



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

---

**Διπλωματική Εργασία**

---

**ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΓΡΑΜΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΟΣ  
ΜΕ ΑΝΕΠΑΡΚΕΙΣ ΕΝΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΑΡΑΘΕΣΗ  
ΥΠΟ ΜΟΝΟΤΟΝΙΚΗ ΦΟΡΤΙΣΗ**

---

**Σκαλτσάς Ιωάννης**

**Επιβλέπων Καθηγητής: Κ. Γ. Τρέζος**

**Συνεπιβλέπων: Π. Μ. Χρονόπουλος (ΥΔ)**

**Αθήνα, Μάρτιος 2013**

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΠΡΟΛΟΓΟΣ</b>	σελίδα 3
<b>Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	
1.1. Γενικά περί ενώσεων	σελίδα 7
1.2. Ενώσεις με παράθεση	σελίδα 16
<b>Κεφάλαιο 2: ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΟΠΙΣΗΣ ΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ 2 ΚΑΙ 8</b>	
2.1. Συνάφεια	σελίδα 21
2.2. Αγκυρώσεις	σελίδα 25
2.3. Ενώσεις με παράθεση – ματίσματα	σελίδα 30
<b>Κεφάλαιο 3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΤΑ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8 ΚΑΙ ΚΑΝ.ΕΠΕ.</b>	
3.1. Βασικά χαρακτηριστικά μηχανικής συμπεριφοράς δομικού στοιχείου	σελίδα 37
3.2. Συμπεριφορά υφιστάμενων στοιχείων χωρίς βλάβες, ή νέων στοιχείων	σελίδα 41
<b>Κεφάλαιο 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ</b>	
4.1. Περιγραφή και σχολιασμός της δοκιμής και της πειραματικής διάταξης	σελίδα 53
4.2. Ενόργανη παρακολούθηση πειραματικής διαδικασίας	σελίδα 55
4.3. Μηχανικά χαρακτηριστικά υλικών	σελίδα 60
4.4. Σχεδιασμός δοκιμών	σελίδα 64
4.5. Πειραματικά αποτελέσματα και διαγράμματα V-δ	σελίδα 71

## **Κεφάλαιο 5: ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

5.1. Μηχανισμοί αστοχίας	σελίδα 73
5.2. Εγκάρσιος οπλισμός	σελίδα 76
5.3. Μέση ενεργή τάση διαμήκων ράβδων	σελίδα 78
5.4. Αντιστάσεις – καμπτική ροπή $M$ / τέμνουσα δύναμη $V$	σελίδα 79
5.5. Ικανότητα παραμόρφωσης – στροφή χορδής $\theta$ / μετακίνηση $\delta$	σελίδα 81

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**

Σύμβολα	i
Εικόνες από την πειραματική διαδικασία	vi
Βιβλιογραφία	x

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Μία κατασκευή είναι ένα κοινωνικό και οικονομικό αγαθό, το οποίο πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες απαιτήσεις, όπως είναι η ασφάλεια, η λειτουργικότητα, η οικονομία, η αισθητική, ο σεβασμός στο περιβάλλον κ.α. Οι περισσότερες από αυτές τις απαιτήσεις, οι οποίες πρέπει να ικανοποιούνται ταυτοχρόνως, είναι πολύ συχνά αντιφατικές μεταξύ τους, αναγκάζοντας τους Μηχανικούς, κατά τον σχεδιασμό μιας κατασκευής, να σταθμίσουν την αξία και τη σημασία τους.

Από τη σκοπιά του Πολιτικού Μηχανικού, σε κάθε περίπτωση, η ασφάλεια και η αξιοπιστία της κατασκευής, αποτελεί το βασικό στόχο. Με βάση αυτήν την προτεραιότητα, έχουν αναπτυχθεί και υιοθετηθεί από διάφορους Κανονισμούς, μέθοδοι και πρακτικές για την ασφαλή μελέτη και τον αξιόπιστο σχεδιασμό των κατασκευών. Η σωστή εφαρμογή και η επιμελής τήρηση των προβλέψεων των σύγχρονων Κανονισμών, διασφαλίζει την επιθυμητή φέρουσα ικανότητα και λειτουργικότητα των κατασκευών.

Είναι όμως πάντα επίκαιρη και αναγκαία η συνεχής διερεύνηση των υφιστάμενων μεθόδων και πρακτικών σχεδιασμού, με στόχο την επιπλέον τεκμηρίωση ή αναθεώρησή τους.

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία (ΔΕ) αναδεικνύει και εξετάζει ένα σημαντικό και διαπιστωμένο πρόβλημα του συνόλου των κατασκευών από ΟΣ. Η αποφυγή ένωσης των ράβδων οπλισμού είναι πρακτικά αδύνατη, τουλάχιστον για τις συνήθεις ανάγκες συμβατικών νέων κτιρίων. Εάν αναλογιστούμε και τις ολοένα αυξανόμενες διαστάσεις των σύγχρονων κατασκευών, αντιλαμβανόμαστε πως η ένωση των ράβδων οπλισμού είναι ένα σημαντικό πρόβλημα το οποίο εντείνεται συνεχώς. Επιπλέον, πολύ συχνά, σε συνήθη κτιριακά έργα ή σε κατασκευές χαμηλής ποιότητας, ο σχεδιασμός και η διάταξη επαρκών ενώσεων αμελείται ή αντιμετωπίζεται επιπόλαια, τόσο στην φάση της μελέτης, όσο και στην φάση της κατασκευής. Ακόμα περισσότερο, αντίστοιχα προβλήματα παρουσιάζονται σε υφιστάμενα κτίρια και ιδιαίτερα σε παλαιότερες κατασκευές, σχεδιασμένες και κατασκευασμένες με βάση την έως τώρα διαθέσιμη γνώση (και τους παλαιούς Κανονισμούς).

Οι ανεπαρκείς ενώσεις ράβδων οπλισμού υπονομεύουν την ασφάλεια και την αξιοπιστία των δομικών έργων από Οπλισμένο Σκυρόδεμα (ΟΣ), εισάγουν πρόσθετες αδυναμίες στις κατασκευές και αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας τους. Η επικινδυνότητα εντείνεται, αν αναλογιστούμε πως πρόκειται για αφανή ελαττώματα των κατασκευών, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος μη έγκαιρης διάγνωσής τους, με σημαντικές επιπτώσεις κατά τις επεμβάσεις σε δομικά έργα ΟΣ (π.χ. καθ' ύψος προσθήκη ορόφου σε υφιστάμενη κατασκευή με ανεπαρκή μήκη αναμονών, αλλαγή χρήσης υφιστάμενης κατασκευής με αύξηση των ωφέλιμων φορτίων λειτουργίας και, συνεπώς, αυξημένες απαιτήσεις σε μήκη παράθεσης, αγκύρωσης, κ.λπ.).

Η παρούσα ΔΕ εκπονείται με στόχο να προσδιορίσει τις συνέπειες που πιθανώς επιφέρει, η ανεπαρκής, βάσει των σύγχρονων Κανονισμών, ένωση με παράθεση («μάτισμα») των διαμήκων οπλισμών, εντός των κρίσιμων περιοχών στοιχείων από ΟΣ, στη συνολική συμπεριφορά τους. Σε αυτό το πλαίσιο, εξετάστηκαν κυρίως οριζόντια γραμμικά στοιχεία (δοκοί) από ΟΣ, αλλά και κατακόρυφα (υποστυλώματα). Η θεωρητική και πειραματική διερεύνηση, καθώς και η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων, βασίστηκε στην ανάλυση και σύγκριση των ακόλουθων παραμέτρων:

- των σχετικών προβλέψεων και απαιτήσεων των σύγχρονων Κανονισμών (ΕΚΩΣ 2000, Ευρωκώδικες 2 (Μέρος 1) και 8 (Μέρος 1 και 3), ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012), όσον αφορά στις ενώσεις με παράθεση των οπλισμών σε στοιχεία από ΟΣ, με ή χωρίς αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας
- των διαθέσιμων πειραματικών αποτελεσμάτων, από σχετικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΟΣ/ΕΜΠ σε γραμμικά στοιχεία με ανεπαρκή ματίσματα, υπό μονοτονική φόρτιση και μηδενικό αξονικό φορτίο

Με την παρούσα ερευνητική εργασία, αναδεικνύονται σημαντικά και επίκαιρα θέματα γύρω από την εν γένει συμπεριφορά δομικών στοιχείων από ΟΣ, με ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον, όπως π.χ. η διαθέσιμη πλαστιμότητα, το μήκος και η πιθανή θέση της πλαστικής άρθρωσης, η επιρροή στην δυνατότητα απορρόφησης ενέργειας, κ.λπ. Το παρόν ερευνητικό έργο αποκτά ιδιαίτερη αξία και σημασία, αν αναλογιστούμε το πλήθος των πρακτικών εφαρμογών του, σε καθημερινά προβλήματα που αντιμετωπίζονται συχνά κατά την κατασκευή δομικών έργων από ΟΣ.

Η εκπόνηση της παρούσας ΔΕ καθώς και οι παρουσιαζόμενες πειραματικές δοκιμές πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΟΣ) της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου (ΕΜΠ), υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Τρέζου Κωνσταντίνου και του Υποψήφιου Διδάκτορα κ. Χρονόπουλου Πέτρου.

Θα ήθελα σε αυτό το σημείο, να ευχαριστήσω τον κ. Τρέζο για τη συνολική επίβλεψη αυτής της εργασίας, καθώς επίσης και τον κ. Χρονόπουλο για την αμέριστη βοήθειά του στη διεξαγωγή των πειραμάτων και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Σκαλτσάς Ιωάννης

Μάρτιος 2013

## **ABSTRACT**

Within the framework of an extended theoretical and experimental programme on anchorages and lap splices of RC members under monotonic loads (including critical regions of earthquake resistant structural elements), underway in the Lab. of RC/National Technical University of Athens, a series of tests is completed on beams (scale 1/1 to 1/2, shear span to depth ratio approx. equal to 3, zero axial load) with inadequate lap splices (for 100% of tension reinforcement).

The main parameters of these tests were (i) the detailing of lap splices within the element's section, (ii) the degree of passive/internal confinement (by concrete cover or stirrups), and (iii) the length of lap splices, equal to 15 or 30 bar diameters.

Based on the results of this study and on the first comparisons with the provisions of modern Codes, e.g. the ECs 2 and 8 (Parts 1 and 3) or the nGCSI (new Greek Code on Structural (Assessment and) Interventions), it could be argued that shorter (than the normative) lap splice lengths could be effective and safe (at least for lengths more than an absolute minimum), depending on the required ductility and on certain structural parameters.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1. ΓΕΝΙΚΑ ΠΕΡΙ ΕΝΩΣΕΩΝ

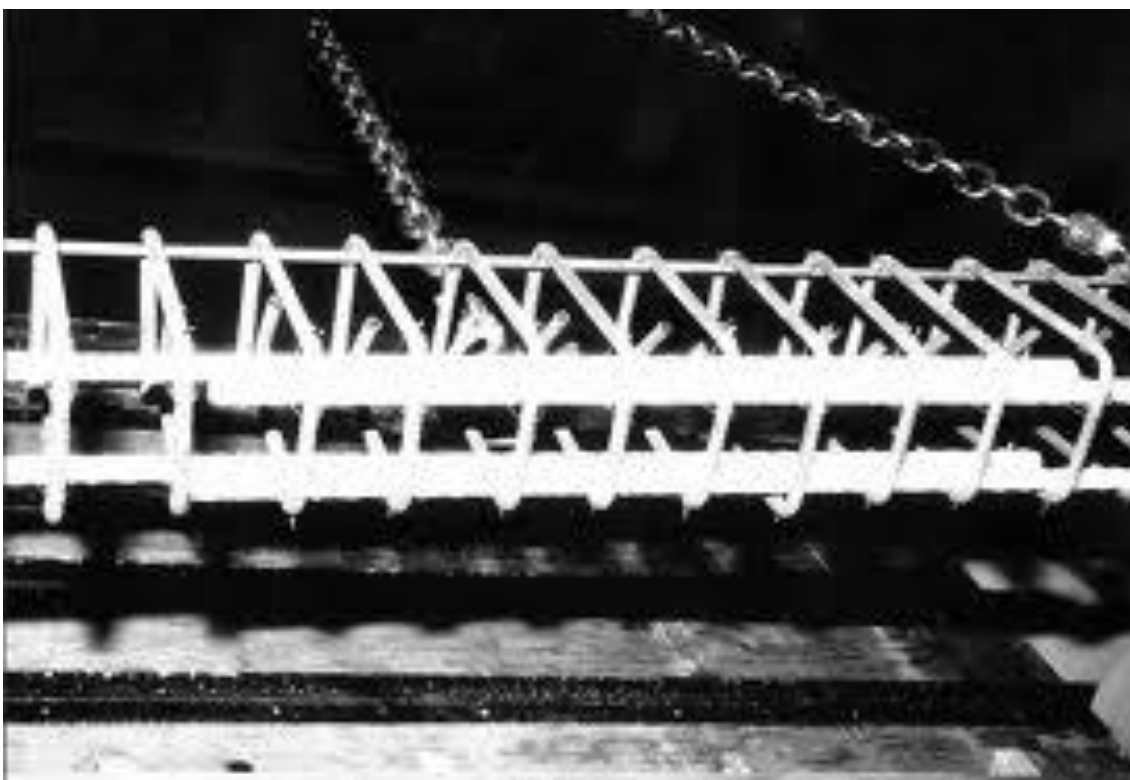
Για πρακτικούς λόγους, υπάρχει πάντα η ανάγκη ένωσης ράβδων οπλισμού σχεδόν σε όλες τις κατασκευές από οπλισμένο σκυρόδεμα. Η ένωση οπλισμών, αποτελούσε και αποτελεί πρόκληση για το Μηχανικό. Οι ενώσεις των οπλισμών, πρέπει να αποφεύγονται σε περιοχές υψηλής έντασης, π.χ. σε πιθανές θέσεις σχηματισμού πλαστικών αρθρώσεων στοιχείων με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας, εκτός αν αποδειχθεί πειραματικώς (με δοκιμές για συμβατές μετακινήσεις υπό ανακυκλιζόμενη ένταση) ότι δεν επηρεάζεται η προσδοκώμενη πλαστιμότητα.

Κατά τον Κανονισμό Τεχνολογίας Χαλύβων (KTX 2008), γενικώς, οι ενώσεις και οι συνδέσεις των οπλισμών πρέπει να έχουν, κατ' ελάχιστον, αντοχή όχι μικρότερη από την αντοχή της ράβδου, εξασφαλίζοντας τη μεταφορά της δύναμης από τη μία ράβδο στην άλλη, μέσω :

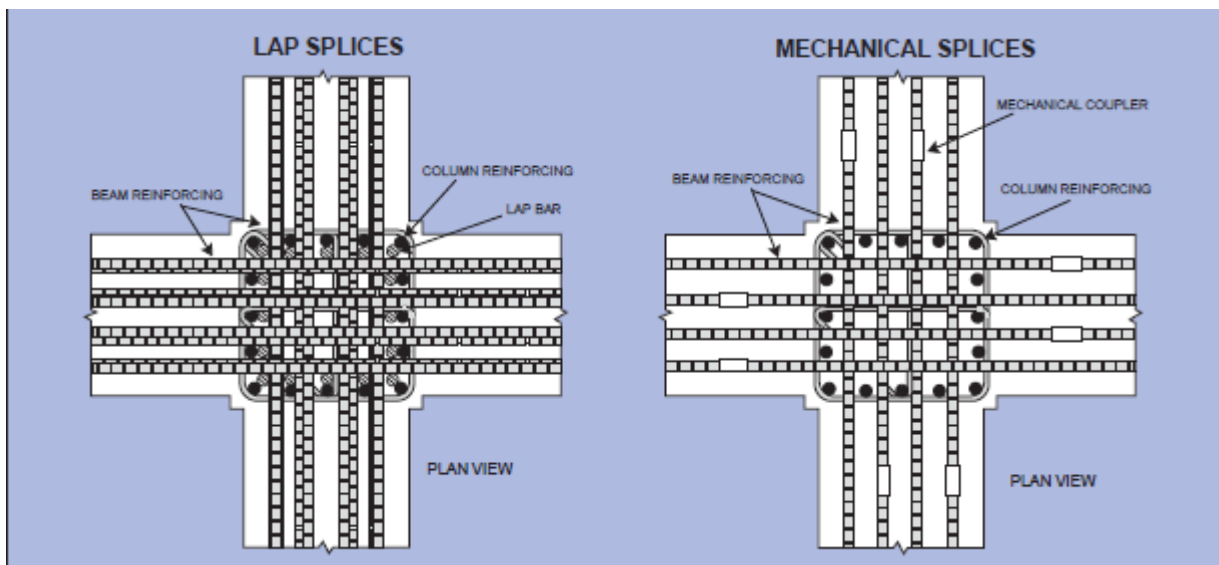
- Παράθεσης / υπερκάλυψης των ράβδων οπλισμού («μάτισμα») με ευθύγραμμα άκρα, με άγκιστρα ημικυκλικά ή ορθογωνικά, με αναβολείς, με ευθύγραμμα άκρα με συγκολλητούς εγκάρσιους οπλισμούς (π.χ. σε συγκολλητά δομικά πλέγματα).
- Μηχανικών μέσων – κοχλιωτών (αρμοκλείδες, ενώσεις με τήγμα μετάλλου κ.α.). Τέτοιες συνδέσεις μπορεί να είναι κοχλιωτές, με συνδέσμους (μούφες), με συμπίεση κ.λπ. Ειδικότερα για τις κοχλιωτές συνδέσεις πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε, κατά τη μηχανουργική κατεργασία για τη δημιουργία σπειρώματος, η αναπόφευκτη απώλεια μαρτενσίτη να μην οδηγεί σε μείωση της αντοχής της ράβδου. Σε κάθε περίπτωση, τα μέσα σύνδεσης και η ένωση θα πρέπει να καλύπτονται από εγκριτικές αποφάσεις, «μέσω κατάλληλων δοκιμών υπό συνθήκες συμβατές με την επιθυμητή στάθμη πλαστιμότητας» (Ευρωκώδικας 8 και ΕΚΩΣ).
- Συγκόλλησης των ράβδων οπλισμού. Κατά τον Ευρωκώδικα 8 (μέρος 1, Ενότητα 5.6) απαγορεύονται στις κρίσιμες περιοχές δομικών στοιχείων συγκολλήσεις με παράθεση ή με λωρίδες. Η διάταξη των συνδέσεων με συγκόλληση γίνεται κατά την Ενότητα 3.2.5 του Ευρωκώδικα 2 (Ενότητα 17.7.4 του ΕΚΩΣ). Για τις συγκολλήσεις χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ισχύει και το Κεφάλαιο 8 του KTX 2008.



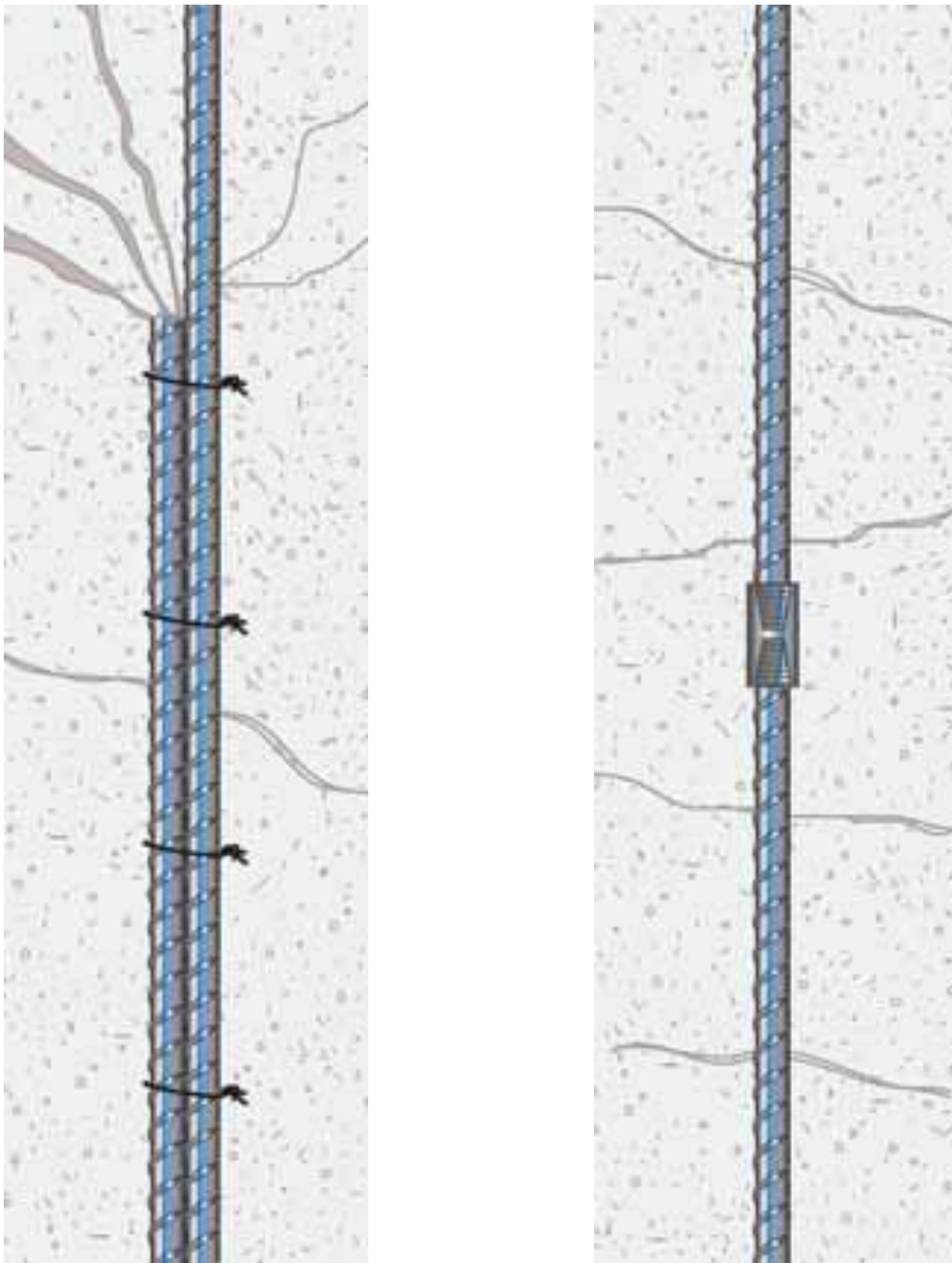
Στις εικόνες που ακολουθούν, παρουσιάζονται όλοι οι προαναφερθέντες τρόποι ένωσης ράβδων οπλισμού σκυροδέματος.



*Εικόνα 1: Ένωση ράβδων οπλισμού με υπερκάλυψη ευθύγραμμων άκρων*



*Εικόνα 2: Ένωση ράβδων οπλισμού με υπερέκλυση και με μηχανικά μέσα  
Αποφυγή «συνωστισμού» οπλισμών μέσω εφαρμογής ενώσεων με μηχανικά μέσα*



Εικόνα 3: Διαφορά ρηγμάτωσης μεταξύ ένωσης με παράθεση και με μηχανικά μέσα

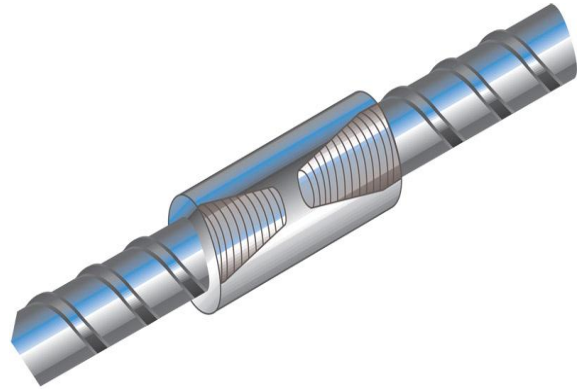
Έντονη ρηγμάτωση στο άκρο του «ματίσματος»



Εικόνα 4: Ένωση με μηχανικά μέσα (couplers), με εμφανές το πρόβλημα της ανεπαρκούς πλευρικής εξασφάλισης των διαμήκων οπλισμών έναντι λυγισμού από τους συνδετήρες



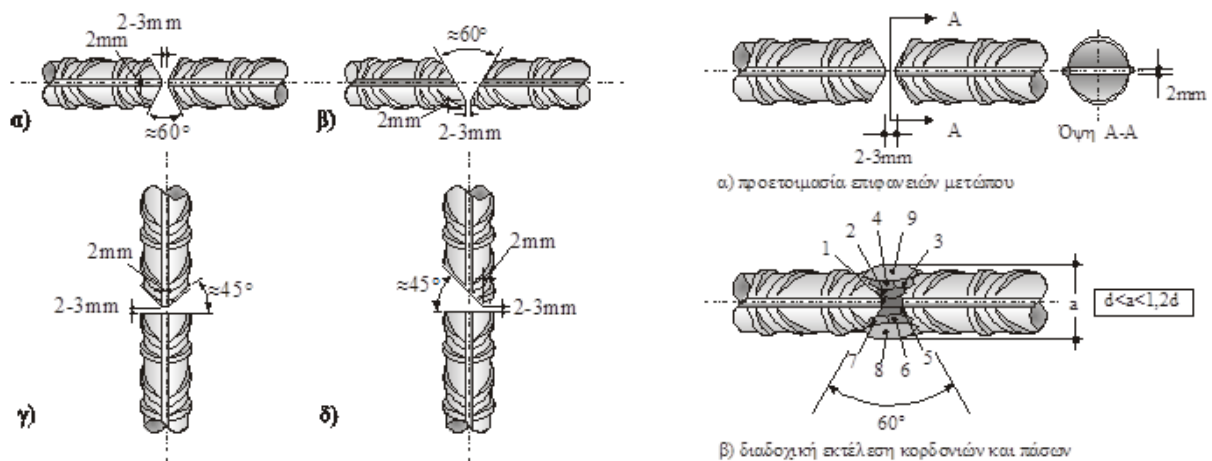
*Εικόνα 5: Διάφοροι τύποι ένωσης με μηχανικά μέσα (couplers)*



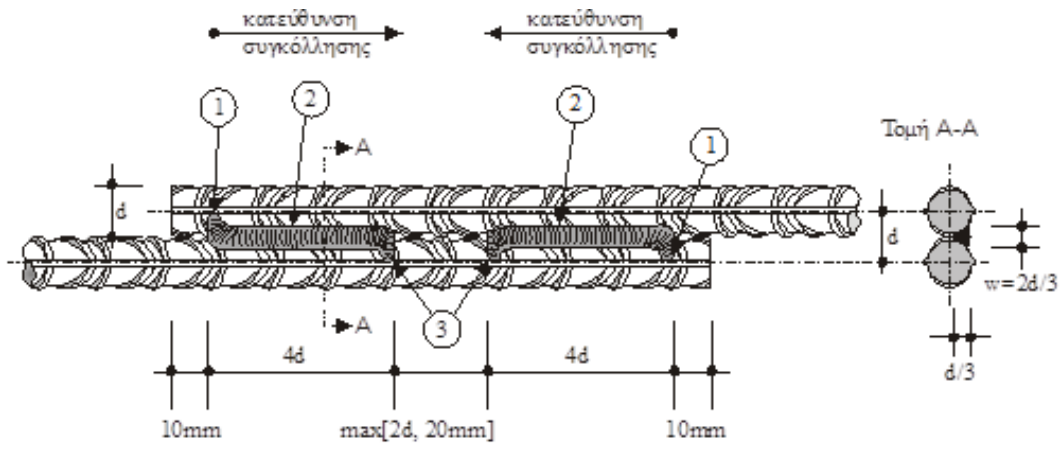
*Εικόνα 6: Ένωση ράβδων οπλισμού με κοχλιωτή σύνδεση,  
με κυλινδρικό και κωνικό σπείρωμα*



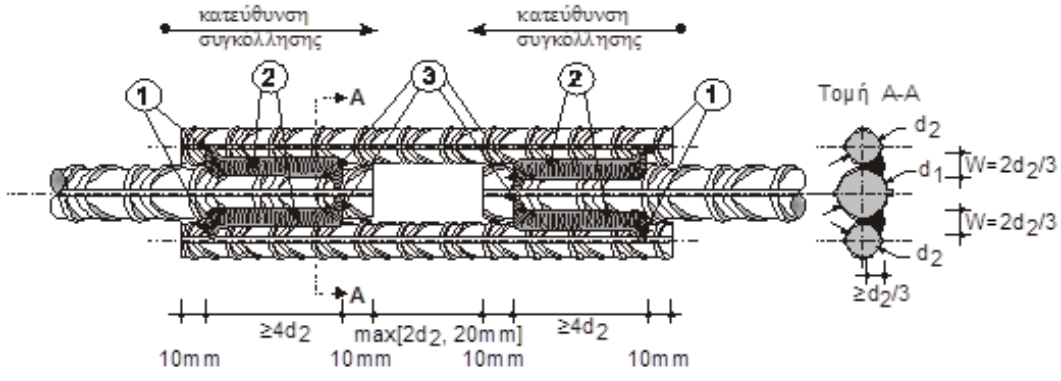
*Εικόνα 7: Μηχανουργική κατεργασία για τη δημιουργία σπειρώματος. Η αναπόφευκτη απώλεια μαρτενσίτη δεν πρέπει να οδηγεί σε μείωση της αντοχής της ράβδου*



*Εικόνα 8: Συγκολλητή μετωπική σύνδεση (άκρο με άκρο) με τεχνικές τόξου*



*Εικόνα 9: Συγκολλητή σύνδεση κατά παράθεση με τεχνικές τόξου*



Η σημειούμενη κατεύθυνση συγκόλλησης αφορά οριζόντιες ράβδους. Αν οι ράβδοι είναι κατακόρυφες, η συγκόλληση γίνεται από κάτω προς τα πάνω.

*Εικόνα 10: Συγκολλητή σύνδεση με λωρίδες με τεχνικές τόξου*

## Πηγές Εικόνων

Εικόνα 1	επάνω: <a href="http://onlinemanuals.txdot.gov">onlinemanuals.txdot.gov</a> κάτω: <a href="http://www.sciencedirect.com">www.sciencedirect.com</a>
Εικόνα 2	επάνω αριστερά: <a href="http://www.krc.co.in">www.krc.co.in</a> επάνω δεξιά: <a href="http://www.concreteconstruction.net">www.concreteconstruction.net</a> μέσον: <a href="http://www.erico.com">www.erico.com</a> κάτω: <a href="http://rothenbergerelectrofusioontools.com">rothenbergerelectrofusioontools.com</a>
Εικόνα 3	<a href="http://www.erico.com">www.erico.com</a>
Εικόνα 4	<a href="http://www.edingaps.com">www.edingaps.com</a>
Εικόνα 5	<a href="http://www.erico.com">www.erico.com</a>
Εικόνα 6	αριστερά: <a href="http://www.hotfrog.com">www.hotfrog.com</a> δεξιά: <a href="http://www.midlandsteelreinforcement.co.uk">www.midlandsteelreinforcement.co.uk</a>
Εικόνα 7	<a href="http://www.veingle.com">www.veingle.com</a>
Εικόνα 8	Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων 2008
Εικόνα 9	Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων 2008
Εικόνα 10	Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων 2008



## 1.2. ΕΝΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΑΡΑΘΕΣΗ

Σύμφωνα με τους σύγχρονους Κανονισμούς (Ευρωκώδικες 2 και 8, αλλά και τον «παλαιότερο» ΕΚΩΣ), συνιστάται να αποφεύγονται οι ενώσεις και συνδέσεις στις κρίσιμες περιοχές των δομικών στοιχείων με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας. Όμως, για τις ενώσεις με παράθεση (και υπό ορισμένες προϋποθέσεις και για τις μηχανικές ενώσεις), δίνονται τόσο γενικές όσο και ειδικότερες διατάξεις ανά δομικό στοιχείο.

Επιπλέον, η ένωση με παράθεση των οπλισμών στις κρίσιμες περιοχές στοιχείων από ΟΣ εξακολουθεί να είναι ο κανόνας, τουλάχιστον για συμβατικά νέα κτίρια, και ακόμα περισσότερο, για υφιστάμενα κτίρια, σχεδιασμένα και κατασκευασμένα με βάση την έως τώρα διαθέσιμη γνώση (και τους «παλαιότερους» Κανονισμούς).

Η πρόσφατη εμπειρία από σεισμούς έχει δείξει πως αστοχίες σε κατακόρυφα φέροντα στοιχεία, που σχετίζονται με τις ενώσεις των οπλισμών, μπορούν να έχουν καταστροφικές συνέπειες για τις κατασκευές. Ο ελλειπής σχεδιασμός και οι ακατάλληλες λεπτομέρειες όπλισης των ενώσεων με παράθεση εισάγει σοβαρές αδυναμίες στις κατασκευές ΟΣ, με σημαντικές επιπτώσεις στη μηχανική συμπεριφορά τους. Συνήθως, η αστοχία στην περιοχή ένωσης των οπλισμών ισοδυναμεί με πρόωρη και ψαθυρή αστοχία τμήματος ή ακόμα και του συνόλου της κατασκευής.

Στην πλειονότητα των περιπτώσεων, τα ματίσματα οπλισμών σε παλαιότερες κατασκευές, δεν συμβαδίζουν με τις σύγχρονες αντιλήψεις και τις αντίστοιχες Κανονιστικές προβλέψεις. Αλλά ακόμα και σε νεότερες κατασκευές, και κυρίως σε συνήθη κτιριακά έργα ή σε δομήματα χαμηλής ποιότητας, ο σχεδιασμός και η διάταξη επαρκών ενώσεων συχνά αμελείται ή αντιμετωπίζεται επιπόλαια, τόσο στην φάση της μελέτης, όσο και στην φάση της κατασκευής. Επιπρόσθετα, η κοινή πρακτική της αύξησης του μήκους παράθεσης, χωρίς κατάλληλη διάταξη και επαρκή εγκάρσιο οπλισμό, δεν μπορεί να εξασφαλίσει ικανοποιητική συμπεριφορά.

