετρος του πυρήνα του σκυροδέματος εσωτερικά των συνδετήρων, D η διάμετρος της διατομής, c η επικάλυψη του σκυροδέματος και d_{bw} η διάμετρος του εγκάρσιου οπλισμού,

f_c είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε Mpa όπως προκύπτει ως μέση τιμή από επί τόπου δοκιμές ή άλλες πηγές πληροφόρησης διαιρεμένη με τον κατάλληλο συντελεστή εμπιστοσύνης που δίνεται στον πίνακα 3.1 της παραγράφου 3.5(1)P ανάλογα με το επίπεδο γνώσης. Για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία το f_c θα πρέπει να διαιρείται επίσης με τον επιμέρους συντελεστή ασφαλείας για το σκυρόδεμα σύμφωνα με το EN1998-1 στην παράγραφο 5.2.4 (δηλ. με το συντελεστή γ_c που ορίζουν τα εθνικά προσαρτήματα για το σκυρόδεμα, και επομένως με το 1.5 που ισχύει στην Ελλάδα),

ρ_{tot} είναι το συνολικό ποσοστό του διαμήκους οπλισμού,

V_w η συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού στη διατμητική αντοχή η οποία:

- Σε διατομές με ορθογωνικό κορμό πλάτους b_w λαμβάνεται ίση με: $V_w=\rho_w b_w z f_{yw}$, όπου ρ_w το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού, z είναι το μήκος του εσωτερικού μοχλοβραχίονα που υπολογίζεται από τη διαφορά d-d' σε δοκούς, υποστυλώματα ή τοιχώματα διατομής T, ή από το γινόμενο 0.8h σε τοιχώματα με ορθογωνική διατομή, και f_{yw} η τάση διαρροής του εγκάρσιου οπλισμού σε Mpa όπως προκύπτει ως μέση τιμή από επί τόπου δοκιμές ή άλλες πηγές πληροφόρησης διαιρεμένη με τον κατάλληλο συντελεστή εμπιστοσύνης που δίνεται στον πίνακα 3.1 της παραγράφου 3.5(1)P ανάλογα με το επίπεδο γνώσης. Για τα πρωτεύοντα σεισμικά στοιχεία το f_{yw} θα πρέπει να διαιρείται επίσης με τον επιμέρους συντελεστή ασφαλείας για

τον χάλυβα σύμφωνα με το EN1998-1 στην παράγραφο 5.2.4 (δηλ. με το συντελεστή γ_s που ορίζουν τα εθνικά προσαρτήματα για το σκυρόδεμα, και επομένως με το 1.15 που ισχύει στην Ελλάδα).

• Σε κυκλικές διατομές λαμβάνεται από τη σχέση:

$$V_w = 0.5 \cdot \pi \cdot (A_{sw}/s) \cdot f_{yw} \cdot (D - 2c) \tag{2.25}$$

Όπου D είναι η διάμετρος της διατομής, A_{sw} είναι η επιφάνεια της διατομής ενός κυκλικού συνδετήρα, s η απόσταση των συνδετήρων, το f_{yw} με τον τρόπο που ορίστηκε προηγουμένως και c η επικάλυψη του σκυροδέματος.

Στην περίπτωση που ελέγχεται υποστύλωμα με λόγο διάτμησης (L_v/h) μικρότερο ή ίσο του 2.0 [στη διατομή του άκρου με την μέγιστη από τις ροπές των δύο άκρων] η τιμή του V_R δεν πρέπει να λαμβάνεται μεγαλύτερη από την παρακάτω τιμή:

$$V_{R,max} = \frac{(4/7) \cdot \left[1 - 0.02 \cdot \min\left(5;\mu_\Delta^{pl}\right)\right]}{\gamma_{el}} \cdot \left[1 + 1.35 \cdot \frac{N}{A_c f_c}\right] \cdot \left[1 + 0.45 \cdot (100\rho_{tot})\right] \cdot \sqrt{\min(40;f_c)}\, b_w z \sin(2\delta) \tag{2.26α}$$

(*<u>Σημείωση</u>*: Οι μονάδες της παραπάνω εξίσωσης είναι MN και m)

Όπου δ είναι η γωνία μεταξύ της διαγωνίου και του άξονα του υποστυλώματος [tanδ=h/(2L_v)], ενώ οι υπόλοιπες μεταβλητές ορίζονται όπως και στην προηγούμενη σχέση.

Ειδικά στην περίπτωση των τοιχωμάτων η τιμή της διατμητικής αντοχής V_R που υπολογίζεται από την σχέση (A.12) του EN1998-3 δεν θα πρέπει να υπερβαίνει την τιμή η οποία αντιστοιχεί σε αστοχία λόγω λοξής θλίψης του κορμού $V_{R,max}$ η τιμή της οποίας υπό ανακυκλιζόμενη φόρτιση μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση (A.15) του EN1998-3:

$$V_{R,max} = \frac{0.85 \cdot \left[1 - 0.06 \cdot \min\left(5;\mu_\Delta^{pl}\right)\right]}{\gamma_{el}} \cdot \left[1 + 1.8 \cdot \min\left(0.15;\frac{N}{A_c f_c}\right)\right] \cdot \left[1 + 0.25 \cdot \max(1.75;100\rho_{tot})\right] \cdot \left[1 - 0.2 \cdot \min\left(2;\frac{L_v}{h}\right)\right] \cdot \sqrt{f_c}\, b_w z \tag{2.26β}$$

(*<u>Σημείωση</u>*: Οι μονάδες της παραπάνω εξίσωσης είναι MN και m)

Οι παράμετροι στην παραπάνω σχέση ορίζονται όπως ακριβώς και στην σχέση (A.14) που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

[Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι η μέγιστη τιμή της διατμητικής αντοχής $V_{R,max}$ πριν την καμπτική διαρροή, προκύπτει από την παραπάνω σχέση με $\mu_\Delta^{pl}=0$. Επομένως όταν γίνει ο έλεγχος σε κάποια διατομή τοιχώματος η οποία δεν έχει διαρρεύσει ισχύει η σχέση (Α.15) θέτοντας όμως $\mu_\Delta^{pl}=0$. Διαφορετικά θα πρέπει να τεθεί στην (Α.15) η τιμή του μ_Δ^{pl} όπως υπολογίζεται με τα κατάλληλα δεδομένα.]

Τέλος, σύμφωνα με το εδάφιο Α.3.3.1(4): *Η τελική αποτίμηση της φέρουσας ικανότητας θα πρέπει να προκύπτει από την ελάχιστη τιμή (ανάλογα την περίπτωση) από τις παραπάνω σχέσεις της παραγράφου Α.3.3.1 αφενός, και από τις τιμές που προκύπτουν από τις σχέσεις για την αντοχή σε διάτμηση που δίνονται στον EN1992-1-1*.

Πρόκειται για μία πολύ σημαντική παρατήρηση αφού σύμφωνα με αυτήν η τελική τιμή της διατμητικής αντοχής ενός μέλους, δεν μπορεί να προκύψει απλώς με εφαρμογή των σχέσεων που δίνονται στο παράρτημα του Α του EN1998-3 αλλά απαιτείται και η θεώρηση των σχέσεων διατμητικής αντοχής που ορίζει ο EN1992-1-1. Έτσι όλα τα παραπάνω μπορούν να συνοψιστούν με την βοήθεια του πίνακα που ακολουθεί:

Δοκοί:	$V_{sd}<\min\{V_R; V_{Rd,s}; V_{Rd,max}\}$ - V_R από την σχέση (Α.12) του EN1998-3,	
Υποστυλώματα με $(L_v/h)>2$:		
Υποστυλώματα με $(L_v/h)<2$:	$M_{sd}<M_y$:	$V_{sd}<\min\{V_R; V_{R,max}(\mu_\Delta^{pl}=0); V_{Rd,s}; V_{Rd,max}\}$ - V_R από την σχέση (Α.12) του EN1998-3, - $V_{R,max}$ από την σχέση (Α.16) του EN1998-3,
	$M_{sd}>M_y$:	$V_{sd}<\min\{V_R; V_{R,max}(\mu_\Delta^{pl}=(\theta_{\chi,u}-\theta_{\chi,y})/\theta_{\chi,y}); V_{Rd,s}; V_{Rd,max}\}$ - V_R από την σχέση (Α.12) του EN1998-3, - $V_{R,max}$ από την σχέση (Α.16) του EN1998-3,
Τοιχώματα:	$M_{sd}<M_y$:	$V_{sd}<\min\{V_R; V_{R,max}(\mu_\Delta^{pl}=0); V_{Rd,s}; V_{Rd,max}\}$ - V_R από την σχέση (Α.12) του EN1998-3, - $V_{R,max}$ από την σχέση (Α.15) του EN1998-3,
	$M_{sd}>M_y$:	$V_{sd}<\min\{V_R; V_{R,max}(\mu_\Delta^{pl}=(\theta_{\chi,u}-\theta_{\chi,y})/\theta_{\chi,y}); V_{Rd,s};$

		$V_{Rd,max}$} - V_R από την σχέση (Α.12) του EN1998-3, - $V_{R,max}$ από την σχέση (Α.15) του EN1998-3,

Όπου:

$V_{Rd,s}$ από τη σχέση (6.8) του EN1992-1-1,

$V_{Rd,max}$ από τη σχέση (6.9) του EN1992-1-1.

Έλεγχος για στάθμες επιτελεστικότητας: «Σημαντικές βλάβες» και «Περιορισμός βλαβών»

Στην περίπτωση αυτή (σύμφωνα με το εδάφιο Α.3.3.2 του EN1998-3) ο έλεγχος υπέρβασης της διατμητικής αντοχής των δομικών στοιχείων δεν απαιτείται εκτός και αν ο συγκεκριμένος έλεγχος είναι ο μόνος που επιβάλλεται να γίνει. Στην περίπτωση αυτή για την πραγματοποίηση του ελέγχου ισχύουν όλα όσα ισχύουν και στην περίπτωση ελέγχου στα πλαίσια της στάθμης επιτελεστικότητας «Οιονεί κατάρρευση» που παρουσιάστηκε προηγουμένως.

2.5 ΒΗΜΑ 5: Προσδιορισμός της απαίτησης – Υπολογισμός της «μετακίνησης-στόχου»

2.5.1 Περιγραφή των μεθόδων του EN1998-1 και του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Μετά την ολοκλήρωση των τεσσάρων πρώτων βημάτων της υπερωθητικής ανάλυσης τα οποία έχουν ως τελικό εξαγόμενο την ΥΚ, ολοκληρώνεται το πρώτο βασικό στάδιο της μεθόδου το οποίο αφορά στον προσδιορισμό της ικανότητας της κατασκευής. Όπως τονίστηκε και στην εισαγωγή του παρόντος εγχειριδίου, η ικανότητα αποτελεί την πρώτη από τις τρεις βασικές έννοιες επί των οποίων στηρίζεται η υπερωθητική ανάλυση. Η δεύτερη βασική έννοια είναι η απαίτηση την οποία «εγείρει» η σεισμική διέγερση και στην οποία θα πρέπει να είναι σε θέση να ανταπεξέλθει η κατασκευή έχοντας κάποια συγκεκριμένη επιθυμητή συμπεριφορά (επίπεδο επιτελεστικότητας).

Έτσι το αντικείμενο του βήματος 5 της υπερωθητικής ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός της απαίτησης που θέτει ο σεισμός σχεδιασμού. Η απαίτηση αυτή εκφράζεται μέσω της μετακίνησης-στόχου του σημείου/κόμβου ελέγχου το οποίο έχει επιλεγεί για το σχεδιασμό της ΥΚ. Για τον υπολογισμό της μετακίνησης-

στόχου υπάρχουν διάφορες μέθοδοι (βλ. π.χ. Σπυράκος Κ. (2004), Μανούκας Γ. (2006)). Επειδή στα πλαίσια παρόντος κειμένου γίνεται αναφορά στους ΕΝ1998-1, ΕΝ1998-3 και ΚΑΝ.ΕΠΕ., θα παρουσιαστούν οι μέθοδοι που προτείνουν τα συγκεκριμένα κανονιστικά κείμενα.

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ κατά ΕΝ1998-1 (ΕΝ1998-3)

Ο ΕΝ1998-1 στο παράρτημα Β προτείνει μία συγκεκριμένη μεθοδολογία για τον υπολογισμό της μετακίνησης-στόχου. Η διαδικασία αυτή υιοθετείται και από τον ΕΝ1998-3 και θα παρουσιαστεί ακολούθως και με αριθμητική εφαρμογή. Τα βήματα της μεθόδου είναι τα εξής:

1. Εκτελείται ιδιομορφική ανάλυση του κτιρίου από την οποία προκύπτει η θεμελιώδης ιδιοπερίοδος T_0, η τέμνουσα βάσης V_0 αλλά και το αντίστοιχο διάνυσμα των ιδιομορφικών μετακινήσεων των ορόφων [Φ].
2. Οι ιδιομορφές κανονικοποιούνται έτσι ώστε στον ανώτατο όροφο όπου βρίσκεται και ο κόμβος ελέγχου να ισχύει $\Phi_n=1$ (n=ο ανώτατος όροφος).
3. Γίνεται η παραδοχή ότι οι οριζόντιες σεισμικές δυνάμεις έχουν την τριγωνική κατανομή που δίνεται από τη σχέση (4.11) του ΕΝ1998-1. Υπολογίζονται οι κανονικοποιημένες οριζόντιες δυνάμεις από τη σχέση:

$$\left[\bar{F}\right] = [m] \bullet [\Phi] \tag{2.27}$$

όπου [m] το διάνυσμα με τις μάζες των ορόφων του κτιρίου.

4. Το κτίριο μετασχηματίζεται σε ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα (SDOF). Η μάζα m* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος δίνεται από τη σχέση:

$$m^* = \sum [m_i] \bullet [\Phi_i] = \sum \left[\bar{F}\right] \tag{2.28}$$

και ο συντελεστής μετασχηματισμού Γ από τη σχέση:

$$\Gamma = \frac{m^*}{\sum [m_i] \bullet [\Phi_i^2]} = \frac{\sum \left[\bar{F}\right]}{\sum \left(\frac{\left[\bar{F}\right]^2}{[m_i]} \right)} \tag{2.29}$$

5. Εκτελείται υπερωθητική ανάλυσηκαι σχεδιάζεται η καμπύλη ικανότητας. Η καμπύλη αυτή διγραμμικοποιείται (δηλαδή μετατρέπεται σε ένα τέλειο ελαστοπλαστικό διάγραμμα δύναμης-μετακίνησης) με κριτήριο την ισότητα των εμβαδών που ορίζονται κάτω από την πραγματική και την διγραμμικοποιημένη καμπύλη ικανότητας. Η δύναμη διαρροής F_y^* του ισοδύναμου μονοβάθμιου ελαστοπλαστικού συστήματος λαμβάνεται ίση με την τέμνουσα βάσης κατά το

σχηματισμό του πλαστικού μηχανισμού. Ενώ η τιμή της μετακίνησης διαρροής του ιδεατού μονοβάθμιου συστήματος d_y^* δίνεται από τη σχέση:

$$d_y^* = 2 \cdot \left(d_m^* - \frac{E_m^*}{F_y^*} \right) \tag{2.30}$$

όπου: F_y^*, d_m^* η δύναμη και η μετακίνηση κατά το σχηματισμό του πλαστικού μηχανισμού αντίστοιχα, και E_m^* η πραγματική ενέργεια παραμόρφωσης ως το σχηματισμό πλαστικού μηχανισμού (δηλαδή το εμβαδόν κάτω από την πραγματική καμπύλη ικανότητας του κτιρίου).

6. Υπολογίζεται η ιδιοπερίοδος του ιδεατού ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος από τη σχέση:

$$T^* = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^* \cdot d_y^*}{F_y^*}} \tag{2.31}$$

7. Υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος με ελαστική συμπεριφορά από τη σχέση:

$$d_{et}^* = S_e\left(T^*\right) \cdot \left[\frac{T^*}{2 \cdot \pi} \right]^2 \tag{2.32}$$

όπου $S_e(T^*)$ είναι η τιμή του ελαστικού φάσματος επιτάχυνσης για ιδιοπερίοδο T*.

8. Προσδιορίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση dt* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος. Για τον προσδιορισμό της μετακίνησης αυτής υπάρχουν δύο σχέσεις ανάλογα με το αν το κτίριο βρίσκεται στις μικρές ή στις μεσαίες και μεγάλες ιδιοπεριόδους του φάσματος. Η ιδιοπερίοδος διαχωρισμού ανάμεσα στις μικρές και τις μεσαίες ιδιοπεριόδους είναι η T_c (τέλος οριζόντιου κλάδου φάσματος).

(α) $T^* < T_c$ (μικρές ιδιοπερίοδοι):

Αν $F_y^* / m^* \geq S_e(T^*)$, η απόκριση είναι ελαστική και επομένως $d_t^* = d_{et}^*$

Αν $F_y^* / m^* < S_e(T^*)$, η απόκριση είναι μη γραμμική και ισχύει:

$$d_t^* = \frac{d_{et}^*}{q_u} \cdot \left[1 + (q_u - 1) \cdot \frac{T_2}{T^*} \right] \geq d_{et}^*$$

όπου: $q_u = \frac{S_e(T^*) \cdot m^*}{F_y^*}$, ο λόγος της επιτάχυνσης του συστήματος για απεριόριστα ελαστική συμπεριφορά $S_e(T^*)$ προς την επιτάχυνση του συστήματος με περιορισμένη αντοχή F_y^* / m^*.

β) $T^* \geq T_c$ (μεσαίες και μεγάλες ιδιοπερίοδοι): $d_t^* = d_{et}^*$. Η τιμή της d_t^* δε πρέπει να ξεπερνά το $3 \cdot d_{et}^*$

9. Τέλος υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση του πολυβάθμιου συστήματος από τη σχέση: $d_t = \Gamma \cdot d_t^*$

<u>ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.</u>

Η μετακίνηση-στόχος με βάση το κείμενο του ΚΑΝ.ΕΠΕ. υπολογίζεται στα σχόλια της παραγράφου 5.7.4.2 από την ακόλουθη σχέση (Σ5.6):

$$u_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \left(\frac{T_e^2}{4\pi^2}\right) \cdot S_e(T) \qquad (2.33)$$

Όπου:

- $S_e(T)$ είναι η ελαστική φασματική ψευδοεπιτάχυνση και υπολογίζεται με βάση το ελαστικό φάσμα του EN1998-1 για ιδιοπερίοδο που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο της κατασκευής T_e. Η T_e υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση (Σ5.5) του ΚΑΝ.ΕΠΕ.:

$$T_e = T_1 \sqrt{\frac{K_0}{K_e}} \qquad (2.34)$$

Στην παραπάνω σχέση:

–T_1=η πρώτη (η κυριαρχούσα) ελαστική ιδιοπερίοδος ταλάντωσης όπως υπολογίζεται από μία ελαστική δυναμική ανάλυση,

–K_0=αντίστοιχη ελαστική οριζόντια δυσκαμψία

–K_e=η ισοδύναμη οριζόντια δυσκαμψία η οποία υπολογίζεται με βάση την εξιδανικευμένη υπερωθητική καμπύλη που προκύπτει με βάση την μέθοδο που περιγράφεται στην παράγραφο 5.7.3.4 του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

- Οι συντελεστές C_0, C_1, C_2, C_3 είναι διορθωτικοί συντελεστές και υπολογίζονται ως εξής:

–C_0=ο συντελεστής συσχέτισης που συσχετίζει τη φασματική μετακίνηση ενός ισοδύναμου ελαστικού φορέα με δυσκαμψία K_e (όπως προκύπτει από την εξιδανικευμένη υπερωθητική καμπύλη και είναι ίση με $S_d=(T_e^2/4\pi^2)\Phi_e$) με

την πραγματική μετακίνηση δ_t στην κορυφή του φορέα που συμπεριφέρεται ελαστοπλαστικά. Οι τιμές του C_0 εξαρτώνται από τον αριθμό των ορόφων της μελετούμενης κατασκευής και δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Αριθμός ορόφων	1	2	3	5	≥10
Συντελεστής C_0	1.0	1.2	1.3	1.4	1.5

–Ο συντελεστής C_1 προκύπτει από το λόγο:

$$C_1 = \delta_{inel} / \delta_{el} \tag{2.35}$$

όπου το δ_{inel} είναι η μέγιστη ανελαστική μετακίνηση της κατασκευής, ενώ το δ_{el} είναι η αντίστοιχη ελαστική και μπορεί να υπολογιστεί από τις σχέσεις:

$$\begin{aligned} C_1 &= 1 && \text{όταν} \quad T \geq T_C \\ C_1 &= \frac{1.0 + \left[(R-1) \bullet (T_c/T) \right]}{R} && \text{όταν} \quad T < T_C \end{aligned} \tag{2.36}$$

Στην παραπάνω σχέση το T_c είναι η χαρακτηριστική τιμή του φάσματος του EN1998-1 από την οποία ξεκινάει ο κατιών κλάδος του φάσματος απόκρισης, ενώ $R=V_{el}/V_y$ είναι ο λόγος της ελαστικής απαίτησης προς την αντίσταση διαρροής της κατασκευής εκφρασμένων σε όρους τέμνουσας βάσης. Ο συγκεκριμένος λόγος μπορεί να υπολογιστεί από την ακόλουθη σχέση:

$$R = \left[\frac{(\Phi_e / g)}{(V_y / W)} \right] \bullet C_m \tag{2.37}$$

όπου το Φ_e είναι φασματική επιτάχυνση (από το ελαστικό φάσμα του EN1998-1) που αντιστοιχεί στην ισοδύναμη ιδιοπερίοδο του κτιρίου T_e που υπολογίζεται με τρόπο που παρουσιάστηκε πιο πάνω, W το βάρος του κτιρίου που αντιστοιχεί στη συνολική ταλαντούμενη μάζα της κατασκευής, και C_m είναι ο συντελεστής δρώσας μάζας (για τη συνεκτίμηση των ανωτέρων ιδιομορφών που μπορεί να λαμβάνεται ίσος με 0.85 (σύμφωνα με την παράγραφο 5.5.5.2β του ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Η αντίσταση διαρροής (σε όρους τέμνουσας βάσης) της κατασκευής V_y μπορεί να υπολογιστεί από το εξιδανικευμένη/διγραμμικοποιημένη ΥΚ σύμφωνα με την παράγραφο 5.7.3.4 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών ο λόγος V_y/W μπορεί να ληφθεί ίσος με 0.15 για κτίρια με μικτό σύστημα και 0.10 για κτίρια

με αμιγώς πλαισιακό σύστημα με βάση την κατηγοριοποίηση που κάνει ο EN1998-1.

–Ο συντελεστής C_2 μπορούν να ληφθεί από τον ακόλουθο πίνακα:

Στάθμη επιτελεστικότητας	**T≤0.1sec**		**T≤T_c**	
	Φορέας τύπου 1	**Φορέας τύπου 2**	**Φορέας τύπου 1**	**Φορέας τύπου 2**
Άμεση χρήση μετά το σεισμό	1.0	1.0	1.0	1.0
Προστασία ζωής	1.3	1.0	1.1	1.0
Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης	1.5	1.0	1.2	1.0

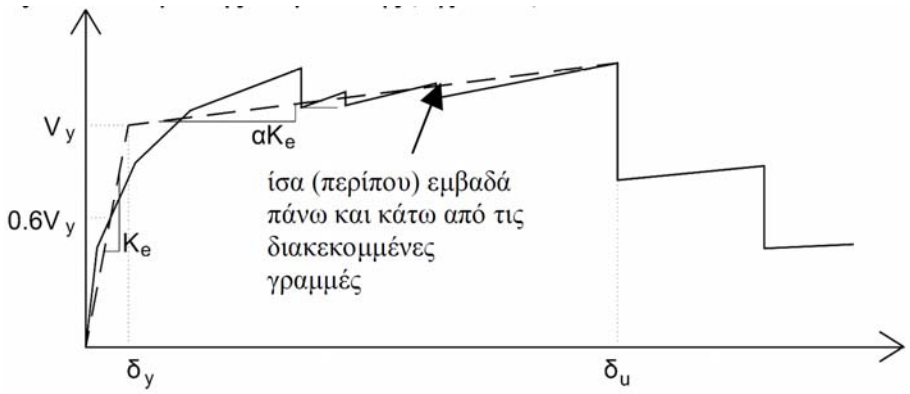
Για τιμές T μεταξύ 0.1sec και T_c θα πρέπει να γίνει γραμμική παρεμβολή.

