



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΚΑΙ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΔΟΜΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΕΧΝΙΚΩΝ ΕΡΓΩΝ

**ΕΛΕΓΧΟΣ ΕΓΚΑΡΣΙΩΝ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΩΝ ΚΑΙ ΡΩΓΜΩΝ ΣΕ
ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ**

Διπλωματική Εργασία

Απόλλωνα Δ. Μπουρνά

Επιβλέπων

Μαρίνος Α. Καττής

Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2013

DEFLECTION AND CRACK WIDTH CONTROL OF REINFORCED CONCRETE
STRUCTURES

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο, την παρουσίαση των μεθόδων οι οποίοι χρησιμοποιούνται προκειμένου να μελετηθούν οι παραμορφώσεις και η ρηγμάτωση κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ), σύμφωνα με τους κανονισμούς EC2 και ACI 318-11. Αρχικά, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και οι κανόνες που διέπουν τις εγκάρσιες μετατοπίσεις και την ανάπτυξη ρωγμών, σε δομικά στοιχεία από Ο/Σ. Ύστερα γίνεται η μελέτη και η παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθούν οι παραπάνω κανονισμοί για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων και του εύρους ρωγμής κατά τον έλεγχο λειτουργικότητας των κατασκευών Ο/Σ. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, γίνεται, επίσης, η ανάπτυξη ενός λογισμικού για την άμεση εφαρμογή των παραπάνω ελέγχων. Τέλος, με την εφαρμογή των παραπάνω μεθόδων σε ένα αριθμητικό παράδειγμα, πραγματοποιείται η σύγκριση των μεθόδων που εφαρμόζει ο κάθε κανονισμός.

Abstract

This diploma thesis refers to the methods used to evaluate the deflection and cracking of reinforced concrete structures, according to the EC2 and ACI 318-11 codes. First, the basic principles that define the deflection and cracking behavior of reinforced concrete members are discussed. Secondly, the methods used for the serviceability limit state design, according to the above codes, are comparatively presented and discussed. Concluding, the two codes are numerically compared by using a software developed in the course of the present work.

Πίνακας Περιεχομένων

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
----------------------	----------

Κεφάλαιο 1

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	3
--	----------

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	3
1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ	5
1.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΠΟ ΑΞΟΝΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	6
1.4 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΚΑΜΨΗΣ	11
1.5 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΚΑΜΠΙΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ	14

Κεφάλαιο 2

ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	17
---	-----------

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	17
2.2 ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ	20
2.3 ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 2 (EC2).....	22
2.4 CEB-FIP 1990 (MC-90).....	24
2.5 ACI 318-11	26

Κεφάλαιο 3

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2 ΚΑΙ ΤΟΝ ACI 318-11	27
---	-----------

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2.....	27
3.2.1 Όρια των παραμορφώσεων	27
3.2.2 Έλεγχος των παραμορφώσεων	29

3.2.3	Υπολογισμός παραμορφώσεων βάση του EC-2.....	32
3.2.4	Τα δεδομένα του υπολογισμού.....	32
3.2.5	Η υπολογιστική διαδικασία.....	34
3.3	ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ACI 318-11	49
3.3.1	Εισαγωγή.....	49
3.3.2	Υπολογισμός παραμορφώσεων βάσει του ACI 318-11.....	50
3.3.3	Τα δεδομένα του υπολογισμού.....	50
3.3.4	Η υπολογιστική διαδικασία.....	51

Κεφάλαιο 4

ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2 ΚΑΙ ΤΟΝ AC 318-11	59	
4.1	ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2	59
4.1.1	Εισαγωγή.....	59
4.1.2	Υπολογισμός του εύρους ρωγμής.....	60
4.1.3	Ελάχιστος απαιτούμενος οπλισμός.....	64
4.1.4	Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση και διάμετρος ράβδων οπλισμού	66
4.2	ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ACI 318	68
4.2.1	Εισαγωγή.....	68
4.2.2	Υπολογισμός Εύρους Ρωγμής.....	68
4.2.3	Έλεγχος Ρηγμάτωσης.....	70

Κεφάλαιο 5

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ	73	
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	73
5.2	ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ EC2.....	74
5.2.1	Σχεδιασμός Δοκού έναντι οριακής κατάστασης αντοχής.....	74
5.2.2	Έλεγχος Παραμόρφωσης	79
5.2.3	Έλεγχος Ρηγμάτωσης.....	91
5.3	ACI 318-11	94

5.3.1	Σχεδιασμός Δοκού έναντι οριακής κατάστασης αντοχής	94
5.3.2	Έλεγχος παραμόρφωσης	97
5.3.3	Έλεγχος Ρηγμάτωσης.....	102

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	109
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΕΛΩΝ ΒΥΘΙΣΗΣ ΕΝΟΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ	109
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	111
ΠΙΝΑΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΡΠΥΣΜΟΥ	111
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ	113
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ EC2 ΚΑΙ ACI 318-11	113
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	147

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρελθόν, οι κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα (Ο/Σ) σχεδιάζονταν, κατά κανόνα, δύσκαμπτες και με μικρά ανοίγματα. Όμως, η εισαγωγή της μεθόδου της οριακής αντοχής στον σχεδιασμό των κατασκευών αυτών, καθώς και η ανάπτυξη σκυροδεμάτων και χαλύβων υψηλής αντοχής, επέτρεψαν τον σχεδιασμό κατασκευών Ο/Σ πιο εύκαμπτων, αλλά και ταυτόχρονα, πιο ανθεκτικών. Με την βοήθεια των υπολογιστών και της σχετικής έρευνας, που έχει αναπτυχθεί στη σχετική επιστημονική περιοχή, έχει επιτευχθεί βαθύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των κατασκευών αυτών, με αποτέλεσμα, τον ασφαλέστερο και οικονομικότερο σχεδιασμό τους. Έτσι, οι διατομές των δομικών στοιχείων των κατασκευών αυτών μπορούν να μειωθούν σημαντικά, με συνέπεια, αυτά τα στοιχεία να μην παρουσιάζουν πρόβλημα από πλευράς αντοχής, αλλά να υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις. Επιπλέον, σε δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, με ή χωρίς προεντεταμένα στοιχεία, η εμφάνιση ρωγμών είναι, γενικά, ένα αναμενόμενο γεγονός, όταν αυτά υπόκεινται σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη ή εφελκυσμό, που προέρχεται είτε από άμεση φόρτιση, είτε από παρεμπόδιση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων.

Στην πράξη, ο σχεδιασμός των κατασκευών Ο/Σ στοχεύει πριν από όλα, στη αντοχή της κατασκευής, ενώ ο λειτουργικός σχεδιασμός επιτρέπει στα δομικά της στοιχεία, ένα αποδεκτό επίπεδο παραμορφώσεων και ρωγμών. Η διεθνής πρακτική, όπως εκφράζεται, για παράδειγμα, από τον Ευρωκώδικα 2 (CEN, 2004) συνίσταται στη θέσπιση συντηρητικών κριτηρίων απαλλαγής από τον υπολογιστικό έλεγχο των οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας. Κατά το σχεδιασμό όμως, ο υπολογιστικός έλεγχος των ρωγμών και των παραμορφώσεων είναι χρήσιμος, καθώς, μέσα από τη σχετική ανάλυση

που γίνεται, επιτυγχάνεται η καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των δομικών στοιχείων των κατασκευών, και, με κατάλληλες επιλογές, μπορεί να οδηγήσει σε ασφαλέστερες και οικονομικότερες κατασκευές.

Η μέθοδος της οριακής κατάστασης λειτουργικότητας εξετάζει τα φαινόμενα της παραμόρφωσης και της ρηγμάτωσης, που εμφανίζονται σε κατασκευές από Ο/Σ, όταν αυτές καταπονούνται με τα φορτία λειτουργίας. Στη μέθοδο αυτή, με τον όρο παραμόρφωση, εννοούνται οι εγκάρσιες μετατοπίσεις των δομικών στοιχείων, και με τον όρο ρηγμάτωση, τα εύρη των ρωγμών.

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι: α) η παρουσίαση των βασικών μεθόδων που διέπουν την ανάλυση της παραμόρφωσης και ρηγμάτωσης κατασκευών Ο/Σ, σύμφωνα με τους κανονισμούς EC2 και ACI 318-11, β) η ανάπτυξη μιας συστηματικής και μεθοδολογίας για τον έλεγχο λειτουργικότητας των κατασκευών Ο/Σ σύμφωνα με τους παραπάνω κανονισμούς, γ) η ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού προγράμματος για την άμεση εφαρμογή της παραπάνω μεθοδολογίας, και δ) σύγκριση των παραπάνω μεθόδων με εφαρμογή σε συγκεκριμένα δομικά στοιχεία.

Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1, παρουσιάζονται οι βασικές αρχές και οι κανόνες που διέπουν τις εγκάρσιες μετατοπίσεις σε δομικά στοιχεία από Ο/Σ. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται μια μέθοδος προσδιορισμού της επιμήκυνσης και της καμπυλότητας που εμφανίζονται σε δομικά στοιχεία Ο/Σ, όταν καταπονούνται από αξονική δύναμη με ή χωρίς ροπή κάμψης. Στο κεφάλαιο 2, αναπτύσσεται η σχετική θεωρία που διέπει την ανάπτυξη ρωγμών σε δομικά στοιχεία Ο/Σ. Στο κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι κανόνες που διέπουν τον έλεγχο των παραμορφώσεων, όπως αυτοί καθορίζονται από τους κανονισμούς EC2 και ACI 318-11, και κωδικοποιείται η διαδικασία υπολογισμού τους. Στο κεφάλαιο 4, γίνεται η ανάπτυξη των μεθόδων του υπολογισμού του εύρους ρωγμής, και παρέχονται οι απαραίτητοι έλεγχοι για τον περιορισμό του. Στο κεφάλαιο 5 σχεδιάζεται ένα δομικό στοιχείο Ο/Σ, με βάση την οριακή κατάσταση αστοχίας, και στη συνέχεια γίνεται ο έλεγχος λειτουργικότητας, σύμφωνα με τους κανονισμούς EC2 και ACI 318-11. Στα συμπεράσματα γίνεται η σύγκριση των δύο μεθόδων, παρουσιάζονται και συζητούνται τα αριθμητικά αποτελέσματα που παρέχουν.

Κεφάλαιο 1

ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΡΗΓΜΑΤΩΜΕΝΩΝ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, με ή χωρίς προεντεταμένα στοιχεία, η εμφάνιση ρωγμών είναι, γενικά, ένα αναμενόμενο γεγονός όταν αυτά καταπονούνται σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη ή εφελκυσμό (Ghali *et al*, 2002; Hassoun and Al-Manaseer, 2005) Οι ρωγμές εμφανίζονται όταν οι εφελκυστικές τάσεις υπερβούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η μείωση της ακαμψίας των δομικών αυτών στοιχείων, λόγω της ρηγμάτωσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των παραμορφώσεων των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια μέθοδος προσδιορισμού της επιμήκυνσης και της καμπυλότητας, που εμφανίζεται σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος υπό την επίδραση αξονικής δύναμης με ή χωρίς ροπή κάμψης. Η μέθοδος αυτή, αποτελεί τη βάση υπολογισμού παραμορφώσεων δομικών στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος, σύμφωνα με πολλούς κώδικες, συμπεριλαμβανομένου και του Ευρωκώδικα.

Η πιο αδύνατη περιοχή ενός ρηγματωμένου στοιχείου είναι προφανώς εκείνη στην οποία έχει εμφανισθεί η ρωγμή. Μακριά από τη ρωγμή, το σκυρόδεμα στη εφελκυστική ζώνη είναι ικανό να παραλάβει μερικές εφελκυστικές τάσεις, και έτσι, συνεισφέρει στην ακαμψία του στοιχείου. Έτσι, η ακαμψία ενός ρηγματωμένου στοιχείου κυμαίνεται από μία ελάχιστη τιμή που αντιστοιχεί στη θέση της ρωγμής και από μια μέγιστη, που αντιστοιχεί στο διάστημα μεταξύ δύο ρωγμών. Για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων θεωρείται μια μέση τιμή της ακαμψίας του στοιχείου.

Στη μέθοδο αυτή, θεωρούνται δύο οριακές καταστάσεις παραμορφώσεων των δομικών στοιχείων, η αρηγμάτωση κατάσταση, στην οποία το σκυρόδεμα και ο οπλισμός αποκρίνονται πως δρουν ελαστικά και παράγουν συμβατές μεταξύ τους παραμορφώσεις και η ρηγματωμένη κατάσταση, στην οποία η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος θεωρείται μηδενική.

Στις δύο αυτές καταστάσεις, υπολογίζονται η επιμήκυνση και η καμπυλότητα των ρηγματωμένων δομικών στοιχείων και η τελική τους παραμόρφωση προκύπτει κάνοντας παρεμβολή μεταξύ των δύο αυτών καταστάσεων. Για την παρεμβολή χρησιμοποιείται ένας αδιάστατος συντελεστής ζ ο οποίος αντιπροσωπεύει την έκταση της ρηγμάτωσης. Στην αρχή της ρωγμής, είναι $\zeta = 0$ και η τιμή του συντελεστή αυτού, πλησιάζει την μονάδα καθώς αυξάνεται η εφαρμοσμένη αξονική δύναμη ή η καμπτική ροπή. Ο ίδιος συντελεστής ζ μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για την εκτίμηση του εύρους ρωγμής.

Η μέθοδος παρεμβολής, που αναφέρθηκε παραπάνω, δίνει τις μέσες τιμές της αξονικής παραμόρφωσης και καμπυλότητας, σε διάφορα σημεία της κατασκευής, τα οποία στην συνέχεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των μετατοπίσεων. Οι εσωτερικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στο δομικό στοιχείο θεωρούνται γνωστές και σε μέγεθος αρκετά μικρότερο της οριακής αντοχής των στοιχείων σε συνθήκες λειτουργίας. Η μετάβαση των εσωτερικών δυνάμεων λόγω ρηγμάτωσης σε μια στατικώς αόριστη κατασκευή θα αναλυθεί παρακάτω.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, η μείωση της ακαμψίας λόγω ρηγμάτωσης, που οφείλεται σε διατμητικές τάσεις είναι πολύ δύσκολη να εκτιμηθεί. Το μοντέλο δικτυώματος που συχνά χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της οριακής κατάστασης διατμητικής ή στρεπτικής αντοχής, θα χρησιμοποιηθεί παρακάτω για να εκτιμηθεί το ως άνω όριο των παραμορφώσεων μετά τη ρηγμάτωση.

Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών εξαρτάται από διάφορους παράγοντες εκτός του μεγέθους των άμεσα επιβαλλόμενων φορτίσεων. Για την πρόβλεψη του εύρους ρωγμής, έχουν προταθεί αρκετές εμπειρικές σχέσεις και εκτιμάται ότι στο μέλλον θα προκύψουν περισσότερες.

1.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΥΠΟΘΕΣΕΙΣ

Θεωρούμε ένα δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα που καταπονείται από μία αξονική δύναμη ή από μία καμπτική ροπή. Όταν η τάση στο σκυρόδεμα δεν υπερβαίνει την εφελκυστική του αντοχή το δομικό στοιχείο δεν παρουσιάζει ρωγμές. Ο οπλισμός και το σκυρόδεμα υφίστανται συμβατές παραμορφώσεις. Στην βιβλιογραφία, αυτή η κατάσταση αναφέρεται ως *στάδιο I*.

Όταν έχουμε υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, τότε έχουμε εμφάνιση ρωγμών. Στη θέση της ρωγμής, η εφελκυστική τάση θεωρείται πως αναλαμβάνεται πλήρως από τον οπλισμό. Η εφελκυστική ζώνη θεωρείται πλήρως ρηγματωμένη, και η κατάσταση αυτή αναφέρεται ως *στάδιο II*.

Για τα στάδια I και II, υποθέτουμε πως ισχύουν οι παραδοχές του Bernoulli, δηλαδή ότι, οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και μετά την παραμόρφωση ή τη ρηγμάτωση. Σε μία διατομή που βρίσκεται μεταξύ δύο ρωγμών, η συνάφεια μεταξύ του σκυροδέματος και των ράβδων οπλισμού περιορίζει την επιμήκυνση του χάλυβα, και έτσι, ένα μέρος της εφελκυστικής τάσης του οπλισμού στη θέση της ρωγμής μεταβιβάζεται στο σκυρόδεμα που βρίσκεται μεταξύ των ρωγμών. Η τάση και η παραμόρφωση στη διατομή θα είναι μια ενδιάμεση κατάσταση ανάμεσα στα στάδια I και II. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η παραμόρφωση σε μία ράβδο οπλισμού να κυμαίνεται μεταξύ μιας μέγιστης τιμής στις ρωγμές και μιας ελάχιστης τιμής στο μεσαίο διάστημα μεταξύ των ρωγμών. Η ακαμψία του στοιχείου μεταβάλλεται μεταξύ διαδοχικών ρωγμών με παρόμοιο τρόπο. Στο προσδιορισμό της επιμήκυνσης ή της καμπυλότητας, των δομικών στοιχείων, θα πρέπει να θεωρηθεί ως ισοδύναμη, η μέση τιμή της ακαμψίας των στοιχείων αυτών. Η συνεισφορά του σκυροδέματος της εφελκυστικής ζώνης, στην ακαμψία του στοιχείου, μερικές φορές ονομάζεται εφελκυστική ακαμψία (*tension stiffening*) του στοιχείου.

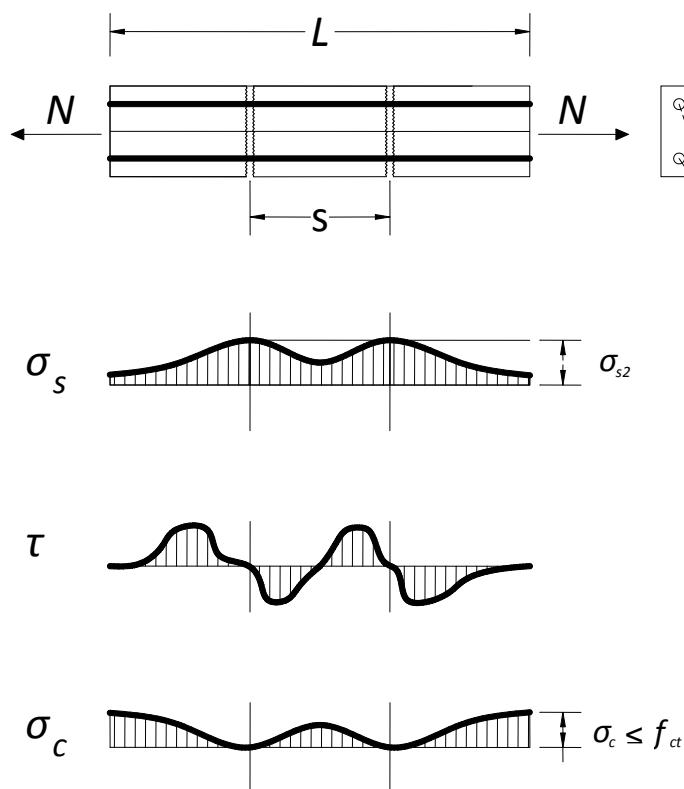
Αν αμεληθεί η επίδραση της εφελκυστικής ακαμψίας στον υπολογισμό της παραμόρφωσης ή του εύρους ρωγμής, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι υπερεκτιμημένα. Για να ληφθούν υπόψη οι επιδράσεις της εφελκυστικής ακαμψίας στον υπολογισμό της παραμόρφωσης και της ρηγμάτωσης, θα πρέπει να γίνουν επιπρόσθετες υποθέσεις, οι οποίες θα συζητηθούν παρακάτω.

1.3 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΠΟ ΑΞΟΝΙΚΟ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Ένα δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα, που καταπονείται από την αξονική εφελκυστική δύναμη N , δεν θα εμφανίζει ρωγμές, αν η τιμή της εφελκυστικής δύναμης N είναι μικρότερη από την τιμή,

$$N_r = f_{ct}(A_c + \alpha A_s) = f_{ct} A_1, \quad \alpha = E_s / E_c. \quad (1.1)$$

Στις σχέσεις αυτές, f_{ct} είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το N_r είναι η τιμή της αξονικής δύναμης που προκαλεί την πρώτη ρωγή, τα A_c , A_s είναι τα εμβαδά των διατομών του σκυροδέματος και του οπλισμού, αντίστοιχα, το E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού και το E_c είναι το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος για βραχυχρόνια φόρτιση. Η επίδραση του ερπυσμού δεν υπολογίζεται σε αυτή τη διατομή. Το A_1 είναι το εμβαδόν της μετασχηματισμένης διατομής στο στάδιο I, που συντίθεται από το A_c και το αA_s .



Σχήμα 1-1 Τάσεις σε δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα, ρηγματωμένο από αξονική δύναμη.

Πριν ακριβώς τη ρηγματώση, η διατομή βρίσκεται στο στάδιο I. Η τάση στο σκυρόδεμα είναι f_{ct} και η τάση στο χάλυβα είναι af_{ct} . Αμέσως μετά την ρωγμή, η διατομή στην θέση της ρωγμής βρίσκεται στο στάδιο II και η τάση στο χάλυβα είναι

$$\sigma_{sr} = N_r / A_s \quad (1.2)$$

Όταν η αξονική δύναμη N αποκτήσει την τιμή N_r , τότε, εμφανίζεται και η πρώτη ρωγμή στο στοιχείο. Στη θέση της ρωγμής, η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος μηδενίζεται και η ολική τάση εφελκυσμού παραλαμβάνεται από τον χάλυβα οπλισμού (στάδιο II). Η ξαφνική αύξηση της τάσης στον οπλισμό προκαλεί παραμόρφωση στο χάλυβα, που είναι μη συμβατή με την παραμόρφωση του σκυροδέματος που τον περιβάλλει και έχει ως αποτέλεσμα την διεύρυνση του εύρους ρωγμής.

Μακριά από τη ρωγμή, το σκυρόδεμα, που είναι συνδεδεμένο με τον οπλισμό, τείνει να περιορίσει την επιμήκυνση και η συνάφεια τ μεταβιβάζει ένα μέρος της εφελκυστικής δύναμης από τη ράβδο οπλισμού στο σκυρόδεμα που την παράγει. Σε μια ορισμένη απόσταση s από την πρώτη ρωγμή, η συμβατότητα των παραμορφώσεων αποκαθίσταται (στάδιο I) και η εφελκυστική αντοχή στο σκυρόδεμα αποκτά ξανά την οριακή τιμή της, με αποτέλεσμα να προκαλείται η εμφάνιση μιας δεύτερης ρωγμής.

Στη θέση της ρωγμής, η διατομή βρίσκεται στο στάδιο II. Η εφελκυστική τάση στο σκυρόδεμα είναι μηδενική και η τάση και η παραμόρφωση του χάλυβα είναι,

$$\sigma_{s2} = N / A_s, \quad (1.3)$$

$$\varepsilon_{s2} = N / E_s A_s, \quad (1.4)$$

όταν $N > N_r$. Στο μέσο μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών, η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος έχει κάποια άγνωστη τιμή μικρότερη της f_{ct} και η τάση του χάλυβα έχει τιμή μικρότερη της σ_{s2} . Έτσι η παραμόρφωση στον οπλισμό μεταβάλλεται κατά μήκος του στοιχείου. Μια μέση τιμή της θλιπτικής παραμόρφωσης είναι,

$$\varepsilon_{sm} = \Delta l / l \quad (1.5)$$

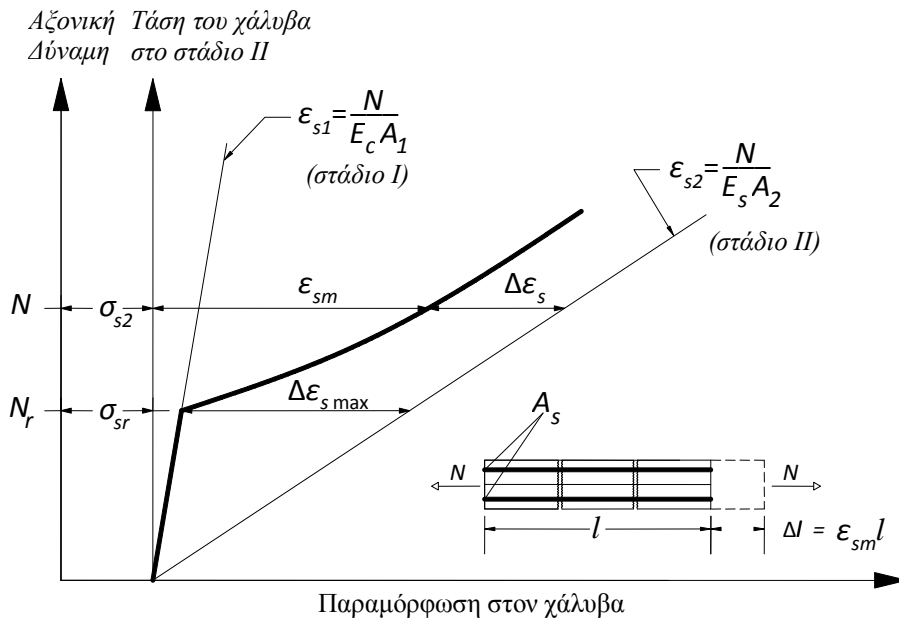
όπου l είναι το αρχικό μήκος του στοιχείου και Δl είναι η επέκταση του στοιχείου. Το σύμβολο ε_{sm} αντιπροσωπεύει μια συνολική μέση τιμή της παραμόρφωσης του ρηγματωμένου μέλους. Προφανώς, η τιμή ε_{sm} είναι μικρότερη της ε_{s2} η οποία είναι η παραμόρφωση του οπλισμού στη ρηγματωμένη διατομή. Έστω,

$$\varepsilon_{sm} = \varepsilon_{s2} - \Delta\varepsilon_s \quad (1.6)$$

όπου $\Delta\varepsilon_s$ είναι η μείωση της παραμόρφωσης του οπλισμού που προξενείται από τη συμμετοχή του σκυροδέματος στη μεταφορά εφελκυστικών τάσεων ανάμεσα στις ρωγμές. Στο Σχήμα 1-2 δείχνεται η μεταβολή της μέσης παραμόρφωσης ε_{sm} σαν συνάρτηση του αξονικού φορτίου N . Το διάγραμμα αυτό ακολουθεί μια καμπύλη που βρίσκεται μεταξύ δύο ευθείων γραμμών που αντιπροσωπεύουν τις παραμορφώσεις ε_{s1} και ε_{s2} . Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, η ε_{s1} είναι μια θεωρητική παραμόρφωση του οπλισμού, υποθέτοντας ότι το στάδιο I συνεχίζει να εφαρμόζεται, όταν $N > N_r$. Έτσι

$$\varepsilon_{s1} = \varepsilon_{c1} = \frac{N}{E_c (A_c + \alpha A_s)} = \frac{N}{E_c A_1} \quad (1.7)$$

όπου, A_1 είναι το εμβαδόν της μετασχηματισμένης διατομής τμήματος στο στάδιο I.



Σχήμα 1-2 Μεταβολή της μέσης παραμόρφωσης ε_{sm} σαν συνάρτηση του αξονικού φορτίου N

Η τιμή $\Delta\varepsilon_s$ αντιπροσωπεύει τη διαφορά μεταξύ της μέσης παραμόρφωσης του οπλισμού ε_{sm} και της παραμόρφωσης του οπλισμού στην πλήρως ρηγματωμένη διατομή. Αυτή η

διαφορά έχει μια μέγιστη τιμή $\Delta\varepsilon_{s,\max}$ στην αρχή της ρηγμάτωσης, όταν $N = N_r$. Βασιζόμενοι σε πειραματικά δεδομένα, γίνεται η υπόθεση ότι η $\Delta\varepsilon_s$ έχει μια μεταβολή που περιγράφεται από μια υπερβολή με τη σ_{s2} και μεταβάλλεται σύμφωνα με την σχέση,

$$\Delta\varepsilon_s = \Delta\varepsilon_{s,\max} \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}}. \quad (1.8)$$

Από τη γεωμετρία του Σχήματος 1-2 έχουμε:

$$\Delta\varepsilon_{s,\max} = (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1}) \frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}} \quad (1.9)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (1.8) και (1.9) στην εξίσωση (1.6), βρίσκεται μια μακροσκοπική τιμή παραμόρφωσης για ένα ρηγματωμένο δομικό στοιχείο, η οποία είναι, επίσης, και η μέση παραμόρφωση στον χάλυβα:

$$\varepsilon_{sm} = (1 - \zeta) \varepsilon_{s1} + \zeta \varepsilon_{s2} \quad (1.10)$$

όπου ζ μία αδιάστατη σταθερά, με τιμές μεταξύ 0 και 1, η οποία αντιπροσωπεύει την έκταση της ρηγμάτωσης. Ισχύει $\zeta = 0$ για αρηγμάτωση διατομή ($N < N_r$), και $0 < \zeta < 1$ για ρηγματωμένη διατομή. Η τιμή του ζ δίνεται από την εξίσωση

$$\zeta = 1 - \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}} \right)^2, \quad \text{όταν } (\sigma_{s2} > \sigma_{sr}) \quad (1.11)$$

ή

$$\zeta = 1 - \left(\frac{N_r}{N} \right)^2, \quad \text{όταν } (N > N_r), \quad (1.12)$$

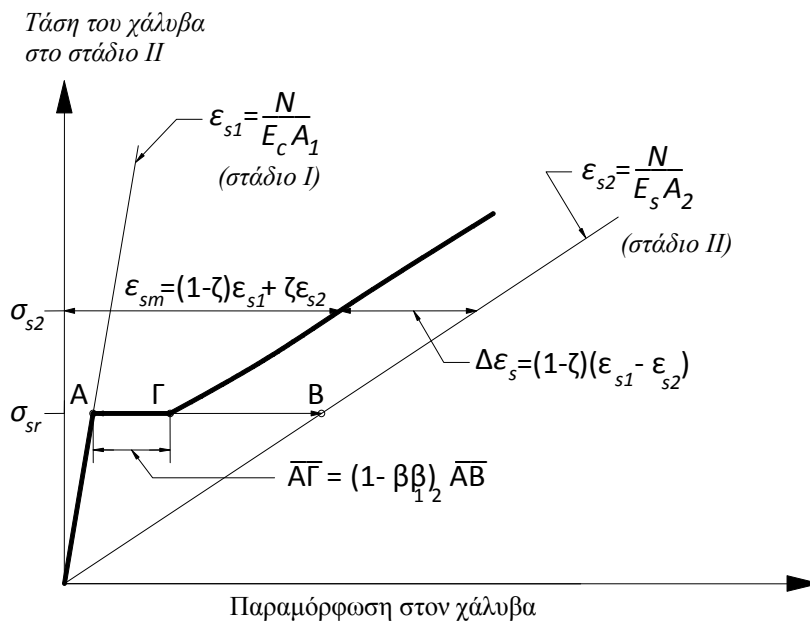
Στην εξίσωση (1.10), η μέση παραμόρφωση του χάλυβα προσδιορίζεται μέσω παρεμβολής μεταξύ των τιμών ε_{s1} και ε_{s2} στα στάδια I και II. Ο συντελεστής παρεμβολής ζ εξαρτάται από το λόγο των παραμορφώσεων του χάλυβα σ_{sr} και σ_{s2} σε μία πλήρως ρηγματωμένη διατομή, όταν οι εφαρμοζόμενες δυνάμεις είναι N και N_r , αντίστοιχα. Η χρήση αυτής της εξίσωσης, θα επεκταθεί στη συνέχεια, για να εκφραστεί σε μέλη υπό καταπόνηση σε κάμψη.

Για να λάβουμε υπόψη τις ιδιότητες της συνάφειας στις ράβδους οπλισμού και την επίδραση της χρονικής διάρκειας ή της επανάληψης της φόρτισης, ο Ευρωκώδικας 2-1991 (EC2-91) εισάγει τις σταθερές β_1 και β_2 στην εξίσωση (1.11) ως εξής

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}} \right)^2, \quad \text{όταν } (\sigma_{s2} \geq \sigma_{sr}), \quad (1.13)$$

όπου $\beta_1 = 1$ και 0.5 για ράβδους υψηλής συνάφειας ή για ράβδους χωρίς νευρώσεις, αντίστοιχα. $\beta_2 = 1$ και 0.5 , αντίστοιχα, για πρώτη φόρτιση και φορτία που εφαρμόζονται σε ένα μόνιμο τρόπο ή για μεγάλο αριθμό κύκλων φόρτισης.

Με αυτήν την τροποποίηση το γράφημα της ε_{sm} , (Σχήμα 1-2) θα έχει ένα οριζόντιο τμήμα στο ρηγματωμένο στάδιο, όπως δείχνεται στο Σχήμα 1-3 (γραμμή ΑΓ).



ΣΧΗΜΑ 1.3

Σχήμα 1-3 Μέση παραμόρφωση του οπλισμού σε ένα ρηγματωμένο μέλος.

Ο δεύτερος όρος της εξίσωσης (1.10), $(\zeta \varepsilon_{s2})$, αντιπροσωπεύει την συμπληρωματική παραμόρφωση του χάλυβα συγκρινόμενη με την παραμόρφωση του σκυροδέματος. Έτσι, το μέσο εύρος της ρωγμής θα είναι,

$$w_m = s_m \zeta \varepsilon_{s2} \quad (1.14)$$

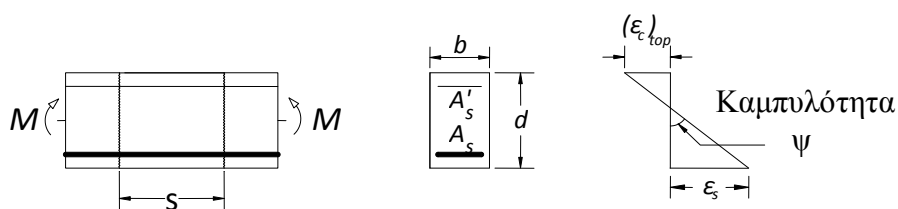
όπου s_m είναι η μέση απόσταση μεταξύ των ρωγμών. Η απόσταση αυτή εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως η συνάφεια, το μέγεθος της επικάλυψης του οπλισμού και το σχήμα της διανομής των εφελκυστικών τάσεων πάνω στη διατομή. Εμπειρικές εξισώσεις που βασίζονται σε πειράματα χρησιμοποιούνται γενικά για να προβλέψουν την τιμή s_m .

1.4 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΚΑΜΨΗΣ

Ένα δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα, το οποίο υπόκειται σε κάμψη (Σχήμα 1-4), θα παραμένει αρηγμάτωτο, εάν η ροπή κάμψης είναι μικρότερη από

$$M_r = W_1 f_{ct}, \quad (1.15)$$

όπου M_r είναι η τιμή της ροπής κάμψης η οποία παράγει την πρώτη ρωγμή. Το W_1 είναι το μέτρο διατομής στο στάδιο I. Έτσι το W_1 υπολογίζεται για το εμβαδό της διατομής του σκυροδέματος στο τμήμα προσθέτοντας α φορές το τμήμα του εμβαδού του χάλυβα. Το f_{ct} είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε κάμψη (αντοχή διάρρηξης).



Σχήμα 1-4 Δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα σε κάμψη.

Για ροπή κάμψης $M > M_r$, το στοιχείο ρηγματώνεται και η εφελκυστική τάση κατά μήκος του οπλισμού μεταβάλλεται από μια μέγιστη τιμή στη θέση της ρωγμής σε μια

ελάχιστη τιμή στο μέσο της απόστασης μεταξύ δύο ρωγμών. Υποθέτοντας πως το σκυρόδεμα μεταξύ των ρωγμών έχει την ίδια επίδραση πάνω στη μέση παραμόρφωση του χάλυβα, όπως στην περίπτωση της αξονικής δύναμης, η εξίσωση (1.10) μπορεί να υιοθετηθεί και σε αυτή την περίπτωση. Έτσι

$$\varepsilon_{sm} = (1 - \zeta) \varepsilon_{s1} + \zeta \varepsilon_{s2} \quad (1.16)$$

όπου

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}} \right)^2 = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_r}{M} \right)^2 \quad (1.17)$$

Στην παραπάνω εξίσωση, τα σ_{sr} και σ_{s2} είναι οι τάσεις του χάλυβα, που υπολογίσθηκαν για τις ροπές M_r και M , αντίστοιχα, με την υπόθεση ότι η διατομή είναι πλήρως ρηγματωμένη. Για απόσταση μεταξύ των ρωγμών ίση με s_m , το εύρος μιας ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (1.14),

$$w_m = s_m \zeta \varepsilon_{s2}.$$

Στη θέση μιας αρηγμάτωτης ή ρηγματωμένης διατομής, η καμπυλότητα μπορεί να εκφραστεί ως προς τη ροπή κάμψης και την καμπτική ακαμψία ή με όρους παραμόρφωσης με τη σχέση

$$\psi = \frac{M}{EI} = \frac{\varepsilon_s - (\varepsilon_c)_{top}}{d} \quad (1.18)$$

όπου ψ είναι η καμπυλότητα. Το E είναι το μέτρο ελαστικότητας, το I η ροπή αδράνειας, το ε_c είναι η παραμόρφωση του χάλυβα οπλισμού, το $(\varepsilon_c)_{top}$ είναι η παραμόρφωση σε μια ακραία ίνα της θλιπτικής ζώνης, και τέλος, το d είναι η απόσταση του χάλυβα από την ακραία θλιβόμενη ίνα της διατομής (Σχήμα 1-4). Στο σημείο αυτό γίνεται η υπόθεση, ότι η ρηγμάτωση επιδρά πάνω στην καμπυλότητα με τον ίδιο τρόπο που επιδρά πάνω στην παραμόρφωση η αξονική ένταση, συνεπώς, η μέση καμπυλότητα μπορεί να εκφραστεί με τη σχέση

$$\psi_m = (1 - \zeta) \psi_1 + \zeta \psi_2 \quad (1.19)$$

όπου ψ_1, ψ_2 είναι οι καμπυλότητες που αντιστοιχούν για μια δεδομένη ροπή M , με την υπόθεση πως η διατομή βρίσκεται στο στάδιο I και II, αντίστοιχα.