Είναι προφανές λοιπόν, πως ο ανεπαρκής σχεδιασμός και η ακατάλληλη διάταξη των ενώσεων, αποτελούν ένα σύνθετο πρόβλημα, που μπορεί να απαντηθεί τόσο σε παλαιότερες (κυρίως), όσο και σε σύγχρονες κατασκευές. Οι ανεπαρκείς ενώσεις ράβδων οπλισμού δύναται να καταστούν καθοριστικές για την ασφάλεια και την αξιοπιστία των δομικών έργων ΟΣ, καθώς εισάγουν σημαντικές αδυναμίες στις κατασκευές και αυξάνουν την πιθανότητα αστοχίας τους. Η επικινδυνότητα εντείνεται, αν αναλογιστούμε πως πρόκειται για αφανή ελαττώματα των κατασκευών, με αποτέλεσμα να υπάρχει ο κίνδυνος μη έγκαιρης διάγνωσής τους, με σημαντικές επιπτώσεις κατά τις επεμβάσεις σε υφιστάμενα δομήματα.

Στις εικόνες που ακολουθούν, παρατίθενται περιπτώσεις αστοχίας του φέροντος οργανισμού, εξαιτίας ανεπαρκούς μήκους παράθεσης των ράβδων οπλισμού.



Εικόνα 11: Αστοχίες σε κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα) ΟΣ με ανεπαρκές μήκος παράθεσης και ελλιπή εγκάρσιο οπλισμό



Εικόνα 12: Αστοχίες σε κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα) ΟΣ με ανεπαρκές μήκος παράθεσης και ελλιπή εγκάρσιο οπλισμό



Εικόνα 13: Αστοχίες σε κατακόρυφα στοιχεία (υποστυλώματα) ΟΣ με «επαρκές» μήκος παράθεσης και ελλιπή εγκάρσιο οπλισμό

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΟΠΛΙΣΗΣ ΕΝΩΣΕΩΝ ΜΕ ΠΑΡΑΘΕΣΗ ΚΑΤΑ ΤΟΥΣ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΕΣ 2 ΚΑΙ 8

### 2.1. ΣΥΝΑΦΕΙΑ

Με τον όρο συνάφεια, καλείται το σύνολο των παραγόντων που παρεμποδίζουν τη σχετική ολίσθηση μεταξύ των ράβδων οπλισμού και της μάζας του σκυροδέματος που τις περιβάλλει. Καθώς στα δομικά στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα, οι δράσεις εφαρμόζονται στο δομικό στοιχείο ως σύνολο και όχι επιμέρους στο χάλυβα και στο σκυρόδεμα, η εξασφάλιση κοινών παραμορφώσεων και η πλήρης συνεργασία μεταξύ των δύο υλικών, εξαρτάται από τη συνάφεια. Οι βασικότερες παράμετροι που καθορίζουν τη συνάφεια είναι:

- Η ποιότητα του σκυροδέματος
- Οι διαστάσεις του δομικού στοιχείου
- Η θέση, η κλίση, η μορφή της επιφάνειας των ράβδων οπλισμού (λεία ή με ραβδώσεις)

Η ελάχιστη επικάλυψη των οπλισμών, πρέπει να εξασφαλίζει την ανάπτυξη και μεταβίβαση των τάσεων συνάφειας, οι οποίες θεωρούνται σταθερές κατά μήκος των ράβδων. Μ' αυτόν τον τρόπο, αναπτύσσονται ίσες μηκύνσεις στις ράβδους οπλισμού και στις γειτονικές ίνες σκυροδέματος. Η εφελκυστική όμως μήκυνση την οποία δέχεται το σκυρόδεμα πριν αυτό ρηγματωθεί, είναι μικρή (περίπου 0,15 έως 0,25‰) σε σχέση με την αντίστοιχη του χάλυβα. Κατ' αυτόν τον τρόπο, αμέσως μετά τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος, οι οπλισμοί καλούνται να παραλάβουν όλες τις δυνάμεις εφελκυσμού, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η ισορροπία στο δομικό στοιχείο, χωρίς όμως υπερβολικές παραμορφώσεις. Ακόμη, οι αποστάσεις μεταξύ των οπλισμών πρέπει να είναι τέτοιες, ώστε το σκυρόδεμα να μπορεί να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί ικανοποιητικά για να αναπτυχθεί επαρκής συνάφεια.

Γενικά, στη θεωρία υπολογισμού του Οπλισμένου Σκυροδέματος, δεχόμαστε ότι και μετά τη ρηγμάτωσή του, ισχύει  $\epsilon_c = \epsilon_s$ . Δεχόμαστε δηλαδή ότι δεν παρουσιάζεται ολίσθηση μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, μια παραδοχή που ισχύει χονδρικά, αν θεωρήσουμε μία ευρύτερη περιοχή στην οποία έχουν εκδηλωθεί πολλές κύριες ρωγμές. Στην άμεση όμως περιοχή των κυρίων ρωγμών, ακόμη και ανάμεσα στις κύριες ρωγμές, εμφανίζονται μικρορωγμές και

επομένως και σχετικές ολισθήσεις ανάμεσα στα δύο υλικά. Αρχικά, ανάμεσα στην επιφάνεια του χάλυβα και στο σκυρόδεμα που τον περιβάλλει, υπάρχει η πρόσφυση, η οποία αντιστοιχεί σε ένα πολύ μικρό ποσοστό της τιμής της συνάφειας. Η πρόσφυση όμως καταστρέφεται ακόμη και για πολύ μικρές μετατοπίσεις. Μετά την καταστροφή της πρόσφυσης, έναντι των μικρομετατοπίσεων μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, ενεργοποιείται η μάζα του σκυροδέματος που περιβάλλει τον χάλυβα, και προβάλλει αντίσταση μέσω του μηχανισμού της τριβής. Όπως είναι φυσικό, η λόγω τριβής συνάφεια, αυξάνει με την αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας της ράβδου, και με την αύξηση της εγκάρσιας, προς την κατεύθυνση εξολκείσεως, θλίψης. Στην περίπτωση χαλύβων με μηχανικές οδοντώσεις (νευροχάλυβες), το μεγαλύτερο ποσοστό της συνολικής συνάφειας προέρχεται από τη μεταξύ των νευρώσεων αντίσταση του σκυροδέματος. Στις θέσεις των νευρώσεων αναμένεται τοπική θραύση του σκυροδέματος και μικρορηγμάτωση, ενώ στη μεταξύ των νευρώσεων περιοχή, η θραύση αρχίζει ως εφελκυστική, αντίστοιχη με τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων.

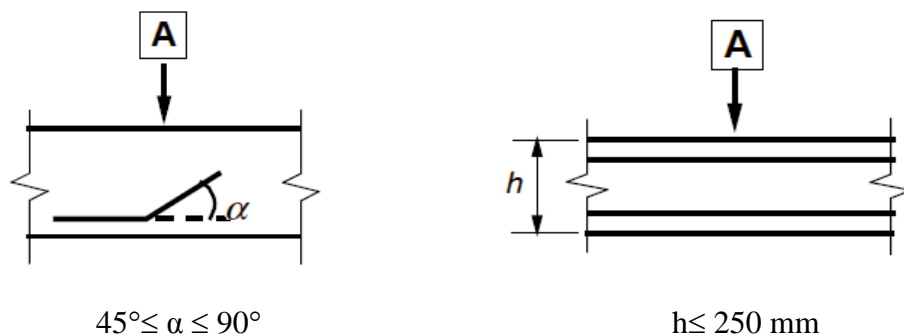
Υπάρχουν κατασκευαστικές προϋποθέσεις που δημιουργούν “καλές” ή “κακές” συνθήκες συνάφειας. Όταν οι ράβδοι τοποθετούνται παράλληλα με τη διεύθυνση σκυροδετήσεως, εξασφαλίζονται καλές συνθήκες συνάφειας. Όσο οι οπλισμοί έχουν κλίση μεγαλύτερη των  $45^\circ$  από τη διεύθυνση σκυροδετήσεως, το νωπό σκυρόδεμα παθαίνει “συνίζηση”, δηλαδή τα στερεά του σκυροδέματος κατεβαίνουν, και κάτω από οριζόντια τοποθετημένες ράβδους στο πάνω μέρος μιας μάζας μπετού, δημιουργείται μηνίσκος νερού, ο οποίος αργότερα απορροφάται από το σκυρόδεμα και επομένως, ένα μέρος της περιμέτρου της ράβδου δε συνεργάζεται αμέσως με το σκυρόδεμα.

Σε περίπτωση όπου μια περίπου οριζόντια ράβδος οπλισμού έχει τοποθετηθεί τουλάχιστον 30cm κάτω από το άνω άκρο του στοιχείου ή το πολύ 25cm πάνω από το κάτω άκρο του, δεν προλαβαίνει να δημιουργηθεί τέτοιος μηνίσκος νερού, οπότε οι συνθήκες συνάφειας θεωρούνται καλές. Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι οι συνθήκες καλής συνάφειας δεν πρέπει να διαταράσσονται από άλλους λόγους, όπως παραδείγματος χάριν από συσσώρευση οπλισμών. Για αυτόν το λόγο επιβάλλονται κατασκευαστικές διατάξεις ως προς την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των ράβδων οπλισμού, έτσι ώστε να περιβάλλονται διαρκώς οι ράβδοι με σκυρόδεμα.

Επίσης, το ελάχιστο πάχος επικάλυψης πρέπει να είναι επαρκές, ώστε να μειώνεται ο κίνδυνος σχηματισμού διαμήκων και εγκάρσιων ρωγμών λόγω των δυνάμεων διαρρήξεως.

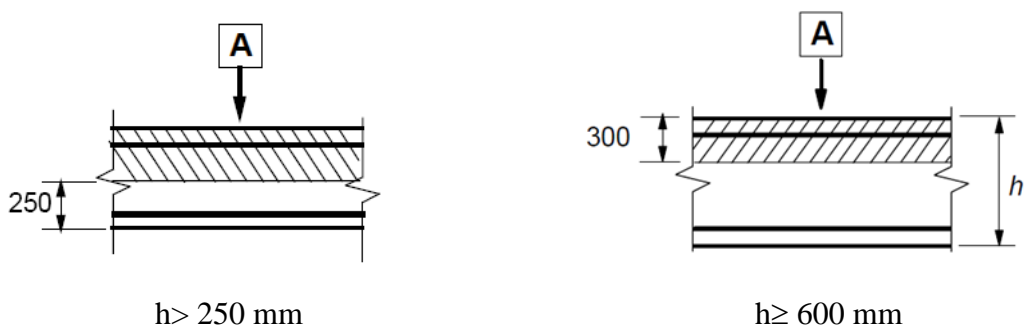
Ακολουθεί η σχηματική απεικόνιση ευνοϊκών και δυσμενών συνθηκών συνάφειας για τις ράβδους.

### **A** Διεύθυνση σκυροδέτησης



Σχήμα 1: Ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας για όλες τις ράβδους

### **A** Διεύθυνση σκυροδέτησης



Σχήμα 2: Δυσμενείς συνθήκες συνάφειας για τις ράβδους στις διαγραμμισμένες περιοχές



Η οριακή αντοχή συνάφειας πρέπει να είναι επαρκής ώστε να αποκλείεται αστοχία της συνάφειας. Κατά τον Ευρωκώδικα 2 (Ενότητα 8.4), η τιμή σχεδιασμού για την οριακή τάση συνάφειας,  $f_{bd}$ , για ράβδους με νευρώσεις μπορεί να ληφθεί ως:

$$f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \quad (2.1.1)$$

ενώ για λείες ράβδους ισχύει:

$$f_{bd} = f_{ctd} \quad (2.1.2)$$

όπου:

- $f_{ctd}$  η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος, η οποία προκύπτει από τη χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος  $f_{ctk,0,05}$  για ποσοστημόριο αστοχίας 5%, διαιρεμένη με το συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_c$  ( $f_{ctk,0,05} / \gamma_c$ ). Λόγω της αυξημένης ψαθυρότητας των σκυροδεμάτων υψηλής αντοχής, το  $f_{ctk,0,05}$  πρέπει να περιοριστεί στην τιμή που αντιστοιχεί στο C60/75, εκτός αν μπορεί να τεκμηριωθεί ότι η μέση τάση συνάφειας υπερβαίνει αυτό το όριο. Η τιμή  $f_{ctk,0,05}$  υπολογίζεται από τη σχέση:  $f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} = 0,7 \cdot 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$  (2.1.3)
- $f_{ck}$  η χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος
- $f_{ctm}$  η μέση εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος
- $\eta_1$  συντελεστής που σχετίζεται με την ποιότητα των συνθηκών συνάφειας και τη θέση της ράβδου κατά τη σκυροδέτηση
  - $\eta_1 = 1,0$  όταν εξασφαλίζονται 'ευνοϊκές' συνθήκες και
  - $\eta_1 = 0,7$  για όλες τις άλλες περιπτώσεις, εκτός αν μπορεί να τεκμηριωθεί η ύπαρξη ευνοϊκών συνθηκών συνάφειας
- $\eta_2$  συντελεστής που σχετίζεται με τη διάμετρο των ράβδων:
  - $\eta_2 = 1,0$  για  $\varnothing \leq 32 \text{ mm}$
  - $\eta_2 = (132 - \varnothing) / 100$  για  $\varnothing > 32 \text{ mm}$

Ο προσδιορισμός των μηκών αγκύρωσης και υπερκάλυψης βασίζεται στην τιμή σχεδιασμού της τάσεως συνάφειας  $f_{bd}$ .

## 2.2. ΑΓΚΥΡΩΣΕΙΣ

Οι ράβδοι οπλισμού πρέπει να είναι αγκυρωμένες, έτσι ώστε οι δυνάμεις συνάφειας να μεταβιβάζονται με ασφάλεια στο σκυρόδεμα χωρίς την εμφάνιση διαμήκων ρηγματώσεων ή αποφλοιώσεων. Εάν είναι απαραίτητο θα πρέπει να τοποθετείται εγκάρσιος οπλισμός.

Ο υπολογισμός του απαιτούμενου μήκους αγκύρωσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη τον τύπο του χάλυβα και τα χαρακτηριστικά συνάφειας των ράβδων. Το βασικό απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης,  $l_{b,req}$  για αγκύρωση ράβδου που καταπονείται με δύναμη  $A_s \cdot \sigma_{sd}$ , με την παραδοχή σταθερής τάσης συνάφειας ίσης με  $f_{bd}$ , δίδεται από την ακόλουθη σχέση, όπως προβλέπεται στον Ευρωκώδικα 2 (Ενότητα 8.4):

$$l_{b,req} = (\varnothing/4) \cdot (\sigma_{sd} / f_{bd}) \quad (2.2.1)$$

όπου:

- $\varnothing$  η διάμετρος της ράβδου σε mm
- $\sigma_{sd}$  η τάση σχεδιασμού της ράβδου στη θέση από όπου αρχίζει να μετράται η αγκύρωση, και υπολογίζεται:  $\sigma_{sd} = f_{yd} \cdot (A_{s,req} / A_{s,prov})$
- $f_{yd}$  η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του χάλυβα
- $A_{s,req}$  η κατά τους υπολογισμούς θεωρητικά απαιτούμενη διατομή οπλισμού
- $A_{s,prov}$  η υπάρχουσα διατομή οπλισμού

Στους υπολογισμούς, εισάγεται το μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού  $l_{bd}$ , που κατά τον Ευρωκώδικα 2 (Ενότητα 8.4), δίδεται από τη σχέση:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,req} \geq l_{b,min} \quad (2.2.2)$$

όπου:

- $l_{b,min}$  το ελάχιστο μήκος αγκύρωσης, το οποίο, αν δεν υπάρχει άλλος περιορισμός, ορίζεται ως εξής:
  - για αγκυρώσεις υπό εφελκυσμό:  $l_{b,min} = \max\{0,3 l_{b,req}; 10\varnothing; 100 \text{ mm}\}$
  - για αγκυρώσεις υπό θλίψη:  $l_{b,min} = \max\{0,6 l_{b,req}; 10\varnothing; 100 \text{ mm}\}$

- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  και  $\alpha_5$  είναι συντελεστές, οι οποίοι προσδιορίζονται αναλυτικά:
- $\alpha_1$ : συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της μορφής των ράβδων, με την παραδοχή επαρκούς επικάλυψης
  - $\alpha_2$ : συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της ελάχιστης επικάλυψης σκυροδέματος
  - $\alpha_3$ : συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της περίσφιγξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού
  - $\alpha_4$ : συντελεστής που σχετίζεται με την επίδραση μίας ή περισσότερων συγκολλημένων εγκάρσιων ράβδων ( $\emptyset_t > 0,6\emptyset$ ), κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού  $l_{bd}$
  - $\alpha_5$ : συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της πίεσης εγκάρσια στο επίπεδο της διάρρηξης, κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού
  - Απαιτείται  $(\alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_5) \geq 0,7$

Οι τιμές των παραπάνω συντελεστών καθορίζονται από τον πίνακα και τα σχήματα που ακολουθούν:

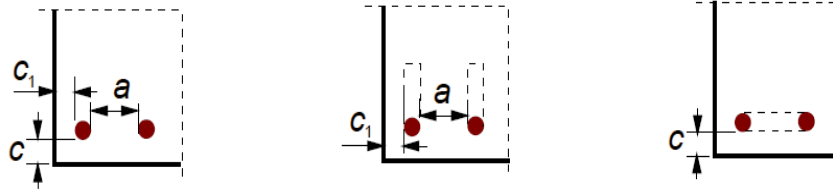
$\alpha_i$	Παράγοντας επιρροής	Αγκύρωση	Ράβδοι οπλισμών υπό:	
			Εφελκυσμό	Θλίψη
$\alpha_1$	Μορφή ράβδων	Ευθύγραμμη	$\alpha_1=1,0$	$\alpha_1=1,0$
		Μη ευθύγραμμη	$\alpha_1=0,7$ αν $c_d>3\varnothing$ αλλιώς $\alpha_1=1,0$	$\alpha_1=1,0$
$\alpha_2$	Επικάλυψη σκυροδέματος	Ευθύγραμμη	$\alpha_2=1-0,15\cdot(c_d-\varnothing)/\varnothing$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2=1,0$
		Μη ευθύγραμμη	$\alpha_2=1-0,15\cdot(c_d-3\varnothing)/\varnothing$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2=1,0$
$\alpha_3$	Περίσφιγξη με εγκάρσιο οπλισμό μη συγκολλημένο στον κύριο οπλισμό	Όλοι οι τύποι	$\alpha_3=1-K\cdot\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3=1,0$
$\alpha_4$	Περίσφιγξη με συγκολλημένο εγκάρσιο οπλισμό*	Όλοι οι τύποι	$\alpha_4=0,7$	$\alpha_4=0,7$
$\alpha_5$	Περίσφιγξη με εγκάρσια πίεση	Όλοι οι τύποι	$\alpha_5 = 1-0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	-

\*Για άμεσες στηρίξεις, το  $l_{bd}$  μπορεί να ληφθεί μικρότερο από το  $l_{b,min}$ , αρκεί να υπάρχει τουλάχιστον ένα εγκάρσιο σύρμα συγκολλημένο στο μήκος στήριξης και σε απόσταση τουλάχιστον 15 mm από την έναρξη του μήκους στήριξης.

*Πίνακας 1: Τιμές για τους συντελεστές  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$*

Αναλυτικά οι παράμετροι του **Πίνακα 1**:

- $c_d$  η επικάλυψη σχεδιασμού, όπως αυτή υπολογίζεται από το ακόλουθο σκαρίφημα:



1. Ευθύγραμμες ράβδοι

$$c_d = \min (a/2 ; c_1 ; c)$$

2. Καμπτόμενες ράβδοι

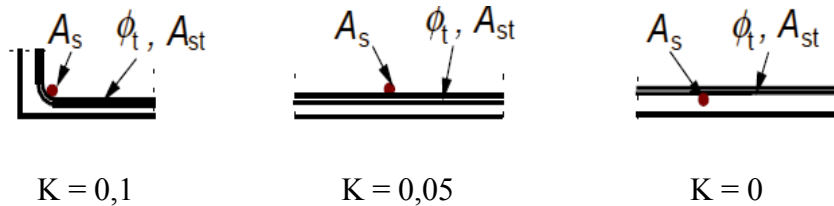
$$c_d = \min (a/2 ; c_1)$$

3. Βρόχοι

$$c_d = c$$

Σχήμα 3: Τιμές της επικάλυψης σχεδιασμού  $c_d$

- $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$ , όπου  $\Sigma A_{st}$  το εμβαδόν διατομής του εγκάρσιου οπλισμού κατά μήκος του μήκους αγκύρωσης σχεδιασμού  $l_{bd}$ ,  $\Sigma A_{st,min}$  το εμβαδόν διατομής του ελάχιστου εγκάρσιου οπλισμού ( $A_s/4$  για δοκούς και μηδενικό για πλάκες) και  $A_s$  το εμβαδόν διατομής της αγκυρούμενης ράβδου με τη μέγιστη διάμετρο
- $K$  συντελεστής που υπολογίζεται από το ακόλουθο σχήμα:



Σχήμα 4: Τιμές του συντελεστή  $K$

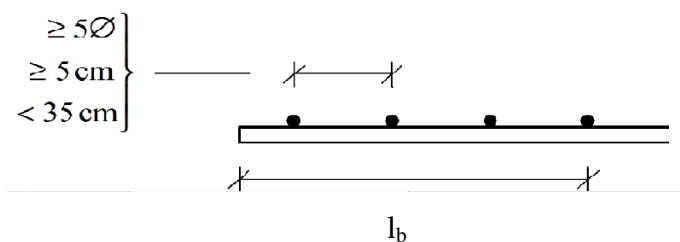
- $p$  η εγκάρσια πίεση [MPa] στην κατάσταση αστοχίας κατά μήκος του  $l_{bd}$

Σημείωση: Στις καμπτόμενες ράβδους, το βασικό μήκος αγκύρωσης,  $l_b$ , και το μήκος σχεδιασμού,  $l_{bd}$ , πρέπει να μετράται κατά μήκος της αξονικής γραμμής της ράβδου.

Στις περιοχές των αγκυρώσεων πρέπει να τοποθετείται εγκάρσιος οπλισμός. Το ελάχιστο εμβαδόν του εγκάρσιου οπλισμού πρέπει να είναι το 25% του εμβαδού της μέγιστης από τις αγκυρούμενες ράβδους. Ο εγκάρσιος οπλισμός πρέπει να είναι ομοιόμορφα κατανεμημένος μέσα στο μήκος αγκύρωσης. Σε περιπτώσεις καμπύλων αγκυρώσεων, πρέπει να τοποθετείται στην περιοχή των ακίστρων ή των αναβολέων τουλάχιστο μία ράβδος εγκάρσιου οπλισμού.

Οι αποστάσεις των εγκάρσιων ράβδων στο τμήμα αγκύρωσης, πρέπει να πληρούν τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

- $s_w$   $\geq 5\varnothing$
- $s_w$   $\geq 5\text{cm}$
- $s_w$   $< 35\text{cm}$



Σχήμα 5: Αποστάσεις εγκάρσιου οπλισμού στο μήκος αγκύρωσης

Πέραν των διατάξεων του Ευρωκώδικα 2, ο Ευρωκώδικας 8 (Μέρος 1, Ενότητα 5.6.), προβλέπει για τον εγκάρσιο οπλισμό, ότι οι χρησιμοποιούμενοι συνδετήρες ως εγκάρσιος οπλισμός σε δοκούς και υποστυλώματα, θα διαμορφώνονται κλειστοί με γάντζους  $135^\circ$  και μήκος  $10\varnothing_w$ . Επιπρόσθετα, ο EC 8 προβλέπει ότι, κατά τον υπολογισμό του μήκους αγκύρωσης των ράβδων υποστυλωμάτων που συνεισφέρουν στην καμπτική αντοχή των στοιχείων σε κρίσιμες περιοχές, ο λόγος  $A_{s,req}/A_{s,prov}$  θα λαμβάνεται ίσος με 1. Επίσης, αν υπό σεισμικές συνθήκες, η αξονική δύναμη σε ένα υποστυλώμα είναι εφελκυστική, τα μήκη αγκύρωσης θα αυξάνονται κατά 50% σε σχέση με αυτά που καθορίζονται στον EC 2. Τέλος, για την αγκύρωση διαμήκους οπλισμού δοκών, προβλέπεται το τμήμα οπλισμού που κάμπτεται για την αγκύρωση, να διατάσσεται στο εσωτερικό των αντίστοιχων συνδετήρων των υποστυλωμάτων, ενώ περιλαμβάνονται και διατάξεις σχετικά με την αγκύρωση των οπλισμών δοκών στους κόμβους με τα υποστυλώματα.

### 2.3. ΕΝΩΣΕΙΣ ΜΕ ΠΑΡΑΘΕΣΗ - ΜΑΤΙΣΜΑΤΑ

Στις ενώσεις με παράθεση, οι δυνάμεις μεταβιβάζονται από τη μία ράβδο στην άλλη. Όπως είδαμε εισαγωγικά, η ένωση οπλισμών μπορεί να συντελεστεί με έναν από τους ακόλουθους τρόπους:

- με υπερκάλυψη των ράβδων με ευθύγραμμα άκρα, με άγκιστρα ημικυκλικά ή ορθογωνικά, με αναβολείς, με ευθύγραμμα άκρα με συγκολλητούς εγκάρσιους οπλισμούς (π.χ. σε συγκολλητά δομικά πλέγματα)
- με συγκόλληση
- με μηχανικά μέσα (όπως αρμοκλείδες, ενώσεις με τήγμα μετάλλου κ.α.)

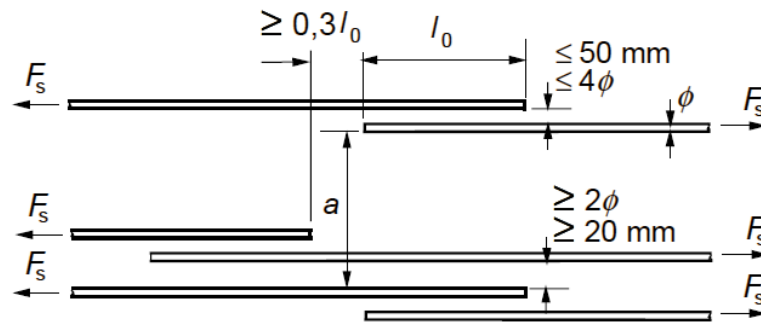
Για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας, θα μας απασχολήσει η περίπτωση των ενώσεων με υπερκάλυψη ράβδων με ευθύγραμμα άκρα. Η διαμόρφωση των υπερκαλύψεων μεταξύ των ράβδων θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται η μεταβίβαση των δυνάμεων από την μία στην άλλη ράβδο, να αποφεύγεται η αποφλοιώση του σκυροδέματος στην περιοχή της ένωσης και τέλος, να αποφεύγεται η δημιουργία μεγάλων ρηγμάτων που επηρεάζουν τη συμπεριφορά της κατασκευής.

Οι ενώσεις με υπερκάλυψη πρέπει, κατά το δυνατόν, να διατάσσονται κατά αποστάσεις μεταξύ τους και να αποφεύγεται η τοποθέτησή τους στις περιοχές υψηλής εντάσεως. Ο Ευρωκώδικας 2 (Ενότητα 8.7) προβλέπει:

- οι υπερκαλύψεις γειτονικών ράβδων πρέπει να εναλλάσσονται και να μην διατάσσονται σε περιοχές υψηλών ροπών ή δυνάμεων (π.χ. πλαστικών αρθρώσεων), να διατάσσονται συμμετρικά σε κάθε διατομή, και παραλλήλως προς τις παρειές του στοιχείου
- η καθαρή απόσταση μεταξύ ζεύγους υπερκαλυπτόμενων ράβδων πρέπει να μην είναι μεγαλύτερη από  $4\varnothing$  ή 50 mm, αλλιώς το μήκος υπερκάλυψης θα πρέπει να αυξηθεί κατά απόσταση ίση με το καθαρό διάστημα πέραν των  $4\varnothing$  ή 50 mm

- η διαμήκης απόσταση μεταξύ δύο γειτονικών ενώσεων πρέπει να μην είναι μικρότερη από  $0,3 l_0$ , όπου  $l_0$  το μήκος υπερκάλυψης
- σε περίπτωση γειτονικών ενώσεων, η καθαρή απόσταση μεταξύ γειτονικών ράβδων δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από  $2\phi$  ή 20 mm
- σε ενώσεις που διατάσσονται σύμφωνα με τα παραπάνω, το επιτρεπόμενο ποσοστό ένωσης ράβδων υπό εφελκυσμό μπορεί να φτάσει το 100% όταν όλες οι ράβδοι βρίσκονται σε μία στρώση. Όταν οι ράβδοι βρίσκονται σε περισσότερες από μία στρώσεις, το ποσοστό πρέπει να μειωθεί στο 50%

Οι ανωτέρω διατάξεις συνοψίζονται στο σχήμα που ακολουθεί:



Σχήμα 6: Αποστάσεις οπλισμού στις περιοχές ενώσεως

Όλες οι ράβδοι υπό θλίψη και οι δευτερεύοντες οπλισμοί (διανομής), επιτρέπεται να ενώνονται σε μία μόνο θέση.

Περίπτωση μετατοπισμένων ενώσεων: Ενώσεις με υπερκάλυψη θεωρούνται μετατοπισμένες, όταν η απόσταση των μέσων δύο γειτονικών ενώσεων ξεπερνά το  $1,3 l_0$ , όπου  $l_0$  το μήκος υπερκάλυψης.



Το μήκος υπερκάλυψης σχεδιασμού  $l_0$  υπολογίζεται κατά τον Ευρωκώδικα 2 (Ενότητα 8.7), από τη σχέση:

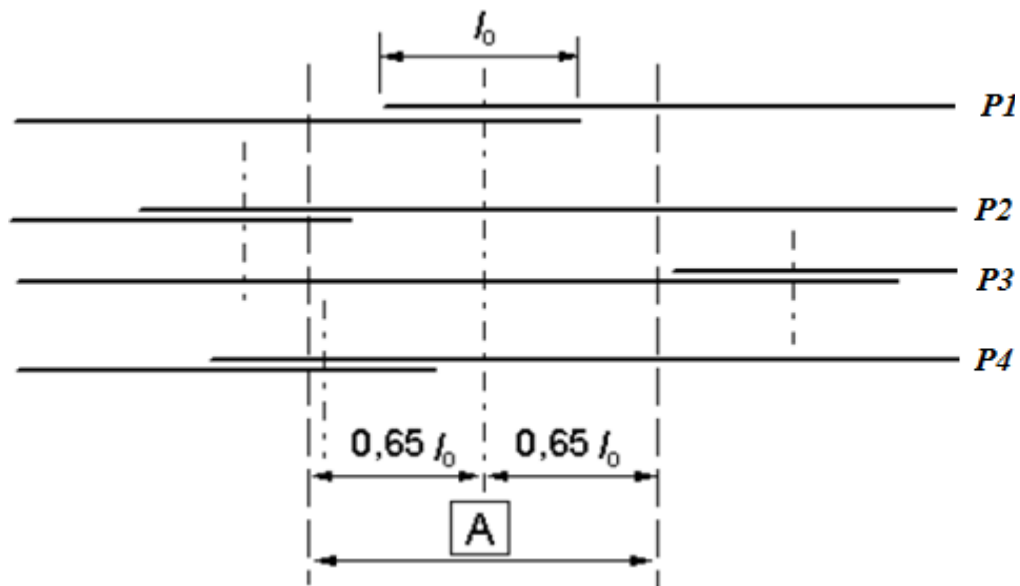
$$l_0 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,req} \geq l_{0,min} \quad (2.3.1)$$

όπου:

- $l_{b,req}$  το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης, όπως αυτό υπολογίστηκε στην προηγούμενη ενότητα
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_4$  και  $\alpha_5$  είναι συντελεστές, όπως αυτοί υπολογίστηκαν στην προηγούμενη ενότητα
- Κατά τον υπολογισμό του  $\alpha_3$ , ο συντελεστής  $K$  υπολογίζεται όπως προηγουμένως, στο δε συντελεστή  $\lambda'$ , το  $\Sigma A'_{st,min}$  λαμβάνεται ίσο προς  $1,0 \cdot A_s(\sigma_{sd}/f_{yd}) = 4 \cdot \Sigma A_{st,min}$ , όπου  $A_s$  το εμβαδόν διατομής της μέγιστης υπό ένωση ράβδου
- $l_{0,min} = \max\{0,3 \alpha_6 l_{b,req}; 15\varnothing; 200 \text{ mm}\}$  το ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης
- $\alpha_6 = (\rho_1/25)^{0,5}$  συντελεστής, αλλά όχι μεγαλύτερος από 1,5 ούτε μικρότερος από 1,0. Τιμές του  $\alpha_6$  δίνονται στον **Πίνακα 2** που ακολουθεί
- $\rho_1$  το ποσοστό των υπό ένωση ράβδων σε αποστάσεις  $0,65 \cdot l_0$  εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου του μήκους υπερκάλυψης. Τιμές του  $\rho_1$  προκύπτουν από το ακόλουθο σκαρίφημα του **Σχήματος 7**

Ποσοστό $\rho_1$ των υπό ένωση ράβδων ως προς το συνολικό εμβαδόν ράβδων της διατομής	< 25%	33%	50%	> 50%
$\alpha_6$	1,0	1,15	1,4	1,5
<b>Σημείωση: Ενδιάμεσες τιμές καθορίζονται με γραμμική παρεμβολή</b>				

Πίνακας 2: Τιμές του συντελεστή  $\alpha_6$



**A** Θεωρούμενη περιοχή

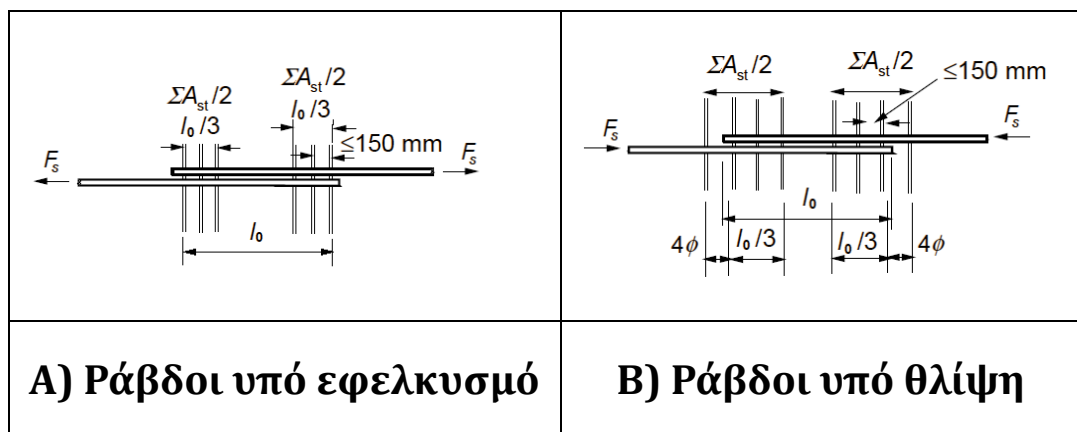
*Σχήμα 7: Ποσοστό  $\rho_1$  των υπό ένωση ράβδων που αντιστοιχεί σε μια θέση υπερκάλυψης*

Στο ανωτέρω παράδειγμα, οι ενώσεις των ράβδων P2 και P3 είναι εκτός της θεωρούμενης περιοχής, συνεπώς  $\rho_1 = 50\%$  και από τον **Πίνακα 2** υπολογίζεται:  $\alpha_6 = 1,4$ .