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

–Ο συντελεστής C_3 (λαμβάνει υπόψη την αύξηση των μετακινήσεων λόγω φαινομένων $2^{ης}$ τάξης (P-Δ)), μπορεί να ληφθεί ίσος προς 1+5(θ-0.1)/T, όπου θ ο δείκτης σχετικής μεταθετότητας (βλέπε μέθοδο υπολογισμό στον EN1998-1). Στη συνήθη (για κτίρια από Ο/Σ και από τοιχοποιία) περίπτωση, όπου θ<0.1, λαμβάνεται C_3=1.0.

ΕΞΙΝΔΑΝΙΚΕΥΣΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗΣ ΚΑΜΠΥΛΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Στο σημείο αυτό θα γίνει μία αναφορά στον τρόπο με τον οποίο προτείνεται να γίνεται η εξιδανίκευση/διγραμμικοποίηση της ΥΚ κατά τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. καθώς η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη στα πλαίσια του υπολογισμού της μετακίνησης-στόχου που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται στην παράγραφο 5.7.3.4 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. και δίνεται ενδεικτικά στο ακόλουθο σχήμα Σ5.2 του συγκεκριμένου κανονισμού (Πηγή: Κείμενο ΚΑΝ.ΕΠΕ.):



Η εξιδανικευμένη ΥΚ προτείνεται να είναι διγραμμική, με κλίση του πρώτου κλάδου K_e και κλίση του δεύτερου κλάδου ίση με αK_e. Οι δύο ευθείες που συνθέτουν τη διγραμμική ΥΚ μπορεί να προσδιορίζονται γραφικά, με *κριτήριο την κατά προσέγγιση ισότητα των εμβαδών των χωρίων που προκύπτουν πάνω και κάτω από τις τομές της πραγματικής και της εξιδανικευμένης καμπύλης* (βλ. το παραπάνω σχήμα). Η ισοδύναμη οριζόντια δυσκαμψία K_e μπορεί να υπολογιστεί ως η «επιβατική» δυσκαμψία που αντιστοιχεί σε δύναμη ίση προς το 60% της δύναμης διαρροής V_y η οποία ορίζεται από την τομή των ευθειών που προαναφέρθηκαν (και σχεδιάζονται με το κριτήριο των ίσων εμβαδών). Η ανηγμένη κλίση (α) του δεύτερου κλάδου προσδιορίζεται από μια ευθεία που διέρχεται από το σημείο της (πραγματικής) μη-γραμμικής ΥΚ που αντιστοιχεί στη μετακίνηση αστοχίας (δ_u), πέραν της οποίας παρατηρείται σημαντική μείωση της αντοχής της κατασκευής. Σε κάθε περίπτωση η προκύπτουσα τιμή της α πρέπει να είναι θετική (ή μηδέν), αλλά να μην ξεπερνά το 0.10. Απλοποιητικά, και εφόσον δεν απαιτείται εκτίμηση της διαθέσιμης πλαστιμότητας του κτιρίου, η κλίση K_e μπορεί να λαμβάνεται ως η επιβατική τιμή για στάθμη αντοχής ίση προς το 60% της μέγιστης αντοχής (V_{max}), η δε δύναμη διαρροής V_y, για τον υπολογισμό του δείκτη R, ως το 80% της V_{max}.

2.5.2 Αριθμητικές εφαρμογές

Στην παράγραφο αυτή θα παρουσιαστούν αριθμητικές εφαρμογές των μεθόδων υπολογισμού της μετακίνησης-στόχου του EN1998-1 και του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Υπολογισμός μετακίνησης-στόχου κατά EN1998-1

Τα βήματα της διαδικασίας που παρουσιάστηκε παραπάνω για τον υπολογισμό της μετακίνησης-στόχου σύμφωνα με τον EN1998-1 θα εφαρμοστούν ακολούθως και αριθμητικά με τη βοήθεια ενός διπλά συμμετρικού πενταόροφου κτιρίου αμιγώς πλαισιακού θεμελιωμένου σε έδαφος κατηγορίας D (με βάση τις κατηγορίες εδαφών του EN1998-1).

1. Ιδιομορφική ανάλυση του κτιρίου και κανονικοποίηση της πρώτης ιδιομορφής:

Μητρώο μάζας: $[m]=\begin{bmatrix}57.62\\57.62\\56.72\\54.74\\42.46\end{bmatrix}$ **1η ιδιομορφή:** $[\Phi_1]=\begin{bmatrix}0.0155\\0.0386\\0.0599\\0.0776\\0.093\end{bmatrix}$ **Κανονικοποιημένη 1η ιδιομορφή:** $[\Phi]=\begin{bmatrix}0.167\\0.416\\0.644\\0.834\\1.000\end{bmatrix}$

Θεμελιώδης ιδιοπερίοδος: T_0=0.46sec **Τέμνουσα βάσης**: V_0=452.65kN

2. Υπολογισμός κανονικοποιημένων οριζοντίων δυνάμεων από τη σχέση (2.27):

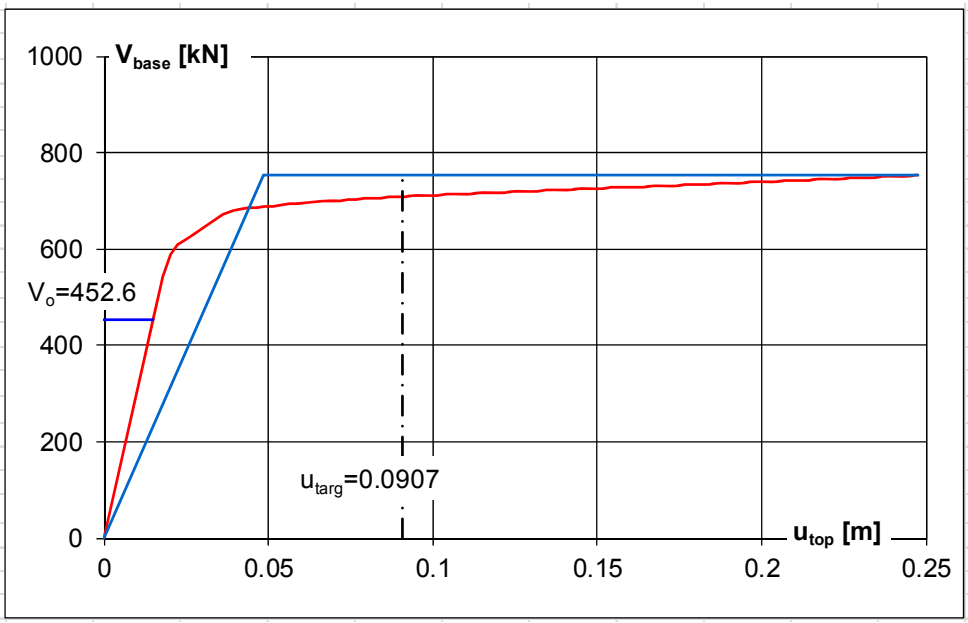
$$[\overline{F}]=\begin{bmatrix}57.62\\57.62\\56.72\\54.74\\42.46\end{bmatrix}\bullet\begin{bmatrix}0.167\\0.416\\0.644\\0.834\\1.000\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}9.60\\23.94\\36.53\\45.65\\42.46\end{bmatrix}$$

3. Υπολογισμός της μάζας m* του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος από τη σχέση (2.28), και του συντελεστή μετασχηματισμού Γ από τη σχέση (2.29):

$$m^*=\sum[m_i]\bullet[\Phi_i]=\sum[\overline{F}]=158.180t$$

$$\Gamma=m^*/\sum[m_i]\bullet[\Phi_i^2]=158.180/115.60=1.37$$

4. Εκτέλεση στατικής υπερωθητικής ανάλυσης, σχεδίαση της καμπύλης ικανότητας και διγραμμικοποίηση της:



Η διγραμμικοποίηση γίνεται με κριτήριο την ισότητα των εμβαδών που ορίζονται κάτω από την πραγματική και την διγραμμικοποιημένη καμπύλη ικανότητας. Το εμβαδόν αυτό είναι: E_m=168.89. Από την καμπύλη ικανότητας προκύπτει ότι η μετακίνηση του φορέα κατά τον σχηματισμό του πλαστικού μηχανισμού είναι d_m=0.25m ενώ από τη διγραμμικοποίηση προκύπτουν για το πραγματικό πολυβάθμιο σύστημα:

Δύναμη διαρροής: F_y=752.9kN **Μετακίνηση διαρροής:** $d_y = 2 \cdot \left(d_m - \frac{E_m}{F_y} \right) = 0.048\text{m}$

Τα αντίστοιχα μεγέθη για το ισοδύναμο μονοβάθμιο σύστημα είναι:

Δύναμη διαρροής: F_y^*= F_y/Γ=550.2kN **Μετακίνηση διαρροής:** $d_y^* = d_y / \Gamma = 0.035\text{m}$

5. Η ιδιοπερίοδος του ιδεατού ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος υπολογίζεται από τη σχέση (2.31):

$$T^* = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m^* \cdot d_y^*}{F_y^*}} = 0.633\text{sec}$$

6. Υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση του ιδεατού ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος με απεριόριστα ελαστική συμπεριφορά από τη σχέση (2.32), και με τα δεδομένα του επιλεχθέντος ελαστικού φάσματος. Από τα

δεδομένα αυτά προκύπτει ότι $S_e(T^*)=5.89 m/sec^2$, και επομένως από την (2.32) προκύπτει:

$$d^*_{et} = 0.06m$$

7. Υπολογίζεται η στοχευόμενη μετακίνηση του ισοδύναμου μονοβάθμιου συστήματος με ελαστική συμπεριφορά ως εξής:

Για έδαφος κατηγορίας D ισχύει: $T_C=0.8sec$. Επομένως $T^*=0.633<T_2$.

Επιπλέον: $F^*_y/m^*=550.2/158.18=3.48< S_e(T^*)=5.89$. Επομένως, η απόκριση είναι μη γραμμική και ισχύει:

$$d^*_t = \frac{d^*_{et}}{q_u} \bullet \left[1+(q_u-1)\bullet\frac{T_2}{T^*}\right] = \frac{0.06}{1.692} \bullet \left[1+(1.692-1)\bullet\frac{0.8}{0.633}\right] = 0.0663 \geq d^*_{et}$$

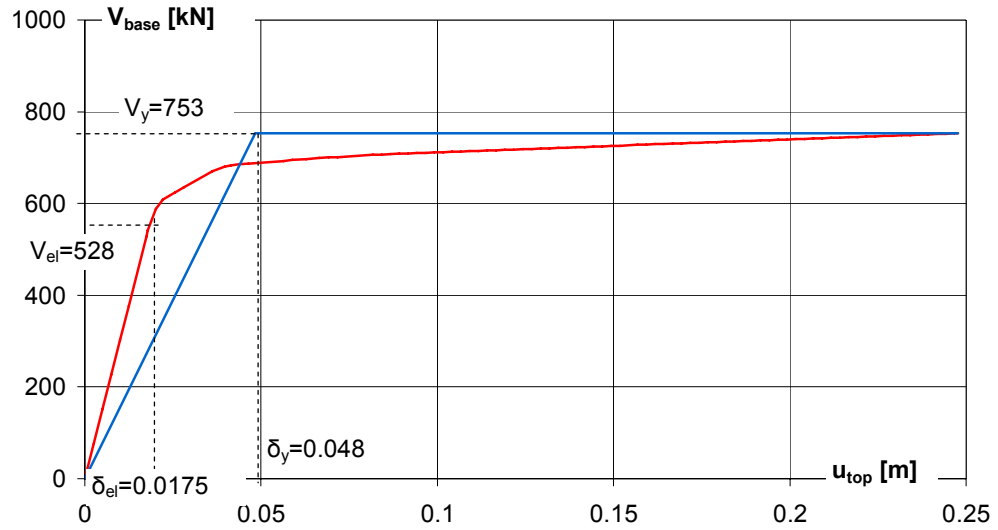
Όπου: $q_u = \frac{S_e(T^*)\bullet m^*}{F^*_y} = \frac{5.89 \bullet 158.18}{550.20} = 1.692$

8. Υπολογισμός της στοχευόμενης μετακίνησης του πολυβάθμιου συστήματος από τη σχέση:

$$u_t = d_t = d^*_t \bullet \Gamma = 0.0663 \bullet 1.37 = 0.091m$$

Υπολογισμός μετακίνησης-στόχου κατά ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Τα βήματα της διαδικασίας που παρουσιάστηκε παραπάνω για τον υπολογισμό της μετακίνησης-στόχου σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. θα εφαρμοστούν ακολούθως και αριθμητικά. Για το λόγο αυτό θεωρείται το διπλά συμμετρικό αμιγώς πλαισιακό πενταώροφο κτίριο όπως και στην περίπτωση του αριθμητικού παραδείγματος για την μέθοδο του EN1998-1 που παρουσιάστηκε πιο πάνω. Για το ξεκίνημα των υπολογισμών θεωρείται η πραγματική και η διγραμμικοποιημένη υπερωθητική καμπύλη του κτιρίου:



Η διγραμμικοποίηση έγινε με βάση το κριτήριο των ίσων εμβαδών και με κλίση του δεύτερου κλάδου ίση με 0 (α=0) όπως επιτρέπει στα σχόλια του στο εδάφιο 5.7.3.4 ο ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Από την ελαστική δυναμική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε προέκυψε ότι η κυριαρχούσα ελαστική ιδιοπερίοδος T είναι ίση με T=0.456sec. Από τη μελέτη της πραγματικής (και όχι της διγραμμικοποιημένης) υπερωθητικής καμπύλης που δίνεται πιο πάνω προκύπτει ότι η ελαστική δυσκαμψία του κτιρίου είναι:

$$K_0 = \frac{528}{0.0175} = 30153.25 kN/m$$

Από την διγραμμικοποιημένη καμπύλη του ίδιου σχήματος μπορεί να υπολογιστεί και η ισοδύναμη πλευρική δυσκαμψία από τη σχέση:

$$K_e = \frac{753}{0.048} = 15553 kN/m$$

Έτσι η τιμή της ισοδύναμης κυριαρχούσας ιδιοπεριόδου T_e υπολογίζεται από τη σχέση:

$$T_e = T_1\sqrt{\frac{K_0}{K_e}} = 0.456\sqrt{\frac{30153.25}{15553}} = 0.635\text{sec}$$

Από το ελαστικό φάσμα του EN1998-1 για έδαφος D, ζώνη II και T_e=0.635sec βρίσκουμε: $\Phi_e(T_e)$=7.95.

Ο υπολογισμός των συντελεστών C_0, C_1, C_2, C_3 μπορεί να γίνει τώρα ως εξής:

- *Συντελεστής C_0*: Σύμφωνα με τα σχόλια της παραγράφου 5.7.4.2, για κτίριο με πέντε ορόφους μπορούμε να λάβουμε: C_0=1.4.
- *Συντελεστής C_1*: Σύμφωνα με τα σχόλια της παραγράφου 5.7.4.2 θα πρέπει να ελεγχθεί αρχικά αν ισχύει $T_1>T_c$ ή όχι. Για έδαφος κατηγορίας D η τιμή του T_c είναι: $T_c(D)$=0.8>0.456. Άρα:

$$C_1 = \frac{1.0 + \left[(R-1)\bullet(T_c/T)\right]}{R}$$

Η τιμή του R μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση (Σ5.7):

$$R = \left[\frac{(\Phi_e/g)}{(V_y/W)}\right]\bullet C_m$$

Για το C_m μπορούμε να λάβουμε τη τιμή: C_m=0.85 (σύμφωνα με την παράγραφο 5.5.5.2β). Για τον λόγο V_y/W σε κτίρια με αμιγώς πλαισιακό στατικό σύστημα μπορούμε να λάβουμε προς την πλευρά της ασφάλειας την τιμή V_y/W=0.1. Έτσι προκύπτει:

$$R = \left[\frac{(\Phi_e/g)}{(V_y/W)}\right]\bullet C_m = \left[\frac{(7.95/9.81)}{0.1}\right]\bullet 0.85 = 6.885$$

Και έτσι:

$$C_1 = \frac{1.0 + \left[(R-1)\bullet(T_c/T)\right]}{R} = \frac{1.0 + \left[(6.885-1)\bullet(0.8/0.456)\right]}{6.885} = 1.645$$

- *Συντελεστής C_2*: Σύμφωνα με τα σχόλια της παραγράφου 5.7.4.2 η τιμή του συντελεστή C_2 μπορεί να ληφθεί από τον πίνακα Σ5.1. Για να γίνει χρήση του πίνακα αυτού θα πρέπει να υπάρχει πληροφορία για το επίπεδο πλαστιμότητας του φορέα. Θεωρώντας ότι το μελετούμενο κτίριο κατασκευάστηκε μετά το 1985 μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το κτίριο είναι φορέας τύπου 2. Επίσης για

να χρησιμοποιηθεί ο συγκεκριμένος πίνακας θα πρέπει να ληφθεί απόφαση για το στοχευόμενο επίπεδο επιτελεστικότητας. Έστω λοιπόν ότι το επίπεδο αυτό αντιστοιχεί στην Προστασία Ζωής. Τέλος με βάση το γεγονός ότι $0.1<T=0.456<T_c=0.8$ θα πρέπει να γίνει παρεμβολή μεταξύ των δύο περιπτώσεων που καλύπτει ο πίνακας. Στη συγκεκριμένη όμως περίπτωση και για τις δύο περιπτώσεις του πίνακα προκύπτει $C_2=1$, και άρα τελικά $C_2=1$.

- *Συντελεστής C_3*: Σύμφωνα με τα σχόλια της παραγράφου 5.7.4.2 για τον υπολογισμό του C_3 θα πρέπει να εξεταστεί το επίπεδο επιρροής των φαινομένων δεύτερης τάξης. Στο μελετούμενο κτίριο προέκυψε θ=0.1 και άρα $C_3=1$.

Μετά τον υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών μπορεί να γίνει και ο τελικός υπολογισμός της μετακίνησης στόχου από τη σχέση (Σ5.6) του ΚΑΝ.ΕΠΕ ως ακολούθως:

$$u_t = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot \left(\frac{T_e^2}{4\pi^2}\right) \cdot S_e(T) = 1.4 \cdot 1.645 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot \left(\frac{0.635^2}{4 \cdot 3.14^2}\right) \cdot 7.95$$

$$\Rightarrow u_t = 0.186\text{m}$$

2.6 ΒΗΜΑ 6: Αποτίμηση της συμπεριφοράς της κατασκευής

2.6.1 Υπολογισμός μεγεθών απόκρισης για την αποτίμηση

Η διαδικασία που περιγράφηκε στα πλαίσια των βημάτων 3 έως και 5 αφορούσε στον σχεδιασμό της ΥΚ του κτιρίου. Όπως τονίστηκε στις αντίστοιχες παραγράφους η διαδικασία αυτή συνίσταται στην προοδευτική εισαγωγή οριζοντίων φορτίων (με κατανομές που δίνονται στο βήμα 3 στην παράγραφο 2.3) σε δύο κάθετες μεταξύ τους διευθύνσεις Χ και Υ, και στην σχεδίαση της καμπύλης που συνδέει την τέμνουσα βάσης του κτιρίου με την μετακίνηση του κόμβου ελέγχου στην ίδια διεύθυνση (Χ ή Υ). Κάθε σημείο της ΥΚ αντιστοιχεί σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο των οριζοντίων φορτίων για το οποίο υπολογίζονται όλα τα μεγέθη έντασης και μετακίνησης στα δομικά στοιχεία του κτιρίου. Έτσι τα μεγέθη αυτά αντιστοιχούν σε σεισμική διέγερση κατά Χ όταν τα οριζόντια φορτία εφαρμόζονται κατά Χ, και αντιστοίχως σε σεισμική διέγερση κατά Υ όταν τα οριζόντια φορτία εφαρμόζονται κατά Υ. Όμως οι απαιτούμενοι έλεγχοι για την αποτίμηση του κτιρίου θα πρέπει να γίνουν αφενός με μεγέθη τα οποία

προκύπτουν από την ταυτόχρονη θεώρηση των δύο οριζοντίων συνιστωσών της σεισμικής διέγερσης, και αφετέρου από την επίσης ταυτόχρονη θεώρηση των κατακορύφων φορτίων του κτιρίου. Έτσι τόσο οι EN1998-1, EN1998-3 όσο και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. δίνουν ειδικές οδηγίες για τον υπολογισμό των μεγεθών απόκρισης (δηλ. των μεγεθών έντασης και μετακίνησης) με τα οποία θα γίνει η αποτίμηση της συμπεριφοράς του κτιρίου που θα παρουσιαστεί στην επόμενη παράγραφο. Οι οδηγίες αυτές αφορούν:

(α) Στον συνδυασμό των συνιστωσών της σεισμικής διέγερσης, και

(β) Στον συνδυασμό των μεγεθών της σεισμικής διέγερσης με άλλες δράσεις.

EN1998-1 (EN1998-3)

(α) Συνδυασμός των συνιστωσών της σεισμικής διέγερσης

Ο EN1998-1 στο εδάφιο 4.3.3.5.1(6) συστήνει την εφαρμογή κατάλληλων κανόνων συνδυασμού των μεγεθών που προκύπτουν από την εφαρμογή των σεισμικών φορτίων σε δύο οριζόντιες διευθύνσεις X και Y. Ως τέτοιους κανόνες προτείνει αυτούς που περιγράφονται στα εδάφια 4.3.3.5.1(2) και 4.3.3.5.1(3). Πιο συγκεκριμένα:

- Στο εδάφιο 4.3.3.5.1(2)β προτείνεται η χρήση του κανόνα SRSS (τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων) για τα μεγέθη που προκύπτουν από την εφαρμογή των οριζοντίων φορτίων κατά X και κατά Y. Αυτός ο κανόνας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση των ελέγχων οι οποίοι γίνονται με ένα μόνον μέγεθος έντασης ή μετακίνησης. Επομένως στο σημείο αυτό έχουμε αντιστοιχία με τα αντιστοίχως προτεινόμενα για τις ελαστικές μεθόδους.
- Στο εδάφιο 4.3.3.5.1(2)γ δηλώνεται ότι για τον υπολογισμό των μεγεθών που αναπτύσσονται ταυτόχρονα με την μεγιστοποίηση κάποιου άλλου μεγέθους (δηλ. όταν έχουμε έλεγχο με περισσότερα του ενός μεγέθη όπως π.χ. ο έλεγχος διατομών υποστυλωμάτων σε διαξονική κάμψη με αξονική δύναμη) θα πρέπει να γίνεται χρήση ειδικών και τεκμηριωμένων τεχνικών επαλληλίας. Επειδή όμως δεν κάνει καμία αναφορά ή περιγραφή κάποιας τέτοιας τεχνικής, θα μπορούσε να γίνει εφαρμογή της αντίστοιχης μεθόδου που προτείνει ο ΕΑΚ/2000 για τα μεγέθη της Απλοποιημένης Φασματικής Μεθόδου (βλ.

παράγραφο 3.5.3 του ΕΑΚ/2000 ή εναλλακτικά το εγχειρίδιο τεκμηρίωσης του ΡΑΦ).

- Σαν εναλλακτική μεθοδολογία για τον συνδυασμό των μεγεθών έντασης και μετακίνησης από τις δύο οριζόντιες συνιστώσες του σεισμού προτείνεται η μέθοδος που περιγράφεται στο εδάφιο 4.3.3.5.1(3). Στα πλαίσια της συγκεκριμένης μεθόδου τα μεγέθη έντασης και μετακίνησης λόγω του συνδυασμού των οριζοντίων συνιστωσών της σεισμικής δράσης μπορούν να υπολογιστούν με βάση τους παρακάτω συνδυασμούς:

$$\left[\pm E_{Edx}\right] "+" \left[\pm 0.30 E_{Edy}\right]$$

$$\left[\pm 0.30 E_{Edx}\right] "+" \left[\pm E_{Edy}\right]$$

όπου

το σύμβολο «+» έχει την έννοια «να συνδυαστεί με»,

το E_{Edx} συμβολίζει τα μεγέθη έντασης ή μετακίνησης λόγω της εφαρμογής της σεισμικής δράσης κατά την διεύθυνση του οριζόντιου άξονα Χ,

το E_{Edy} συμβολίζει τα μεγέθη έντασης ή μετακίνησης λόγω της εφαρμογής της σεισμικής δράσης κατά την διεύθυνση του κάθετου προς τον Χ οριζόντιου άξονα Υ.

Ειδικά στην περίπτωση εφαρμογής της υπερωθητικής ανάλυσης οι όροι E_{Edx} και E_{Edy} συμβολίζουν αντίστοιχα τα μεγέθη έντασης ή μετακίνησης λόγω μετακίνησης στον κόμβο ελέγχου ίσης με την μετακίνηση-στόχο που υπολογίστηκε για τη διεύθυνση Χ ($u_{targ,X}$), και τα μεγέθη έντασης ή μετακίνησης λόγω μετακίνησης στον κόμβο ελέγχου ίσης με την μετακίνηση-στόχο που υπολογίστηκε για τη διεύθυνση Υ ($u_{targ,Y}$).