Έτσι, ο συντελεστής ζ , χρησιμοποιείται για να παρεμβληθεί ανάμεσα στις καμπυλότητες των σταδίων I και II, προκειμένου να αποκτηθεί μια μέση καμπυλότητα (Σχήμα 1-5). Το ρηγματωμένο δομικό στοιχείο έχει μια μέση καμπτική ακαμψία, που δίνεται από την σχέση

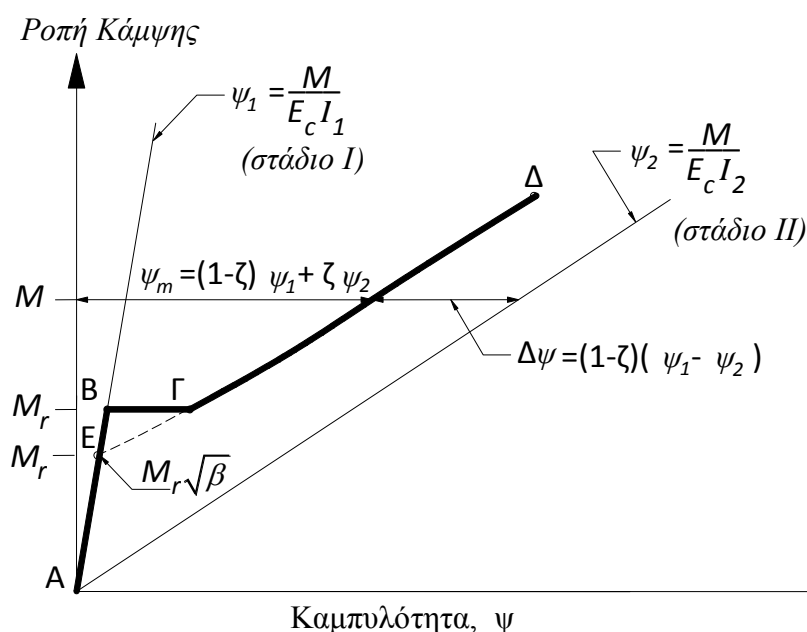
$$(EI)_m = \frac{M}{\psi_m} \quad (1.20)$$

Οι καμπυλότητες ψ_1, ψ_2 είναι,

$$\psi_1 = \frac{M}{E_c I_1} \quad (1.21)$$

$$\psi_2 = \frac{M}{E_c I_2} \quad (1.22)$$

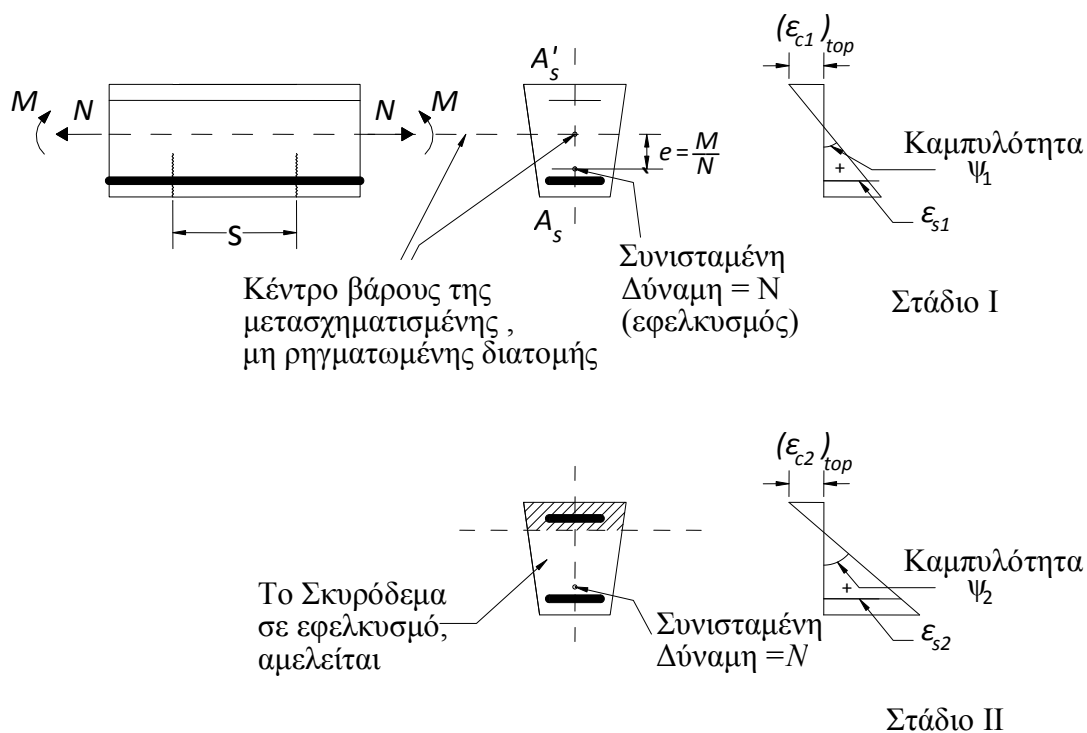
όπου I_1, I_2 είναι οι ροπές αδράνειας της μετασχηματισμένης μη ρηγματωμένης διατομής, και της πλήρως ρηγματωμένης διατομής γύρω από έναν άξονα που διέρχεται από το κέντρο βάρους της ισοδύναμης διατομής, αντίστοιχα. Το $E_c (= E_{ref})$ είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, που χρησιμοποιείται σαν μέτρο αναφοράς για τον υπολογισμό των I_1, I_2 .



Σχήμα 1-5 Σχέση ροπής κάμψης και της καμπυλότητας σε ένα ρηγματωμένο μέλος

1.5 ΚΑΜΠΥΛΟΤΗΤΑ ΛΟΓΩ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΚΑΜΠΙΤΙΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ

Το Σχήμα 1-6 δείχνει ένα στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα το οποίο καταπονείται από καμπτική ροπή M και από αξονική δύναμη N στο κέντρο βάρους της μετασχηματισμένης, μη ρηγματωμένης διατομής. Οι τιμές των M, N θεωρούνται τέτοιου μεγέθους, ικανού να προκαλέσει ρηγμάτωση στην κάτω ακραία ίνα.



Σχήμα 1-6 Καμπυλότητα λόγω έκκεντρης δύναμης σε μια διατομή δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα στα στάδια I και II

Οι εξισώσεις του Κεφαλαίου 1.4, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η μέση παραμόρφωση του χάλυβα και η μέση καμπυλότητα ενός ρηγματωμένου μέλους που καταπονείται από τις M και N . Η εκκεντρότητα της αξονικής δύναμης είναι,

$$e = M / N \quad (1.23)$$

Η υπόθεση που γίνεται τώρα είναι η εξής: η αξονική δύναμη N είναι θετική όταν προκαλεί εφελκυσμό, και η ροπή κάμψης M είναι θετική, όταν προκαλεί εφελκυσμό

στην κάτω ακραία ίνα. Έτσι η εκκεντρότητα e , θα είναι θετική όταν η συνισταμένη των M, N βρίσκεται κάτω από το κέντρο βάρους της μετασχηματισμένης, μη ρηγματωμένης διατομής, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-6.

Με κάποια αλλαγή της εκκεντρότητας, μπορούμε να βρούμε τις τιμές των N_r και της αντίστοιχης M_r που προκαλεί στην κάτω ακραία ίνα εφελκυστική τάση f_{ct} , η οποία είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Οι τιμές των N_r και M_r , υπολογίζονται από τις εξισώσεις,

$$N_r = f_{ct} \left(\frac{1}{A} + \frac{e}{W_{bot}} \right)_1^{-1}, \quad (1.24)$$

$$M_r = eN_r, \quad (1.25)$$

όπου A_1 και W_1 είναι το εμβαδό και το μέτρο διατομής, αντίστοιχα.

Η εξίσωση (1.24), φυσικά, δεν ισχύει όταν η κάτω ίνα θλίβεται. Αυτή η περίπτωση συμβαίνει όταν η συνισταμένη δύναμη στην διατομή είναι εφελκυστική και το σημείο εφαρμογής της βρίσκεται πάνω από το άνω άκρο του πυρήνα της μετασχηματισμένης, μη ρηγματωμένης διατομής, $e \leq -(W_{bot} / A)_1$. Επίσης, αυτό συμβαίνει, όταν η συνισταμένη δύναμη είναι θλιπτική και το σημείο εφαρμογής της βρίσκεται εντός του πυρήνα, $(W_{top} / A)_1 \leq e \leq -(W_{bot} / A)_1$, όπου W_{bot} και W_{top} είναι το μέτρο διατομής της κάτω και άνω ίνας, αντίστοιχα, και ο δείκτης 1 αντιστοιχεί στην μετασχηματισμένη, μη ρηγματωμένη διατομή.

Όταν $N > N_r$ και $M > M_r$, το στοιχείο ρηγματώνεται και η μέση παραμόρφωση του οπλισμού υπολογίζεται από την σχέση,

$$\varepsilon_m = (1 - \zeta) \varepsilon_1 + \zeta \varepsilon_2, \quad (1.26)$$

όπου

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}} \right)^2 \quad (1.27)$$

ή

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{M_r}{M} \right)^2 \quad (1.28)$$

ή

$$\zeta = 1 - \beta_1 \beta_2 \left(\frac{N_r}{N} \right)^2 \quad (1.29)$$

όπου,

- ε_{s1} και ε_{s2} είναι οι παραμορφώσεις του κάτω χάλυβα που προκαλείται από τον συνδυασμό καμπτικής ροπής M και αξονικής δύναμης N , στα στάδια I και II, αντίστοιχα.
- σ_{s2} είναι η τάση του κάτω χάλυβα, που προκαλείται από τις M και N σε μια διατομή στο στάδιο I.
- σ_{sr} , είναι η τάση του κάτω χάλυβα, που προκαλείται από τις M_r και N_r σε μια διατομή στο στάδιο II.

Πρέπει να σημειωθεί, ότι σε μία πλήρως ρηγματωμένη διατομή, η θέση του ουδέτερου άξονα, εξαρτάται από την εκκεντρότητα $e = M / N$, και όχι από κάθε τιμή των M και N χωριστά. Επειδή η εκκεντρότητα παραμένει σταθερή, δηλαδή, $e = M / N = M_r / N_r$, τότε ισχύει

$$\frac{\sigma_{sr}}{\sigma_{s2}} = \frac{M_r}{M} = \frac{N_r}{N} \quad (1.30)$$

Εάν η απόσταση μεταξύ των ρωγμών είναι s_m , το εύρος ρωγμής θα είναι

$$w_m = s_m \zeta \varepsilon_{s2} \quad (1.31)$$

Η μέση καμπυλότητα μιας ρηγματωμένης διατομής είναι

$$\psi_m = (1 - \zeta) \psi_1 + \zeta \psi_2 \quad (1.32)$$

όπου ψ_1, ψ_2 είναι οι καμπυλότητες που αντιστοιχούν σε μια δεδομένη ροπή M και μιας δεδομένη αξονική δύναμη N , με την υπόθεση πως η διατομή βρίσκεται στο στάδιο I και II αντίστοιχα.

Κεφάλαιο 2

ΡΗΓΜΑΤΩΣΗ ΔΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΑΠΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ρωγμές σε κατασκευές από οπλισμένο και σε προεντεταμένο σκυρόδεμα είναι αναπόφευκτο γεγονός αλλά, με επαρκή και κατάλληλη λεπτομέρεια όπλισης, είναι δυνατόν να περιορισθεί το εύρος των ρωγμών σε μικρές τιμές, έτσι ώστε η εμφάνιση και η λειτουργία των κατασκευών να μην καθίσταται προβληματική. Η ακριβής πρόβλεψη του εύρους ρωγμής δεν είναι δυνατή. Για το προσδιορισμό του εύρους ρωγμής, έχουν παρουσιαστεί πολλές εξισώσεις και μέθοδοι, αλλά οι περισσότερες από αυτές είναι απλοί εμπειρικοί κανόνες που προέρχονται από παρατηρήσεις και δοκιμές. Επιπλέον, δεν υπάρχει συμφωνία για το ποιο εύρος ρωγμής, που θα πρέπει να είναι αποδεκτό για τα διάφορα είδη κατασκευών. Το κεφάλαιο αυτό συζητά τις κύριες παραμέτρους, που επηρεάζουν το εύρος ρωγμών και παρέχει εξισώσεις, που χρησιμοποιούνται σε συνήθεις περιπτώσεις.

Τα εξωτερικά φορτία, που εφαρμόζονται σε κατασκευές από σκυρόδεμα, προκαλούν ρωγμές όταν η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος ξεπεραστεί. Όταν ο οπλισμός σχεδιάζεται για να παρέχει συνολική αντοχή, σύμφωνα με κάποιο από τους υπάρχοντες κανονισμούς, οι ρωγμές που εισάγονται από τα φορτία, σπάνια υπερβαίνουν το εύρος των 0.5 mm. Ρωγμές μεγαλύτερου εύρους εμφανίζονται μόνο όταν οι κατασκευές καταπονούνται με φορτία μεγαλύτερα από τα φορτία σχεδιασμού, ή, όταν υπάρξει από στατικό λάθος διαρροή του οπλισμού στα φορτία λειτουργίας.

Επίσης, εσωτερικές δυνάμεις και τάσεις, αναπτύσσονται εξαιτίας θερμοκρασίας, συρρίκνωσης και καθιζήσεων των στηρίξεων, μόνο όταν οι μετακινήσεις λόγω αυτών των επιδράσεων περιορίζονται. Το μέγεθος των δυνάμεων, που δημιουργούνται από τον περιορισμό των μετακινήσεων, εξαρτάται από την ακαμψία των μελών, και έτσι, οι δυνάμεις αυτές είναι αρκετά μικρότερες σε μια ρηγματωμένη κατασκευή απ'ότι σε σχέση με μια αρηγμάτωτη. Όταν υπάρχει επαρκής οπλισμός, οι ρωγμές που προκαλούνται από τον περιορισμό των μετακινήσεων είναι γενικά μικρότερου εύρους. Ο αριθμός των ρωγμών αυξάνει με την αύξηση του περιορισμού των μετακινήσεων. Δεν υπάρχει μια γενικώς αποδεκτή μέθοδος για τον σχεδιασμό του οπλισμού, που είναι αναγκαίος για να ελέγχει τη ρηγμάτωση που προξενείται από τον περιορισμό των μετακινήσεων. Μία προσέγγιση είναι να παρέχουμε αρκετό οπλισμό, σε όλες τις εφελκόμενες ζώνες με ένα μικρό λόγο

$$\rho_{\min} = \frac{f_{ct}}{f_y} \quad (2.1)$$

όπου f_{ct} η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και f_y είναι το όριο διαρροής του χάλυβα. Η εξίσωση αυτή βασίζεται στην υπόθεση ότι η εφελκυστική δύναμη που μεταφέρεται στο σκυρόδεμα, αμέσως πριν την ρηγμάτωση, μεταβιβάζεται στον οπλισμό προκαλώντας τάσεις, οι οποίες δεν ξεπερνούν το όριο διαρροής του. Με $f_{ct} = 2 \text{ MPa}$ και $f_{sy} = 400 \text{ MPa}$, η εξίσωση (2.1) δίνει $\rho_{\min} = 0.005$.

Ρηγμάτωση μπορεί να συμβεί και για άλλους λόγους, εκτός από τους παραπάνω. Αρκετά πολύ μεγαλύτερες ρωγμές σε εύρος μπορούν να εμφανιστούν τις πρώτες ώρες μετά την σκυροδέτηση, όσο αυτό βρίσκεται σε ρευστή μορφή. Οι ρωγμές αυτές, δημιουργούνται από τη συρρίκνωση, ή από την καθίζηση του ρευστού σκυροδέματος στα καλούπια. Ρωγμές εμφανίζονται όταν οι μετακινήσεις στο σκυρόδεμα περιορίζονται από τον οπλισμό ή από τα καλούπια. Η ρηγμάτωση αυτή δεν μπορεί να ελεγχθεί με κατάλληλη όπλιση. Μπορεί να ελεγχθεί μόνο με προσοχή στη μίξη του σκυροδέματος και στην αποφυγή συνθηκών, οι οποίες προκαλούν ταχεία ξήρανση κατά την διάρκεια της πρώτης ώρας σκυροδέτησης. Αυτό ο τύπος ρωγμών δεν θα συζητηθεί παραπέρα.

Τα επιτρεπτά εύρη ρωγμών, κυμαίνονται από κώδικα σε κώδικα. Οι αποδεκτές τιμές κυμαίνονται από 0.1 και 0.4mm. Η μικρότερη τιμή ενδείκνυται για κατασκευές κάτω από

νερό και η μεγαλύτερη τιμή για κατασκευές σε ξηρό αέρα, ή με προστατευτικές μεμβράνες.

Το εύρος των ρωγμών εξαρτάται, κυρίως από την τάση στο χάλυβα μετά τη ρηγμάτωση. Άλλοι παράμετροι, που επηρεάζουν το εύρος των ρωγμών είναι το πάχος επικάλυψης του οπλισμού, η διάμετρος των ράβδων οπλισμού, η απόσταση μεταξύ τους και ο τρόπος που τοποθετούνται σε μια διατομή, οι ιδιότητες συνάφειας των ράβδων, η αντοχή του σκυροδέματος και η διανομή των παραμορφώσεων. Ρωγμές που προέρχονται από τα εξωτερικά φορτία, αντίθετα με τις ρωγμές που προέρχονται από περιορισμό μετακινήσεων, αυξάνουν σε εύρος με τη διάρκεια της φόρτισης.

Μια σχέση για τον προσδιορισμό του εύρους της ρωγμής είναι η παρακάτω εξίσωση. Η εξίσωση αυτή έχει εξαχθεί για το μέσο εύρος ρωγμής, που έχει διεύθυνση κάθετη στον κύριο οπλισμό και εμφανίζεται σε μέλη στα οποία εφαρμόζεται αξονική δύναμη, ροπή κάμψης ή και τα δύο μαζί.

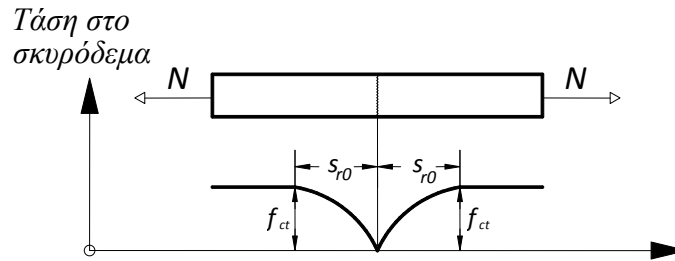
$$w_m = s_{rm} \zeta \varepsilon_{s2} \quad (2.2)$$

Στη σχέση αυτή, το s_{rm} είναι η απόσταση μεταξύ των ρωγμών, που θα συζητηθεί παρακάτω, ε_{s2} είναι η παραμόρφωση του χάλυβα υπολογισμένη στη μετασχηματισμένη διατομή, στην οποία η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος δεν λαμβάνεται υπόψη (στάδιο II). Το ζ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής που παίρνει τιμές μεταξύ 0 και 1. Ο συντελεστής αυτός αντιπροσωπεύει την επίδραση της συνεισφοράς του σκυροδέματος, που βρίσκεται στην εφελκυστική ζώνη, στην ακαμψία του στοιχείου, που είναι γνωστή ως εφελκυστική ακαμψία. Το γινόμενο $\zeta \varepsilon_{s2}$ αντιπροσωπεύει τη μέση επιπρόσθετη παραμόρφωση του οπλισμού σε σχέση με το περιβάλλον σκυρόδεμα.

Η τιμή του συντελεστή ζ εξαρτάται από το λόγο N_r / N ή M_r / M , όπου N, M είναι οι τιμές της αξονικής δύναμης ή της ροπής κάμψης της διατομής. Ο δείκτης r στα N και M δηλώνει τις τιμές των μεγεθών αυτών, όταν η εφελκυστική τάση στην ακραία ίνα φθάσει την τιμή f_{ct} .

2.2 ΑΠΟΣΤΑΣΗ ΡΩΓΜΩΝ

Παρακάτω, θα παρουσιαστεί μία ημι-εμπειρική σχέση για την πρόβλεψη της απόστασης μεταξύ των εγκάρσιων ρωγμών σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος, που καταπονούνται από αξονική δύναμη ή καμπτική ροπή.



Σχήμα 2-1 Τάση στο σκυρόδεμα μετά την εμφάνιση της πρώτης ρωγμής σε δομικό στοιχείο υπό την επίδραση αξονικής δύναμης.

Το Σχήμα 2-1 δείχνει ένα δομικό στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα που καταπονείται από μία αξονική δύναμη, που έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να μπορεί να προκαλέσει την πρώτη ρωγμή. Στη ρηγματωμένη διατομή, η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος είναι μηδενική (στάδιο II) και η αξονική δύναμη παραλαμβάνεται πλήρως από τον χάλυβα. Σε κάποια απόσταση s_{r0} από τη ρωγμή, η διατομή είναι αρηγμάτωτη (στάδιο I) και η εφελκυστική τάση του σκυροδέματος είναι f_{ct} , που είναι η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Η δύναμη στο χάλυβα σε αυτή τη διατομή είναι ένα μικρό ποσοστό της συνολικής αξονικής δύναμης. Το υπόλοιπο τμήμα της αξονικής δύναμης μεταβιβάζεται στο σκυρόδεμα μέσω των τάσεων συνάφειας που αναπτύσσονται πάνω στο μήκος s_{r0} . Υποθέτοντας ότι η f_{bm} είναι η μέση τιμή της τάσης συνάφειας, μπορούμε να γράψουμε,

$$A_c f_{ct} = s_{r0} f_{bm} \left(\frac{4A_s}{d_b} \right) \quad (2.3)$$

όπου A_c και A_s είναι το εμβαδό της διατομής του σκυροδέματος και του χάλυβα αντίστοιχα, η ποσότητα $\frac{4A_s}{d_b}$ είναι το άθροισμα των παραμέτρων των ράβδων οπλισμού,

υποθέτοντας πως οι ράβδοι έχουν την ίδια διάμετρο d_b . Για ένα δεδομένο τύπο οπλισμού, η τάση συνάφειας f_{bm} μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ανάλογη της f_{ct} . Έτσι μπορούμε να έχουμε,

$$\kappa_1 = \frac{f_{ct}}{f_{bm}} \quad (2.4)$$

όπου κ_1 είναι μια αδιάστατη σταθερά που εξαρτάται από τις ιδιότητες συνάφειας των ράβδων οπλισμού.

Αντικαθιστώντας την (2.4) στην (2.3), έχουμε

$$s_{r0} = \kappa_1 \frac{d_b}{4\rho} \quad (2.5)$$

Το s_{r0} αντιπροσωπεύει την απόσταση μεταξύ της πρώτης ρωγμής και της διατομής, στην οποία η τάση στο σκυρόδεμα φτάνει την τιμή f_{ct} . Παραπέρα μικρή αύξηση της εφαρμοσμένης δύναμης έχει ως αποτέλεσμα την εμφάνιση δεύτερης και τρίτης ρωγμής, σε απόσταση s_{r0} εκατέρωθεν της πρώτης ρωγμής κ.ο.κ. Αυτό συνεχίζεται έως την σταθεροποίηση του τύπου ρηγμάτωσης. Περαιτέρω αύξηση του φορτίου, δεν προκαλεί νέες ρωγμές.

Περιορισμός, ο οποίος συμβαίνει όταν ένα μέλος με πακτωμένα άκρα προσπαθεί να επιβραχυνθεί εξαιτίας της συρρίκνωσης ή πτώσης της θερμοκρασίας, μπορεί να εμφανίσει μόνο λίγες ρωγμές, έτσι ώστε η σταθεροποίηση του τύπου ρηγμάτωσης συνήθως να μην επιτυγχάνεται. Αυτό συμβαίνει, επειδή η ρηγμάτωση συνδέεται με την μείωση της ακαμψίας και έτσι, στην περίπτωση αυτή, έχουμε ανακούφιση των καταναγκαστικών δυνάμεων.

Πειράματα, δείχνουν, ότι η απόσταση των ρωγμών επηρεάζεται και από άλλες παραμέτρους στις οποίες δεν συμπεριλαμβάνονται στην εξίσωση (2.5), όπως η επικάλυψη του σκυροδέματος και η απόσταση των ράβδων οπλισμού. Για το λόγο αυτό, η εξίσωση (2.5), τροποποιείται εμπειρικά στην πράξη.

Ο EC2-91 και ο MC-90 δίνουν εξισώσεις για το μέγιστο χαρακτηριστικό εύρος ρωγμής w_k . Οι δύο κώδικες, θεωρούν την τιμή $w_k = 0.30 \text{ mm}$ για το χαρακτηριστικό εύρος ρωγμής υπό οιονεί μόνιμα φορτία (quasi-permanent), ως ικανοποιητική για δομικά

στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα (χωρίς προένταση). Το όριο μπορεί να διευρυνθεί, εάν οι περιβαλλοντικές συνθήκες είναι τέτοιες, ώστε το εύρος ρωγμής να μην έχει αντίκτυπο στην αντοχή (για παράδειγμα το εσωτερικό κτιρίων γραφείων). Ένα ελάχιστο όριο της τιμής w_k μπορεί να συγκεκριμενοποιηθεί σε συμφωνία με τον πελάτη, σε ειδικές περιπτώσεις, όταν η κατασκευή πρόκειται να εκτεθεί σε διαβρωτικό περιβάλλον. Οι δύο κώδικες διαφέρουν ως προς την εξίσωση που χρησιμοποιούν για τον υπολογισμό του w_k . Ομοίως με τους παραπάνω κώδικες, ο ACI 318, χρησιμοποιεί μια ημι-εμπειρική σχέση για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής, και συγκρίνει την τιμή αυτή με τις επιτρεπόμενες τιμές που ορίζει, για διάφορες περιβαλλοντολογικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το δομικό στοιχείο.

2.3 ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 2 (EC2)

Ο (EC2-91) χρησιμοποιεί την εξίσωση (2.2) για να υπολογίσει το μέσο εύρος ρωγμής, w_m , αλλά ο κανονισμός ορίζει και τη χαρακτηριστική τιμή του μέγιστου εύρους ρωγμής, με τη σχέση,

$$w_k = \beta w_m \quad (2.6)$$

Για ρωγμές που προκαλούνται από φορτία, οι τιμές του συντελεστή β στην παραπάνω εξίσωση, παίρνει τις τιμές $\beta = 1.7$ για διατομές, όπου η ελάχιστη διάσταση ξεπερνά τα 800mm και $\beta = 1.3$ για διατομές, όπου η ελάχιστη διάσταση είναι μικρότερη των 300mm. Για τις ενδιάμεσες τιμές, γίνεται παρεμβολή.

Σύμφωνα με τον EC2-91, η μέση απόσταση των ρωγμών s_m που μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση (2.2) είναι,

$$s_m = 50 + \kappa_1 \kappa_2 \frac{d_b}{4\rho_r} \quad (2.7)$$

όπου,

d_b , είναι η διάμετρος των ράβδων οπλισμού σε mm,

κ_1 , είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από την ποιότητα της συνάφειας. $\kappa_1 = 0.8$ για ράβδους υψηλής συνάφειας και $\kappa_1 = 1.6$ για ράβδους χωρίς νευρώσεις. Όταν η ρηγμάτωση οφείλεται σε περιορισμούς ή από εσωτερική επιβαλλόμενη παραμόρφωση, για παράδειγμα, περιορισμό συρρίκνωσης, η σταθερά κ_1 πρέπει να αντικατασταθεί με την τιμή $0.8\kappa_1$. Ο πολλαπλασιαστής 0.8 είναι γενικά καλό να χρησιμοποιείται. Όμως για ορθογωνική διατομή με ύψος h , ο πολλαπλασιαστής πρέπει να είναι ίσος με 0.8 για $h \leq 3m$ και 0.5 για $h \geq 8m$.

κ_2 , είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το σχήμα των παραμορφώσεων και έχει τις τιμές $\kappa_2 = 0.5$ στην περίπτωση καθαρής κάμψης, χωρίς αξονική δύναμη, και $\kappa_2 = 1$ στην περίπτωση καθαρού εφελκυσμού. Στην έκκεντρη περίπτωση είναι,

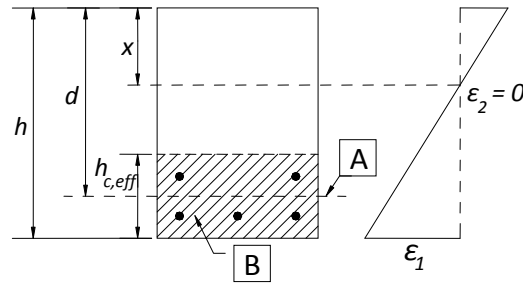
$$\kappa_2 = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2\varepsilon_1}, \quad (2.8)$$

όπου ε_1 η μεγαλύτερη τιμή και ε_2 η μικρότερη, της εφελκυστικής παραμόρφωσης, εκτιμώντας στη βάση μιας πλήρως ρηγματωμένης διατομής, στα άνω και κάτω όρια της ενεργής εφελκυστικής επιφάνειας, $A_{c,eff}$ όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-2.

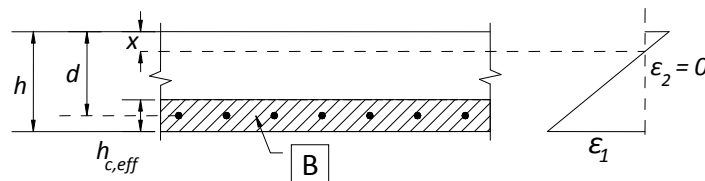
Ο λόγος οπλισμού ρ_r ορίζεται ως,

$$\rho_r = \frac{A_s}{A_{c,eff}} \quad (2.9)$$

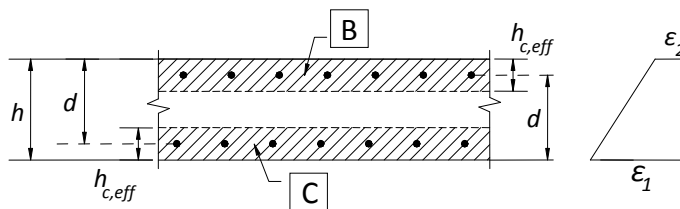
Η ενεργή εφελκυστική επιφάνεια, είναι γενικά ίση με 2.5 φορές την απόσταση της εφελκυστικής παρειάς της διατομής, μέχρι το κέντρο βάρους του (Σχήμα 2-2). Το ύψος όμως της ενεργής επιφάνειας, δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $(h-c)/3$, όπου h είναι το ύψος της διατομής και c το πάχος της θλιβόμενης ζώνης.



- α) Δοκός
- A Στάθμη του Κ.Β. του οπλισμού
 - B Ενεργός εφελκόμενη ζώνη, $A_{c,eff}$



- β) Πλάκα
- B Ενεργός εφελκόμενη ζώνη, $A_{c,eff}$



γ) Στοιχείο υπό εφελκισμό

- B Ενεργός εφελκόμενη ζώνη για την άνω επιφάνεια, $A_{ct,eff}$
- C Ενεργός εφελκόμενη ζώνη για την κάτω επιφάνεια, $A_{cb,eff}$

Σχήμα 2-2 Ενεργός Επιφάνεια $A_{c,eff}$ (τυπικές περιπτώσεις)

2.4 CEB-FIP 1990 (MC-90)

Ο MC-90 δίνει την παρακάτω εξίσωση για τον υπολογισμό της τιμής σχεδιασμού του εύρους ρωγμής,

$$w_k = l_{s,\max} (\varepsilon_{s2} - \beta \varepsilon_{sr2} - \varepsilon_{cs}) \quad (2.10)$$

όπου,

ε_{cs} , είναι η ελεύθερη συρρίκνωση του σκυροδέματος, που έχει συνήθως αρνητική τιμή,

ε_{sr2} , είναι η παραμόρφωση του χάλυβα στο σημείο ρωγμής, υπό την επίδραση δύναμης που προκαλεί τάση ίση με $f_{ctm}(t)$ στην $A_{c,eff}$ και ισχύει,

$$\varepsilon_{sr2} = \frac{f_{ctm}(t)}{\rho_r E_s} (1 + \alpha \rho_r) \quad (2.11)$$

$f_{ctm}(t)$, είναι η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής την χρονική στιγμή t στην οποία συμβαίνει η ρωγμή.

$$\alpha = E_s / E_c(t) \quad (2.12)$$

ρ_r και $A_{c,eff}$ όπως αυτά ορίζονται από την εξίσωση (2.9) και το Σχήμα 2-2.

ε_{s2} , είναι η παραμόρφωση του χάλυβα στο σημείο της ρωγμής

$l_{s,\max}$, είναι το μήκος πάνω στο οποίο γίνεται η ολίσθηση μεταξύ του χάλυβα και του σκυροδέματος. Αυτό το μήκος δίνεται από την εξίσωση (2.13) ή την (2.14) για σταθεροποιημένη ρηγμάτωση ή απλή μονή ρωγμή αντίστοιχα.

$$l_{s,\max} = \frac{d_b}{3.6 \rho_r} \quad (2.13)$$

$$l_{s,\max} = \frac{d_b}{2 \tau_{bk} (1 + \alpha \rho_r)} \quad (2.14)$$

d_b , είναι η διάμετρος της ράβδου οπλισμού, σ_{s2} , είναι η τάση του χάλυβα στη ρωγμή,

τ_{bk} , είναι η τάση συνάφειας και δίνεται από τον Πίνακα 2.1 (υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούνται ράβδοι με νευρώσεις)

β , είναι ένας εμπειρικός συντελεστής, ο οποίος εκφράζει τη μέση παραμόρφωση στο $l_{s,\max}$. Η τιμή του β δίνεται από τον Πίνακα 2-1, υποθέτοντας ότι χρησιμοποιούνται ράβδοι με νευρώσεις.

Πίνακας 2-1 Τιμές των β , τ_{bk} , για χρήση στις εξισώσεις (2.10) και (2.14)

	Απλή, Μονή Ρωγμή		Σταθεροποιημένη ρηγμάτωση	
	β	τ_{bk}	β	τ_{bk}
Μικρής διάρκειας ή Απότομα φορτία	0.6	$1.8 f_{ctm}(t)$	0.6	$1.8 f_{ctm}(t)$
Μεγάλης διάρκειας ή επαναλαμβανόμενα φορτία	0.6	$1.35 f_{ctm}(t)$	0.38	$1.8 f_{ctm}(t)$

2.5 ACI 318-11

Ο Αμερικάνικος κανονισμός ACI 318-11 ελέγχει την καμπτική ρηγμάτωση περιορίζοντας την τάση στον χάλυβα, σε μια ρηγματωμένη διατομή λόγω των φορτίων λειτουργίας, στο 60% της τάσης διαρροής του χάλυβα. Ο κανονισμός, χρησιμοποιεί την έκφραση Gergely-Lutz, η οποία είναι αποτέλεσμα στατιστικής μελέτης, για να υπολογίσει, το μέγιστο εύρος ρωγμής. Έπειτα, αντιμετωπίζει το φαινόμενο της ρηγμάτωσης, θέτοντας ένα μέγιστο όριο στην απόσταση μεταξύ των ράβδων οπλισμού.

Ο κανονισμός ελέγχει τη ρηγμάτωση, θεσπίζοντας ένα όριο στην απόσταση μεταξύ των ράβδων οπλισμού.

Η απόσταση s μεταξύ δύο ράβδων οπλισμού υπολογίζεται από τη σχέση

$$s = 380(280 / f_s) - 2.5c_c \leq 300(280 / f_s) \quad (mm) \quad (2.15)$$

όπου c_c , η καθαρή επικάλυψη του οπλισμού από την κοντινότερη επιφάνεια που βρίσκεται σε εφελκυσμό, ως τον άκρο του καμπτικού οπλισμού (Σχήμα 4-2(α)). Η f_s εάν δεν υπολογισθεί αναλυτικά, μπορεί να πάρει την τιμή $f_s = 0.6f_y$ για συνήθεις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται χάλυβας οπλισμού S500 με $f_y = 500$ MPa.

Τα παραπάνω, αναλύονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.

Κεφάλαιο 3

ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2 ΚΑΙ ΤΟΝ ACI 318-11

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εισαγωγή της μεθόδου της οριακής αντοχής στο σχεδιασμό των κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα καθώς και η ανάπτυξη της τεχνολογίας που οδήγησε στην εισαγωγή σκυροδεμάτων και χαλύβων μεγαλύτερης αντοχής, έχουν ως αποτέλεσμα την κατασκευή πιο εύκαμπτων αλλά ταυτόχρονα πιο ανθεκτικών κατασκευών (Martin and Purkiss, 2006; Narayanan and Beeby, 2005; Nawy 2005). Έτσι οι διατομές των δομικών στοιχείων των κατασκευών αυτών, μπορούν να μειωθούν σημαντικά, με συνέπεια αυτά τα στοιχεία, να μην παρουσιάζουν μεν πρόβλημα από πλευράς αντοχής, αλλά να υφίστανται μεγάλες παραμορφώσεις. Έτσι, το πρόβλημα του ελέγχου των παραμορφώσεων, αποκτά ιδιαίτερη σημασία, και ιδιαίτερα, σε κατασκευές με ειδικές απαιτήσεις, όπως είναι αυτές με μεγάλα ανοίγματα.

3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2

3.2.1 Όρια των παραμορφώσεων

Ο κανονισμός ορίζει, ότι η παραμόρφωση ενός στοιχείου, δεν πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να επηρεάζει δυσμενώς τη λειτουργία της κατασκευής ή την εμφάνισή της. Έτσι, θα πρέπει να τεθούν, οι κατάλληλες τιμές για τις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις των

δομικών στοιχείων μιας κατασκευής, οι οποίες θα λαμβάνουν υπόψη τη φύση της κατασκευής, καθώς και τη λειτουργία της.

Στον EC2, οι επιτρεπόμενες αυτές παραμορφώσεις έχουν ληφθεί από το Πρότυπο ISO 4356 (ISO 4356: Bases for the design of structures -- Deformations of buildings at the serviceability limit states.) και αναμένεται να οδηγήσουν εν γένει, σε ικανοποιητική συμπεριφορά κτιρίων, όπως κατοικιών, γραφείων, δημοσίων κτιρίων και εργοστασίων. Όταν πρόκειται για κατασκευή με ειδικές απαιτήσεις, θα πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα, στα συγκεκριμένα όρια.

Η εμφάνιση αυτών των παραμορφώσεων δεν αποτελεί μόνο αισθητική ενόχληση, αλλά προκαλεί και στο χρήστη, αίσθημα ανασφάλειας, όπως για παράδειγμα, αν η βύθιση μιας δοκού είναι αρκετά μεγάλη. Έχει παρατηρηθεί, πως η αισθητική και η ψυχολογική ενόχληση συμβαίνει, όταν η βύθιση ενός οριζόντιου δομικού στοιχείου ξεπερνά το 1/250 του ανοίγματος του. Επιπρόσθετα, οι παραμορφώσεις, σε ένα φέρον δομικό στοιχείο μιας κατασκευής, μπορεί να προκαλέσουν βλάβες σε γειτονικά μη-φέροντα στοιχεία. Συνηθέστερες περιπτώσεις βλαβών, είναι αυτές των λοξών ρηγματώσεων των τοιχοποιιών, που στηρίζονται σε πλάκες ή δοκούς με έντονη βύθιση, και αυτή της στρέβλωσης του πλαισίου των παραθύρων ή των θυρών κυρίως σε περίπτωση μεταλλικών κουφωμάτων. Έτσι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι παραμορφώσεις των άλλων στοιχείων που συνδέονται με το φορέα, όπως διαχωριστικά, υαλοπίνακες, εξωτερικές επενδύσεις, εγκαταστάσεις και τελειώματα. Μια αποδεκτή τιμή ορίζεται ως 1/500 του ανοίγματος των δομικών στοιχείων, αλλά μπορεί να τεθούν και άλλα όρια, ανάλογα με την ευαισθησία των γειτονικών μερών. Επίσης, πρέπει να εξασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία μηχανών ή συσκευών που εδράζονται στο φορέα, και η αποφυγή δημιουργίας λιμναζόντων υδάτων σε επίπεδες στέγες. Ο EC2 θέτει τα παρακάτω όρια, τα οποία αναφέρονται στις παραγράφους (4) και (5) του κεφαλαίου 7.4 του κανονισμού.

- Βύθιση μιας δοκού, πλάκας, προβόλου, υπό οιονεί-μόνιμα φορτία $< 1/250$ του ανοίγματος και μετά την ολοκλήρωση της κατασκευής $< 1/500$ του ανοίγματος.
- Σημειώνεται, πως η βύθιση μετράται ως προς τις στηρίξεις και μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλη υπερύψωση για τη μείωση της ή το μηδενισμό της, αλλά η τιμή της δεν πρέπει να ξεπερνά το 1/250 του ανοίγματος.