Πέραν των προβλέψεων για τους διαμήκεις οπλισμούς, στη ζώνη υπερκάλυψης χρειάζεται επίσης εγκάρσιος οπλισμός προς παραλαβή των εγκάρσιων εφελκυστικών δυνάμεων. Για την τοποθέτηση εγκάρσιου οπλισμού, ο Ευρωκώδικας 2 (Ενότητα 8.7), προβλέπει:

- Όταν η διάμετρος  $\varnothing$  των ράβδων με υπερκάλυψη, είναι μικρότερη από 20 mm, ή το ποσοστό των ράβδων με υπερκάλυψη σε οποιαδήποτε θέση, είναι μικρότερο από το 25%, τότε οι τοποθετούμενοι για άλλους λόγους εγκάρσιοι οπλισμοί ή συνδετήρες, μπορούν να θεωρηθούν επαρκείς για τις εγκάρσιες εφελκυστικές δυνάμεις, χωρίς περαιτέρω διερεύνηση

- Όταν η διάμετρος  $\varnothing$  των ράβδων με υπερκάλυψη είναι ίση ή μεγαλύτερη των 20 mm, ο εγκάρσιος οπλισμός πρέπει να έχει συνολική επιφάνεια  $\Sigma A_{st}$  (άθροισμα όλων των σκελών κατά μήκος της ζώνης υπερκάλυψης), όχι μικρότερη από την επιφάνεια  $A_s$  μίας υπό ένωση ράβδου ( $\Sigma A_{st} \geq 1,0 \cdot A_s$ ). Οι εγκάρσιες ράβδοι πρέπει να τοποθετηθούν κάθετα στη διεύθυνση του υπό ένωση οπλισμού και μεταξύ αυτού και της επιφάνειας του σκυροδέματος
- Αν περισσότερο του 50% των ράβδων ενώνεται σε μια περιοχή και η απόσταση  $a$  μεταξύ γειτονικών υπερκαλύψεων είναι  $a \leq 10\varnothing$ , οι εγκάρσιοι οπλισμοί θα πρέπει να έχουν τη μορφή συνδετήρων ή ράβδων σχήματος U, αγκυρωμένων μέσα στο σώμα της διατομής
- Ο εγκάρσιος οπλισμός που απαιτείται, σύμφωνα με τα παραπάνω, θα πρέπει να τοποθετηθεί στα άκρα του μήκους υπερκάλυψης, όπως φαίνεται στο αριστερό σκαρίφημα (A) του **Σχήματος 8**
- Σε περιπτώσεις μονίμως θλιβόμενων ράβδων, πέραν των ανωτέρω διατάξεων, οι ακραίες ράβδοι εγκάρσιου οπλισμού πρέπει να τοποθετούνται έξω από τα άκρα του μήκους υπερκάλυψης και σε αποστάσεις έως  $4\varnothing$  από τα πέρατα του μήκους υπερκάλυψης, όπως φαίνεται στο δεξιό σκαρίφημα (B) του **Σχήματος 8**



Σχήμα 8: Εγκάρσιοι οπλισμοί σε περιοχές ενώσεων με υπερκάλυψη

Πέραν των διατάξεων του Ευρωκώδικα 2, ο Ευρωκώδικας 8 (Μέρος 1, Ενότητα 5.6.), προβλέπει:

- Δεν θα διατάσσονται συγκολλημένες ενώσεις με υπερκάλυψη εντός των κρίσιμων περιοχών των στατικών στοιχείων
- Επιτρέπονται ενώσεις με μηχανικούς συνδέσμους σε υποστυλώματα και τοιχώματα, εφόσον οι σύνδεσμοι αυτοί καλύπτονται από κατάλληλες δοκιμές υπό συνθήκες συμβατές με την κατηγορία πλαστιμότητας που έχει επιλεγεί
- Ο εγκάρσιος οπλισμός που διατάσσεται μέσα στο μήκος υπερκάλυψης θα υπολογίζεται σύμφωνα με τον EC2. Επιπρόσθετα θα ικανοποιούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις
  - Εάν οι δύο ράβδοι που ενώνονται με υπερκάλυψη είναι διατεταγμένες σε επίπεδο παράλληλο προς τον εγκάρσιο οπλισμό, το άθροισμα των διατομών όλων των ράβδων που ενώνονται, θα χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του εγκάρσιου οπλισμού
  - Εάν οι ράβδοι που ενώνονται με υπερκάλυψη είναι διατεταγμένες σε επίπεδο κάθετο προς τον εγκάρσιο οπλισμό, η διατομή του εγκάρσιου οπλισμού θα υπολογίζεται με βάση τη διατομή της μεγαλύτερης διαμήκους ράβδου,  $A_s$
  - Η απόσταση  $s$ , του εγκάρσιου οπλισμού στην ζώνη υπερκάλυψης (σε mm), δεν θα υπερβαίνει την  $s = \min(h/4; 100)$ , όπου  $h$  είναι η ελάχιστη διάσταση της διατομής (σε mm)
- Η απαιτούμενη διατομή του εγκάρσιου οπλισμού  $A_{st}$ , μέσα στη ζώνη υπερκάλυψης διαμήκους οπλισμού υποστυλωμάτων που ενώνονται στην ίδια περιοχή (όπως ορίζεται στον EC2), μπορεί να υπολογισθεί από την ακόλουθη έκφραση  $A_{st} = s(\varnothing/50)(f_{yd}/f_{ywd})$



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΤΑ ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑ 8 ΚΑΙ ΚΑΝ.ΕΠΕ.

### 3.1. ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Ο Κανονισμός Επεμβάσεων (Ενότητα 7.1) προβλέπει: Η μηχανική συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής στοιχείου, ή μιας συνδέσεως στοιχείων (κόμβου), περιγράφεται μέσω ενός διαγράμματος εντατικού μεγέθους  $F$ , συναρτήσεως της παραμόρφωσης ή σχετικής μετακίνησης  $\delta$ . Το είδος και η διεύθυνση του μεγέθους  $F$ , επιλέγονται έτσι ώστε να χαρακτηρίζουν το κύριο μέρος της έντασης που προκαλεί η επιβαλλόμενη δράση στο στοιχείο, στην κρίσιμη περιοχή ή στη σύνδεση. Η παραμόρφωση  $\delta$  επιλέγεται έτσι ώστε, σε συνδυασμό με το εντατικό μέγεθος  $F$ , να εκφράζει την ενέργεια παραμόρφωσης του στοιχείου, της κρίσιμης περιοχής ή της σύνδεσης. Αν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η κάμψη, κατάλληλα μεγέθη  $F$  και  $\delta$  είναι η ροπή κάμψης  $M$  και η καμπυλότητα  $1/r$ . Αν καθοριστική της ανελαστικής συμπεριφοράς είναι η διάτμηση, κατάλληλα μεγέθη είναι η τέμνουσα δύναμη  $V$  και η γωνιακή παραμόρφωση  $\gamma$ . Επειδή στα στοιχεία από ΟΣ, οι καμπτικές παραμορφώσεις συνυπάρχουν με τις διατμητικές και με τις στροφές των ακραίων διατομών λόγω εξόλκευσης οπλισμών στην αγκύρωση πέραν του άκρου του στοιχείου, η καταλληλότερη επιλογή  $F$ - $\delta$  είναι η ροπή  $M$  και η γωνία στροφής χορδής  $\theta$  στα άκρα του στοιχείου, όπου η  $\theta$  περιλαμβάνει το σύνολο των καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων, καθώς και τη στροφή των άκρων λόγω εξόλκευσης οπλισμών.

Η απώλεια της φέρουσας ικανότητας ή αντίστασης έναντι κατακόρυφων φορτίων, σηματοδοτεί το τελικό στάδιο της αστοχίας του στοιχείου. Κατά κανόνα, αυτή συμβαίνει σε τιμές της παραμόρφωσης  $\delta$  πολύ πέραν από αυτές που προκαλούν απώλεια ή ουσιαστική μείωση της αντίστασης του στοιχείου έναντι της σεισμικής έντασης. Η προσέγγιση της πραγματικής καμπύλης  $F$ - $\delta$  μέσω πολυγραμμικού διαγράμματος, είναι γενικώς επαρκής για τις ανάγκες του σχεδιασμού.

A. Ελαστικός κλάδος: Ο πρώτος ευθύγραμμος κλάδος εκτείνεται από την αρχή των αξόνων μέχρι τη συμβατική (ή ενεργό) διαρροή του στοιχείου ή της κρίσιμης περιοχής του στοιχείου, μετά την οποία η καμπύλη F-δ μπορεί να λαμβάνεται περίπου οριζόντια. Η αντίσταση διαρροής  $F_y$  μπορεί να ληφθεί ίση με την οριακή αντίσταση για τον κρίσιμο τρόπο αστοχίας. Έτσι, μπορούν να διακριθούν οι εξής περιπτώσεις:

- Σε ένα μέλος που αστοχεί από κάμψη με ροπή στο άκρο ίση με  $M_u$ , θα λαμβάνεται  $F_y=M_u$ , εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους ροπών, είτε  $F_y=V_{Mu}$  (η τέμνουσα, τη στιγμή της καμπτικής αστοχίας), εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους τεμνουσών
- Σε ένα μέλος που αστοχεί από τέμνουσα, όταν δηλαδή  $V_u < V_{Mu}$ , θα λαμβάνεται  $F_y=M_{Vu}$  (η ροπή, τη στιγμή της διατμητικής αστοχίας), εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους ροπών, είτε  $F_y=V_u$ , εφόσον οι F εκφράζονται σε όρους τεμνουσών

$V_{Mu}=M_u/(\alpha_s \cdot h)$ , όπου  $\alpha_s=M/(V \cdot h)$ , ο λόγος διατμήσεως της υπόψιν περιοχής κατά την υπό εξέταση εντατική κατάσταση. Η τιμή της παραμόρφωσης  $\delta_y$  στη διαρροή, πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλες τις παραμορφώσεις κατά τη διαρροή του στοιχείου (καμπτικές, διατμητικές, λόγω εξόλκευσης οπλισμών). Σημειώνεται ότι, η έννοια διαρροής δομικού στοιχείου, είναι ευρύτερη εκείνης που προκαλείται αποκλειστικώς απ' τη διαρροή οπλισμού.

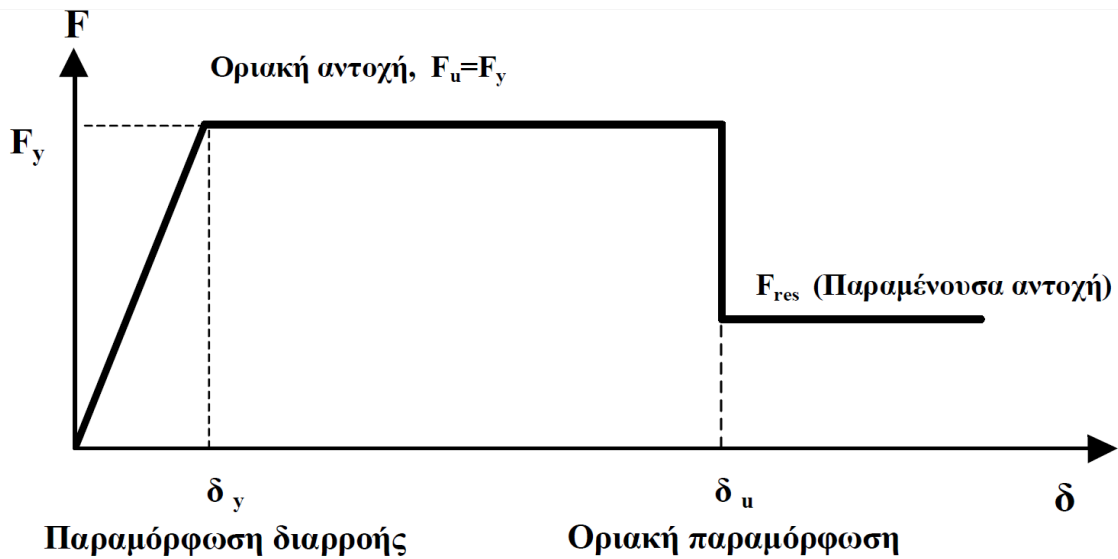
Η οιονεί ελαστική δυσκαμψία  $K$  που χρησιμοποιείται στην ανάλυση του δομικού συστήματος ορίζεται και υπολογίζεται από τη σχέση  $K=F_y/\delta_y$ . Στο οπλισμένο σκυρόδεμα, ο υπολογισμός των  $F_y$  και  $\delta_y$  (άρα και της δυσκαμψίας  $K$ ), προϋποθέτει ότι είναι γνωστός ο οπλισμός του εξεταζόμενου στοιχείου.

B. Μετελαστικός κλάδος: Σε περιπτώσεις όπου αναμένεται ορισμένη αξιόπιστη πλαστιμότητα των κρίσιμων περιοχών, είναι αποδεκτό να λαμβάνεται ο μετελαστικός κλάδος της καμπύλης F-δ ως οριζόντιος μέχρι την παραμόρφωση αστοχίας του στοιχείου,  $\delta_u$ . Η εκτίμηση της ανελαστικής σεισμικής απόκρισης δεν επηρεάζεται ουσιωδώς αν αγνοηθεί η, λόγω κράτυνσης, θετική κλίση του μετελαστικού κλάδου. Πάντως, ο μετελαστικός κλάδος μπορεί να λαμβάνεται με μικρή θετική κλίση για λόγους αριθμητικής ευστάθειας της ανάλυσης.

Ως αστοχία ορίζεται η σημαντική και συχνά απότομη μείωση της αντίστασης  $F$ , υπό μονοτονικά αυξανόμενη παραμόρφωση, ή υπό ανακυκλιζόμενη παραμόρφωση. Υπό την έννοια αυτή, μπορεί να θεωρηθεί ως “αστοχία” μία μείωση της αντίστασης ίση περίπου με το 20% της μέγιστης τιμής της. Ως παραμόρφωση αστοχίας,  $\delta_u$ , επομένως, ορίζεται εκείνη η τιμή, που αντιστοιχεί σε απόκριση  $F$  μειωμένη κατά 20% έναντι της μέγιστης. Η αντίσταση  $F$  αναφέρεται σε ένταση λόγω εγκάρσιας φόρτισης, όπως για παράδειγμα αυτή που προκαλείται από σεισμική δράση. Η αστοχία λόγω σημαντικής πτώσης της αντίστασης  $F$ , δε συνοδεύεται απαραίτητα από μείωση της αντίστασης έναντι φορτίων βαρύτητας. Εξαιρέση αποτελούν υποστυλώματα με πολύ υψηλό ανηγμένο αξονικό φορτίο. Η τιμή της παραμόρφωσης αστοχίας,  $\delta_u$ , ορίζει και την ικανότητα πλαστικής παραμόρφωσης, μέσω του πλαστικού τμήματος της παραμόρφωσης αστοχίας, δηλαδή του  $\delta_{u,pl} = \delta_u - \delta_y$  ενός στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής ή μιας συνδέσεως στοιχείων. Η παραμόρφωση  $\delta$  μπορεί να εκφράζεται ως ανηγμένο μέγεθος, με τη βοήθεια του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων,  $\mu_\delta = \delta / \delta_y$ . Η  $\mu_{\delta u} = \delta_u / \delta_y$  ορίζεται ως διαθέσιμη (μέγιστη) τιμή του δείκτη πλαστιμότητας παραμορφώσεων. Αν ως  $\delta$  χρησιμοποιείται η γωνία στροφής χορδής,  $\theta$ , ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu_\delta = \mu_\theta$  αφορά γωνίες στροφής χορδής, δηλαδή σχετική μετάθεση άκρων στοιχείου. Αν ως  $\delta$  χρησιμοποιείται η καμπυλότητα  $1/r$ , τότε  $\mu_\delta$  είναι ο δείκτης πλαστιμότητας καμπυλοτήτων  $\mu_{1/r}$ . Μέσω των τοπικών δεικτών πλαστιμότητας  $\mu$ , εκτιμάται και ο αντίστοιχος ενιαίος δείκτης συμπεριφοράς ενός δομήματος.

Μετά την παραμόρφωση αστοχίας,  $\delta_u$ , μειώνεται σημαντικά η απόκριση του στοιχείου σε ένταση λόγω σεισμικής δράσης υπό αυξανόμενη παραμόρφωση  $\delta$ , αλλά συνήθως δε μηδενίζεται. Η απόκριση αυτή μπορεί να θεωρηθεί περίπου σταθερή μέχρι την παραμόρφωση που προκαλεί απώλεια της αντίστασης έναντι φορτίων βαρύτητας και ονομάζεται απομένουσα αντίσταση  $F_{res}$ . Η τιμή της απομένουσας αντίστασης ενδιαφέρει μόνο για λόγους προσομοίωσης της ανελαστικής απόκρισης πλαστικών στοιχείων. Το μέγεθος της απομένουσας αντίστασης  $F_{res}$  και της παραμόρφωσης για την οποία μηδενίζεται (ουσιαστικώς) η αντίσταση σε φορτία βαρύτητας, είναι δύσκολο να εκτιμηθούν. Μόνο για λόγους προσομοίωσης της απόκρισης του συνολικού δομήματος μετά την παραμόρφωση αστοχίας των επιμέρους στοιχείων, μπορεί να λαμβάνεται η απομένουσα αντοχή ίση με το 25% της οριακής αντοχής των στοιχείων. Πρόκειται πάντως για κατάσταση αστοχίας που ενδιαφέρει μόνο για τη στάθμη επιτελεστικότητας  $\Gamma$ , “Αποφυγή οιονεί κατάρρευσης”, και μόνο για πλάστιμα στοιχεία.





*Σχήμα 9: Διάγραμμα προσομοίωσης μηχανικής συμπεριφοράς στοιχείου*

Αν η διαθέσιμη τιμή του δείκτη πλαστιμότητας  $\mu_\delta$  ενός δομικού στοιχείου, μιας κρίσιμης περιοχής στοιχείου, ή μιας συνδέσεως στοιχείων, ξεπερνά ένα ορισμένο όριο, η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως πλάστιμη, οπότε η ανίσωση ασφαλείας του θα εκφράζεται σε όρους παραμορφώσεων  $\delta$ . Διαφορετικά, η συμπεριφορά χαρακτηρίζεται ως ψαθυρή, οπότε η ανίσωση ασφαλείας θα εκφράζεται σε όρους δυνάμεων  $F$ . Το όριο μεταξύ πλάστιμης και ψαθυρής συμπεριφοράς λαμβάνεται συμβατικά ίσο με 2,0, όταν αναφέρεται σε διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστιμότητας σχετικών μετακινήσεων,  $\mu_\delta$  ή  $\mu_\theta$ . Όταν αναφέρεται σε διαθέσιμη τιμή δείκτη πλαστιμότητας καμπυλοτήτων,  $\mu_{1/r}$ , το συμβατικό όριο λαμβάνεται ίσο με 3,0.

Στοιχεία Οπλισμένου Σκυροδέματος που διαρρέουν σε διάτμηση πριν απ' τη διαρροή σε κάμψη (δηλαδή στα οποία η  $V_{Mu}=M_u/(\alpha_s \cdot h)$ , είναι μεγαλύτερη από τη  $V_u$ ), θεωρείται ότι έχουν ψαθυρή συμπεριφορά. Στοιχεία που διαρρέουν σε κάμψη πριν απ' τη διαρροή σε διάτμηση (δηλαδή όταν η  $V_{Mu}=M_u/(\alpha_s \cdot h)$  είναι μικρότερη της  $V_u$ ), θεωρείται ότι έχουν πλάστιμη συμπεριφορά, με εξαίρεση στοιχεία με χαμηλό λόγο διάτμησης (π.χ.  $\alpha_s = M/(V \cdot h) < 2$ ), των οποίων η συμπεριφορά μπορεί να ληφθεί ως ψαθυρή, χωρίς υπολογισμό και έλεγχο της διαθέσιμης τιμής του δείκτη πλαστιμότητας.

### 3.2. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΒΛΑΒΕΣ, Ή ΝΕΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Σε αυτήν την ενότητα, θα παρατεθούν οι διατάξεις των Κανονισμών σχετικά με το θεωρητικό υπολογισμό του εντατικού μεγέθους  $F$  και της αναμενόμενης παραμόρφωσης  $\delta$  που αναμένεται να αναπτυχθούν σε μια δοκό με αυξημένες απαιτήσεις πλαστιμότητας. Ο υπολογισμός των δύο αυτών παραμέτρων, οδηγεί στην κατάρτιση ενός διαγράμματος  $F$ - $\delta$ , το οποίο θα αντιπροσωπεύει την προσδοκώμενη συμπεριφορά του στοιχείου.

Σε πρώτο στάδιο πρέπει να υπολογιστεί το εντατικό μέγεθος αντίστασης και εν συνεχεία η αναμενόμενη παραμόρφωση. Ο Κανονισμός Επεμβάσεων αναφέρει σχετικά στην Ενότητα 7.2: Η αντίσταση διαρροής  $F_y$  μπορεί να λαμβάνεται ίση με την οριακή αντοχή (για το Οπλισμένο Σκυρόδεμα όπως αυτή υπολογίζεται κατά τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2), με χρήση όμως των μέσων τιμών της αντοχής των υλικών, αντί των τιμών σχεδιασμού. Αν η αξονική δύναμη είναι υψηλή, η αστοχία του σκυροδέματος της θλιβόμενης ζώνης μπορεί να προηγηθεί της διαρροής του εφελκόμενου οπλισμού, οπότε η καμπύλη  $F$ - $\delta$  δεν εμφανίζει σαφές όριο διαρροής. Σ' αυτή την περίπτωση, αντί της χρήσης ελαστοπλαστικής-καμπύλης  $F$ - $\delta$  με εντατικό μέγεθος διαρροής που προκύπτει από την τιμή καμπτικής αντοχής, κατά τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2, συνιστάται η κατασκευή διαγράμματος  $M$ -( $1/\epsilon$ ) και η προσαρμογή σ' αυτό μιας "ισοδύναμης" ελαστοπλαστικής καμπύλης  $F$ - $\delta$ , με βάση την αρχή των ίσων εμβαδών. Αν καθοριστική της αντοχής γραμμικών στοιχείων είναι η κάμψη, ένα κάτω όριο της  $F_y$  προκύπτει συνήθως από την τιμή της ροπής στη διαρροή του εφελκόμενου χάλυβα.

Καμπτική Αντοχή: Η ροπή διαρροής  $M_y$  υπολογίζεται κατά τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2 και του Κανονισμού Επεμβάσεων και υπό τις εξής παραδοχές:

- Οι επίπεδες διατομές παραμένουν επίπεδες και μετά τη φόρτιση
- Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος αγνοείται
- Οι τάσεις του θλιβόμενου σκυροδέματος υπολογίζονται βάσει της σχέσης τάσης-παραμόρφωσης:

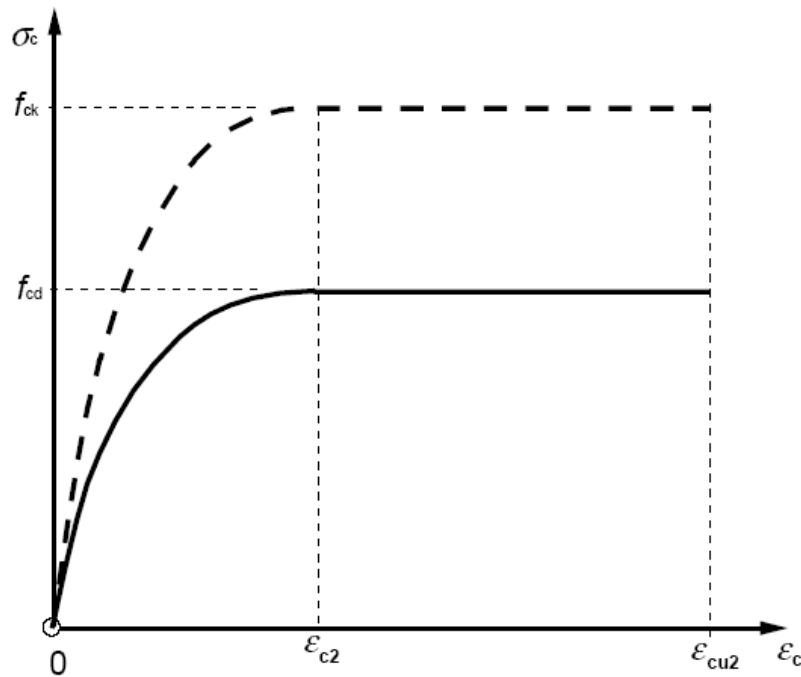
$$\sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad \text{για } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad (3.2.1)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{για } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad (3.2.2)$$

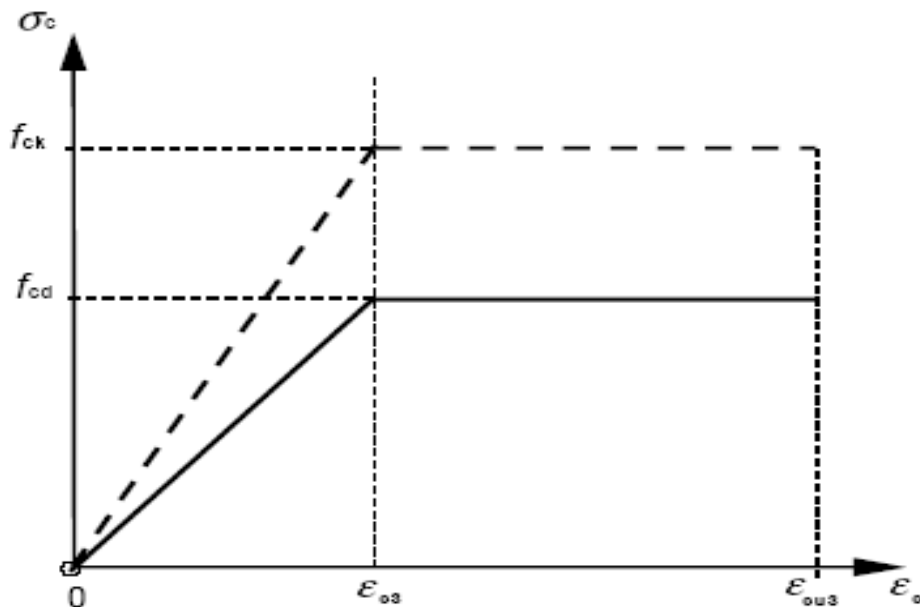
Όπου:

- $n$  συντελεστής που ορίζει τη δρώσα αντοχή και ισούται με 1 για ποιότητα σκυροδέματος μικρότερης του C50/60
- $\varepsilon_{c2}$  είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή
- $\varepsilon_{cu2}$  είναι η παραμόρφωση αστοχίας

Η ποιοτική σχέση μεταξύ των θλιπτικών τάσεων και των ανηγμένων παραμορφώσεων του σκυροδέματος, αποτυπώνεται στα **Σχήματα 10 και 11** που ακολουθούν:

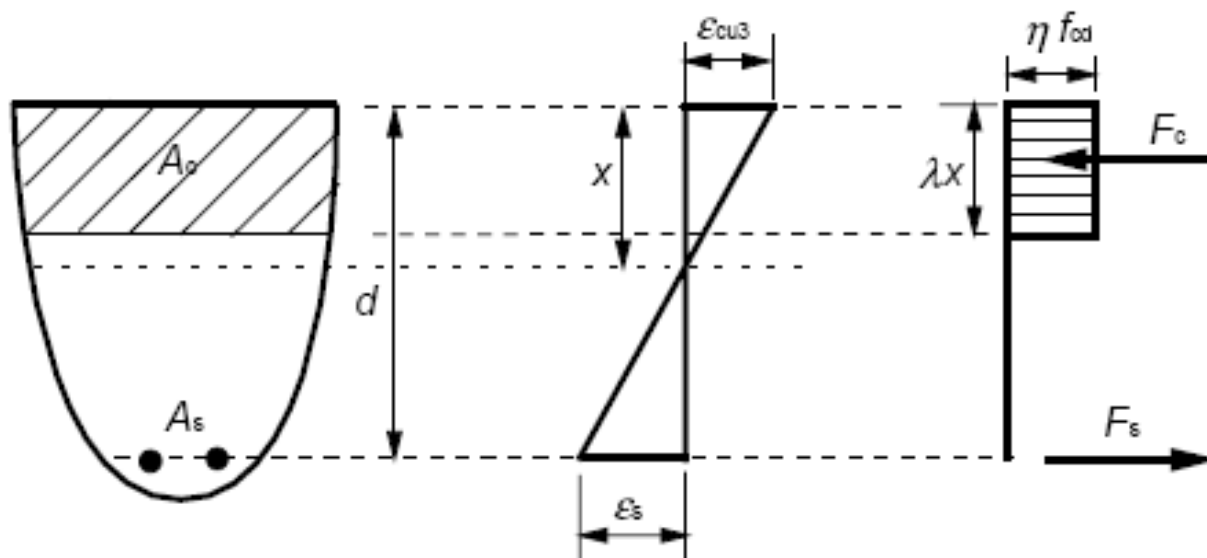


Σχήμα 10: Παραβολικό – ορθογωνικό διάγραμμα για σκυρόδεμα υπό θλίψη



Σχήμα 11: Διγραμμική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων για σκυρόδεμα υπό θλίψη

- Είναι δυνατό να θεωρηθεί ορθογωνική κατανομή τάσεων (όπως δίνεται στο **Σχήμα 12**). Ο συντελεστής  $\lambda$ , ο οποίος ορίζει το ενεργό ύψος της θλιβόμενης ζώνης, ισούται με 0,8 για ποιότητα σκυροδέματος μικρότερης του C50/60



Σχήμα 12: Ορθογωνική κατανομή τάσεων

Σημείωση: Αν το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης μειώνεται προς το μέρος της θλιβόμενης ίνας, τότε η τιμή ( $\eta f_{cd}$ ) πρέπει να απομειώνεται κατά 10%.

- Η μέση καμπτική εφελκυστική αντοχή στοιχείων από οπλισμένο σκυρόδεμα εξαρτάται από τη μέση αξονική εφελκυστική αντοχή και το ύψος της διατομής και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$f_{ctm,fl} = \max \{ (1,6 - h/1000) f_{ctm}; f_{ctm} \} \quad (3.2.3)$$

όπου:

- $h$  το συνολικό ύψος του δομικού στοιχείου σε mm
- $f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3}$  η μέση αξονική εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος

Η **σχέση (3.2.3)** εφαρμόζεται επίσης και για τις τιμές της χαρακτηριστικής εφελκυστικής αντοχής.