- Ο ΕΝ1998-3 στο εδάφιο 4.4.7(1) υιοθετεί πλήρως τα όσα αναφέρει ο ΕΝ1998-1 στην παράγραφο 4.3.3.5.1 όπως περιγράφηκαν παραπάνω.

(β) Συνδυασμός των μεγεθών της σεισμικής διέγερσης με άλλες δράσεις

- Ο ΕΝ1998-1 στο εδάφιο 4.3.3.4.2.1(1) συστήνει τον συνυπολογισμό των φορτίων βαρύτητας κατά την εξαγωγή των μεγεθών απόκρισης.
- Ο υπολογισμός των φορτίων βαρύτητας θα πρέπει σύμφωνα με το εδάφιο 4.3.3.4.1(5)P του ΕΝ1998-1 να γίνει βάσει των οδηγιών που δίνονται στην παράγραφο 3.2.4 του συγκεκριμένου κανονισμού. Δηλαδή ο υπολογισμός των μαζών θα πρέπει να γίνει με βάση τον συνδυασμό:

$$G + \psi_E \cdot Q = G + (\varphi \cdot \psi_2) \cdot Q$$

(Για περισσότερες οδηγίες και διευκρινήσεις για τον καθορισμό των συντελεστών φ και ψ_2 βλ. εγχειρίδιο θεωρητικής τεκμηρίωσης του ΡΑΦ).

Αντίστοιχα για τον υπολογισμό των τιμών των κατακόρυφων φορτίων των δομικών στοιχείων που θα θεωρηθεί ότι τα φορτίζουν κατά τη διάρκεια τις σταδιακής επιβολής των οριζοντίων δυνάμεων θα πρέπει να γίνει εφαρμογή του συνδυασμού:

$$G + \psi_2 \cdot Q$$

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

(α) Συνδυασμός των συνιστωσών της σεισμικής διέγερσης

Ο συνδυασμός των συνιστωσών των σεισμικής δράσης περιγράφεται στο εδάφιο 5.4.9β. Στο εδάφιο αυτό δηλώνεται ότι η εισαγωγή των οριζοντίων φορτίων θα πρέπει να γίνεται ταυτόχρονα στις δύο διευθύνσεις Χ και Υ με λόγο αντίστοιχων τεμνουσών βάσης μία φορά (Χ/Υ=100/30) και μία φορά ξεχωριστά με (Χ/Υ=30/100). Δηλαδή εφαρμόζονται σταδιακά τα φορτία που αντιστοιχούν στο 100% της τέμνουσας βάσης στη μία διεύθυνση (έστω Χ) και ταυτόχρονα τα φορτία που αντιστοιχούν στο 30% της τέμνουσας βάσης στην άλλη διεύθυνση (Υ). Η ανάλυση εφαρμόζεται μέχρι ότου στην διεύθυνση που εισάγονται τα πλήρη φορτία (εδώ στη Χ) η μετακίνηση του σημείου ελέγχου γίνει ίση με την μετακίνηση στόχο που αντιστοιχεί στην συγκεκριμένη διεύθυνση. Αν ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι στα πλαίσια της υπερωθητικής ανάλυσης τα φορτία θα πρέπει να εφαρμόζονται και σε αντίθετες διευθύνσεις (δηλ. κατά –Χ και κατά –Υ), και επίσης ότι πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τυχηματική εκκεντρότητα στην τοποθέτηση των φορτίων στην κάτοψη (τόσο κατά τη διεύθυνση του άξονα Χ όσο και κατά τη διεύθυνση του άξονα Υ, σύμφωνα με τα εδάφια 4.3.3.4.2.2(2)P του EN1998-1 και 4.4.4.1(2) του EN1998-3) προκύπτει η ανάγκη να γίνουν οι ακόλουθες αναλύσεις:

	Εκκεντρότητα			
	$+e_{aX}$	**$-e_{aX}$**	**$+e_{aY}$**	**$-e_{aY}$**
ΛΟΓ και Η	$[+E_X]+[+0.3E_Y]$	$[+E_X]+[+0.3E_Y]$	$[+E_X]+[+0.3E_Y]$	$[+E_X]+[+0.3E_Y]$
	$[+E_X]+[-0.3E_Y]$	$[+E_X]+[-0.3E_Y]$	$[+E_X]+[-0.3E_Y]$	$[+E_X]+[-0.3E_Y]$

	-[+E_X]+[+0.3E_Y]	-[+E_X]+[+0.3E_Y]	-[+E_X]+[+0.3E_Y]	-[+E_X]+[+0.3E_Y]
	-[+E_X]-[+0.3E_Y]	-[+E_X]-[+0.3E_Y]	-[+E_X]-[+0.3E_Y]	-[+E_X]-[+0.3E_Y]
	[+0.3E_X]+[+E_Y]	[+0.3E_X]+[+E_Y]	[+0.3E_X]+[+E_Y]	[+0.3E_X]+[+E_Y]
	[+0.3E_X]+[-E_Y]	[+0.3E_X]+[-E_Y]	[+0.3E_X]+[-E_Y]	[+0.3E_X]+[-E_Y]
	-[+0.3E_X]+[+E_Y]	-[+0.3E_X]+[+E_Y]	-[+0.3E_X]+[+E_Y]	-[+0.3E_X]+[+E_Y]
	-[+0.3E_X]-[+E_Y]	-[+0.3E_X]-[+E_Y]	-[+0.3E_X]-[+E_Y]	-[+0.3E_X]-[+E_Y]

(β) Συνδυασμός των μεγεθών της σεισμικής διέγερσης με άλλες δράσεις

Σύμφωνα με την παράγραφο 5.4.10 οι συνδυασμοί των δράσεων για τους οποίους πρέπει να γίνει η αποτίμηση ενός κτιρίου ορίζονται στην παράγραφο 4.4.2. Στην παράγραφο αυτή δηλώνεται ότι οι συνδυασμοί δράσεων που πρέπει να ληφθούν υπόψη για τους ελέγχους έναντι των οριακών καταστάσεων αστοχίας θα πρέπει να προέρχονται από τους σύγχρονες ισχύοντες κανονισμούς. Συνεπώς γίνεται έμμεση αναφορά στον EN1998-1 στον οποίον όπως είδαμε και πιο πάνω δηλώνεται ότι τα μεγέθη έντασης και μετακίνησης που προκύπτουν από την επιβολή των οριζοντίων φορτίων θα πρέπει να επαλληλίζονται με τα αντίστοιχα μεγέθη του συνδυασμού:

$$G + \psi_2 \cdot Q$$

Το ΡΑΦ υιοθετεί την εφαρμογή του συνόλου των διατάξεων του ΚΑΝ.ΕΠΕ. τόσο για το θέμα της επαλληλίας των οριζοντίων σεισμικών φορτίων όσο και για το θέμα της επαλληλίας τους με τα κατακόρυφα.

2.6.2 Έλεγχοι επιτελεστικότητας

Στα πλαίσια των προηγουμένων βημάτων της μεθόδου έγινε εφαρμογή των απαραίτητων διαδικασιών προκειμένου να εκφραστούν αριθμητικά οι δύο από τις τρείς βασικές έννοιες της υπερωθητική ανάλυση. Δηλαδή η Ικανότητα και η Απαίτηση. Όπως τονίστηκε και στην παράγραφο 1.2 του παρόντος κειμένου με την υπερωθητική ανάλυση διερευνάται αν η μελετώμενη κατασκευή έχει την ικανότητα να αντιστέκεται στην απαίτηση που εισάγει η σεισμική διέγερση. Η πληροφορία αυτή από μόνη της δεν είναι όμως επαρκής για να εξυπηρετήσει τους στόχους αποτίμησης και ανασχεδιασμού, την επαλήθευση ή όχι των οποίων καλείται μεταξύ άλλων να διερευνήσει μία υπερωθητική ανάλυση μέσω των

αποτελεσμάτων της. Η πληροφορία που πρέπει να συνοδεύει την απάντηση στο ερώτημα για το αν η μελετώμενη κατασκευή έχει την ικανότητα να αντιστέκεται στην απαίτηση που εισάγει η σεισμική διέγερση είναι και με ποια συμπεριφορά το επιτυγχάνει. Η πληροφορία αυτή προκύπτει στην ουσία από την σύγκριση του «μεγέθους της ικανότητας» σε σχέση με το «μέγεθος της απαίτησης» με βάση συγκεκριμένα προκαθορισμένα κριτήρια. Για να γίνει πιο κατανοητή η έκφραση "*σύγκριση του «μεγέθους της ικανότητας» σε σχέση με το «μέγεθος της απαίτησης»*" θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα εξής:

- Η ικανότητα εκφράζεται:

(α) Σε επίπεδο κατασκευής μέσω της ΥΚ,

(β) Σε επίπεδο δομικών στοιχείων μέσω των διγραμμικοποιημένων καμπυλών Ροπών-Στροφών χορδής.

- Η απαίτηση εκφράζεται μέσω της μετακίνησης-στόχου η οποία σχετίζεται με τον σεισμό σχεδιασμού για τον οποίο ζητείται η αποτίμηση της κατασκευής.
- Η συμπεριφορά καθορίζεται με βάση τις λεγόμενες «στάθμες επιτελεστικότητας». Οι στάθμες επιτελεστικότητας αναφέρονται σε συγκεκριμένες καταστάσεις (ή επίπεδα) βλαβών και συνιστούν οριακές καταστάσεις για τις οποίες καλούμαστε (με την βοήθεια της υπερωθητικής ανάλυσης εν προκειμένω) να διερευνήσουμε το αν τις υπερβαίνει ή όχι η μελετώμενη κατασκευή. Οι στάθμες επιτελεστικότητας συνδέονται με συγκεκριμένα επίπεδα σεισμικής διέγερσης που αντιστοιχούν σε προκαθορισμένες περιόδους επαναφοράς. Η ονομασία και η περιγραφή των σταθμών επιτελεστικότητας δίνεται στα διάφορα κανονιστικά κείμενα που καλύπτουν το αντικείμενο της αποτίμησης κατασκευών (π.χ. ATC-40, FEMA-273, FEMA-356, FEMA-440, EN1998-3, ΚΑΝ.ΕΠΕ.). Ακολούθως δίνονται οι στάθμες επιτελεστικότητας με βάση τον EN1998-3 και τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. καθώς και οι αντίστοιχες περιγραφές τους:

EN1998-3

Στο Εδάφιο 2.1(1)P του EN1998-3 δίνονται οι θεμελιώδεις απαιτήσεις του κανονισμού όσον αφορά στην συμπεριφορά των κτιρίων. Οι απαιτήσεις αυτές συνδέονται με τον καθορισμό της κατάστασης (δηλ. του επιπέδου) των βλαβών του κτιρίου με βάση τρείς οριακές καταστάσεις (ΟΚ) ή στάθμες επιτελεστικότητας:

(α) Την οριακή κατάσταση της οιονεί κατάρρευσης (NC)

(β) Την οριακή κατάσταση των σημαντικών βλαβών (SD)

(γ) Την οριακή κατάσταση περιορισμού των βλαβών (DL)

Ο χαρακτηρισμός των τριών αυτών καταστάσεων γίνεται μέσω του ακόλουθου πίνακα:

ΟΚ	**Πλευρική αντοχή και δυσκαμψία**	**Σχετικές παραμορφώσεις ορόφων**	**Μη φέροντα στοιχεία**	**Αντοχή έναντι κατακόρυφων φορτίων**	**Απομένουσα αντοχή σε σεισμό**	**Δυνατότητα επισκευής**
NC (Γ)	Χαμηλή ως ανεπαρκής	Μεγάλες και μόνιμες	Κατάρρευση του μεγαλύτερου ποσοστού τους	Οριακά επαρκής	Μηδενική και για σεισμούς μέτριας έντασης	ΟΧΙ
SD (Β)	Χαμηλή έως Μέτρια	Μόνιμες αλλά μέτριες	Εμφάνιση βλαβών αλλά όχι εκτός επιπέδου	Ικανοποιητική	Ικανοποιητική για σεισμούς μέτριας έντασης	Μη οικονομική
DL (Α)	Σχεδόν πλήρης	Αμελητέες	Κατανεμημένες ρηγματώσεις. Επισκευάσιμες βλάβες	Πλήρης	Σχεδόν ίδια με αυτήν προ του σεισμού	Δεν είναι απαραίτητη

Στο εδάφιο 2.1(3)P δηλώνεται ότι οι οριακές καταστάσεις που περιγράφηκαν πιο πάνω συσχετίζονται με επίπεδα σεισμικής διέγερσης που αντιστοιχούν σε σεισμούς με συγκεκριμένες περιόδους επαναφοράς. Οι περίοδοι επαναφοράς δίνονται στα αντίστοιχα Εθνικά Προσαρτήματα. Οι προτεινόμενες τιμές που υιοθετούνται και από το Ελληνικό Εθνικό Προσάρτημα του ΕΝ1998-3 είναι:

(α) ΣΕΙΣΜΟΣ 1: 225 χρόνια → Αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 20% σε 50 χρόνια.

(β) ΣΕΙΣΜΟΣ 2: 475 χρόνια → Αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια.

(γ) ΣΕΙΣΜΟΣ 3: 2475 χρόνια → Αντιστοιχεί σε πιθανότητα υπέρβασης 2% σε 50 χρόνια.

Έτσι ο συνδυασμός των τριών επιπέδων επιτελεστικότητας και των τριών επιπέδων σεισμικής διέγερσης που παρουσιάστηκαν πιο πάνω δίδουν, τους διαφορετικούς στόχους για το επίπεδο ικανότητας που ενδέχεται επιλεγούν:

	ΣΤΑΘΜΗ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ		
	(Α) Περιορισμός βλαβών (DL)	(Β) Σημαντικές βλάβες (SD)	(Γ) Οιονεί κατάρρευση (NC)
ΣΕΙΣΜΟΣ 1 (20% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη, Π.Ε. 225 έτη)	Α1	Β1	Γ1
ΣΕΙΣΜΟΣ 2 (10% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη, Π.Ε. 475 έτη)	Α2	Β2	Γ2
ΣΕΙΣΜΟΣ 3 (2% πιθανότητα υπέρβασης σε 50 έτη, Π.Ε. 2475 έτη)	Α3	Β3	Γ3

Παρατηρούμε ότι ορίζονται γενικώς 9 συνδυασμοί σταθμών επιτελεστικότητας – σεισμών σχεδιασμού. Ωστόσο οι συνδυασμοί Β1, Γ1 και Γ2 (στα γκρι κελιά του πίνακα) είναι μη αποδεκτοί και δεν λαμβάνονται υπόψη. Οι συνδυασμοί που είναι στην κύρια διαγώνιο του πίνακα (δηλ. οι Α1, Β2, Γ3 που βρίσκονται στα πράσινα κελιά) αντιστοιχούν στον βασικό στόχο που πρέπει να πληρούται για το σχεδιασμό των σύνηθων νέων κατασκευών και μπορεί να θεωρηθεί ότι αντικατοπτρίζουν την συμβατική αντισεισμική φιλοσοφία των σύγχρονων κανονισμών. Οι συνδυασμοί Α2, Β3 (που βρίσκονται στα γαλάζια κελιά) αντιστοιχούν σε σχεδιασμό με μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας το οποίο θα μπορούσε να είναι το ζητούμενο σε κατασκευές που είναι μεγάλης σημασίας (π.χ. υψηλή κατηγορία σπουδαιότητας του EN1998-1) και επομένως δεν τίθεται θέμα υψηλού κόστους για την σχεδίαση ή την επανασχεδίαση τους. Τέλος ο στόχος Α3 που απαιτεί την εμφάνιση ελαχίστων βλαβών σε έναν πολύ μεγάλο σεισμό είτε σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να είναι πρακτικά ανέφικτος είτε σε κάποιες άλλες να είναι απαγορευτικός λόγω του υπέρμετρου κόστους.

Επομένως: ο έλεγχος ή όχι της εκπλήρωσης των κριτηρίων συμπεριφοράς που αντιστοιχούν σε κάθε μία από τις παραπάνω τρείς στάθμες επιτελεστικότητας θα πρέπει να γίνει θέτοντας ως απαίτηση την προκύπτουσα απαίτηση από τον αντίστοιχο σεισμό.

Ο προσδιορισμός της σεισμικής διέγερσης που αντιπροσωπεύει την απαίτηση γίνεται σε όρους μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης αναφοράς a_{gR} σε έδαφος κατηγορίας Α. Έτσι για κάθε ένα από τα τρία επίπεδα σεισμικής διέγερσης που

προδιαγράφει ο EN1998-3 θα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός της αντιστοιχούσας τιμής του a_{gR}. Για τον υπολογισμό αυτό απαιτείται η εφαρμογή σχέσεων που συνδέουν το a_{gR} με την τιμή της περιόδου επανάληψης T_R της εκάστοτε σεισμικής διέγερσης. Για τον Ελληνικό χώρο μπορεί να γίνει εφαρμογή των παρακάτω σχέσεων που προέκυψαν από σχετική ερευνητική εργασία [*Koliopoulos P.K., Margaris B.N., and Klimis N.S., "Duration and energy characteristics of Greek seismic motion records", J. Earthq. Eng., vol.2, (1998), pp. 391-417*]:

$$\text{ΖΩΝΗ Z1}: \ \log a_{gR} = 0.277 \cdot \log T_R + 1.579$$
$$\text{ΖΩΝΗ Z2}: \ \log a_{gR} = 0.264 \cdot \log T_R + 1.739$$
$$\text{ΖΩΝΗ Z3}: \ \log a_{gR} = 0.240 \cdot \log T_R + 2.015$$

Επομένως εφαρμόζοντας τις τρείς παραπάνω σχέσεις για κάθε έναν από τους τρείς σεισμούς που ορίζονται στον EN1998-3 λαμβάνομαι τις ζητούμενες τιμές του a_{gR} που δίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

a_{gR}	**ΣΕΙΣΜΟΣ 1 (T_R=225 έτη)**	**ΣΕΙΣΜΟΣ 2 (T_R=475 έτη)**	**ΣΕΙΣΜΟΣ 3 (T_R=2475 έτη)**
ΖΩΝΗ Z1	0.17g	0.21g	0.34g
ΖΩΝΗ Z2	0.23g	0.28g	0.44g
ΖΩΝΗ Z3	0.39g	0.46g	0.69g

Έτσι από τον παραπάνω πίνακα λαμβάνεται ανάλογα με τη ζώνη σεισμικής επικινδυνότητας και επίπεδο της σεισμικής διέγερσης για το οποίο ζητείται η αποτίμηση της κατασκευής, η τιμή του a_{gR} που θα χρησιμοποιηθεί για την εισαγωγή της στο ελαστικό φάσμα προκειμένου να προσδιοριστεί η απαίτηση μέσω της μετακίνησης-στόχου.

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. στην παράγραφο 2.2 παρουσιάζει τις στάθμες επιτελεστικότητας καθώς και τα αντίστοιχα επίπεδα των σεισμικών διεγέρσεων για τα οποία πρέπει να ελέγχεται η εκπλήρωση τους:

- *Εδάφιο 2.2.1(α)*: Ορίζονται τρείς στάθμες επιτελεστικότητας (επίπεδα επιθυμητής αντισεισμικής συμπεριφοράς των υφιστάμενων κατασκευών) υπό δεδομένους αντίστοιχους σεισμούς σχεδιασμού.

• *Εδάφιο 2.2.1(β)*: Οι στόχοι της αποτίμησης (δηλ. οι έλεγχοι για την εκπλήρωση ή όχι των κριτηρίων που διέπουν τα επίπεδα σεισμικής επίδοσης των κατασκευών) προκύπτουν ως συνδυασμοί αφενός μίας στάθμης επιτελεστικότητας και αφετέρου μίας σεισμικής δράσης σχεδιασμού. Η σεισμική δράση σχεδιασμού ορίζεται ως η σεισμική δράση με μία δεδομένη «ανεκτή πιθανότητα υπέρβασης κατά την τεχνική διάρκεια της ζωής του κτιρίου».

Σημ.: Γενικώς γίνεται δεκτή μία ονομαστική τεχνική διάρκεια ζωής ίση με το συμβατικό χρόνο ζωής των 50 ετών, ανεξαρτήτως της εικαζόμενης κατά περίπτωση «πραγματικής» υπολειπόμενης διάρκειας ζωής της κατασκευής.

• *Εδάφιο 2.2.1(γ)*: Οι στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού που εισάγει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. αφορούν στον φέροντα οργανισμό και όχι στον μη φέροντα οργανισμό, και δίνονται στον ακόλουθο πίνακα (πίνακας 2.1 του κειμένου του ΚΑΝ.ΕΠΕ.):

Πίνακας 2.1 Στόχοι αποτίμησης και ανασχεδιασμού

Πιθανότητα υπέρβασης σεισμικής δράσης εντός του συμβατικού χρόνου ζωής των 50 ετών	Στάθμη επιτελεστικότητας φέροντος οργανισμού		
	Άμεση χρήση μετά τον σεισμό	Προστασία ζωής	Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης
1. 10%	Α1	Β1	Γ1
2. 50%	Α2	Β2	Γ2

Σημ. 1: Η πιθανότητα υπέρβασης 50% σε 50 χρόνια αντιστοιχεί σε μέση περίοδο επαναφοράς περίπου 70 χρόνια ενώ η πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια αντιστοιχεί σε μέση περίοδο επαναφοράς περίπου 475 χρόνια.

• Στην παράγραφο 2.2.2 δίνεται η περιγραφή των παραπάνω σταθμών επιτελεστικότητας:

(α) *Άμεση χρήση μετά τον σεισμό (Α)*: Εφόσον η κατασκευή εκπληρώνει τις σχετικές προϋποθέσεις, αναμένεται ότι καμία λειτουργία της δεν θα διακόπτεται κατά τη διάρκεια ή μετά από το σεισμό σχεδιασμού, εκτός ίσως από κάποιες δευτερεύουσας σημασίας. Ενδεχομένως να παρουσιαστούν ορισμένες τριχοειδείς ρωγμές στον φέροντα οργανισμό.

(β) Προστασία ζωής (Β): Εφόσον η κατασκευή εκπληρώνει τις σχετικές προϋποθέσεις, αναμένεται κατά το σεισμό σχεδιασμού να παρουσιαστούν επισκευάσιμες βλάβες στον φέροντα οργανισμό χωρίς όμως να προκληθεί

κάποιος θάνατος ή σοβαρός τραυματισμός εξαιτίας των βλαβών αυτών. Επίσης αναμένεται ότι δεν θα συμβούν ουσιώδεις βλάβες στην οικοσκευή ή σε αποθηκευμένα υλικά.

(γ) *Οιονεί κατάρευση (Γ)*: Εφόσον η κατασκευή εκπληρώνει τις σχετικές προϋποθέσεις, κατά το σεισμό σχεδιασμού αναμένεται να παρουσιαστούν εκτεταμένες σοβαρές ή βαριές (μη-επισκευάσιμες κατά πλειονότητα) βλάβες στον φέροντα οργανισμό ο οποίος όμως θα έχει ακόμα την ικανότητα να φέρει τα προβλεπόμενα κατακόρυφα φορτία (κατά τη διάρκεια του σεισμού και για ένα διάστημα μετά από αυτόν) χωρίς να διαθέτει όμως άλλο ουσιαστικό περιθώριο ασφάλειας έναντι ολικής ή μερικής κατάρρευσης.