3.2.2 Έλεγχος των παραμορφώσεων

Οι έλεγχοι που γίνονται για την οριακή κατάσταση παραμόρφωσης αφορούν τον περιορισμό του λόγου άνοιγμα/ύψος, ή τη σύγκριση μιας υπολογιζόμενης βύθισης ως προς μια επιτρεπόμενη τιμή. Ο EC2 αναφέρει πως αναλυτικός υπολογιστικός έλεγχος βύθισης μπορεί να αποφευχθεί, εάν ο λόγος ανοίγματος προς ύψος περιοριστεί για συνήθεις κατασκευές. Ο EC2 υπολογίζει το βασικό επιτρεπόμενο λόγο ανοίγματος / στατικό ύψος και ύστερα εφαρμόζει διάφορους συντελεστές, ανάλογα με τα δεδομένα του προβλήματος, όπως είναι για παράδειγμα το είδος του οπλισμού, κ.α. Ο επιτρεπόμενος λόγος υπολογίζεται ως:

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1.5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right], \text{ εάν } \rho \leq \rho_0 \quad (3.1)$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1.5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right], \text{ εάν } \rho > \rho_0 \quad (3.2)$$

όπου

- l/d , είναι ο επιτρεπόμενος λόγος άνοιγμα/ύψος
- K , είναι συντελεστής που εξαρτάται από το δομικό σύστημα
- $\rho_0 = \sqrt{f_{ck}} 10^{-3}$ είναι το ποσοστό οπλισμού αναφοράς
- $\rho = A_s/bd$ είναι το απαιτούμενο ποσοστό εφελκόμενου οπλισμού για την παραλαβή της ροπής λόγω φορτίων σχεδιασμού στο κέντρο του ανοίγματος (για προβόλους, στη στήριξη)
- $\rho' = A'_s/bd$ είναι το απαιτούμενο ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού για την παραλαβή της ροπής λόγω φορτίων σχεδιασμού στο κέντρο του ανοίγματος (για προβόλους, στη στήριξη)
- f_{ck} σε MPa

Οι σχέσεις αυτές είναι αποτέλεσμα παραμετρικής μελέτης, που στηρίζεται στην παραδοχή, πως η τάση του χάλυβα σε μια ρηγματωμένη διατομή στο κέντρο του ανοίγματος μιας δοκού ή πλάκας, ή στη στήριξη ενός προβόλου, είναι 310 MPa, που

αντιστοιχεί σε $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$. Όταν χρησιμοποιούνται άλλες στάθμες τάσεων, οι τιμές που προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί $310/\sigma_s$ όπου,

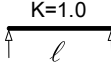
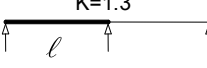
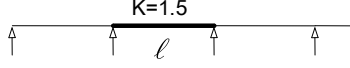
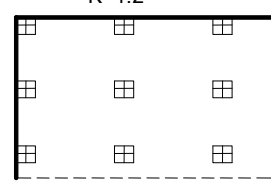
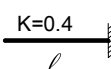
$$\frac{310}{\sigma_s} = \frac{500}{f_{yk} (A_{s,req} / A_{s,prov})} = \frac{500 A_{s,prov}}{f_{yk} A_{s,req}} \quad (3.3)$$

- Σε διατομές με πέλματα, στις οποίες ο λόγος του πλάτους του πέλματος προς το πάχος του κορμού υπερβαίνει το 3, οι τιμές του l/d που προκύπτουν πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί 0.8, για $b_{eff}/b_w \geq 3$, και 1, για $b_{eff}/b_w = 1$, όπου b_{eff} είναι το ενεργό πλάτος του πέλματος και b_w το πάχος του κορμού. Για τις ενδιάμεσες τιμές μπορούμε να εφαρμόσουμε γραμμική παρεμβολή: $0.8 + 0.1(3 - b_{eff}/b_w) \leq 0.8$
- Σε δοκούς ή πλάκες, πλην των μκητοειδών πλακών, με ανοίγματα πάνω από 7m, που φέρουν διαχωριστικά που είναι ευαίσθητα σε βλάβες από υπερβολική βύθιση, οι τιμές l/d που προκύπτουν πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί $7/l_{eff}$ (l_{eff} σε m).
- Σε μκητοειδείς πλάκες, των οποίων το άνοιγμα υπερβαίνει τα 8.5 m, και οι οποίες φέρουν διαχωριστικά ευαίσθητα σε βλάβες από υπερβολική βύθιση, οι τιμές του l/d που προκύπτουν πρέπει να πολλαπλασιάζονται επί $8.5/l_{eff}$ (l_{eff} σε m).

Η τιμή του K που θα χρησιμοποιείται σε μια χώρα, δίνεται στο αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Οι συνιστώμενες τιμές του K δίνονται στον Πίνακα 3-1.

Επίσης, δίνονται οι τιμές που προκύπτουν από τις παραπάνω σχέσεις για τις συνήθεις περιπτώσεις, που αντιστοιχούν σε C30, $\sigma_s = 310 \text{ MPa}$, για διάφορα δομικά συστήματα που παρέχονται στον Πίνακα 3-1 και για ποσοστά οπλισμού $\rho = 0,5 \%$ και $\rho = 1,5 \%$.

Πίνακας 3-1 Βασικοί λόγοι ανοίγματος προς στατικό ύψος για στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα χωρίς αξονική σύνθλιψη

Δομικό σύστημα	K	l / d	
		$\rho = 1.5\%$	$\rho = 0.5\%$
Αμφιέριστη δοκός ή πλάκα κατά μία ή δύο διευθύνσεις	K=1.0 	14	20
Ακραίο άνοιγμα συνεχούς δοκού ή πλάκας, κατά μία διεύθυνση, ή πλάκας κατά δύο διευθύνσεις συνεχούς κατά μήκος μιας επιμήκους πλευράς	K=1.3 	18	26
Μεσαίο άνοιγμα δοκού ή πλάκας κατά μία ή δύο διευθύνσεις	K=1.5 	20	30
Πλάκα επί υποστυλωμάτων χωρίς δοκούς (μυκητοειδής) (έλεγχος βάσει του μεγαλύτερου ανοίγματος)	K=1.2 	17	24
Πρόβολος	K=0.4 	6	8

Σημείωση 1: Οι τιμές που δίνονται έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να είναι εν γένει συντηρητικές, και ο υπολογισμός μπορεί συχνά να δείχνει ότι είναι δυνατή η χρήση μικρότερου πάχους στοιχείου.

Σημείωση 2: Σε πλάκες κατά δύο διευθύνσεις ο έλεγχος γίνεται βάσει του μικρότερου ανοίγματος. Σε μυκητοειδείς πλάκες, γίνεται βάσει του μεγαλύτερου ανοίγματος.

Σημείωση 3: Τα όρια που δίνονται για μυκητοειδείς πλάκες αντιστοιχούν σε περιορισμό λιγότερο αυστηρό από εκείνον της βύθισης κατά 1/250 του ανοίγματος σε σχέση με τα υποστυλώματα. Η εμπειρία δείχνει ότι αυτό είναι ικανοποιητικό.

Σημείωση 4: $\rho = \frac{A_s}{bd}$, $\rho = 1.5\%$ Σκυρόδεμα υπό υψηλή τάση

$\rho = 0.5\%$ Σκυρόδεμα υπό χαμηλή τάση

Για ενδιάμεσες τιμές εφαρμόζεται γραμμική παρεμβολή στις παραπάνω τιμές.

Ο κανονισμός αναφέρει, πως οι παραπάνω εξισώσεις, έχουν προκύψει από αποτελέσματα παραμετρικής μελέτης, που έγινε για μια σειρά αμφιέριστων δοκών και πλακών ορθογωνικής διατομής, χρησιμοποιώντας τη γενική διαδικασία αναλυτικού υπολογισμού των παραμορφώσεων που δίνεται αργότερα. Λήφθηκαν υπόψη διάφορες ποιότητες σκυροδέματος και χαρακτηριστική αντοχή χάλυβα 500 MPa. Για δεδομένο εμβαδόν εφελκόμενου οπλισμού, υπολογίστηκε η οριακή ροπή, ενώ το οιονεί-μόνιμο φορτίο θεωρήθηκε ίσο προς 50% του αντίστοιχου συνολικού φορτίου σχεδιασμού. Τα προκύπτοντα όρια του λόγου ανοίγματος προς ύψος είναι συμβατά με τις επιτρεπόμενες παραμορφώσεις.

3.2.3 Υπολογισμός παραμορφώσεων βάση του EC-2

Υπάρχουν περιπτώσεις, όπου ο αναλυτικός υπολογισμός είναι απαραίτητος και οι παραπάνω εξισώσεις δεν είναι κατάλληλες. Μέσω της υιοθετούμενης υπολογιστικής μεθόδου, γίνεται ο υπολογισμός των βυθίσεων των φορέων και συγκρίνεται με τις επιτρεπόμενες τιμές που θέτει ο κώδικας.

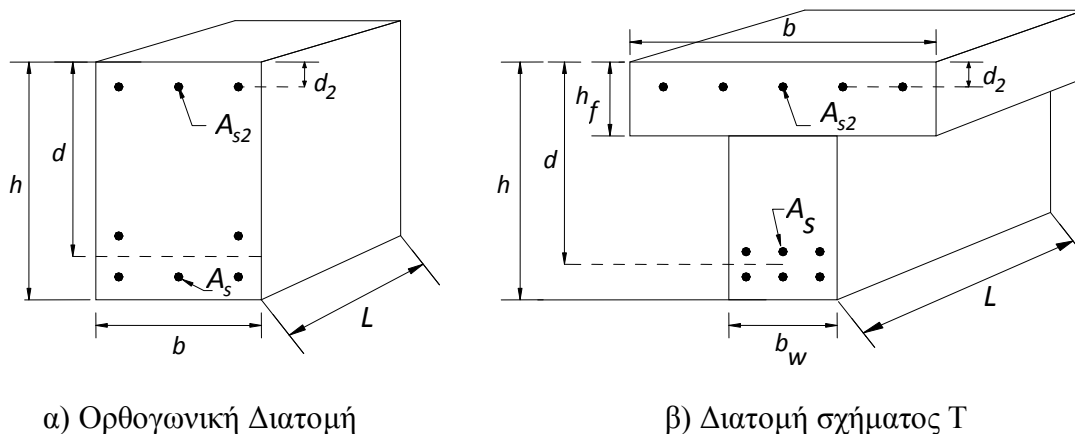
Για να πραγματοποιηθεί ο αναλυτικός υπολογισμός των παραμορφώσεων θα πρέπει να έχουμε γνώση της βύθισης σε μη ρηγματωμένες και σε πλήρως ρηγματωμένες συνθήκες που αντιστοιχούν στα στάδια I και II, αντίστοιχα. Στη συνέχεια, γίνεται παρεμβολή μέσω της εξίσωσης $\alpha = \zeta\alpha_{II} + (1-\zeta)\alpha_I$, όπου ζ είναι ένας αδιάστατος συντελεστής. Οι παραμορφώσεις υπολογίζονται για συνθήκες φόρτισης κατάλληλες για τον σκοπό του ελέγχου (βραχυχρόνιες / μακροχρόνιες).

3.2.4 Τα δεδομένα του υπολογισμού

Ο υπολογισμός απαιτεί τα παρακάτω δεδομένα που σχετίζονται με τη γεωμετρία του δομικού στοιχείου, τα χαρακτηριστικά του οπλισμού, καθώς και το συνδυασμό και το μέγεθος των φορτίων. Τα απαιτούμενα στοιχεία είναι

- το μήκος του στοιχείου L ,
- το πλάτος του στοιχείου b και το πλάτος πέλματος b_w σε περίπτωση διατομής T,

- το ύψος h και το ύψος h_f σε περίπτωση μιας διατομής T,
- το στατικό ύψος του οπλισμού d ,
- το εμβαδόν του οπλισμού A_s ,
- το στατικό ύψος d_2 και το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού A_{s2} , αν υπάρχει,
- η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος και του οπλισμού f_{ck} , f_{yk} και
- το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού E_s .



α) Ορθογωνική Διατομή

β) Διατομή σχήματος T

Σχήμα 3-1 Γεωμετρικά στοιχεία δοκού ορθογωνικής διατομής και σχήματος T

Επιπλέον, για τον έλεγχο, είναι αναγκαία τα παρακάτω δεδομένα για τον υπολογισμό του ερπυσμού και της παραμόρφωσης λόγω συρρίκνωσης.

- το ποσοστό υγρασίας $RH\%$,
- η κατηγορία τσιμέντου, N, R ή S ,
- η ηλικία του σκυροδέματος, σε ημέρες, κατά τη στιγμή που εξετάζεται t ,
- η ηλικία του σκυροδέματος κατά την επιβολή της φόρτισης σε ημέρες t_0 .
- τα φορτία σχεδιασμού, και
- οι συνδυασμοί φόρτισης ή οι επιβαλλόμενες ροπές.

3.2.5 Η υπολογιστική διαδικασία

Ο υπολογισμός των παραμορφώσεων περιγράφεται από τα παρακάτω βήματα

ΒΗΜΑ 1

Υπολογίζονται οι παρακάτω μηχανικές παράμετροι των υλικών.

- f_{cm} , η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος 28 ημερών, σε MPa.

$$f_{cm} = (f_{ck} + 8) \quad (3.4)$$

- η μέση τιμή του σκυροδέματος για καθαρό εφελκυσμό f_{ctm}

$$f_{ctm} \begin{cases} = 0.3 f_{ck}^{2/3} & , \text{για σκυροδέματα} \leq C50/60 \\ = 2.12 \ln [1 + (f_{cm} / 10)] & , \text{για σκυροδέματα} > C50/60 \end{cases} \quad (3.5)$$

- Η μέση τιμή του μέτρου ελαστικότητας,

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} \quad (3.6)$$

Τιμές για τα διάφορα είδη σκυροδέματος δίνονται στο Πίνακα 3-2.

Πίνακας 3-2 Τιμές f_{cm} , f_{ctm} , E_{cm} , E_{c28} για τις διάφορες τιμές του f_{ck}

f_{ck}	MPa	20	25	38	30	32	35	40	50
f_{cm}	MPa	28	33	46	38	40	43	48	58
f_{ctm}	MPa	2.21	2.56	3.39	2.9	3.02	3.21	3.51	4.07
E_{cm}	GPa	30	31.5	34.8	32.8	33.3	34.1	35.2	37.3

ΒΗΜΑ 2

Ο συντελεστής ερπυσμού $\varphi(\infty, t_0)$ μπορεί να υπολογιστεί από τους πίνακες του παραρτήματος Δ, αλλά και αναλυτικά από τη σχέση,

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) \quad (3.7)$$

όπου φ_0 είναι ο βασικός συντελεστής ερπυσμού, που παρέχεται από την εξίσωση

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) \quad (3.8)$$

Στη σχέση αυτή, ο συντελεστής φ_{RH} εκφράζει την επιρροή της σχετικής υγρασίας στο βασικό συντελεστή ερπυσμού φ_0 , και υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\varphi_{RH} \begin{cases} = 1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1\sqrt[3]{h_0}}, \text{ για } f_{cm} \leq 35 \text{ MPa} \\ = \left[1 + \frac{1 - RH / 100}{0,1\sqrt[3]{h_0}} a_1 \right] a_2, \text{ για } f_{cm} \geq 35 \text{ MPa} \end{cases} \quad (3.9)$$

όπου RH είναι η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος επί τοις %, και h_0 είναι το βασικό πάχος του στοιχείου σε mm, που υπολογίζεται από τη σχέση

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} \quad (3.10)$$

όπου A_c είναι η επιφάνεια της διατομής σε mm^2 και u , είναι η περίμετρος του στοιχείου που βρίσκεται σε επαφή με την ατμόσφαιρα σε mm. Για παράδειγμα, σε μια ορθογωνική διατομή είναι $u = 2(b + h)$.

Οι συντελεστές a_1, a_2, a_3 , εκφράζουν την επιρροή αντοχής του σκυροδέματος και υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις,

$$a_1 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.7}, \quad a_2 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.2}, \quad a_3 = \left(\frac{35}{f_{cm}} \right)^{0.5} \quad (3.11)$$

Στη σχέση (3.8), ο συντελεστής $\beta(f_{cm})$ εκφράζει την επίδραση της αντοχής σκυροδέματος στο βασικό συντελεστή ερπυσμού, ενώ ο συντελεστής $\beta(t_0)$ εκφράζει, την επίδραση της ηλικίας σκυροδέματος, κατά την επιβολή της φόρτισης, στο βασικό συντελεστή ερπυσμού της εξίσωσης και υπολογίζονται από τις σχέσεις

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}}, \quad (3.12)$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{0,1 + t_0^{0,20}}. \quad (3.13)$$

Στη σχέση (3.7), το $\beta_c(t, t_0)$, είναι ένας συντελεστής, που έχει εισαχθεί για να περιγράψει την ανάπτυξη του ερπυσμού, με την πάροδο του χρόνου μετά την φόρτιση, και βρίσκεται από τη σχέση,

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t - t_0)}{(\beta_h + t - t_0)} \right]^{0.3}, \quad (3.14)$$

όπου,

- t , είναι η ηλικία του σκυροδέματος σε ημέρες, κατά τη στιγμή που εξετάζεται.
- t_0 , είναι η ηλικία του σκυροδέματος, κατά την επιβολή της φόρτισης σε ημέρες.
- β_H , είναι συντελεστής που εξαρτάται από τη σχετική υγρασία (RH σε %) και το ιδεατό πάχος του στοιχείου (h_0 σε mm). Υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\beta_H \begin{cases} = 1,5 \left[1 + (0.012RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500, \text{ για } f_{cm} \leq 35\text{MPa} \\ = 1,5 \left[1 + (0.012RH)^{18} \right] h_0 + 250a_3 \leq 1500 a_e, \text{ για } f_{cm} \geq 35\text{MPa} \end{cases} \quad (3.15)$$

όπου ο συντελεστής a_3 δίνεται από τη σχέση (3.11).

ΒΗΜΑ 3

Προσδιορίζεται το ισοδύναμο μέτρο ελαστικότητας $E_{c,eff}$ και ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας a_e από τις σχέσεις,

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)}, \quad a_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} \quad (3.16)$$

όπου E_s , είναι το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα ($E_s = 200\text{Gpa}$).

ΒΗΜΑ 4

Προσδιορίζεται η θέση x του ουδέτερου άξονα της διατομής, η ροπή αδράνειας της διατομής I , ως προς τον άξονα αυτόν και η στατική ροπή του οπλισμού S ως προς το κέντρο βάρους του οπλισμού.

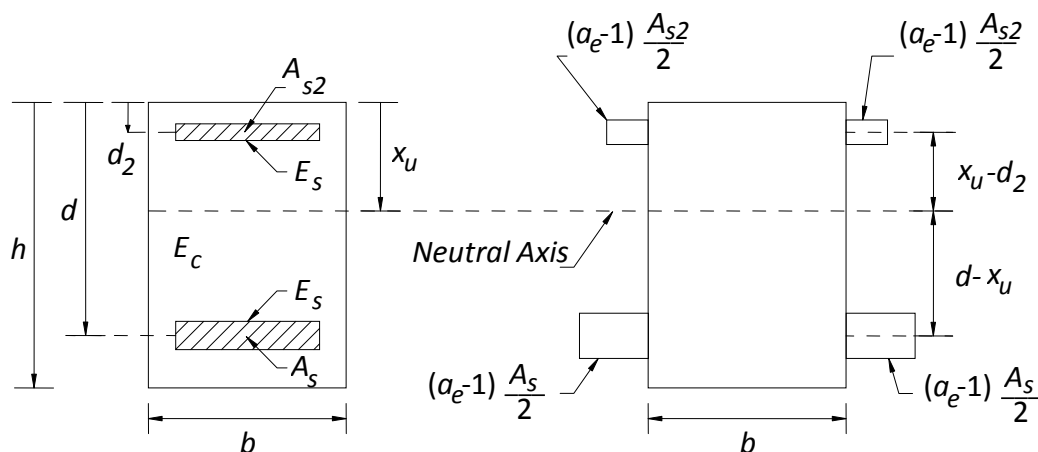
Στην αρηγμάτωση κατάσταση, οι ποσότητες αυτές, υπολογίζονται με τις σχέσεις:

Για ορθογωνική διατομή,

$$\blacksquare x_u = \frac{bh^2/2 + (a_e - 1)(A_s d + A_{s2} d_2)}{bh + (a_e - 1)(A_s + A_{s2})} \quad (3.17)$$

$$\blacksquare I_u = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - x_u \right)^2 + (a_e - 1) \left[A_s (d - x_u)^2 + A_{s2} (d_2 - x_u)^2 \right] \quad (3.18)$$

$$\blacksquare S_u = A_s (d - x_u) - A_{s2} (x_u - d_2) \quad (3.19)$$



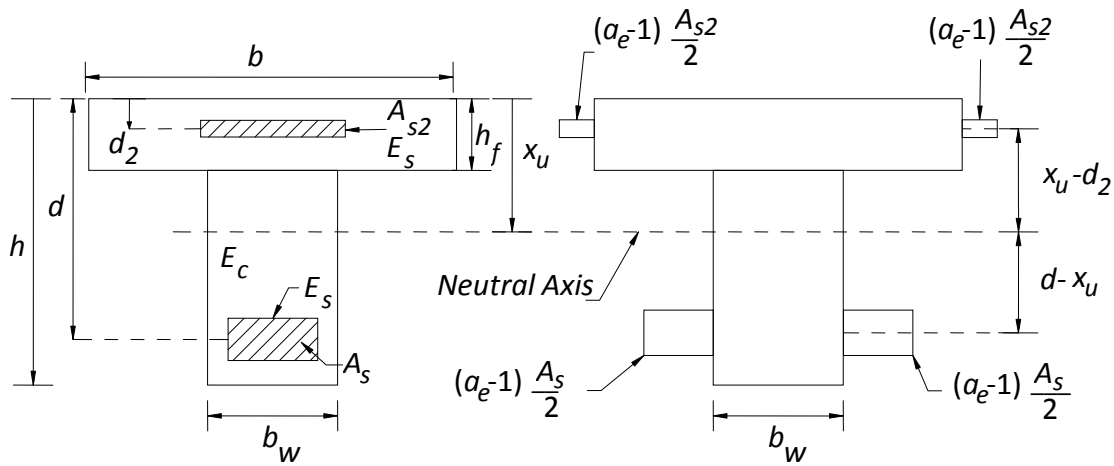
Σχήμα 3-2 Μετασχηματισμένη μη ρηγματωμένη ορθογωνική διατομή

Για διατομή T ή Γ,

$$\blacksquare x_u = \frac{bh_f^2/2 + b_w h_f^2/2 + (a_e - 1)(A_s d + A_{s2} d_2)}{bh + b_w h_f + (a_e - 1)(A_s + A_{s2})} \quad (3.20)$$

$$\blacksquare I_u = \frac{bh_f^3}{12} + bh_f \left(x_u - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \frac{b_w (h - h_f)^3}{12} + b_w (h - h_f) \left(x_u - \frac{(h - h_f)}{2} \right)^2 + (a_e - 1) \left[A_s (x_u - d)^2 + A_{s2} (x_u - d_2)^2 \right] \quad (3.21)$$

$$\blacksquare S_u = A_s (d - x_u) - A_{s2} (x_u - d_2) \quad (3.22)$$



Σχήμα 3-3 Μετασχηματισμένη μη ρηγματωμένη διατομή σχήματος T

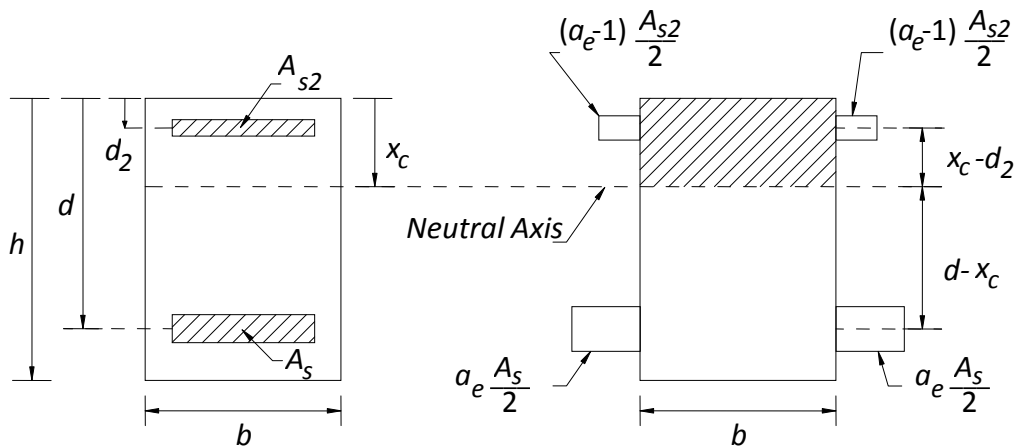
Στην αρηγμάτωση κατάσταση, οι ποσότητες αυτές, υπολογίζονται από τις σχέσεις:

Για ορθογωνική διατομή,

$$x_c = \frac{\sqrt{[A_s a_e + A_{s2}(a_e - 1)]^2 + 2b[A_s d a_e + A_{s2} d_2 (a_e - 1)]} - [A_s a_e + A_{s2}(a_e - 1)]}{b} \quad (3.23)$$

$$I_c = \frac{b x_c^3}{3} + a_e A_s (d - x_c)^2 + (a_e - 1) A_{s2} (d_2 - x_c)^2 \quad (3.24)$$

$$S_c = A_s (d - x_c) - A_{s2} (x_c - d_2) \quad (3.25)$$



Σχήμα 3-4 Μετασχηματισμένη ρηγματωμένη ορθογωνική διατομή

Για διατομή T ή Γ,

Ο ουδέτερος άξονας, x_c , υπολογίζεται από τη δευτεροβάθμια εξίσωση,

$$\blacksquare \quad a_1 x_c^2 + a_2 x_c + a_3 = 0 \quad (3.26)$$

όπου,

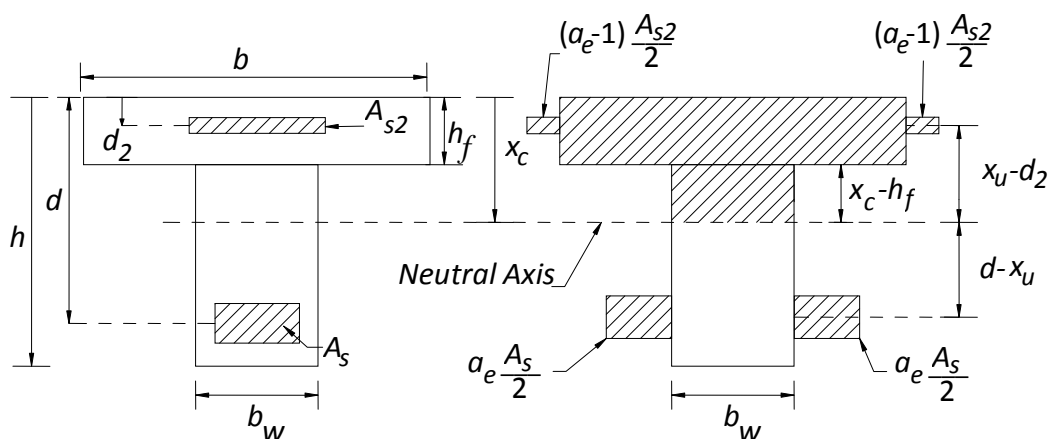
$$\alpha_1 = 0.5b_w$$

$$a_2 = h_f(b - b_w) + a_e A_s + (a_e - 1)A_{s2}$$

$$a_3 = -\frac{1}{2}h_f^2(b - b_w) - a_e A_s d - (a_e - 1)A_{s2}d_2$$

$$\blacksquare \quad I_c = \frac{b_w(c - h_f)^3}{3} + \frac{bh_f^3}{3} + bh_f \left(x_c - \frac{h_f}{2} \right)^2 + a_e A_s (d - x_c)^2 + (a_e - 1)A_{s2} (d_2 - x_c)^2 \quad (3.27)$$

$$\blacksquare \quad S_c = A_s (d - x_c) - A_{s2} (x_c - d_2) \quad (3.28)$$



Σχήμα 3-5 Μετασχηματισμένη ρηγματωμένη διατομή σχήματος T

Οι παραπάνω σχέσεις, για μια διατομή σχήματος T, ισχύουν για $x_u \geq h_f$. Εάν $x_u < h_f$, τότε τα ζητούμενα στοιχεία της διατομής μπορούν να υπολογιστούν από τις απλούστερες σχέσεις που δίνονται για μια ορθογωνική διατομή θεωρώντας πλάτος b . Οι σχέσεις που παρουσιάστηκαν για τις διατομές σχήματος T ή Γ, εξακολουθούν να ισχύουν εάν αντικατασταθεί όπου $b_w = b$.

ΒΗΜΑ 5

Προσδιορίζεται η ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} των δομικών στοιχείων και η ροπή M_{QP} . Η ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} , υπολογίζεται από τη σχέση

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} I_u}{h - x_u} \quad (3.29)$$

όπου τα f_{ctm} , x_u , I_u έχουν υπολογιστεί στα βήματα 1 και 4.

ΒΗΜΑ 6

Υπολογίζεται η ολική παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης ε_{cs} με τη σχέση,

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca} \quad (3.30)$$

όπου ε_{cd} είναι η παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης από ξήρανση και υπολογίζεται από τη σχέση

$$\varepsilon_{cd} = \beta(t, t_0) k_h \varepsilon_{cd,0} \quad (3.31)$$

Στη σχέση αυτή, το $\varepsilon_{cd,0}$ είναι η ονομαστική ανεμπόδιστη συρρίκνωση από ξήρανση, που προσδιορίζεται από την εξίσωση

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \alpha_{ds1}) \exp \left(-\alpha_{ds2} \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \beta_{RH} \times 10^{-6} \quad (3.32)$$

Στη παραπάνω εξίσωση,

- f_{cm} είναι η μέση θλιπτική αντοχή (MPa),
- f_{cm0} λαμβάνεται ίσο με 10 MPa,
- α_{ds1} και α_{ds2} είναι συντελεστές που εξαρτώνται από τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιείται, και λαμβάνουν τις τιμές

$$a_1 = \begin{cases} 3.0, & \text{για Κατηγορία τσιμέντου S} \\ 4.0, & \text{για Κατηγορία τσιμέντου N} \\ 6.0, & \text{για Κατηγορία τσιμέντου R} \end{cases} \quad (3.33)$$

$$a_2 = \begin{cases} 0.13, & \text{για Κατηγορία τσιμέντου S} \\ 0.12, & \text{για Κατηγορία τσιμέντου N} \\ 0.11, & \text{για Κατηγορία τσιμέντου R} \end{cases} \quad (3.34)$$

$$\beta_{RH} = 1,55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] \quad (3.35)$$

- RH είναι η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος (%)
- $RH_0 = 100\%$

Ο συντελεστή k_h της σχέσης (3.31) υπολογίζεται από το Πίνακα 3-3, χρησιμοποιώντας γραμμική παρεμβολή.

Πίνακας 3-3 Τιμές Συντελεστή k_h για την έκφραση (3.31)

h_0	k_h
100	1
200	0.85
300	0.75
500	0.7

Το h_0 , έχει υπολογιστεί στο Βήμα 3, με τη σχέση (3.10). Ο συντελεστής $\beta(t, t_0)$ της σχέσης (3.31) παρέχεται από τη σχέση

$$\beta(t, t_0) = \frac{(t - t_0)}{(t - t_0) + 0.04\sqrt{h_0^3}} \quad (3.36)$$

Η αυτογενής παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης από ξήρανση ε_{ca} της σχέσης (3.30) παρέχεται από την εξίσωση

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t)\varepsilon_{ca}(\infty) \quad (3.37)$$

όπου

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10) \times 10^{-6} \quad (3.38)$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5}), \text{ το } t \text{ σε ημέρες.} \quad (3.39)$$

Συνήθως, για μακροχρόνιες παραμορφώσεις είναι $\varepsilon_{ca} = \varepsilon_{ca}(\infty)$.

ΒΗΜΑ 7

Υπολογισμός της μέγιστης εφαρμοζόμενης ροπής. Η εφαρμοζόμενη ροπή M_{QP} υπολογίζεται στο σημείο που γίνεται ο έλεγχος. Στην περίπτωση που γίνει ο αριθμητικός έλεγχος, υπολογίζεται η ροπή ανά πυκνές αποστάσεις, κατά μήκος του στοιχείου. Η

μέθοδος αυτή επεξηγείται αναλυτικότερα στο βήμα 10. Εναλλακτικά, με την απλοποιημένη μέθοδο, λαμβάνεται ως η ροπή σχεδιασμού, M_{QP} , η ροπή εκείνη που αναμένεται να προκαλέσει τη μέγιστη βύθιση στο στοιχείο. Αυτή η ροπή είναι η μέγιστη ροπή M_s , η οποία, δίνεται εν γένει από τον τύπο,

$$M_s = k_2 WL \quad (3.40)$$

Στον Πίνακα 3-4 η ροπή αυτή δείχνεται στην μεσαία στήλη, για συνήθεις περιπτώσεις φορτίσεων και δομικών συστημάτων.

ΒΗΜΑ 8

Υπολογίζεται ο συντελεστής ζ και η καμπτική καμπυλότητα $\frac{1}{r_n}$.

- Εάν $M_{cr} > M_{QP}$, τότε το τμήμα είναι αρηγμάτωτο και $\zeta = 0$.
- Εάν $M_{cr} \leq M_{QP}$, τότε το τμήμα είναι ρηγματωμένο και ο συντελεστής ζ βρίσκεται από τη σχέση

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M_{QP}} \right)^2 \quad (3.41)$$

Στη παραπάνω σχέση, το β είναι ένας συντελεστής, που παίρνει υπόψη του την επίδραση της διάρκειας της φόρτισης, ή της επαναλαμβανόμενης φόρτισης, στη μέση παραμόρφωση και παίρνει τις τιμές,

$$\beta = \begin{cases} 1.0, & \text{για ένα (μονό) βραχυχρόνιο φορτίο} \\ 0.5, & \text{για μακροχρόνια φορτία, ή για πολλούς κύκλους} \\ & \text{επαναλαμβανόμενης φόρτισης} \end{cases} \quad (3.42)$$

Η καμπτική καμπυλότητα για μια μη ρηγματωμένη διατομή, υπολογίζεται από την σχέση

$$1/r_{n,unc} = \frac{M_{QP}}{E_{c,eff} I_u} \quad (3.43)$$

και για τη ρηγματωμένη διατομή από τη σχέση,

$$1/r_{n,cr} = \frac{M_{QP}}{E_{c,eff} I_c} \quad (3.44)$$

Η συνολική καμπτική καμπυλότητα υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{1}{r_n} = \zeta \frac{1}{r_{n,cr}} + (1-\zeta) \frac{1}{r_{n,unc}} \quad \text{ή} \quad (3.45)$$

$$\frac{1}{r_n} = \zeta \frac{M_{QP}}{E_{c,eff} I_c} + (1-\zeta) \frac{M_{QP}}{E_{c,eff} I_u} \quad (3.46)$$

ΒΗΜΑ 9

Υπολογίζεται η καμπυλότητα λόγω συρρίκνωσης $\frac{1}{r_{cs}}$.

Η καμπυλότητα λόγω συρρίκνωσης για μια μη ρηγματωμένη διατομή υπολογίζεται από τη σχέση,

$$1/r_{cs,unc} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_u}{I_u} \quad (3.47)$$

και για τη ρηγματωμένη διατομή από την σχέση,

$$1/r_{cs,cr} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_c}{I_c} \quad (3.48)$$

Η συνολική καμπυλότητα λόγω συρρίκνωσης υπολογίζεται από τη σχέση

$$\frac{1}{r_{cs}} = \zeta \frac{1}{r_{cs,cr}} + (1-\zeta) \frac{1}{r_{cs,unc}} \quad \text{ή} \quad (3.49)$$

$$\frac{1}{r_{cs}} = \zeta \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_c}{I_c} + (1-\zeta) \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_u}{I_u} \quad (3.50)$$

Οι παράμετροι που υπάρχουν στη σχέση αυτήν, έχουν υπολογιστεί από τα προηγούμενα βήματα.

ΒΗΜΑ 10

Υπολογίζεται η συνολική καμπυλότητα $\frac{1}{r_{i,QP}}$ με τη σχέση,

$$\frac{1}{r_{i,QP}} = \frac{1}{r_n} + \frac{1}{r_{cs}} \quad (3.51)$$

ΒΗΜΑ 11

Υπολογίζονται τα βέλη κάμψεως των δομικών στοιχείων. Ο υπολογισμός αυτός μπορεί να γίνει

- με αριθμητική ολοκλήρωση των βελών κάμψης, που υπολογίζονται σε συγκεκριμένα σημεία, σε όλο το μήκος του φορέα (αριθμητική ολοκλήρωση).
- με άμεση χρήση της καμπυλότητας στο σημείο, όπου έχουμε υπολογίσει τη μέγιστη ροπή, χρησιμοποιώντας την παρεμβολή των παραμορφώσεων μεταξύ της ρηγματωμένης και της αρηγμάτωτης κατάστασης (απλοποιημένη μέθοδος).

Αριθμητική ολοκλήρωση

Η αριθμητική μέθοδος στηρίζεται στην επίλυση της διαφορικής εξίσωσης, της ελαστικής γραμμής $\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$, με την μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Η επίλυση της μεθόδου αυτής παρέχεται στο Παράρτημα Α.

Πρέπει να σημειωθεί, πως εάν εφαρμοστεί η αριθμητική μέθοδος για τον υπολογισμό των βυθίσεων, η συνολική καμπυλότητα προκύπτει από τη σχέση,

$$\frac{1}{r_{t,QP}} = \zeta \frac{1}{r_{II}} + (1-\zeta) \frac{1}{r_I} \quad (3.52)$$

όπου,

$$1/r_I = 1/r_{n,unc} + 1/r_{cs,uncr} \quad (3.53)$$

είναι το άθροισμα της καμπυλότητας λόγω κάμψης και συρρίκνωσης, αντίστοιχα, στη μη ρηγματωμένη διατομή που προκύπτουν από τις σχέσεις (3.43) και (3.47), και

$$1/r_{II} = 1/r_{n,cr} + 1/r_{cs,cr}, \quad (3.54)$$

είναι το άθροισμα της καμπυλότητας λόγω κάμψης και συρρίκνωσης, αντίστοιχα, στη ρηγματωμένη διατομή που προκύπτουν από τις σχέσεις (3.44) και (3.48). Ο συντελεστής ζ θα πρέπει να υπολογίζεται για, κάθε σημείο στο οποίο υπολογίζεται η ροπή που καταπονεί το τμήμα αυτό, από τη σχέση (3.41).

Απλοποιημένη μέθοδος

Η απλοποιημένη μέθοδος στηρίζεται στην εξής ιδέα. Θεωρούμε ένα άνοιγμα μήκους L που καταπονείται από μια συγκεντρωμένη δύναμη W . Η μέγιστη ροπή και η μέγιστη βύθιση που αναπτύσσεται στο άνοιγμα είναι,

$$\max M = k_2 WL, \quad (3.55)$$

$$\Delta = k_1 \frac{WL^3}{EI}, \quad (3.56)$$

όπου EI είναι η ακαμψία της δοκού. Στις σχέσεις αυτές τα k_1 , k_2 είναι πραγματικά ορισμένα και εξαρτώνται από τη θέση της δύναμης. Η μέγιστη βύθιση της δοκού μπορεί να εκφρασθεί σε όρους της μέγιστης ροπής με τη σχέση,

$$\Delta = \frac{k_1}{k_2} \frac{\max M}{EI} L^2 \quad (3.57)$$

Η ποσότητα $\max M / EI$ στη σχέση αυτή, εκφράζει την καμπυλότητα της δοκού, αν στις άκρες της εφαρμοζόταν η ροπή $\max M$. Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε φόρτιση του ανοίγματος αν γραφτεί στη μορφή

$$\Delta_{QP} = k_3 \frac{1}{r_{t,QP}} l^2 \quad (3.58)$$

όπου, η ποσότητα $1/r_{t,QP}$ είναι η καμπυλότητα, όπως έχει υπολογιστεί από τη σχέση (3.51), που προκύπτει από τις σχέσεις (3.46) και (3.50), και k_3 ένας συντελεστής που εξαρτάται από το δομικό σύστημα. Για τα συνήθη δομικά συστήματα, οι τιμές του k_3 παρέχονται από τον Πίνακα 3.4.