- Σε περίπτωση που το σκυρόδεμα είναι περισφιγμένο, έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της σχέσης δρώσας τάσης-παραμόρφωσης καθώς επιτυγχάνονται υψηλότερη αντοχή και μεγαλύτερες κρίσιμες παραμορφώσεις. Τα υπόλοιπα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού μπορεί να θεωρηθούν αμετάβλητα για το σχεδιασμό. Η χαρακτηριστική αντοχή και οι παραμορφώσεις αυξάνονται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,000 + 5,0 \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{για } \sigma_2 \leq 0,05 f_{ck} \quad (3.2.4\alpha)$$

$$f_{ck,c} = f_{ck} (1,125 + 2,50 \sigma_2 / f_{ck}) \quad \text{για } \sigma_2 > 0,05 f_{ck} \quad (3.2.4\beta)$$

$$\varepsilon_{c2,c} = \varepsilon_{c2} (f_{ck,c} / f_{ck})^2 \quad (3.2.5)$$

$$\varepsilon_{cu2,c} = \varepsilon_{cu2} + 0,2 \sigma_2 / f_{ck} \quad (3.2.6)$$

Όπου  $\sigma_2$  ( $= \sigma_3$ ) είναι η δρώσα ακτινική θλιπτική τάση στην οριακή κατάσταση αστοχίας εξαιτίας της περισφιγξης, ενώ  $\varepsilon_{c2}$  και  $\varepsilon_{cu2}$  είναι η παραμόρφωση που αντιστοιχεί στη μέγιστη αντοχή και η παραμόρφωση αστοχίας αντίστοιχα. Η περισφιγξη μπορεί να δημιουργηθεί μέσω επαρκώς κλειστών συνδετήρων ή εγκαρσίων συνδέσμων, οι οποίοι φτάνουν στην πλαστική περιοχή εξαιτίας της πλευρικής διόγκωσης του σκυροδέματος.

➤ Ειδικά στις περιοχές δομικών στοιχείων, όπου οι διαμήκεις οπλισμοί τους αποτελούνται από ράβδους με νευρώσεις και ενώνονται με ευθύγραμμη υπερκάλυψη των άκρων τους, η ροπή αστοχίας (ή διαρροής)  $M_y$  εκτιμάται με βάση τις κατωτέρω υποθέσεις:

- Στο μήκος παράθεσης, επιτρέπεται να προσμετρώνται ως θλιβόμενος οπλισμός αμφότερες οι ράβδοι, σε περιπτώσεις επαρκούς εγκιβωτισμού και περίσφιξης. Το ποσοστό δηλαδή του θλιβόμενου οπλισμού, λαμβάνεται περίπου διπλάσιο αυτού που ισχύει εκτός της περιοχής ένωσης
- Η τάση των εφελκυσμένων ράβδων θεωρείται ότι αυξάνεται γραμμικά από μηδέν στο άκρο τους έως την τάση διαρροής,  $f_y$ , σε απόσταση από το άκρο ίση με το ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης,  $l_{0,min}$ , το οποίο απαιτείται για την ανάπτυξη της πλήρους ροπής αστοχίας (ή διαρροής) της διατομής. Τα περιορισμένα πειραματικά αποτελέσματα που διατίθενται δείχνουν ότι, πρακτικώς, για ευθύγραμμες ράβδους με διάμετρο  $d_b$ , επιτρέπεται να λαμβάνεται:

$$l_{0,min} = 0,3 d_b f_y / \sqrt{f_c} \quad (f_y, f_c \text{ σε MPa}) \quad (3.2.7)$$

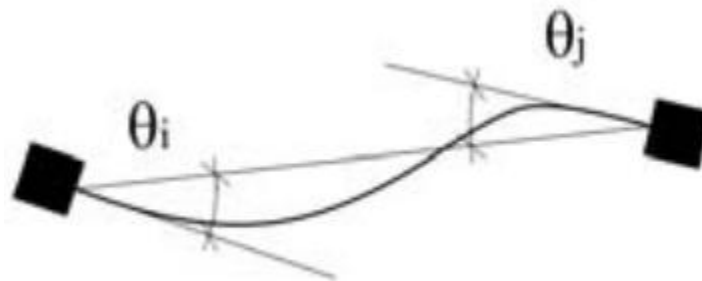
- Αν το μήκος παράθεσης  $l_0$  είναι μικρότερο του  $l_{0,min}$  στην περιοχή της ένωσης, η τάση διαρροής των εφελκυσμένων ράβδων θα λαμβάνεται ίση με  $f_y$  επί τον λόγο του  $l_0$  προς το  $l_{0,min}$ . Πάντως, για  $l_0 < 0,5 l_{0,min}$ , δεν μπορεί (γενικώς) να επιτευχθεί ένωση με υπερκάλυψη άκρων ράβδων οπλισμού.

Η σχέση που δίνει ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Παράρτημα 7Α) για τη  $M_y$ , με δεδομένη την αντίστοιχη καμπυλότητα στη διαρροή  $(1/r)_y$ , είναι:

$$\frac{M_y}{bd^3} = \left(\frac{1}{r}\right)_y \left( E_c \frac{\xi_y^2}{2} \left( 0,5(1 + \delta') - \frac{\xi_y}{3} \right) + \frac{\left( (1 - \xi_y)\rho + (\xi_y - \delta')\rho' + \frac{\rho_v}{6}(1 - \delta') \right) (1 - \delta') E_s}{2} \right) \quad (3.2.8)$$

Όπου:  $b$  το πλάτος του στοιχείου,  $d$  το στατικό ύψος του στοιχείου,  $E_c$  το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος,  $E_s$  το μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα. Τα  $\rho$ ,  $\rho'$  και  $\rho_v$  είναι τα ποσοστά του εφελκυσμένου, του θλιβόμενου και του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού,  $\delta' = d'/d$ , όπου  $d'$  η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος. Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή,  $\xi_y$  (ανηγμένο στο στατικό ύψος  $d$ ), και η καμπυλότητα στη διαρροή,  $(1/r)_y$ , θα υπολογιστούν παρακάτω.

Γωνία στροφής χορδής: Ο Ευρωκώδικας 8 (Μέρος 3, Παράρτημα Α) προβλέπει: Η ικανότητα παραμόρφωσης των δοκών, ορίζεται σε όρους στροφής χορδής  $\theta$ , δηλαδή της γωνίας μεταξύ της εφαπτομένης στον άξονα στο άκρο υπό διαρροή, και της χορδής που συνδέει το άκρο αυτό με το άκρο του ανοίγματος διάτμησης ( $L_s=M/V=$  ροπή / διάτμηση στην ακραία διατομή), δηλαδή το σημείο μηδενισμού των ροπών. Η γωνία στροφής χορδής είναι επίσης ίση με τον λόγο της κατακόρυφης παραμόρφωσης στο άκρο του ανοίγματος διάτμησης ως προς την εφαπτομένη στον άξονα στο άκρο υπό διαρροή, δια του ανοίγματος διάτμησης.



Σχήμα 13: Γωνία στροφής χορδής στοιχείου

Κατά τον υπολογισμό της **γωνίας στροφής χορδής στη διαρροή**, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η συμβολή και της κάμψης και της διάτμησης. Ο Κανονισμός Επεμβάσεων προβλέπει:

- Η συμβολή της κάμψης στη γωνία στροφής χορδής διαρροής, μπορεί να εκτιμηθεί με βάση την τιμή της καμπυλότητας διαρροής,  $(1/r)_y$ , η οποία μπορεί να υπολογισθεί με βάση την υπόθεση επιπεδότητας διατομών και με γραμμικό νόμο τάσεων-παραμορφώσεων  $\sigma$ - $\epsilon$  του χάλυβα και του σκυροδέματος σε θλίψη, για μηδενική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Εάν η γωνία στροφής χορδής αναφέρεται στο σύνολο του μήκους  $L_s=\alpha_s h$  στο άκρο δομικού στοιχείου, τότε στη φάση της καμπτικής διαρροής, το τμήμα της  $\theta_y$  που οφείλεται στην κάμψη, μπορεί να ληφθεί ίσο με  $(1/r)_y(L_s+\alpha_v z)/3$ , όπου  $z(=d-d')$  ο μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων, ο δε συντελεστής  $\alpha_v$  ισούται με 1, αν η τέμνουσα  $V_{R1}$ , που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου, υπολείπεται της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή  $V_{Mu}=M_y/L_s$ , και με 0 αν είναι μεγαλύτερη. Το μήκος  $L_s$  είναι ο λόγος  $M/V$  στην ακραία διατομή του στοιχείου, δηλαδή η απόσταση της ακραίας διατομής από το σημείο μηδενισμού των ροπών. Ο όρος  $\alpha_v z$  εκφράζει το μήκος μετατόπισης του διαγράμματος των ροπών κάμψης
- Ακολούθως εκτιμάται η συμβολή των διατμητικών παραμορφώσεων στη  $\theta_y$

- Τέλος, εκτιμάται η συμβολή της στροφής της ακραίας διατομής λόγω εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου. Η εξόλκευση του τμήματος των ράβδων πέραν της διατομής στήριξης είναι ανάλογη: (i) της μήκυνσης του χάλυβα στη διαρροή, και (ii) του μήκους που απαιτείται για την αγκύρωση των ράβδων

Αν δεν υπάρχουν ακριβέστερα στοιχεία, η γωνία στροφής χορδής  $\theta_y$  στην καμπτική διαρροή δοκών μπορεί να εκτιμηθεί από την ακόλουθη έκφραση (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Ενότητα 7.2):

$$\theta_y = \left(\frac{1}{r}\right)_y \frac{L_s + a_v z}{3} + 0,0014 \left(1 + 1,5 \frac{h}{L_s}\right) + \left(\frac{1}{r}\right)_y \frac{d_b f_y}{(8\sqrt{f_c})} \quad (3.2.9)$$

Ο 1<sup>ος</sup> όρος εκφράζει την συμβολή των καμπτικών παραμορφώσεων, ο 2<sup>ος</sup> όρος εκφράζει τις μέσες διατμητικές παραμορφώσεις στο μήκος  $L_s$ , ενώ ο 3<sup>ος</sup> όρος εκφράζει την επιρροή της εξόλκευσης του τμήματος των ράβδων πέραν της ακραίας διατομής του στοιχείου ( $f_y, f_c$  σε ΜΡα).

Αν από τη διατομή του άκρου του δομικού στοιχείου και προς το εσωτερικό του μήκους του, υπάρχει περιοχή ένωσης διαμήκων ράβδων με παράθεση των άκρων τους, χρειάζεται να ληφθεί υπόψη η επιρροή της ένωσης στην τιμή της  $\theta_y$ , όπως αυτή συντίθεται από τη συμβολή των καμπτικών και διατμητικών παραμορφώσεων και της στροφής της ακραίας διατομής λόγω ολίσθησης του τμήματος των ράβδων πέραν από τη διατομή αυτή. Η επιρροή της ένωσης, σε περιπτώσεις παράθεσης ευθύγραμμων άκρων ράβδων με νευρώσεις, μπορεί να υπολογιστεί:

- Η τιμή της  $(1/r)_y$  και της  $M_y$  που συγκρίνεται με το γινόμενο  $V_{R1}L_s$ , ως κριτήριο για τον όρο  $a_v z$ , υπολογίζονται με βάση τις υποθέσεις που διατυπώθηκαν νωρίτερα
- Αν η ένωση γίνεται με παράθεση ευθύγραμμων άκρων σε μήκος  $l_0$  μικρότερο του  $l_{0,min}$ , ο 2ος όρος της **σχέσης 3.2.9** πολλαπλασιάζεται με το λόγο της ροπής αστοχίας  $M_y$ , προς την τιμή της ροπής αυτής εκτός του μήκους παράθεσης. Επίσης, στον 3ο όρο η τιμή των  $f_y$  και  $\varepsilon_y$  πολλαπλασιάζεται επί τον λόγο του μήκους παράθεσης  $l_0$  προς το  $l_{0,min}$

Αν η τέμνουσα αντοχής του στοιχείου,  $V_R$ , υπολείπεται της τιμής της τέμνουσας κατά την καμπτική διαρροή,  $V_{Mu}=M_y/L_s$ , τότε καθοριστική της διαρροής είναι η διάτμηση, οπότε η παραμόρφωση διαρροής υπολογίζεται ως το γινόμενο της  $(1/r)_y$  ή της  $\theta_y$  επί  $V_R L_s / M_y$ , ανάλογα με το νόημα της  $\delta$  (ως  $1/r$  ή ως  $\theta$ ).



Για τον προσδιορισμό της γωνίας στροφής χορδής  $\theta_y$  στη διαρροή, χρειάζεται ο αναλυτικός υπολογισμός της καμπυλότητας διαρροής για τη διατομή της δοκού. Για διατομές στοιχείων ΟΣ με ορθογωνική θλιβόμενη ζώνη σταθερού πλάτους  $b$ , και με βάση το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή  $\xi_y d$ , ο ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Παράρτημα 7Α) ορίζει τον υπολογισμό της καμπυλότητας διαρροής με τις εξής σχέσεις (από τις **σχέσεις 3.2.10 α και β** για τις τιμές της καμπυλότητας διαρροής, θα λαμβάνεται η μικρότερη αυτών):

- Αν η διαρροή της διατομής οφείλεται σε διαρροή του εφελκόμενου οπλισμού:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{f_y}{E_s (1-\xi_y)d} \quad (3.2.10\alpha)$$

- Αν η διαρροή διατομής οφείλεται σε μη γραμμικότητα των παραμορφώσεων του θλιβόμενου σκυροδέματος (για παραμόρφωση ακραίας θλιβόμενης ίνας πέραν του  $\varepsilon_c \approx 1,8f_c/E_c$ ):

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{\varepsilon_c}{\xi_y d} \approx \frac{1,8 f_c}{E_c \xi_y d} \quad (3.2.10\beta)$$

- Το ύψος της θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή,  $\xi_y$ , ανηγμένο στο στατικό ύψος  $d$ , είναι:

$$\xi_y = (\alpha^2 A^2 + 2 \alpha B)^{0,5} - \alpha A \quad (3.2.11)$$

Όπου:

- $\alpha = E_s / E_c$
- $A$  και  $B$  συντελεστές που προσδιορίζονται ανάλογα από το αν η διαρροή ελέγχεται από τον εφελκόμενο οπλισμό ή από το θλιβόμενο σκυροδέμα
  - Διαρροή λόγω χάλυβα:
 
$$A = \rho + \rho' + \rho_v + N/bdf_y$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta') + N/bdf_y \quad (3.2.12\alpha)$$
  - Διαρροή λόγω παραμορφώσεων σκυροδέματος:
 
$$A = \rho + \rho' + \rho_v - N / \varepsilon_c E_s b d \approx \rho + \rho' + \rho_v - N / 1,8 a b d f_c$$

$$B = \rho + \rho' \delta' + 0,5 \rho_v (1 + \delta') \quad (3.2.12\beta)$$
  - $\rho$ ,  $\rho'$  και  $\rho_v$  είναι τα ποσοστά του εφελκόμενου, του θλιβόμενου και του μεταξύ τους κατανεμημένου οπλισμού,  $\delta' = d'/d$ , όπου  $d'$  η απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος,  $b$  το πλάτος της θλιβόμενης ζώνης και  $N$  το αξονικό φορτίο (θετικό σε θλίψη)

- Αντί των *σχέσεων 3.2.10 α και β*, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προσεγγιστικά οι ημιεμπειρικές σχέσεις:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{1,77 f_y}{E_s h} \quad (3.2.13\alpha)$$

$$\left(\frac{1}{r}\right)_y = \frac{1,55 f_y}{E_s d} \quad (3.2.13\beta)$$

Ακολούθως, στον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (Ενότητα 7.2), υπολογίζεται η *διαθέσιμη γωνία πλαστικής στροφής  $\theta_{u,pl}$  και η διαθέσιμη συνολική γωνία στροφής  $\theta_u$* , που αντιστοιχεί σε παραμόρφωση αστοχίας της διατομής. Αρχικά, η καμπυλότητα αστοχίας μιας διατομής, μπορεί να υπολογισθεί συντάσσοντας διάγραμμα ροπών-καμπυλοτήτων της διατομής μέχρι την αστοχία, λαμβάνοντας υπόψη ότι η διατομή μπορεί να αστοχήσει είτε λόγω θραύσης του εφελκόμενου οπλισμού, είτε λόγω αστοχίας του σκυροδέματος σε θλίψη, και μάλιστα (αναλόγως της περισφιγξης στη θλιβόμενη ζώνη), πριν ή μετά την αποφλοιώση του απερίσφιγκτου τμήματος της διατομής.

- Για αστοχία πριν απ' την αποφλοιώση, η καμπυλότητα αστοχίας λόγω θραύσης του εφελκόμενου χάλυβα είναι:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{su} = \frac{\varepsilon_{su}}{(1 - \xi_{su}) d} \quad (3.2.14)$$

- ενώ λόγω αστοχίας θλιβόμενου σκυροδέματος είναι:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\xi_{cu} d} \quad (3.2.15)$$

Στις ανωτέρω εξισώσεις,  $\xi_{su}$  και  $\xi_{cu}$  είναι το ανηγμένο στο  $d$  ύψος της θλιβόμενης ζώνης, κατά την αστοχία του χάλυβα και του σκυροδέματος αντίστοιχα,  $\varepsilon_{su}$  η ομοιόμορφη μήκυνση αστοχίας του εφελκόμενου οπλισμού και  $\varepsilon_{cu}$  η βράχυνση αστοχίας της ακραίας θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος. Η βράχυνση αστοχίας της ακραίας ίνας του περισφιγμένου πυρήνα  $\varepsilon_{cu}$  μπορεί να εκτιμηθεί ως:  $\varepsilon_{cu} = 0,0035 + 0,1\alpha\omega_w$  (3.2.16)

όπου  $\omega_w$  είναι το μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό του οπλισμού περισφιγξης και  $\alpha$  ο συντελεστής αποδοτικότητάς της, ως εξής :

$$\alpha = \left(1 - \frac{s_h}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_c}\right) \left(1 - \frac{\sum b_i^2}{6b_c h_c}\right) \quad (3.2.17)$$

όπου  $s_h$  η (καθαρή) απόσταση συνδετήρων,  $b_c$  και  $h_c$  οι διαστάσεις του πυρήνα (με  $h_c < 1,5 \div 2,0 b_c$ ) και  $b_i$  οι (περίπου ίσες) αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα ή άγκιστρο σιγμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου, κατά την περίμετρο της διατομής.

Εναλλακτικώς, στη *σχέση 3.2.17*, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντί του  $h_c$  το ύψος της θλιβόμενης ζώνης εντός του περισφιγμένου πυρήνα, οπότε ως  $b_i$  θα λαμβάνονται οι αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων κατά την εξωτερική περίμετρο της θλιβόμενης ζώνης, με αφετηρία τον ουδέτερο άξονα. Αν οι συνδετήρες δεν κλείνουν με άγκιστρο προς το εσωτερικό του σκυροδέματος ( $\geq 135^\circ$  στις γωνίες και  $\geq 90^\circ$  στο ενδιάμεσο των πλευρών), συνιστάται να αμελείται η περισφιγξη (ο συντελεστής  $\alpha$  να λαμβάνεται ίσος με 0).

Η διαθέσιμη γωνία πλαστικής στροφής  $\theta_{u,pl}$  μιας κρίσιμης περιοχής και η διαθέσιμη συνολική γωνία στροφής  $\theta_u$  στο άκρο δομικού στοιχείου, πρέπει να υπολογίζονται λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις υπεισερχόμενες παραμέτρους των μεγεθών αυτών, και συνεκτιμώντας υπέρ της ασφαλείας και όλες τις σχετικές πηγές αβεβαιότητας. Είναι δυνατή η εμπειρική εκτίμηση της διαθέσιμης τιμής της πλαστικής γωνίας στροφής και της συνολικής γωνίας στροφής χορδής στοιχείων ΟΣ, συναρτήσει των γεωμετρικών και μηχανικών χαρακτηριστικών των στοιχείων και των οπλισμών τους, με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων ή πινάκων. Ως τέτοιες σχέσεις επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται οι *σχέσεις 3.2.18 και 3.2.19* (ΚΑΝ.ΕΠΕ. Ενότητα 7.2), εφόσον οι διαμήκεις οπλισμοί είναι νευρογάλυβες.

Για τη μέση τιμή της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία δοκών:

$$\theta_{um} = 0,016 (0,3^v) \left( \left( \frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} \right) f_c \right)^{0,255} (\alpha_s)^{0,35} 25^{\alpha \rho_s} \frac{f_{yw}}{f_c} (1,25^{100 \rho_d}) \quad (3.2.18)$$

όπου:

- $\alpha_s = M/Vh$ , ο λόγος διάτμησης
- $\omega, \omega'$ : μηχανικό ποσοστό εφελκυόμενου και θλιβόμενου οπλισμού
- $v = N/bhf_c$  ( $b$ = πλάτος θλιβόμενης ζώνης)
- $\rho_s = A_{sh}/(b_w s_h)$ : γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης
- $\rho_d$ : γεωμετρικό ποσοστό δισδιαγώνιου οπλισμού

Για τη μέση τιμή του πλαστικού τμήματος της μέσης γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία του στοιχείου:

$$\theta_{um}^{pl} = \theta_u - \theta_y = 0,0145 (0,25^v) \left( \frac{\max(0,01; \omega')}{\max(0,01; \omega)} \right)^{0,3} f_c^{0,2} \alpha_s^{0,35} 25^{\alpha \rho_s} \left( \frac{f_{yw}}{f_c} \right) 1,275^{100 \rho_d} \quad (3.2.19)$$

όπου η γωνία στροφής χορδής διαρροής,  $\theta_y$ , είναι αυτή η οποία προκύπτει από τη **σχέση 3.2.9**.

Κανονικά, ο έλεγχος των διαθέσιμων γωνιών στροφής κάθε μέλους γίνεται με τιμές αξονικής δύναμης και λόγου διάτμησης οι οποίες παρουσιάζονται σταδιακώς κατά τις φορτίσεις που λαμβάνονται υπόψη στη σύνταξη της καμπύλης αντίστασης. Απλοποιητικώς, επιτρέπεται να γίνεται ο έλεγχος αυτός σε κάθε μέλος με τιμές αξονικής δύναμης και λόγου διάτμησης ίσες με εκείνες που συμβαίνουν στο μέλος αυτό κατά τη στιγμή της κρίσιμης μετακίνησης του δομήματος. Όσον αφορά την αξονική δύναμη, μόνον στην περίπτωση χθαμαλών κτιρίων, στα οποία η σεισμική δράση δεν συνεπάγεται συνήθως μεταβολή αξονικών δυνάμεων στα κατακόρυφα στοιχεία, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί τιμή αξονικής δύναμης που οφείλεται μόνον στα κατακόρυφα φορτία.

Αν το στοιχείο αστοχεί από τέμνουσα προτού διαρρεύσει σε κάμψη, δηλαδή αν  $V_R < V_{My}$ , τότε επιτρέπεται να λαμβάνεται πλαστική γωνία στροφής στο άκρο του μετά την εξάντληση της διατμητικής αντοχής ίση με το 40% της αντίστοιχης γωνίας στροφής χορδής στην καμπτική διαρροή,  $\theta_y$ . Σε δοκούς κτιρίων, γενικώς, κρίσιμο έναντι αστοχίας σε διάτμηση είναι ένα άκρο όταν εφελκύεται το πάνω πέλμα. Τότε, το μήκος διάτμησης υπολογίζεται ως ο εκάστοτε λόγος  $M/V$  στη διατομή στήριξης. Μόνον όταν εφελκύεται το κάτω πέλμα, μπορεί να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του λόγου διάτμησης μια σταθερή τιμή αυτού. (Σε δοκούς που συνδέονται και στα δύο άκρα με κατακόρυφα στοιχεία, το  $L_s$  μπορεί να λαμβάνεται ίσο με το μισό του καθαρού ανοίγματος της δοκού).

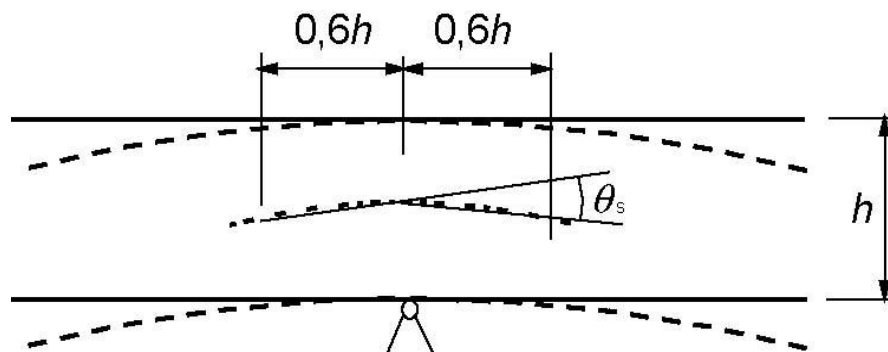
Στην περίπτωση όπου, στη διατομή βάσης στοιχείου, αρχίζει η ένωση των διαμήκων άκρων τους σε μήκος  $l_0$ , το πλαστικό τμήμα της γωνίας στροφής χορδής κατά την αστοχία του στοιχείου, μπορεί να υπολογιστεί από τη **σχέση 3.2.19**, με βάση τις υποθέσεις που διατυπώθηκαν παραπάνω για την επιρροή των ενώσεων με παράθεση ράβδων με ευθύγραμμα άκρα (το μηχανικό ποσοστό του θλιβόμενου οπλισμού,  $\omega'$ , λαμβάνεται διπλάσιο αυτού που ισχύει εκτός του μήκους παράθεσης). Επίσης, το δεξί μέλος της **σχέσης 3.2.19**, πολλαπλασιάζεται με το λόγο

$$l_0 / l_{0u,min}, \text{ με: } l_{0u,min} = \frac{\phi f_y}{\left(1,05 + 14,5 a_1 \rho_s \frac{f_{yw}}{f_c}\right) f_c^{0,5}} \quad (3.2.20)$$

Όπου  $f_c$ ,  $f_y$ ,  $f_{yw}$ , είναι οι αντιπροσωπευτικές τιμές αντοχής των υλικών σε MPa,  $\rho_s$  όπως υπολογίστηκε προηγουμένως, και  $a_1 = \left(1 - \frac{s_h}{2b_c}\right) \left(1 - \frac{s_h}{2h_c}\right) \left(\frac{n_{restr}}{n_{tot}}\right)$  (3.2.21)

Τα  $s_h$ ,  $b_c$ ,  $h_c$ , είναι όπως ορίστηκαν προηγουμένως,  $n_{tot}$  είναι ο συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στην περίμετρο της διατομής που ενώνονται με παράθεση των άκρων τους, και  $n_{restr}$  είναι ο αριθμός των ανωτέρω ράβδων που συγκρατούνται σε γωνία συνδετήρα ή από άγκιστρο σιγμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου.

Αφού προσδιοριστεί η διαθέσιμη ικανότητα στροφής της δοκού, γίνεται έλεγχος στην οριακή κατάσταση αστοχίας, κατά τις διατάξεις του Ευρωκώδικα 2: Η απλοποιημένη διαδικασία, βασίζεται στη διαθέσιμη ικανότητα στροφής της ζώνης της δοκού σε μήκος περίπου 1,2 φορές το ύψος της διατομής. Θεωρείται πως οι ζώνες αυτές υφίστανται πλαστικές παραμορφώσεις (σχηματισμό πλαστικών αρθρώσεων) υπό το σχετικό συνδυασμό δράσεων. Ο έλεγχος των πλαστικών στροφών στην οριακή κατάσταση αστοχίας πληρούται, εφόσον αποδεικνύεται ότι, υπό τις σχετικές δράσεις, η υπολογισθείσα στροφή  $\theta$  (όπως αυτή αναπαριστάται στο **Σχήμα 14**), είναι μικρότερη ή ίση από την επιτρεπόμενη πλαστική στροφή,  $\theta_{pl,d}$ .

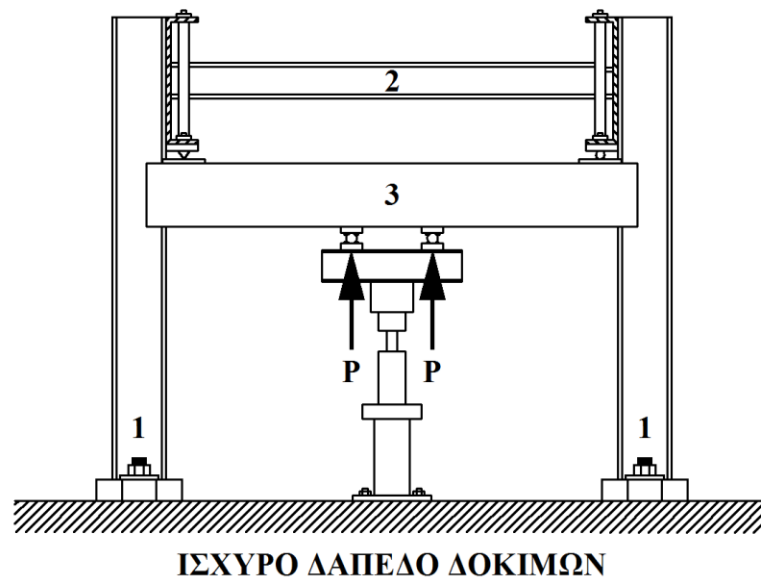


Σχήμα 14: Πλαστική στροφή  $\theta_s$  διατομής δοκού ΟΣ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

### 4.1. ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Μια πρώτη σειρά δοκιμών, σε δοκούς ΟΣ (χωρίς αξονικό φορτίο) με ανεπαρκή ματίσματα υπό μονοτονική ένταση, έχει ήδη ολοκληρωθεί και αξιολογηθεί. Η πειραματική διάταξη καθώς και οι θέσεις και ο τρόπος επιβολής των φορτίων φαίνεται στο *σχήμα 15*.



**1, 2: ΔΥΣΚΑΜΠΤΑ ΧΑΛΥΒΔΙΝΑ ΠΛΑΙΣΙΑ ΣΤΗΡΙΞΗΣ**

**3: ΔΟΚΟΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΑΠΟΥΣΙΑ ΑΞΟΝΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ)**

**P: ΔΙΠΛΟ ΣΗΜΕΙΑΚΟ ΦΟΡΤΙΟ 19cm ΕΚΑΤΕΡΩΘΕΝ ΤΗΣ ΜΕΣΑΙΑΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ**

*Σχήμα 15: Πειραματική διάταξη*

Όσον αφορά στην εκτέλεση των δοκιμών, στο σχεδιασμό των δοκιμών και στην πειραματική διάταξη, τρία κύρια χαρακτηριστικά πρέπει να αναφερθούν :

- Καθώς η εξάπλωση/διάδοση της βλάβης από το άκρο (ή τα άκρα) του ματίσματος («άνοιγμα» του ματίσματος, unzipping) είναι κρίσιμη, μπορεί να υποθεθεί πως «μέτριες» τιμές τέμνουσας δύναμης, και συνεπώς άνισες τιμές καμπτικής ροπής στα άκρα του ματίσματος, θα βελτιώσουν την συμπεριφορά του. Ωστόσο, η αστοχία ενός ματίσματος στην περιοχή της μέγιστης τέμνουσας δύναμης φαίνεται να εμφανίζει πιο ψαθυρή συμπεριφορά από μία αστοχία στην περιοχή της μέγιστης καμπτικής ροπής. Για το λόγο αυτό, σε όλα τα δοκίμια, τα ματίσματα των οπλισμών διατάχθηκαν στις περιοχές των δοκιμών οι οποίες καταπονήθηκαν υπό σταθερή τέμνουσα δύναμη και μεταβαλλόμενη καμπτική ροπή.
- Οι συνθήκες συνάφειας για τις ράβδους και τα ματίσματα σε όλα τα δοκίμια ήταν καλές, ασχέτως από τη θέση τους κατά την σκυροδέτηση. Επιπλέον, η μέγιστη διάμετρος των αδρανών και η κοκκομετρική διαβάθμιση δεν επηρεάζουν σημαντικά τις συνθήκες συνάφειας των οπλισμών.
- Σε όλα τα ματίσματα, οι ματιζόμενες ράβδοι ήταν σε πλήρη επαφή και «καλά» δεμένες μεταξύ τους με διπλό σύρμα από μαλακό χάλυβα. Οι θέσεις των οπλισμών και των ματισμάτων, καθώς και το πάχος της επικάλυψης του σκυροδέματος, εξασφαλίστηκαν από κατάλληλα διατεταγμένους πλαστικούς αποστατήρες. Με τον τρόπο αυτό, εξασφαλίστηκαν ίδιες συνθήκες εγκιβωτισμού των οπλισμών και των ματισμάτων, και συνεπώς, ίδια παθητική περίσφιγξη, λόγω της επικάλυψης του σκυροδέματος, για όλα τα δοκίμια.