Όσον αφορά στην αντιστοίχηση των επιπέδων της σεισμικής διέγερσης που ορίζονται στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. με την τιμή του a_{gR}, κατ' αντιστοιχία με βάση αυτά που αναφέρθηκαν για τον EN1998-3 προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας:

a_{gR}	**ΣΕΙΣΜΟΣ 1 (T_R=475 έτη)**	**ΣΕΙΣΜΟΣ 2 (T_R=73 έτη)**
ΖΩΝΗ Ζ1	0.21g	0.13g
ΖΩΝΗ Ζ2	0.28g	0.17g
ΖΩΝΗ Ζ3	0.46g	0.30g

(Να σημειωθεί εδώ ότι ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. στον ορισμό των σεισμικών διεγέρσεων αποτίμησης και ανασχεδιασμού, δεν δίνει περίοδο επαναφοράς σε έτη αλλά πιθανότητα υπέρβασης στης σεισμικής διέγερσης σε 50 έτη. Επειδή όμως οι σχέσεις από τις οποίες επιτυγχάνεται η συσχέτιση του a_{gR} με το επίπεδο του σεισμού απαιτούν την περίοδο επαναφοράς, χρησιμοποιούμε την ακόλουθη σχέση: $T_R=1/[1-(1-P_L)^{1/L}]$. Από την σχέση αυτή βρίσκουμε ότι ένας σεισμός που έχει πιθανότητα υπέρβασης 10% σε 50 χρόνια, έχει περίοδο επαναφοράς $T_R=1/[1-(1-0.1)^{1/50}]$=475 έτη, ενώ ένας σεισμός που έχει πιθανότητα υπέρβασης 50% σε 50 χρόνια, έχει περίοδο επαναφοράς $T_R=1/[1-(1-0.5)^{1/50}]$=72.6≈73 έτη)

Έχοντας ορίσει ποσοτικά τόσο την απαίτηση όσο και την ικανότητα, και έχοντας περιγράψει τα προκαθορισμένα επίπεδα συμπεριφοράς (δηλ. τα επίπεδα επιτελεστικότητας), θα πρέπει να γίνει η σύνδεση των τριών αυτών εννοιών σε αριθμητικό επίπεδο. Δηλαδή θα πρέπει να δοθούν τα αριθμητικά κριτήρια βάσει των οποίων θα ελέγχεται αν η ικανότητα καλύπτει ή όχι την απαίτηση με συγκεκριμένη συμπεριφορά που καθορίζεται από το επιλεχθέν επίπεδο επιτελεστικότητας. Η σύνδεση των εννοιών της ικανότητας, της απαίτησης και της

συμπεριφοράς μπορεί να γίνει ή σε επίπεδο δομικού στοιχείου, ή σε επίπεδο κατασκευής.

Α) *Σε επίπεδο δομικού στοιχείου*:

Όπως είδαμε και στην παράγραφο 2.2 του παρόντος κειμένου, η μη γραμμική συμπεριφορά των δομικών στοιχείων σε κάμψη εκφράζεται σύμφωνα τόσο με τον EN1998-3 όσο και με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ., μέσω διγραμμικοποιημένων καμπυλών ροπών-στροφών χορδής. Τα διαγράμματα αυτά εκφράζουν την ικανότητα των δομικών στοιχείων έναντι καμπτικής δράσης. Για να είναι δυνατή η αποτίμηση σε επίπεδο δομικού στοιχείου, ορίζονται συγκεκριμένες χαρακτηριστικές τιμές των στροφών χορδής με βάση τις οποίες οριοθετούνται στο διάγραμμα ροπών-στροφών χορδής οι περιοχές οι οποίες αντιστοιχούν στις προκαθορισμένες στάθμες επιτελεστικότητας. Οι χαρακτηριστικές αυτές τιμές ορίζονται τόσο στον EN1998-3 όσο και στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. Η λογική της αποτίμησης των δομικών στοιχείων σε όρους παραμορφώσεων αφορά μόνον στις πλάστιμες μορφές αστοχίας (αστοχία λόγω κάμψης). Αντίθετα στην περίπτωση που θέλουμε να διασφαλίσουμε την επάρκεια ενός δομικού στοιχείου έναντι διάτμησης (ψαθυρή μορφή αστοχίας) στα πλαίσια κάποιας επιλεγμένης στάθμης επιτελεστικότητας, τόσο ο EN1998-3 όσο και ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. συστήνουν τη διενέργεια των ελέγχων με βάση δυνάμεις (δηλαδή τις τέμνουσες) και όχι παραμορφώσεις. Ακολούθως θα γίνει ξεχωριστή αναφορά στην λογική των ελέγχων επιτελεστικότητας τόσο στα πλαίσια του EN1998-3 όσο και του ΚΑΝ.ΕΠΕ.

EN1998-3

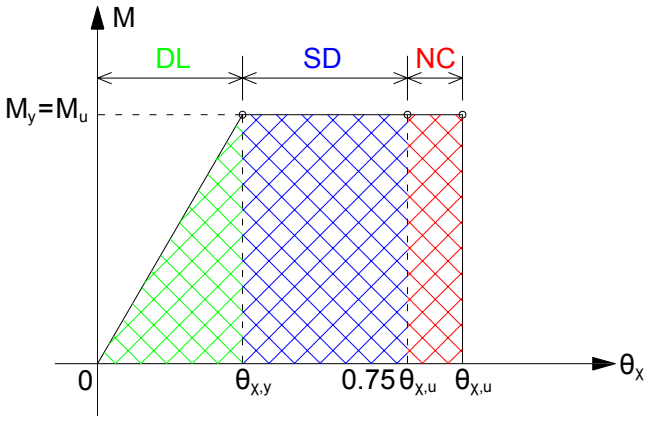
Ο EN1998-3 στον πίνακα 4.3 συνοψίζει τα κριτήρια των ελέγχων επιτελεστικότητας με βάση το είδος της ανάλυσης (γραμμική ή μη-γραμμική) αλλά και τον μηχανισμό αστοχίας (ψαθυρό ή πλάστιμο) που ελέγχεται. Επιπλέον στο παράρτημα Α παρουσιάζει τις οριακές τιμές των παραμορφώσεων αλλά και των μεγεθών έντασης οι οποίες αποτελούν τα κριτήρια με βάση τα οποία θα πρέπει να ελέγχονται τα δομικά στοιχεία μίας κατασκευής. Οι οριακές αυτές τιμές εξαρτώνται από το επίπεδο επιτελεστικότητας για του οποίο ελέγχεται η κατασκευή αλλά και από τον μηχανισμό αστοχίας (Εδάφιο Α.3.1(2)).

Έλεγχοι για πλάστιμους μηχανισμούς αστοχίας

Η αναφορά του κανονισμού στους πλάστιμους μηχανισμούς αστοχίας γίνεται στην παράγραφο Α.3.2. Στο εδάφιο Α.3.2.1(1) ορίζεται ότι η ικανότητα των δομικών στοιχείων σε κάμψη με αξονική δύναμη ορίζεται σε όρους στροφής χορδή (βλ. τον ορισμό της στην παράγραφο 2.2.3 του παρόντος κειμένου). Στις επόμενες παραγράφους Α.3.2.2, Α.3.2.3, και Α.3.2.4 δίνονται οι προτεινόμενες από τον κανονισμό οριακές τιμές των γωνιών στροφής χορδής που οριοθετούν τις περιοχές του διαγράμματος που αντιστοιχούν στις τρείς στάθμες επιτελεστικότητας. Αυτές είναι συγκεντρωμένες στον ακόλουθο πίνακα:

ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	**ΟΡΙΑ ΤΙΜΩΝ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ**
Περιορισμός βλαβών (DL)	$0\text{-}\theta_{\chi,y}$ [Το $\theta_{\chi,y}$ από τις σχέσεις (Α.10β), (Α.11β)]
Σημαντικές βλάβες (SD)	$\theta_{\chi,y}$ $-0.75\theta_{\chi,u}$ [Το $\theta_{\chi,u}$ από τη σχέση (Α.4)]
Οιονεί κατάρρευση (NC)	$0.75\theta_{\chi,u}$ $-\theta_{\chi,u}$

Η σχηματική έκφραση του παραπάνω πίνακα δίνεται με τη βοήθεια του σχήματος που ακολουθεί:



Έτσι αν π.χ. υποτεθεί ότι έχει προεπιλεγεί ως στόχος της αποτίμησης η στάθμη σημαντικές βλάβες (SD), τότε αν για την κατάσταση του κτιρίου που αντιστοιχεί σε μετακίνηση του σημείου ελέγχου ίση με την στοχευόμενη μετακίνηση προκύψει ότι σε κάποιο δομικό στοιχείο η στροφή χορδής βρίσκεται εντός της κόκκινα γραμμοσκιασμένης περιοχής του παραπάνω σχήματος, τότε το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο δεν εκπληρώνει την επιλεγμένη στάθμη επιτελεστικότητας.

Έλεγχοι για ψαθυρούς μηχανισμούς αστοχίας (διάτμηση)

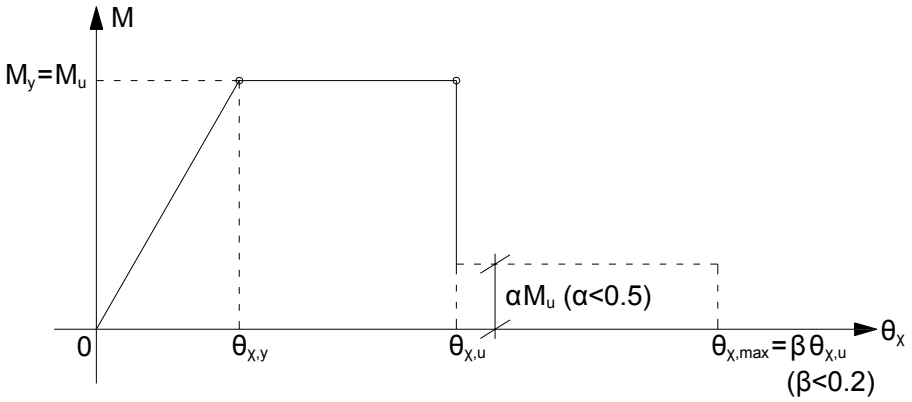
Σύμφωνα με τον πίνακα 4.3 όταν γίνεται μη γραμμική ανάλυση (εν προκειμένω υπερωθητική ανάλυση), και ο έλεγχος αφορά σε ψαθυρά στοιχεία θα πρέπει να γίνει με βάση δυνάμεις. Έτσι στην παράγραφο Α.3.3 δίνονται ειδικές οδηγίες για τον έλεγχο σε διάτμηση ανάλογα με το επιλεχθέν επίπεδο επιτελεστικότητας. Αναλυτική αναφορά στην διαδικασία του συγκεκριμένου ελέγχου έχει ήδη γίνει στην παράγραφο 2.4.3 του παρόντος κειμένου. Έτσι δεν είναι απαραίτητη κάποια επιπλέον αναφορά.

ΚΑΝ.ΕΠΕ.

Η λογική των ελέγχων στα πλαίσια του ΚΑΝ.ΕΠΕ. είναι ανάλογη αυτής του EN1998-1. Η λογική αυτή παρουσιάζεται αναλυτικά στο παράρτημα 9Α. Στο συγκεκριμένο παράρτημα γίνεται μία συγκεντρωτική περιγραφή των μορφών των ελέγχων με βάση αφενός το αν η ανάλυση είναι γραμμική ή μη γραμμική και αφετέρου το αν η ανάλυση αφορά πλάστιμα ή ψαθυρά στοιχεία. Επιπλέον όπως και στην περίπτωση του EN1998-3 οι έλεγχοι διαφοροποιούνται με βάση το επιλεχθέν επίπεδο επιτελεστικότητας.

Έλεγχοι για πλάστιμους μηχανισμούς αστοχίας

Ο έλεγχος έναντι πλάστιμων μορφών αστοχίας γίνεται σε όρους παραμορφώσεων. Σύμφωνα με τα σχόλια του εδαφίου 7.1.2.1(α) όταν ο έλεγχος επιτελεστικότητας αφορά σε στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος η καταλληλότερη επιλογή για το μέγεθος παραμόρφωσης είναι η στροφή χορδής στα άκρα του στοιχείου (βλ. παράγραφο 2.2.3 του παρόντος κειμένου). Για την διενέργεια των ελέγχων προτείνεται το σκελετικό διάγραμμα συμπεριφοράς του παραρτήματος 4.4 το οποίο έχει την εξής μορφή προσαρμοσμένο στα μεγέθη ροπής/στροφής χορδής έχει την παρακάτω μορφή:

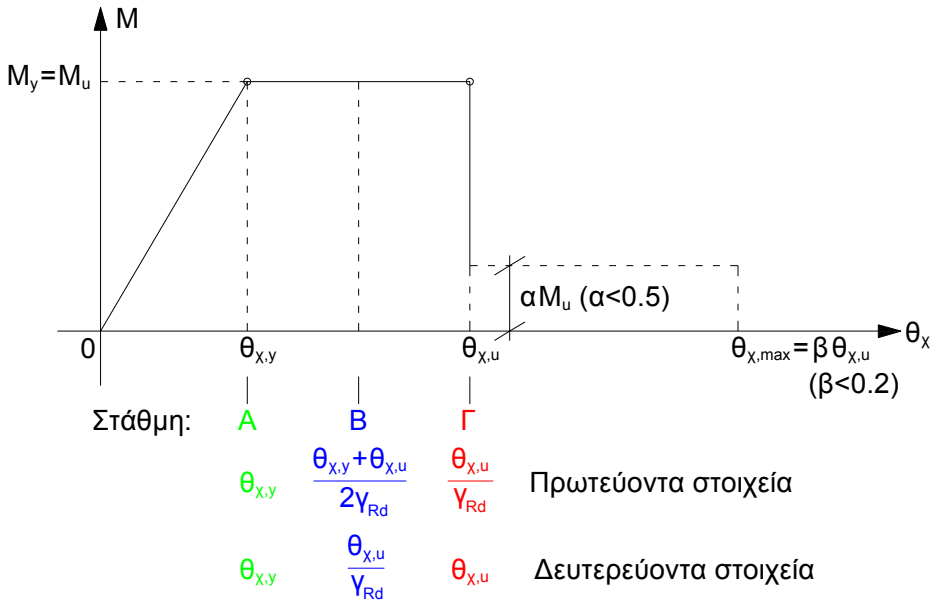


(***Σημείωση***: Σύμφωνα με το παράρτημα 4.4, η θεώρηση του τμήματος του διαγράμματος μετά την παραμόρφωση αστοχίας $\theta_{\chi,u}$ θα πρέπει να γίνεται ΜΟΝΟΝ στην περίπτωση που ο έλεγχος γίνεται για στάθμη επιτελεστικότητας «Αποφυγή κατάρρευσης» ενώ για τις άλλες στάθμες επιτελεστικότητας το διάγραμμα τερματίζεται στην παραμόρφωση αστοχίας και δεν γίνεται αποδεκτή καμία περαιτέρω απομένουσα αντοχή).

Η οριοθέτηση των περιοχών που ορίζουν τις στάθμες επιτελεστικότητας στο παραπάνω διάγραμμα, γίνεται όπως και στην περίπτωση του EN1998-3 μέσω του ορισμού κατάλληλων τιμών για τις στροφές χορδής. Έτσι με βάση τα γραφόμενα στο παράρτημα 4.4 και στο παράρτημα 9Α, ισχύει ο παρακάτω πίνακας:

ΕΠΙΠΕΔΟ ΕΠΙΤΕΛΕΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	**Στοιχείο**	**ΟΡΙΑ ΤΙΜΩΝ ΣΤΡΟΦΗΣ ΧΟΡΔΗΣ**
Άμεση χρήση μετά τον σεισμό (Α)	Πρωτεύον	0-$\theta_{\chi,y}$ [Το $\theta_{\chi,y}$ από τις σχέσεις (Σ.2) και (Σ.3)]
	Δευτερεύον	
Προστασία ζωής (Β)	Πρωτεύον	$\theta_{\chi,y}$ –[0.5($\theta_{\chi,y}$+$\theta_{\chi,u}$)/γ_{Rd}] [Το $\theta_{\chi,y}$ από τις σχέσεις (Σ.2) και (Σ.3)] [Το $\theta_{\chi,u}$ από τη σχέση (Σ.8Α)] γ_{Rd}=1.50
	Δευτερεύον	$\theta_{\chi,u}/\gamma_{Rd}$ (γ_{Rd}=1.50)
Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης (Γ)	Πρωτεύον	$\theta_{\chi,u}/\gamma_{Rd}$ (γ_{Rd}=1.50)
	Δευτερεύον	$\theta_{\chi,u}$

Παρατηρούμε εδώ ότι γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ πρωτευόντων και δευτερευόντων στοιχείων. Έτσι στο διάγραμμα ροπών/στροφών χορδής μπορούν να οριοθετηθούν οι παρακάτω περιοχές επιτελεστικότητας:



Έλεγχοι για ψαθυρούς μηχανισμούς αστοχίας (διάτμηση)

Σύμφωνα με το παράρτημα 9Α όταν γίνεται μη γραμμική ανάλυση (εν προκειμένω υπερωθητική ανάλυση), και ο έλεγχος αφορά σε ψαθυρά στοιχεία θα πρέπει να γίνει με βάση δυνάμεις. Έτσι στο παράρτημα 7Γ δίνονται ειδικές οδηγίες για τον έλεγχο σε διάτμηση ανάλογα με το επιλεχθέν επίπεδο επιτελεστικότητας. Αναλυτική αναφορά στην διαδικασία του συγκεκριμένου ελέγχου έχει ήδη γίνει στην παράγραφο 2.4.3 του παρόντος κειμένου. Έτσι δεν είναι απαραίτητη κάποια επιπλέον αναφορά.

Β) *<u>Σε επίπεδο κατασκευής</u>*:

Όπως είδαμε ο έλεγχος των εκπλήρωσης των κριτηρίων των επιπέδων επιτελεστικότητας σε επίπεδο δομικών στοιχείων γίνεται – σύμφωνα με τα ισχύοντα κανονιστικά κείμενα – με τη βοήθεια των διαγραμμάτων ροπών-στροφών χορδής, και με βάση τη διαδικασία που παρουσιάστηκε πιο πάνω. Στόχος όμως της αποτίμησης είναι ο έλεγχος της συμπεριφοράς όλης της κατασκευής. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιείται η υπερωθητική καμπύλη και το σκεπτικό του ελέγχου είναι το εξής:

Η κατασκευή θεωρείται πως εκπληρώνει ένα συγκεκριμένο επιλεχθέν επίπεδο επιτελεστικότητας όταν όλα τα πρωτεύοντα δομικά της στοιχεία εκπληρώνουν το

κριτήριο του συγκεκριμένου επιπέδου επιτελεστικότητας που εκφράζεται μέσω του διαγράμματος ροπών-στροφών χορδής.

Με βάση το παραπάνω σκεπτικό, η διαδικασία αποτίμησης μίας κατασκευής γίνεται με βάση την υπερωθητική καμπύλης και ακολουθώντας τα εξής βήματα:

α) Σχεδιάζεται η υπερωθητική καμπύλη με βάση τη διαδικασία που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους και με τις παραδοχές των ισχυόντων κανονιστικών κειμένων.

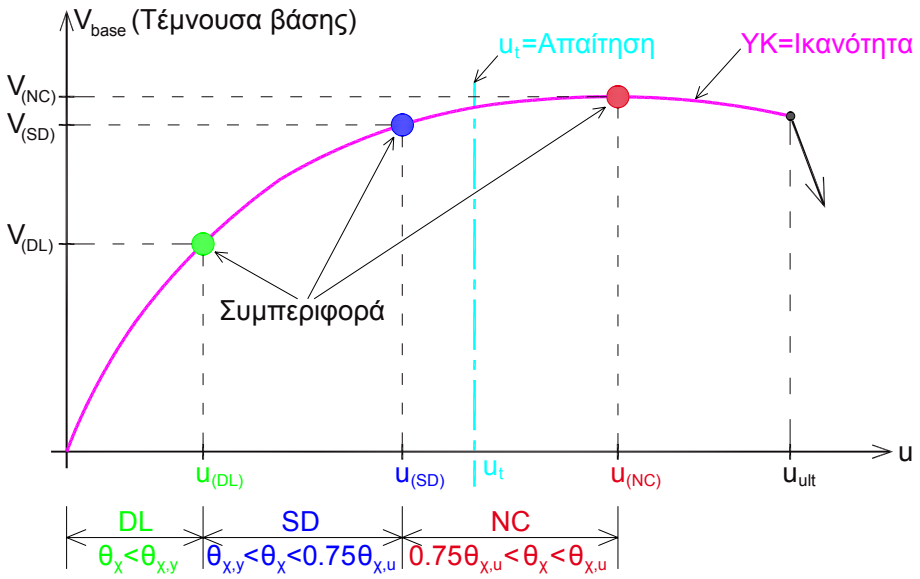
β) Εντοπίζεται και επισημαίνεται πάνω στην καμπύλη το σημείο το οποίο αντιστοιχεί σε μετακίνηση του κόμβου ελέγχου με τιμή για την οποία όλα τα πρωτεύοντα στοιχεία της κατασκευής πληρούν το κριτήριο του περιορισμού βλαβών (DL). Δηλ. για όλα τα πρωτεύοντα στοιχεία θα πρέπει να ισχύει: $\theta_{\chi}<\theta_{\chi,y}$.

γ) Εντοπίζεται και επισημαίνεται πάνω στην καμπύλη το σημείο το οποίο σε μετακίνηση του κόμβου ελέγχου με τιμή για την οποία όλα τα πρωτεύοντα στοιχεία της κατασκευής πληρούν το κριτήριο των σημαντικών βλαβών (SD). Δηλ. για όλα τα πρωτεύοντα στοιχεία θα πρέπει να ισχύει: $\theta_{\chi}<0.75\theta_{\chi,u}$.

δ) Εντοπίζεται και επισημαίνεται πάνω στην καμπύλη το σημείο το οποίο αντιστοιχεί σε μετακίνηση του κόμβου ελέγχου με τιμή για την οποία όλα τα πρωτεύοντα στοιχεία της κατασκευής πληρούν το κριτήριο της Οιονεί κατάρρευσης (NC). Δηλ. για όλα τα πρωτεύοντα στοιχεία θα πρέπει να ισχύει: $\theta_{\chi}<\theta_{\chi,u}$.

ε) Σχεδιάζεται στο διάγραμμα της υπερωθητικής καμπύλης μία κατακόρυφη ευθεία που τέμνει τον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος (άξονα των μετακινήσεων του σημείου ελέγχου) στο σημείο που αντιστοιχεί στην μετακίνηση στόχο της σεισμικής διέγερσης που επιλέχθηκε για την αποτίμηση.

στ) Μετά την διενέργεια των παραπάνω βημάτων έχει επιτευχθεί η συγκέντρωση σε ένα μόνον διάγραμμα όλων των παραμέτρων που εκφράζουν ποσοτικά τις τρείς βασικές έννοιες της υπερωθητική ανάλυση: ικανότητα (=υπερωθητική καμπύλη) – απαίτηση (=μετακίνηση στόχος) – συμπεριφορά (=σημεία που αντιστοιχούν στις στάθμες επιτελεστικότητας). Έτσι στο σημείο αυτό είναι δυνατό να γίνει η αποτίμηση του κτιρίου για το επιλεχθέν επίπεδο σεισμικής δράσης. Το σύνθετο διάγραμμα ικανότητας-απαίτησης-συμπεριφοράς δίνεται στο ακόλουθο σχήμα:



Όρια περιοχών ορισμού και κριτήρια
των σταθμών επιτελεστικότητας

Από τη μελέτη του παραπάνω σχήματος προκύπτει το συμπέρασμα ότι η κατασκευή στην οποία αντιστοιχεί η συγκεκριμένη υπερωθητική καμπύλη, πληρεί το κριτήριο της στάθμης επιτελεστικότητας «Οιονεί κατάρρευση», όχι όμως τα κριτήρια των σταθμών «Περιορισμού βλαβών» και «Σημαντικών βλαβών». Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει από τη μελέτη της σχετικής θέσης της κατακόρυφης ευθείας που αναπαριστά την «απαίτηση» (δηλ. τη μετακίνηση στόχο) ως προς τα τρία σημεία της υπερωθητικής καμπύλης (δηλ. της «ικανότητας») τα οποία προσδιορίζουν τις περιοχές ορισμού των τριών επιπέδων συμπεριφοράς («επιτελεστικότητας»). Η ευθεία της απαίτησης βρίσκεται στα δεξιά των σημείων που αντιστοιχούν στα επίπεδα επιτελεστικότητας DL και SD. Αυτό σημαίνει ότι η απαίτηση που θέτει ο σεισμός με τον οποίο γίνεται η αποτίμηση μεταφράζεται σε μία τιμή της μετακίνησης στόχου η οποία είναι μεγαλύτερη των τιμών που αντιστοιχούν σε μετακινήσεις για τις οποίες τουλάχιστον ένα πρωτεύων δομικό στοιχείο της κατασκευής παύει να πληρεί τα κριτήρια των σταθμών επιτελεστικότητας DL και SD. Επομένως για μετακίνηση του σημείου ελέγχου ίση με την μετακίνηση στόχο το κτίριο δεν έχει την συμπεριφορά που χαρακτηρίζει τις στάθμες DL και SD. Αντίθετα η συμπεριφορά του είναι συμβατή με τα κριτήρια της στάθμης επιτελεστικότητας NC, αφού η μετακίνηση στόχος είναι βρίσκεται

αριστερά του αντίστοιχου σημείου και επομένως όλα τα πρωτεύοντα δομικά στοιχεία της κατασκευής πληρούν τα κριτήρια της συγκεκριμένης στάθμης.

3. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΗΣ ΠΕΡΙΣΦΙΓΞΗΣ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Είναι γνωστό ότι η αντοχή αλλά και η ικανότητα παραμόρφωσης (και κατά συνέπεια και η πλαστιμότητα) του σκυροδέματος εμφανίζει μεγάλη αύξηση όταν αυτό υφίσταται τριαξονική ένταση. Το σκυρόδεμα το οποίο υφίσταται την ευνοϊκή αυτή επίδραση της τριαξονικής έντασης ονομάζεται *περισφιγμένο σκυρόδεμα*. Η τριαξονική ένταση (δηλ. η περίσφιγξη) μπορεί να επιτευχθεί όταν στα δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος τοποθετηθεί εγκάρσιος οπλισμός (συνδετήρες). Ο οπλισμός αυτός ούτως ή άλλως τοποθετείται για λόγους παραλαβής διατμητικών τάσεων, αλλά η επιπλέον ευεργετική επίδραση του επί της αντοχής και της πλαστιμότητας των δομικών στοιχείων επιτυγχάνεται αν ο υπολογισμός του γίνει και με κριτήριο την αύξηση του επιπέδου περίσφιγξης. Η ευεργετική επίδραση της περίσφιγξης αναγνωρίζεται από όλους τους σύγχρονους κανονισμούς σκυροδέματος αλλά και τους αντισεισμικούς κανονισμούς, οι οποίοι δίνουν σχέσεις υπολογισμού της αντοχής αλλά και των παραμορφώσεων διαρροής και αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος. Έτσι όσον αφορά στον EN1992-1-1 το μοντέλο περίσφιγξης του οποίου υιοθετείται από το ΡΑΦ ισχύουν τα εξής:

Στην παράγραφο 3.1.9 γίνεται αναφορά στην επιρροή της περίσφιγξης στις ιδιότητες του σκυροδέματος (αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης). Για τον υπολογισμό των αναβαθμισμένων αυτών ιδιοτήτων εισάγονται οι ακόλουθες σχέσεις:

$$f_{ck,c} = f_{ck}\left[1.0 + 5.0\cdot\left(\sigma_2/f_{ck}\right)\right] \quad \text{για} \quad \sigma_2 \le 0.05 f_{ck}$$

$$f_{ck,c} = f_{ck}\left[1.125 + 2.5\cdot\left(\sigma_2/f_{ck}\right)\right] \quad \text{για} \quad \sigma_2 > 0.05 f_{ck}$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2}\left(f_{ck,c}/f_{ck}\right)^2$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0.2\left(\sigma_2/f_{ck}\right)$$

Όπου:

f_{ck} η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του απερίσφικτου σκυροδέματος,

$f_{ck,c}$ η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος,

ε_{c2} η παραμόρφωση του απερίσφιγκτου σκυροδέματος στη μέγιστη αντοχή με βάση το διάγραμμα του σχήματος 3.3 του EN1992-1-1 (βλ. και πίνακα 3.1 του EN1992-1-1)

ε_{cu2} η παραμόρφωση αστοχίας του απερίσφιγκτου σκυροδέματος στη μέγιστη αντοχή με βάση το διάγραμμα του σχήματος 3.3 του EN1992-1-1

$\varepsilon_{c2,c}$ η παραμόρφωση του περισφιγμένου σκυροδέματος στη μέγιστη αντοχή με βάση το διάγραμμα του σχήματος 3.3 του EN1992-1-1

$\varepsilon_{cu2,c}$ η παραμόρφωση αστοχίας του περισφιγμένου σκυροδέματος στη μέγιστη αντοχή με βάση το διάγραμμα του σχήματος 3.3 του EN1992-1-1

σ_2 (=σ_3) είναι η δρώσα ακτινική θλιπτική τάση στην οριακή κατάσταση αστοχίας εξαιτίας της περίσφιξης. Για τον υπολογισμό της ο EN1998-3 στο εδάφιο A.3.2.2(7) δίνει την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_2 = \alpha \rho_{sx} f_{yw}$$

Όπου:

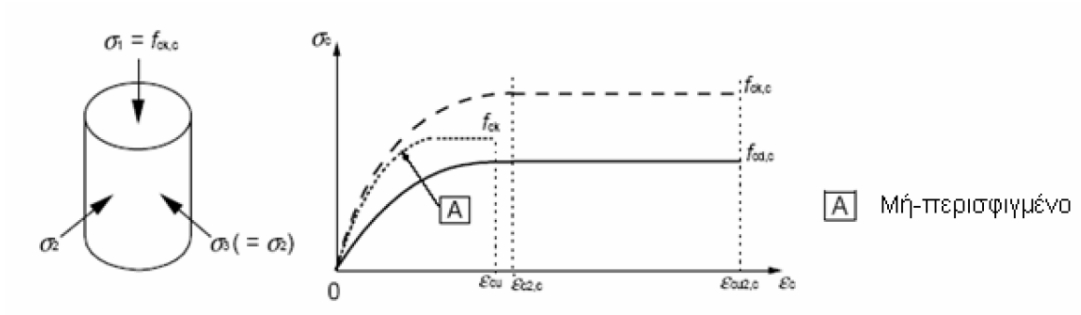
ρ_{sx} = $A_{sx}/b_w s_h$ = ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού παράλληλου προς την κατεύθυνση χ της φόρτισης, (s_h = απόσταση μεταξύ συνδετήρων)

α είναι ο συντελεστής αποτελεσματικότητας της περίσφιγξης, που μπορεί να λαμβάνεται:

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_0}\right)\left(1 - \frac{s_h}{2h_0}\right)\left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_0 h_0}\right)$$

b_o και h_o είναι η διάσταση του περισφιγμένου πυρήνα μετρούμενου μέχρι τον άξονα του συνδετήρα

b_i είναι η αξονική απόσταση μεταξύ των διαμήκων ράβδων οι οποίες συγκρατούνται πλευρικά από ένα γωνιακό συνδετήρα ή έναν εγκάρσιο σύνδεσμο κατά μήκος της περιμέτρου της διατομής.


σ1 = fck,c
σ2
σ3 (= σ2)
σc
fck,c
fck
fcd,c
A
0
εcu
εc2,c
εcu2,c
εc
A Μή-περισφιγμένο

4. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Chopra A.K and Goel R.K. (2002), «A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings», Earthquake Engng Struct Dyn., 31, 561-582.

[2] Αναστασιάδης Κ. (2004), «Προσεγγιστικές Μέθοδοι Εκτίμησης Ανελαστικής Σεισμικής Απόκρισης Κτιρίων», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις ΑΣΤΕ 3, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ.

[3] ATC-40 (1996), Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. *Applied Technology Council*, California, Report No. SSC 96-01, November 1996.

[4] FEMA 273&274 (1997) «NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings», *Publ. FEMA 273 & 274*, Washington, D.C., October 1997.

[5] FEMA 356 (2000) «Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings», *Publ. FEMA 356*, Washington, D.C., November 2000.

[6] FEMA 440 (2005) «Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures», *ATC-55 project*, prepared by FEMA (FEMA 440), Wadhington, D.C.

[7] Eurocode 8: «Design of structures for earthquake resistance - Part 1»: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.

[8] Eurocode 8: «Design of structures for earthquake resistance - Part 3»: Assessment and retrofitting of buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium, 2004.

[9] ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2012) «Κανονισμός Επεμβάσεων», *Ο.Α.Σ.Π.*

[10] Moehle J.P. (1992), «Displacement-based Design of R/C Structures Subjected to Earthquakes», Earthquake Spectra, 8(3), 403-428.

[11] Freeman S.A., Nicoletti J.P., Tyrell J.V. (1975), «Evaluations of existing buildings for seismic risk – A case study of Puget Sound Naval Shipyard, Bremerton, Washington», Proc. 1st U.S. National Conf. on Earthquake Eng. EERI, Berkeley, pp. 113-122.

[12] Kranwinkler H. & Seneviratna G.D.P.K. (1998) «Pros and cons of a pushover analysis of seismic performance evaluation», *Engineering*

Structures, vol. 20, No. 4-6, 452-464.

[13] Σπυράκος Κ. (2004), «Ενίσχυση Κατασκευών για Σεισμικά Φορτία», Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Αθήνα.

[14] Μακάριος Τ. (2003), «ΣΤΑΤΙΚΗ ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ: Το θεωρητικό υπόβαθρο και η εφαρμογή της», Ινστιτούτο Τεχνικής Σεισμολογίας και Αντισεισμικών Κατασκευών, Θεσσαλονίκη.

[15] Makarios T. (2013), “Modelling of characteristics of inelastic member of reinforced concrete structures in seismic nonlinear analysis”, In: Focus on Nonlinear Analysis Research, Editors: Gualtiero Padovani and Manuel Occhino, ISBN: 978-1-62417-350-9

[16] Αβραμίδης Ι., Αθανατοπούλου Α., Μορφίδης Κ., Σέξτος Α., «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κτιρίων Ο/Σ και Αριθμητικά Παραδείγματα σύμφωνα με τους Ευρωκώδικες», Θεσσαλονίκη 2011, ISBN 978-960-93-3151-7.

[17] Κάππος Α.Ι. (1986), «Διερεύνηση της ανελαστικής σεισμικής συμπεριφοράς πολυορόφων κτιρίων από οπλισμένο σκυρόδεμα», Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολτικών Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη.

[18] Penelis G.G., Kappos A.J. (1997), «Earthquake-Resistant Concrete Structures», First Edition, E & FN SPON, London UK.

[19] Priestley, M. J. N. (2003), “Myths and fallacies in earthquake engineering, revisited” (In the Ninth Mallet Milne Lecture). Rose School, Pavia, Italy, 9-31.

[20] Αβραμίδης Ι.Ε. (1982), «Ακριβή μητρώα δυσκαμψίας και μεταφοράς της ελαστικώς εδραζόμενης δοκού με αξονικό φορτίο κατά τη θεωρία 2ης τάξης καθώς και για όλες τις υποπεριπτώσεις». Μονογραφία. Επιστημονική Επετηρίδα της Πολυτεχνικής Σχολής του Α.Π.Θ. / Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τόμος Θ', 1982β.

[21] Μπισκίνης Δ.Ε., (2007), «Αντοχή και ικανότητα παραμόρφωσης μελών οπλισμένου σκυροδέματος με ή χωρίς ενίσχυση», Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Πάτρας.

[22] Τσιγγέλης Β. (2009), «Συγκριτική αξιολόγηση απλοποιημένων μεθόδων ανελαστικής ανάλυσης κατασκευών υπό σεισμική φόρτιση με έμφαση στη συστηματική διατύπωση και βελτίωση της φασματικής υπερωθητικής

ανάλυσης», Διδακτορική διατριβή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών.

[23] Ψυχάρης Γ.Ν. (2010), «Αντισεισμικός σχεδιασμός με στάθμες επιτελεστικότητας», Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

[24] Paulay T., Priestley M. (1992), «Αντισεισμικός Σχεδιασμός Κατασκευών από Οπλισμένο Σκυρόδεμα και Τοιχοποιία», Εκδόσεις Κλειδάριθμος 1996, Αθήνα.

[25] Μανούκας Γ.Η., Αθανατοπούλου Α.Μ., Αβραμίδης Ι.Ε. (2006), «Συγκριτική διερεύνηση παραλλαγών της στατικής υπερωθητικής ανάλυσης βάσει σύγχρονων κανονιστικών κειμένων (FEMA356-440, EC-8, ΚΑΝ.ΕΠΕ.)», Τόμος Β' Πρακτικών σελ. 411-421, 15° Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος Αλεξανδρούπολη.

[26] ΕΑΚ/2000, *Ελληνικός Αντισεισμικός Κανονισμός* (2000), ΟΑΣΠ, Αθήνα.

[27] Angelo Masi; Marco Vona; and Marco Mucciarelli, Selection of Natural and Synthetic Accelerograms for Seismic Vulnerability Studies on Reinforced Concrete Frames.

[28] A. Elenas a,, K. Meskouris Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures

ΡΑΦ

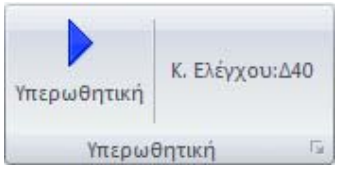
Μονάδα Στατικής Υπερωθητικής Ανάλυσης

ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ

5. ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΣΗΣ

5.1 Εισαγωγή Δεδομένων

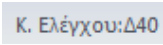
Τα δεδομένα εισαγωγής που αφορούν την Υπερωθητική Ανάλυση δίνονται στο φύλλο «Ανάλυση» και εν συνεχεία στην πινακίδα δεδομένων.



Πριν προβούμε στην Υπερωθητική Ανάλυση πρέπει να εκτελείται η ανάλυση του φορέα με επιλεγμένο κανονισμό τους Ευρωκώδικες και μέθοδο την Ιδιομορφική Ανάλυση Φάσματος Απόκρισης.

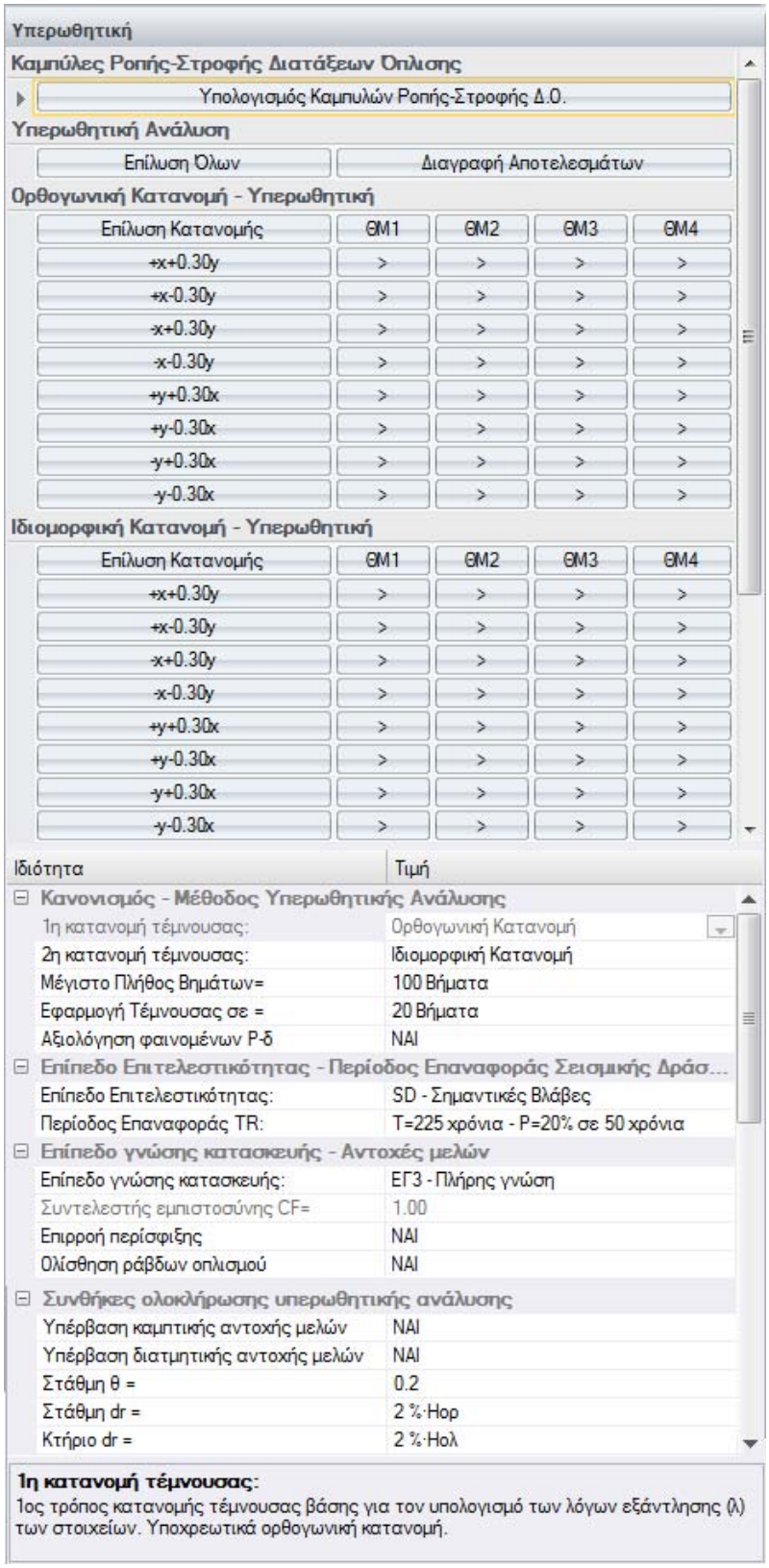
Αφού ολοκληρωθεί η ανάλυση του φορέα επιλέγεται από την ενότητα «Υπερωθητική» ο Κόμβος Ελέγχου για τον καθορισμό της μετακίνησης στόχου.

– **Κόμβος Ελέγχου**

  Ενεργοποιούμε την εντολή μέσω του πλήκτρου 

και στην συνέχεια ορίζουμε στον φορέα τον κόμβο που επιθυμούμε κάνοντας αριστερό κλικ στο σύμβολο (+) του κόμβου. Για ευκολία του χρήστη καθώς πλησιάζει με το σταυρόνημα έναν κόμβο και μόλις αυτός εντοπιστεί από το πρόγραμμα εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα μια οπτική ειδοποίηση. Αν υπάρχει ήδη επιλεγμένος κόμβος ελέγχους αυτός σηματοδοτείται με ένα κυκλικό σύμβολο χρώματος magenta.

Στην συνέχεια, με το πλήκτρο «Υπερωθητική» ενεργοποιείται στην πινακίδα δεδομένων ο πίνακας ελέγχου και χειρισμών της Υπερωθητικής Ανάλυσης.


Υπερωθητική
Καμπύλες Ροπής-Στροφής Διατάξεων Όπλισης
Υπολογισμός Καμπυλών Ροπής-Στροφής Δ.Ο.
Υπερωθητική Ανάλυση
Επίλυση Όλων
Διαγραφή Αποτελεσμάτων
Ορθογωνική Κατανομή - Υπερωθητική
Επίλυση Κατανομής
ΘΜ1
ΘΜ2
ΘΜ3
ΘΜ4
+x+0.30y
+x-0.30y
-x+0.30y
-x-0.30y
+y+0.30x
+y-0.30x
-y+0.30x
-y-0.30x
Ιδιομορφική Κατανομή - Υπερωθητική
Ιδιότητα
Τιμή
Κανονισμός - Μέθοδος Υπερωθητικής Ανάλυσης
1η κατανομή τέμνουσας:
Ορθογωνική Κατανομή
2η κατανομή τέμνουσας:
Ιδιομορφική Κατανομή
Μέγιστο Πλήθος Βημάτων=
100 Βήματα
Εφαρμογή Τέμνουσας σε =
20 Βήματα
Αξιολόγηση φαινομένων P-δ
ΝΑΙ
Επίπεδο Επιτελεστικότητας - Περίοδος Επαναφοράς Σεισμικής Δράσ...
Επίπεδο Επιτελεστικότητας:
SD - Σημαντικές Βλάβες
Περίοδος Επαναφοράς TR:
T=225 χρόνια - P=20% σε 50 χρόνια
Επίπεδο γνώσης κατασκευής - Αντοχές μελών
Επίπεδο γνώσης κατασκευής:
ΕΓ3 - Πλήρης γνώση
Συντελεστής εμπιστοσύνης CF=
1.00
Επιρροή περίσφιξης
ΝΑΙ
Ολίσθηση ράβδων οπλισμού
ΝΑΙ
Συνθήκες ολοκλήρωσης υπερωθητικής ανάλυσης
Υπέρβαση καμπτικής αντοχής μελών
ΝΑΙ
Υπέρβαση διατμητικής αντοχής μελών
ΝΑΙ
Στάθμη θ =
0.2
Στάθμη dr =
2 %·Hop
Κτήριο dr =
2 %·Hολ
1η κατανομή τέμνουσας:
1ος τρόπος κατανομής τέμνουσας βάσης για τον υπολογισμό των λόγων εξάντλησης (λ) των στοιχείων. Υποχρεωτικά ορθογωνική κατανομή.

Στο κάτω μέρος της πινακίδας δεδομένων μπορούμε να εισάγουμε ή να τροποποιήσουμε τα δεδομένα για την υπερωθητική ανάλυση τα οποία εμφανίζονται στα παρακάτω κεφάλαια:

Κανονισμός – Μέθοδος Υπερωθητικής Ανάλυσης:

- **1η Κατανομή Τέμνουσας:** 1ος τρόπος κατανομής τέμνουσας βάσης για τον υπολογισμό των λόγων εξάντλησης (λ) των στοιχείων. Η επιλογή της Ορθογωνικής Κατανομής είναι υποχρεωτική και δεν επιδέχεται τροποποίησης.
- **2η Κατανομή Τέμνουσας:** 2ος τρόπος κατανομής τέμνουσας βάσης για τον υπολογισμό των λόγων εξάντλησης (λ) των στοιχείων. Οι διαθέσιμες επιλογές κατανομής είναι η Ιδιομορφική και η Τριγωνική.
- **Μέγιστο Πλήθος Βημάτων:** Ορισμός του μέγιστου επιτρεπτού πλήθους βημάτων σε κάθε κύκλο υπερωθητικής ανάλυσης. Η τιμή αυτή προσδιορίζει το μέγιστο πλήθος βημάτων που θα εκτελεστούν, είτε επέλθει κατάρρευση είτε όχι. Η προκαθορισμένη τιμής είναι 100 βήματα.
- **Εφαρμογή Τέμνουσας σε**: Ορισμός του πλήθους βημάτων στην εφαρμογή της τέμνουσας βάσης καθορίζει σε πόσα βήματα θα διαιρεθεί η αρχική τιμή της τέμνουσας βάσης. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός αυτός τόσο ποιοτικότερα αποτελέσματα λαμβάνονται, όμως με κόστος την διάρκεια υπολογισμών. Πολύ μεγάλος αριθμός διαίρεσης της τέμνουσας βάσης πιθανώς να προκαλέσει αριθμητικές αστάθειες στα υπερωθητικά αποτελέσματα. Η προτεινόμενη τιμή για σταθερά αποτελέσματα είναι :μέχρι **20 βήματα**.

  Αξιολόγηση Φαινομένων P-δ: Η επιρροή της αξονικής δύναμης σε συνδυασμό με την οριζόντια εκκεντρότητα στην καμπτική λειτουργία των κατακόρυφων στοιχείων αυξάνει την ακρίβεια και την αξιοπιστία της υπερωθητικής διαδικασίας. Συνιστάται η ενεργοποίηση αυτής επιλογής. (βλ. § 2.2.5 παρόντος).

Επίδοση – Επιτελεστικότητα Κτηρίου:

- **Επίπεδο Επιτελεστικότητας:** Επιλογή του Επιπέδου Επιτελεστικότητας για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της υπερωθητικής ανάλυσης. Δυνατές επιλογές DL-Περιορισμός Βλαβών, SD-Σημαντικές Βλάβες ή NC-Οιωνοί Κατάρρευση. Η

επιλογή του επιπέδου επιτελεστικότητας μπορεί γίνει και αφού έχει πραγματοποιηθεί η υπερωθητική ανάλυση.

- **Περίοδος Επαναφοράς TR:** Επιλογή της τιμής αναφοράς Τ της περιόδου επαναφοράς της σεισμικής δράσης (ή ισοδύναμα, την τιμή αναφοράς Ρ της πιθανότητας υπέρβασης σε 50 χρόνια) σύμφωνα με την παρ. 2.1.(1) του EN1998-3 και το εθνικό προσάρτημα. Προκαθορισμένη Τα=225 χρόνια ή Ρ=20% σε 50 χρόνια. Η επιλογή της περιόδου επαναφοράς μπορεί γίνει και αφού έχει πραγματοποιηθεί η υπερωθητική ανάλυση.

Επίπεδο Γνώσης Κατασκευής – Αντοχές Μελών

- **Τύπος Φορέα (C2):** Επιλογή του τύπου του φορέα σύμφωνα με τον πίνακα Σ5.1 του ΚΑΝ.ΕΠΕ. Δυνατές επιλογές, Τύπος 1 – Φορείς Χαμηλής Πλαστιμότητας και Τύπος 2 – Φορείς Υψηλής Πλαστιμότητας.
- **Επίπεδο Γνώσης Κατασκευής:** Επιλογή του επιπέδου γνώσης της κατασκευής σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 του EN1998-3 και το εθνικό προσάρτημα. Οι επιλογές είναι ΕΓ1 – Περιορισμένη Γνώση, ΕΓ2 – Κανονική Γνώση και ΕΓ3 – Πλήρης Γνώση. Η προκαθορισμένη τιμή είναι η ΕΓ3 – Πλήρης Γνώση.
- **Συντελεστής Εμπιστοσύνης CF:** Ο συντελεστής εμπιστοσύνης CF σύμφωνα με τον πίνακα 3.1 του EN1998-3 και το εθνικό προσάρτημα. Η τιμή του συντελεστή δεν είναι τροποποιήσιμη.
- **Επιρροή Περίσφιξης:** Επιλογή αν θα λαμβάνεται υπ' όψιν ο συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιξης στον υπολογισμό της τάσης του σκυροδέματος fcc και της θλιπτικής παραμόρφωσης σκυροδέματος ecc. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Ναι και Όχι.
- **Ολίσθηση Ράβδων Οπλισμού:** Επιλογή αν θα λαμβάνεται υπ' όψιν η ολίσθηση των ράβδων οπλισμού των στοιχείων. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Ναι και Όχι.