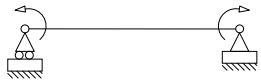
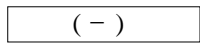
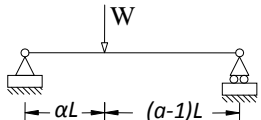
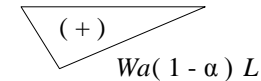
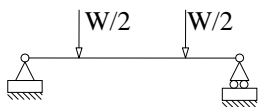
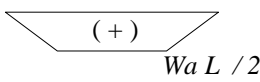


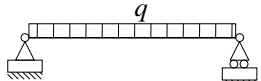
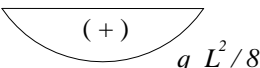
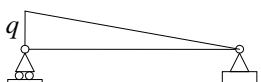
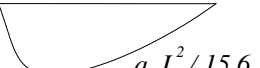
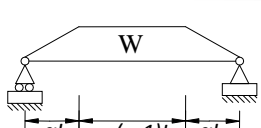
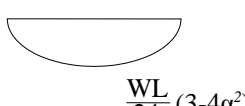
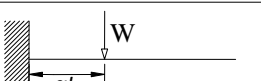

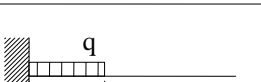
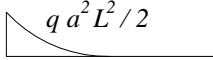
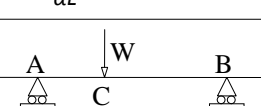
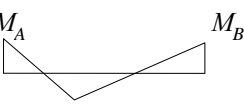
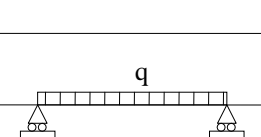
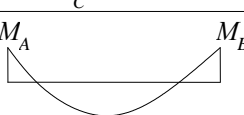
ΒΗΜΑ 12

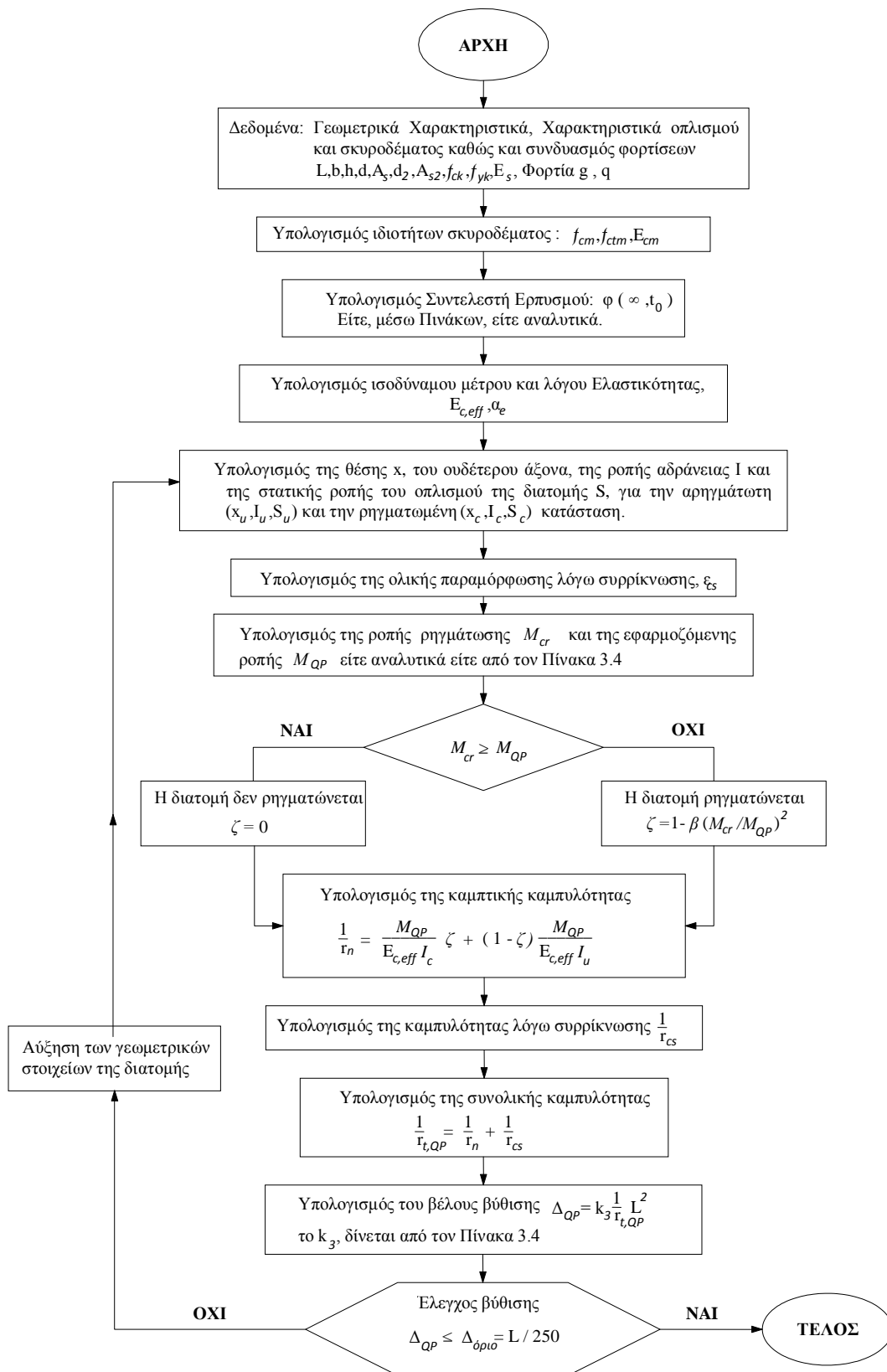
Έχοντας ως δεδομένο το Δ_{allow} , που ορίζει ο κανονισμός, ελέγχεται αν ισχύει η σχέση,

$$\Delta_{QP} \leq \Delta_{allow}.$$

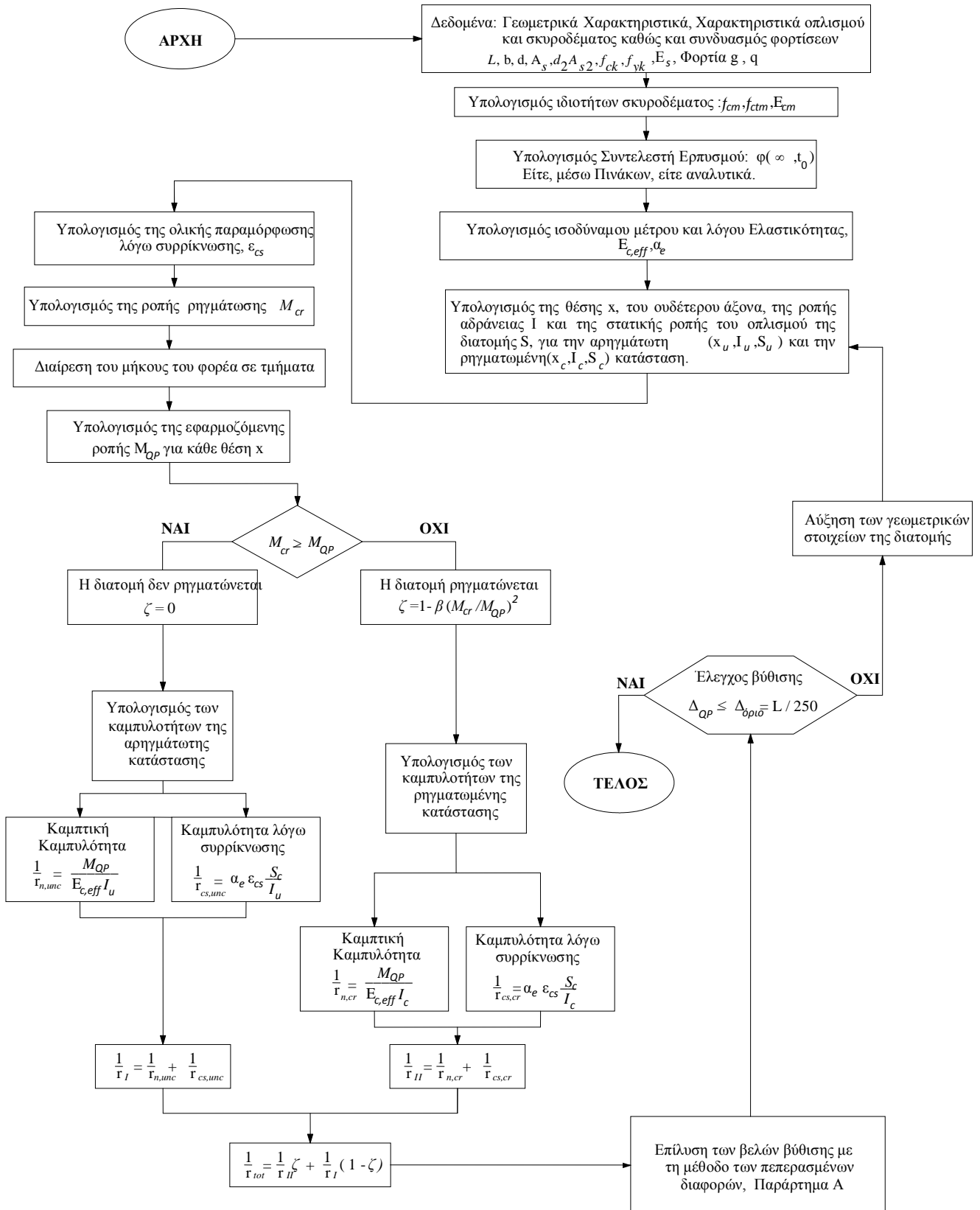
Αν η παραπάνω σχέση δεν ισχύει, τότε θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στα γεωμετρικά στοιχεία των δομικών στοιχείων, να αυξηθούν δηλαδή, οι διαστάσεις του φορέα και να επαναληφθεί η διαδικασία έως ότου ισχύσει ο περιορισμός.

Πίνακας 3-4 Τιμές συντελεστή k_3 , για τον υπολογισμό Μεγίστης Ροπής

Φορτίο	Ροπή	k_3
	M 	0.125
		$(3-4a)^2 / 48(1-a)$
		$0.125 - \alpha^2 / 6$
		0.0625
		$5 / 48$
		0.102
		$(5-4\alpha^2)^2 / 80(3-4\alpha)^2$
	$W\alpha L$ 	$\alpha(3-\alpha) / 6$
		$\alpha(4-\alpha) / 12$
		$k = 0.083(1 - \beta / 4)$ $\beta = (M_A + M_B) / M_C$ οι Τιμές των M_A, M_B, M_C
		$k = 0.104(1 - \beta / 10)$ $\beta = (M_A + M_B) / M_C$ M_C μπορεί να είναι το μέσο ή η μέγιστη τιμή, καθώς το σφάλμα είναι μικρό



Σχήμα 3-6 Διάγραμμα ροής, απλοποιημένου ελέγχου βελών βύθισης βάσει τον EC2



Σχήμα 3-7 Διάγραμμα ροής, αριθμητικού ελέγχου βελών βύθισης, βάσει τον EC2

3.3 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ACI 318-11

3.3.1 Εισαγωγή

Ο ACI 318-11 προτείνει με τον παρακάτω Πίνακα 3-5, τις τιμές του ελάχιστου πάχους των δομικών στοιχείων, ως συνάρτηση του μήκους τους, για τις οποίες δεν είναι απαραίτητο να γίνει ο υπολογισμός των βυθίσεων, εάν το συγκεκριμένο δομικό στοιχείο δεν στηρίζει ή δεν είναι ενωμένο με κατασκευή που, πιθανώς, να τραυματιστεί από μεγάλες παραμορφώσεις.

Πίνακας 3-5 Ελάχιστο πάχος δοκών και μιας διεύθυνσης πλακών εάν δεν γίνουν οι υπολογισμοί βυθίσεων, κατά τον ACI 318-11

Δομικό Μέλος	Ελάχιστο Πάχος h			
	Απλή Στήριξη	Συνεχής, σε μία πλευρά	Συνεχής, σε δύο πλευρές	Πρόβολος
Πλάκες μιας διεύθυνσης	1/20	1/24	1/28	1/10
Δοκοί ή πλάκα με νευρώσεις σε μια διεύθυνση	1/16	1/18.5	1/21	1/8

Οι τιμές του παραπάνω πίνακα, αναφέρονται για μήκος l σε inches ($1\text{ inch} = 25.4\text{ mm}$). Οι τιμές αφορούν σε δομικά στοιχεία σκυροδέματος με κανονικό βάρος και τύπο οπλισμού. Για διαφορετικές συνθήκες, οι τιμές πρέπει να μεταβάλλονται ανάλογα.

Εάν το πάχος του μέλους είναι λιγότερο από αυτό που δίνει ο πίνακας, τότε η βύθιση πρέπει να υπολογιστεί αναλυτικά και να συγκριθεί με τις επιτρεπόμενες τιμές.

Σε περίπτωση που γίνει ο υπολογισμός των βυθίσεων, ο κανονισμός ορίζει με τον Πίνακα 3-6, το ελάχιστο όριο του επιτρεπόμενου λόγου, μήκος ως προς βύθιση Δ ανά τύπο μέλους.

Πίνακας 3-6 Ελάχιστοι επιτρεπόμενοι λόγοι μήκους / βύθισης (l/Δ) κατά τον κανονισμό ACI 318-11

Τύπος δομικού μέλους	Βύθιση, Δ , που πρέπει να εξεταστεί	
Επίπεδες οροφές που δεν στηρίζουν ή δεν ενώνονται με μη φέροντα στοιχεία, που πιθανώς να τραυματιστούν από μεγάλες βυθίσεις	Δ_L , η άμεση βύθιση λόγω κινητού φορτίου L	180
Δάπεδα, που δεν στηρίζουν ή δεν ενώνονται με μη φέροντα στοιχεία, που πιθανώς να τραυματιστούν από μεγάλες βυθίσεις	Δ_L , η άμεση βύθιση λόγω κινητού φορτίου L	360
Οροφές ή δάπεδα που στηρίζουν ή ενώνονται με μη φέροντα στοιχεία που πιθανώς τραυματιστούν από μεγάλες βυθίσεις	Δ_{LT} Το μέρος της συνολικής βύθισης που συμβαίνει μετά την τοποθέτηση των φερόντων στοιχείων. Το άθροισμα των μακροπρόθεσμων βυθίσεων, λόγω των φορτίων (μόνιμα φορτία μαζί με μέρος των κινητών φορτίων) και άμεση βύθιση λόγω πρόσθετης ενεργής φόρτισης	480
Οροφές ή δάπεδα που στηρίζουν ή ενώνονται με μη φέροντα στοιχεία που πιθανώς να μην τραυματιστούν από μεγάλες βυθίσεις		240

3.3.2 Υπολογισμός παραμορφώσεων βάσει του ACI 318-11

3.3.3 Τα δεδομένα του υπολογισμού

Ο υπολογισμός απαιτεί τα παρακάτω δεδομένα, που σχετίζονται με τη γεωμετρία του δομικού στοιχείου, τα χαρακτηριστικά του οπλισμού, καθώς και το συνδυασμό και το μέγεθος των φορτίων. Σε μια ορθογωνική διατομή απαιτούνται τα εξής στοιχεία

- το μήκος του στοιχείου l ,
- το πλάτος του στοιχείου b , και το πλάτος b_w σε περίπτωση διατομής T,

- το ύψος h, b , και το ύψος πέλματος h_f σε περίπτωση διατομής T,
- το στατικό ύψος του οπλισμού d ,
- το εμβαδόν του οπλισμού A_s ,
- το στατικό ύψος και το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού, d_2, A_{s2} αν υπάρχει,
- η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος και του οπλισμού f_c, f_y και
- το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού E_s .
- Τις ροπές ή τα φορτία σχεδιασμού.

3.3.4 Η υπολογιστική διαδικασία

Ο υπολογισμός της βύθισης ενός δομικού στοιχείου γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα.

ΒΗΜΑ 1

Υπολογίζεται το μέτρο ελαστικότητας E_c και ο λόγος των μέτρων ελαστικότητας με τις σχέσεις,

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f_c}, \quad n = \frac{E_s}{E_c} \quad (3.59)$$

όπου E_s το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού, και $1500 < w_c < 2500 \text{ kg} / \text{m}^3$, με συνήθη τιμή, $w_c = 2400 \text{ kg} / \text{m}^3$.

ΒΗΜΑ 2

Γίνεται σύγκριση του πάχους h του δομικού στοιχείου, με την τιμή ελάχιστου πάχους h_{\min} που παρέχεται από τον Πίνακα 3-5. Εάν η τιμή είναι μεγαλύτερη, τότε, απαιτείται αναλυτικός υπολογισμός των βυθίσεων.

ΒΗΜΑ 3

Υπολογίζεται η ροπή αδράνειας I_g και η ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} με τις σχέσεις που δίνονται παρακάτω.

Η ροπή ρηγμάτωσης παρέχεται με τη σχέση

$$M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y_l} \quad (3.60)$$

όπου

- $f_r = 0.7\sqrt{f_c}$ για κοινού βάρους σκυρόδεμα, (3.61)
- y_l , είναι η απόσταση της ακραίας ίνας από το κέντρο βάρους της αρηγμάτωτης διατομής,.
- I_g , είναι η ροπή αδράνειας της διατομής,.

Σε μία ορθογωνική διατομή, τα y_l και I_g δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

- $y_l = \frac{h}{2}$ (3.62)

- $I_g = \frac{bh^3}{12}$ (3.63)

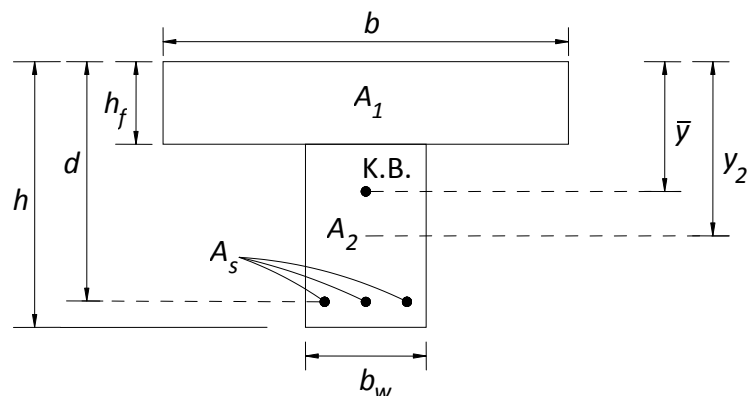
Σε μία διατομή σχήματος T, τα y_l και I_g υπολογίζονται από τις σχέσεις,

- $\bar{y} = \frac{A_1 y_1 + A_2 y_2}{A_1 + A_2}$ (3.64)

- $y_l = h - \bar{y}$ (3.65)

- $I_g = \frac{bh_f^3}{12} + bh_f \left(\bar{y} - \frac{h_f}{2} \right)^2 + \frac{b_w (h - h_f)^3}{12} + b_w (h - h_f) \left(y_l - \frac{h - h_f}{2} \right)^2$ (3.66)

Οι παραπάνω γεωμετρικές ποσότητες της διατομής T, επεξηγούνται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 3-8 Γεωμετρικά Στοιχεία μιας Διατομής σχήματος T

ΒΗΜΑ 4

Υπολογίζεται η θέση του ουδέτερου άξονα c στη ρηγματωμένη διατομή. Για ορθογωνικές διατομές, η θέση c υπολογίζεται από την παρακάτω δευτεροβάθμια εξίσωση

$$\frac{bc^2}{2} + nA_s c - nA_s d = 0 \quad (3.67)$$

Σε μια διατομή σχήματος T, η θέση c υπολογίζεται από την εξίσωση

$$b_w (c - h_f)^2 - 2nA_s (d - c) + bh_f (2c - h_f) = 0 \quad (3.68)$$

ΒΗΜΑ 5

Υπολογίζεται η ροπή αδράνειας της ρηγματωμένης διατομής I_{cr} .

Για ορθογωνική διατομή, η ποσότητα αυτή δίνεται από την εξίσωση

$$I_{cr} = \frac{bc^3}{12} + nA_s (d - c)^2. \quad (3.69)$$

Για διατομή σχήματος T, η ποσότητα αυτή δίνεται από την εξίσωση

$$I_{cr} = \frac{1}{3} b_w (c - h_f)^3 + \frac{1}{12} bh_f^3 + bh_f \left(c - \frac{h_f}{2} \right)^2 + nA_s (d - c)^2. \quad (3.70)$$

ΒΗΜΑ 6

Υπολογίζεται η ενεργή διατομή, I_e των δομικών στοιχείων για κάθε συνδυασμό φόρτισης. Η ενεργή ροπή αδράνειας δίνεται από τον τύπο του Branson,

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (3.71)$$

όπου M_a είναι η μέγιστη ροπή στο στοιχείο υπό συγκεκριμένο φορτίο. Ο υπολογισμός της ενεργούς ροπής γίνεται ανά συνδυασμό φόρτισης. Οι συνδυασμοί αυτοί είναι:

- μόνιμο φορτίο D ,
- μόνιμο και ένα μέρος του κινητού φορτίου $D + aL$,
- μόνιμα και κινητά φορτία $D + L$.

Σε κάθε περίπτωση πρέπει να υπολογίζεται ο όρος M_{cr} / M_a , όπου M_{cr} η ροπή ρηγμάτωσης, όπως έχει υπολογιστεί από την εξίσωση (3.60) στο Βήμα 4 και M_a η ροπή που προκύπτει από το συνδυασμό φόρτισης. Έτσι,

- $M_a = M_D$ για μόνο μόνιμα φορτία,
- $M_a = M_D + aM_L$ για μόνιμο και ένα μέρος του κινητού φορτίου και
- $M_a = M_D + M_L$ για μόνιμα και κινητά φορτία.

Εάν ο όρος M_{cr} / M_a είναι > 1 , τότε η (3.71) δίνει $I_e \geq I_g$. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει ρηγμάτωση και θέτουμε $I_e = I_g$ και $M_{cr} = M_a$ για τον υπολογισμό της βύθισης.

Στην περίπτωση συνεχών δοκών, η ενεργός ροπή αδράνειας υπολογίζεται με παρεμβολή βάσει των εξισώσεων,

$$I_e = 0.7(I_e)_{μέση} + 0.15(I_{e1} + I_{e2})_{στηρίξεις} \quad (3.72)$$

για δοκούς, συνεχείς και στα δύο άκρα και

$$I_e = 0.85(I_e)_{μέση} + 0.15(I_{ec})_{στηρίξεις} \quad (3.73)$$

για δοκούς, συνεχείς μόνο σε ένα άκρο.

ΒΗΜΑ 7

Υπολογισμός των άμεσων μέγιστων βυθίσεων $\Delta_D, \Delta_{LT}, \Delta_L$.

Οι παραπάνω συμβολισμοί αντιστοιχούν σε κάθε συνδυασμό φόρτισης. Η βύθιση υπολογίζεται από την εξίσωση,

$$\Delta = k_3 \frac{Ml^2}{EI_e}, \quad (3.74)$$

όπου k_3 είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από το δομικό σύστημα. Οι τιμές του συντελεστή δίνονται από τον Πίνακα 3-4. Για κάθε συνδυασμό φόρτισης, χρησιμοποιούνται οι ροπές M_α και η ενεργός ροπή αδράνειας I_e που υπολογίστηκαν στο Βήμα 6 για κάθε συνδυασμό φόρτισης.

ΒΗΜΑ 8

Υπολογισμός της μακροχρόνιας μέγιστης βύθισης Δ_{LT} . Ο τύπος που υπολογίζει την μακροχρόνια μέγιστη βύθιση είναι,

$$\Delta_{LT} = \Delta_L + \lambda_\infty \Delta_D + \lambda_i \Delta_{LT}, \quad (3.75)$$

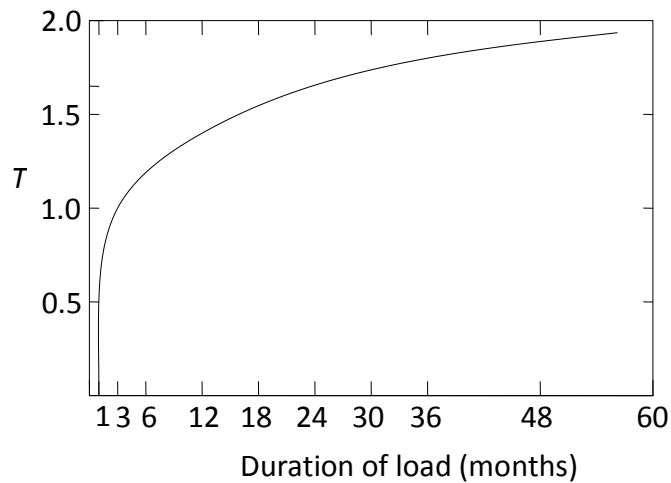
όπου λ είναι ένας συντελεστής που εξαρτάται από τη χρονική στιγμή που εξετάζουμε την βύθιση. Ο συντελεστής λ παρέχεται από τη σχέση

$$\lambda = \frac{T}{1 + 50\rho'}, \quad (3.76)$$

όπου ρ' είναι το ποσοστό του θλιβόμενου οπλισμού, εάν υπάρχει. Η τιμή του T εξαρτάται από τη διάρκεια της φόρτισης και υπολογίζεται από τον Πίνακα 3.7 ή το Σχήμα 3-9.

Πίνακας 3-7 Τιμές του συντελεστή T

Διάρκεια Φόρτισης (Μήνες)	1	3	6	12	24	36	48	60
T_i	0.5	1.0	1.2	1.4	1.7	1.8	1.9	2.0

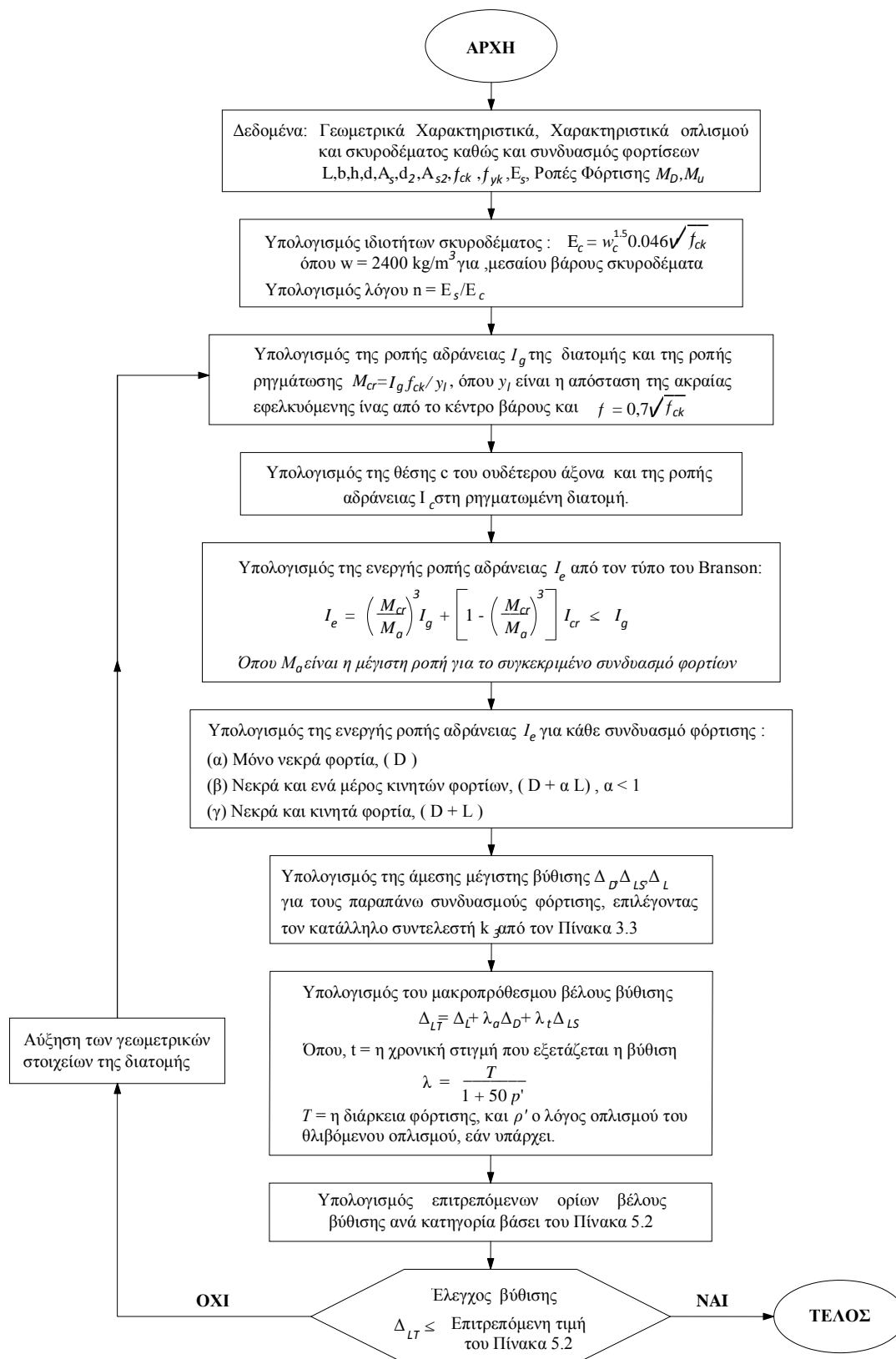


Σχήμα 3-9 Τιμές του συντελεστή T

ΒΗΜΑ 9

Έλεγχος βύθισης

Οι τιμές Δ_{LT} , Δ_L που υπολογίστηκαν παραπάνω, συγκρίνονται με τις τιμές του Πίνακα 3-6. Δηλαδή, οι δύο πρώτοι δομικοί τύποι, που είναι, επίπεδες σκεπές ή δάπεδα που δεν στηρίζουν ή δεν ενώνονται με μη φέροντα στοιχεία που πιθανώς να τραυματιστούν από μεγάλες βυθίσεις, συγκρίνονται με την τιμή Δ_L και οι υπόλοιποι δύο με την τιμή Δ_{LT} . Εάν η τιμή είναι μικρότερη από τις επιτρεπόμενες τότε, η βύθιση είναι αποδεκτή. Εάν η τιμή είναι μεγαλύτερη, τότε πρέπει να μεταβληθούν τα γεωμετρικά στοιχεία του.



Σχήμα 3-10 Διάγραμμα ροής, ελέγχου βελών βύθισης βάσει του ACI 318-11

Κεφάλαιο 4

ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2 ΚΑΙ ΤΟΝ AC 318-11

4.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ EC-2

4.1.1 Εισαγωγή

Η ρηγμάτωση είναι γενικά αναμενόμενη σε δομικά στοιχεία οπλισμένου σκυροδέματος, με ή χωρίς προεντεταμένα στοιχεία, όταν αυτά υπόκεινται σε κάμψη, διάτμηση, στρέψη ή εφελκυσμό, που προέρχεται, είτε από άμεση φόρτιση είτε από παρεμπόδιση των επιβαλλόμενων παραμορφώσεων. Οι ρωγμές προκαλούνται όταν οι εφελκυστικές τάσεις υπερβούν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης, ρωγμές μπορεί να δημιουργηθούν και από άλλες αιτίες, όπως είναι η συστολή ξήρανσης και οι χημικές αντιδράσεις μέσα στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, που προκαλούν διόγκωση. Τέτοιες ρωγμές μπορεί να μην είναι αποδεκτές, αλλά η αποφυγή και ο έλεγχος του δεν αποτελούν αντικείμενο του κεφαλαίου αυτού.

Σύμφωνα με τον EC2, οι ρηγματώσεις που δημιουργούνται σε ένα δομικό στοιχείο θα πρέπει να περιορίζονται σε τέτοιο βαθμό, ώστε να μην παρεμποδίζεται η ομαλή λειτουργία και η ανθεκτικότητα σε διάρκεια μιας κατασκευής ή να οδηγούν σε μη-αποδεκτό αισθητικό αποτέλεσμα σε σχέση με την εμφάνιση της. Ο κώδικας αναφέρει πως η εμφάνιση ρωγμών, χωρίς περιορισμό, μπορεί να επιτρέπεται με την προϋπόθεση ότι δεν παρεμποδίζουν την ομαλή λειτουργία της κατασκευής (παράγραφος (4), κεφάλαιο 7.3 του κώδικα EC2).

4.1.2 Υπολογισμός του εύρους ρωγμής

Η σχετική θεωρία στην οποία βασίζεται ο EC2 έχει αναλυθεί διεξοδικά στο κεφάλαιο 2. Αναφορικά με το μέγιστο εύρος ρωγμής, ο κώδικας συνιστά τις τιμές που βρίσκονται στον Πίνακα 4-1.

Πίνακας 4-1: Συνιστώμενες τιμές του w_{\max} (mm)

Κατηγορία Περιβαλλοντολογικών συνθηκών	Οπλισμένα και προεντεταμένα στοιχεία με τένοντες χωρίς συνάφεια	Προεντεταμένα στοιχεία με τένοντες με συνάφεια
	Οιονεί-μόνιμος συνδυασμός δράσεων	Συχνός συνδυασμός δράσεων
X0, XC1	0.40	0.20
XC2, XC3, XC4	0.30	0.20
XD1, XD2, XS1, XS2, XS3		0.20 (Απόθλιψη)

Ο κώδικας σημειώνει ότι για τις κατηγορίες περιβαλλοντικών συνθηκών X0 και XC1 το εύρος ρωγμής δεν επηρεάζει την ανθεκτικότητα σε διάρκεια, και ότι το σχετικό όριο σε κάθε περίπτωση, τίθεται για την εξασφάλιση αποδεκτής αισθητικής εμφάνισης. Εφόσον δεν τίθενται απαιτήσεις αισθητικής, το όριο αυτό μπορεί να αυξηθεί. Επιπλέον, για τις κατηγορίες XC2, XC3, XC4, πρέπει να ελέγχεται η απόθλιψη και υπό τον οιονεί-μόνιμο συνδυασμό δράσεων. Για δομικά στοιχεία, τα οποία είναι εκτεθειμένα σε κατηγορία περιβάλλοντος XD3, θα πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα, ανάλογα με τη φύση της ουσίας που τα προσβάλλει.

Η τιμή σχεδιασμού του εύρους ρωγμής δεν πρέπει να ξεπερνά τις τιμές του Πίνακα 4-1. Ο υπολογισμός της τιμής σχεδιασμού του εύρους ρωγμής w_k , γίνεται με τη σχέση

$$w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (4.1)$$

όπου το $s_{r,\max}$ είναι η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών ρωγμών, το ε_{sm} είναι η μέση παραμόρφωση του οπλισμού και το ε_{cm} είναι η μέση παραμόρφωση του σκυροδέματος μεταξύ δύο ρωγμών.

Θα πρέπει να υπολογίζεται πρώτα η απόσταση s των ράβδων οπλισμού, που έχουν τοποθετηθεί στη διατομή. Σε περιπτώσεις, που ο οπλισμός με συνάφεια είναι τοποθετημένος σε ευλόγως μικρές αποστάσεις εντός της εφελκυσμένης ζώνης και ικανοποιεί τη σχέση $s \leq 5(c + \varphi / 2)$, τότε η μέγιστη τελική απόσταση των ρωγμών υπολογίζεται από τη σχέση

$$s_{r,\max} = k_3 c + \frac{k_1 k_2 k_4 \varphi}{\rho_{\rho,\text{eff}}} \quad (4.2)$$

Στη σχέση αυτή, οι τιμές k_3, k_4 δίνονται από το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα κάθε χώρας. Συνιστώμενες τιμές από τον κώδικα είναι οι $k_3 = 3.4$ και $k_4 = 0.425$. Έτσι, η παραπάνω σχέση παίρνει τη μορφή

$$s_{r,\max} = 3.4c + 0.425 \frac{k_1 k_2 \varphi}{\rho_{\rho,\text{eff}}} \quad (4.3)$$

όπου, c είναι η επικάλυψη του διαμήκους οπλισμού και φ , η διάμετρος των ράβδων οπλισμού. Το k_1 είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη τις ιδιότητες συνάφειας του οπλισμού και λαμβάνει τις τιμές

$$k_1 = \begin{cases} 0.8 & , \text{ για ράβδους υψηλής συνάφειας} \\ 1.6 & , \text{ για ράβδους με πρακτικώς λεία επιφάνεια.} \end{cases}$$

Το k_2 είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την κατανομή των παραμορφώσεων και παίρνει τις τιμές,

$$k_2 = \begin{cases} 0.5 & , \text{ για κάμψη,} \\ 1.0 & , \text{ για καθαρό εφελκυσμό.} \end{cases}$$

Σε περιπτώσεις έκκεντρου εφελκυσμού, ή για τμήματα μιας διατομής, χρησιμοποιούνται ενδιάμεσες τιμές του k_2 που μπορούν να υπολογιστούν από τη σχέση,

$$k_2 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2\varepsilon_1 \quad (4.4)$$

όπου το ε_1 είναι η μεγαλύτερη και το ε_2 η μικρότερη εφελκυστική παραμόρφωση στα άκρα της θεωρούμενης διατομής, που υπολογίζονται με την παραδοχή ρηγματωμένης διατομής.

Στην περίπτωση που η απόσταση του οπλισμού με συνάφεια υπερβαίνει την τιμή $s > 5(c + \varphi / 2)$, ή, όπου δεν υπάρχει οπλισμός με συνάφεια εντός της εφελκυόμενης ζώνης, μπορεί να βρεθεί ένα άνω όριο για το εύρος ρωγμής, υποθέτοντας την ακόλουθη μέγιστη απόσταση

$$s_{r,\max} = 1.3(h - x). \quad (4.5)$$

Τέλος, σε τοιχώματα, που υπόκεινται σε πρόωρη θερμική συστολή, όταν το εμβαδόν του οριζόντιου οπλισμού A_s είναι μικρότερου του ελάχιστου οπλισμού και στο κάτω μέρος του τοιχώματος παρεμποδίζεται η παραμόρφωση λόγω της ύπαρξης μιας βάσης, που έχει σκυροδετηθεί σε προηγούμενη φάση, η $s_{r,\max}$ μπορεί να θεωρηθεί ίση με το $1.3h$, όπου h είναι το ύψος του τοιχώματος.

Η ενεργή παραμόρφωση ($\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}$), που υπάρχει στη σχέση (4.1), υπολογίζεται από τη σχέση

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0,6 \frac{\sigma_s}{E_s} \quad (4.6)$$

όπου E_s είναι το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού, $\alpha_e = E_s / E_{cm}$, και k_t ένας συντελεστής που εξαρτάται από την διάρκεια φόρτισης και λαμβάνει τις τιμές

$$k_t = \begin{cases} 0.6 & , \text{για βραχυχρόνια φόρτιση} \\ 0.4 & , \text{για μακροχρόνια φόρτιση.} \end{cases}$$

Στη σχέση αυτή το $f_{ct,eff}$ υπολογίζεται από τη σχέση

$$f_{ct,eff} = 0.3 \times f_{ck}^{2/3} \quad (4.7)$$

Η τάση του χάλυβα σε ένα ρηγματωμένο τμήμα σ_s προσδιορίζεται από τη σχέση

$$\sigma_s = \frac{\alpha_e M_{sd} (d - x_c)}{I_{cr}} \quad (4.8)$$

όπου τα x_c , I_{cr} , για μια ορθογωνική διατομή υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.23) και (3.24), ενώ για μια διατομή σχήματος T ή Γ από τις σχέσεις (3.26) και (3.27).

$\alpha_e = E_s / E_{cm}$. Ο ενεργός λόγος οπλισμού $\rho_{p,eff}$ παρέχεται με τη σχέση

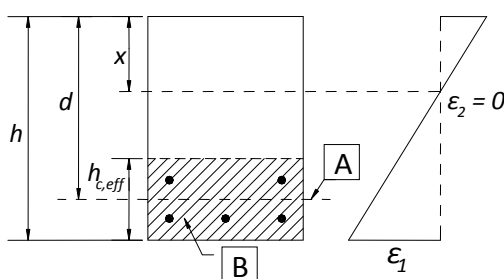
$$\rho_{\rho,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A_p}{A_{c,eff}} \quad (4.9)$$

όπου A_s είναι το εμβαδό διατομής του οπλισμού σε εφελκυσμό. Στην περίπτωση που έχουμε προεντεταμένο σκυρόδεμα A_p , είναι το εμβαδό των τενόντων (με τάνυση πριν ή μετά τη σκλήρυνση) εντός του $A_{c,eff}$, και ξ_1 είναι ο ανοιγμένος λόγος αντοχών σε συνάφεια

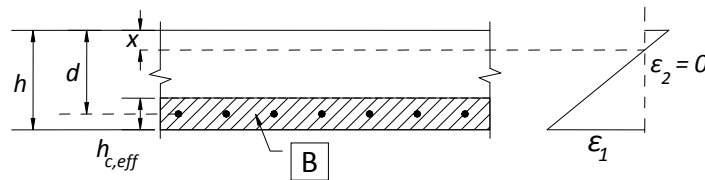
$$\xi_1 = \sqrt{\xi \frac{\varphi_s}{\varphi_p}} \quad (4.10)$$

όπου το φ_s είναι η μέγιστη χρησιμοποιούμενη διάμετρος οπλισμού, το φ_p είναι η ισοδύναμη διάμετρος τένοντα και ξ ο λόγος αντοχών σε συνάφεια προεντεταμένου και χαλαρού οπλισμού.