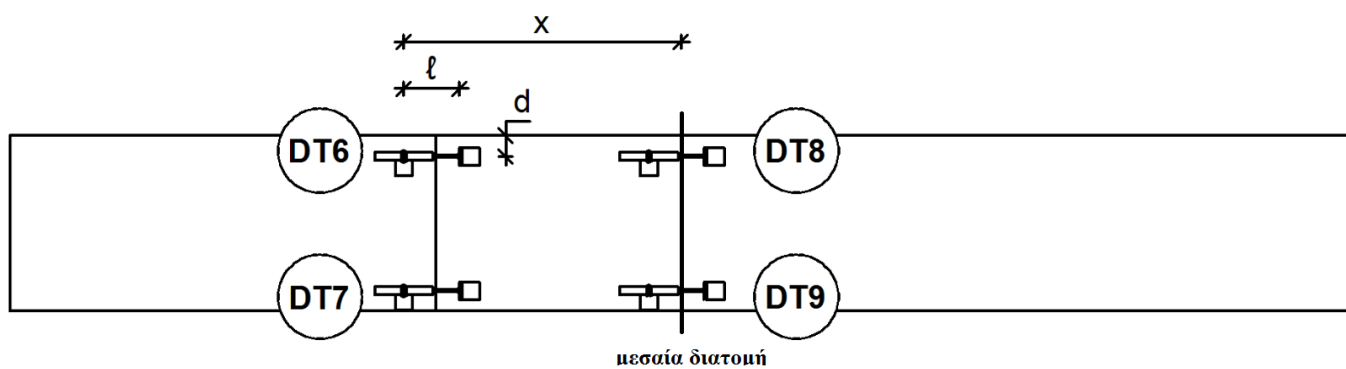
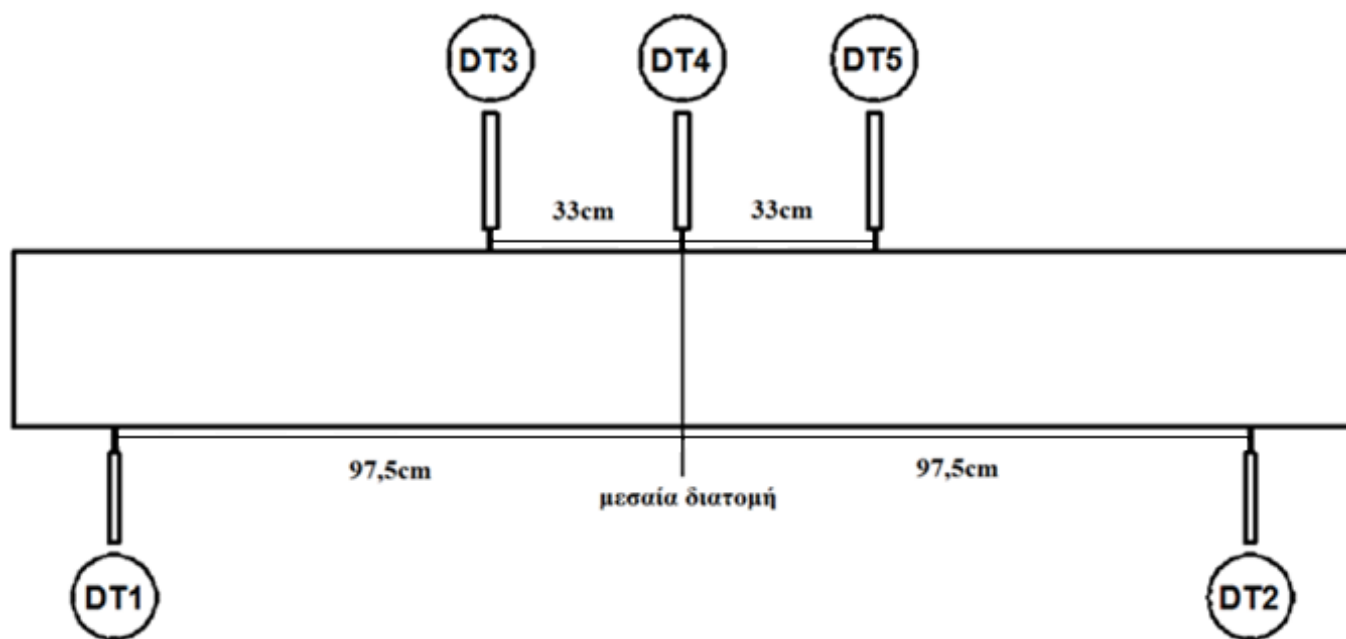
#### 4.2. ΕΝΟΡΓΑΝΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Βελόμετρα: Με τη συντομογραφία DT (displacement transducer), συμβολίζονται τα βελόμετρα. Τα βελόμετρα DT1, DT2, DT3, DT4 και DT5, είναι τοποθετημένα κατακόρυφα της διεύθυνσεως των δοκιμίων και καταγράφουν τις κατακόρυφες μετατοπίσεις των επιτόπιων σημείων. Τα βελόμετρα DT6, DT7, DT8 και DT9 είναι τοποθετημένα κατά την οριζόντια διεύθυνση των δοκιμίων και καταγράφουν τις οριζόντιες μετατοπίσεις των επιτόπιων σημείων. Ακολουθούν επεξηγηματικοί πίνακες και σχέδια με το μετρούμενο μέγεθος και τη θέση του κάθε οργάνου, για κάθε πειραματική επανάληψη.

ΒΕΛΟΜΕΤΡΟ	ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗΣ
DT1	Υποχώρηση αριστερής στηρίξεως
DT2	Υποχώρηση δεξιάς στηρίξεως
DT3	Βύθιση σε απόσταση -33cm από το μέσον
DT4	Βύθιση μεσαίας διατομής
DT5	Βύθιση σε απόσταση +33cm από το μέσον
DT6	Παραμόρφωση στη στάθμη των εφελκόμενων οπλισμών, στη διατομή με απόσταση περίπου -36cm από το μέσον
DT7	Παραμόρφωση στη στάθμη των θλιβόμενων οπλισμών, στη διατομή με απόσταση περίπου -36cm από το μέσον
DT8	Παραμόρφωση στη στάθμη των εφελκόμενων οπλισμών, στη μεσαία διατομή
DT9	Παραμόρφωση στη στάθμη των θλιβόμενων οπλισμών, στη μεσαία διατομή

*Πίνακας 3: Καταγραφόμενα μεγέθη βελομέτρων*





*Σχήμα 16: Θέσεις κατακόρυφων και οριζόντιων βελομέτρων*

L30D1*	l (mm)	x (mm)	d (mm)	x-l/2 (mm)	Avg (mm)
DT6	85	417	21	374.5	380.5
DT7	81	427	26	386.5	
DT8	93	55	21	8.5	5.5
DT9	87	46	25	2.5	

L30D2*	l (mm)	x (mm)	d (mm)	x-l/2 (mm)	Avg (mm)
DT6	83	409	21	367.5	368.75
DT7	92	416	23	370.0	
DT8	89	48	22	3.5	6.25
DT9	90	54	26	9.0	

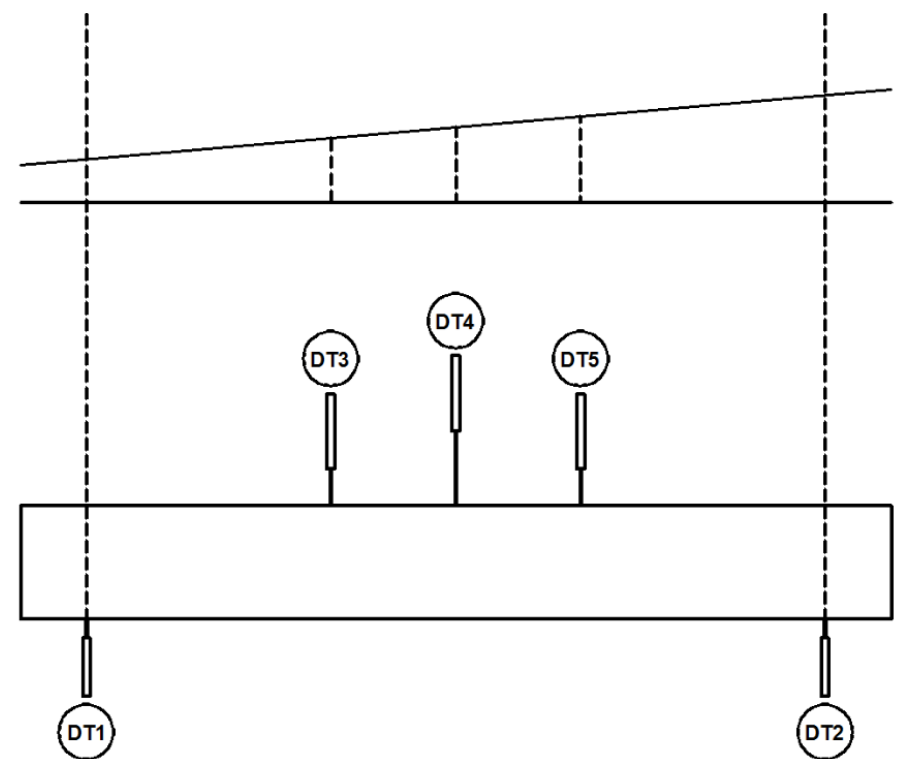
L15D1*	l (mm)	x (mm)	d (mm)	x-l/2 (mm)	Avg (mm)
DT6	105	413	25	360.5	361.5
DT7	91	408	46	362.5	
DT8	97	51	43	2.5	4.0
DT9	95	53	31	5.5	

L15D2*	l (mm)	x (mm)	d (mm)	x-l/2 (mm)	Avg (mm)
DT6	82	406	41	365.0	368.5
DT7	96	420	26	372.0	
DT8	90	48	23	3.0	6.75
DT9	95	58	39	10.5	

*Πίνακας 4: Αποστάσεις των οριζόντιων βελομέτρων από χαρακτηριστικά σημεία των δοκιμίων*

\*Για τα δοκίμια που αναγράφονται με τις ονομασίες L30D1, L30D2, L15D1 και L15D2 στον Πίνακα 4, τα χαρακτηριστικά τους περιγράφονται αναλυτικά στην Ενότητα 4.4. που ακολουθεί για το σχεδιασμό των δοκιμίων.

Οι καταγραφόμενες ενδείξεις βύθισης των βελομέτρων DT3, DT4, DT5, εξαιτίας της υποχώρησης των στηρίξεων, πρέπει να διορθωθούν συναρτήσει των ενδείξεων των βελομέτρων DT1 και DT2 (που έχουν τοποθετηθεί στις στηρίξεις). Εδώ να σημειωθεί ότι, καθώς οι στηρίξεις υποχωρούν, από την πειραματική διάταξη φαίνεται ότι τα έμβολα των βελομέτρων DT1 και DT2 αποσυμπιέζονται, συνεπώς οι ενδείξεις τους θα έχουν αρνητικές τιμές. Αντίθετα, με την επιβαλλόμενη φόρτιση, τα έμβολα των βελομέτρων DT3, DT4 και DT5 συμπιέζονται, και συνεπώς οι καταγραφές τους (βυθίσεις δοκού στις αντίστοιχες διατομές) θα έχουν θετικές τιμές.



Σχήμα 17: Εστραμμένη δοκός εξαιτίας υποχωρήσεων στις στηρίξεις

Στο **Σχήμα 17**, φαίνονται οι μετακινήσεις στις θέσεις των βελομέτρων DT3, DT4 και DT5, λόγω μετακίνησης ή/και στροφής της δοκού ως στερεό σώμα, εξαιτίας των υποχωρήσεων στις στηρίξεις. Οι ενδείξεις αυτές των βελομέτρων DT1 και DT2, που αντιστοιχούν στην υποχώρηση των στηρίξεων, πρέπει να αφαιρεθούν από τις καταγραφές των βελομέτρων DT3, DT4 και DT5, αφού δεν πρόκειται για βέλη από την κάμψη της δοκού.

Αν θεωρήσουμε  $x$  την οριζόντια απόσταση του οργάνου καταγραφής από την αριστερή στήριξη, τότε η κατακόρυφη μετατόπιση στην εν λόγω διατομή θα είναι:

$DT1 + \frac{x}{l}(DT2 - DT1)$ , όπου  $DT1$ ,  $DT2$  οι ενδείξεις των αντίστοιχων βελομέτρων και  $l$  η απόσταση μεταξύ των στηρίξεων. Τελικώς, για τις βυθίσεις  $\delta_3$ ,  $\delta_4$  και  $\delta_5$  στις θέσεις των βελομέτρων  $DT3$ ,  $DT4$  και  $DT5$  αντίστοιχα, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$\bullet \delta_3 = DT3 + \left( DT1 + \frac{64.5}{195}(DT2 - DT1) \right) \quad (4.2.1)$$

$$\bullet \delta_4 = DT4 + \left( DT1 + \frac{97.5}{195}(DT2 - DT1) \right) = DT4 + \frac{(DT1 + DT2)}{2} \quad (4.2.2)$$

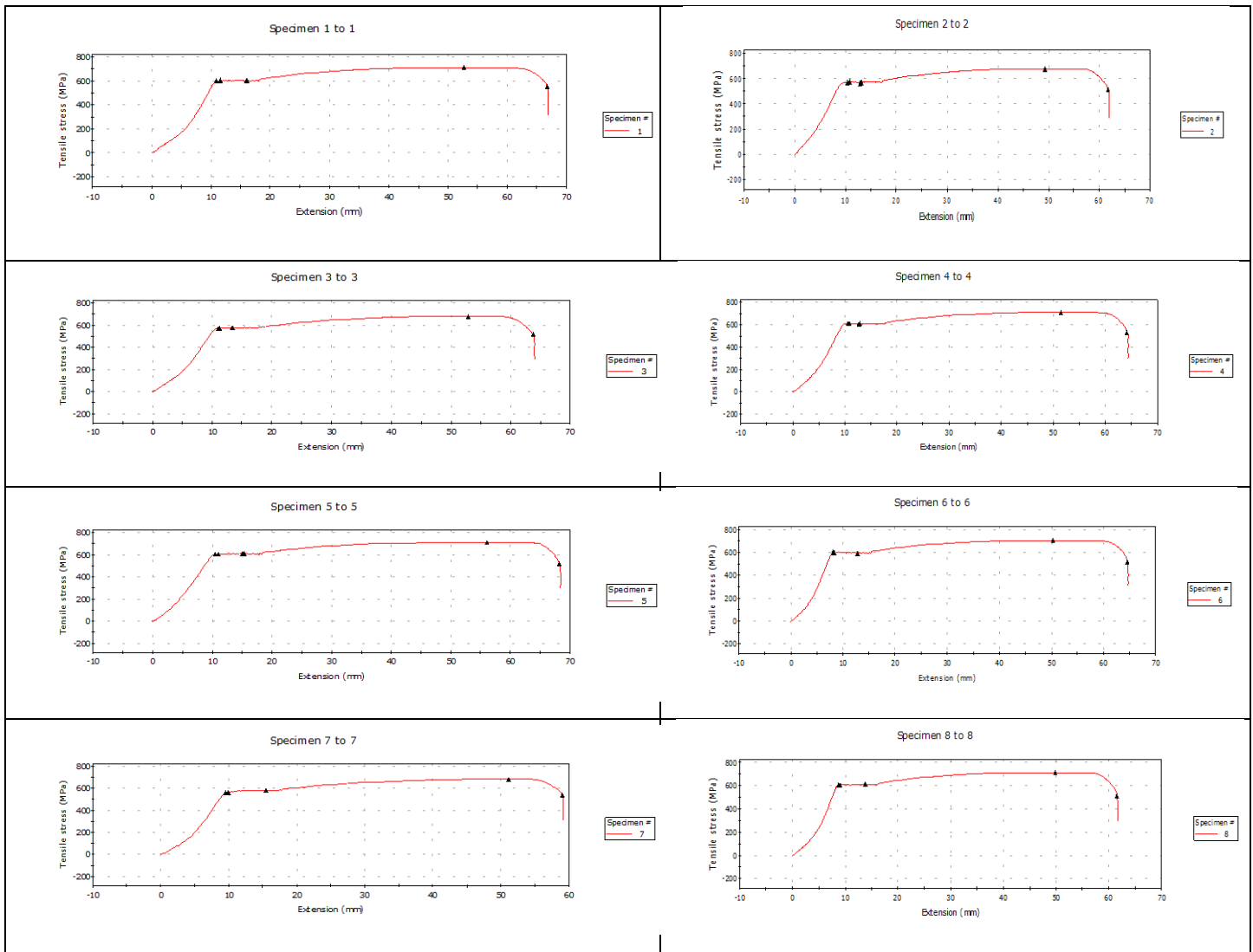
$$\bullet \delta_5 = DT5 + \left( DT1 + \frac{130.5}{195}(DT2 - DT1) \right) \quad (4.2.3)$$

Σημείωση: Στις παραπάνω σχέσεις, χρησιμοποιείται η αριθμητική τιμή για τη διορθωτική παράμετρο της υποχώρησης των στηρίξεων, η οποία είναι αρνητική από τις ενδείξεις των βελομέτρων  $DT1$  και  $DT2$ , όπως αναφέρθηκε προηγουμένως.

### 4.3. ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΛΙΚΩΝ

Ακολούθως θα εξετάσουμε τα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών:

Χάλυβας Οπλισμού: Στο Κέντρο Ελέγχου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) διεξήχθησαν πειραματικοί έλεγχοι σε «γυμνές» ενώσεις ράβδων οπλισμού. Από τη δοκιμή εφελκυσμού 8 δοκιμίων ράβδων οπλισμού, ποιότητας B500C, προέκυψαν τα παρακάτω διαγράμματα τάσης παραμόρφωσης:



*Σχήμα 18: Διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης από τη δοκιμή εφελκυσμού στα δοκίμια χάλυβα*

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται στον ακόλουθο πίνακα:

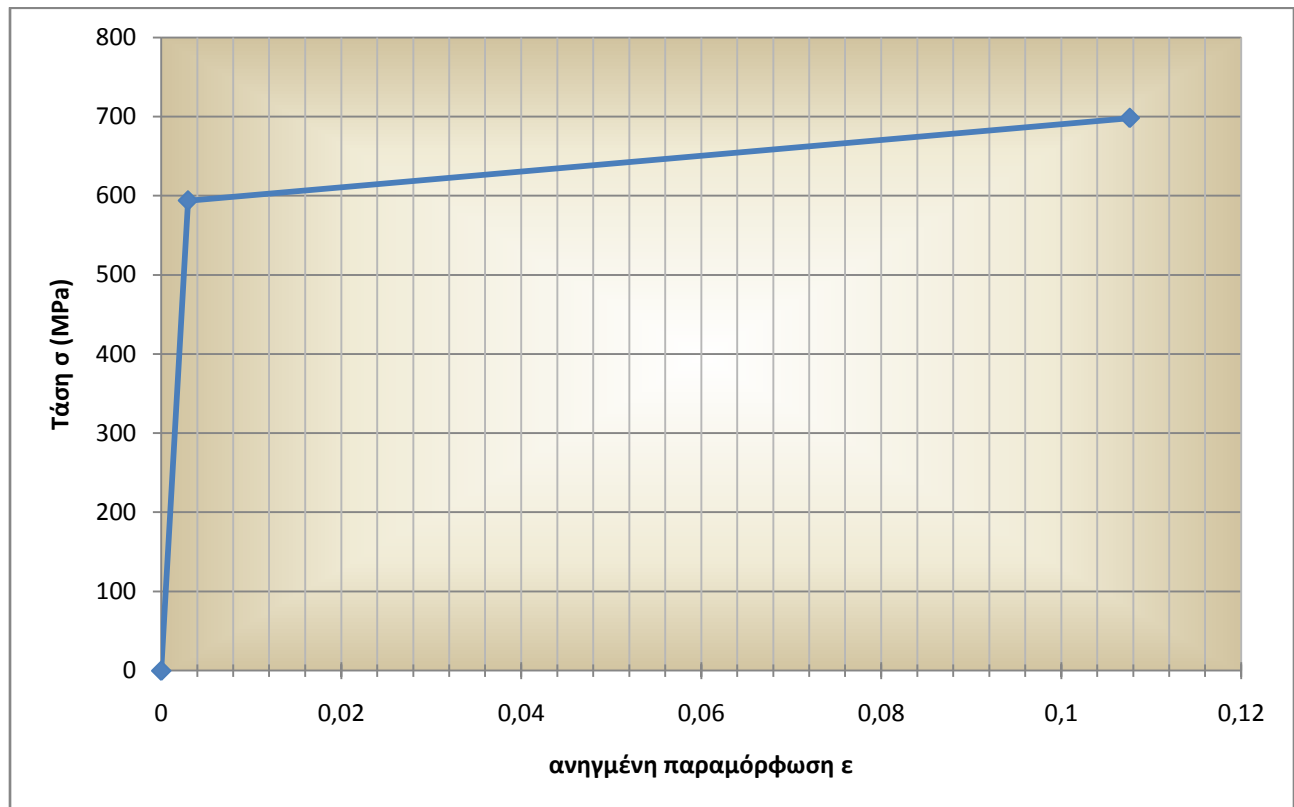
A/A ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΤΑΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ (MPa)	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ (MPa)	ΑΝΗΓΜΕΝΗ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΘΡΑΥΣΕΩΣ
1	605	0.30%	708	10.7%
2	567	0.28%	676	10.5%
3	574	0.29%	679	10.4%
4	607	0.30%	712	11.3%
5	610	0.31%	713	11.6%
6	596	0.30%	703	12.5%
7	581	0.29%	682	8.9%
8	611	0.31%	712	10.2%
<b>M.O.</b>	593.88	0.30%	698.13	10.77%
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>	17.47	0,01%	16.23	1.07%

*Πίνακας 5: Σύνοψη τιμών τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων για τα δοκίμια χάλυβα κατά τη δοκιμή εφελκυσμού*

Προκύπτουν οι εξής μέσες τιμές αντοχών και ανηγμένων παραμορφώσεων του χάλυβα οπλισμού:

- Μέση εφελκυστική αντοχή διαρροής χάλυβα:  $f_{sy} = 594 \text{ MPa}$
- Μέση ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής χάλυβα:  $\epsilon_{sy} = 0.3\%$
- Μέση μέγιστη εφελκυστική αντοχή χάλυβα:  $f_{su} = 698 \text{ MPa}$
- Μέση ανηγμένη παραμόρφωση θραύσεως χάλυβα:  $\epsilon_{su} = 10.77\%$

Στο **Σχήμα 19**, καταρτίζεται η ιδεατή διγραμμική σχέση τάσης-ανηγμένης παραμόρφωσης, όπως προκύπτει από τις μέσες τιμές που υπολογίστηκαν:



*Σχήμα 19: Ιδεατό διάγραμμα τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων για τα δοκίμια χάλυβα*

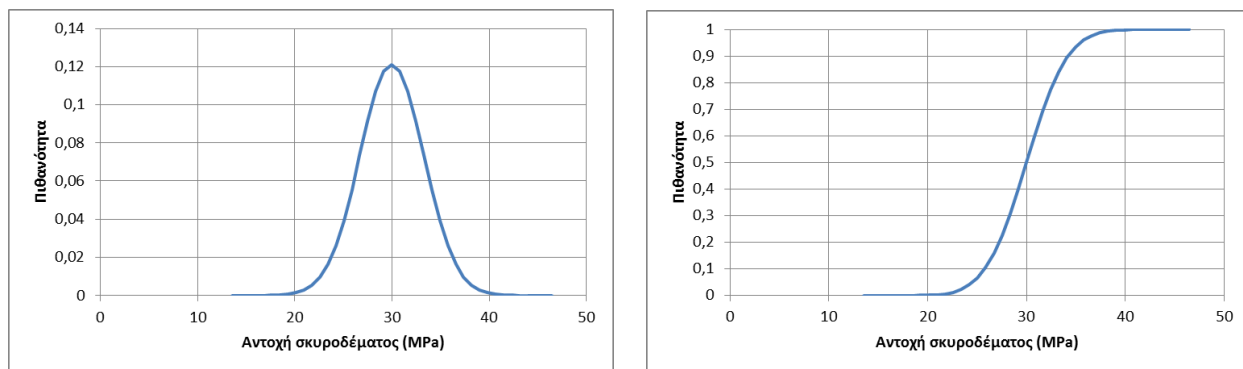
**Σκυροδέμα:** Στο Κέντρο Ελέγχου Δημοσίων Έργων (ΚΕΔΕ) διεξήχθησαν πειραματικοί έλεγχοι σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος. Από τη δοκιμαστική θλιπτική καταπόνηση 7 κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος ποιότητας C30/35, προέκυψαν τα παρακάτω δεδομένα, όπως αυτά συνοψίζονται στον **Πίνακα 6**:

Α/Α ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΕΜΒΑΔΟ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (m <sup>2</sup> )	ΔΥΝΑΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (KN)	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ (MPa)
1	0.01755	534.57	30.46
2	0.01755	558.59	31.83
3	0.01755	494.88	28.20
4	0.01755	432.21	24.63
5	0.01755	548.14	31.23
6	0.01755	614.99	35.04
7	0.01755	499.05	28.44
<b>Μ.Ο.</b>		<b>526.06</b>	<b>29.97</b>
<b>ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ</b>		<b>57.79</b>	<b>3.29</b>

*Πίνακας 6: Σύνοψη τιμών τάσεων-ανηγμένων παραμορφώσεων κατά τη θραύση κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος σε θλιπτική δοκιμή*

➤ Μέση τιμή θλιπτικής τάσης θραύσης σκυροδέματος:  $f_{cm} \approx 30 \text{ Mpa}$

Στο **Σχήμα 20** καταρτίζεται η καμπύλη κατανομής της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος:



*Σχήμα 20: Καμπύλη κατανομής πιθανότητας για τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων σκυροδέματος*



#### 4.4. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

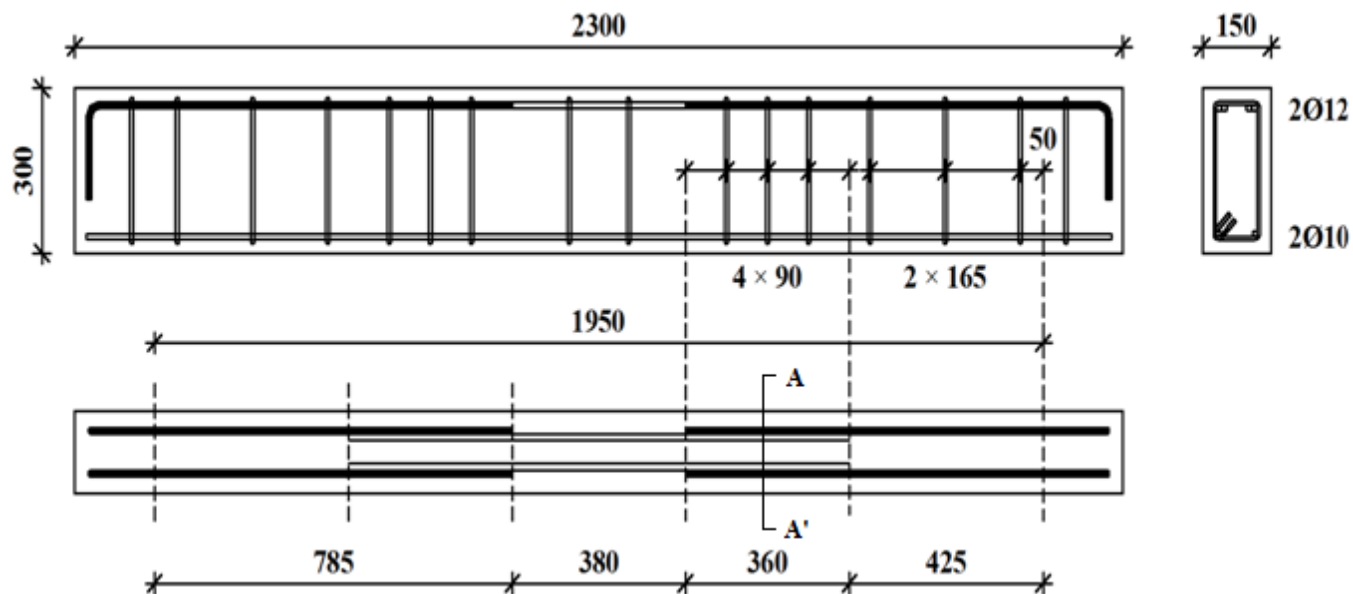
Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, σκυροδετήθηκαν 4 δοκίμια, δύο διαφορετικών τύπων:

- 2 δοκοί με μήκος παράθεσης των εφελκόμενων οπλισμών ίσο με 30 φορές τη διάμετρο των ράβδων οπλισμού (συντομογραφία δοκών: L30D). Οι ράβδοι που ματίζονται εφάπτονται μεταξύ τους μέσα στο μήκος υπερκάλυψης
- 2 δοκοί με μήκος παράθεσης των εφελκόμενων οπλισμών ίσο με 15 φορές τη διάμετρο των ράβδων οπλισμού (συντομογραφία δοκών: L15D). Οι ράβδοι που ματίζονται εφάπτονται μεταξύ τους μέσα στο μήκος υπερκάλυψης

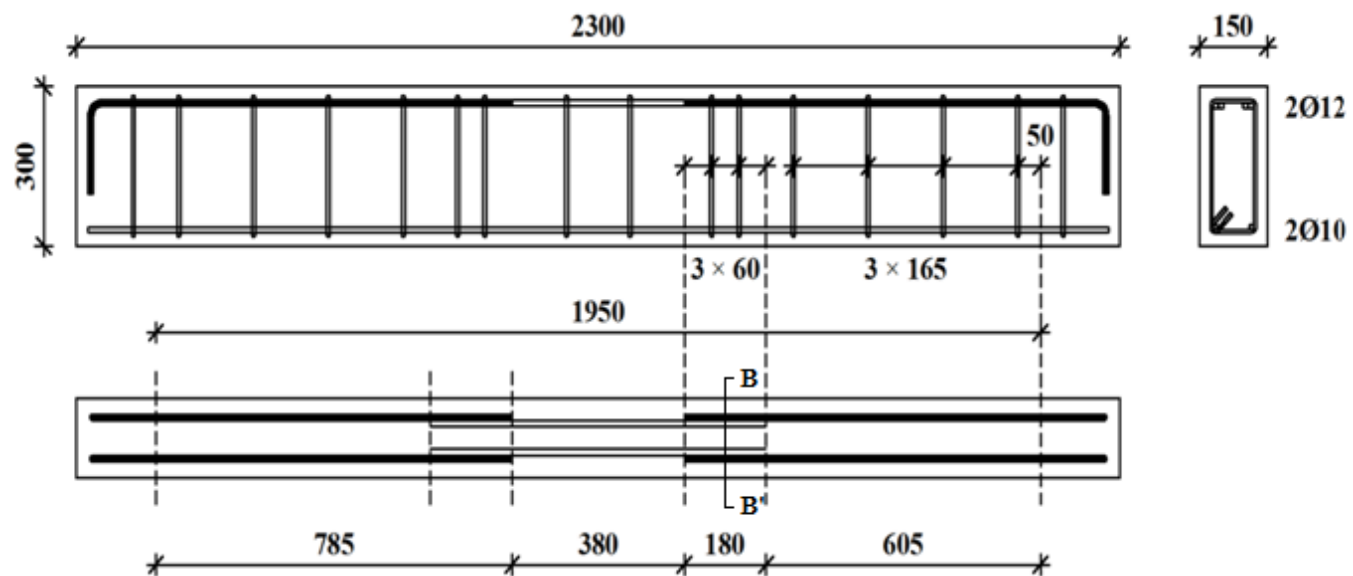
Η γεωμετρία των δοκιμίων και η διάταξη των οπλισμών παρατίθενται στον πίνακα και τα σκαριφήματα που ακολουθούν:

ΤΥΠΟΣ ΔΟΚΟΥ	L30D	L15D
Πλάτος b(mm)	150	150
Ύψος h(mm)	300	300
Απόσταση μεταξύ των στηρίξεων $l_s$ (mm)	1950	1950
Επικάλυψη c(mm)	25	25
Διάμετρος εφελκόμενου οπλισμού $\varnothing_{long\_1}$ (mm)	12	12
Αριθμός ράβδων εφελκόμενου οπλισμού	2	2
Διάμετρος θλιβόμενου οπλισμού $\varnothing_{long\_2}$ (mm)	10	10
Αριθμός ράβδων θλιβόμενου οπλισμού	2	2
Διάμετρος συνδετήρων $\varnothing_w$ (mm)	8	6
Απόσταση κέντρου εφελκόμενου οπλισμού-ακραίας ίνας $d_1$ (mm)	39	37
Απόσταση κέντρου θλιβόμενου οπλισμού-ακραίας ίνας $d_2$ (mm)	38	36
Εμβαδό εφελκόμενου οπλισμού $\Sigma A_{s1}$ (mm <sup>2</sup> )	226.2	226.2
Εμβαδό θλιβόμενου οπλισμού $\Sigma A_{s2}$ (mm <sup>2</sup> )	157.1	157.1
Μήκος παράθεσης εφελκόμενου οπλισμού $l_0$ (mm)	30x12=360	15x12=180

*Πίνακας 7: Γεωμετρικά δεδομένα των δοκιμίων*



*Σχήμα 21: Όψη, κάτοψη και τομή A-A' στην περιοχή ένωσης οπλισμών (L30D)*



*Σχήμα 22: Όψη, κάτοψη και τομή B-B' στην περιοχή ένωσης οπλισμών (L15D)*

Απαιτούμενο μήκος υπερκάλυψης βάσει των προβλέψεων του ΕΚ2:

- Καθώς πρόκειται για υφιστάμενα στοιχεία, των οποίων μάλιστα οι αντοχές των υλικών έχουν ελεγχθεί με δοκιμές, θα γίνει χρήση της μέσης τιμής της αντοχής των υλικών. Επιπροσθέτως, θα χρησιμοποιηθούν μοναδιαίοι συντελεστές για τα υλικά
- Κατά τη σκυροδέτηση των δοκιμίων, οι οπλισμοί βρίσκονται σε θέση κάθετη της διεύθυνσης σκυροδετήσεως. Οι ράβδοι θλιβόμενου οπλισμού βρίσκονται στην άνω και οι ράβδοι εφελκόμενου οπλισμού στην κάτω πλευρά του, υπό έγχυση νωπού σκυροδέματος, δοκιμίου. Από τις συνθήκες που παρατέθηκαν στην Ενότητα 2.1 και λαμβάνοντας υπόψιν τη θέση των οπλισμών σε σχέση με τη διεύθυνση και το πάχος σκυροδετήσεως, προκύπτουν ευνοϊκές συνθήκες συνάφειας για τον εφελκόμενο οπλισμό, και δυσμενείς για το θλιβόμενο. Για τον υπολογισμό του μήκους παράθεσης, θα ληφθούν υπόψιν μόνο οι παράμετροι για τις εφελκόμενες ράβδους που ματίζονται. Λόγω της ύπαρξης ευνοϊκών συνθηκών συνάφειας στις εφελκόμενες ράβδους:  $\eta_1 = 1,0$
- Η διάμετρος  $\varnothing$  των εφελκόμενων ράβδων οπλισμού είναι 12mm, και αφού είναι μικρότερη των 32 mm, σύμφωνα με την Ενότητα 2.1, προκύπτει:  $\eta_2 = 1,0$  για  $\varnothing \leq 32$  mm
- Από τη **σχέση 2.1.3**, προκύπτει:  $f_{ctd} = f_{ctk} / \gamma_c = 0,7 \cdot f_{ctm} / \gamma_c = 0,7 \cdot 0,3 \cdot f_c^{2/3} / \gamma_c \approx 2,03 \text{MPa}$  όπου για το σκυρόδεμα  $\gamma_c = 1,0$  και από τις θλιπτικές δοκιμές στα κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος, προκύπτει η μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος  $f_c \approx 29,97 \text{MPa}$
- Η τάση συνάφειας μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, υπολογίζεται όπως έχει ήδη αναφερθεί στη **σχέση 2.1.1**:  $f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd} \rightarrow f_{bd} \approx 4,5 \text{MPa}$
- Τα δοκίμια θα καταπονηθούν μέχρι θραύσεως κατά την πειραματική δοκιμή, συνεπώς ως τάση σχεδιασμού του χάλυβα  $\sigma_{sd}$ , θα χρησιμοποιήσουμε την αντοχή διαρροής σχεδιασμού του χάλυβα  $f_{yd}$ , αφού οι οπλισμοί θα διαρρεύσουν και θα γίνει εκμετάλλευση όλης της αντοχής τους. Από τη δοκιμαστική εφελκυστική καταπόνηση των 8 δοκιμίων χάλυβα, προέκυψε η μέση εφελκυστική αντοχή χάλυβα  $f_{sy} = f_{yk} = 594 \text{MPa}$ . Από τα παραπάνω,  $\sigma_{sd} = f_{yd} = f_{yk} / \gamma_s = 594 \text{MPa}$ , με  $\gamma_s = 1,0$

- Η **σχέση 2.2.1**, δίνει το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης για τις εφελκόμενες ράβδους:

$$l_{b,req} = (\varnothing/4) \cdot (\sigma_{sd} / f_{bd}) = (\varnothing/4) \cdot (f_{yd} / f_{bd}) \rightarrow l_{b,req} = 39,6 \text{ cm}$$

όπου  $\varnothing = 12 \text{ mm}$  και  $f_{bd} = 4,5 \text{ MPa}$ , όπως υπολογίστηκε παραπάνω

- Το ελάχιστο μήκος αγκύρωσης για ράβδους που υπόκεινται σε εφελκυσμό, δίδεται από τη σχέση:  $l_{b,min} = \max\{0,3l_{b,req} ; 10\varnothing ; 100 \text{ mm}\}$

Εν προκειμένω,  $l_{b,min} = \max\{118,8 \text{ mm}; 120 \text{ mm}; 100 \text{ mm}\} = 118,8 \text{ mm}$

- Η **σχέση 2.2.2**, δίνει το βασικό μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού για τις εφελκόμενες ράβδους οπλισμού των δοκιμίων:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,req} \geq l_{b,min}$$

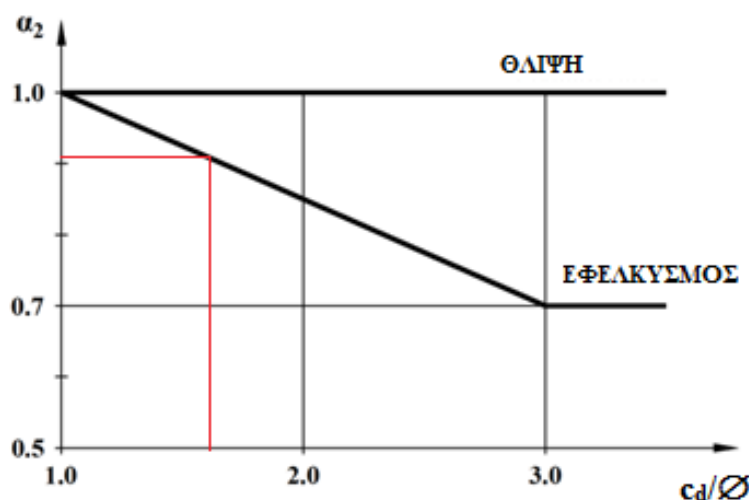
- $\alpha_1 = 1,0$  λόγω ευθύγραμμης αγκύρωσης των ράβδων
- $\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot (c_d - \varnothing) / \varnothing = 1 - 0,15 \cdot (c_d - 12) / 12$

όπου  $c_d = \min(a/2; c_1; c) = \min(c_d/2; 25; 25)$  για ευθύγραμμη αγκύρωση των ράβδων.