Συνθήκες Ολοκλήρωσης Υπερωθητικής Ανάλυσης

- **Υπέρβαση Καμπτικής Αντοχής Μελών:** Επιλογή αν θα πραγματοποιείται αξιολόγηση της καμπτικής αντοχής των μελών. Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Ναι και Όχι.
- **Υπέρβαση Διατμητικής Αντοχής Μελών:** Επιλογή αν θα πραγματοποιείται αξιολόγηση της διατμητικής αντοχής των μελών.

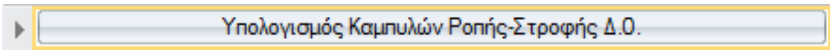
Οι διαθέσιμες επιλογές είναι Ναι και Όχι.

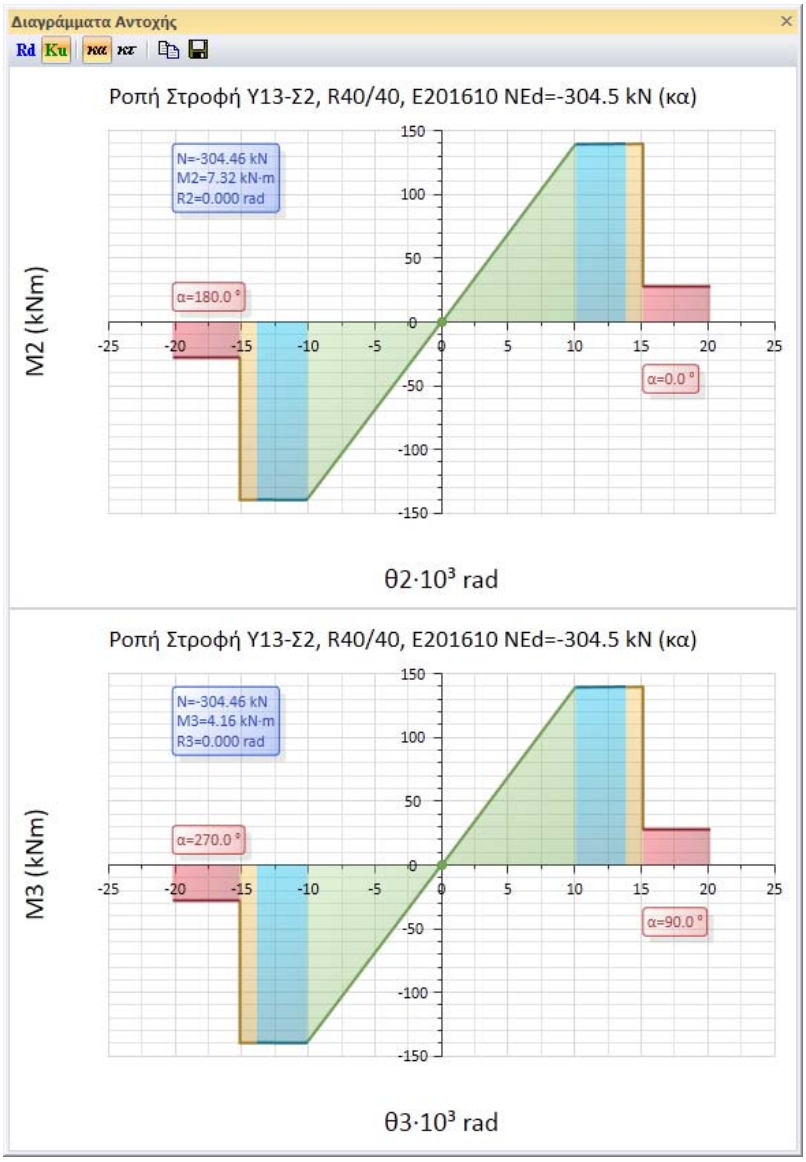
- **Στάθμη θ=:** Ο συντελεστής ευαισθησίας σχετικής μετακίνησης του ορόφου. Προκαθορισμένη τιμή: 0.2.
- **Στάθμη dr=:** Το ποσοστό σχετικής μετακίνησης ορόφου (drift). Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή σεισμολογική επιτροπή σαν όριο καταστροφικής βλάβης τίθεται το 1.5%.του ύψους του κάθε ορόφου.(βλ.βιβλ.[25])

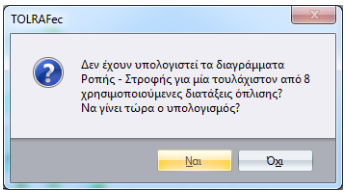
5.2 Χειρισμοί Υπερωθητικής Ανάλυσης

5.2.1 Πίνακας Χειρισμών Υπερωθητικής Ανάλυσης

Το πρώτο στάδιο της υπερωθητικής ανάλυσης αφορά τον υπολογισμό των καμπύλων Ροπής – Στροφής για τις χρησιμοποιούμενες διατάξεις όπλισης. Ο υπολογισμός πραγματοποιείται πατώντας το σχετικό πλήκτρο στον πίνακα χειρισμών της πινακίδας δεδομένων.







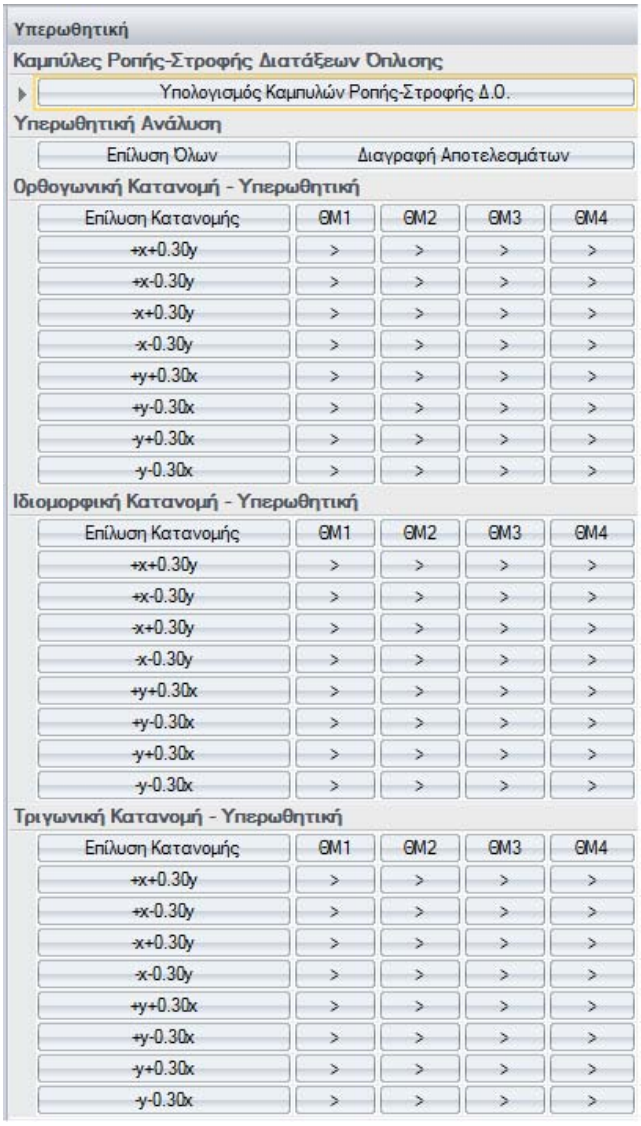
Με την ενεργοποίηση της παραπάνω εντολής εμφανίζεται στην οθόνη μια ειδοποίηση για την αποδοχή ή όχι της λειτουργίας υπολογισμού των διαγραμμάτων. Αφού επιλέξουμε «ΝΑΙ» γίνεται αυτόματα ο υπολογισμός κι εμφανίζονται στην οθόνη γραφικών τα διαγράμματα Ροπής – Στροφής (KuMu) των κόμβων αρχής (κα) και τέλους (κτ) για τις διευθύνσεις ‘2’ και ‘3’.

Οι χρωματισμένες περιοχές που εμφανίζονται στα διαγράμματα

αντιστοιχούν στα επίπεδα επιτελεστικότητας κάθε στοιχείου. Το πράσινο χρώμα αντιστοιχεί στο επίπεδο «DL – Περιορισμός Βλαβών», το κυανό χρώμα στο επίπεδο «SD – Σημαντικές Βλάβες», το πορτοκαλί χρώμα στο επίπεδο «NC – Οιονεί Κατάρρευση» και τέλος το κόκκινο χρώμα αντιστοιχεί στην κατάρρευση.

Στην συνέχεια για να υπολογιστεί η υπερωθητική καμπύλη χρησιμοποιούμε τον πίνακα χειρισμών της πινακίδας δεδομένων ώστε να επιλέξουμε το είδος και την φορά της κατανομής αλλά και την θέση μάζας βάσει των οποίων θα διενεργηθεί η επίλυση της υπερωθητικής ανάλυσης.

Ο πίνακας χειρισμών χωρίζεται σε τρεις ενότητες, την ορθογωνική κατανομή, την ιδιομορφική κατανομή και την τριγωνική κατανομή.



Τα πλήκτρα των χειρισμών είναι όμοια και στις τρεις ενότητες και προσφέρουν τις εξής δυνατότητες για κάθε κατανομή:

- Επίλυση βάσει μιας συγκεκριμένης διεύθυνσης κατανομής και θέσης μάζας.

Ορθογωνική Κατανομή - Υπερωθητική

Επίλυση Κατανομής	ΘΜ1	ΘΜ2	ΘΜ3	ΘΜ4
+x+0.30y	15	>	>	>
+x-0.30y	>	>	>	>
-x+0.30y	>	>	>	>
-x-0.30y	>	>	>	>
+y+0.30x	>	>	>	>
+y-0.30x	>	>	>	>
-y+0.30x	>	>	>	>
-y-0.30x	>	>	>	>

Η εκτέλεση της επίλυσης πραγματοποιείται με το πλήκτρο του πίνακα που αντιστοιχεί στο επιθυμητό ζεύγος διεύθυνσης κατανομής και θέσης μάζας.

- Επίλυση βάσει μιας συγκεκριμένης διεύθυνσης κατανομής για όλες τις θέσεις μάζας.

Ορθογωνική Κατανομή - Υπερωθητική

Επίλυση Κατανομής	ΘΜ1	ΘΜ2	ΘΜ3	ΘΜ4
+x+0.30y	>	15	>	>
+x-0.30y	>	19	>	>
-x+0.30y	>	20	>	>
-x-0.30y	>	15	>	>
+y+0.30x	>	20	>	>
+y-0.30x	>	15	>	>
-y+0.30x	>	15	>	>
-y-0.30x	>	19	>	>

Η εκτέλεση της επίλυσης πραγματοποιείται με το πλήκτρο του πίνακα που αντιστοιχεί στην επιθυμητή θέση μάζας.

- Επίλυση βάσει μιας συγκεκριμένης θέσης μάζας για όλες τις διευθύνσεις κατανομής.

Ορθογωνική Κατανομή - Υπερωθητική

Επίλυση Κατανομής	ΘΜ1	ΘΜ2	ΘΜ3	ΘΜ4
+x+0.30y	15	15	15	15
+x-0.30y	>	>	>	>
-x+0.30y	>	>	>	>
-x-0.30y	>	>	>	>
+y+0.30x	>	>	>	>
+y-0.30x	>	>	>	>
-y+0.30x	>	>	>	>
-y-0.30x	>	>	>	>

Η εκτέλεση της επίλυσης πραγματοποιείται με το πλήκτρο του πίνακα που αντιστοιχεί στην επιθυμητή διεύθυνση κατανομής.

- Επίλυση βάσει του συνόλου των διευθύνσεων κατανομής και θέσεων μάζας της κατανομής.

Ορθογωνική Κατανομή - Υπερωθητική

Επίλυση Κατανομής	ΘΜ1	ΘΜ2	ΘΜ3	ΘΜ4
+x+0.30y	15	15	15	15
+x-0.30y	20	19	19	20
-x+0.30y	19	20	20	19
-x-0.30y	15	15	15	15
+y+0.30x	20	20	21	20
+y-0.30x	15	15	15	15
-y+0.30x	15	15	15	15
-y-0.30x	20	19	20	20

Η εκτέλεση της επίλυσης πραγματοποιείται με το πλήκτρο του πίνακα «Επίλυση Κατανομής».

Βέβαια, υπάρχει η δυνατότητα να εκτελεστεί η επίλυση συνολικά και για τις τρεις κατανομές (ορθογωνική, ιδιομορφική, τριγωνική) με το πλήκτρο «Επίλυση Όλων».

Υπερωθητική Ανάλυση

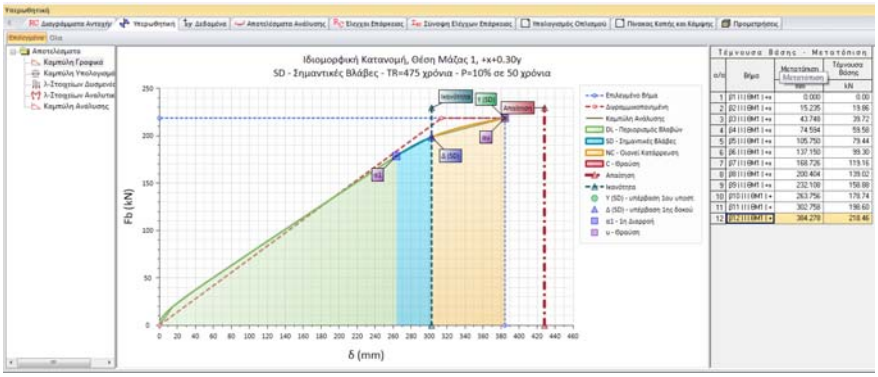
Επίλυση Όλων	Διαγραφή Αποτελεσμάτων

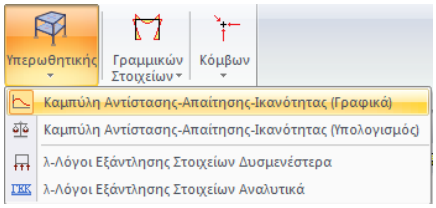
Με το πλήκτρο «Διαγραφή Αποτελεσμάτων» διαγράφονται όλα τα δεδομένα της επίλυσης της υπερωθητικής ανάλυσης.

5.3 Αποτελέσματα Υπερωθητικής Ανάλυσης

5.3.1 Καμπύλη Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας

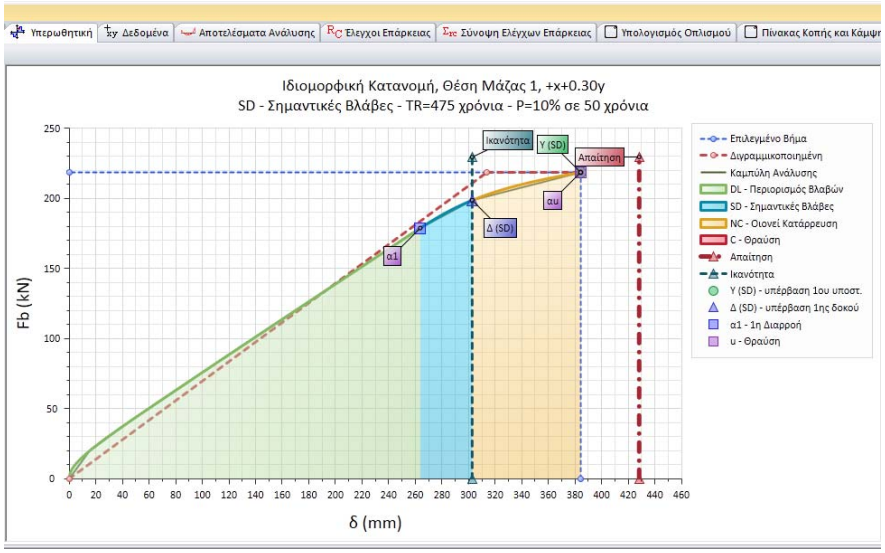
Αφού πραγματοποιηθεί έστω και μία επίλυση από οποιαδήποτε κατανομή είναι δυνατή η εμφάνιση της υπολογισθείσας υπερωθητικής καμπύλης.



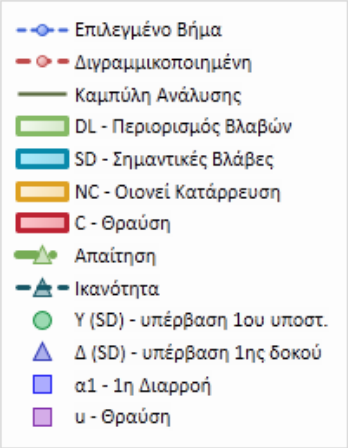


Η εμφάνιση γίνεται επιλέγοντας την εντολή «Καμπύλη Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας (Γραφικά)» από το πλήκτρο «Υπερωθητικής» στην ενότητα «Πίνακες Αποτελεσμάτων» του φύλλου «Ανάλυση».

Στο παράθυρο που εμφανίζεται παρουσιάζεται το διάγραμμα της καμπύλης Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας με την σχετική λεζάντα επεξήγησης.



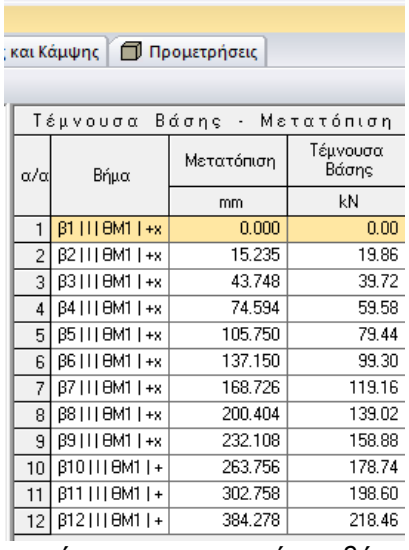
Η πληροφορία που αποτυπώνεται στο διάγραμμα της υπερωθητικής καμπύλης αφορά την ίδια την καμπύλη της ανάλυσης και την



διγραμμικοποιημένη εκδοχή της. Επίσης, με κατάλληλο χρωματισμό διακρίνονται οι περιοχές που αντιστοιχούν στα επίπεδα επιτελεστικότητας του φορέα, δηλαδή, με πράσινο χρώμα το επίπεδο «DL – Περιορισμός Βλαβών», με κυανό χρώμα το επίπεδο «SD – Σημαντικές Βλάβες», με πορτοκαλί χρώμα το επίπεδο «NC – Οιονεί Κατάρρευση» και τέλος με κόκκινο χρώμα το επίπεδο «C - Θραύση».

Ακόμα, ως διακεκομμένες γραμμές τοποθετούνται πάνω στο διάγραμμα η «Ικανότητα» του φορέα και η «Απαίτηση» από τον φορέα ανάλογα με τις παραμέτρους τις υπερωθητικής ανάλυσης. Η «Ικανότητα» εμφανίζεται με μπλε χρώμα ενώ η «Απαίτηση» είτε με πράσινο είτε με κόκκινο χρώμα ανάλογα με το αν η «Απαίτηση» είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη από την «Ικανότητα».

Επιπλέον, ορίζονται αυτόματα από το ΡΑΦ στο διάγραμμα τα σημεία της πρώτης διαρροής, της υπέρβασης του 1^{ου} υποστυλώματος και της 1^{ης} δοκού και το σημείο θραύσης.



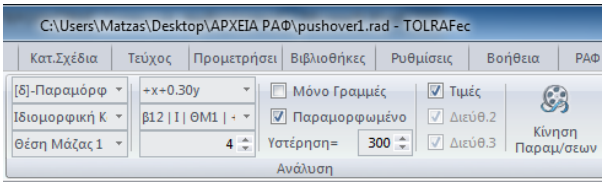
και Κάμψης | Προμετρήσεις

Τέμνουσα Βάσης - Μετατόπιση

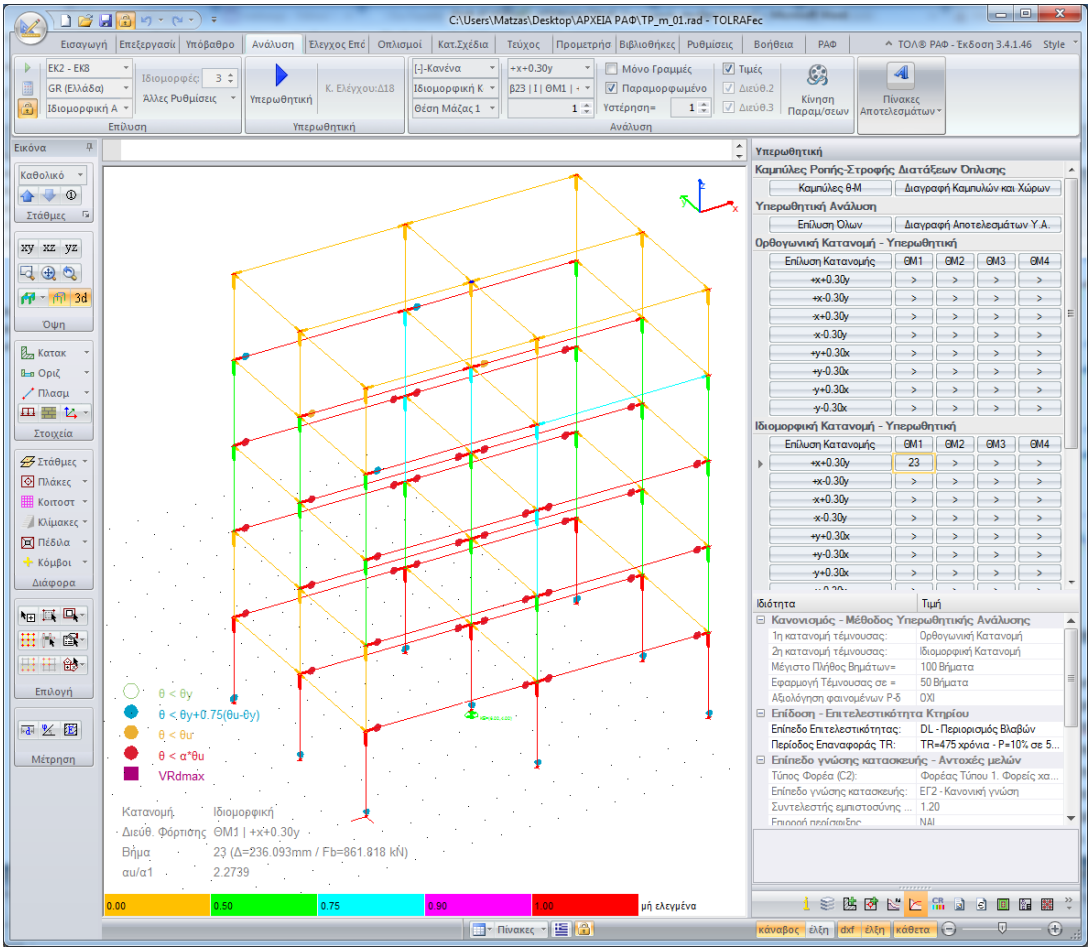
α/α	Βήμα	Μετατόπιση	Τέμνουσα Βάσης
		mm	kN
1	β1 | | | ΘΜ1 | +x	0.000	0.00
2	β2 | | | ΘΜ1 | +x	15.235	19.86
3	β3 | | | ΘΜ1 | +x	43.748	39.72
4	β4 | | | ΘΜ1 | +x	74.594	59.58
5	β5 | | | ΘΜ1 | +x	105.750	79.44
6	β6 | | | ΘΜ1 | +x	137.150	99.30
7	β7 | | | ΘΜ1 | +x	168.726	119.16
8	β8 | | | ΘΜ1 | +x	200.404	139.02
9	β9 | | | ΘΜ1 | +x	232.108	158.88
10	β10 | | | ΘΜ1 | +	263.756	178.74
11	β11 | | | ΘΜ1 | +	302.758	198.60
12	β12 | | | ΘΜ1 | +	384.278	218.46

Επίσης, δίπλα στο διάγραμμα «Καμπύλη Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας» εμφανίζεται ο πίνακας που περιλαμβάνει τις τιμές των μεγεθών της μετατόπισης και της τέμνουσας βάσης για κάθε βήμα που έχει πραγματοποιηθεί στην επιλεγμένη κατανομή της υπερωθητικής ανάλυσης.