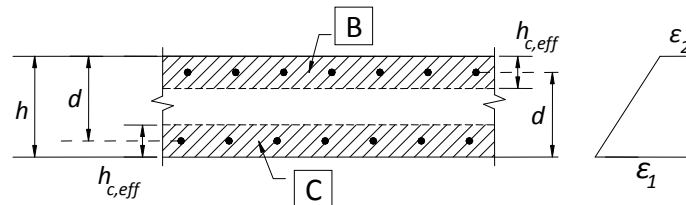
Τέλος, το $A_{c,eff}$ είναι η ενεργή επιφάνεια του εφελκυσμένου σκυροδέματος. Γενικά, η ενεργή επιφάνεια είναι ίση με 2.5 φορές την απόσταση, από το πρόσωπο της εφελκυσμένης ζώνης, έως του κέντρου του A_s (Σχήμα 4-1). Το ύψος όμως της ενεργής επιφάνειας δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $(h-c)/3$, όπου h είναι το ύψος της διατομής και c το βάθος της θλιβόμενης ζώνης.



- α) Δοκός
- A Στάθμη του Κ.Β. του οπλισμού
 - B Ενεργός εφελκυσμένη ζώνη, $A_{c,eff}$



β) Πλάκα B Ενεργός εφελκυσμένη ζώνη, $A_{c,eff}$



γ) Στοιχείο υπό εφελκυσμό

B Ενεργός εφελκυσμένη ζώνη για την άνω επιφάνεια, $A_{ct,eff}$

C Ενεργός εφελκυσμένη ζώνη για την κάτω επιφάνεια, $A_{cb,eff}$

Σχήμα 4-1 Ενεργός Επιφάνεια $A_{c,eff}$ (τυπικές περιπτώσεις)

4.1.3 Ελάχιστος απαιτούμενος οπλισμός

Ο Ευρωκώδικας 2, αντιμετωπίζει το φαινόμενο της ρηγμάτωσης εισάγοντας ένα κριτήριο ελάχιστου απαιτούμενου οπλισμού. Ο έλεγχος της ρηγμάτωσης γίνεται σε περιοχές, όπου αναμένεται να αναπτυχθεί εφελκυσμός. Το ποσοστό αυτό του οπλισμού, μπορεί να προσδιοριστεί από την ισορροπία μεταξύ της εφελκυστικής δύναμης στο σκυρόδεμα αμέσως πριν την εμφάνιση της ρηγμάτωσης, και της εφελκυστικής δύναμης στον οπλισμό κατά τη διαρροή ή και σε χαμηλότερη τάση αν αυτό είναι απαραίτητο για τον περιορισμό του εύρους ρωγμής. Ο ελάχιστος οπλισμός δίνεται από την εξίσωση

$$A_{s,min} = k_c k f_{ct,eff} \frac{A_{ct}}{\sigma_s} \quad (4.11)$$

όπου,

- $A_{s,min}$ είναι το ελάχιστο εμβαδό οπλισμού της εφελκυσμένης ζώνης,

- $A_{ct} = A_{c,eff}$ είναι το εμβαδόν του σκυροδέματος της εφελκόμενης ζώνης που είναι το τμήμα εκείνο της διατομής που θεωρείται ότι βρίσκεται σε εφελκυσμό αμέσως πριν την εμφάνιση της ρηγμάτωσης.
- σ_s είναι η απόλυτη τιμή της μέγιστης επιτρεπόμενης τάσης του οπλισμού αμέσως μετά την εμφάνιση της ρηγμάτωσης. Αυτή λαμβάνει την τιμή f_y , που είναι το όριο διαρροής του οπλισμού. Όταν όμως δεν ικανοποιούνται τα όρια του εύρους ρωγμής, σύμφωνα με τους περιορισμούς στη διάμετρο ή την απόσταση των ράβδων, που θα συζητηθούν παρακάτω, τότε απαιτείται η χρήση χαμηλότερης τιμής.
- $f_{ct,eff}$ είναι η μέση τιμή της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος τη στιγμή που δημιουργείται η πρώτη ρωγμή. Λαμβάνει την τιμή $f_{ct,eff} = f_{ctm}$ ή μικρότερη, $f_{ctm}(t)$, αν η ρηγμάτωση αναμένεται να συμβεί πριν τις 28 ημέρες.
- k είναι ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η επιρροή των ανομοιόμορφων αυτοϊσορροπούμενων τάσεων, που οδηγούν σε μείωση των δυνάμεων που προκύπτουν λόγω περιορισμού της παραμόρφωσης και λαμβάνει τις τιμές,

$$k = \begin{cases} 1.0 & , \text{ για κορμούς με } h \leq 300 \text{ mm ή πέλματα με πλάτη } < 300 \text{ mm} \\ 0.65 & , \text{ για κορμούς με } h \geq 800 \text{ mm ή πέλματα με πλάτη } > 800 \text{ mm,} \end{cases}$$

ενώ για ενδιάμεσες τιμές γίνεται παρεμβολή μεταξύ των παραπάνω τιμών.

- k_c είναι ένας συντελεστής που χρησιμοποιείται για να ληφθεί υπόψη η ανακατανομή των τάσεων εντός της διατομής, αμέσως πριν τη ρηγμάτωση. Ο συντελεστής λαμβάνει την τιμή, $k_c = 1.0$ για καθαρό εφελκυσμό, ενώ για καθαρή κάμψη ή κάμψη με ορθή δύναμη παίρνει τις τιμές,

για ορθογωνικές διατομές και κορμούς πλακοδοκών ή κιβωτιοειδών διατομών

$$k_c = 0.4 \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1(h/h^*)f_{ct,eff}} \right] \leq 1, \quad (4.12)$$

για πέλματα πλακοδοκών ή κιβωτιοειδών διατομών

$$k_c = 0.9 \frac{F_{cr}}{A_{ct} f_{ct,eff}} \geq 0.5. \quad (4.13)$$

Στις παραπάνω σχέσεις το σ_c είναι η μέση τάση του σκυροδέματος, που δρα στο θεωρούμενο τμήμα της διατομής και υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh} \quad (4.14)$$

όπου N_{Ed} είναι η αξονική δύναμη υπό φορτία λειτουργίας στο θεωρούμενο τμήμα της διατομής, και είναι θετική στην περίπτωση θλίψης. Η N_{Ed} προσδιορίζεται λαμβάνοντας τις χαρακτηριστικές τιμές της προέντασης και της ορθής δύναμης για το θεωρούμενο συνδυασμό δράσεων.

Το h^* (m) λαμβάνει τις τιμές

$$h^* = \begin{cases} h & , \text{για } h < 1.0 \text{ m,} \\ 1.0 & , \text{για } h \geq 1.0 \text{ m.} \end{cases} \quad (4.15)$$

Το k_1 είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την επιρροή των αξονικών δυνάμεων στην κατανομή των τάσεων και υπολογίζεται από τη σχέση

$$k_1 = \begin{cases} 1.5 & , \text{αν η } N_{ED} \text{ είναι θλιπτική,} \\ \frac{2h^*}{3h} 1.0 & , \text{αν η } N_{ED} \text{ είναι εφελκυστική.} \end{cases} \quad (4.16)$$

Το F_{cr} είναι η απόλυτη τιμή της μέγιστης εφελκυστικής δύναμης στο πέλμα, αμέσως πριν τη ρηγμάτωση, λόγω της ροπής ρηγμάτωσης η οποία υπολογίζεται βάσει της $f_{ct,eff}$.

4.1.4 Μέγιστη επιτρεπόμενη απόσταση και διάμετρος ράβδων οπλισμού

Ο κώδικας αναφέρει πως η ρηγμάτωση περιορίζεται, όταν η διάμετρος των ράβδων οπλισμού ή η απόσταση μεταξύ τους δεν υπερβαίνουν τα όρια του Πίνακα 4-2. Ο πίνακας εμφανίζει τις βασικές τιμές των μέγιστων διαμέτρων οπλισμού και της μεταξύ τους απόστασης, ανάλογα με το μέγιστο εύρος ρωγμής που εξετάζεται, στη συγκεκριμένη διατομή, και την τάση του οπλισμού. Οι τιμές της μέγιστης διαμέτρου οπλισμού πρέπει να μεταβάλλονται ανάλογα με το είδος της φόρτισης,

- για κάμψη, όπου τουλάχιστον ένα τμήμα της διατομής βρίσκεται σε θλίψη,

$$\varphi_s = \varphi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)} \quad (4.17)$$

- για εφελκυσμό

$$\varphi_s = \varphi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \frac{h_{cr}}{24(h-d)} \quad (4.18)$$

όπου το φ_s είναι η ανοιγμένη μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος ράβδων, το φ_s^* είναι η μέγιστη διάμετρος ράβδων που παρέχεται από τον Πίνακα 4-2, $h_{cr} = h - x_u$ είναι το ύψος της εφελκυσμένης ζώνης αμέσως πριν τη ρηγμάτωση, υπό οιονεί-μόνιμο συνδυασμό δράσεων. Στις περιπτώσεις που το σύνολο της διατομής εφελκύεται, $(h-d)$ είναι η ελάχιστη απόσταση από το κέντρο της στρώσης οπλισμού ως την εξωτερική παρειά του σκυροδέματος. Σε περιπτώσεις μη-συμμετρικής τοποθέτησης του οπλισμού, κάθε παρειά θα πρέπει να εξετάζεται χωριστά.

Πίνακας 4-2 Μέγιστες διαμέτροι και αποστάσεις ράβδων οπλισμού για περιορισμό ρηγμάτωσης ανάλογα με το εύρος ρωγμής w_k κατά τον EC-2

Τάση χάλυβα [MPa]	Εύρος Ρωγμής w_k					
	Μέγιστη διάμετρος ράβδων [mm]			Μέγιστη απόσταση ράβδων [mm]		
	$w_k=0.40$	$w_k=0.30$	$w_k=0.20$	$w_k=0.40$	$w_k=0.30$	$w_k=0.20$
160	40	32	25	300	300	200
200	32	25	16	300	250	150
240	20	16	12	250	200	100
280	16	12	8	200	150	50
320	12	10	6	150	100	-
360	10	8	5	100	50	-
400	8	6	4			
450	6	5	-			

Στις παραπάνω τιμές του πίνακα, έχουν ληφθεί υπόψη τα παρακάτω στοιχεία.

$c = 25\text{mm}$, $f_{ct,eff}=2.9\text{MPa}$, $h_{cr}=0.5$, $(h-d)=0.1h$, $k_1=0.8$, $k_2=0.5$, $k_c=0.4$, $k=1.0$, $k_t=4.0$, $k'=1.0$ και υπό τους κατάλληλους συνδυασμούς δράσεων.

Σε δοκούς με συνολικό ύψος, $h \geq 1.0\text{m}$, στις οποίες ο κύριος οπλισμός συγκεντρώνεται σε μικρό μόνο ποσοστό του ύψους της διατομής, θα πρέπει να τοποθετείται πρόσθετος επιδερμικός οπλισμός για τον περιορισμό της ρηγμάτωσης που εμφανίζεται στις πλευρικές παρειές της δοκού. Ο οπλισμός αυτός πρέπει να κατανέμεται ομοιόμορφα μεταξύ της στάθμης του εφελκυσμένου οπλισμού και του ουδέτερου άξονα, και να βρίσκεται στο εσωτερικό των συνδετήρων. Το εμβαδόν του επιδερμικού οπλισμού δεν πρέπει να είναι μικρότερο από την τιμή που προκύπτει βάσει της εξίσωσης (4.11) λαμβάνοντας τις τιμές των συντελεστών $k=0.5$ και $\sigma_s = f_{yk}$. Η απόσταση και η διάμετρος των ράβδων οπλισμού μπορεί να υπολογίζονται από τον Πίνακα 4-2, κάνοντας την παραδοχή καθαρού εφελκυσμού και τάσης του χάλυβα ίση προς το ήμισυ της τιμής που εκτιμήθηκε για τον κύριο εφελκυσμένο οπλισμό.

4.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ACI 318

4.2.1 Εισαγωγή

Ο Αμερικάνικος κανονισμός ACI 318-11 ελέγχει την καμπτική ρηγμάτωση περιορίζοντας την τάση στον χάλυβα, σε μια ρηγματωμένη διατομή λόγω των φορτίων λειτουργίας, στο 60% της τάσης διαρροής του χάλυβα. Ο κανονισμός, χρησιμοποιεί την έκφραση Gergely-Lutz, η οποία είναι αποτέλεσμα στατιστικής μελέτης, για να υπολογίσει το μέγιστο εύρος ρωγμής. Έπειτα, αντιμετωπίζει το φαινόμενο της ρηγμάτωσης θέτοντας ένα μέγιστο όριο στην απόσταση μεταξύ των ράβδων οπλισμού.

4.2.2 Υπολογισμός Εύρους Ρωγμής

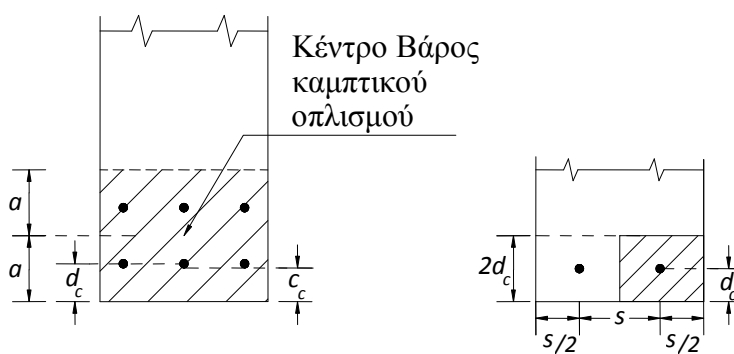
Η έκφραση Gergely-Lutz, η οποία δίνει το μέγιστο εύρος ρωγμής είναι

$$w_{\max} = \left(0.011\beta f_s \sqrt[3]{d_c A}\right) \times 10^{-3} \text{ (mm)} \quad (4.19)$$

- όπου f_s είναι η τάση του χάλυβα υπό λειτουργικό φορτίο. Αυτή υπολογίζεται για την πλήρως ρηγματωμένη διατομή (στάδιο II), και λαμβάνει την τιμή $0.6f_y$ όταν

πρόκειται για συνήθη κατασκευές και εάν δεν έχουν γίνει αναλυτικότεροι υπολογισμοί. Προσοχή πρέπει να δίνεται, εάν το δομικό στοιχείο εκτίθεται σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες όπως, για παράδειγμα σε χημικά εργοστάσια.

- d_c είναι το πάχος της επικάλυψης τους σκυροδέματος, μετρώντας από την ακραία εφελκυστική ίνα έως το κέντρο της ράβδου που βρίσκεται πιο κοντά. (Σχήμα 4-2(α))
- A είναι η ενεργή επιφάνεια του εφελκυσμένου σκυροδέματος που περιβάλλει την καμπτική τάση οπλισμού, με κέντρο βάρους αυτό του εμβαδού του οπλισμού δια τον αριθμό των ράβδων (Σχήμα 4-2(α)). Όταν ο οπλισμός κάμψης αποτελείται από διαφορετικής διαμέτρου ράβδους, τότε ο αριθμός των ράβδων υπολογίζεται ως το συνολικό εμβαδό του οπλισμού δια το εμβαδόν της μεγαλύτερης ράβδου ή σύρματος που χρησιμοποιείται.
- β είναι ο λόγος της απόστασης, από τον ουδέτερο άξονα έως την ακραία εφελκυστική ίνα, και του κέντρου βάρους του οπλισμού. Σε μια ορθογωνική διατομή ο λόγος ισούται με $\beta = (h - c) / (d - c)$ αλλά συνήθως χρησιμοποιείται μια μέση τιμή, η οποία για δοκούς είναι $\beta = 1.2$ ενώ για πλάκες είναι $\beta = 1.35$. Οι τιμές αυτές του συντελεστή β έχουν σαν αποτέλεσμα να περιορίσει το εύρος ρωγμής στις τιμές 0.40 και 0.33 mm.



α) Ενεργός εφελκυσμένη ζώνη A β) Ενεργός εφελκυσμένη ζώνη, $A=2d_c s$

Σχήμα 4-2 Επεξήγηση των συμβόλων A , d_c και s σε (α) Δοκός 6 ράβδων και σε (β) Πλάκα.

Ο κανονισμός θέτει στον Πίνακα 4-3, τα όρια για το μέγιστο εύρος ρωγμής w_{\max} , ανάλογα με τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το δομικό στοιχείο.

Πίνακας 4-3 Επιτρεπόμενες τιμές εύρους ρωγμής κατά τον ACI 318-11

Περιβαλλοντολογικές Συνθήκες	Επιτρεπόμενο Εύρος Ρωγμής	
	inches.	mm
Ξηρό, ή με προστατευτική μεμβράνη	0.016	0.41
Υγρασία	0.012	0.30
Χημικό	0.007	0.18
Εκτεθειμένο σε θάλασσα ή αερομεταφερόμενα άλατα θαλάσσης	0.006	0.15
Μόνιμα Βυθισμένο σε νερό	0.004	0.10

4.2.3 Έλεγχος Ρηγμάτωσης

Για τον έλεγχο της ρηγμάτωσης, έτσι ώστε να τηρούνται τα όρια του Πίνακα 4-3, ο ACI 318-11 υπολογίζει τη μέγιστη απόσταση s , μεταξύ δύο ράβδων οπλισμού στην ζώνη της μέγιστης τάσης σε μια διατομή.

Η απόσταση s μεταξύ δύο ράβδων οπλισμού υπολογίζεται από την σχέση

$$s = 380(280 / f_s) - 2.5c_c \leq 300(280 / f_s) \quad (mm) \quad (4.20)$$

όπου $f_s = 0.6f_y$ και c_c , η καθαρή επικάλυψη του οπλισμού από την κοντινότερη επιφάνεια που βρίσκεται σε εφελκυσμό ως το άκρο του καμπτικού οπλισμού (Σχήμα 4-2(α)). Για συνήθεις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιείται χάλυβας οπλισμού S500, $f_y = 500$ Mpa, υπολογίζεται $f_s = 0.6 \times 500 = 300$ Mpa και η μέγιστη απόσταση μεταξύ των ράβδων οπλισμού είναι $s = 300(280 / f_s) = 280mm$.

Ο ACI 318-99, δηλώνει πως για κτίρια τα οποία βρίσκονται σε ακραίες περιβαλλοντολογικές συνθήκες, ή σχεδιάζονται για να είναι κάτω από την επιφάνεια του νερού, η προϋπόθεση για την απόσταση μεταξύ των ράβδων δεν είναι αρκετή και πως χρειάζεται ειδικός έλεγχος και προσοχή. Ομοίως με τα ερμηνευτικά σχόλια των προηγούμενων κωδίκων, ο ACI 318R-99 αναφέρει πως ο έλεγχος των ρωγμών είναι

ιδιαίτερα σημαντικός, όταν χρησιμοποιείται οπλισμός με τάση χάλυβα μεγαλύτερη των 300 MPa. Στα σχόλια, ο κανονισμός παραπέμπει σε εργαστηριακές δοκιμές, και σε ράβδους με νευρώσεις, οι οποίες επιβεβαιώνουν πως το εύρος ρωγμής υπό φορτίο λειτουργίας είναι ανάλογο με την τάση του χάλυβα.

Κεφάλαιο 5

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό, θα γίνει η εφαρμογή των μεθόδων, που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, για τον έλεγχο της παραμόρφωσης και του εύρους ρωγμής σύμφωνα με τους κώδικες EC2 και ACI 318-11. Η εφαρμογή θα γίνει σε μια δοκό οπλισμένου σκυροδέματος, η οποία θα σχεδιαστεί με τους κανόνες οριακής αντοχής που θέτει ο κάθε κανονισμός και στη συνέχεια θα γίνουν οι έλεγχοι λειτουργικότητας.

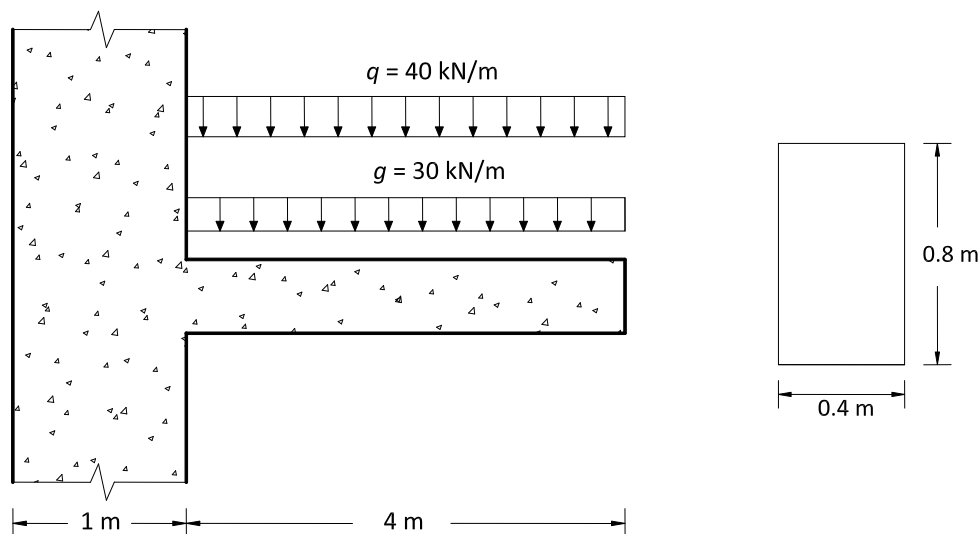
Η δοκός που θα σχεδιαστεί παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Η δοκός πρόκειται να φέρει ένα μόνιμο φορτίο $g = 30\text{kN/m}$, στο οποίο περιλαμβάνεται και το ίδιο βάρος της, καθώς και ένα κινητό φορτίο $q = 40\text{kN/m}$. Τα υλικά που θα χρησιμοποιηθούν είναι, σκυρόδεμα με $f_{ck} = 30\text{ MPa}$, και ράβδοι οπλισμού υψηλής συνάφειας με $f_{yk} = 500\text{ MPa}$. Η δοκός θα είναι εκτεθειμένη σε συνθήκες περιβάλλοντος τύπου XC3 με σχετική υγρασία 50%.

5.2 ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ EC2

5.2.1 Σχεδιασμός Δοκού έναντι οριακής κατάστασης αντοχής

Ο πρόβλος έχει τα παρακάτω δεδομένα:

$l = 4 \text{ m}$, $b = 400 \text{ mm}$, $h = 800 \text{ mm}$, $q = 40 \text{ kN/m}$, $g = 30 \text{ kN/m}$, $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$,
 $f_y = 500 \text{ MPa}$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $RH = 50\%$, $t = 5 \text{ years}$, $t_0 = 3 \text{ days}$, ράβδοι οπλισμού
 υψηλής συνάφειας, κατηγορία τσιμέντου N.



Σχήμα 5-1 Η γεωμετρία, και η φόρτιση της δοκού

Επικάλυψη

Προσδιορισμός της ονομαστικής τιμής επικάλυψης C_{nom}

$$C_{nom} = C_{min} + \Delta C_{dev}$$

όπου $C_{min} = \max\{C_{min,b}; C_{min,dur}\}$ και $\Delta C_{dev} = 10 \text{ mm}$.

Η $C_{min,b}$, για μεμονωμένες ράβδους οπλισμού, έχει την τιμή της διαμέτρου του κυρίου οπλισμού. Άρα με την υπόθεση ότι τοποθετείται οπλισμός $\Phi 26$, $C_{min,b} = 26 \text{ mm}$. Η $C_{min,dur}$ υπολογίζεται με βάση τις περιβαλλοντολογικές συνθήκες στις οποίες εκτίθεται το

δομικό στοιχείο. Για συνθήκες περιβάλλοντος XC3 και για χρόνο ζωής 50 χρόνια, ανήκει στην κατηγορία S4, και άρα $C_{\min,dur} = 25 \text{ mm}$.

$$\text{Οπότε } C_{\min} = \max\{26; 25\} = 26 \text{ mm}$$

$$C_{nom} = C_{\min} + \Delta C_{dev} = 26 + 10 = 36 \text{ mm}$$

Αντίσταση σε πυρκαγιά

Η αντίσταση σε πυρκαγιά, απαιτεί τον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης διάστασης της δοκού $b_{\min,req}$, και τις ελάχιστες απαιτούμενες αποστάσεις a_{req} και $\alpha_{sd,req}$ ($= \alpha_{sd} = \alpha + 10 \text{ mm}$). Απαιτεί επίσης τη σύγκριση αυτών των τιμών με την τιμή b και a_{prov} . Εφόσον έχουμε επιλέξει ράβδους κυρίου οπλισμού $\Phi 26$ και διάμετρο συνδετήρων $\Phi 10$ υπολογίζουμε,

$$a_{prov} = c_{nom} + \Phi_{link} + \Phi_{bar} / 2 = 36 + 10 + 26 / 2 = 59 \text{ mm}, \quad b = 400 \text{ mm}$$

Για αντίσταση σε πυρκαγιά για 1,5 ώρα, κατηγορία REI90 τότε έχουμε,

$$b_{\min,req} = 300 \text{ mm}, \quad a_{req} = a = 40 \text{ mm} \quad \text{και} \quad \alpha_{sd,req} = \alpha + 10 = 40 + 10 = 50 \text{ mm}.$$

Άρα ισχύει $b_{\min,prov} \geq b_{\min,req}$ και $a_{prov} \geq a_{sd,req} \geq a_{req}$ και ο έλεγχος είναι επιτυχής.

Το στατικό μοντέλο της δοκού

Θεωρητικό άνοιγμα δοκού:

$$l_{eff} = l_n + a_1$$

$$a_1 = \min\{1/2h; 1/2t\} = \min\{0.5 \times 0.8; 0.5 \times 1\} = \min\{0.4; 0.5\} = 0.4$$

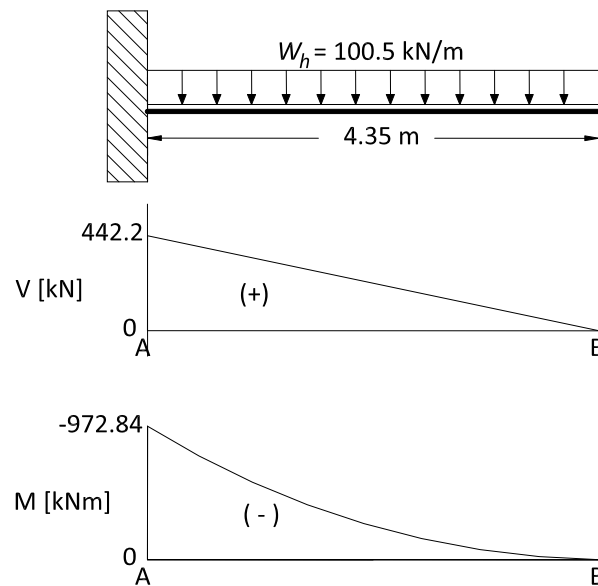
$$l_{eff} = l_n + a_1 = 4 + 0.4 = 4.4 \text{ m}.$$

$$W_h = 1.35g + 1.5q = 1.35 \times 30 + 1.5 \times 40 = 100.5 \text{ KN/m}$$

Η μέγιστη τέμνουσα και η ροπή κάμψης βρίσκονται στην πάκτωση. Τα διαγράμματα των τεμνουσών και ροπών παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα.

$$V_{Ed,A} = W_h \times l_{eff} = 100.5 \times 4.4 = 442.2 \text{ KN}$$

$$M_{Ed,A} = -\frac{W_h \times (l_{eff})^2}{2} = -\frac{100.5 \times (4.4)^2}{2} = -972.84 \text{ kNm}$$

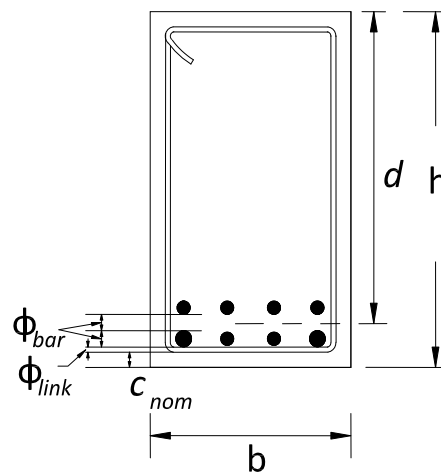


Σχήμα 5-2 Διάγραμμα Τεμνουσών και Ροπών

Οπλισμός Κάμψης

Επειδή εκτιμάται ότι θα χρειαστούν δύο στρώσεις οπλισμού διαμέτρου $\Phi 26$, και συνδετήρες διαμέτρου $\Phi 10$, το στατικό ύψος, d , υπολογίζεται

$$d = h - (C_{nom} + \phi_{bars} + \phi_{link} + \phi_{bars} / 2) = 800 - (36 + 26 + 10 + 26 / 2) = 715 \text{ mm}$$



Σχήμα 5-3 Λεπτομέρεια διατομής

$$K = \frac{M_{Ed}}{bd^2 f_{ck}} = \frac{972.85 \times 10^6}{400 \times 715^2 \times 30} = 0.159 < K_{lim} = 0.167$$

$$\omega = 0.652 - \sqrt{0.425 - 1.5K} = 0.652 - \sqrt{0.425 - 4.5 \times 0.159} = 0.22$$

Εμβαδό Οπλισμού:

$$A_s = \omega bd \frac{f_{ck}}{f_{yk}} = 0.22 \times 400 \times 715 \times \frac{30}{500} = 3775.5 \text{ mm}^2$$

Τίθεται συνολικός οπλισμός 2Φ26+2Φ24 κάτω και 4Φ24 άνω, με συνολικό εμβαδό

$$A_s = 3776 \text{ mm}^2$$

Διάτμηση

Υπολογίζονται οι τιμές της τέμνουσας στην παρειά του στηρίγματος και σε απόσταση d.

$$V_{Ed,f} = V(A) - W \times a_1 = 442.2 - 100.5 \times 0.4 = 402 \text{ KN},$$

$$V_{Ed,d} = V(A) - W \times (d + a_1) = 442.2 - 100.5 \times (0.715 + 0.4) = 330 \text{ KN}$$

Τιμή τέμνουσας για την οποία δεν απαιτείται οπλισμός διάτμησης:

$$V_{Rd,c} = \left[0.12k(100\rho_1 f_{ck})^{1/3} + 0.15\sigma_{cp} \right] bd \geq (0.035k^{3/2} f_{ck}^{1/2} + 0.15\sigma_{cp}) bd$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2 \Rightarrow 1 + \sqrt{\frac{200}{715}} = 1.529 \leq 2$$

$$\rho = \frac{A_s}{bd} \leq 0.02 \Rightarrow \frac{3776}{800 \times 715} = 0.013 < 0.02$$

$$V_{Rd,c} = \left[0.12 \times 1.529 (100 \times 0.014 \times 30)^{1/3} \right] 400 \times 715 \geq (0.035 \times 1.529^{3/2} \times 30^{1/2}) 400 \times 715 \Rightarrow$$

$$V_{Rd,c} = 177.95 \geq 104.03$$

$V_{Ed,d} = 330 \text{ kN} > V_{Rd,c} = 177.95 \text{ KN}$, απαιτείται οπλισμός διάτμησης.

$$V_{Rd,max}(\theta) = \frac{0.36bd(1 - f_{ck}/250)f_{ck}}{\cot \theta + \tan \theta}.$$

Για $\theta = 22^\circ$

$$V_{Rd,max}(\theta) = \frac{0.36 \times 400 \times 715(1 - 30/250)30}{\cot 22 + \tan 22} = 944.09 \text{ KN}$$

$V_{Rd,max} > V_{Ed,f} = 402 \text{ kN}$, δεν απαιτείται αλλαγή της διατομής.

Απαιτούμενοι συνδετήρες:

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{V_{Ed,d}}{0.78df_{yk} \cot \theta} = \frac{330}{0.78 \times 715 \times 30 \times \cot 22} = 0.478$$

Ο λόγος αυτός έχει ελάχιστη τιμή

$$\left[\frac{A_{sw}}{s} \right]_{\min} = \frac{0.08 f_{ck}^{0.5}}{f_{yk}} b = \frac{0.08 \times 30^{0.5}}{500} 400 = 0.35$$

Τοποθετώντας συνδετήρες $\phi 10$ έχουμε, $A_{sw} = 15.7 \text{ mm}^2$

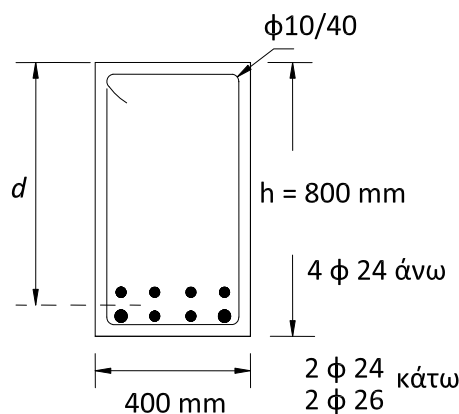
$$\left[\frac{A_{sw}}{s} \right]_{\min} = 0.35 \Rightarrow s_{\min} = \frac{0.35}{A_{sw}} = \frac{0.32}{15.7} = 44.78 \text{ cm}$$

Μέγιστη απόσταση, που μπορώ να τους τοποθετήσω είναι,

$$s_{\max} = 0.75d = 0.75 \times 715 = 53.63 \text{ cm}$$

$$\text{Με } \frac{A_{sw}}{s} = 0.475 \Rightarrow s = \frac{0.478}{15.7} = 30.45 \text{ cm.}$$

Άρα, επιλέγω μια απόσταση s μικρότερη των παραπάνω τιμών, $s = 30 \text{ cm}$ και άρα τοποθετώ συνδετήρες $\Phi 10/30$.



Σχήμα 5-4 Οπλισμός του δομικού στοιχείου βάσει του EC2

5.2.2 Έλεγχος Παραμόρφωσης

Ο έλεγχος της παραμόρφωσης, δηλαδή, η επιτρεπόμενη μέγιστη βύθιση που θα παρουσιάσει το δομικό στοιχείο, μπορεί να γίνει είτε προσεγγιστικά, ελέγχοντας τον λόγο ανοίγματος/στατικού ύψους, είτε μέσω του αναλυτικού υπολογισμού των βελών βύθισης και σύγκρισης αυτών με τις επιτρεπόμενες τιμές.

Αρχικά ελέγχεται το βέλος βύθισης, μέσω του λόγου ανοίγματος/στατικού ύψους χρησιμοποιώντας την παραμετρική σχέση που δίνει ο κανονισμός.

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho} + 3,2\sqrt{f_{ck}} \left(\frac{\rho_0}{\rho} - 1 \right)^{3/2} \right], \text{ εάν } \rho \leq \rho_0$$

$$\frac{l}{d} = K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right], \text{ εάν } \rho > \rho_0$$

όπου

$$\rho_0 = \sqrt{f_{ck}} 10^{-3} = \sqrt{30} \times 10^{-3} = 0.005 \text{ είναι το ποσοστό οπλισμού αναφοράς}$$

$$\rho = A_{s,req} / bd = 3374.55 / (400 \times 715) = 0.013 > 0.005 \text{ άρα ισχύει η δεύτερη σχέση,}$$

$$\rho' = 0, \text{ και για πρόβολο } K = 0.4.$$

Υπολογίζεται

$$\begin{aligned} \frac{l}{d} &= K \left[11 + 1,5\sqrt{f_{ck}} \frac{\rho_0}{\rho - \rho'} + \frac{1}{12} \sqrt{f_{ck}} \sqrt{\frac{\rho'}{\rho_0}} \right] \\ &= 0.4 \left[11 + 1,5\sqrt{30} \frac{0.00547}{0.013 - 0} + \frac{1}{12} \sqrt{30} \sqrt{\frac{0}{0.00547}} \right] = 5.76 \end{aligned}$$

Διόρθωση λόγω τάσης, δε χρειάζεται καθώς $A_{s,prov} \approx A_{s,req}$

$$\text{Άρα } (l/d)_{allow} = 5.76$$

$$(l/d)_{provided} = 4 / 0.715 = 5.59 < (l/d)_{allow}$$

Άρα δεν υπάρχει πρόβλημα βύθισης Στο παράδειγμα αυτό θα επιλυθεί όμως διεξοδικά για να αναλυθεί η διαδικασία που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία.

Αναλυτικός υπολογισμός του βέλου βύθισης

Ο αναλυτικός υπολογισμός, γίνεται με τη διαδικασία των βημάτων, που έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3. Υπολογίζονται τα βέλη βύθισης και συγκρίνονται με τις επιτρεπόμενες τιμές που θέτει ο κανονισμός. Η δοκός θα εξεταστεί για μακροπρόθεσμη διάρκεια φόρτισης, 5 χρόνων, με πρώτη στιγμή φόρτισης τις 3 μέρες, από την κατασκευή. Ο συνδυασμός φόρτισης που χρησιμοποιείται είναι $W_h = 1 \times g + 1 \times q$.