Για τις δοκούς L30D,  $c_{d,L30D} = 19,5 \text{ mm}$  και  $\alpha_{2,L30D} \approx 0,91$ , και για τις δοκούς L15D,

$c_{d,L15D} = 18,5 \text{ mm}$  και  $\alpha_{2,L15D} \approx 0,92$ . Ισχύει για όλα τα δοκίμια:  $0,7 \leq \alpha_2 \leq 1,0$

Από τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 2, προτείνεται τελικώς η ακόλουθη γραμμική σχέση μεταξύ υπερκάλυψης σχεδιασμού και του συντελεστή  $\alpha_2$ :



Σχήμα 23: Γραμμική σχέση μεταξύ επικάλυψης σχεδιασμού  $c_d$  και του συντελεστή  $\alpha_2 = 1 - 0,15 \cdot ((c_d/\varnothing) - 1)$  (για εφελκυσμό). Οι συντεταγμένες που έχουν σημειωθεί με κόκκινο δείχνουν τη σχέση  $c_d$  και  $\alpha_2$  για τα δοκίμια της πειραματικής διαδικασίας

- $\alpha_3 = 1 - K \cdot \lambda$

όπου  $K=0,1$  από την περίσφιγξη εγκάρσιου οπλισμού και  $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$ :

- Στα δοκίμια L30D, υπάρχουν 3 συνδετήρες  $\varnothing 8$  στο μήκος υπερκάλυψης:  
 $\Sigma A_{st} = 3\pi 8^2 / 4 = 150,8 \text{ mm}^2$ ,  $A_s = \pi 12^2 / 4 = 113,1 \text{ mm}^2$ ,  $\Sigma A_{st,min} = A_s / 4 = 28,3 \text{ mm}^2$   
 $\lambda_{L30D} = 1,08$
- Στα δοκίμια L15D υπάρχουν 2 συνδετήρες  $\varnothing 6$  στο μήκος υπερκάλυψης:  
 $\Sigma A_{st} = 2\pi 3^2 / 4 = 56,55 \text{ mm}^2$ ,  $A_s = \pi 12^2 / 4 = 113,1 \text{ mm}^2$ ,  $\Sigma A_{st,min} = A_s / 4 = 28,3 \text{ mm}^2$   
 $\lambda_{L15D} = 0,25$

Συνεπώς,  $\alpha_{3,L30D} = 1 - 0,1 \cdot 1,08 = 0,892$  και  $\alpha_{3,L15D} = 1 - 0,1 \cdot 0,25 = 0,975$

Ισχύει για όλα τα δοκίμια:  $0,7 \leq \alpha_3 \leq 1,0$

- $\alpha_4 = 1,0$  καθώς δεν υπάρχει περίσφιγξη με συγκολλητό εγκάρσιο οπλισμό
- $\alpha_5 = 1,0$  καθώς δεν υπάρχει περίσφιγξη με εγκάρσια πίεση

Τελικώς:

$$l_{bd,L30D} = 32,1 \text{ cm} \geq l_{b,min} = 11,8 \text{ cm} \text{ και } l_{bd,L30D} = 35,5 \text{ cm} \geq l_{b,min} = 11,8 \text{ cm}$$

- Υπολογίζεται το ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης:

$$l_{0,min} = \max \{ 0,3 \alpha_6 l_{b,req} ; 15\varnothing ; 200 \text{ mm} \}$$

- $\rho_1$  το ποσοστό των υπό ένωση ράβδων σε αποστάσεις  $0,65 \cdot l_0$  εκατέρωθεν του θεωρούμενου μέσου του μήκους υπερκάλυψης. Στην προκειμένη περίπτωση  $\rho_1 = 100\%$
- $\alpha_6 = 1,5$  όπως προκύπτει από τον **Πίνακα 2** που παρατίθεται στην Ενότητα 2.3.

$$l_{0,min} = \max \{ 0,3 \cdot 1,5 \cdot 39,6 \text{ cm} ; 15 \cdot 1,2 \text{ cm} ; 20 \text{ cm} \} = 20 \text{ cm}$$

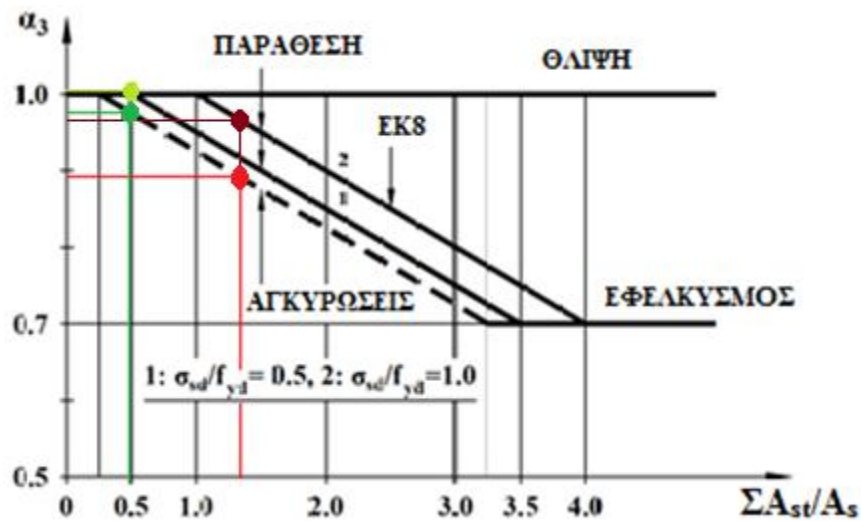
- Η **σχέση 2.3.1** δίνει το απαιτούμενο μήκος υπερκάλυψης:

$$l_0 = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3' \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,req} \geq l_{0,min}$$

- Οι συντελεστές  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_4$ ,  $\alpha_5$  και  $\alpha_6$  έχουν την τιμή που υπολογίστηκε προηγουμένως. Στον υπολογισμό του  $\alpha_3' = 1 - K \cdot \lambda'$ ,  $K=0,1$  σε όλα τα δοκίμια από την περίσφιγξη μη συγκολλητού εγκάρσιου οπλισμού και  $\lambda' = (\Sigma A_{st} - \Sigma A'_{st,min}) / A_s$ , όπου θα πρέπει να ληφθεί  $\Sigma A'_{st,min} = A_s$

- Στα δοκίμια L30D, υπάρχουν 3 συνδετήρες  $\varnothing 8$  στο μήκος υπερκάλυψης:  
 $\Sigma A_{st}=3\pi 8^2/4=150,8\text{mm}^2$ ,  $A_s=\pi 12^2/4=113,1\text{mm}^2$ ,  $\Sigma A'_{st,\min}=A_s=113,1\text{mm}^2$   
 $\lambda'_{L30D}=0,33$
- Στα δοκίμια L15D, υπάρχουν 2 συνδετήρες  $\varnothing 6$  στο μήκος υπερκάλυψης:  
 $\Sigma A_{st}=2\pi 6^2/4=56,5\text{mm}^2$ ,  $A_s=\pi 12^2/4=113,1\text{mm}^2$ ,  $\Sigma A'_{st,\min}=A_s=113,1\text{mm}^2$ .  
 $\Sigma A_{st} < \Sigma A'_{st,\min} \rightarrow \lambda'_{L15D}=0$   
 Συνεπώς,  $\alpha_3'_{L30D}=1-0,1\cdot 0,33=0,967$  και  $\alpha_3'_{L15D}=1-0,1\cdot 0=1$   
 Ισχύει για όλα τα δοκίμια:  $0,7 \leq \alpha_3' \leq 1,0$

Από τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 2, προτείνεται τελικώς η ακόλουθη γραμμική σχέση μεταξύ της επιρροής του εγκάρσιου οπλισμού και του συντελεστή  $\alpha_3$  για γωνιακές ράβδους ( $K=0,1$ ):



Σχήμα 24: Γραμμική σχέση μεταξύ της επιρροής του εγκάρσιου οπλισμού και του συντελεστή  $\alpha_3=1-K\lambda$ , για γωνιακές ράβδους ( $K=0,1$ ). Με κόκκινο και πράσινο χρώμα έχουν σημειωθεί οι συντεταγμένες της σχέσης αυτής για τα δοκίμια L30D και L15D αντίστοιχα, για τον υπολογισμό του μήκους παράθεσης και αγκύρωσης

Τελικώς:

$$l_{o,L30D} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3'_{L30D} \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,\text{req}} \geq l_{o,\min} \rightarrow l_{o,L30D} \approx 52,3\text{cm} \geq l_{o,\min} = 20\text{cm}$$

$$l_{o,L15D} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3'_{L15D} \alpha_4 \alpha_5 \alpha_6 l_{b,\text{req}} \geq l_{o,\min} \rightarrow l_{o,L15D} \approx 54,6\text{cm} \geq l_{o,\min} = 20\text{cm}$$

Το απαιτούμενο μήκος υπερκάλυψης είναι περίπου ίσο με  $44\varnothing$  στις δοκούς τύπου L30D και περίπου ίσο με  $46\varnothing$  στις δοκούς τύπου L15D. Όλα τα δοκίμια έχουν κατασκευαστεί με ανεπαρκή μήκη παράθεσης (μήκος υπερκάλυψης ίσο με  $30\varnothing$  και  $15\varnothing$  αντίστοιχα).

Σε ό,τι αφορά στις κατασκευαστικές διατάξεις για τις υπερκαλύψεις των εφελκόμενων ράβδων:

- Οι υπερκαλύψεις των γειτονικών ενώσεων εναλλάσσονται, διατάσσονται συμμετρικά και παραλλήλως προς τις παρειές του στοιχείου, κατά τις προβλέψεις των Κανονισμών
- Η καθαρή απόσταση μεταξύ του ζεύγους υπερκαλυπτόμενων ράβδων είναι 3,8 cm. Δεν υπερβαίνει τα  $4\varnothing=4,8\text{cm}$  ή 5cm, περίπτωση κατά την οποία θα απαιτούνταν περεταίρω αύξηση του μήκους υπερκάλυψης
- Η διαμήκης απόσταση μεταξύ των δύο γειτονικών ενώσεων, είναι μηδενική, και άρα μικρότερη από την ελάχιστη απόσταση  $0,3 l_0$  που προβλέπεται
- Οι δύο ενώσεις, έχουν καθαρή απόσταση μεταξύ τους 3,8 cm, μεγαλύτερη δηλαδή από την ελάχιστη απόσταση των  $2\varnothing=2,4\text{cm}$  που απαιτούν οι διατάξεις των Κανονισμών

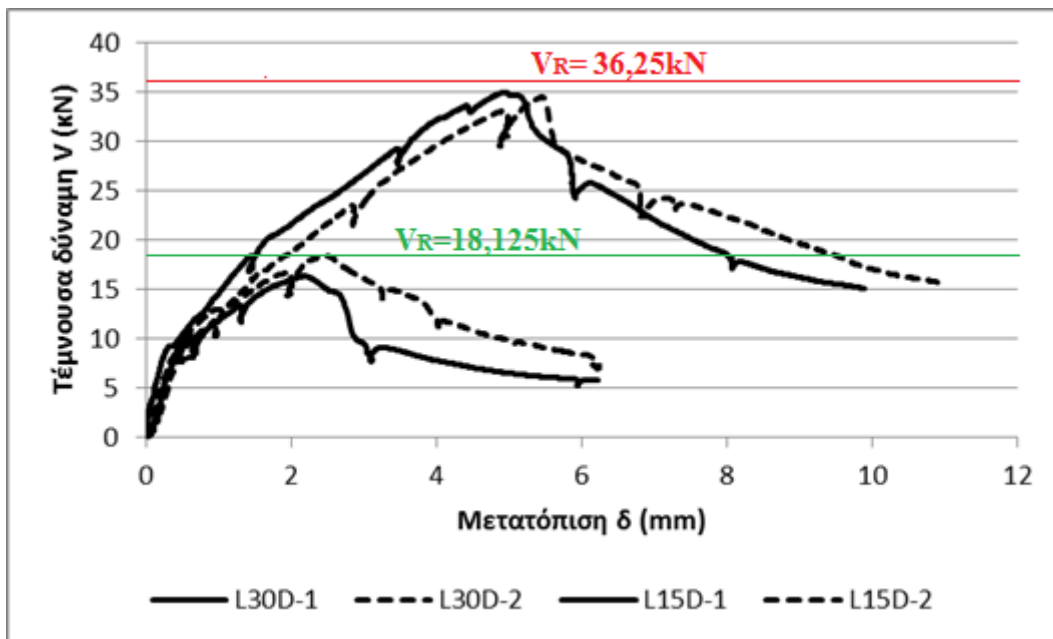
Τέλος, αναφορικά με τις προβλέψεις του Ευρωκώδικα 2 για τον εγκάρσιο οπλισμό που τοποθετήθηκε μέσα στο μήκος παράθεσης, αξίζει να σημειωθούν τα ακόλουθα στοιχεία:

- Στις δοκούς τύπου L30D, τοποθετήθηκαν στο μήκος υπερκάλυψης 3 συνδετήρες διαμέτρου  $\varnothing_w=8\text{mm}$  και εμβαδού  $50,3\text{mm}^2$  έκαστος. Στις δοκούς τύπου L15D, τοποθετήθηκαν στο μήκος υπερκάλυψης 2 συνδετήρες διαμέτρου  $\varnothing_w=6\text{mm}$  και εμβαδού  $28,3\text{mm}^2$  έκαστος. Το εμβαδό μιας εφελκόμενης ράβδου οπλισμού με  $\varnothing=12\text{mm}$ , είναι  $A_s=113,1\text{mm}^2$ . Συνεπώς, πληρούνται τα κριτήρια του ελάχιστου επιτρεπτού εμβαδού για τον εγκάρσιο οπλισμό, αφού το εμβαδό του και στις δύο περιπτώσεις δεν είναι μικρότερο του ενός τετάρτου του εμβαδού της μεγαλύτερης σε διάμετρο ράβδου.
- Στις περιοχές των ενώσεων, και οι δύο εφελκόμενες ράβδοι ματίζονται ( $\rho_1=100\%$ ), ενώ ταυτοχρόνως η απόσταση  $a$  μεταξύ των γειτονικών υπερκαλύψεων είναι  $a=3,8\text{cm}\leq 10\varnothing=12\text{cm}$ . Οι εγκάρσιοι οπλισμοί που τοποθετήθηκαν έχουν τη μορφή συνδετήρων, όπως προβλέπεται
- Οι συνδετήρες δεν τοποθετήθηκαν στα άκρα του μήκους υπερκάλυψης, κατά παράβαση των προβλέψεων των Κανονισμών

#### 4.5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ V-δ

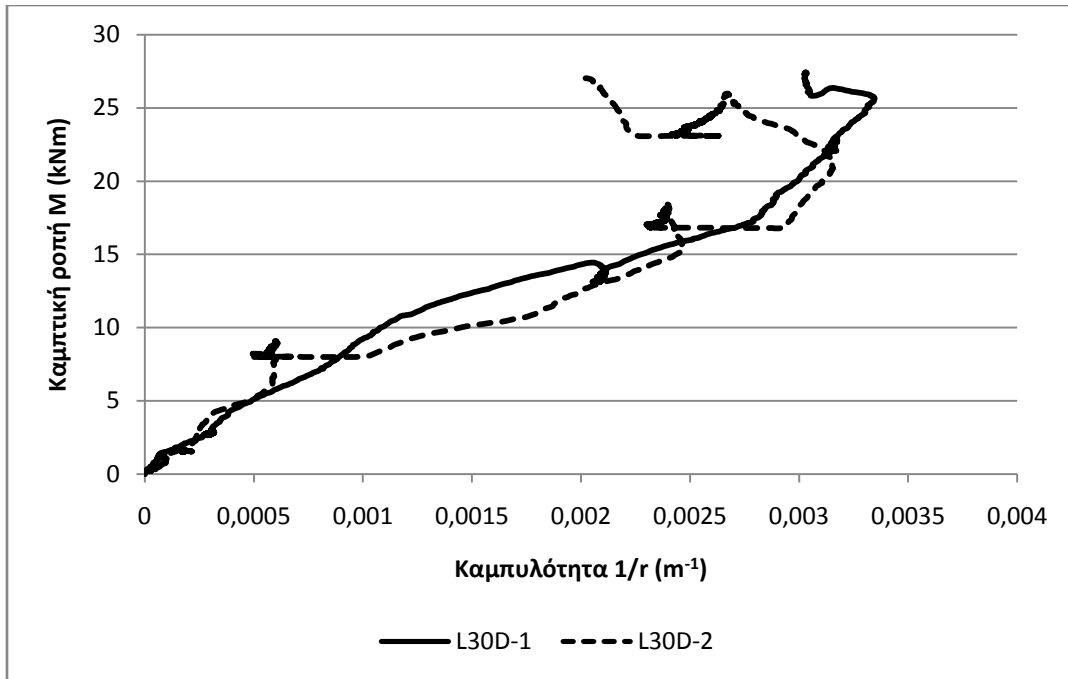
Τα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σε σύνολο τεσσάρων δοκιμίων, συνοψίζονται στα *Σχήματα 25, 26 και 27*, σε όρους αντιπροσωπευτικών διαγραμμάτων V-δ (σε kN-mm), καθώς και ενδεικτικά διαγράμματα M-1/ι (σε kNm-m<sup>-1</sup>).

Στα *Σχήματα 25, 26 και 27* παρουσιάζονται οι καμπύλες μονοτονικής απόκρισης όλων των δοκιμίων, μαζί με το αναμενόμενο μέγιστο φορτίο, βάσει της μηχανικής του ΟΣ, για εφελκόμενο διαμήκη οπλισμό 2Ø12 B500C, με μέση «ενεργή» τάση  $\sigma_{sm} \approx 1.0 f_y$  για τα δοκίμια L30D και  $\sigma_{sm} \approx 0.5 f_y$  για τα Δοκίμια L15D (βλ. Κεφάλαιο 5) και για εσωτερικό μοχλοβραχίονα  $z \approx 0,7h$ . Οι πειραματικές τιμές των μετατοπίσεων ( $\delta$ , στα σημεία επιβολής των δύο ίσων φορτίων P) και των περιορισμένων στροφών (στην περιοχή των ματισμάτων) προσεγγίζουν επαρκώς τις προβλέψεις, τόσο της θεωρητικής μηχανικής, όσο και των κανονιστικών διατάξεων του ΕΚ8 (3<sup>ο</sup> μέρος - 2005) και του ΚΑΝ.ΕΠΕ. (2012).

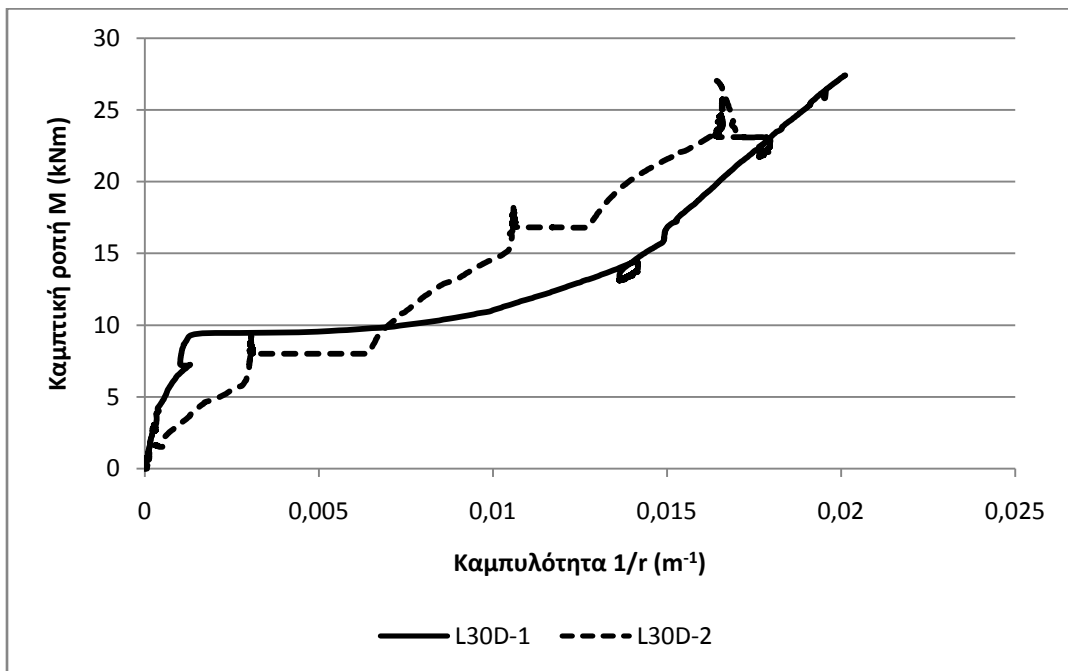


*Σχήμα 25: Διάγραμμα V-δ για τη φόρτιση των τεσσάρων δοκιμίων*





*Σχήμα 26: Διάγραμμα M-1/r στη θέση των ματισμάτων (L30D)*



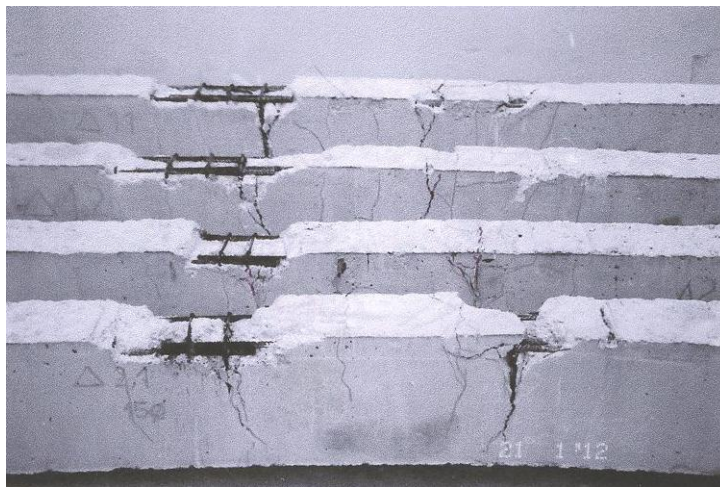
*Σχήμα 27: Διάγραμμα M-1/r στη μεσαία διατομή των δοκιμίων (L30D)*

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

### 5.1. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ

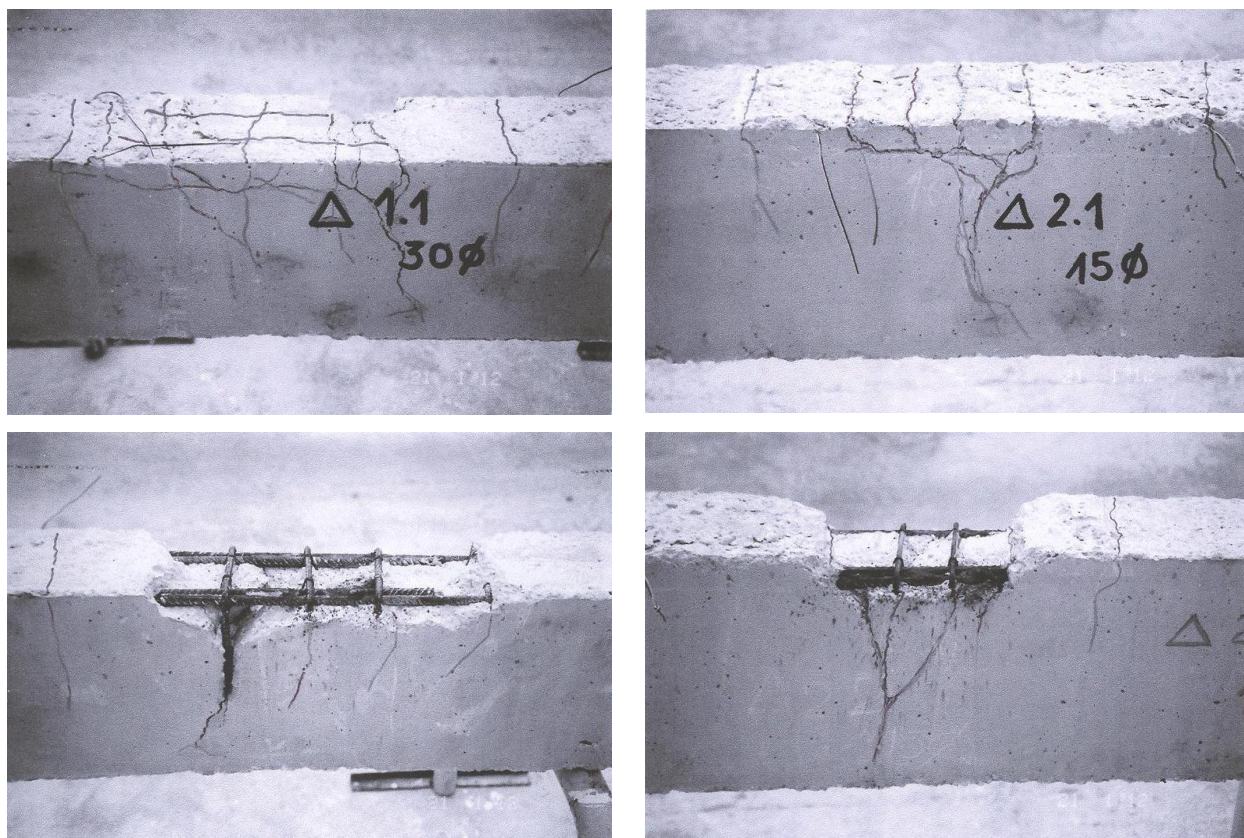
Με βάση τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας, και όσον αφορά στους μηχανισμούς αστοχίας των δοκιμίων, αξίζει να σημειωθούν τα ακόλουθα:

- Σε όλες τις δοκιμές, τα άκρα των ματισμάτων, προς την μεσαία περιοχή των δοκιμίων (με τη μεγαλύτερη ένταση), «προκάλεσαν» την εμφάνιση των πρώτων μεγάλων «κύριων» εγκάρσιων ρωγμών, στις περιοχές με τις μεγαλύτερες τάσεις συνάφειας (εικόνα 14). Οι ρωγμές αυτές προκάλεσαν με τη σειρά τους, ή ίσως ταυτόχρονα, την ανάπτυξη ρωγμών παράλληλων στις ματιζόμενες ράβδους (ρωγμές διάρρηξης, splitting cracks) και την αποφλοΐωση της διατομής (απώλεια της επικάλυψης σκυροδέματος, spalling of concrete), γενικώς διαφορετικής μορφής μεταξύ των δύο τύπων δοκιμίων. Τελικά, παρατηρήθηκε μία σύνθετη μορφή αστοχίας, ένα είδος «εξόλκευσης» των ράβδων λόγω της προγενέστερης «διάρρηξης» του περιβάλλοντος σκυροδέματος, αφήνοντας καθαρά ίχνη των νευρώσεων των ράβδων πάνω στο σκυρόδεμα.



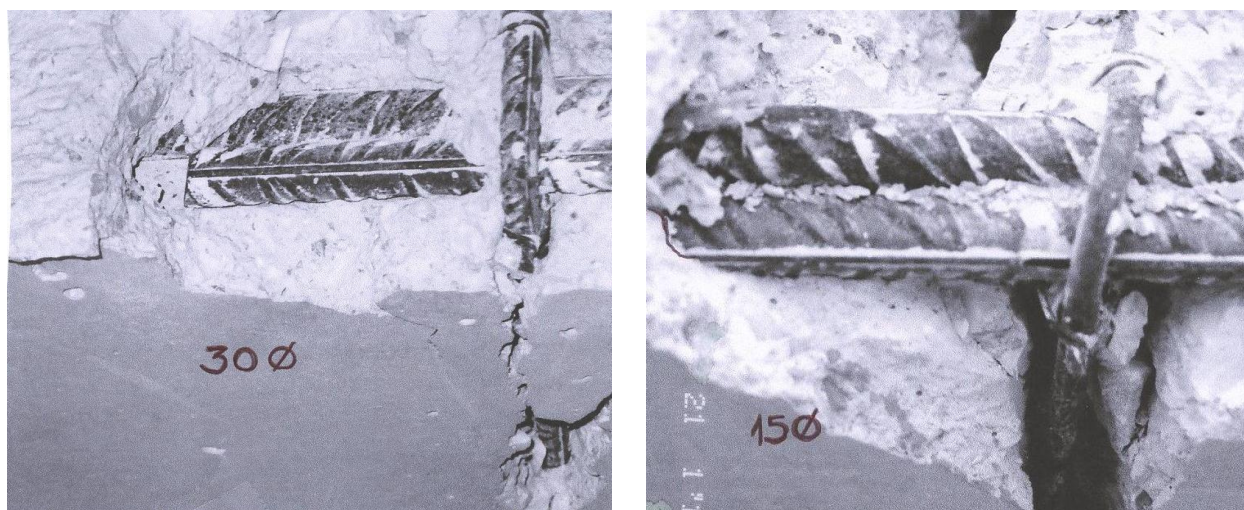
*Εικόνα 14: Κύριες εγκάρσιες ρωγμές στα άκρα των ματισμάτων και προς τις θέσεις επιβολής των φορτίων*

- Τα δοκίμια L30D (*εικόνα 15* αριστερά) αστόχησαν υπό τον πλήρη σχηματισμό διαμήκων ρωγμών διάρρηξης (και αποφλοιώσης του σκυροδέματος) και προς τις δύο πλευρές του δοκιμίου (εγκάρσια στην διατομή) καθώς και προς το πλέον εφελκόμενο πέλμα, ενώ τα δοκίμια L15D (*εικόνα 15* δεξιά) αστόχησαν υπό το μερικό σχηματισμό ρωγμών διάρρηξης μόνο προς τις δύο πλευρές του δοκιμίου (εγκάρσια στην διατομή). Επιπλέον, ο μηχανισμός αστοχίας των δοκιμίων L30D ήταν σχεδόν πανομοιότυπος και αρκετά πιο «σταθερός» από τον μηχανισμό αστοχίας των δοκιμίων L15D.