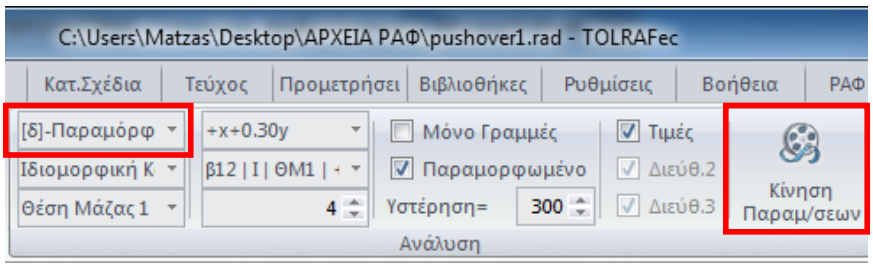
Επιλέγοντας με το ποντίκι είτε με τα πλήκτρα κάποιο βήμα από τον πίνακα αυτόματα εντοπίζεται στο διάγραμμα πάνω στην καμπύλη το σημείο του συγκεκριμένου βήματος. Παράλληλα εμφανίζονται με την μορφή χρωματισμένων κύκλων στο μοντέλο του φορέα τα σημεία δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων των φερόντων στοιχείων, εφόσον βέβαια στο επιλεγμένο βήμα έχει υπάρξει διαρροή.

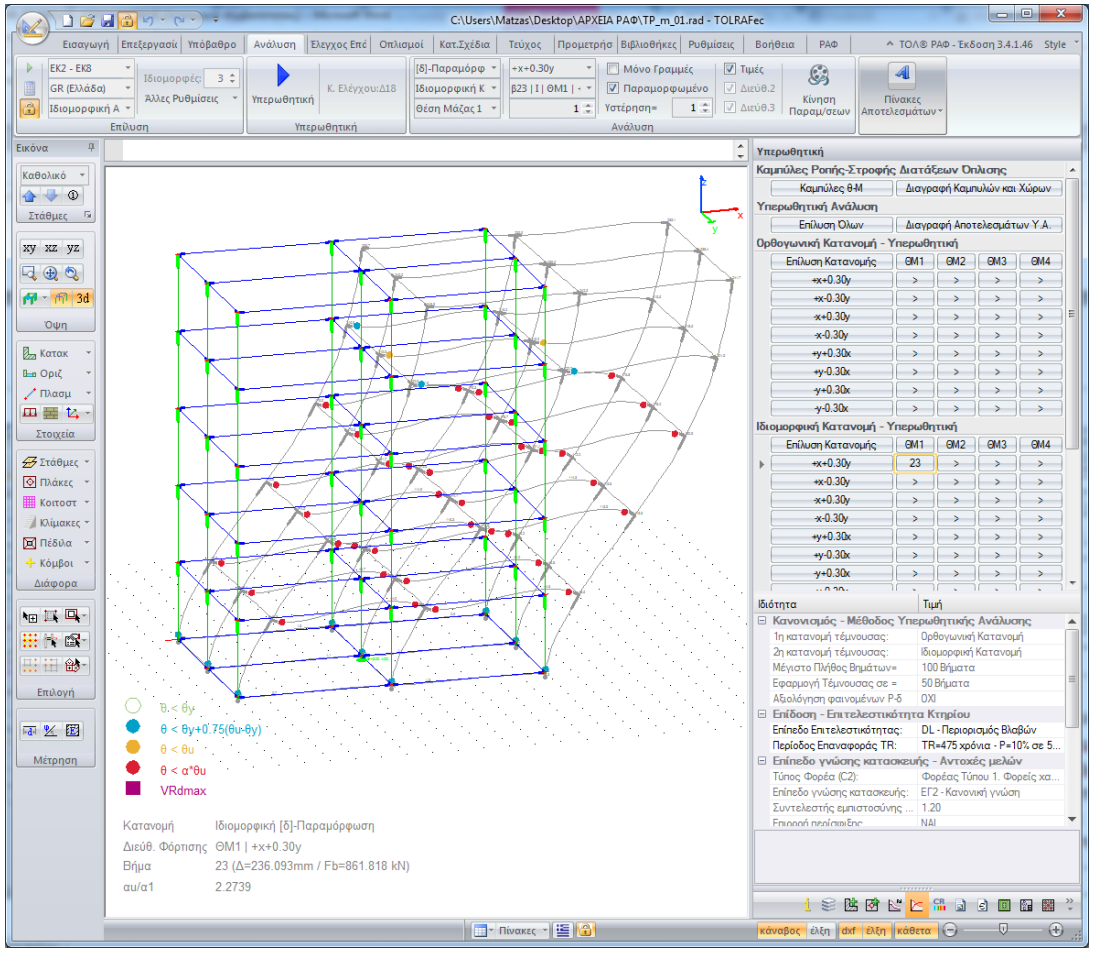


Ο χειρισμός αυτός μπορεί να γίνει και στο φύλλο «Ανάλυση», ενότητα «Ανάλυση» μεταβάλλοντας όχι μόνο τα βήματα της υπερωθητικής ανάλυσης αλλά και την θέση μάζας, την διεύθυνση της ώθησης και το είδος της κατανομής.



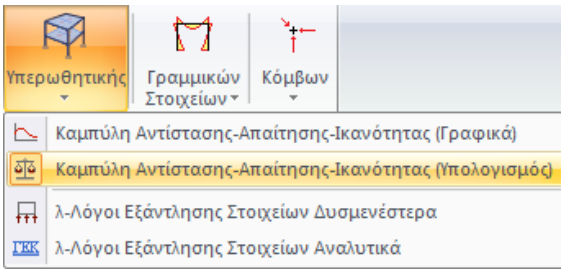
Παράλληλα επιλέγοντας την εμφάνιση του διαγράμματος «Παραμόρφωση» μπορούμε να δούμε την εξέλιξη της παραμόρφωσης του φορέα ανά βήμα υπερωθητικής ανάλυσης με ταυτόχρονη υπόδειξη των σημείων δημιουργίας πλαστικών αρθρώσεων. Με το πλήκτρο «Κίνηση Παραμορφώσεων» και ρυθμίζοντας κατάλληλα την χρονική υστέρηση μπορούμε να δούμε με κίνηση πως εξελίσσεται ανά βήμα η παραμόρφωση του φορέα και οι πλαστικές αρθρώσεις των φερόντων στοιχείων του μοντέλου.

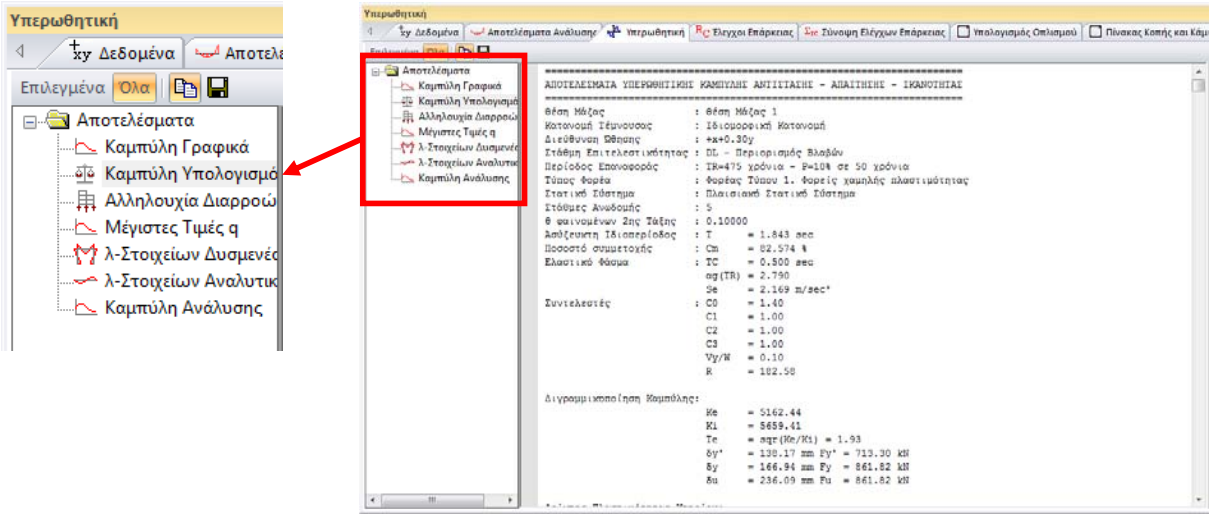




5.3.2 Υπολογισμός Καμπύλης Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας

Τα αριθμητικά αποτελέσματα της υπερωθητικής καμπύλης Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας μπορούμε να τα δούμε είτε επιλέγοντας την εντολή «Καμπύλη Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας (Υπολογισμός)» από το πλήκτρο «Υπερωθητικής» στην ενότητα «Πίνακες Αποτελεσμάτων» του φύλλου «Ανάλυση», είτε από δέντρο των αποτελεσμάτων του φύλλου «Υπερωθητική» στους πίνακες δεδομένων του ΡΑΦ.





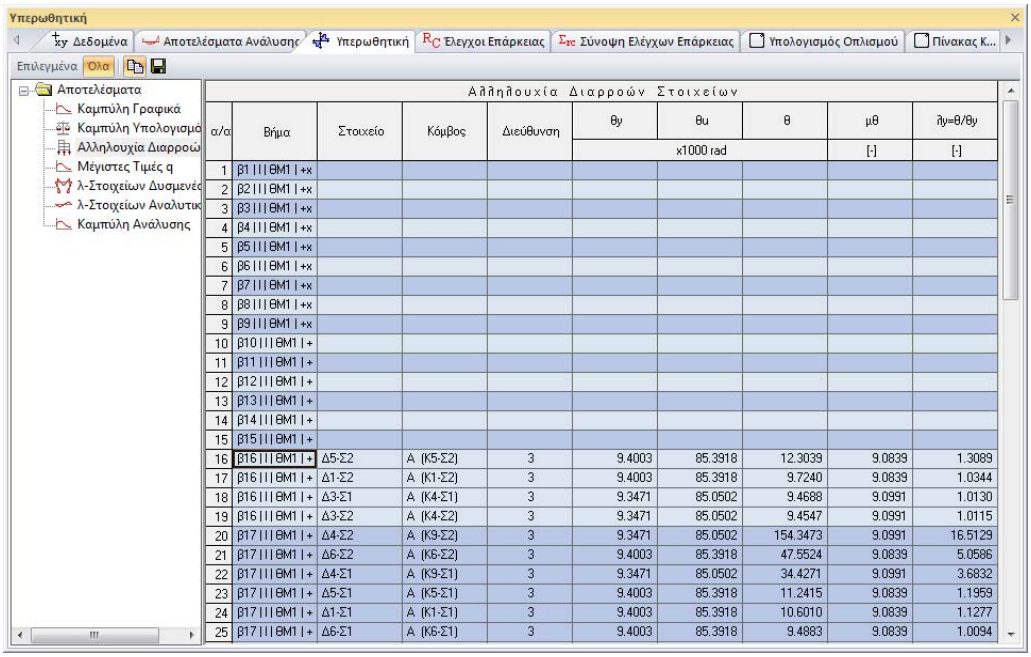
Στα αριθμητικά αποτελέσματα αναφέρονται:

- τα δεδομένα της υπερωθητικής ανάλυσης
- οι παράμετροι της διγραμμικοποίησης της καμπύλης Αντίστασης – Απαίτησης – Ικανότητας,
- τα χαρακτηριστικά σημεία διαρροών και υπερβάσεων που προκύπτουν λόγω της επιλεγμένης επιτελεστικότητας,
- οι συντεταγμένες (δ – F) της αρχικής καμπύλης αντίστασης
- οι συντεταγμένες (δ – F) των περιοχών επιτελεστικότητας

5.3.3 Αλληλουχία Διαρροών

Επιλέγοντας την εντολή «Αλληλουχία Διαρροών» στο δέντρο των «Αποτελεσμάτων» του φύλλου «Υπερωθητική» στους πίνακες του ΡΑΦ, εμφανίζεται ο πίνακας στον οποίο παρατίθεται η αλληλουχία εμφάνισης των διαρροών των γραμμικών στοιχείων του φορέα που προκύπτουν από την υπερωθητιτκή ανάλυση βάσει της επιλεγμένης κατανομής και θέσης μάζας.

Στον πίνακα εμφανίζονται διαδοχικά όλα τα βήματα που πραγματοποιήθηκαν στην υπερωθητική ανάλυση. Στο βήμα στο οποίο προκύπτουν διαρροές στοιχείων συμπληρώνονται αυτόματα από το ΡΑΦ τα δεδομένα (είδος, στάθμη, κόμβος, διεύθυνση) του κάθε στοιχείου το οποίο διέρρευσε, καθώς επίσης και τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν την στροφή διαρροής και θραύσης, την υπάρχουσα στροφή του στοιχείου, την πλαστιμότητα των στροφών και τον λόγο εξάντλησης του στοιχείου ως προς την στροφή διαρροής.



Υπερωθητική

Δεδομένα | Αποτελέσματα Ανάλυσης | Υπερωθητική | Έλεγχοι Επάρκειας | Σύνοψη Ελέγχων Επάρκειας | Υπολογισμός Οπλισμού | Πίνακας Κ...

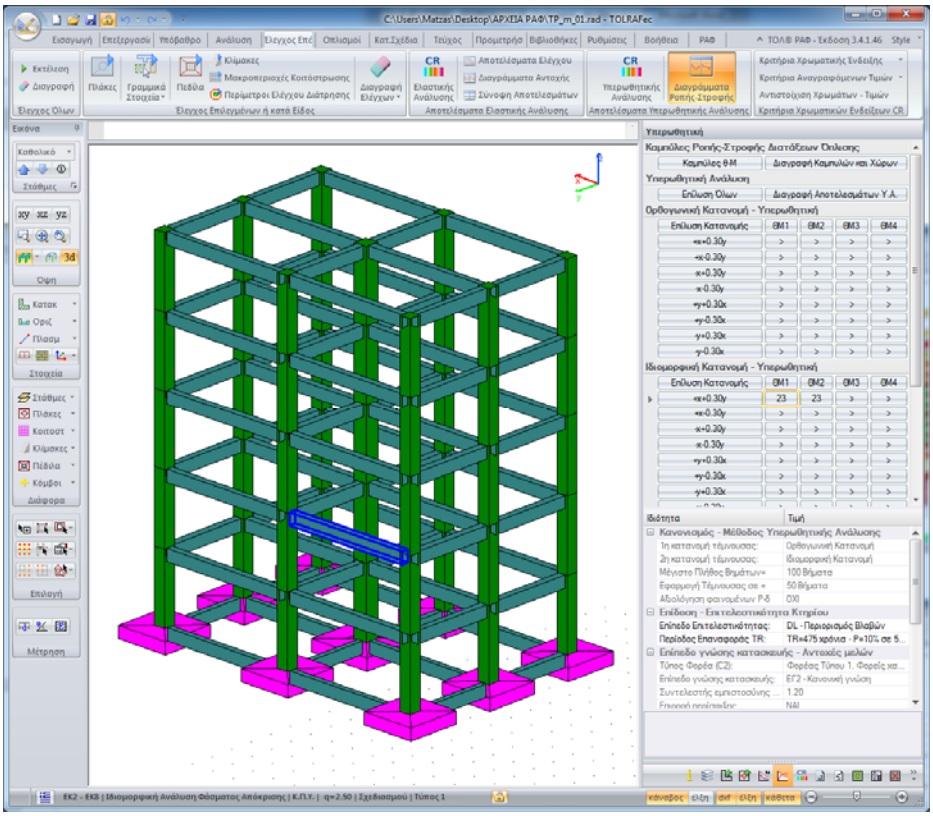
Επιλεγμένα | Όλα

- Αποτελέσματα
  - Καμπύλη Γραφικά
  - Καμπύλη Υπολογισμό
  - Αλληλουχία Διαρροώ
  - Μέγιστες Τιμές q
  - λ-Στοιχείων Δυσμενές
  - λ-Στοιχείων Αναλυτικ
  - Καμπύλη Ανάλυσης

Αλληλουχία Διαρροών Στοιχείων

α/α	Βήμα	Στοιχείο	Κόμβος	Διεύθυνση	θy	θu	θ	μθ	λy=θ/θy
					x1000 rad			[-]	[-]
1	β1 | | | θM1 | +x								
2	β2 | | | θM1 | +x								
3	β3 | | | θM1 | +x								
4	β4 | | | θM1 | +x								
5	β5 | | | θM1 | +x								
6	β6 | | | θM1 | +x								
7	β7 | | | θM1 | +x								
8	β8 | | | θM1 | +x								
9	β9 | | | θM1 | +x								
10	β10 | | | θM1 | +								
11	β11 | | | θM1 | +								
12	β12 | | | θM1 | +								
13	β13 | | | θM1 | +								
14	β14 | | | θM1 | +								
15	β15 | | | θM1 | +								
16	β16 | | | θM1 | +	Δ5-Σ2	Α (Κ5-Σ2)	3	9.4003	85.3918	12.3039	9.0839	1.3089
17	β16 | | | θM1 | +	Δ1-Σ2	Α (Κ1-Σ2)	3	9.4003	85.3918	9.7240	9.0839	1.0344
18	β16 | | | θM1 | +	Δ3-Σ1	Α (Κ4-Σ1)	3	9.3471	85.0502	9.4688	9.0991	1.0130
19	β16 | | | θM1 | +	Δ3-Σ2	Α (Κ4-Σ2)	3	9.3471	85.0502	9.4547	9.0991	1.0115
20	β17 | | | θM1 | +	Δ4-Σ2	Α (Κ3-Σ2)	3	9.3471	85.0502	154.3473	9.0991	16.5129
21	β17 | | | θM1 | +	Δ6-Σ2	Α (Κ6-Σ2)	3	9.4003	85.3918	47.5524	9.0839	5.0586
22	β17 | | | θM1 | +	Δ4-Σ1	Α (Κ3-Σ1)	3	9.3471	85.0502	34.4271	9.0991	3.6832
23	β17 | | | θM1 | +	Δ5-Σ1	Α (Κ5-Σ1)	3	9.4003	85.3918	11.2415	9.0839	1.1959
24	β17 | | | θM1 | +	Δ1-Σ1	Α (Κ1-Σ1)	3	9.4003	85.3918	10.6010	9.0839	1.1277
25	β17 | | | θM1 | +	Δ6-Σ1	Α (Κ6-Σ1)	3	9.4003	85.3918	9.4883	9.0839	1.0094

Επιλέγοντας οποιοδήποτε στοιχείο από τον πίνακα αυτομάτως αυτό εντοπίζεται στο μοντέλο του φορέα στην επιφάνεια εργασίας ώστε να έχουμε σαφή οπτική εικόνα της αλληλουχίας των διαρροών.

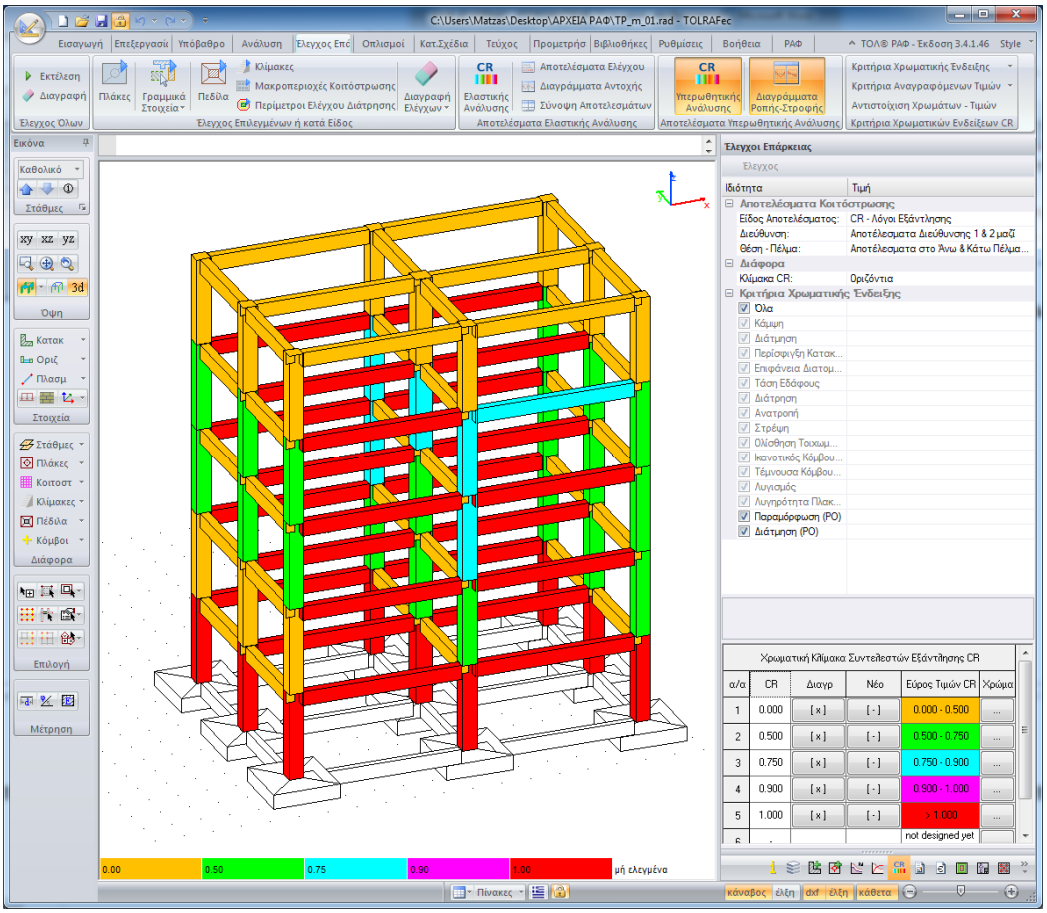


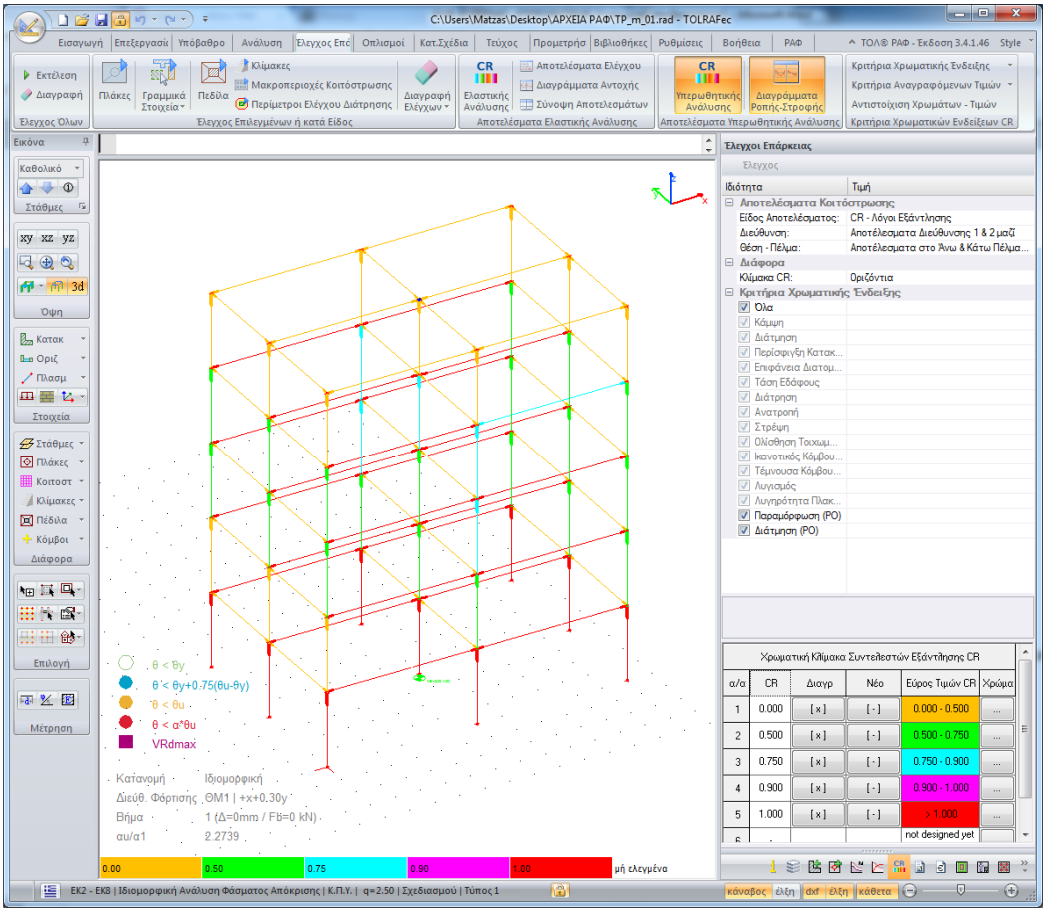
5.3.4 Έλεγχος Επάρκειας Δομικών Στοιχείων μη Γραμμικής Ανάλυσης

Ο έλεγχος επάρκειας των δομικών στοιχείων του φορέα για μη γραμμική ανάλυση πραγματοποιείται αυτόματα από το ΡΑΦ ταυτόχρονα με την υπερωθητική ανάλυση. Τα αποτελέσματα του ελέγχου επάρκειας είναι διαθέσιμα στον χρήστη είτε γραφικά, είτε αριθμητικά μέσω των πινάκων του ΡΑΦ.