ΒΗΜΑ 1

Υπολογισμός των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. f_{cm}, f_{ctm}, E_{cm}

$$f_{cm} = (f_{ck} + 8) = (30 + 8) = 38 \text{ MPa}$$

Για σκυρόδεμα $\leq C50/60$, έχουμε

$$f_{ctm} = 0.3 f_{ck}^{2/3} = 0.3 \times 30^{2/3} = 2.90 \text{ MPa},$$

$$E_{cm} = 22 \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.3} = 22 \left(\frac{38}{10} \right)^{0.3} = 32.8 \text{ GPa}$$

ΒΗΜΑ 2

Υπολογισμός του συντελεστή ερπυσμού $\varphi(\infty, t_0)$:

Ο συντελεστής ερπυσμού $\varphi(\infty, t_0)$ μπορεί να υπολογιστεί από την:

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 \times \beta_c(t, t_0)$$

Αρχικά, υπολογίζεται το ιδεατό πάχος στοιχείου h_0 ,

$$h_0 = \frac{2A_c}{u} = \frac{2 \times b \times h}{2 \times (b + h)} = \frac{2 \times 400 + 800}{2 \times (400 + 800)} = 266.67 \text{ mm}$$

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0),$$

Για $f_{cm} \leq 35 \text{ MPa}$ είναι

$$\varphi_{RH} = 1 + \frac{1 - RH/100}{0.1 \sqrt[3]{h_0}} = 1 + \frac{1 - 50/100}{0.1 \sqrt[3]{266.67}} = 1.705$$

$$\beta(f_{cm}) = \frac{16,8}{\sqrt{f_{cm}}} = \frac{16,8}{\sqrt{38}} = 2.725$$

$$\beta(t_0) = \frac{1}{(0,1+3^{0.20})} = 0.743$$

$$\text{Άρα } \varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0) = 1.705 \times 2.725 \times 0.743 = 3.453$$

Ο δεύτερος όρος της πρώτης εξίσωσης δίνεται από τη σχέση,

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{\beta_H + t - t_0} \right]^{0.3}$$

όπου, $t = 5$ χρόνια = 5×365 ημέρες, $t_0 = 3$ ημέρες

Για $f_{cm} \leq 35$ ισχύει,

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012RH)^{18} \right] h_0 + 250 \leq 1500 \Rightarrow$$

$$\beta_H = 1.5 \left[1 + (0.012 \times 50)^{18} \right] \times 266.67 + 250 = 639.97 \leq 1500$$

$$\beta_c(t, t_0) = \left[\frac{(t-t_0)}{(\beta_H + t - t_0)} \right]^{0.3} = \left[\frac{(5 \times 365 - 3)}{(639.97 + 5 \times 365 - 3)} \right]^{0.3} = 0.914$$

Έτσι υπολογίζεται ο συντελεστής ερπυσμού $\varphi(\infty, t_0)$,

$$\varphi(\infty, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0) = 3.453 \times 0.914 = 3.155.$$

ΒΗΜΑ 3

Υπολογισμός του ισοδύναμου μέτρου ελαστικότητας $E_{c,eff}$

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \varphi(\infty, t_0)} = \frac{32.83}{1 + 3.155} = 7.90 \text{ GPa}$$

Υπολογισμός του ισοδύναμου λόγου ελαστικότητας a_e .

$$a_e = \frac{E_s}{E_{c,eff}} = \frac{200}{7.90} = 25.31$$

ΒΗΜΑ 4

Υπολογίζεται η θέση x του ουδέτερου άξονα της διατομής, της ροπής αδράνειας της διατομής I και της πολικής ροπής αντιστάσεως του οπλισμού S ως προς το κέντρο βάρους του οπλισμού. Όπου $A_{s2}, d_2 = 0$ αφού δεν υπάρχει οπλισμός θλίψης. Για μια ορθογωνική, τα παραπάνω υπολογίζονται από τις σχέσεις:

Για την αρηγμάτωτη κατάσταση x_u, I_u, S_u .

$$x_u = \frac{\frac{bh^2}{2} + (a_e - 1)(A_s d + A_{s2} d_2)}{bh + (a_e - 1)(A_s + A_{s2})} = \frac{400 \times 800^2}{2} + (25.31 - 1)(3776 \times 715 + 0)}{400 \times 800 + (25.31 - 1)3776} = 470.21 \text{ mm}$$

$$I_u = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - x_u \right)^2 + (a_e - 1) \left[A_s (d - x_u)^2 + A_{s2} (d_2 - x_u)^2 \right] =$$

$$\frac{400 \times 800^3}{12} + 400 \times 800 \left(\frac{400}{2} - 470.21 \right)^2 + (24.31 - 1) \left[3776 (715 - 470.21)^2 \right] \Rightarrow$$

$$I_u = 2.41 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$S_u = A_s (d - x_u) - A_{s2} (d_2 - x_u) = 3776 (715 - 470.21) - 0 = 9.24 \times 10^5 \text{ mm}^3$$

Για τη ρηγματωμένη κατάσταση x_c, I_c, S_c .

$$x_c = \frac{\left[(A_s a_e + A_{s2} (a_e - 1))^2 + 2b (A_s d a_e + A_{s2} d_2 (a_e - 1)) \right]^{0.5} - (A_s a_e + A_{s2} (a_e - 1))}{b} =$$

$$= \frac{\left[(3776 \times 25.31)^2 + 2 \times 400 (3776 \times 715 \times 25.31) \right]^{0.5} - (3776 \times 25.31)}{400} \Rightarrow$$

$$x_c = 392.52 \text{ mm}$$

$$I_c = \frac{bx_c^3}{3} + a_e A_s (d - x_c)^2 + (a_e - 1) A_{s2} (d_2 - x_c)^2 = \frac{400 \times 392.52^3}{3} + 25.31 \times 3776 (715 - 392.52)^2$$

$$I_c = 1.80 \times 10^{10} \text{ mm}^4$$

$$S_c = A_s (d - x_c) - A_{s2} (d_2 - x_c) = 3776 (715 - 392.52) - 0 = 1.22 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

ΒΗΜΑ 5

Υπολογίζεται η ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} , και η εφαρμοζόμενη ροπή M_{QP} .

Η ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} , υπολογίζεται από τη σχέση,

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} I_u}{h - x_u} 10^{-6} \text{ (kNm)}$$

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} I_u}{h - x_u} 10^{-6} = \frac{2.90 \times 2.41 \times 10^{10}}{800 - 470.20} \times 10^{-6} = 212.05 \text{ KNm}$$

ΒΗΜΑ 6

Υπολογισμός της ολικής παραμόρφωσης λόγω συρρίκνωσης ε_{cs}

Η ολική παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης ε_{cs} , υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} + \varepsilon_{ca}$$

Η παραμόρφωση λόγω συρρίκνωσης από ξήρανση, ε_{cd} , υπολογίζεται από τη σχέση

$$\varepsilon_{cd} = \beta(t, t_0) k_h \varepsilon_{cd,0}$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp \left(-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH}$$

$f_{cm0} = 10 \text{ MPa}$, ενώ για κατηγορία τσιμέντου N, οι συντελεστές έχουν τις τιμές, $\alpha_{ds1} = 4$ και $\alpha_{ds2} = 0,12$.

$$\beta_{RH} = 1.55 \left[1 - \left(\frac{RH}{RH_0} \right)^3 \right] = 1.55 \left[1 - \left(\frac{50}{100} \right)^3 \right] = 1.356$$

Ο συντελεστή k_h υπολογίζεται από τον Πίνακα 3-3, με γραμμική παρεμβολή όπου, $h_0 = 266.67 \text{ mm}$.

Από γραμμική παρεμβολή, υπολογίζεται $k_h = 0.783$.

Άρα

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \times \alpha_{ds1}) \times \exp \left(-\alpha_{ds2} \times \frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right) \right] \times 10^{-6} \times \beta_{RH} =$$

$$\varepsilon_{cd,0} = 0.85 \left[(220 + 110 \times 4) \times \exp \left(-0.12 \times \frac{38}{10} \right) \right] \times 10^{-6} \times 1.356 = 4.8 \times 10^{-4}$$

$$\beta(t, t_0) = \frac{(t - t_0)}{(t - t_0) + 0.04\sqrt{h_0^3}} = \frac{(5 \times 365 - 3)}{(5 \times 365 - 3) + 0.04\sqrt{242.056^3}} = 0.913$$

$$\text{Άρα, } \varepsilon_{cd} = \beta(t, t_0) k_h \varepsilon_{cd,0} = 0.913 \times 0.783 \times 0.00048 = 3.4 \times 10^{-4}.$$

$$\text{Η } \varepsilon_{ca}, \text{ δίνεται από την εξίσωση, } \varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty)$$

$$\varepsilon_{ca}(\infty) = 2.5(f_{ck} - 10)10^{-6} = 2.5(30 - 10)10^{-6} = 5 \times 10^{-5}$$

$$\beta_{as}(t) = 1 - \exp(-0.2t^{0.5}) = 1 - \exp(-0.2 \times (5 \times 365)^{0.5}) = 1$$

$$\varepsilon_{ca} = \beta_{as}(t) \varepsilon_{ca}(\infty) = 1 \times 5 \times 10^{-5} = 5 \times 10^{-5}$$

$$\text{Έτσι τελικά, } \varepsilon_{cs} = \varepsilon_{cd} - \varepsilon_{ca} = 4.8 \times 10^{-4} + 5 \times 10^{-5} = 3.95 \times 10^{-4}$$

ΒΗΜΑ 7

Υπολογισμός της ροπής σχεδιασμού.

Αρχικά, θα επιλύσουμε το πρόβλημα με την απλοποιημένη μέθοδο. Στην απλοποιημένη μέθοδο, οι καμπυλότητες υπολογίζονται θεωρώντας όλο το στοιχείο ρηγματωμένο ή αρηγμάτωτο και η τελική καμπυλότητα υπολογίζεται μέσω της χρήση της μέγιστης ροπής, καθώς εκεί αναμένεται να εμφανιστεί το μέγιστο βέλος βύθισης στο δομικό στοιχείο. Υπολογίζεται η μέγιστη ροπή στο στοιχείο. Περίπτωση δοκού προβόλου, με καταναεμημένο φορτίο.

$$M_{\max} = qL^2 / 2 = q4^2 / 2 = 8q$$

Άρα η μέγιστη ροπή για συνδυασμό φορτίου $W = (g + q) = (30 + 40) = 70$ KN είναι

$$M_{QP} = 8 \times 70 = 560 \text{ KNm}$$

ΒΗΜΑ 8

Υπολογισμός του συντελεστή ζ και της καμπτικής καμπυλότητας $\frac{1}{r_n}$

Εάν $M_{cr} > M_{QP}$ τότε το τμήμα είναι αρηγμάτωτο και $\zeta = 0$.

Εάν $M_{cr} \leq M_{QP}$ τότε το τμήμα είναι ρηγματωμένο και υπολογίζουμε:

$$\zeta = 1 - \beta \left(M_{cr} / M_{QP} \right)^2$$

Όπου $\beta = 0.5$ για έλεγχο μακροχρόνιας διάρκειας.

$M_{cr} = 212.05 \leq 560 = M_{QP}$, άρα το τμήμα ρηγματώνεται και έχουμε,

$$\zeta = 1 - \beta \left(M_{cr} / M_{QP} \right)^2 = 1 - 0.5 \left(212.05 / 560 \right)^2 = 0.928$$

Η καμπτική καμπυλότητα υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\frac{1}{r_n} = \zeta \frac{M_{QP}}{E_{c,eff} I_c} + (1 - \zeta) \frac{M_{QP}}{E_{c,eff} I_u} = 0.928 \frac{560}{25.31 \times 1.80 \times 10^{10}} + (1 - 0.928) \frac{560}{25.31 \times 2.41 \times 10^{10}} \Rightarrow$$

$$\frac{1}{r_n} = 3.86 \times 10^{-6} / mm$$

ΒΗΜΑ 9

Η καμπυλότητα λόγω συρρίκνωσης $\frac{1}{r_{cs}}$ υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\begin{aligned} \frac{1}{r_{cs}} &= \zeta \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_c}{I_c} + (1 - \zeta) \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_u}{I_u} = \\ &= 0.928 \times 3.95 \times 10^{-4} \times 25.31 \times \frac{1.22 \times 10^6}{1.80 \times 10^{10}} + (1 - 0.928) \times 3.95 \times 10^{-4} \times 25.31 \times \frac{9.24 \times 10^5}{2.41 \times 10^{10}} = \end{aligned}$$

$$\frac{1}{r_{cs}} = 6.6 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-1}$$

ΒΗΜΑ 10

Το μέγιστο βέλος βύθισης σε ένα δομικό στοιχείο υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\Delta_i = k_3 \frac{1}{r_{i,i}} l^2$$

Όπου k_3 , εξαρτάται από τη γεωμετρία του δομικού συστήματος και δίνεται από τον Πίνακα 3-4. Για δοκό πρόβολο, $k_3 = 0.25$, ενώ για την καμπυλότητα λόγω συρρίκνωσης $k_3 = 0.5$.

$$\Delta_n = k_3 \frac{1}{r_n} l^2 = 0.25 \times 3.86 \times 10^{-6} \times (4 \times 1000)^3 = 15.46 \text{ mm}$$

$$\Delta_{cs} = k_3 \frac{1}{r_{cs}} l^2 = 0.5 \times 6.6 \times 10^{-7} \times (4 \times 1000)^3 = 5.24 \text{ mm}$$

$$\text{Άρα } \Delta_{QP} = \Delta_n + \Delta_{cs} = 15.46 + 5.24 = 20.70 \text{ mm}$$

ΒΗΜΑ 12

Υπολογισμός του ορίου $\Delta_{οριο}$, της επιτρεπόμενης βύθισης που ορίζει ο κανονισμός και έλεγχος βύθισης.

Ο κανονισμός ορίζει ως όριο της μέγιστης παραμόρφωσης, το μέγεθος $l/250$, όπου l το άνοιγμα.

$$\Delta_{οριο} = 4 / 250 = 0.016 = 16 \text{ mm}$$

Έλεγχος Βύθισης

$$\Delta_{QP} = 20.70 > 16 = \Delta_{οριο}$$

Άρα η βύθιση δεν είναι επιτρεπόμενη. Στον πίνακα 5.1 εμφανίζονται οι τιμές υπολογισμένης βύθισης για διαφορετικές χρονικές στιγμές, για τις οποίες πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος.

Πίνακας 5-1 Αποτελέσματα συνολικής βύθισης ανά χρονική στιγμή ελέγχου, βάσει του EC2

Χρονική στιγμή ελέγχου	Συνολική βύθιση Δ_{QP} (mm)	Χρονική στιγμή ελέγχου	Συνολική βύθιση Δ_{QP} (mm)
28 ημέρες	13.20	3 χρόνια	20.18
6 μήνες	16.89	5 χρόνια	20.70
1 χρόνο	18.42	20 χρόνια	21.39
2 χρόνια	19.64	50 χρόνια	21.55

ΒΗΜΑ 7.β

Επιλύεται η διαδικασία με την αριθμητική μέθοδο, λύνοντας το σύστημα που θα προκύψει από τις πεπερασμένες διαφορές.

Χωρίζουμε τη δοκό σε 4 τμήματα. Το καθένα έχει διάσταση ένα μέτρο.

Για κάθε τμήμα υπολογίζεται η ροπή του και ύστερα το βέλος βύθισης.

Η ροπή σε μια απόσταση x από το ελεύθερο άκρο της δοκού, δίνεται από την εξίσωση,

$$M(x) = \frac{W_h x^2}{2} = \frac{70x^2}{2} = 35x^2 \text{ kN/m}$$

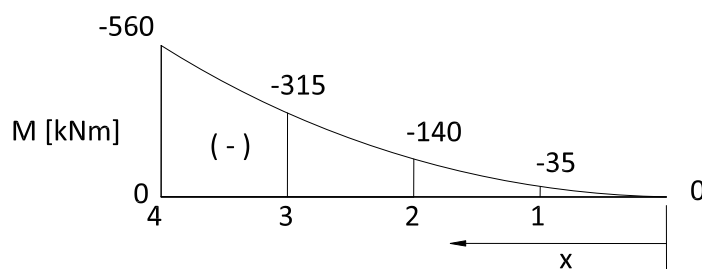
Η ροπή ρηγμάτωσης έχει υπολογιστεί, $M_{cr} = 212.05 \text{ KNm}$.

Η καμπυλότητα λόγω συρρίκνωσης είναι, για μια μη ρηγματωμένη διατομή

$$\frac{1}{r_{cs,unc}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_u}{I_u} = 3.95 \times 10^{-4} \times 25.31 \times \frac{9.24 \times 10^5}{2.41 \times 10^{10}} = 3.82 \times 10^{-7}$$

και για μια ρηγματωμένη

$$\frac{1}{r_{cs,cr}} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S_c}{I_c} = 3.95 \times 10^{-4} \times 25.31 \times \frac{1.22 \times 10^6}{1.80 \times 10^{10}} = 6.72 \times 10^{-7}$$



Σχήμα 5-5 Διάγραμμα Ροπών

- Σημείο 0, $x = 0$.

$M(0) = 0$, άρα και η καμπυλότητα είναι μηδέν. $1/r_{tot,0} = 0$

- Σημείο 1, $x = 1$

$M(1) = 35x^2 = 35 \times 1^2 = 35 < M_{cr} = 212.05 \text{ KNm}$

Άρα η διατομή δε ρηγματώνεται και $\zeta = 0$.

Η Καμπυλότητα υπολογίζεται,

$$1/r_{M,unc} = \frac{M(1)}{I_u E_{c,eff}} = \frac{35}{2.41 \times 10^{10} \times 7.9} = 1.84 \times 10^{-7}$$

Άρα η συνολική καμπυλότητα στο σημείο,

$$1/r_{tot,1} = 1/r_l = 1/r_{cs,unc} + 1/r_{m,unc} = 1.84 \times 10^{-7} + 3.82 \times 10^{-7} = 5.66 \times 10^{-7}$$

▪ **Σημείο 2, $x = 2$**

$$M(2) = 35x^2 = 35 \times 2^2 = 140 < M_{cr} = 212.09 \text{ KNm}$$

Άρα η διατομή δε ρηγματώνεται και $\zeta = 0$.

Η Καμπυλότητα υπολογίζεται,

$$1/r_{M,unc} = \frac{M(1)}{I_u E_{c,eff}} = \frac{140}{2.41 \times 10^{10} \times 7.9} = 7.34 \times 10^{-7}$$

Άρα η συνολική καμπυλότητα στο σημείο,

$$1/r_{tot,2} = 1/r_l = 1/r_{cs,unc} + 1/r_{m,unc} = 7.34 \times 10^{-7} + 3.82 \times 10^{-7} = 1.17 \times 10^{-6}$$

▪ **Σημείο 3, $x = 3$**

$$M(3) = 35x^2 = 35 \times 3^2 = 315 < M_{cr} = 212.09 \text{ KNm}$$

Άρα η διατομή ρηγματώνεται και υπολογίζεται

$$\zeta = 1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M(3)} \right)^2 = 1 - 0.5 \left(\frac{212.09}{315} \right)^2 = 0.773$$

Η Καμπυλότητα για τη μη ρηγματωμένη διατομή στο σημείο, θα είναι

$$1/r_{M,unc} = \frac{M(3)}{I_u E_{c,eff}} = \frac{315}{2.41 \times 10^{10} \times 7.9} = 1.65 \times 10^{-6}$$

Άρα η συνολική καμπυλότητα για τη μη ρηγματωμένη διατομή,

$$1/r_l = 1/r_{cs,unc} + 1/r_{M,unc} = 1.65 \times 10^{-6} + 3.82 \times 10^{-7} = 2.03 \times 10^{-6}$$

Η Καμπυλότητα για τη ρηγματωμένη διατομή στο σημείο, θα είναι

$$1/r_{M,cr} = \frac{M(3)}{I_c E_{c,eff}} = \frac{315}{1.80 \times 10^{10} \times 7.9} = 2.21 \times 10^{-6}$$

Άρα η συνολική καμυλότητα για ρηγματωμένη διατομή

$$1/r_{II} = 1/r_{cs,cr} + 1/r_{M,cr} = 2.21 \times 10^{-6} + 6.76 \times 10^{-7} = 2.89 \times 10^{-6}$$

Άρα η συνολική καμυλότητα στο σημείο 2 θα είναι

$$1/r_{tot,3} = \zeta \frac{1}{r_{II}} + (1-\zeta) \frac{1}{r_I} = 0.773 \times 2.89 \times 10^{-6} + (1-0.773) \times 2.03 \times 10^{-6} = 2.70 \times 10^{-6}$$

▪ **Σημείο 4**, $x = 4$

$$M(4) = 35x^2 = 35 \times 4^2 = 560 < M_{cr} = 212.05 \text{ KNm}$$

Άρα η διατομή ρηγματώνεται και υπολογίζεται

$$\zeta = 1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M(4)} \right)^2 = 1 - 0.5 \left(\frac{212.05}{560} \right)^2 = 0.928$$

Η Καμυλότητα για τη μη ρηγματωμένη διατομή στο σημείο, θα είναι

$$1/r_{M,unc} = \frac{M(4)}{I_u E_{c,eff}} = \frac{560}{2.41 \times 10^{10} \times 7.9} = 2.94 \times 10^{-6}$$

Άρα η συνολική καμυλότητα για τη μη ρηγματωμένη διατομή,

$$1/r_I = 1/r_{cs,unc} + 1/r_{M,unc} = 2.94 \times 10^{-6} + 3.82 \times 10^{-7} = 3.32 \times 10^{-6}$$

Η Καμυλότητα για τη ρηγματωμένη διατομή στο σημείο, θα είναι

$$1/r_{M,cr} = \frac{M(4)}{I_c E_{c,eff}} = \frac{560}{1.80 \times 10^{10} \times 7.9} = 3.94 \times 10^{-6}$$

Άρα η συνολική καμυλότητα για τη ρηγματωμένη διατομή,

$$1/r_{II} = 1/r_{cs,cr} + 1/r_{M,cr} = 3.94 \times 10^{-6} + 6.76 \times 10^{-7} = 4.61 \times 10^{-6}$$

Άρα η συνολική καμυλότητα στο σημείο 2 θα είναι,

$$1/r_{tot,3} = \zeta \frac{1}{r_{II}} + (1-\zeta) \frac{1}{r_I} = 0.927 \times 4.61 \times 10^{-6} + (1-0.927) \times 3.31 \times 10^{-6} = 4.52 \times 10^{-6}$$

Η βύθιση υπολογίζεται από την εξίσωση,

$$\frac{\Delta_{i-1} + \Delta_{i+1} - 2\Delta_i}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{r_{tot,i}}$$

Για να λυθεί το σύστημα, πρέπει να τεθούν κάποιες οριακές συνθήκες. Αυτές είναι για έναν πρόβολο: Στη στήριξη, $x=4$, η βύθιση είναι μηδενική, $\Delta_4 = 0$. Επιπλέον, η κλίση της γωνίας στη στήριξη είναι μηδέν και άρα παρουσιάζει τοπικό ακρότατο. Εάν υποθέσουμε μια φανταστική βύθιση αριστερά της στήριξης, σε απόσταση 1μ, τότε θα ισχύει $\Delta_5 = \Delta_3$. Τέλος η βύθιση δεξιά του σημείου 0, είναι και αυτή μηδενική αφού δεν υπάρχει, $\Delta_{-1} = 0$.

Οι εξισώσεις είναι οι εξής, όπου $\Delta x = 1$

$$\begin{pmatrix} \Delta_0 + \Delta_2 - 2\Delta_1 = \frac{1}{r_{QP,1}} \\ \Delta_1 + \Delta_3 - 2\Delta_2 = \frac{1}{r_{QP,2}} \\ \Delta_2 + \Delta_4 - 2\Delta_3 = \frac{1}{r_{QP,3}} \\ \Delta_3 + \Delta_5 - 2\Delta_4 = \frac{1}{r_{QP,4}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2\Delta_1 + \Delta_2 = \frac{1}{r_{tot,1}} \\ \Delta_1 - 2\Delta_2 + \Delta_3 = \frac{1}{r_{tot,2}} \\ \Delta_2 - 2\Delta_3 = \frac{1}{r_{tot,3}} \\ 2\Delta_3 = \frac{1}{r_{tot,4}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta_0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/r_{tot,1} \\ 1/r_{tot,2} \\ 1/r_{tot,3} \\ 1/r_{tot,4} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.566 \\ 1.116 \\ 2.7 \\ 4.52 \end{pmatrix} \times 10^{-6}$$

Το παραπάνω σύστημα έχει λύση, $A\Delta_i = \frac{1}{r} \Rightarrow \Delta_i = A^{-1} \frac{1}{r}$

$$\begin{pmatrix} \Delta_0 \\ \Delta_1 \\ \Delta_2 \\ \Delta_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 20.4 \\ 13.35 \\ 7.22 \\ 2.26 \end{pmatrix} \text{ (mm)}$$

Ελέγχεται η μεγαλύτερη βύθιση με το όριο που ορίζει ο κανονισμός, $L/250 = 4/250 = 16 < 20.4 \text{ mm}$.

Μη επιτρεπτή βύθιση.

Η τιμή της μέγιστης βύθισης, που προέκυψε από την αριθμητική μέθοδο είναι η ίδια με αυτήν που προέκυψε από την απλοποιημένη μέθοδο.

5.2.3 Έλεγχος Ρηγμάτωσης

Ο έλεγχος της ρηγμάτωσης, περιλαμβάνει τον έλεγχο του εύρους ρωγμής, της απόστασης μεταξύ των ράβδων οπλισμών ως προς τις μέγιστες τιμές που θέτει ο κανονισμός και έλεγχο του εμβαδού του οπλισμού που παρέχεται ως προς μια τιμή. Η μέθοδος που ακολουθείται, έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4.

Εύρος Ρωγμής

Το εύρος ρωγμής υπολογίζεται από τη σχέση $w_k = s_{r,\max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$.

Υπολογίζεται η απόσταση των ράβδων οπλισμού της διατομής,

$$5(c + \varphi / 2) = 5(36 + 26 / 2) = 245 \text{ mm}$$

$$s = (b - 2c - \# \varphi_{bar}) / (\# - 1) = (400 - 2 \times 36 - 4 \times 26) / (4 - 1) = 74.67 \text{ mm} < 245 \text{ mm}$$

Άρα, η μέγιστη απόσταση υπολογίζεται από τη σχέση,

$$s_{r,\max} = 3.4c + 0.425k_1k_2\varphi / \rho_{\rho,eff}$$

Για ράβδους οπλισμού, υψηλής συνάφειας, $k_1 = 0.8$, και για κάμψη $k_2 = 0.5$.

$$\rho_{\rho,eff} = \frac{A_s + \xi_1^2 A_{\rho'}}{A_{c,eff}} = \frac{3776}{A_{c,eff}}$$

Όπου, $A_{c,eff} = b \times h_{c,ef}$

$$\begin{aligned} h_{c,ef} &= \min \{ 2.5(h - d); (h - x) / 3; (h / 2) \} = \\ &= \min \{ 2.5(800 - 715); (800 - 417.85) / 3; (800 / 2) \} = \min \{ 212.5; 188.35 / 3; 400 \} = 188.35 \text{ mm} \end{aligned}$$

Άρα $A_{c,eff} = b \times h_{c,ef} = 400 \times 188.08 = 75339 \text{ mm}^2$

$$\rho_{\rho,eff} = \frac{A_s}{A_{c,eff}} = \frac{3776}{75339} = 0.05$$

Υπολογίζουμε τελικά,

$$s_{r,\max} = 3.4c + 0.425k_1k_2\varphi / \rho_{\rho,eff} = 3.4 \times 36 + 0.425 \times 0.8 \times 0.5 \times 26 / 0.05 = 210.59 \text{ mm}$$

Υπολογισμός του όρου $(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm})$.

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{\sigma_s - k_t \frac{f_{ct,eff}}{\rho_{p,eff}} (1 + \alpha_e \rho_{p,eff})}{E_s} \geq 0.6 \frac{\sigma_s}{E_s}$$

Όπου, $f_{ct,eff} = 0.3 \times f_{ck}^{2/3} = 0.3 \times 30^{2/3} = 2.90 \text{ MPa}$.

$$\sigma_s = a_e M_{sd} (d - x_c) / I_{cr}$$

Όπου τα x_c, I_{cr} υπολογίζονται, όπως υπολογίστηκαν και στον έλεγχο των παραμορφώσεων, χωρίς την επίδραση του ερπυσμού. Δηλαδή λαμβάνεται ο λόγος, $a_e = E_s / E_{cm} = 200 / 32.84 = 6.09$. $M_{sd} = 560 \text{ MPa}$.

$$\sigma_s = a_e M_{sd} (d - x_c) / I_{cr} = 6.09 \times 560 \times (400 \times 234.95) \times 10^6 / 1.81 \times 10^{10} = 232.93 \text{ MPa}$$

Τέλος, $k_t = 0.4$, για μακροχρόνια φόρτιση.

Άρα,

$$\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm} = \frac{232.93 - 0.41 \frac{2.90}{0.050} (1 + 6.09 \times 0.05)}{200} \geq 0.6 \frac{231.57}{200 \times 10^3} \Rightarrow 10.1 \times 10^{-4} \geq 6.95 \times 10^{-4}$$

Όποτε τελικά,

$$w_k = s_{r,max} (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) = 210.59 \times 10.1 \times 10^{-4} = 0.21 \text{ mm}$$

Τιμή μικρότερη από το επιτρεπτό όριο $w_{k,max} = 0.30 \text{ mm}$, για περιβαλλοντολογικές συνθήκες XC3.

Επιπλέον, με $s_{r,max} = 210.59 \text{ mm} > s = 73.3 \text{ mm}$, Ο σχεδιασμός είναι επιτυχής.

Ελάχιστος Οπλισμός

Ο ελάχιστος οπλισμός υπολογίζεται από την εξίσωση,

$$A_{s,min} = k_c k f_{ct,eff} \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

όπου, $f_{ct,eff} = f_{ctm} = 2.90 \text{ MPa}$, $A_{ct} = A_{c,eff} = 75339 \text{ mm}^2$ και $\sigma_s = 233.93 \text{ MPa}$.

για καθαρή κάμψη σε μια ορθογωνική διατομή,

$$k_c = 0.4 \left[1 - \frac{\sigma_c}{k_1 (h/h^*) f_{ct,eff}} \right] \leq 1,$$

όπου, $\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{bh} = 0$ και άρα $k_c = 0.4$.

$$k = \begin{cases} 1.0 & , \text{για κορμούς με } h \leq 300 \text{ mm ή πέλματα με πλάτη } < 300 \text{ mm} \\ 0.65 & , \text{για κορμούς με } h \geq 800 \text{ mm ή πέλματα με πλάτη } > 800 \text{ mm,} \end{cases}$$

Άρα $k = 0.65$

$$A_{s,min} = k_c k f_{ct,eff} \frac{A_{ct}}{\sigma_s} = 0.4 \times 0.65 \times 2.90 \times \frac{75339}{232.93} = 243.58 \text{ mm}^2$$

Ο οπλισμός που παρέχεται είναι $A_s = 3776 > 243.58 \text{ mm}^2$ άρα ικανοποιεί τον έλεγχο.

Μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος οπλισμών

Για κάμψη, η μέγιστη επιτρεπόμενη διάμετρος υπολογίζεται από τη σχέση,

$$\varphi_s = \varphi_s^* \frac{f_{ct,eff}}{2.9} \frac{k_c h_{cr}}{2(h-d)}$$

όπου $h_{cr} = h - x_u = 800 - 417.85 = 382.15 \text{ mm}$ και $k_c = 0.4$.

φ_s^* είναι η βασική μέγιστη επιτρεπόμενη ράβδος.

Με τάση χάλυβα $\sigma_s = 233.93 \text{ MPa}$ και μέγιστο επιτρεπόμενο εύρος ρωγμής $w_k = 0.3$ από τον Πίνακα 4-2 έχουμε, $\varphi_s^* = 18$.

Άρα

$$\varphi_s = 18 \frac{2.90}{2.9} \frac{0.4 \times 382.15}{2(800 - 715)} = 16$$

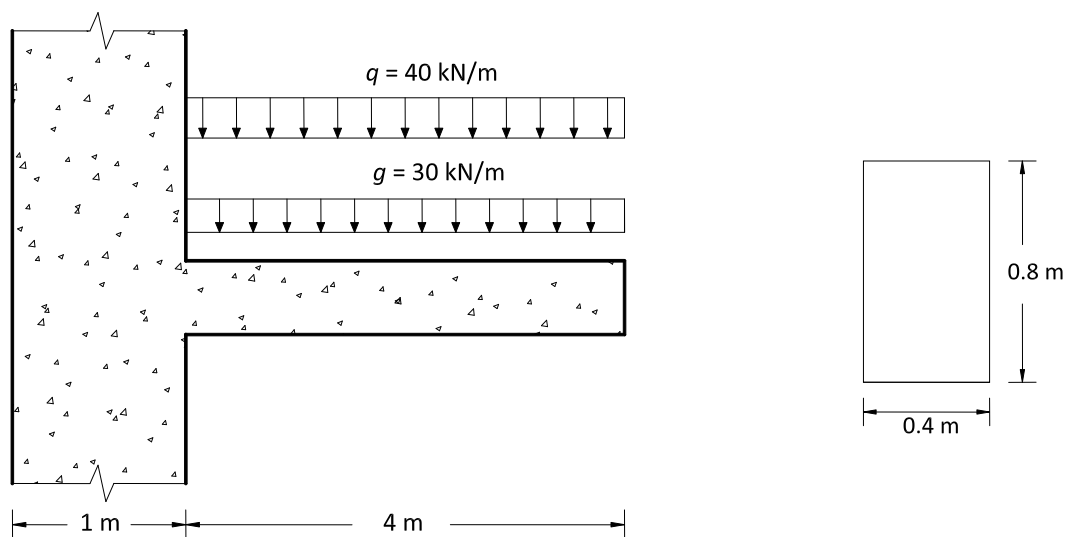
Έχουμε θέσει ράβδους $\Phi 26$, άρα ο έλεγχος δεν είναι επιτυχής. Ο κανονισμός όμως ορίζει, πως εάν ένας από τους δύο περιορισμούς, της μέγιστης διαμέτρου των ράβδων οπλισμού και της μέγιστης μεταξύ τους απόστασης, εξασφαλίζεται, τότε ο έλεγχος είναι επιτυχής. Άρα αφού εξασφαλίζεται η μέγιστη μεταξύ τους απόσταση, τότε ο έλεγχος είναι επιτυχής.

5.3 ACI 318-11

Επίλυση του παραπάνω προβλήματος βάσει του κανονισμού ACI 318-11.

Ο πρόβλος έχει τα παρακάτω δεδομένα:

$l = 4 \text{ m}$, $b = 400 \text{ mm}$, $h = 800 \text{ mm}$, $q = 40 \text{ kN/m}$, $g = 30 \text{ kN/m}$, $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$,
 $f_y = 500 \text{ MPa}$, $E_s = 200 \text{ GPa}$, $RH = 50\%$, $t = 5 \text{ years}$, $t_0 = 3 \text{ days}$, ράβδοι οπλισμού
 υψηλής συνάφειας, περιβαλλοντολογικές συνθήκες, μέτρια υγρασία.



Σχήμα 5-6 Η γεωμετρία, και η φόρτιση της δοκού

5.3.1 Σχεδιασμός Δοκού έναντι οριακής κατάστασης αντοχής

Ο κανονισμός ACI θέτει για επικάλυψη δοκαριού την τιμή, $c = 38 \text{ mm}$.

Στατική Ανάλυση

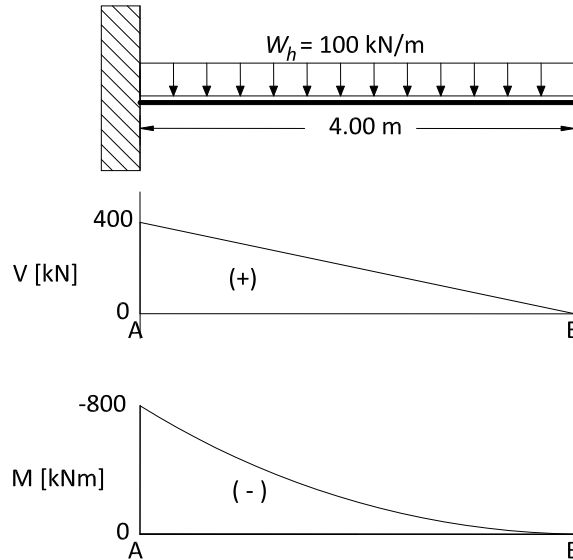
Επειδή εκτιμάται, ότι θα χρειαστούν δύο στρώσεις οπλισμού διαμέτρου $\Phi 26$, και συνδετήρες διαμέτρου $\Phi 10$, το στατικό ύψος, d , υπολογίζεται

$$d = h - (c + \phi_{link} + \phi_{bar} + 26/2) = 800 - (38 + 10 + 26 + 26/2) = 713 \text{ mm}$$

$$W_h = 1.2g + 1.6q = 1.2 \times 30 + 1.6 \times 40 = 100 \text{ kN/m}$$

Η μέγιστη τέμνουσα είναι $V_{\max} = 4 \times W_h = 400 \text{ kN}$

$$M_{\max} = \frac{W_h \times l^2}{2} = \frac{100 \times 4^2}{2} = 800 \text{ kNm}$$



Σχήμα 5-7 Διάγραμμα Τεμνουσών και Ροπών

Οπλισμός Κάμψης

$$M_u = M_{\max} = 800 \text{ kNm}$$

Ο κανονισμός θέτει τους παρακάτω συντελεστές,

$$\phi = 0.90 \text{ και για } f_c \leq 30, \beta_1 = 0.85$$

Υπολογίζονται τα ποσοστά οπλισμού,

$$\rho_b = 0.85 \beta_1 \left[\frac{f_c}{f_y} \right] \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) = 0.85 \times 0.85 \left[\frac{30}{500} \right] \left(\frac{600}{600 + 500} \right) = 0.0236$$

$$\rho_{\max} = \left(\frac{0.003 + f_y / E_s}{0.008} \right) \rho_b = \left(\frac{0.003 + 500 / (200 \times 10^3)}{0.008} \right) 0.0236 = 0.0162$$

$$R_{u,\max} = \phi \rho_{\max} f_y \left(1 - \frac{\rho_{\max} f_y}{1.7 f_c} \right) = 0.90 \times 0.0162 \times 500 \left(1 - \frac{0.0162 \times 500}{1.7 \times 30} \right) = 6.149 \text{ MPa}$$

$$\phi M_n = R_{u,\max} b d^2 = 6.149 \times 400 \times 713^2 = 1250.47 \text{ kNm}$$

$M_u = 800 < \phi M_n = 1205.289 \text{ KNm}$, άρα δεν απαιτείται θλιβόμενος οπλισμός.

Άρα το εμβαδό του οπλισμού υπολογίζεται,

$$A = \rho_{\max} bd = 0.0143 \times 400 \times 713 = 4079.81 \text{ mm}^2$$

Τοποθετούνται, 4Φ26 κάτω, (2Φ26+2Φ24) άνω συνολικού εμβαδού

$$A_s = 3186 + 905 = 4091 \text{ mm}^2 < 4079.81$$

Οπλισμός Διάτμησης

Μέγιστη τιμή της τέμνουσας, για την οποία γίνεται ο υπολογισμός,

$$V_{Ed} = 400 \text{ KN}$$

Ο ACI 318 θεωρεί συντελεστή $\phi = 0.75$ για τον έλεγχο έναντι διάτμησης.

Υπολογισμός της τέμνουσας σε απόσταση d

$$V_u = V_{Ed} - d \times W = 400 - 0.719 \times 100 = 328.7 \text{ KN}$$

Η αντοχή του σκυροδέματος σε διάτμηση δίνεται από τη σχέση,

$$V_c = 0.17 \sqrt{f_c} bd = 0.17 \sqrt{30} \times 400 \times 713 = 265.56 \text{ kN}$$

και άρα, $\phi V_c = 0.75 \times 265.56 = 199.17 \text{ KN}$

Ισχύει, $\phi V_s = V_u - \phi V_c = 328.7 - 199.17 = 129.54 \text{ KN}$

και άρα $V_s = \frac{134.46}{\phi} = \frac{129.54}{0.75} = 172.71 \text{ KN}$

Τοποθετούνται συνδετήρες Φ10 με $A_u = 2 \times 78.5 = 157 \text{ mm}^2$

Η απόσταση συνδετήρων υπολογίζεται ως,

$$V_s = \frac{A_u f_y d}{s} \Rightarrow s = \frac{A_u f_y d}{V_s} = \frac{157 \times 500 \times 713}{172.71 \times 10^3} = 324.07 \text{ mm}$$

Ελέγχεται εάν πρέπει να υπολογίσω ως μέγιστη απόσταση την $d/4$ ή την

$$(0.33 \sqrt{f_c}) bd = (0.33 \sqrt{30}) \times 400 \times 713 = 515.49$$

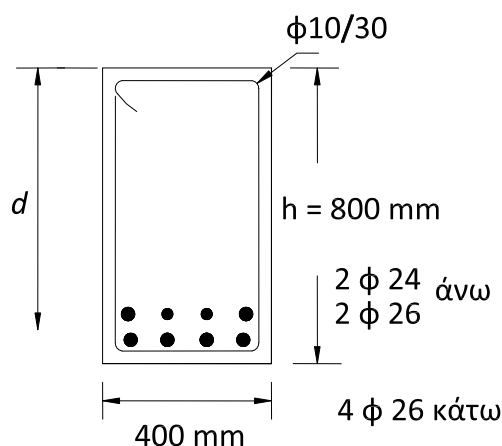
$V_s = 172.71 < 515.49$, άρα υπολογίζω ως μέγιστη απόσταση μόνο την $d/2$.

Μέγιστη απόσταση των συνδετήρων είναι

$$s_{\max} = \begin{cases} \frac{d}{2} \\ \frac{A_u f_y}{0.35b} \end{cases} = \begin{cases} \frac{713}{2} = 356.5\text{mm} = 35.65\text{ cm} \\ \frac{157 \times 500}{0.35 \times 400} = 560.7\text{mm} = 56.7\text{ cm} \end{cases}$$

Άρα με απόσταση $s = 35\text{ cm}$ υπάρχει επαρκής οπλισμός.

Τοποθετούνται συνδετήρες $\Phi 10/35$. Προτιμότερο όμως είναι να θέσουμε $\Phi 10/30$ για μεγαλύτερη ασφάλεια σε περίπτωση που προκύψουν σφαλμάτα κατά την κατασκευή.