*Εικόνα 15: Μηχανισμοί αστοχίας δοκιμίων L30D (αριστερά) και L15D (δεξιά)*

- Σε όλα τα ματίσματα, οι ματιζόμενες ράβδοι ήταν σε πλήρη επαφή, με αλληλεμπλοκή των νευρώσεων των επαπτόμενων ράβδων, και «καλά» δεμένες μεταξύ τους με διπλό σύρμα. Έπειτα από λεπτομερή οπτικό έλεγχο των δοκιμίων, παρατηρήθηκε ότι η σχετική ολίσθηση των ματιζόμενων ράβδων και η προκαλούμενη απομάκρυνσή τους (διασταλτικότητα, dilatancy), λόγω της αλληλεμπλοκής των νευρώσεων, ενεργοποίησε τους καλά δεμένους συνδετήρες εντός του ματίσματος, αναγκάζοντας τους να προσφέρουν, επιπλέον, και ένα είδος «δράσης βλήτρου» (εικόνα 16). Αυτό το φαινόμενο ήταν πιο εμφανές στα δοκίμια L15D (με συνδετήρες Ø6/S220) από ότι στα δοκίμια L30D (με συνδετήρες Ø8/B500C).



Εικόνα 16: Ενεργοποίηση δεμένων συνδετήρων δοκιμίων L30D (αριστερά) και L15D (δεξιά)

## 5.2. ΕΓΚΑΡΣΙΟΣ ΟΠΛΙΣΜΟΣ

Όσον αφορά στον εγκάρσιο οπλισμό κατά μήκος του ματίσματος, και σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2, οι διαφορές μεταξύ των δύο τύπων δοκιμίων, βάσει του συντελεστή επιρροής της περίσφιξης λόγω εγκάρσιου οπλισμού  $\alpha_3(=1-K\cdot\lambda, \lambda=(\Sigma A_{st}-\Sigma A_{st,min})/A_s$  και  $0,7\leq\alpha_3\leq 1,0$ ) είναι πολύ μικρότερες, από εκείνες που προκύπτουν βάσει της διατομής των συνδετήρων ή της αναπτυσσόμενης δύναμης σε αυτούς (με την προϋπόθεση πως οι εγκάρσιοι οπλισμοί έχουν διαρρεύσει), όπως προκύπτει από τους παρακάτω υπολογισμούς :

		Δοκίμια L30D	Δοκίμια L15D
Μήκος ένωσης / Εγκάρσιοι Οπλισμοί		$\ell_o \approx 30\emptyset/3\emptyset 8$ εντός του $\ell_o$ , B500C (TEMPCORE)	$\ell_o \approx 15\emptyset/2\emptyset 6$ εντός του $\ell_o$ , S220 <sup>(1)</sup>
Εμβαδόν εγκάρσιου οπλισμού (δίτητοι συνδετήρες) <sup>(3)</sup>		$\Sigma A_{st} = 301,8 \text{ mm}^2 \approx 2,7\emptyset 12$	$\Sigma A_{st} = 113,2 \text{ mm}^2 \approx 1,0\emptyset 12$
Δύναμη εγκάρσιου οπλισμού (για πλήρη διαρροή)		$N_1 = \Sigma A_{st} \times 600 \text{ MPa} \approx 181\text{KN}$	$N_2 = \Sigma A_{st} \times 280 \text{ MPa} \approx 32\text{KN}$
Συντελεστής πυκνότητας $\lambda$ (EK2) <sup>(2) (3)</sup>	Αγκύρωση	$\Sigma A_{st}=3\pi 8^2/4=150,8\text{mm}^2$ , $A_s=\pi 12^2/4=113,1\text{mm}^2$ , $\Sigma A_{st,min}= A_s/4=28,3 \text{ mm}^2$ $\lambda_{L30D}=1,08$	$\Sigma A_{st}=2\pi 3^2/4=56,55\text{mm}^2$ , $A_s=\pi 12^2/4=113,1\text{mm}^2$ , $\Sigma A_{st,min}= A_s/4=28,3 \text{ mm}^2$ $\lambda_{L15D}=0,25$
	Μάτισμα	$\Sigma A_{st}=3\pi 8^2/4=150,8\text{mm}^2$ , $A_s=\pi 12^2/4=113,1\text{mm}^2$ , $\Sigma A_{st,min}= A_s=113,1 \text{ mm}^2$ $\lambda_{L30D}=0,33$	$\Sigma A_{st}=2\pi 3^2/4=56,55\text{mm}^2$ , $A_s=\pi 12^2/4=113,1\text{mm}^2$ , $\Sigma A_{st,min}= A_s=113,1\text{mm}^2$ $\lambda_{L15D}=0$
Συντελεστής επιρροής περίσφιξης $\alpha_3$ λόγω εγκάρσιου οπλισμού (EK2) <sup>(2) (3)</sup>	Αγκύρωση	$\alpha_{3,L30D}=1-0,1\cdot 1,08=0,892$	$\alpha_{3,L15D}=1-0,1\cdot 0,25=0,975$
	Μάτισμα	$\alpha_{3,L30D}=1-0,1\cdot 0,33=0,967$	$\alpha_{3,L15D}=1-0,1\cdot 0,0=1,0$

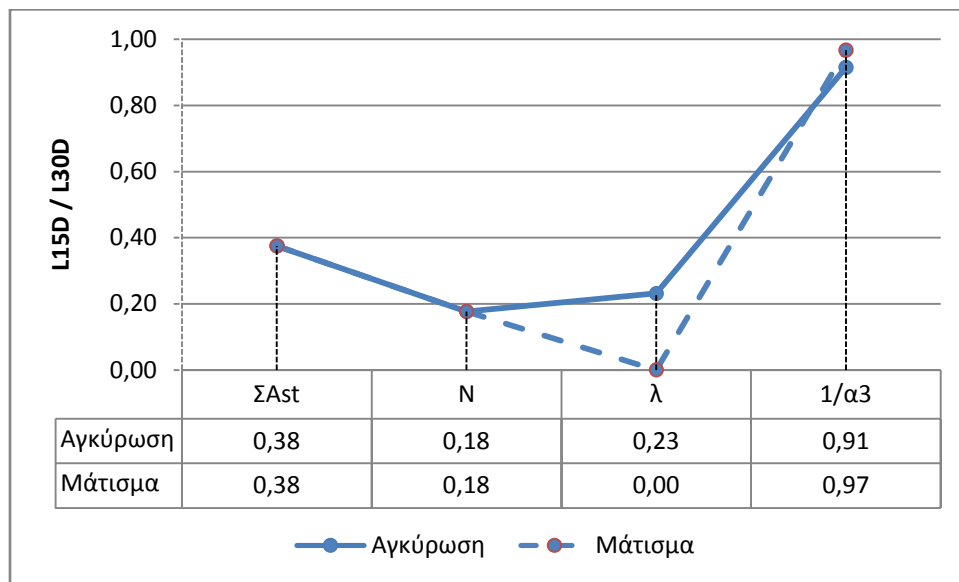
*Πίνακας 8: Επιρροή εγκάρσιου οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2*

Υπόμνημα Πίνακα:

(1) Πρακτικώς ακατάλληλοι χάλυβες για κατασκευές ΟΣ, παρά μόνον ως δευτερεύων οπλισμός (μη διαθέσιμοι πλέον στο εμπόριο).

(2) Ευρωκώδικας 2:  $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$ ,  $\alpha_3 = 1 - K \cdot \lambda$  και  $0,7 \leq \alpha_3 \leq 1,0$  (βλ. Ενότητα 4.4)

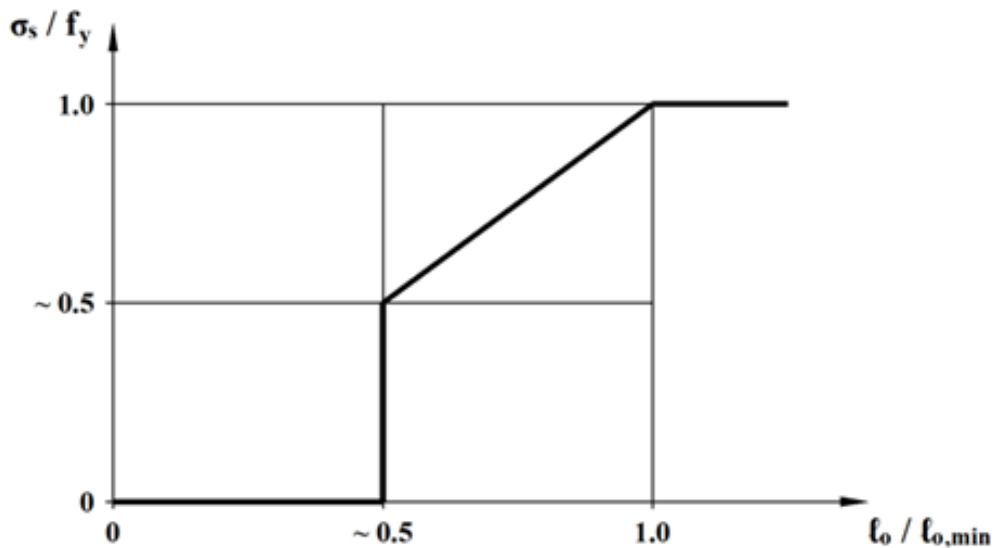
(3) Είναι εμφανές πως σύμφωνα με τον ΕΚ2, η διαφορά μεταξύ των δοκιμών L30D και L15D όσον αφορά στη συνεισφορά του εγκάρσιου οπλισμού, είναι πολύ μικρότερη σε όρους απαιτούμενου μήκους παράθεσης  $l_o$  (συντελεστής  $\alpha_3$ ), απ' ότι σε όρους εμβαδού ή δύναμης (συντελεστής πυκνότητας  $\lambda$ ).



Σχήμα 28: Επιρροή εγκάρσιου οπλισμού σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2

### 5.3. ΜΕΣΗ ΕΝΕΡΓΗ ΤΑΣΗ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ

Όσον αφορά στο πλέον ενδιαφέρον θέμα, αυτό της μέσης «ενεργής» τάσης  $\sigma_{sm} \leq f_y$ , των ματιζόμενων ράβδων, και σύμφωνα με τις σχετικές προβλέψεις των σύγχρονων Κανονισμών (για αποτίμηση και ανασχεδιασμό, ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012, Ευρωκώδικας 8 – Μέρος 3), η «ενεργή» τάση  $\sigma_s$  θα μπορούσε να βασίζεται στον λόγο  $l_o/l_{o,min}$ , με  $l_{o,min} \approx (1/3)\phi f_y/\sqrt{f_c}$ , μέσω μίας «ασυνεχούς» σχέσης (βλ. Ενότητα 3.2).



Σχήμα 29: Η προτεινόμενη από τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. σχέση μεταξύ  $\sigma_s$  και  $l_o$  για ματίσματα υπό μονοτονικές δράσεις

Σημειώνεται πως τα περιορισμένα αποτελέσματα αυτής της εργασίας προσεγγίζουν ικανοποιητικά τις σχετικές προβλέψεις των σύγχρονων Κανονισμών. Όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 25** (καμπύλες μονοτονικής απόκρισης, βλ. Ενότητα 4.5), και βάσει της μηχανικής του ΟΣ, για εφελκόμενο διαμήκη οπλισμό 2 $\phi$ 12 B500C και για εσωτερικό μοχλοβραχίονα  $z \approx 0,7h$ , η μέση «ενεργή» τάση  $\sigma_{sm}$  προκύπτει περίπου ίση με  $1.0 f_y$  για τα δοκίμια L30D και περίπου ίση με  $0.5 f_y$  για τα δοκίμια L15D.

#### 5.4. ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΙΣ–ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΡΟΠΗ M / ΤΕΜΝΟΥΣΑ ΔΥΝΑΜΗ V

Βάσει της *σχέσης 3.2.8*, υπολογίζεται η ροπή αστοχίας (ή διαρροής)  $M_y$ , η οποία είναι ανάλογη της αναπτυσσόμενης καμπυλότητας  $(1/r)_y$  της διατομής κατά τη διαρροή. Από τη *σχέση 3.2.10α*, είναι εμφανές ότι η καμπυλότητα  $(1/r)_y$  είναι με τη σειρά της ανάλογη της τάσης διαρροής των ράβδων οπλισμού ή της μέσης ενεργής τάσης για την περίπτωση ματιζόμενων ράβδων. Το μήκος παράθεσης καθορίζει τη μέση ενεργή τάση την οποία θα αναπτύξει ο εφελκόμενος οπλισμός στην περιοχή της ένωσης (βλ. Κεφάλαιο 3), δηλαδή η τάση «διαρροής» των ράβδων θα λαμβάνεται ίση με  $f_y$  επί τον λόγο του διατιθέμενου  $l_o$  προς ένα ελάχιστο  $l_{o,min}$  μήκος παράθεσης, όπου το  $l_{o,min}$  υπολογίζεται από τη *σχέση 3.2.7*:

Ελάχιστο μήκος παράθεσης  $l_{o,min} \approx 39,4\text{cm}$  για όλα τα δοκίμια

Τα δοκίμια L30D έχουν μήκος παράθεσης  $30\phi = 36\text{cm} \approx 0,91 l_{o,min}$

Τα δοκίμια L15D έχουν μήκος παράθεσης  $15\phi = 18\text{cm} \approx 0,46 l_{o,min}$

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα παραπάνω, οι *σχέσεις 3.2.8 και 3.2.10α*, δίνουν την τιμή της αναμενόμενης καμπτικής αντοχής  $M_y$ , βάσει της γεωμετρίας και των λεπτομερειών όπλισης των δοκιμίων, των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών και του μήκους παράθεσης των ράβδων οπλισμού. Στο *σχήμα 30*, το διάγραμμα δείχνει τη σχέση της αναμενόμενης καμπτικής αντοχής  $M_y$ , συναρτήσει του λόγου  $l_o/l_{o,min}$ .

Σημείωση: Σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ. (βλ. Κεφάλαιο 3) για μήκη παράθεσης  $l_o < 0,5l_{o,min}$ , δεν μπορεί (γενικώς) να επιτευχθεί ένωση με υπερκάλυψη άκρων ράβδων οπλισμού (στα δοκίμια L15D, το μήκος παράθεσης είναι μικρότερο του  $0,5l_{o,min}$ ). Είναι σαφές, πως ο περιορισμός αυτός είναι ένα συντηρητικό κατώτατο όριο για την αξιόπιστη αποτίμηση υφιστάμενων στοιχείων και τον ασφαλή σχεδιασμό των επεμβάσεων, και δεν αναφέρεται στην πραγματική απόκριση δομικών στοιχείων με πολύ μικρά μήκη παράθεσης.

Αναμενόμενη καμπτική αντοχή (ροπή «διαρροής»)  $M_y$ :

L30D:  $M_y \approx 29,7\text{kNm}$

L15D:  $M_y \approx 15,0\text{kNm}$



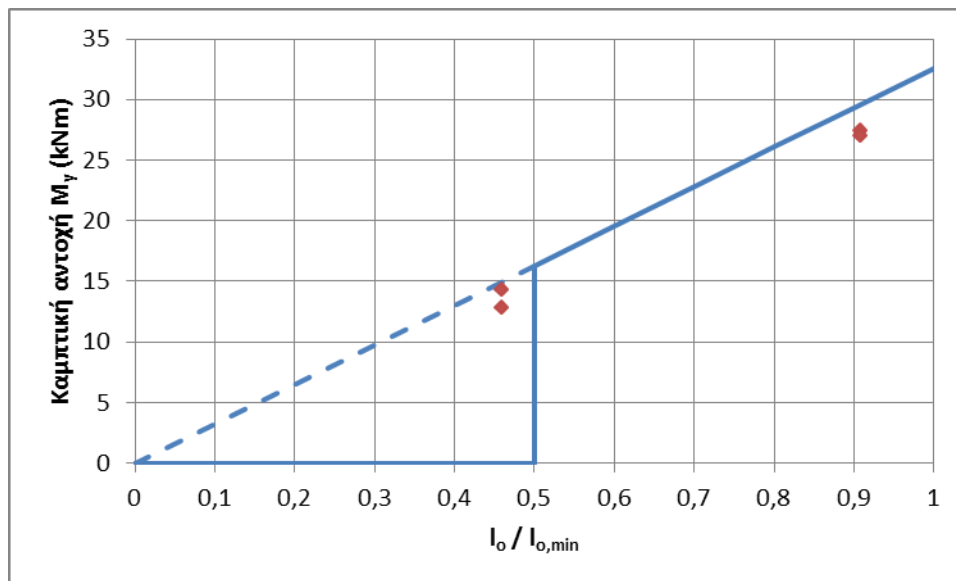
Αναμενόμενη τέμνουσα δύναμη  $V_{My}$  (για ροπή «διαρροής»  $M_y$ ) :

L30D:  $V = M_y/L_s = 29,7\text{kNm}/0,785 \text{ m} \rightarrow V \approx 37,8 \text{ kN}$

L15D:  $V = M_y/L_s = 15,0\text{kNm}/0,785 \text{ m} \rightarrow V \approx 19,1 \text{ kN}$

Δοκίμιο	L30D1	L30D2	L15D1	L15D2
Τέμνουσα (kN)	34,92	34,42	16,28	18,29
Μετακίνηση (mm)	4,95	5,46	2,18	2,47
Ροπή (kNm)	27,41	27,02	12,78	14,36
Στροφή (rad)	0,0063	0,0070	0,0028	0,0032

*Πίνακας 9: Πειραματικές τιμές αντίστασης και παραμόρφωσης*



*Σχήμα 30: Επιρροή του  $l_0/l_{0,min}$  στην καμπτική αντοχή διαρροής  $M_y$*

## 5.5. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ–ΣΤΡΟΦΗ ΧΟΡΔΗΣ $\theta$ / ΜΕΤΑΚΙΝΗΣΗ $\delta$

Βάσει της *σχέσης 3.2.9*, υπολογίζεται η γωνία στροφής χορδής διαρροής  $\theta_y$ , αθροίζοντας τη συμβολή των καμπτικών, των διατμητικών αλλά και των παραμορφώσεων λόγω της εξόλκευσης των οπλισμών (1<sup>ος</sup>, 2<sup>ος</sup> και 3<sup>ος</sup> όρος της *σχέσης 3.2.9*, αντίστοιχα). Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, η ένωση ράβδων επηρεάζει τον 2<sup>ο</sup> και τον 3<sup>ο</sup> όρο του αθροίσματος (έμμεσα ή άμεσα αντίστοιχα) συναρτήσει του μήκους παράθεσης  $l_0$  προς το ελάχιστο μήκος παράθεσης  $l_{0,min}$ , όπως αυτό υπολογίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο.

Σημείωση: Όπως έχει ήδη αναφερθεί (βλ. Σημείωση Ενότητας 5.4), για μήκη παράθεσης  $l_0 < 0,5l_{0,min}$ , δεν μπορεί (γενικώς) να επιτευχθεί ένωση με υπερκάλυψη άκρων ράβδων οπλισμού. Παρ'όλο που στα δοκίμια L15D το μήκος παράθεσης είναι μικρότερο του  $0,5l_{0,min}$ , θα υπολογιστεί η αναμενόμενη  $\theta_y$ , καθώς το μήκος παράθεσης στα δοκίμια L15D βρίσκεται πολύ κοντά στο επιτρεπτό όριο ( $0,46 l_{0,min}$ ).

Αναμενόμενη διαθέσιμη γωνία στροφής χορδής «διαρροής»  $\theta \leq \theta_y$  (για  $l_0 < l_{0,min}$ ,  $\theta_y \approx 9,7 \times 10^{-3}$  rad για την περίπτωση συνεχούς εφελκόμενου οπλισμού ή επαρκούς μήκους παράθεσης):

$$L30D: \quad \theta \approx 8,66 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

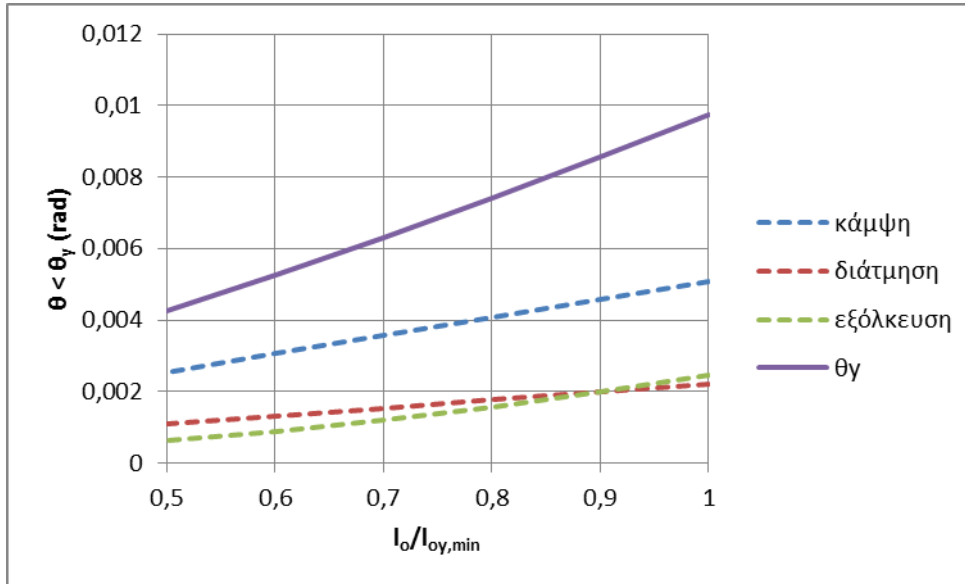
$$L15D: \quad \theta \approx 3,87 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

Από τις παραπάνω τιμές της  $\theta$ , προκύπτουν και οι τιμές της μετακίνησης  $\delta$ :

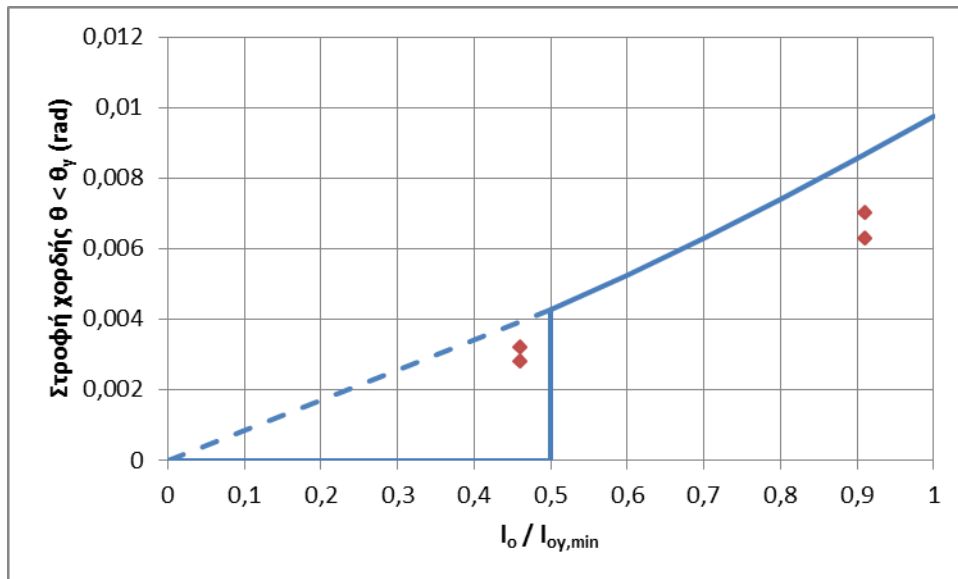
$$L30D: \quad \delta = \theta L_s \rightarrow \delta \approx 6,8 \text{ mm}$$

$$L15D: \quad \delta = \theta L_s \rightarrow \delta \approx 3,0 \text{ mm}$$

Στα *σχήματα 31 και 32*, φαίνεται η σχέση μεταξύ της διαθέσιμης γωνίας στροφής χορδής  $\theta$  και του λόγου  $l_0/l_{0,min}$ , για τη δεδομένη γεωμετρία και τις λεπτομέρειες όπλισης των δοκιμίων και των μηχανικών χαρακτηριστικών των υλικών, μέχρι τη «διαρροή» των στοιχείων.



*Σχήμα 31: Επιρροή του  $l_o/l_{oy,min}$  στη γωνία στροφής χορδής διαρροής  $\theta_y$*



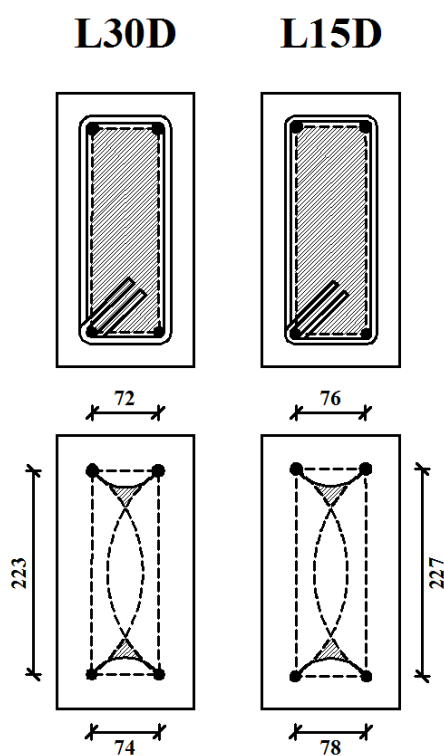
*Σχήμα 32: Επιρροή του  $l_o/l_{oy,min}$  στη γωνία στροφής χορδής διαρροής  $\theta_y$*

Η *σχέση 3.2.20* δίνει το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος παράθεσης  $l_{ou,min}$  για την πλήρη ανάπτυξη των παραμορφώσεων αστοχίας υπό κάμψη:

L30D:  $l_{ou,min} \approx 95,2\text{cm} \rightarrow l_0/l_{ou,min} \approx 0,38$

L15D:  $l_{ou,min} \approx 103,1\text{cm} \rightarrow l_0/l_{ou,min} \approx 0,18$

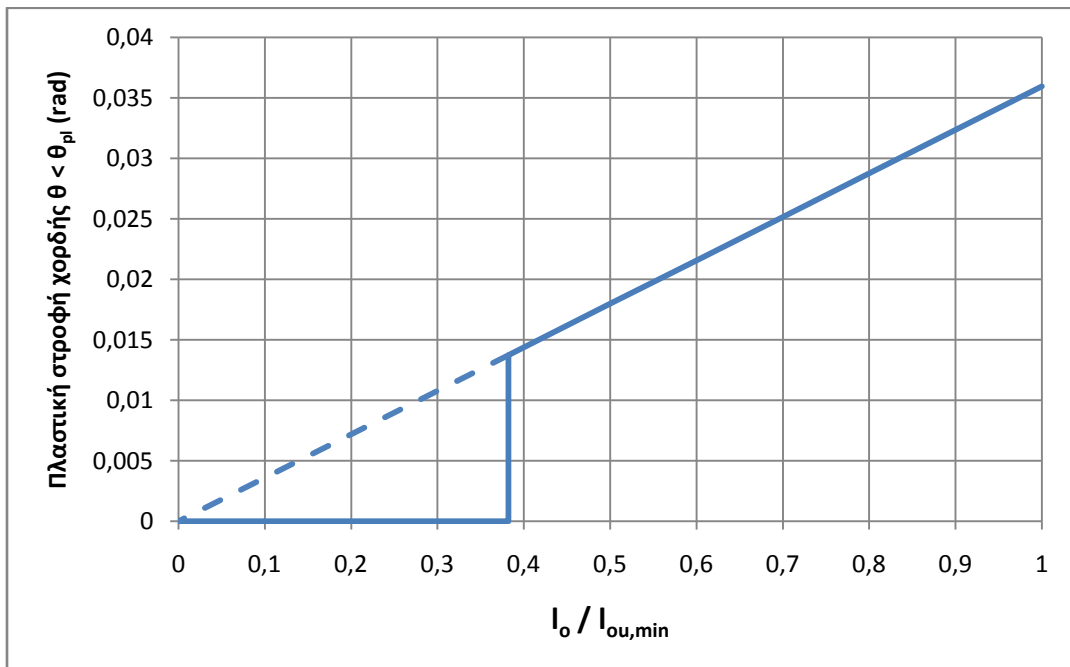
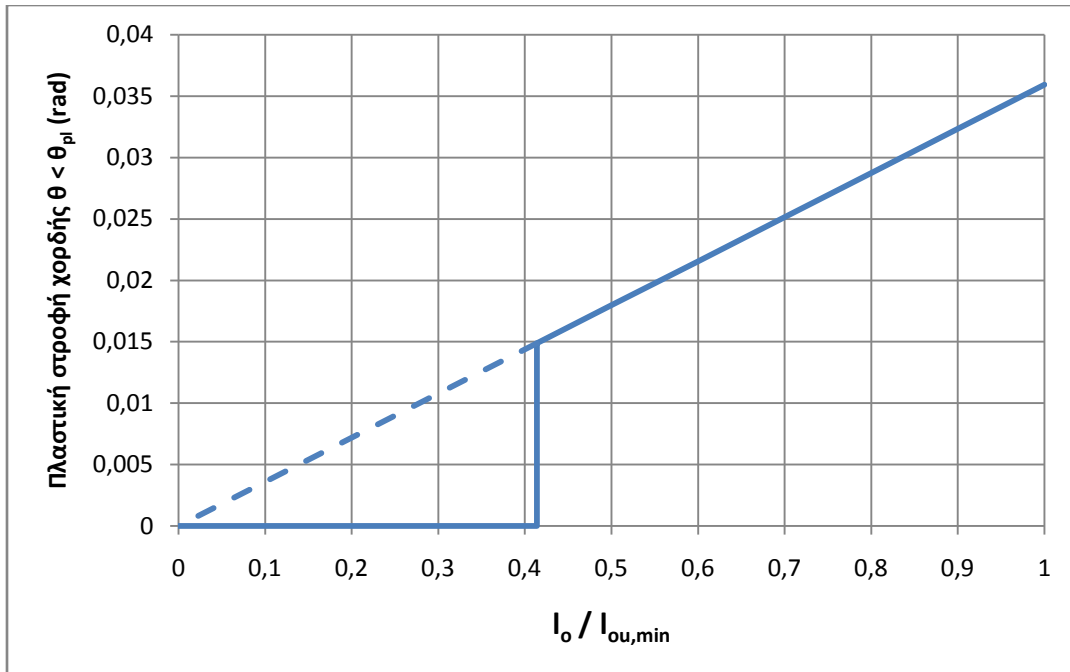
Σημείωση: Αξίζει να αναφέρουμε, πως για τη δεδομένη γεωμετρία του δοκιμίου και τη διάταξη των συνδετήρων, ο συντελεστής αποδοτικότητας της περισφιγξης  $\alpha$ , λαμβάνει πρακτικά μηδενική τιμή (δεν υπάρχει πυρήνας περισφιγμένου σκυροδέματος στη διατομή).



*Σχήμα 33: Αποδοτικότητα περισφιγξης*

*(δεν υπάρχει πυρήνας περισφιγμένου σκυροδέματος, οι παραβολές τέμνονται)*

Η τιμή της μέσης διαθέσιμης πλαστικής γωνίας στροφής χορδής  $\theta_{um,pl}$  δίνεται από τη *σχέση 3.2.19*, όπως φαίνεται και στο *σχήμα 34*, σε σχέση με το λόγο του διαθέσιμου μήκους παράθεσης  $l_0$  προς το ελάχιστο απαιτούμενο μήκος παράθεσης  $l_{ou,min}$  για την πλήρη ανάπτυξη των παραμορφώσεων αστοχίας υπό κάμψη.



Σχήμα 34: Επιρροή του  $l_o/l_{ou,min}$  στη διαθέσιμη πλαστική γωνία στροφής χορδής  $\theta_{pl}$  για τα δοκίμια L30D (πάνω) και L15D (κάτω)

Καθώς και στις δύο περιπτώσεις, τα μήκη παράθεσης είναι μικρότερα του ελάχιστου μήκους παράθεσης  $l_{o,min}$  (για την πλήρη ανάπτυξη της τάσης διαρροής των εφελκόμενων οπλισμών, σύμφωνα με τον ΚΑΝ.ΕΠΕ), τα στοιχεία δεν αναμένεται να εμφανίσουν σημαντική πλαστική γωνία στροφής χορδής  $\theta_{pl}$ . Όμως, για τις ανάγκες της παρούσης εργασίας, θα αγνοήσουμε αυτήν την σύσταση και θα υπολογίσουμε τις τιμές της  $\theta_{pl}$  για τους δύο τύπους δοκιμών

$$\text{L30D: } \theta_{pl} \approx 13,59 \times 10^{-3} \text{ rad} \rightarrow \delta_{pl} = \theta_{pl} L_s \rightarrow \delta_{pl} \approx 10,67 \text{ mm}$$

$$\text{L15D: } \theta_{pl} \approx 6,27 \times 10^{-3} \text{ rad} \rightarrow \delta_{pl} = \theta_{pl} L_s \rightarrow \delta_{pl} \approx 4,92 \text{ mm}$$

Έχοντας υπολογίσει πλέον τις αναμενόμενες παραμορφώσεις για τους δύο τύπους δοκιμών, μπορεί να υπολογιστεί η διαθέσιμη παραμόρφωση ως άθροισμα της τιμής της στη «διαρροή» του στοιχείου και του πλαστικού τμήματός της, τόσο σε όρους γωνίας στροφής χορδής  $\theta$ , όσο και μετακίνησης  $\delta$ .

$$\text{L30D: } \theta + \theta_{pl} \approx 8,66 \times 10^{-3} \text{ rad} + 13,59 \times 10^{-3} \text{ rad} \approx 22,25 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\delta + \delta_{pl} \approx 6,8 \text{ mm} + 10,67 \text{ mm} \approx 17,47 \text{ mm}$$

$$\text{L15D: } \theta + \theta_{pl} \approx 3,87 \times 10^{-3} \text{ rad} + 6,27 \times 10^{-3} \text{ rad} \approx 10,14 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$\delta + \delta_{pl} \approx 3,0 \text{ mm} + 4,92 \text{ mm} \approx 7,92 \text{ mm}$$

Από τα παραπάνω μπορεί να εκτιμηθεί η αναμενόμενη πλαστιμότητα των δοκιμών.