– **Γραφική απεικόνιση αποτελεσμάτων**

Η ενεργοποίηση της γραφικής απεικόνισης των αποτελεσμάτων γίνεται από την ενότητα «Αποτελέσματα Υπερωθητικής Ανάλυσης» του φύλλου «Έλεγχος Επάρκειας». Επιλέγοντας την εντολή «CR Υπερωθητικής Ανάλυσης» τα δομικά στοιχεία του φορέα αποκτούν χρώμα σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα για τον χαρακτηρισμό του κάθε στοιχείου σε σχέση με τον λόγο εξάντλησης «λ» που προκύπτει λόγω των κριτηρίων της παραμόρφωσης και της διάτμησης που αφορούν την υπερωθητική ανάλυση.



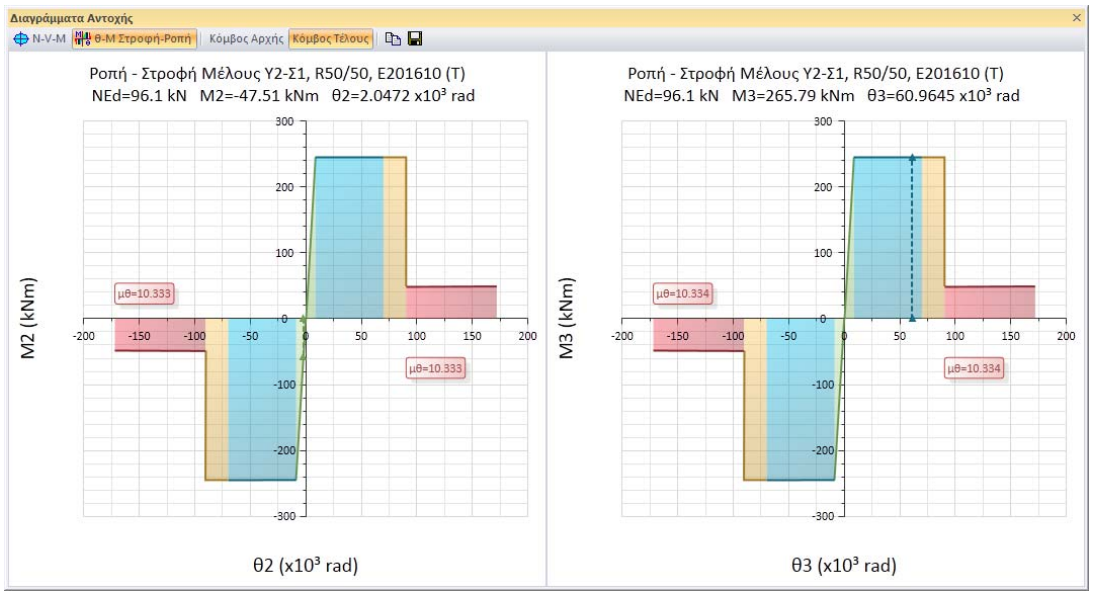


Τα κριτήρια για τον έλεγχο επάρκειας τόσο για την μη γραμμική ανάλυση όσο και για την γραμμική ανάλυση εμφανίζονται στην πινακίδα δεδομένων όπως επίσης και στην ενότητα «Κριτήρια Χρωματικών Ενδείξεων CR» του φύλλου «Έλεγχος Επάρκειας».

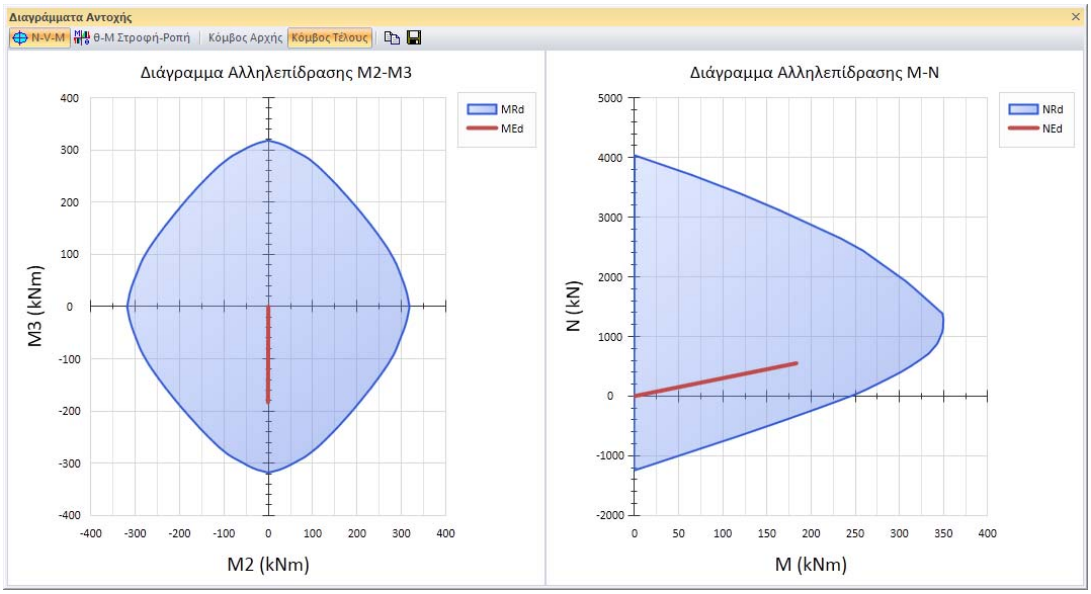
Όταν εκτελείται μη γραμμική ανάλυση τα κριτήρια χρωματικής ένδειξης που αφορούν την γραμμική ανάλυση απενεργοποιούνται και διαθέσιμα για τροποποίηση παραμένουν μόνο όσα αφορούν την υπερωθητική ανάλυση (Παραμόρφωση (PO), Διάτρηση (PO)).

Επίσης, μια άλλη δυνατότητα που παρέχει το ΡΑΦ στον μελετητή είναι τα Διαγράμματα Ροπής – Στροφής των δομικών στοιχείων του φορέα. Η εντολή εμφάνισης των διαγραμμάτων βρίσκεται στην ενότητα «Αποτελέσματα Υπερωθητικής Ανάλυσης» του φύλλου «Έλεγχος Επάρκειας» επιλέγοντας το πλήκτρο «Διαγράμματα Ροπής – Στροφής». Στην συνέχεια επιλέγοντας οποιοδήποτε δομικό στοιχείο και βήμα της υπερωθητικής ανάλυσης εμφανίζονται σε παράθυρο τα διαγράμματα Ροπής – Στροφής για τις διευθύνσεις «2» και «3» του

τοπικού συστήματος. Σε ότι αφορά τα οριζόντια δομικά στοιχεία η διεύθυνση καταπόνησης είναι η «3» του τοπικού συστήματος.

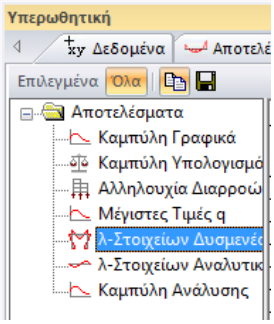


Από το παράθυρο των διαγραμμάτων μπορούμε να επιλέξουμε να δούμε τα διαγράμματα στον «Κόμβο Αρχής» ή στον «Κόμβο Τέλους» ενεργοποιώντας τις σχετικές επιλογές στην κορυφή του παραθύρου των διαγραμμάτων, καθώς επίσης υπάρχει η δυνατότητα εμφάνισης των διαγραμμάτων αλληλεπίδρασης Rd εφόσον έχει προηγηθεί έλεγχος επάρκειας με ελαστική ανάλυση.



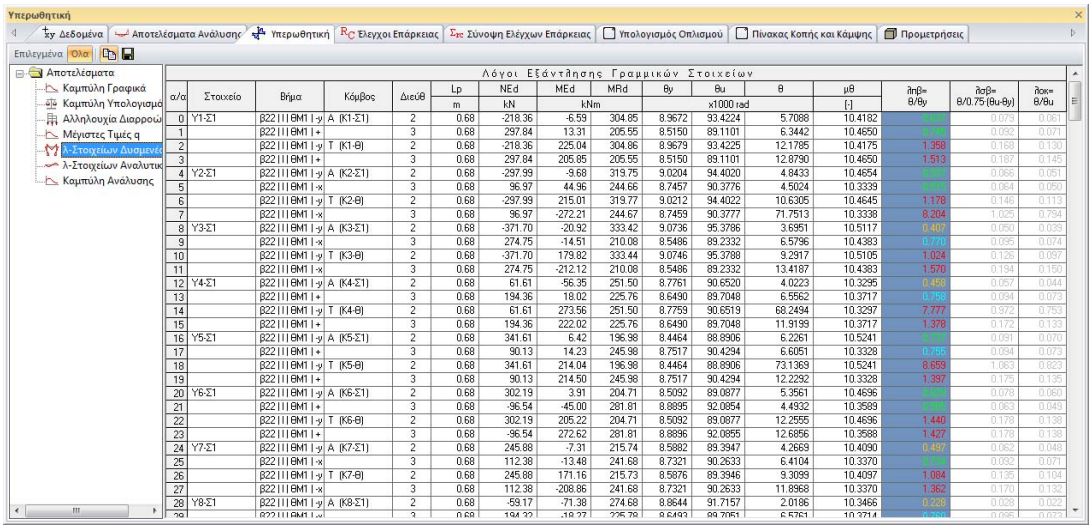
Τέλος μπορούμε να αποθηκεύσουμε σε αρχείο εικόνας την τρέχουσα όψη των διαγραμμάτων ή να την αντιγράψουμε στο πρόχειρο για χρήση σε άλλο πρόγραμμα.

– **Αριθμητικά αποτελέσματα**



Τα αριθμητικά αποτελέσματα εμφανίζονται στους πίνακες του ΡΑΦ και συγκεκριμένα στο φύλλο «Υπερωθητική» με τις εντολές «λ – Στοιχείων Δυσμενέστερα» και «λ – Στοιχείων Αναλυτικά».

Στον πίνακα «λ – Στοιχείων Δυσμενέστερα» εμφανίζονται για κάθε στάθμη όλα τα κατακόρυφα και οριζόντια δομικά στοιχεία που συμμετείχαν στην υπερωθητική ανάλυση. Για κάθε στοιχείο αναφέρονται το βήμα, η κατανομή, ο κόμβος και η διεύθυνση στην οποία προέκυψε η διαρροή του στοιχείου. Επίσης, εμφανίζονται τα εντατικά μεγέθη (αξονική δύναμη, ροπές) καθώς και τα αριθμητικά αποτελέσματα που αφορούν την στροφή διαρροής και θραύσης, την υπάρχουσα στροφή του στοιχείου, την πλαστιμότητα των στροφών και τον λόγο εξάντλησης του στοιχείου ως προς την στροφή διαρροής για κάθε επίπεδο επιτελεστικότητας (Περιορισμός Βλαβών, Σοβαρές Βλάβες, Οιονεί Κατάρρευση).



α/α	Στοιχείο	Βήμα	Κόμβος	Διεύθ	Lp	NEd	MEd	MRd	θy	θu	θ	μθ	ληβ= θ/θy	λσβ= θ/0.75 (θu-θy)	λοκ= θ/θu
					m	kN	kNm		x1000 rad			[-]			
0	Y1-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K1-Σ1)	2	0.68	-218.36	-6.59	304.85	8.9672	93.4224	5.7088	10.4182	[illegible]	0.073	0.061
1		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	297.84	13.31	205.55	8.5150	89.1101	6.3442	10.4650	[illegible]	0.092	0.071
2		B22 | | 6M1 | -y	T (K1-Θ)	2	0.68	-218.36	225.04	304.86	8.9679	93.4225	12.1785	10.4175	1.358	0.168	0.130
3		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	297.84	205.85	205.55	8.5150	89.1101	12.8790	10.4650	1.513	0.187	0.145
4	Y2-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K2-Σ1)	2	0.68	-297.99	-9.68	319.75	9.0204	94.4020	4.8433	10.4654	[illegible]	0.066	0.051
5		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	96.97	44.96	244.66	8.7457	90.3776	4.5024	10.3339	[illegible]	0.064	0.050
6		B22 | | 6M1 | -y	T (K2-Θ)	2	0.68	-297.99	215.01	319.77	9.0212	94.4022	10.6305	10.4645	1.178	0.146	0.113
7		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	96.97	-272.21	244.67	8.7459	90.3777	71.7513	10.3338	8.204	1.025	0.794
8	Y3-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K3-Σ1)	2	0.68	-371.70	-20.92	333.42	9.0736	95.3786	3.6951	10.5117	0.407	0.050	0.039
9		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	274.75	-14.51	210.08	8.5486	89.2332	6.5796	10.4383	0.770	0.095	0.074
10		B22 | | 6M1 | -y	T (K3-Θ)	2	0.68	-371.70	179.82	333.44	9.0746	95.3788	9.2917	10.5105	1.024	0.126	0.097
11		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	274.75	-212.12	210.08	8.5486	89.2332	13.4187	10.4383	1.570	0.194	0.150
12	Y4-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K4-Σ1)	2	0.68	61.61	-56.35	251.50	8.7761	90.6520	4.0223	10.3295	0.458	0.057	0.044
13		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	194.36	18.02	225.76	8.6490	89.7048	6.5562	10.3717	0.758	0.094	0.073
14		B22 | | 6M1 | -y	T (K4-Θ)	2	0.68	61.61	273.56	251.50	8.7759	90.6519	68.2494	10.3297	7.777	0.972	0.753
15		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	194.36	222.02	225.76	8.6490	89.7048	11.9199	10.3717	1.378	0.172	0.133
16	Y5-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K5-Σ1)	2	0.68	341.61	6.42	196.98	8.4464	88.8906	6.2261	10.5241	[illegible]	0.091	0.070
17		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	90.13	14.23	245.98	8.7517	90.4294	6.6051	10.3328	0.799	0.094	0.073
18		B22 | | 6M1 | -y	T (K5-Θ)	2	0.68	341.61	214.04	196.98	8.4464	88.8906	73.1369	10.5241	8.659	1.083	0.823
19		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	90.13	214.50	245.98	8.7517	90.4294	12.2292	10.3328	1.397	0.175	0.135
20	Y6-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K6-Σ1)	2	0.68	302.19	3.91	204.71	8.5092	89.0877	5.3561	10.4696	[illegible]	0.078	0.060
21		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	-96.54	-45.00	281.81	8.8895	92.0854	4.4932	10.3589	[illegible]	0.063	0.049
22		B22 | | 6M1 | -y	T (K6-Θ)	2	0.68	302.19	205.22	204.71	8.5092	89.0877	12.2555	10.4696	1.440	0.178	0.138
23		B22 | | 6M1 | +		3	0.68	-96.54	272.62	281.81	8.8896	92.0855	12.6856	10.3588	1.427	0.178	0.138
24	Y7-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K7-Σ1)	2	0.68	245.88	-7.31	215.74	8.5882	89.3947	4.2669	10.4090	0.497	0.062	0.048
25		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	112.38	-13.48	241.68	8.7321	90.2633	6.4104	10.3370	[illegible]	0.092	0.071
26		B22 | | 6M1 | -y	T (K7-Θ)	2	0.68	245.88	171.16	215.73	8.5876	89.3946	9.3099	10.4097	1.084	0.135	0.104
27		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	112.38	-208.86	241.68	8.7321	90.2633	11.8968	10.3370	1.362	0.170	0.132
28	Y8-Σ1	B22 | | 6M1 | -y	A (K8-Σ1)	2	0.68	-59.17	-71.38	274.68	8.8644	91.7157	2.0186	10.3466	0.228	0.029	0.022
29		B22 | | 6M1 | -x		3	0.68	194.32	-18.27	225.79	8.6493	89.7051	6.5761	10.3714	[illegible]	0.095	0.073

Το σημαντικό μέγεθος είναι ο λόγος εξάντλησης $\lambda_{\pi\beta}$ που προκύπτει με δεδομένο το επίπεδο επιτελεστικότητας «Περιορισμός Βλαβών», πριν δηλαδή παρουσιαστεί η πρώτη διαρροή στον φορέα. Η στήλη αυτή ($\lambda_{\pi\beta}$=θ/θy) παρουσιάζει τον λόγο εξάντλησης για όλα τα δομικά στοιχεία του φορέα αποδίδοντας τους το κατάλληλο χρώμα σύμφωνα με την χρωματική κλίμακα που ορίζεται στο φύλλο «Έλεγχος

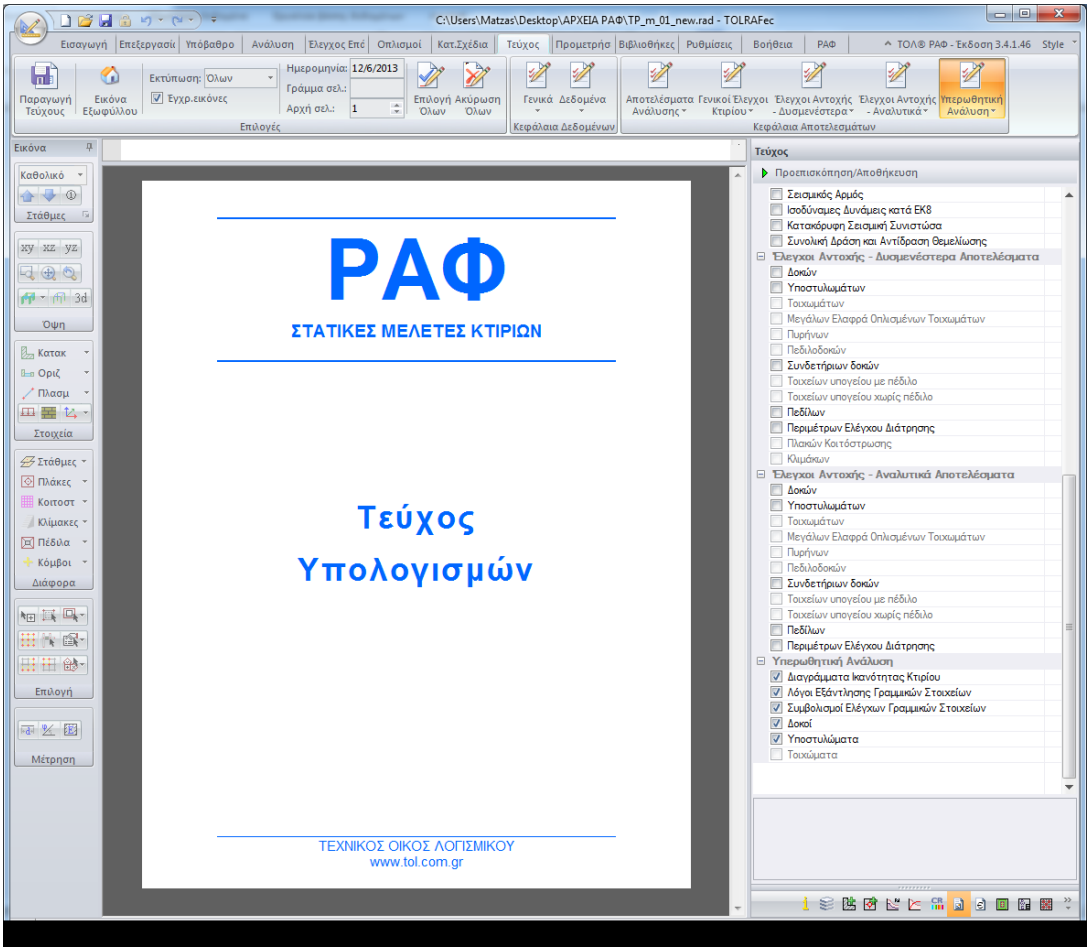
Επάρκειας» για κάθε κριτήριο ελέγχου της υπερωθητικής ανάλυσης.

Στον πίνακα «λ – Στοιχείων Αναλυτικά» παρουσιάζονται ακριβώς τα ίδια δεδομένα και αποτελέσματα με τον πίνακα «λ – Στοιχείων Δυσμενέστερα» με μόνη διαφορά ότι αυτά αναφέρονται σε όλα τα βήματα που έχουν πραγματοποιηθεί στην υπερωθητική ανάλυση.

5.4 Τεύχος Υπολογισμών

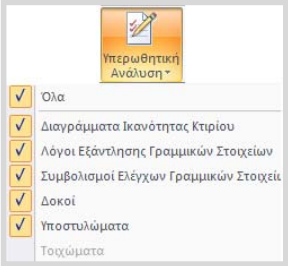
5.4.1 Υπερωθητική ανάλυση

Αφού ολοκληρωθεί η υπερωθητική ανάλυση μπορούμε να τυπώσουμε το τεύχος υπολογισμών μεταβαίνοντας στο φύλλο «Τεύχος».



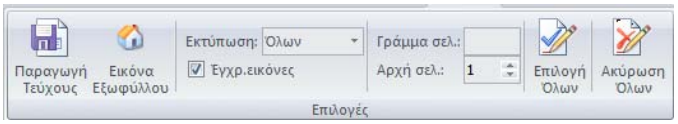
Τα κεφάλαια που αφορούν την υπερωθητική ανάλυση και μπορούν να συμπεριληφθούν στο τεύχος είναι:

– Διαγράμματα Ικανότητας Κτηρίου



- Λόγοι Εξάντλησης Γραμμικών Στοιχείων
- Συμβολισμοί Ελέγχων Γραμμικών Στοιχείων
- Δοκοί
- Υποστυλώματα
- Τοιχώματα

Η επιλογή των κεφαλαίων γίνεται είτε από την πινακίδα δεδομένων στην ενότητα «Υπερωθητική Ανάλυση», είτε από την εκτυλισσόμενη λίστα της εντολής «Υπερωθητική Ανάλυση» της ενότητας «Κεφάλαια Αποτελεσμάτων» στην ταινία εντολών.



Στην ενότητα «Επιλογές» στο πεδίο «Εκτύπωση», μας δίνεται η δυνατότητα να επιλέξουμε για εκτύπωση είτε όλες τις στάθμες του κτιρίου της μελέτης, είτε την τρέχουσα, είτε επιλεγμένες στάθμες. Ακόμα, από τα πεδία «Γράμμα Σελ.» και «Αρχή Σελ.» μπορούμε να παρέμβουμε στην αρίθμηση των σελίδων και να επιλέξουμε τον αριθμό από τον οποίο θα ξεκινάει η αρίθμηση, αλλά και να προσθέσουμε ένα γράμμα μπροστά απ' αυτόν με το οποίο, για παράδειγμα, θα διαχωρίζουμε την κάθε στάθμη. Δίπλα από τα παραπάνω πεδία βρίσκονται τα πλήκτρα «Επιλογή Όλων», με το οποίο μπορούμε με μια κίνηση να επιλέξουμε όλα τα δεδομένα και τα αποτελέσματα της μελέτης όχι μόνο της υπερωθητικής ανάλυσης, και «Ακύρωση Όλων», με το οποίο ακυρώνουμε οποιαδήποτε επιλογή έχει γίνει.

Ακόμα με το πλήκτρο 'Παραγωγή Τεύχους' εμφανίζεται το τεύχος στην επιφάνεια σχεδίασης του ΡΑΦ σε τύπο αρχείου PDF, το οποίο μπορούμε να διατρέξουμε για τον τελικό έλεγχο πριν την εκτύπωση. Εναλλακτικά από το πλήκτρο «Προεπισκόπηση/Αποθήκευση» μπορούμε να δούμε το τεύχος σε εξωτερική εφαρμογή (viewer) και από εκεί να το εξάγουμε σε τύπο αρχείου 'doc', 'html', 'pdf', 'rtf' και 'xls'. Και στις δύο περιπτώσεις, εφόσον έχουμε επιλέξει να συμπεριληφθούν στο τεύχος τα αποτελέσματα των ελέγχων αντοχής, θα πρέπει να έχουμε προβεί σε έλεγχο αντοχής των δομικών στοιχείων πριν την παραγωγή του τεύχους. Σε αντίθετη περίπτωση εκκινεί αυτόματα ο έλεγχος.

ΡΑΦ

ΣΤΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ ΚΤΙΡΙΩΝ

ΕΓΧΕΙΡΙΔΙΟ ΥΠΟΜΟΝΑΔΑΣ «ΥΠΕΡΩΘΗΤΙΚΗ»

ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΟΙΚΟΣ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ
www.tol.com.gr info@tol.com.gr

Copyright © 2008-2013