Σχήμα 5-8 Οπλισμός της δοκού, βάσει του ACI 318

5.3.2 Έλεγχος παραμόρφωσης

Ο έλεγχος της παραμόρφωσης, δηλαδή, ο υπολογισμός των βελών βύθισης, γίνεται με τη διαδικασία των βημάτων που έχει αναλυθεί στο κεφάλαιο 3.

ΒΗΜΑ 1

Υπολογισμός E_c

$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f_c'} \text{ Μπα}, \text{ για συνήθους βάρους σκυροδέματα } w_c = 2400 \text{ kg} / \text{m}^3,$$

$$\text{άρα } E_c = 2400^{1.5} 0.043 \sqrt{30} = 27691 = 27.69 \text{ GPa}$$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{27.69} = 7.2$$

ΒΗΜΑ 2

Τιμή ελάχιστου πάχους h_{\min} από τον Πίνακα 3-5.

$$h_{\min} = l / 40 = 4 / 40 = 0.1 < 0.8 = h, \text{ άρα απαιτείται έλεγχος.}$$

ΒΗΜΑ 3

Υπολογίζεται η ροπή αδράνειας I_g της διατομής και η ροπή ρηγμάτωσης M_{cr} .

$$M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y_l}$$

$$f_r = 0.7 \sqrt{f_c'} = 0.7 \sqrt{30} = 3.8 \text{ Μpa}$$

$$y_l = \frac{h}{2} = \frac{800}{2} = 400 \text{ mm}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} = \frac{400 \times 800^3}{12} = 17.1 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

$$\text{Άρα, } M_{cr} = \frac{I_g f_r}{y_l} = \frac{17.1 \times 10^9 \times 3.8}{400} \times 10^{-6} = 163.59 \text{ KNm}$$

ΒΗΜΑ 4

Υπολογισμός της θέσης του ουδέτερου άξονα c στη ρηγματωμένη διατομή.

Για ορθογωνικές διατομές, η θέση c , υπολογίζεται από την παρακάτω δευτεροβάθμια εξίσωση,

$$\frac{bc^2}{2} + nA_s c - nA_s d = 0$$

$$\frac{400c^2}{2} + 7.2 \times 4091 \times c - 7.9 \times 4091 \times 713 = 0 \Rightarrow 200c^2 + 29455.2 \times c - 23043375.7 = 0 \Rightarrow$$

$$c^2 + \frac{29455.2}{200} c - \frac{23043375.7}{200} = 0$$

Η εξίσωση δίνει θετική λύση $c = 259 \text{ mm}$

ΒΗΜΑ 5

Υπολογισμός της ροπής αδράνειας ρηγμάτωσης I_{cr}

Για ορθογωνική διατομή, δίνεται από την εξίσωση,

$$I_{cr} = \frac{bc^3}{12} + nA_s(d-c)^2$$

$$I_{cr} = \frac{400 \times 259^3}{12} + 7.2 \times (4091 \times 713 - 259)^2 = 8.41 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

ΒΗΜΑ 6

Υπολογισμός της ενεργούς ροπής αδράνειας, I_e για κάθε συνδυασμό φόρτισης.

Υπολογισμός ροπών, συνδυασμών φόρτισης.

Από πίνακα 3.4 βρίσκουμε την σχέση μέγιστη ροπής που ισχύει για το δομικό σύστημα.

Περίπτωση δοκού μεταξύ δύο στηρίξεων, με καταναμημένο φορτίο.

$$M_{\max} = qL^2 / 2 = q4^2 / 2 = 8q$$

Μόνο νεκρό φορτίο (D)

$$g = 40 \text{ N}, \text{ \acute{a}\rho\alpha } M_D = 8q = 8 \times 30 = 240 \text{ kNm}$$

$M_{cr} / M_D = 162.59 / 240 = 0.681 < 1$, \acute{a}\rho\alpha υπολογίζουμε ενεργή ροπή αδράνειας

$$I_{e,D} = \left(\frac{M_{cr}}{M_D} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_D} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \text{ \acute{o}\pi\omicron\upsilon, } \left(\frac{M_{cr}}{M_D} \right)^3 = 0.681^3 = 0.317$$

$$I_{e,D} = 0.317 \times 17.1 \times 10^9 + [1 - 0.317] 8.57 \times 10^9 = 11.1 \times 10^9 < I_g = 17.1 \times 10^9$$

$$\text{\acute{A}\rho\alpha } I_{e,D} = 11.1 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

Νεκρό και μέρος κινητού φορτίου (D + αL)

$$a\% = 60\%$$

$$\text{\acute{A}\rho\alpha } M_{(D+\alpha L)} = 8q = 8(D + \alpha L) = 8(30 + 0.6 \times 40) = 432 \text{ KNm}$$

$$I_{e,(D+aL)} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{(D+aL)}} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{(D+aL)}} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g$$

$$I_{e,(D+aL)} = 8.9 \times 10^9 \text{ mm}^4 < I_g = 17.1 \times 10^9$$

Νεκρά και Μόνιμα φορτία

$$M_{(D+L)} = 8q = 8(D+L) = 8(30+40) = 560 \text{ kNm}$$

$$I_{e,(D+L)} = \left(\frac{M_{cr}}{M_{(D+L)}} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_{(D+L)}} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g$$

$$I_{e,(D+L)} = 8.62 \times 10^9 \text{ mm}^4 < I_g = 17.1 \times 10^9$$

ΒΗΜΑ 7

Υπολογισμός της άμεσης μέγιστη βύθισης $\Delta_D, \Delta_{L+D}, \Delta_L$.

Η βύθιση υπολογίζεται από την εξίσωση,

$$\Delta = k_3 \frac{Ml^2}{EI_e}$$

Από τον Πίνακα 3.4 βρίσκουμε, $k_3 = 0.25$ για πρόβολο.

$$\Delta_i = k_3 \frac{M_{ai} l^2}{E_c I_{ei}} = 0.25 \frac{(4 \times 1000)^2}{27.69 \times 10^3} \frac{M_{ai}}{I_{ei}} = 144.45 \frac{M_{ai}}{I_{ei}}$$

Άρα έχουμε,

$$\Delta_D = 144.45 \frac{M_D}{I_{e,D}} = 144.49 \frac{240 \times 10^6}{11.1 \times 10^9} = 3.11 \text{ mm}$$

$$\Delta_{L+D} = 144.49 \frac{M_{(D+L)}}{I_{e,(D+L)}} = 144.49 \frac{560 \times 10^6}{9.00 \times 10^9} = 9.38 \text{ mm}$$

$$\Delta_L = \Delta_{L+D} - \Delta_D = 9.38 - 3.11 = 6.27 \text{ mm}$$

$$\Delta_{LS} = 144.49 \frac{M_{(D+aL)}}{I_{e,(D+aL)}} - \Delta_D = 144.49 \frac{432 \times 10^6}{8.89 \times 10^9} - 3.2 = 3.92 \text{ mm}$$

ΒΗΜΑ 8

Υπολογισμός μακροπρόθεσμης, μέγιστης βύθισης Δ_{LT}

Ο τύπος που υπολογίζει την μακροπρόθεσμη μέγιστη βύθιση είναι,

$$\Delta_{LT} = \Delta_L + \lambda_{\infty}\Delta_D + \lambda_1\Delta_{LS}$$

όπου λ ένας συντελεστής που εξαρτάται από την χρονική στιγμή που εξετάζουμε τη βύθιση

$$\lambda = \frac{T}{1+50\rho'}$$

Η τιμή του T εξαρτάται από τη διάρκεια της φόρτισης και υπολογίζεται από το Σχήμα 3-9 ή τον Πίνακα 3-7. Θεωρούμε διάρκεια κινητής φόρτισης, όμοια με αυτή του μόνιμου φορτίου. Έτσι για $t \geq 5$ χρόνια, $T_1 = T_{\infty} = 2$

$\rho' = 0$ αφού δεν υπάρχει θλιβόμενος σπλισμός.

$$\text{Τότε } \lambda_1 = \lambda_{\infty} = \frac{2}{1} = 2$$

$$\text{Άρα } \Delta_{LT} = \Delta_L + \lambda_{\infty}\Delta_D + \lambda_1\Delta_{LS} = 6.27 + 2 \times 3.11 + 2 \times 3.92 = 20.33 \text{ mm}$$

$$\Delta_{LT} = 20.33 \text{ mm}$$

ΒΗΜΑ 9

Έλεγχος βύθισης.

Οι τιμές των Δ_{LT}, Δ_L που υπολογίστηκαν παραπάνω, συγκρίνονται με τις τιμές που προκύπτουν από τον Πίνακα 3-6.

Από πίνακα 4.2 προκύπτουν τα εξής όρια:

$$l/180 = 22.22 > \Delta_L = 6.27$$

$$l/360 = 11.11 > \Delta_L = 6.27$$

$$l/240 = 16.66 < \Delta_{LT} = 20.33$$

$$l/480 = 8.33 < \Delta_{LT} = 20.33$$

Άρα η χρήση του στοιχείου, περιορίζεται μόνο στις πρώτες δύο κατηγορίες, για πατώματα ή στέγες που δεν στηρίζουν ή δεν εδράζονται σε μη φέροντα στοιχεία που ενδέχεται να τραυματιστούν από μεγάλες βυθίσεις.

Για διάφορες, δηλαδή διαφορετικές τιμές των λ , εμφανίζονται τα παρακάτω αποτελέσματα, θέτοντας ως διάρκεια φόρτισης των κινητών φορτίων κατά 3 μήνες λιγότερου από αυτές των μονίμων φορτίων. Για $t > 5$ χρόνια, οι συντελεστές έχουν τη μέγιστη τιμή, 2, και η μακροχρόνια παραμόρφωση παραμένει σταθερή.

Πίνακας 5-2 Αποτελέσματα συνολικής βύθισης ανά χρονική στιγμή ελέγχου, βάσει του ACI 318

Χρονική στιγμή ελέγχου	Συνολική βύθιση Δ_{LT} (mm)	Χρονική στιγμή ελέγχου	Συνολική βύθιση Δ_{LT} (mm)
28 ημέρες	13.3	3 χρόνια	18.59
6 μήνες	15.59	5 χρόνια	20.33
1 χρόνο	16.63	20 χρόνια	20.33
2 χρόνια	17.64	50 χρόνια	20.33

5.3.3 Έλεγχος Ρηγμάτωσης

Ο έλεγχος της ρηγμάτωσης αναφέρεται στον έλεγχο του εύρους ρωγμής και της απόστασης μεταξύ των ράβδων οπλισμού ως προς τις μέγιστες τιμές που θέτει ο κανονισμός. Η μέθοδος που ακολουθείται, έχει περιγραφεί στο κεφάλαιο 4.

Η έκφραση Gergely-Lutz, η οποία δίνει το μέγιστο εύρος ρωγμής είναι

$$w_k = \left(0.011\beta f_s \sqrt[3]{d_c A}\right) \times 10^{-3} \text{ (mm) ,όπου } \beta = 1.2 \text{ για δοκούς.}$$

$$f_s = \frac{M_u n}{I_{cr}} (d - c) = \frac{560 \times 7.2}{8.41 \times 10^9} (713 - 259) \times 10^6 = 218.43 \text{ MPa}$$

d_c είναι η απόσταση από την ακραία εφελκυστική ίνα, έως το κέντρο βάρους του πρώτου οπλισμού.

$$d_c = c + \phi_{bar} / 2 = 38 + 26 / 2 = 51 \text{ mm}$$

$$A = bd_c \times 2 / \#_{bars} = 400 \times 51 \times 2 / 4 = 10200 \text{ mm}^2$$

$$w_k = \left(0.011 \times 1.2 \times 216.51 \sqrt[3]{65.5 \times 10200} \right) \times 10^{-3} = 0.23 \text{ mm}$$

Για περιβαλλοντολογικές συνθήκες με υγρασία, το επιτρεπόμενο εύρος ρωγμής είναι

$$w_{k,max} = 0.30 \text{ mm} . \text{ Άρα αποδεκτό.}$$

Η μέγιστη απόσταση των ράβδων οπλισμού δίνεται από τη σχέση,

$$s_{max} = 380(280 / f_s) - 2.5c_c \leq 300(280 / f_s)$$

$$s_{max} = 380(280 / 218.43) - 2.5 \times 38 \leq 300(280 / 218.43)$$

$$s_{max} = 392.11 \leq 384.56 \text{ mm}., \text{ Άρα } s_{max} = 384.56 \text{ mm}$$

Υλοποιημένο s ,

$$s = (b - 2 \times c - 2 \times \phi_{link} - \# \times \phi_{bar}) / 3 = (400 - 2 \times 38 - 2 \times 10 - 4 \times 24) / 3 = 74.67 \text{ mm} < 384.56$$

Επιπλέον, εάν τεθεί $f_s = 0.6f_y = 0.6 \times 500 = 300 \text{ MPa}$, τότε $s_{max} = 259.67$ και άρα και σε αυτή την περίπτωση ο σχεδιασμός είναι αποδεκτός.

Κεφάλαιο 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

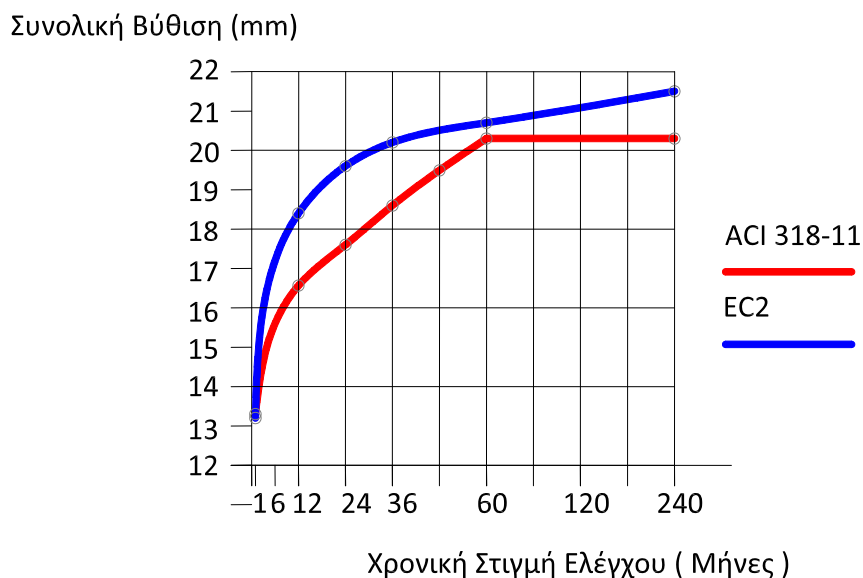
Από την παρούσα εργασία προέκυψαν τα παρακάτω συμπεράσματα.

1. Για τον υπολογισμό των παραμορφώσεων, οι δύο κανονισμοί, αν και βασίζονται στην ίδια θεωρία διαφέρουν ως προς τον τρόπο αντιμετώπισης. Το πρόβλημα ανάγεται στον τρόπο παρεμβολής μεταξύ των δύο καταστάσεων λειτουργίας ενός δομικού στοιχείου, πριν και μετά τη ρηγμάτωση του. Ο EC2, υπολογίζει, ξεχωριστά, την καμπυλότητα του στοιχείου πριν και μετά τη ρηγμάτωση του και χρησιμοποιεί ένα συντελεστή παρεμβολής, ζ , για να υπολογίσει την τελική καμπυλότητα και την τελική βύθιση του δομικού στοιχείου. Ο ACI 318-11 πραγματοποιεί αυτή την παρεμβολή, με την εμπειρική εξίσωση του Branson, η οποία υπολογίζει την ενεργή ροπή αδράνειας της διατομής, ή οποία είναι η ροπή αδράνειας της διατομής στην ενδιάμεση κατάσταση. Η ροπή αυτή, η οποία προκύπτει από την παρεμβολή μεταξύ της ροπής αδράνειας της ρηγματωμένης και της μη ρηγματωμένης διατομής, στη συνέχεια χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του βέλους βύθισης του στοιχείου. Και στους δύο κανονισμούς, οι συντελεστές παρεμβολής προκύπτουν από το λόγο της ροπής στο σημείο ως προς τη ροπή στην οποία ρηγματώνεται το στοιχείο. Η ανάλυση με τον κανονισμό EC2, και ιδιαίτερα αυτή με την αριθμητική μέθοδο, με χρήση των πεπερασμένων διαφορών, είναι αρκετά αναλυτική και μπορεί και υπολογίζει αναλυτικά όλες τις βυθίσεις κατά μήκος ενός στοιχείου. Γενικά, από τα αριθμητικά παραδείγματα φαίνεται πως οι τιμές που προκύπτουν από τη μέθοδο EC2 είναι μεγαλύτερες από αυτές του ACI.

2. Οι δύο κανονισμοί διαφέρουν στον τρόπο υπολογισμού της επίδρασης του ερπυσμού και της συρρίκνωσης στον υπολογισμό των παραμορφώσεων. Ο EC2, υπολογίζει αναλυτικά το συντελεστή ερπυσμού $\varphi(\infty,0)$ και ύστερα τον υιοθετεί για να υπολογίσει το ενεργό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, $E_{c,eff}$, το οποίο και χρησιμοποιεί στους υπολογισμούς των καμπυλοτήτων. Όσο αφορά την επίδραση της συρρίκνωσης, ο κανονισμός υπολογίζει αναλυτικά την τιμή της καμπυλότητας που οφείλεται σε αυτήν, και την προσθέτει στις καμπυλότητες που οφείλονται στα φορτία, για μια ρηγματωμένη και μη διατομή. Ο ACI 318-11, χρησιμοποιεί μια τελείως διαφορετική προσέγγιση, εμπειρικού χαρακτήρα. Ο κανονισμός υπολογίζει ένα συντελεστή ερπυσμού λ , ο οποίος εξαρτάται από τη διάρκεια της φόρτισης, μέσω διαγράμματος, και ο οποίος πολλαπλασιάζεται στην άμεση βύθιση και δίνει την μακροπρόθεσμη τιμή της. Ο συντελεστής αυτός περιλαμβάνει τις επιδράσεις του ερπυσμού και συρρίκνωσης. Από τη φύση αλλά και από τα αποτελέσματα των παραπάνω διαδικασιών, συνάγεται, πως η προσέγγιση του EC2 είναι αποτελεσματικότερη, καθώς ο συντελεστής λ , του κανονισμού ACI 318-11, είναι αρκετά συντηρητικός και προσεγγιστικός. Οι τελικές βυθίσεις που υπολογίστηκαν από τον κάθε κανονισμό παρουσιάζονται στον Πίνακα 6-1.

Πίνακας 6-1 Αποτελέσματα βέλων βύθισης του αριθμητικού παραδείγματος του κεφαλαίου 5

Χρονική στιγμή ελέγχου	Συνολική βύθιση		Διαφορά
	EC2	ACI 318-11	
28 ημέρες	13.20	13.30	-0.1
6 μήνες	16.89	15.59	1.3
1 χρόνο	18.42	16.63	1.79
2 χρόνια	19.64	17.64	2.0
3 χρόνια	20.18	18.59	1.59
5 χρόνια	20.70	20.33	0.37
20 χρόνια	21.39	20.33	1.06
50 χρόνια	21.55	20.33	1.22



Σχήμα 6-1 Σύγκριση των αποτελεσμάτων των παραμορφώσεων του παραδείγματος του κεφαλαίου 5

- Μια άλλη διαφορά μεταξύ των δύο κανονισμών, είναι στα όρια που θεσπίζουν για τις επιτρεπόμενες τιμές. Ο ACI αναφέρεται σε περισσότερες κατηγορίες από ότι ο EC2. Όσον αφορά την άμεση βύθιση υπάρχει μια διαφοροποίηση, καθώς ο ACI αναφέρεται σε περισσότερες κατηγορίες, και είναι πιο ελαστικός για επίπεδα δώματα και πιο συντηρητικός για τα δάπεδα, ενώ ο EC2 χρησιμοποιεί την ίδια τιμή για αυτές τις περιπτώσεις. Όσο αφορά τη συνολική βύθιση, οι δύο κανονισμοί θεσπίζουν σχεδόν τα ίδια όρια.
- Για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής, οι δύο κανονισμοί βασίζονται κυρίως σε ημι-εμπειρικές εξισώσεις για τον υπολογισμό του μέγιστου εύρους ρωγμής, οι οποίες βασίζονται στην ίδια θεωρία. Τα όρια που θέτουν οι δύο κανονισμοί είναι ίδιου μεγέθους, με τον ACI να υιοθετεί πιο συντηρητικές τιμές για κατασκευές που εκτίθενται σε δυσμενείς περιβαλλοντολογικές συνθήκες. Για τον περιορισμό του εύρους ρωγμής, και οι δύο κανονισμοί χρησιμοποιούν το κριτήριο της μέγιστης απόστασης μεταξύ των ράβδων οπλισμού, ως προς μια μέγιστη τιμή. Ο ACI 318-11

χρησιμοποιεί αυτό το κριτήριο για να ελέγξει τη ρηγμάτωση, ενώ ο EC2 υπολογίζει επιπλέον, έναν ελάχιστο απαιτούμενο καμπτικό οπλισμό διατομής.

Πίνακας 6-2 Αποτελέσματα ελέγχου έναντι ρηγμάτωσης, του παραδείγματος του κεφαλαίου 5

Έλεγχος Ρηγμάτωσης		
	EC-2	ACI 318-11
w_k (mm)	0.22	0.23
s_{max} (mm)	217.27	254.98

5. Τέλος, μέσα από τα παραδείγματα, συνάγεται ότι ο EC2 παρέχει μεγαλύτερες εγκάρσιες μετατοπίσεις σε σχέση με το κανονισμό ACI. Έτσι, ο κανονισμός κρίνεται πιο συντηρητικός από ότι ο ACI. Ο ACI περιλαμβάνει μικρότερο όγκο εργασίας, και βασίζεται σε περισσότερες απλοποιητικές παραδοχές, όπως είναι αυτή με τον συντελεστή λ , στον υπολογισμό των μακροχρόνιων βυθίσεων. Σε κάθε περίπτωση, η τάξη μεγέθους των αποτελεσμάτων είναι η ίδια, με όλες τις παραδοχές, όπως για παράδειγμα της διάρκειας φόρτισης, που έχουν ληφθεί, σε συνδυασμό με τις διαφορετικές μεθόδους σχεδιασμού του δομικού στοιχείου, έναντι οριακής κατάστασης αντοχής.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΒΕΛΩΝ ΒΥΘΙΣΗΣ ΕΝΟΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΩΝ ΠΕΠΕΡΑΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ

Θεωρείται μια δοκός με άνοιγμα L . Το άνοιγμα της δοκού χωρίζεται σε n πεπερασμένα ανοίγματα ίσου μήκους $\Delta x^2 = L/n$ (Σχήμα Α.1). Στα σημεία της δοκού $1, 2, \dots, n$ οι κατακόρυφες βυθίσεις της δοκού είναι $\Delta_0, \Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$. Σε κάθε διάστημα αντιστοιχεί μια μέση τιμή κλίσης θ_i της καμπυλότητας, που είναι ίση με

$$\theta_1 = \frac{\Delta_1 - \Delta_0}{\Delta x}, \theta_2 = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{\Delta x}, \dots, \theta_n = \frac{\Delta_n - \Delta_{n-1}}{\Delta x} \quad (4.21)$$

Συνεπώς η καμπυλότητα στο σημείο 1 θα είναι

$$k_1 = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\Delta x} = \frac{\Delta_0 + \Delta_2}{\Delta x} - 2\Delta_1 \quad (4.22)$$

Αν όμως στο σημείο 1 εφαρμόσουμε τη σχέση βρίσκεται η τιμή $\frac{1}{r_{QP,1}}$ χρησιμοποιώντας

τη ροπή που αντιστοιχεί στη θέση 1, δηλαδή, της $M_{QP,1}$ ακολουθώντας τα βήματα 4-10 του κεφαλαίου 3.2.5, η διαφορική εξίσωση της ελαστικής γραμμής για την τριάδα των σημείων 0,1,2 παράγει

$$\frac{\Delta_0 + \Delta_2 - 2\Delta_1}{(\Delta x)^2} = \frac{1}{r_{QP,1}} \quad (4.23)$$

Από τη σχέση αυτή έχουμε,

$$\Delta_0 + \Delta_2 - 2\Delta_1 = \frac{(\Delta x)^2}{r_{QP,1}}$$

Ομοίως για τα υπόλοιπα διαστήματα έχουμε,

$$\Delta_1 + \Delta_3 - 2\Delta_2 = \frac{(\Delta x)^2}{r_{QP,2}}$$

$$\Delta_2 + \Delta_4 - 2\Delta_3 = \frac{(\Delta x)^2}{r_{QP,3}}$$

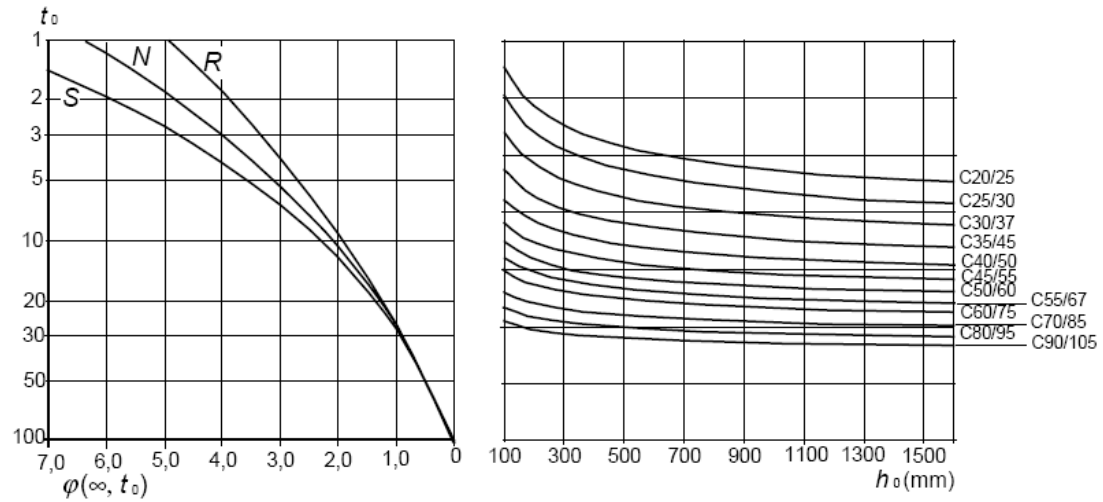
$$\vdots$$

$$\Delta_{n-2} + \Delta_n - 2\Delta_{n-1} = \frac{(\Delta x)^2}{r_{QP,n-1}}$$

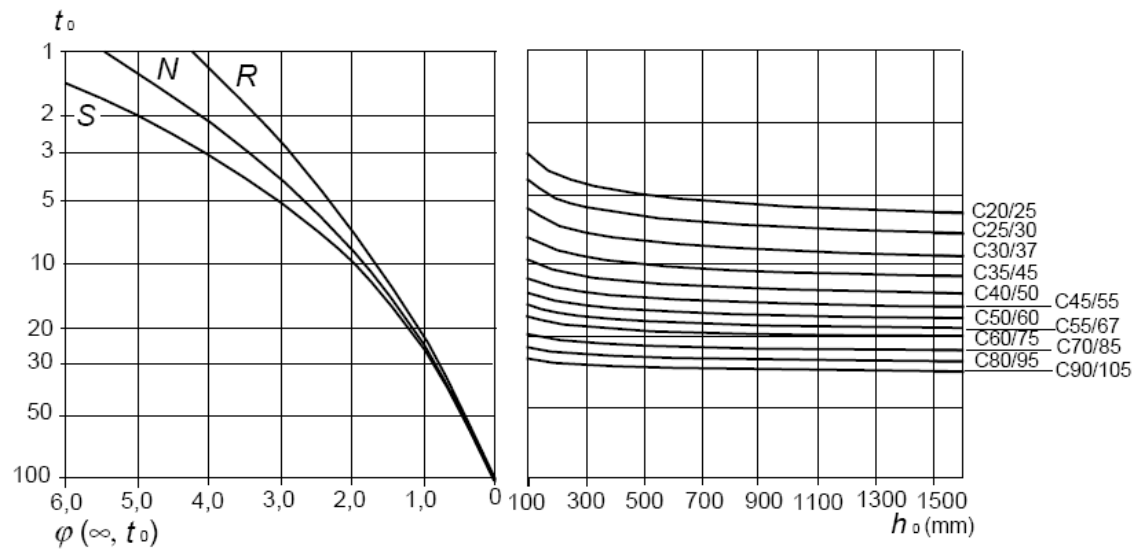
Από τις σχέσεις αυτές, χρησιμοποιώντας τις συνοριακές συνθήκες $\Delta_0 = 0$ και $\Delta_n = 0$ προκύπτουν $(n-1)$ εξισώσεις για τον προσδιορισμό των $(n-1)$ αγνώστων, που είναι οι βυθίσεις $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{n-1}$. Γενικά, ανάλογα με τη μορφή του δομικού συστήματος, θεσπίζονται και οι αντίστοιχες οριακές συνθήκες. Το σύστημα που προκύπτει, έχει λύση σε μορφή πινάκων, $A\Delta_i = R \Rightarrow \Delta_i = A^{-1}R$, όπου R είναι ο πίνακας των τιμών της καμπυλότητας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

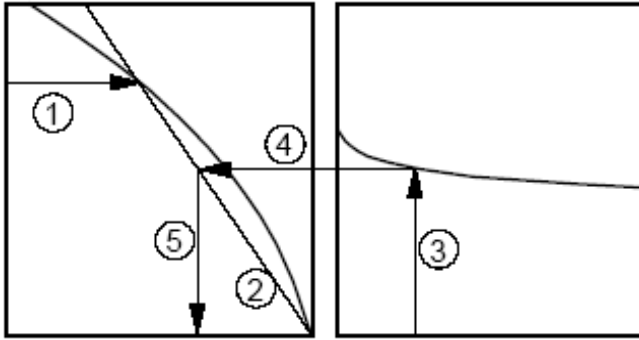
ΠΙΝΑΚΕΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΟΥ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΕΡΙΠΥΣΜΟΥ



α) Συνθήκες εσωτερικού χώρου - RH = 50%



β) Συνθήκες υπαίθρου - RH = 80%



Σημείωση: Το σημείο τομής μεταξύ των γραμμών 4 και 5 μπορεί να είναι επίσης υπεράνω του σημείου 1. Για $t_0 > 100$ είναι επαρκώς ακριβές να υποτεθεί $t_0 = 100$ (και να χρησιμοποιηθεί η εφαπτομένη).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΛΕΓΧΟΥ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ ΒΑΣΕΙ ΤΩΝ ΚΑΝΟΝΙΣΜΩΝ EC2 ΚΑΙ ACI 318-11

Περιβάλλον Λογισμικού

Το λογισμικό αυτό, ανοιχτού κώδικα, έχει αναπτυχθεί στη γλώσσα προγραμματισμού javascript, html και css. Το λογισμικό μπορεί να εκτελέσει τους ελέγχους οριακών καταστάσεων λειτουργικότητας που ορίζουν οι κανονισμοί EC2 και ACI 318-11 για διάφορα δομικά συστήματα. Στο παράρτημα αυτό, θα επεξηγηθεί το περιβάλλον του προγράμματος και ο τρόπος λειτουργίας του.

Οι έλεγχοι, γίνονται με τις εξισώσεις που έχουν αναλυθεί στα κεφάλαια 3 και 4 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για τον έλεγχο των παραμορφώσεων, συγκεκριμένα, ακολουθούν τα διαγράμματα ροής που παρουσιάζονται στα Σχήματα 3-6 και 3-10. Οι έλεγχοι μπορούν να πραγματοποιηθούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλον καθώς το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει οποιοδήποτε συνδυασμό ελέγχων επιθυμεί. Στο Σχήμα Γ-1 έχει γίνει, για παράδειγμα η επιλογή του έλεγχου παραμορφώσεων με τον κανονισμό EC2. Για να ξεκινήσει ο έλεγχος, θα πρέπει να τοποθετήσει ο χρήστης όλα τα απαραίτητα δεδομένα. Σε κάθε άλλη περίπτωση η εντολή "run", δεν ενεργοποιείται.

Πριν την εκκίνηση της διαδικασίας, η πρώτη επιλογή που πρέπει να κάνει ο χρήστης, είναι η επιλογή του κανονισμού και του ελέγχου που θέλει να πραγματοποιήσει. Έπειτα, ακολουθεί η επιλογή της γεωμετρίας της διατομής, ορθογωνική ή σχήματος T, και η επιλογή του δομικού συστήματος. Η επιλογή του δομικού συστήματος γίνεται σε ξεχωριστό παράθυρο, όπου ο χρήστης επιλέγει το δομικό σύστημα που επιλύει, και εισάγει αν είναι απαραίτητο, κάποια δεδομένα για να το περιγράψει. Για παράδειγμα, στο Σχήμα Γ-3, έχει επιλεγεί ως δομικό σύστημα, ένας πρόβολος, και ο χρήστης πρέπει να εισάγει την τιμή a , που δηλώνει το μήκος του στοιχείου το οποίο φορτίζεται από

κατανεμημένο φορτίο. Το πρόγραμμα, μέσω της επιλογής του δομικού συστήματος, ανατρέχει στα δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-4, της παρούσας διπλωματικής εργασίας, για να υπολογίσει κατά την εκτέλεση του, τα βέλη κάμψης και τις μέγιστες ροπές.

ΟΡΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΛΕΓΧΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΙ ΡΗΓΜΑΤΩΣΗΣ

ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ

ΕΛΕΓΧΟΣ

Γεωμετρία Διατομής
Ορθογωνική

Γεωμετρικά Χαρακτηριστικά

L: 4 m

b: 400 mm

b_w: mm

d: 715 mm

h: 800 mm

h_f: mm

A_s: 3776 mm²

d₂: 0 mm

A_{s2}: 0 mm²

Φορτία Σχεδιασμού

Μόνιμα: 30 kN/m

Κινητά: 40 kN/m

a % load: 60 %

Χρονική Στιγμή Ελέγχου

Φόρτιση: Μακροχρόνια

Διάρκεια, t: 1825 days

Ηλικία: 3 days

Σκυροδέματος
Πρώτης φόρτισης: 12 months

Διάρκεια φόρτισης
Κινητού Φορτίου:

Δομικό Σύστημα

Ράβδοι Κυρίου Οπλισμού (Κάτω Στρώση)

Αριθμός: 4

Φ: 26

Καθαρή Επικάλυψη: 36 mm

Τύπος Σκυροδέματος: N

Είδος Οπλισμού: Υψηλής Συνάφειας

Κατανομή Παραμορφώσεων: Κάμψη

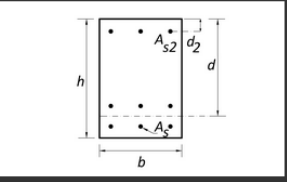
Ned, Είδος φόρτισης: Εφελκυστική 0 kN

Περιβαλλοντικές Συνθήκες

Υγρασία Rh%: 50 %

Περιβαλλοντικές Συνθήκες EC-2: Χ0

Περιβαλλοντικές Συνθήκες ACI 318-11: Ξηρό ή με μεμβράνη



Σχήμα Γ-1 : Το προγραμματιστικό περιβάλλον του λογισμικού

Με την εκκίνηση του προγράμματος, εμφανίζονται τα αποτελέσματα των ελέγχων των οποίων έχει επιλέξει ο χρήστης. Έτσι, αν επιλεγθεί μόνο ο έλεγχος παραμόρφωσης, δεν θα ζητηθούν από το χρήστη δεδομένα που δεν απαιτούνται για τον έλεγχο αυτόν, όπως για παράδειγμα ο αριθμός και η διάμετρος των ράβδων οπλισμού, και θα του εμφανιστούν μόνο τα αποτελέσματα που τον ενδιαφέρουν.

Η μορφή των αποτελεσμάτων είναι τέτοια, ώστε ο χρήστης, να μπορεί να συγκρίνει τα αποτελέσματα των δύο κανονισμών, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές που θέτουν αυτοί ως

όρια. Ειδικότερα, τα όρια των κανονισμών θα εμφανίζονται πράσινα, όταν ο έλεγχος είναι επιτυχής και κόκκινα όταν ο τελευταίος δεν είναι. Στο σχήμα Γ-3, φαίνεται μια σειρά αποτελεσμάτων, για όλους τους ελέγχους. Οι έλεγχοι παραμορφώσεων με όρια $L/500$ για τον EC2 και $L/480$ για τον ACI, καθώς $\Delta_{QP} 12.69 > 8.00$ και $\Delta_{LT} = 13.13 > 8.33$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Έλεγχος Παραμορφώσεων

	EC-2	ACI 318-11
Δ_{QP}	12.69 mm	Δ_{LT} 13.13 mm
		Δ_L 6.66 mm

Έλεγχος Ρηγμάτωσης

	EC-2	ACI 318-11
W_k	0.21 mm	0.24 mm
S_{max}	210.59 mm	264.67 mm
A_{smin}	243.58 mm ²	
Φ_{max}	20	

Όρια Κανονισμών

	EC-2	ACI 318-11
		L/180 33.33 mm
		L/360 16.67 mm
L/250	10.00 mm	L/240 16.67 mm
L/500	8.00 mm	L/480 8.33 mm

Όρια Κανονισμών

	EC-2	ACI 318-11
W_{kmax}	0.40 mm	0.47 mm
$S_{provided}$	14.63 mm	14.63 mm
$A_{sprovided}$	3778.00 mm ²	

EC2 - DEFLECTION

$f_{cm} = 38.00$ MPa

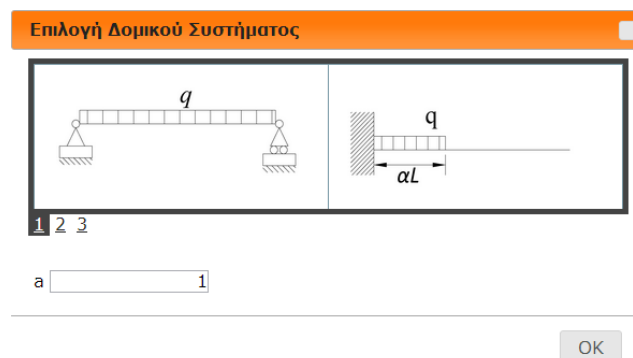
$f_{ctm} = 2.90$ MPa

$E_{cm} = 32.84$ GPa

Show Log

Σχήμα Γ-2 : Η Μορφή των αποτελεσμάτων, και του "Log"

Τέλος, όπως φαίνεται και στο Σχήμα Γ-2, υπάρχει η επιλογή "Show Log", η οποία επεκτείνει το παράθυρο και εμφανίζει αναλυτικά όλα τα αποτελέσματα των υπολογισμών που γίνονται, έτσι ώστε ο χρήστης έχει τον πλήρη έλεγχο και εποπτεία της διαδικασίας. Καθώς το πρόγραμμα είναι ανοιχτού κώδικα, ο χρήστης μπορεί να επέμβει στις εξισώσεις, να διορθώσει ή να προσθέσει επιλογές.



Σχήμα Γ-3 : Τρόπος επιλογής δομικού συστήματος

Επεξήγηση των δεδομένων και των αποτελεσμάτων

- Γεωμετρικά στοιχεία

L , το μήκος του στοιχείου,

b , το πλάτος του στοιχείου, και b_w το πλάτος του πέλματος σε περίπτωση διατομής T,

h , το ύψος της διατομής, και h_f το ύψος πέλματος σε περίπτωση διατομής T,

d , το στατικό ύψος του οπλισμού,

A_s , το εμβαδόν του οπλισμού,

d_2, A_{s2} , το στατικό ύψος και το εμβαδόν του θλιβόμενου οπλισμού.

- Μηχανικές ιδιότητες υλικών

f_{ck}, f_y , η χαρακτηριστική αντοχή του σκυροδέματος και του οπλισμού,

E_s , το μέτρο ελαστικότητας του οπλισμού,

w_c , για συνήθη σκυροδέματα $w_c = 2400 \text{ kg/m}^3$.