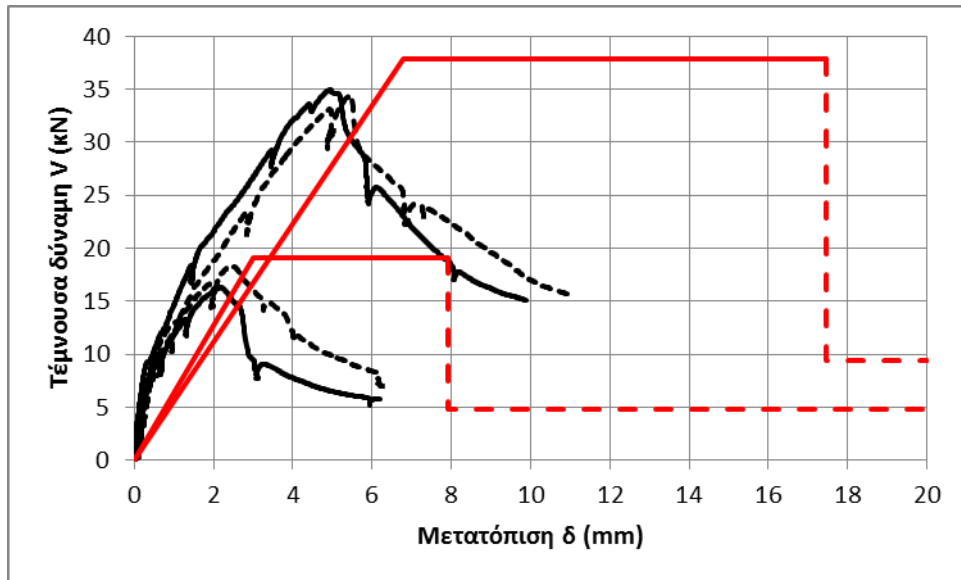
$$\text{L30D: } \mu_{\delta} = \mu_{\theta} = (\theta + \theta_{pl}) / \theta_y \approx 22,25 \times 10^{-3} \text{ rad} / 8,66 \times 10^{-3} \text{ rad} \approx 2,6$$

$$\text{L15D: } \mu_{\delta} = \mu_{\theta} = (\theta + \theta_{pl}) / \theta_y \approx 10,14 \times 10^{-3} \text{ rad} / 3,87 \times 10^{-3} \text{ rad} \approx 2,6$$

Δοκίμιο	L30D1	L30D2	L15D1	L15D2
Τέμνουσα (kN)	34,92	34,42	16,28	18,29
Μετακίνηση (mm)	4,95	5,46	2,18	2,47
Ροπή (kNm)	27,41	27,02	12,78	14,36
Στροφή (rad)	0,0063	0,0070	0,0028	0,0032

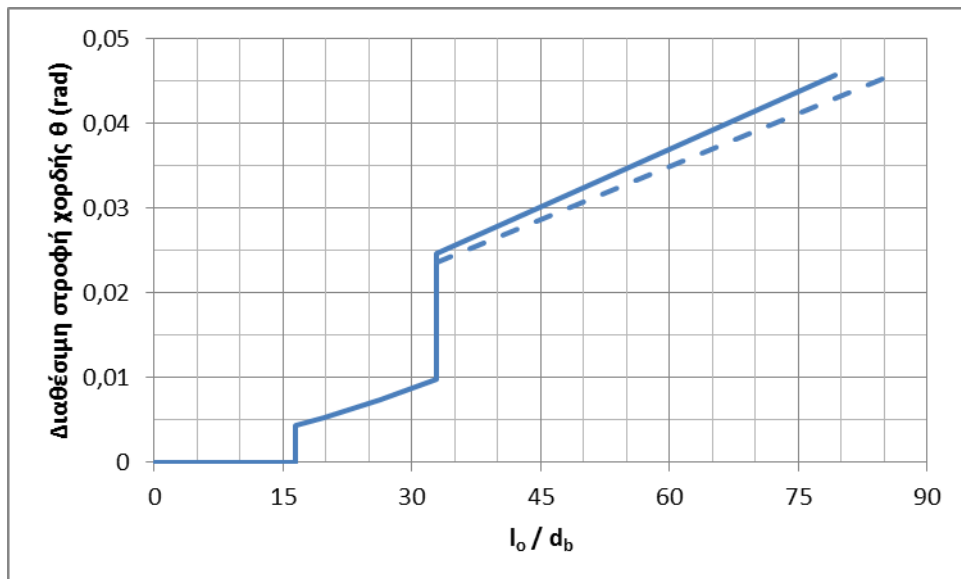
*Πίνακας 10: Πειραματικές τιμές αντίστασης και παραμόρφωσης*

Παρατίθενται οι καμπύλες απόκρισης και το σκελετικό διάγραμμα των δοκιμίων. Οι εκτιμήσεις προσεγγίζουν (σε τάξη μεγέθους) τα πειραματικά αποτελέσματα για τη μετατόπιση  $\delta$  που αναπτύχθηκε.



*Σχήμα 35: Καμπύλες απόκρισης και σκελετικό διάγραμμα (με κόκκινο) των δοκιμίων*

Τελικώς, η διαθέσιμη γωνία στροφής χορδής, συναρτήσει του λόγου  $l_0/d_b$  των δοκιμίων L30D και L15D, προκύπτει από το άθροισμα των ανωτέρω *διαγραμμάτων 32 και 34*, ως εξής :



*Σχήμα 36: Επιρροή του μήκους παράθεσης στη διαθέσιμη γωνία στροφής χορδής για τα δοκίμια τύπου L30D (συνεχής γραμμή) και L15D (διακεκομμένη γραμμή)*

# **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ**



## ΣΥΜΒΟΛΑ

### Λατινικά Κεφαλαία

$A_s$	εμβαδόν ράβδου οπλισμού χάλυβα
$A_{s1}$	εμβαδόν εφελκυσμένης ράβδου οπλισμού χάλυβα
$A_{s2}$	εμβαδόν θλιβόμενης ράβδου οπλισμού χάλυβα
$A_{s,prov}$	εμβαδόν υπάρχουσας διατομής οπλισμού
$A_{s,req}$	εμβαδόν της κατά τους υπολογισμούς θεωρητικά απαιτούμενης διατομής οπλισμού
$A_{st}$	εμβαδόν εγκάρσιου οπλισμού
$A_{st,min}$	ελάχιστο εμβαδόν εγκάρσιου οπλισμού
$E_c$	μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος
$E_s$	μέτρο ελαστικότητας του χάλυβα
$F$	εντατικό μέγεθος
$F_{res}$	απομένουσα αντίσταση
$F_s$	δύναμη ράβδων οπλισμού χάλυβα
$F_u$	εντατικό μέγεθος αστοχίας
$F_y$	εντατικό μέγεθος διαρροής
$K$	ελαστική δυσκαμψία
$L_s$	μήκος διάτμησης
$M$	ροπή
$M_y$	ροπή διαρροής
$M_u$	ροπή αστοχίας
$M_{Vu}$	ροπή τη στιγμή της διατμητικής αστοχίας
$N$	αξονικό φορτίο
$P$	συγκεντρωμένο φορτίο
$V$	τέμνουσα δύναμη
$V_{Mu}$	τέμνουσα δύναμη τη στιγμή της καμπτικής αστοχίας
$V_{My}$	τέμνουσα δύναμη τη στιγμή της καμπτικής διαρροής
$V_R$	τέμνουσα αντοχής
$V_{R1}$	τέμνουσα δύναμη που προκαλεί λοξή ρηγμάτωση του στοιχείου
$V_u$	τέμνουσα δύναμη αστοχίας

## Λατινικά Πεζά

$1/r$	καμπυλότητα
$(1/r)_{cu}$	καμπυλότητα αστοχίας λόγω θραύσης θλιβόμενου σκυροδέματος
$(1/r)_{su}$	καμπυλότητα αστοχίας λόγω θραύσης εφελκυσμένου χάλυβα
$(1/r)_y$	καμπυλότητα διαρροής
$a$	απόσταση μεταξύ γειτονικών υπερκαλύψεων
$a_v$	συντελεστής που καθορίζεται αναλόγως, στην περίπτωση που η καμπτική διαρροή του στοιχείου προηγείται της διατμητικής ρηγμάτωσης ή το αντίστροφο
$b$	πλάτος στοιχείου
$b_c$	πλάτος πυρήνα περισφιγξης
$b_i$	αποστάσεις μεταξύ διαμήκων ράβδων που συγκρατούνται από συνδετήρα ή άγκιστρο σιμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου
$c$	επικάλυψη σκυροδέματος
$c_1$	επικάλυψη κατακόρυφης παρειάς στοιχείου
$c_d$	επικάλυψη σχεδιασμού
$d$	στατικό ύψος στοιχείου
$d_1$	απόσταση από το κέντρο του εφελκυσμένου οπλισμού μέχρι την ακραία εφελκυσμένη ίνα σκυροδέματος
$d_2=d'$	απόσταση από το κέντρο του θλιβόμενου οπλισμού μέχρι την ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος
$d_b$	διάμετρος οπλισμού
$f_{bd}$	οριακή τάση συνάφειας σχεδιασμού
$f_{cd}$	θλιπτική αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος
$f_c$	θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
$f_{ck}$	χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
$f_{ck,c}$	χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή περισφιγμένου σκυροδέματος
$f_{cm}$	μέση θλιπτική αντοχή σκυροδέματος
$f_{ctd}$	εφελκυστική αντοχή σχεδιασμού σκυροδέματος
$f_{ctk,0,05}$	χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
$f_{ctm}$	μέση εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
$f_{ctm,fl}$	μέση καμπτική εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος
$f_{su}$	μέγιστη εφελκυστική αντοχή χάλυβα
$f_y=f_{sy}$	εφελκυστική αντοχή διαρροής χάλυβα

$f_{yk}$	χαρακτηριστική εφελκυστική αντοχή διαρροής χάλυβα
$f_{yw}$	τάση διαρροής εγκάρσιου οπλισμού
$f_{yd}$	τάση διαρροής σχεδιασμού χάλυβα
$h$	ύψος διατομής στοιχείου
$h_c$	ύψος πυρήνα περισφιγξης
$l_0$	μήκος υπερκάλυψης
$l_{0,min}$	ελάχιστο μήκος υπερκάλυψης
$l_b$	βασικό μήκος αγκύρωσης
$l_{b,min}$	ελάχιστο μήκος αγκύρωσης
$l_{b,req}$	απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης
$l_{bd}$	βασικό μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού
$l_s$	απόσταση μεταξύ των στηρίξεων
$n$	συντελεστής που ορίζει τη δρώσα αντοχή
$n_{restr}$	συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στην περίμετρο της διατομής με παράθεση άκρων που συγκρατούνται σε γωνία συνδετήρα ή από άγκιστρο σιγμοειδούς εγκάρσιου συνδέσμου
$n_{tot}$	συνολικός αριθμός διαμήκων ράβδων στην περίμετρο της διατομής με παράθεση άκρων
$p$	εγκάρσια πίεση στην κατάσταση αστοχίας κατά μήκος του $l_{bd}$
$s_h$	απόσταση συνδετήρων
$s_w$	απόσταση των εγκάρσιων ράβδων στο τμήμα αγκύρωσης
$z$	μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων

### Ελληνικά Κεφαλαία

A	συντελεστής που καθορίζεται στην περίπτωση που η διαρροή οφείλεται στον εφελκυσμένο οπλισμό ή στο θλιβόμενο σκυρόδεμα
B	συντελεστής που καθορίζεται στην περίπτωση που η διαρροή οφείλεται στον εφελκυσμένο οπλισμό ή στο θλιβόμενο σκυρόδεμα
K	συντελεστής που υπολογίζεται από τη διάταξη μη συγκολλημένου εγκάρσιου οπλισμού
$\Phi = \emptyset$	διάμετρος διαμήκους οπλισμού
$\Phi_w = \emptyset_w$	διάμετρος εγκάρσιου οπλισμού

## Ελληνικά Πεζά

$\alpha$	συντελεστής αποδοτικότητας περίσφιγξης
$\alpha$	λόγος μέτρων ελαστικότητας χάλυβα-σκυροδέματος
$\alpha_1$	συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της μορφής των ράβδων
$\alpha_2$	συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της ελάχιστης επικάλυψης
$\alpha_3$	συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της περίσφιγξης μέσω εγκάρσιου οπλισμού
$\alpha_4$	συντελεστής που σχετίζεται με την επίδραση μίας ή περισσότερων συγκολλημένων εγκάρσιων ράβδων
$\alpha_5$	συντελεστής που σχετίζεται με την επιρροή της πίεσης εγκάρσια στο επίπεδο της διάρρηξης
$\alpha_6$	συντελεστής που σχετίζεται με το ποσοστό των υπό ένωση ράβδων
$\alpha_s$	μήκος διάτμησης
$\gamma$	γωνιακή παραμόρφωση
$\gamma_c$	συντελεστής ασφαλείας για το σκυρόδεμα
$\delta$	παραμόρφωση
$\delta$	σχετική μετακίνηση
$\delta_u$	παραμόρφωση αστοχίας
$\delta_{u,pl}$	πλαστικό τμήμα παραμόρφωσης αστοχίας
$\delta_{um,pl}$	μέση τιμή πλαστικού τμήματος παραμόρφωσης αστοχίας
$\delta_y$	παραμόρφωση διαρροής
$\epsilon_c$	ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος
$\epsilon_{c2}$	ανηγμένη παραμόρφωση σκυροδέματος στη μέγιστη αντοχή
$\epsilon_{c2,c}$	ανηγμένη παραμόρφωση περισφιγμένου σκυροδέματος στη μέγιστη αντοχή
$\epsilon_{cu}$	βράχυνση αστοχίας ακραίας θλιβόμενης ίνας σκυροδέματος
$\epsilon_{cu2}$	ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας σκυροδέματος
$\epsilon_{cu2,c}$	ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας περισφιγμένου σκυροδέματος
$\epsilon_s$	ανηγμένη παραμόρφωση χάλυβα
$\epsilon_{su}$	ανηγμένη παραμόρφωση αστοχίας εφελκυόμενου χάλυβα
$\epsilon_{sy}$	ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής εφελκυόμενου χάλυβα
$\eta_1$	συντελεστής που σχετίζεται με την ποιότητα των συνθηκών συνάφειας
$\eta_2$	συντελεστής που σχετίζεται με τη διάμετρο των ράβδων
$\theta$	γωνία στροφής χορδής στοιχείου

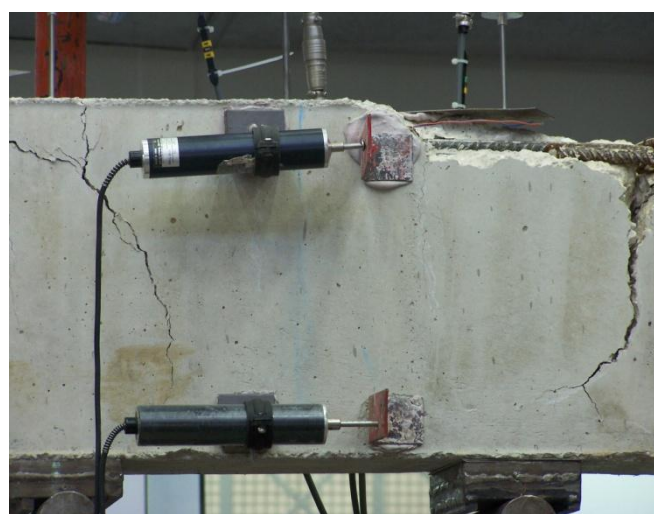
$\theta_{pl,d}$	διαθέσιμη γωνία πλαστικής στροφής σχεδιασμού στοιχείου
$\theta_u$	διαθέσιμη συνολική γωνία στροφής στοιχείου
$\theta_{u,pl}$	διαθέσιμη γωνία πλαστικής στροφής στοιχείου
$\theta_{um,pl}$	μέση τιμή πλαστικού τμήματος γωνίας στροφής χορδής στοιχείου
$\theta_{um}$	μέση διαθέσιμη γωνία στροφής στοιχείου
$\theta_y$	γωνία στροφής χορδής στοιχείου στη διαρροή
$\lambda$	συντελεστής που υπολογίζεται από το εμβαδόν μη συγκολλητού εγκάρσιου οπλισμού
$\lambda$	ενεργό ύψος της θλιβόμενης ζώνης
$\mu$	δείκτης πλαστιμότητας
$\mu_{1/r}$	δείκτης πλαστιμότητας σε όρους καμπυλοτήτων
$\mu_\delta$	δείκτης πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων
$\mu_{\delta u}$	δείκτης διαθέσιμης πλαστιμότητας σε όρους μετακινήσεων
$\mu_\theta$	δείκτης πλαστιμότητας σε όρους γωνίας στροφής χορδής στοιχείου
$\nu$	ανηγμένο αξονικό φορτίο
$\xi_{cu}$	ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία του σκυροδέματος
$\xi_{su}$	ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης στην αστοχία του χάλυβα
$\xi_y$	ανηγμένο ύψος θλιβόμενης ζώνης στη διαρροή
$\rho$	ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού
$\rho'$	ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού
$\rho_1$	ποσοστό των υπό ένωση ράβδων
$\rho_d$	γεωμετρικό ποσοστό δισδιαγώνιου οπλισμού
$\rho_s$	γεωμετρικό ποσοστό εγκάρσιου οπλισμού παράλληλα στη διεύθυνση της φόρτισης
$\rho_v$	ποσοστό κατανεμημένου οπλισμού
$\sigma_2 = \sigma_3$	δρώσα ακτινική θλιπτική τάση σκυροδέματος στην οριακή κατάσταση αστοχίας
$\sigma_c$	τάση του θλιβόμενου σκυροδέματος
$\sigma_s$	ενεργή τάση χάλυβα
$\sigma_{sm}$	μέση ενεργή τάση χάλυβα
$\sigma_{sd}$	τάση σχεδιασμού χάλυβα
$\omega$	μηχανικό ποσοστό εφελκυόμενου οπλισμού
$\omega'$	μηχανικό ποσοστό θλιβόμενου οπλισμού
$\omega_w$	μηχανικό ογκομετρικό ποσοστό οπλισμού περίσφιξης

## ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

### ΔΟΚΙΜΙΑ L30D



*Εικόνα 17: Δοκίμιο τύπου L30D αμέσως μετά την αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση*

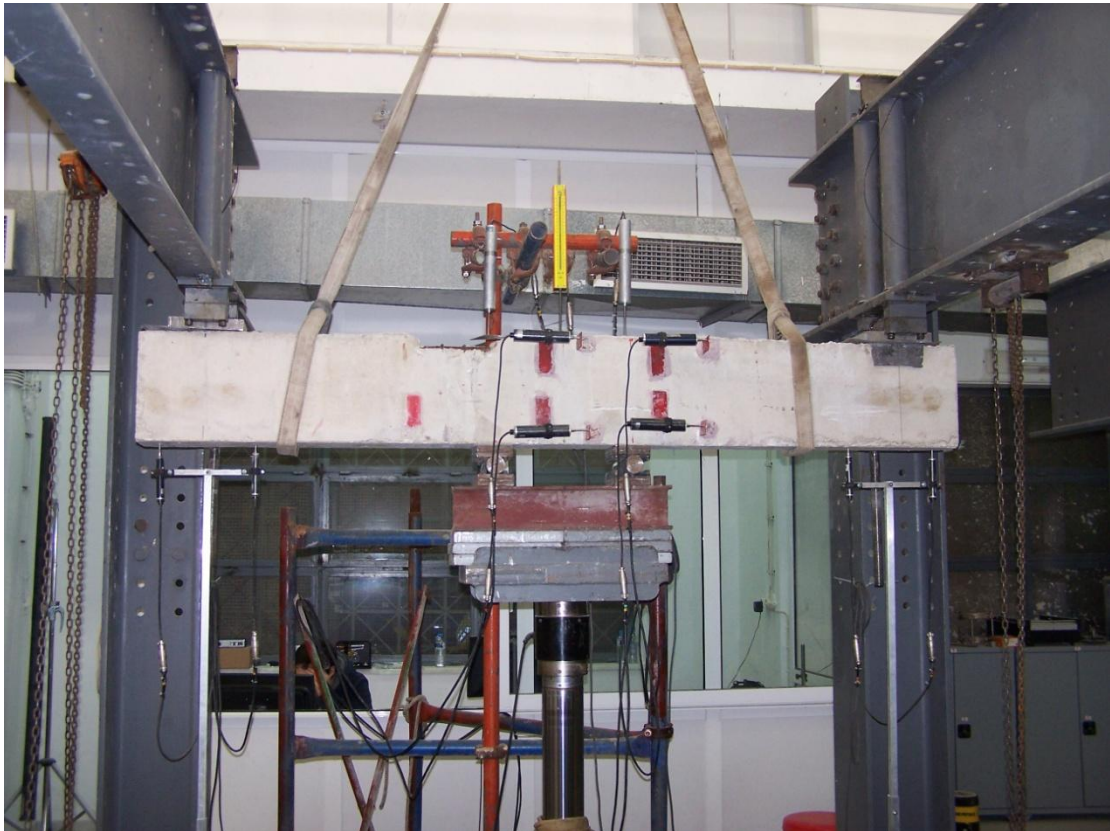


*Εικόνα 18: Λεπτομέρεια αστοχίας ματίσματος στα δοκίμια L30D1 και L30D2 αντίστοιχα.  
Στη δεξιά εικόνα διακρίνεται εγκάρσια καμπτική ρωγμή στη μεσαία διατομή*

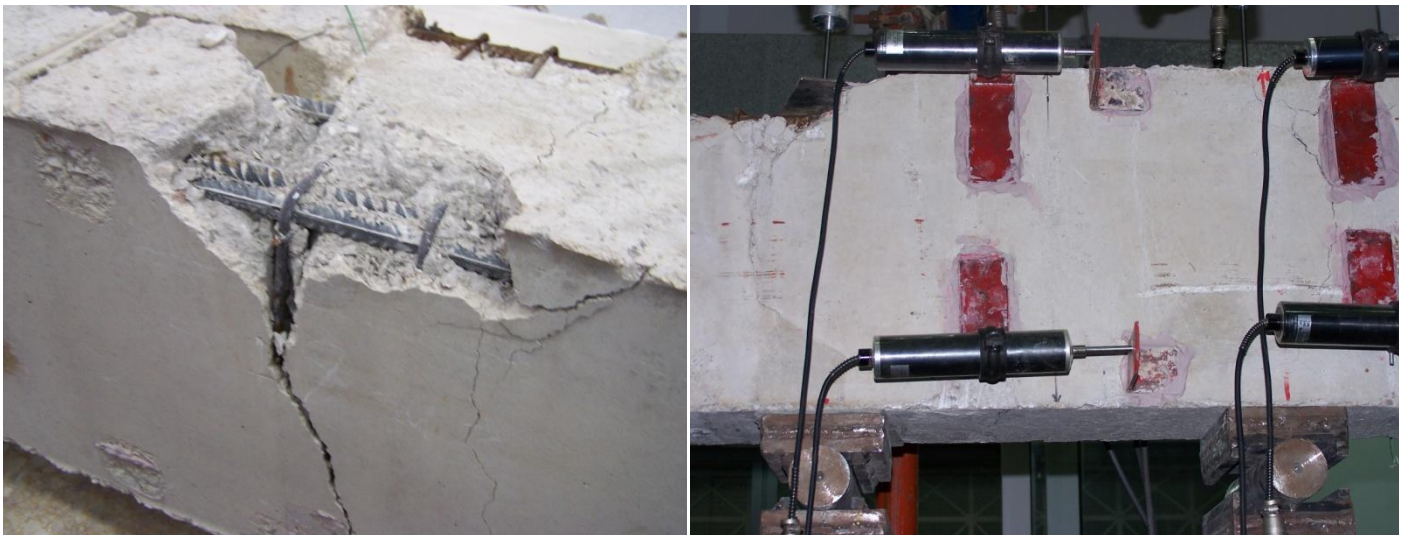


*Εικόνα 19: Λεπτομέρεια αποφλοιωμένου σκυροδέματος στο δοκίμιο L30D1  
στην περιοχή της ένωσης*

## ΔΟΚΙΜΙΑ L15D

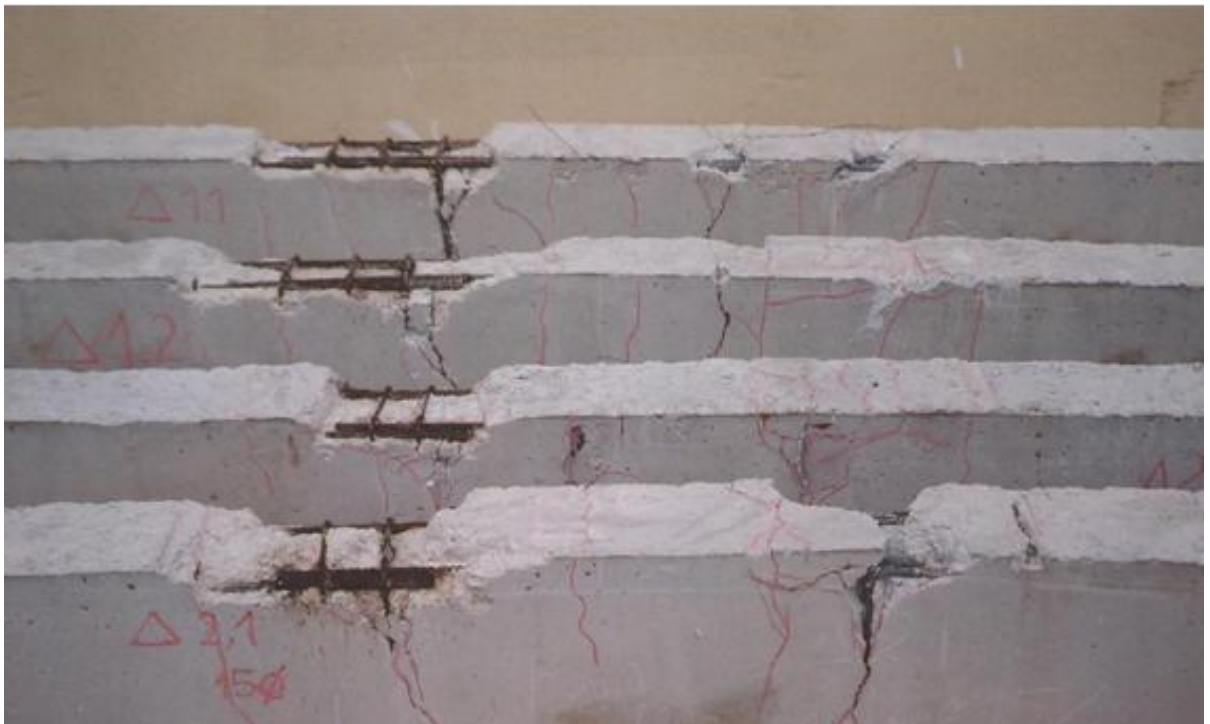


*Εικόνα 20: Δοκίμιο τύπου L15D αμέσως μετά την αστοχία υπό μονοτονική φόρτιση*



*Εικόνα 21: Λεπτομέρεια αστοχίας ματίσματος στα δοκίμια L15D1 και L15D2 αντίστοιχα.  
Στη δεξιά εικόνα διακρίνεται εγκάρσια καμπτική ρωγμή στη μεσαία διατομή*





Εικόνα 22: Τα τέσσερα δοκίμια της πειραματικής διαδικασίας.

Με κόκκινη κιμωλία έχουν σημειωθεί οι ρωγμές

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

- Γκρος, Γ., «Ωπλισμένο Σκυρόδεμα κατά τον Ελληνικό Κανονισμό 2000: σύγκριση με τον Ευρωκώδικα 2 και το DIN 1045/2001», Αθήνα, 2004
- ΕΚΩΣ 2000, «Ελληνικός Κανονισμός Ωπλισμένου Σκυροδέματος 2000», Οργανισμός Αντισεισμικού Σχεδιασμού & Προστασίας, Αθήνα, 2006
- ΚΑΝ.ΕΠΕ. 2012, «Κανονισμός Επεμβάσεων σε κτίρια από Οπλισμένο Σκυρόδεμα», Οργανισμός Αντισεισμικής Προστασίας, Αθήνα, 2012.
- Καραγιάννης, Χ.Γ., «Σχεδιασμός κατασκευών από Ωπλισμένο Σκυρόδεμα έναντι σεισμού», Θεσσαλονίκη, 2008
- Πενέλης, Γ.Γ., Κάππος, Α.Ι., «Αντισεισμικές Κατασκευές από Σκυρόδεμα», Θεσσαλονίκη, 1990
- Τάσιος, Θ.Π., Γιαννόπουλος, Π.Ι., Τρέζος, Κ.Γ. και Τσουκαντάς, Σ.Γ., «Οπλισμένο σκυρόδεμα με βάση τον νέο Ελληνικό Κανονισμό Σκυροδέματος», Εκδόσεις Ε.Μ.Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2005.
- Τάσιος, Θ.Π., «Θεωρία σχεδιασμού επισκευών και ενισχύσεων», Σημειώσεις για το ομώνυμο Μάθημα του ΔΠΜΣ “Δομοστατικός σχεδιασμός και ανάλυση κατασκευών” του Ε.Μ.Πολυτεχνείου, Αθήνα, 2012.
- Φαρδής, Μ.Ν., Μπούσιας, Ε., Σπαθής, Α-Λ., Σωτηρόπουλος, Φ. και Μπισκίνης, Δ., «Επίδραση διαμόρφωσης εγκάρσιου οπλισμού στη σεισμική συμπεριφορά υποστυλωμάτων Οπλισμένου Σκυροδέματος», Τεχνική Έκθεση (Research Report) Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2003.
- Φαρδής, Μ.Ν., κ.ά., «Σεισμική συμπεριφορά υποστυλωμάτων ΟΣ με ενώσεις με παράθεση», Τεχνική Έκθεση (Research Report), Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2004.
- Χρονόπουλος, Μ.Π. και Χρονόπουλος, Π.Μ., «Σύγχρονοι όλκιμοι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος (τεχνικής) κατηγορίας Β500C», Δελτίο ΣΠΜΕ Νο399, Αθήνα, 2012.
- Χρονόπουλος, Π.Μ., Ζυγούρης Ν. Και Παναγιωτάκος, Τ., «Δευτερεύοντα φέροντα στοιχεία σε νέα και υφιστάμενα δομήματα», Δελτίο ΣΠΜΕ Νο 402, Αθήνα, 2012.
- Χρονόπουλος, Π.Μ., «Συμπεριφορά στοιχείων από ΟΣ με ανεπαρκείς ενώσεις οπλισμού», Ημερίδα Ελληνικού Τμήματος Αντισεισμικής Μηχανικής, Θεσσαλονίκη, 2012.

## Αγγλική βιβλιογραφία

- Biskinis, D.E. and Fardis, M.N., “Effect of lap splices on the resistance and cyclic deformation capacity of RC members”, *Beton und Stahlbetonbau, Sonderheft English*, 102, 2007.
- Bousias, S. et al., “Seismic retrofit of RC columns with lap splices”, 13 WCEE, Vancouver, 2004.
- Chronopoulos, P.M., Trezos C.G. and Chronopoulos M.P., "Behaviour of RC elements with inadequate lap splices, before and after upgrading by welding of reinforcement", *Proceedings of 4<sup>th</sup> Int’l Symposium “Bond in Concrete 2012: Bond, anchorages, detailing”*, Brescia, 2012.
- EN 1992-1-1, “Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings”, European Committee for Standardization, Brussels, 2004
- EN 1998-1, “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings”, European Committee for Standardization, Brussels, 2003
- EN 1998-3, “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Strengthening and repair of buildings”, European Committee for Standardization, Brussels, 2003
- Fardis, M.N. et al., “Seismic response of RC columns with lap splices”, *Res. Rep., The Univ. of Patras*, 2004 (in Greek).
- Fardis, M.N., “Seismic design, assessment and retrofitting of concrete buildings (based on EC 8)”, Dordrecht: Springer, 2009.
- Paulay, T, “Lapped splices in EQ – resisting RC columns”, *ACI Str. J.*,” 78 (6), 1982.
- Paulay, T. and Priestley, M.J.N., “Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings”, New York: John Wiley & Sons, 1992.
- Tassios, T.P., “Physical and mathematical models for re-design of damaged structures”, *IABSE Symposium, Venezia*, 1983.