- Φορτία σχεδιασμού

Μόνιμα φορτία, το φορτίο g ανά μέτρο μήκους,

Κινητά φορτία, το φορτίο q ανά μέτρο μήκους,

$\alpha\%$ load, ο συντελεστής κινητού φορτίου που χρησιμοποιεί ο κανονισμός ACI 318-11 για το μακροπρόθεσμο υπολογισμό των παραμορφώσεων, με συνήθης τιμές 40-60%.

- Χρονική Στιγμή Ελέγχου

Φόρτιση, μακροχρόνια και βραχυπρόθεσμη. Έχει κυρίως να κάνει με την επιλογή της τιμής του συντελεστή β της εξίσωση (3.41) και του συντελεστή k , στην εξίσωση (4.6) για τον υπολογισμό του εύρους ρωγμής με τον EC2,

Διάρκεια t , είναι η χρονική διάρκεια της στιγμής του ελέγχου. Ο EC2 χρησιμοποιεί την τιμή για να υπολογίσει τον συντελεστή ερπυσμού στην εξίσωση (3.14), ενώ ο

ACI για να υπολογίσει την τιμή του συντελεστή λ_{∞} για τα μόνιμα φορτία στην εξίσωση (3.75).

Ηλικία πρώτης φόρτισης, αναφέρεται στην τιμή t_0 , για τον υπολογισμό του συντελεστή ερπυσμού από τον EC2 στην εξίσωση (3.14).

Διάρκεια φόρτισης κινητού φορτίου, αναφέρεται στον κανονισμό ACI για να υπολογίσει την τιμή του συντελεστή λ_t για τα μόνιμα φορτία στην εξίσωση (3.75).

- Ράβδοι κυρίου οπλισμού,

Ο πίνακας αυτός, αναφέρεται στον αριθμό, τη διάμετρο του κυρίου οπλισμού, μόνο της κάτω στρώσης, και η καθαρή επικάλυψη αυτού. Χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα στον έλεγχο ρηγμάτωσης για τον υπολογισμό της μέγιστης απόστασης των ράβδων οπλισμού.

- Ο Τύπος σκυροδέματος είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της συρρίκνωσης στην εξίσωση (3.32).
- Το είδος οπλισμού, υψηλής ή χαμηλής συνάφειας, είναι απαραίτητο για την εύρεση της τιμής του συντελεστή κ στην εξίσωση (4.3).
- Η κατανομή των παραμορφώσεων, αναφέρεται στο είδος φόρτισης του δομικού στοιχείου, και δίνει τιμές στους συντελεστές k_2 και k_c των εξισώσεων (4.3) και (4.11), αντίστοιχα.
- Το μέγεθος και το είδος της αξονικής δύναμης N_{ed} , είναι απαραίτητα για τον προσδιορισμό του συντελεστή k_1 (4.16) και την τιμή του σ_c μέσω της εξίσωσης (4.14).
- Περιβαλλοντολογικές συνθήκες

Δηλώνεται η σχετική υγρασία του περιβάλλοντος που εκτίθεται το δομικό στοιχείο, απαραίτητη για τον υπολογισμό του συντελεστή ερπυσμού μέσω της εξίσωσης (3.9) και της συρρίκνωσης στην εξίσωση (3.35).

Οι περιβαλλοντολογικές συνθήκες, όπως αυτές αναγράφονται στον ACI και τον EC2, δηλώνουν το μέγιστο εύρος ρωγμής.

Κώδικας του Λογισμικού

```
//SOFTWARE, FOR DEFLECTION AND CRACK CONTROL VIA EC2 AND ACI  
318-11 REINFORCED CONCRETE CODES
```

```
//We build the application inside a function so that we produce only a single  
// global variable. That function will be invoked immediately, and its return  
// value is the DEFLECTION function itself. That function is also an object that  
// can contain data and other functions.
```

```
var algorithm = ( function() {'use strict';
```

```
// ----- private variables
```

```
var itself, cement = {
```

```
S : {
```

```
ads1 : 3,
```

```
ads2 : 0.13
```

```
},
```

```
N : {
```

```
ads1 : 4,
```

```
ads2 : 0.12
```

```
},
```

```
R : {
```

```
ads1 : 6,
```

```
ads2 : 0.11
```

```
}
```

```
}, diärkeia_fortishs_kt = {
```

```
"Μακροχρόνια" : 0.4,
```

```
"Βραχυχρόνια" : 0.6
```

```
}, diärkeia_fortishs_beta = {
```

```
"Μακροχρόνια" : 0.5,
```

```
}, envEC2 = {
```

```
"X0" : 0.40,
```

```

"XC2" : 0.30,
"XC4" : 0.30,
"XD1" : 0.30,
"XD2" : 0.30,
"XS1" : 0.30,
"XS2" : 0.30,
"XS3" : 0.30
}, envACI = {
"Ξηρό ή με μεμβράνη" : 0.41,
"Υγρασία" : 0.30,
"Χημικό" : 0.18,
"Εκτεθειμένο σε θάλασσα" : 0.15,
"Μόνιμα βυθισμένο" : 0.10
}, l, a, xu, iu, xc, ic, su, sc, fctm, fcm, ecm;

```

//----- private functions section -----

```

function deflectionEC2(data) {
var domiko_systhma = {
1 : {
km : (data.l * data.l) / 8.0,
k3 : 5 / 48.0,
k3cs : 5 / 48.0
},
2 : {
km : (data.a * data.a * data.l * data.l) / 2.0,
k3 : data.a * (4 - data.a) / 12.0,
k3cs : 0.5
},
};
//STEP 1
//3.4

```

```

fcm = data.fck + 8;
log("f<sub>cm</sub>", fcm.toFixed(2), " MPa");
//3.5
if(data.fck <= 50) {
fctm = 0.3 * Math.pow(data.fck, 2.0 / 3);
} else {
fctm = 2.12 * Math.log(1 + (fcm / 10));
}
log("f<sub>ctm</sub>", fctm.toFixed(2), " MPa");
//3.6
ecm = 22 * Math.pow(fcm / 10.0, 0.3);
log("E<sub>cm</sub>", ecm.toFixed(2), " GPa");
//STEP 2
var u = 2 * data.b + 2 * data.h;
log("u", u.toFixed(2), " mm");
var ac = data.b * data.h;
log("ac", ac.toFixed(2), " mm<sup>2</sup>");
//3.10
var h0 = 2 * ac / u;
log("h<sub>0</sub>", h0.toFixed(2), " mm");
// 3.11
var a1 = Math.pow(35 / fcm, 0.7);
log("a1", a1.toFixed(3), " ");
var a2 = Math.pow(35 / fcm, 0.2);
log("a2", a2.toFixed(3), " ");
var a3 = Math.pow(35 / fcm, 0.5);
log("a3", a3.toFixed(3), " ");
//3.9
var frh;
if(fcm <= 35) {
frh = 1 + (1 - data.rh / 100.0) / (0.1 * Math.pow(h0, 1.0 / 3));

```



```

} else {
frh = (1 + ((1 - data.rh / 100.0) / (0.1 * Math.pow(h0, 1.0 / 3))) * a1) * a2;
}
log("φ<sub>RH</sub>", frh.toFixed(3), " ");
// 3.12
var bfcM = 16.8 / Math.sqrt(fcm);
log("β (f<sub>cm</sub>)", bfcM.toFixed(3), " ");
// 3.13
var bt0 = 1.0 / (0.1 + Math.pow(data.t0, 0.2));
log("β (t<sub>0</sub>)", bt0.toFixed(3), " ");
// 3.8
var phi0 = frh * bfcM * bt0;
log("φ<sub>0</sub>", phi0.toFixed(3), " ");
// 3.15
var bh;
if(fcm <= 35) {
var val = 1.5 * (1 + Math.pow(0.012 * data.rh, 18)) * h0 + 250;
bh = (val <= 1500) ? val : 1500;
} else {
var val = 1.5 * (1 + Math.pow(0.012 * data.rh, 18)) * h0 + 250 * a3;
bh = (val < 1500 * a3) ? val : 1500 * a3;
}
log("β<sub>H</sub>", bh.toFixed(3), " ");
// 3.14
var bctt0 = Math.pow((data.t - data.t0) / (bh + data.t - data.t0), 0.3);
log("β<sub>c</sub>(t - t<sub>0</sub>)", bctt0.toFixed(3), " ");
// 3.7
var phi = phi0 * bctt0;
log("φ (&infin; , 0)", phi.toFixed(3), " ");
//STEP 3
// 3.16

```

```

var eceff = ecm / (1 + phi);
log("E<sub>c,eff</sub>", eceff.toFixed(2), " GPa ");
// 3.22 *****
var ae = data.es / eceff;
log("a<sub>e</sub>", ae.toFixed(2), " ");
// STEP 4
// 3.17 to 3.28
if(data.diatomh == "Ορθογωνική") {
findAksonaRophAdraneias(data, ae);
} else {
findAksonaRophAdraneiasT(data, ae);
}
log("x<sub>u</sub>", xu.toFixed(3), " mm");
log("I<sub>u</sub>", iu.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
log("S<sub>u</sub>", su.toPrecision(3), " mm<sup>3</sup>");
log("x<sub>c</sub>", xc.toFixed(3), " mm");
log("I<sub>c</sub>", ic.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
log("S<sub>c</sub>", sc.toPrecision(3), " mm<sup>3</sup>");
// STEP 5
// 3.29
var mcr = (fctm * iu / (data.h - xu)) / Math.pow(10, 6);
log("M<sub>cr</sub>", mcr.toFixed(3), " MPa");
// STEP 6
// 3.35
var brh = 1.55 * (1 - Math.pow(data.rh / 100, 3));
log("β<sub>RH</sub>", brh.toFixed(3), " ");
// 3.32
var ecd0 = 0.85 * ((220 + 110 * cement[data.cement_type].ads1) * Math.exp(-
cement[data.cement_type].ads2 * fcm / 10)) * Math.pow(10, -6) * brh;
log("ε<sub>cd,0</sub>", ecd0.toPrecision(3), " ");
// 3.36

```

```

var bdstt0 = (data.t - data.t0) / (data.t - data.t0 + 0.04 * Math.pow(h0, 3.0 / 2));
log("β ( t , t<sub>0</sub>)", bdstt0.toFixed(3), " ");
// 3.31
var ecd = findKh(h0) * ecd0 * bdstt0;
log("ε<sub>cd</sub>", ecd.toPrecision(3), " ");
log("k<sub>h</sub>", findKh(h0).toFixed(3), " ");
// 3.39
var bast = 1 - Math.exp(-0.2 * Math.pow(data.t, 0.5));
log("β<sub>as</sub> ( t)", bast.toFixed(3), " ");
// 3.38
var ecapeiro = 2.5 * (data.fck - 10) * Math.pow(10, -6);
log("ε<sub>ca</sub>(∞)", ecapeiro.toPrecision(3), " ");
// 3.37
var eca = bast * ecapeiro;
log("ε<sub>ca</sub>", eca.toPrecision(3), " ");
// 3.30
var ecs = ecd + eca;
log("ε<sub>cs</sub>", ecs.toPrecision(3), " ");
// STEP 7
var mqp = (data.q + data.g) * domiko_synthma[data.domiko_synthma_id].km;
log("km", domiko_synthma[data.domiko_synthma_id].km.toFixed(3), " ");
log("M<sub>QP</sub>", mqp.toFixed(3), " MPa");
// STEP 8
// 3.41
var z;
if(mcr > mqp) {
z = 0;
} else {
var beta = diarkeia_fortishs_beta[data.diarkeia_fortishs_name];
z = 1 - beta * Math.pow(mcr / mqp, 2);
}

```

```

log("ζ", z.toFixed(3), " ");
// 3.46

var rn = z * (mqp / (eceff * ic)) + (1 - z) * (mqp / (eceff * iu));
rn = rn * Math.pow(10, 3);
log("1 / r<sub>n</sub>", rn.toPrecision(3), " mm<sup>-1</sup> ");
// STEP 9
// 3.50

var rcs = z * ecs * ae * sc / ic + (1 - z) * ecs * ae * su / iu;
log("1/r<sub>cs</sub>", rcs.toPrecision(3), " mm<sup>-1</sup> ");
// STEP 10+11

var k3 = domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].k3;
log("k3", domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].k3.toFixed(3), " ");
// 3.58

var dqpn = k3 * rn * data.l * data.l * 1000000.0;
log("Δ<sub>QP,n</sub>", dqpn.toFixed(2), " mm ");
var dqpcs = 0.5 * rcs * data.l * data.l * 1000000.0;
log("Δ<sub>QP,csn</sub>", dqpcs.toFixed(2), " mm ");
var dqp = dqpn + dqpcs;
log("Δ<sub>QP</sub>", dqp.toFixed(2), " mm ");
var limit1 = data.l * 1000.0 / 250.0;
log("L/250 ", limit1.toFixed(2), " mm ");
var limit2 = data.l * 1000.0 / 500.0;
log("L/500 ", limit2.toFixed(2), " mm ");
if(limit1 >= dqp) {
$('#res_1250_ec2').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_1250_ec2').removeClass().addClass('nok');
}
if(limit2 >= dqp) {
$('#res_1500_ec2').removeClass().addClass('ok')
} else {

```

```
$('#res_1500_ec2').removeClass().addClass('nok');
}
$('#res_dqp_ec2').text(dqp.toFixed(2));
$('#res_1250_ec2').text(limit1.toFixed(2));
$('#res_1500_ec2').text(limit2.toFixed(2));
}
function crackWidthEC2(data) {
var domiko_systhma = {
1 : {
km : (data.l * data.l) / 8.0,
k3 : 5 / 48.0
},
2 : {
km : (data.a * data.a * data.l * data.l) / 2.0,
k3 : data.a * (4 - data.a) / 12.0
}
};
var k1, k2;
if(data.oplismos == "Υψηλής Συνάφειας") {
k1 = 0.8;
} else {
k1 = 1.6;
}
log("k1", k1, " ");
if(data.kat_paramorphwsh == "Κάμψη") {
k2 = 0.5;
} else {
k2 = 1;
}
log("k2", k2, " ");
// find distance s
```

```

var s = (data.b - 2 * data.c - data.bars * data.phi) / (data.bars - 1);
log("s", s.toFixed(2), " mm");
var s0 = 5 * (data.c + data.phi / 2.0);
log("s<sub>0</sub>", s0.toFixed(2), " mm");
// find xc,Ic,Sc
findMhxanikesIdiothtesSkyrodematos(data);
// find ae
var ae = data.es / ecm;
log("a<sub>e</sub>", ae.toFixed(2), " ");
findAksonaRophAdraneias(data, ae);
log("x<sub>u</sub>", xu.toFixed(3), " mm");
log("I<sub>u</sub>", iu.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
log("S<sub>u</sub>", su.toPrecision(3), " mm<sup>3</sup>");
log("x<sub>c</sub>", xc.toFixed(3), " mm");
log("I<sub>c</sub>", ic.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
log("S<sub>c</sub>", sc.toPrecision(3), " mm<sup>3</sup>");
// find aceff
var heff1 = 2.5 * (data.h - data.d);
var heff2 = (data.h - xc) / 3.0;
var heff3 = data.h / 2;
var heff = Math.min(heff1, heff2, heff3);
log("h<sub>c,eff</sub>", heff.toFixed(2), " mm");
var aceff = heff * data.b;
log("A<sub>c,eff</sub>", aceff.toFixed(2), " mm2");
// 4.9
var rref = data.as / aceff;
log("ρ<sub>ρ,eff</sub>", rref.toFixed(3), " ");
var smax;
// find smax 4.3 to 4.5
if(s <= s0) {
smax = 3.4 * data.c + 0.425 * k1 * k2 * data.phi / rref;

```

```

// k1,k2 dedomena
} else {
smax = 1.3 * (data.h - xc);
}
log("s<sub>max</sub>", smax.toFixed(2), " mm");
// 4.7
var fcteff = fctm;

// Msd
var Msd = (data.q + data.g) * domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].km;
log("M<sub>sd</sub>", Msd.toFixed(2), " MPa");
// 4.8
var sigmas = Math.pow(10, 6) * ae * Msd * (data.d - xc) / ic;
log("σ<sub>s</sub>", sigmas.toFixed(2), " MPa");
// 4.6
var kt = diarkeia_fortishs_kt[data.diarkeia_fortishs_name];
var esmecm = (sigmas - (kt * fcteff * (1 + ae * rref)) / rref) / (data.es * 1000);
var esmecmlimit = 0.6 * sigmas / (data.es * 1000);
if(esmecm < esmecmlimit) {
esmecm = esmecmlimit;
}
log("ε<sub>sm</sub> - ε<sub>cm</sub>", esmecm.toPrecision(3), " ");
// euresi wk
var wk = smax * esmecm;
log("wk", wk.toFixed(2), " mm");
// 4.15
var htonos;
if(data.h >= 1000) {
htonos = 1000;
} else {
htonos = data.h;

```

```
}
log("h", htonos.toFixed(2), " mm");
// 4.14
var sigmac = (data.ned_value / (data.b * data.h)) * 1000000.0;
log("σ<sub>c</sub>", sigmac.toPrecision(3), " MPa");
// 4.15
var k11;
if(data.ned == "Εφελκυστική") {
k11 = 2 * htonos / (3 * data.h);
} else {
k11 = 1.5;
}
log("k", k11.toFixed(2), " ");
//4.12-4.13
var kc;
if(data.kat_paramorphwsh == "Εφελκυσμός") {
kc = 1;
} else {
sigmac = data.ned_value / (data.b * data.h);
kc = 0.4 * (1 - sigmac / (k11 * (data.h / htonos) * fcteff));
}
log("kc", kc.toFixed(2), " ");
var k;
if(data.h <= 300) {
k = 1;
} else if(data.h >= 800) {
k = 0.65;
} else {
k = (0.65 - 1) / (800 - 300) * (data.h - 300) + 1;
}
log("k", k.toFixed(2), " ");
```



```

//4.11
var asmin = kc * k * fcteff * aceff / sigmas;
log("A<sub>s,min</sub>", asmin.toFixed(2), " mm<sup>2</sup>");
// max space and diametre table
var megisth_diametros = [[40, 32, 25], [32, 25, 16], [20, 16, 12], [16, 12, 8], [12, 10, 6], [10, 8, 5], [8, 6, 4], [6, 5, 0]];
var hcr = data.h - xu;
log("h<sub>cr</sub>", hcr.toFixed(2), " mm");
var phi0 = 0;
var wkmax = envEC2[data.ec2_env];
if(wkmax == 0.4) {
phi0 = findSigmaS(sigmas, megisth_diametros, 0);
} else if(wkmax == 0.3) {
phi0 = findSigmaS(sigmas, megisth_diametros, 1);
} else if(wkmax == 0.2) {
phi0 = findSigmaS(sigmas, megisth_diametros, 2);
}
log("Φ<sub>0</sub>", phi0.toFixed(0), " Βασική Διάμετρος");
//4.16-4.17
var phimax;
if(data.kat_paramorphwsh == "Εφελκυσμός") {
var phimax = phi0 * fcteff * hcr / (2.9 * 24 * (data.h - data.d));
} else {
var phimax = phi0 * fcteff * kc * hcr / (2.9 * 2 * (data.h - data.d));
}
log("Φ<sub>max</sub>", phimax.toFixed(0), " Μέγιστη Διάμετρος");
$('#res_wk_ec2').text(wk.toFixed(2));
$('#res_wmax_ec2').text(wkmax.toFixed(2));
$('#res_s_ec2').text(s.toFixed(2));
$('#res_smax_ec2').text(smax.toFixed(2));
$('#res_asmin_ec2').text(asmin.toFixed(2));

```

```

$('#res_phimax_ec2').text(phimax.toFixed(0));
$('#res_asmin2_ec2').text(data.as.toFixed(2));
if(wkmax >= wk) {
$('#res_wmax_ec2').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_wmax_ec2').removeClass().addClass('nok');
}
if(smax >= s) {
$('#res_s_ec2').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_s_ec2').removeClass().addClass('nok');
}
if(asmin < data.as) {
$('#res_asmin2_ec2').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_asmin2_ec2').removeClass().addClass('nok');
}
}
}

function aciDeflection(data) {
var domiko_systhma = {
1 : {
km : (data.l * data.l) / 8.0,
k3 : 5 / 48.0
},
2 : {
km : (data.a * data.a * data.l * data.l) / 2.0,
k3 : data.a * (4 - data.a) / 12.0
}
};
var k3 = domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].k3;
var km = domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].km;

```

```

// STEP 1
// 3.59
var ec = (Math.pow(data.wc, 1.5) * 0.043 * Math.sqrt(data.fck)) / 1000;
log("E<sub>c</sub>", ec.toFixed(2), " GPa");
// 3.59
var n = data.es / ec;
log("n", n.toFixed(2), " ");
var ae = n;
//ACI Ig - Ic 3-61 to 3.69
if(data.diatomh == "Ορθογωνική")
{
//find yt
var yt = data.h / 2;
//find ig
var ig = data.b * Math.pow(data.h, 3) / 12;
var ac = data.b / 2.0;
var bc = n * data.as;
var gc = -n * data.as * data.d;
var root1 = (-bc - Math.sqrt(Math.pow(bc, 2) - 4 * ac * gc)) / (2 * ac);
var root2 = (-bc + Math.sqrt(Math.pow(bc, 2) - 4 * ac * gc)) / (2 * ac);
var c;
if(root1 > 0) {
c = root1;
} else {
c = root2;
}
//find icr
var icr = data.b * Math.pow(c, 3) / 3 + n * data.as * Math.pow(data.d - c, 2) + (n - 1) *
data.as2 * (c - data.d2);
}
else

```

```

{
findAksonaRophAdraneiasT(data, ae);
var yt = xu;
var c = xc;
var ig = iu;
var icr = ic;
};
log("y<sub>t</sub>", yt.toFixed(2), " mm");
log("I<sub>g</sub>", ig.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
log("c", c.toFixed(2), " mm");
log("I<sub>cr</sub>", icr.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
// 3.61
var fr = 0.7 * Math.sqrt(data.fck);
log("f<sub>r</sub>", fr.toFixed(2), " MPa");
// 3.60
var mcr = ig * fr / yt * 1 / 1000000.0;
log("M<sub>cr</sub>", mcr.toFixed(2), " MPa");
//find M
var m1 = km * data.g;
log("M<sub>(D)</sub>", m1.toFixed(2), " MPa");
var m2 = km * (data.g + data.a_load / 100.0 * data.q);
log("M<sub>(D+αL)</sub>", m2.toFixed(2), " MPa");
var m3 = km * (data.g + data.q);
log("M<sub>(D+L)</sub>", m3.toFixed(2), " MPa");
// 3.71
var ie1;
var ie2;
var ie3;
var ma1 = m1;
if(m1 < mcr) {
ie1 = ig;

```

```

ma1 = mcr;
} else {
ie1 = Math.pow(mcr / m1, 3) * ig + (1 - Math.pow(mcr / m1, 3)) * icr;
}
log("M<sub>(D)</sub>", ma1.toFixed(2), " MPa");
log("I<sub>e,(D)</sub>", ie1.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
ie2 = Math.pow(mcr / m2, 3) * ig + (1 - Math.pow(mcr / m2, 3)) * icr;
if(ie2 > ig) {
ie2 = ig;
}
log("I<sub>e,(D+αL)</sub>", ie2.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
ie3 = Math.pow(mcr / m3, 3) * ig + (1 - Math.pow(mcr / m3, 3)) * icr;
if(ie3 > ig) {
ie3 = ig;
}
log("I<sub>e,(D+L)</sub>", ie3.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
// 3.73
log("k3", k3.toFixed(3), " ");
var delta = k3 * Math.pow(data.l * 1000, 2) / (ec * 1000.0);
log("Δ", delta.toFixed(3), "* M / I");
var dd = delta * ma1 * 1000000.0 / ie1;
var dld = delta * m3 * 1000000.0 / ie3;
var dl = dld - dd;
var dls = delta * m2 * 1000000.0 / ie2 - dd;
log("Δ<sub>D</sub>", dd.toFixed(2), " mm");
log("Δ<sub>D+L</sub>", dld.toFixed(2), " mm");
log("Δ<sub>L</sub>", dl.toFixed(2), " mm");
log("Δ<sub>LS</sub>", dls.toFixed(2), " mm");
// 3.75
var t1 = findLamda(data.t / 30.0);
log("T<sub>1</sub>", t1.toFixed(2), " ");

```

```

var t2 = findLamda(data.tt);
log("T<sub>2</sub>", t2.toFixed(2), " ");
var rtonos = data.as2 / (data.b * data.d);
log("ρ", rtonos.toFixed(3), " ");
var lamda1 = t1 / (1 + rtonos);
log("λ<sub>1</sub>", lamda1.toFixed(2), " ");
var lamda2 = t2 / (1 + rtonos);
log("λ<sub>2</sub>", lamda2.toFixed(2), " ");
// 3.74
var dlt = dl + lamda1 * dd + lamda2 * dls;
log("Δ<sub>LT</sub>", dlt.toFixed(2), " mm");
//limits
var orio180 = (data.l / 180) * 1000;
var orio240 = (data.l / 240) * 1000;
var orio360 = (data.l / 360) * 1000;
var orio480 = (data.l / 480) * 1000;
log("L/180", orio180.toFixed(2), " mm");
log("L/240", orio240.toFixed(2), " mm");
log("L/360", orio360.toFixed(2), " mm");
log("L/480", orio480.toFixed(2), " mm");
$('#res_dlt_aci').text(dlt.toFixed(2));
$('#res_dl_aci').text(dl.toFixed(2));
$('#res_l180_aci').text(orio180.toFixed(2));
$('#res_l240_aci').text(orio240.toFixed(2));
$('#res_l360_aci').text(orio360.toFixed(2));
$('#res_l480_aci').text(orio480.toFixed(2));
if(orio180 >= dl) {
$('#res_l180_aci').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_l180_aci').removeClass().addClass('nok');
}

```

```
if(orio360 >= dl) {
  $('#res_1360_aci').removeClass().addClass('ok')
} else {
  $('#res_1360_aci').removeClass().addClass('nok');
}
if(orio240 >= dlt) {
  $('#res_1240_aci').removeClass().addClass('ok')
} else {
  $('#res_1240_aci').removeClass().addClass('nok');
}
if(orio480 >= dlt) {
  $('#res_1480_aci').removeClass().addClass('ok')
} else {
  $('#res_1480_aci').removeClass().addClass('nok');
}
}
}
function aciCrackWidth(data) {
  //k3 , km
  var domiko_systhma = {
    1 : {
      km : (data.l * data.l) / 8.0,
      k3 : 5 / 48.0
    },
    2 : {
      km : (data.a * data.a * data.l * data.l) / 2.0,
      k3 : data.a * (4 - data.a) / 12.0
    }
  };
  var k3 = domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].k3;
  var km = domiko_systhma[data.domiko_systhma_id].km;
```

```

var ec = (Math.pow(data.wc, 1.5) * 0.043 * Math.sqrt(data.fck)) / 1000;
log("E<sub>c</sub>", ec.toFixed(2), " GPa");
//find n
var n = data.es / ec;
log("n", n.toFixed(2), " ");
var ae = n;
if(data.diatomh == "Ορθογωνική")
{
//find yt
var yt = data.h / 2;
//find ig
var ig = data.b * Math.pow(data.h, 3) / 12;
var ac = data.b / 2.0;
var bc = n * data.as;
var gc = -n * data.as * data.d;
var root1 = (-bc - Math.sqrt(Math.pow(bc, 2) - 4 * ac * gc)) / (2 * ac);
var root2 = (-bc + Math.sqrt(Math.pow(bc, 2) - 4 * ac * gc)) / (2 * ac);
var c;
if(root1 > 0) {
c = root1;
} else {
c = root2;
}
//find icr
var icr = data.b * Math.pow(c, 3) / 3 + n * data.as * Math.pow(data.d - c, 2) + (n - 1) *
data.as2 * (c - data.d2);
}
else
{
findAksonaRophAdraneiasT(data, ae);
var yt = xu;

```



```

var c = xc;
var ig = iu;
var icr = ic;
};
log("y<sub>t</sub>", yt.toFixed(2), " mm");
log("I<sub>g</sub>", ig.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
log("c", c.toFixed(2), " mm");
log("I<sub>cr</sub>", icr.toPrecision(3), " mm<sup>4</sup>");
//find M
var m = km * (data.g + data.q);
//find fs
var fs = m / icr * ((data.d - c) * n * 1000000.0);
log("f<sub>s</sub>", fs.toFixed(2), " MPa");
//find dc,c (dedomena) , c einai i epikalipsi eos efaptomenika tin radbo oplismoy
var dc = data.c + data.phi / 2.0;
log("d<sub>c</sub>", dc.toFixed(2), " mm");
//find bitawk (ena apo ta dio tha doyme poio leei)
var bitawk = (data.h - c) / (data.d - c);
log("β", bitawk.toFixed(2), " ");
//find s
var s = (data.b - 2 * data.c - data.bars * data.phi) / (data.bars - 1);
log("s", s.toFixed(2), " mm");
var a = 2 * dc * data.b / data.bars;
log("A", a.toFixed(2), " mm<sup>2</sup>");
var wkmax = envACI[data.aci_env];
log("wk<sub>max</sub>", wkmax.toFixed(2), " mm");
// 4.18
var wk = 0.011 * bitawk * fs * Math.pow(dc * a, 1 / 3.0) * Math.pow(10, -3);
log("wk", wk.toFixed(2), " mm");
// fs gia smax = 0.6fy
var fs_s = 0.6 * data.fy;

```

```

log("f<sub>s</sub> = 0.6f<sub>y</sub>", fs.toFixed(2), " MPa");
//4.20
var smax = 380 * (280 / fs_s) - 2.5 * data.c;
var slimit = 300 * (280.0 / fs_s);
log("s<sub>limit</sub>", slimit.toFixed(2), " mm");
if(smax > slimit) {
smax = slimit;
}
log("s<sub>max</sub>", smax.toFixed(2), " mm");
$('#res_wk_aci').text(wk.toFixed(2));
$('#res_smax_aci').text(smax.toFixed(2));
$('#res_wmax_aci').text(wkmax.toFixed(2));
$('#res_s_aci').text(s.toFixed(2));
if(wkmax >= wk) {
$('#res_wmax_aci').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_wmax_aci').removeClass().addClass('nok');
}
if(smax >= s) {
$('#res_s_aci').removeClass().addClass('ok')
} else {
$('#res_s_aci').removeClass().addClass('nok');
}}
function findMhxanikesIdiothtesSkyrodematos(data) {
// find fcm
fcm = data.fck + 8;
// find fctm
if(data.fck <= 50) { // 3.5
fctm = 0.3 * Math.pow(data.fck, 2.0 / 3);
} else {
fctm = 2.12 * Math.log(1 + (fcm / 10));
}
}

```

```

// (3.6)
}
// 3.7
ecm = 22 * Math.pow(fcm / 10.0, 0.3);
}
//3.17 - 3.19 and 3.23 to 3.25
function findAksonaRophAdraneias(data, ae) {
// oudeteros aksonas kai roph adraneias. create holder.
// 3.23
xu = (data.b * data.h * data.h / 2 + (ae - 1) * (data.as * data.d + data.as2 * data.d2)) /
(data.b * data.h + (ae - 1) * (data.as + data.as2));
// 3.24
iu = data.b * data.h * data.h * data.h / 12 + data.b * data.h * Math.pow(data.h / 2 - xu,
2) + (ae - 1) * (data.as * Math.pow(data.d - xu, 2) + data.as2 * Math.pow(data.d2 - xu,
2));
// 3.25
xc = (Math.pow(Math.pow(data.as * ae + data.as2 * (ae - 1), 2) + 2 * data.b * (data.as
* data.d * ae + data.as2 * data.d2 * (ae - 1)), 0.5) - (data.as * ae + data.as2 * (ae - 1))) /
data.b;
// 3.26
ic = data.b * xc * xc * xc / 3.0 + ae * data.as * Math.pow(data.d - xc, 2) + (ae - 1) *
data.as2 * Math.pow(data.d2 - xc, 2);
su = data.as * (data.d - xu) - data.as2 * (data.d2 - xu);
sc = data.as * (data.d - xc) - data.as2 * (data.d2 - xc);
}
//3.20 - 3.21 and 3.26 to 3.28
function findAksonaRophAdraneiasT(data, ae) {
// oudeteros aksonas kai roph adraneias. create holder.
xu = (data.b * data.hf * data.hf / 2 + data.bw * data.hf * data.hf / 2 + (ae - 1) * (data.as
* data.d + data.as2 * data.d2)) / (data.b * data.h + data.bw * data.hf + (ae - 1) *
(data.as + data.as2));
iu = data.b * data.hf * data.hf * data.hf / 12 + data.b * data.hf * Math.pow(data.h / 2 -
xu, 2) + data.bw * Math.pow(data.h - data.hf, 3) / 12 + data.bw * (data.h - data.hf) *

```

```

Math.pow(xu - (data.h - data.hf) / 2, 2) + (ae - 1) * (data.as * Math.pow(data.d - xu, 2)
+ data.as2 * Math.pow(data.d2 - xu, 2));

var z1 = 0.5 * data.bw;

var z2 = data.hf * (data.b - data.bw) + ae * data.as + (ae - 1) * data.as2;

var z3 = -0.5 * Math.pow(data.hf, 2) * (data.b - data.bw) - ae * data.as * data.d - (ae -
1) * data.as2 * data.d2;

var root1 = (-z2 + Math.pow(Math.pow(z2, 2) - 4 * z1 * z3, 0.5)) / (2 * z1);
var root2 = (-z2 - Math.pow(Math.pow(z2, 2) - 4 * z1 * z3, 0.5)) / (2 * z1);

xc;

if(root1 > 0) {
xc = root1;
} else {
xc = root2;
}

ic = data.bw * Math.pow(xc - data.hf, 3) / 3 + data.b * Math.pow(data.hf, 3) / 3 +
data.b * data.hf * (xc - Math.pow(data.hf / 2, 2)) + ae * data.as * Math.pow(data.d -
xc, 2) + (ae - 1) * data.as2 * Math.pow(data.d2 - xc, 2);

su = data.as * (data.d - xu) - data.as2 * (data.d2 - xu);
sc = data.as * (data.d - xc) - data.as2 * (data.d2 - xc);
}

function log(expr, value, mon) {
//$("<div/>").text(name + ": " + value + " " + mon).appendTo("#debug #log");
$("<tr/>").html("<td>" + expr + <td>&nbsp;=&nbsp;</td>" + "<td>" + value + "</td>"
+ "<td>" + mon + "</td>").appendTo("#debug #log table:last");
"</td><td>&nbsp;=&nbsp;</td><td>" + value + mon + "</td>").appendTo("#debug
#log table:last");
}

function findLamda(x) {
var y = 0;
if(x <= 3) {
y = 1;
} else if(x == 6) {
y = 1.4;
}

```

```
} else if(x == 12) {  
y = 1.5;  
} else if(x == 24) {  
y = 1.65;  
} else if(x >= 60) {  
y = 2.0;  
} else {  
var x_katw_orio = 0;  
var x_panw_orio = 0;  
var y_katw_orio = 0;  
var y_panw_orio = 0;  
if(x < 6) {  
x_katw_orio = 3  
x_panw_orio = 6;  
y_katw_orio = 1;  
y_panw_orio = 1.4;  
} else if(x < 12) {  
x_katw_orio = 6;  
x_panw_orio = 12;  
y_katw_orio = 1.4;  
y_panw_orio = 1.5;  
} else if(x < 24) {  
x_katw_orio = 12;  
x_panw_orio = 24;  
y_katw_orio = 1.5;  
y_panw_orio = 1.65;  
} else if(x < 60) {  
x_katw_orio = 24;  
x_panw_orio = 60;  
y_katw_orio = 1.65;  
y_panw_orio = 2.0;
```

```
}  
y = ((y_panw_orio - y_katw_orio) / (x_panw_orio - x_katw_orio)) * (x - x_katw_orio)  
+ y_katw_orio;  
}  
return y;  
}  
function findKh(h0) {  
var kh = 0;  
if(h0 == 200) {  
kh = 0.85;  
} else if(h0 == 300) {  
kh = 0.75;  
} else if(h0 <= 100) {  
kh = 1;  
} else if(h0 >= 500) {  
kh = 0.7;  
} else {  
var h0_katw_orio = 0;  
var h0_panw_orio = 0;  
var kh_katw_orio = 0;  
var kh_panw_orio = 0;  
if(h0 < 200) {  
h0_katw_orio = 100;  
h0_panw_orio = 200;  
kh_katw_orio = 1;  
kh_panw_orio = 0.85;  
} else if(h0 < 300) {  
h0_katw_orio = 200;  
h0_panw_orio = 300;  
kh_katw_orio = 0.85;  
kh_panw_orio = 0.75;
```

```
} else if(h0 < 500) {
h0_katw_orio = 300;
h0_panw_orio = 500;
kh_katw_orio = 0.75;
kh_panw_orio = 0.7;
}
kh = ((kh_panw_orio - kh_katw_orio) / (h0_panw_orio - h0_katw_orio)) * (h0 -
h0_katw_orio) + kh_katw_orio;
}
if(h0 == 100) {
kh = 1;
} else if(h0 == 200) {
kh = 0.85;
}
return kh;
}
function findSigmaS(x, megisth_diametros, index) {
var phimax = 0;
var katw_orio_x = 0, panw_orio_x = 0, katw_orio_y = 0, panw_orio_y = 0;
if(x <= 160) {
phimax = megisth_diametros[0][index];
} else if(x > 450) {
phimax = megisth_diametros[7][index];
} else {
if(x <= 200) {
katw_orio_x = 160;
panw_orio_x = 200;
katw_orio_y = megisth_diametros[0][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[1][index];
} else if(x <= 240) {
katw_orio_x = 200;
```

```
panw_orio_x = 240;
katw_orio_y = megisth_diametros[1][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[2][index];
} else if(x <= 280) {
katw_orio_x = 240;
panw_orio_x = 280;
katw_orio_y = megisth_diametros[2][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[3][index];
} else if(x <= 320) {
katw_orio_x = 280;
panw_orio_x = 320;
katw_orio_y = megisth_diametros[3][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[4][index];
} else if(x <= 360) {
katw_orio_x = 320;
panw_orio_x = 360;
katw_orio_y = megisth_diametros[4][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[5][index];
} else if(x <= 400) {
katw_orio_x = 360;
panw_orio_x = 400;
katw_orio_y = megisth_diametros[5][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[6][index];
} else if(x <= 450) {
katw_orio_x = 400;
panw_orio_x = 450;
katw_orio_y = megisth_diametros[6][index];
panw_orio_y = megisth_diametros[7][index];
}
phimax = ((panw_orio_y - katw_orio_y) / (panw_orio_x - katw_orio_x)) * (x -
katw_orio_x) + katw_orio_y;
```

```
}  
return phimax;  
}  
// ----- Public methods  
return {  
  findDeflectionEC2 : function(data) {  
    deflectionEC2(data);  
  },  
  findCrackWidthEC2 : function(data) {  
    crackWidthEC2(data);  
  },  
  findCrackWidthACI : function(data) {  
    aciCrackWidth(data);  
  },  
  findDeflectionACI : function(data) {  
    aciDeflection(data);  
  }  
}  
}());
```


ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ACI Committee 318 (2011), "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) An ACI Standard and Commentary". American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich

CEN (2004), "Eurocode 2 Design of Concrete Structures-Part 1: General rules and rules for buildings (EN 1992-1-1:2004)", European Committee for Standardization

Ghali, A., Favre, R. and Eldbardry, M. (2002), "Concrete Structures, Stresses and Deformations 3rd edition", Spon Press, London and New York.

Hassoun M. Nadim, Al-Manaseer Akthem (2005), "Structural Concrete, Theory and Design", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey

Martin, L., Purkiss J. , (2006), "Concrete Design to EN 1992 – 2nd edition", Butterworth-Heinemann, London.

Narayanan, R.S., Beeby, A. (2005), "Designers' Guide to EN1992-1-1 and En1992-1-2. General Rules and Rules for Buildings and Structural Fire Design", Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD.

Nawy, E. G., (2005), "Reinforced Concrete – A fundamental Approach", Upper Saddle River, New Jersey 07458.