

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

**Μεταπτυχιακή Εργασία**

*Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και  
εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό*

**Γεωργία Θ. Τασούλα**

**Επιβλέποντες:**

Μ. Κωτσοβός, Καθηγητής Ε.Μ.Π  
Ε. Μπαδογιάννης, Λέκτορας Ε.Μ.Π

**Αθήνα, Φεβρουάριος 2013**



## *ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ*

Πρωτίστως, ευχαριστώ τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Μιχαήλ Κωτσοβό, Καθηγητή ΕΜΠ, ο οποίος με την επιστημονική του καθοδήγηση συνετέλεσε καθοριστικά στην εκπόνηση αυτής της ερευνητικής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον συνεπιβλέποντα κ. Ευστράτιο Μπαδογιάννη, Λέκτορα ΕΜΠ, για την καθοριστική καθοδήγησή του, το συνεχές ενδιαφέρον του και την άψογη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας αυτής.

Επιπρόσθετα, ευχαριστώ τη Διεύθυνση και το προσωπικό του εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου του Ομίλου TITAN ΑΕ, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην πραγματοποίηση της εργασίας.

Ακόμη, ευχαριστώ τον κ. Γεράσιμο Κωτσοβό ο οποίος συνετέλεσε στην πραγματοποίηση μέρους της πειραματικής διαδικασίας καθώς και τον κ. Εμμανουήλ Βουγιούκα, Λέκτορα ΕΜΠ για τη βοήθειά του.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω γονείς, φίλους και συμφοιτητές οι οποίοι με τον τρόπο τους βοήθησαν καθοριστικά στην εκπόνηση της εργασίας αυτής.

*Αθήνα, Φεβρουάριος 2013*

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας εντάσσεται στο πλαίσιο της διερεύνησης της δυνατότητας αξιοποίησης του ελαφροσκυροδέματος με αδρανές την κίσηρη στον αντισεισμικό σχεδιασμό των συνήθων κατασκευών από οπλισμένο σκυρόδεμα. Για το σκοπό αυτό έγινε καταρχάς μία προσπάθεια προσδιορισμού της βέλτιστης σύνθεσης για την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος καθώς και των φυσικών και μηχανικών χαρακτηριστικών του. Σε δεύτερη φάση, κατασκευάστηκαν δοκοί οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος από κίσηρη διαστασιολογημένες βάσει των σύγχρονων ειδικών διατάξεων που διέπουν την περίπτωση κατασκευών από ελαφροσκυρόδεμα του Ευρωκώδικα - 2: «Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα, Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για Κτίρια» (EC-2/ EN1992-1-1) και του Ευρωκώδικα - 8: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια» (EC- 8/ EN1998-1), με στόχο τη μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών τους μέσω της υποβολής αυτών σε μονότονη – στατική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

*Λέξεις κλειδιά: ελαφροσκυρόδεμα, κίσηρης, μελέτη σύνθεσης, αντισεισμικός σχεδιασμός, μονοτονη φόρτιση, ανακυκλιζόμενη φόρτιση.*

## ABSTRACT

The scope of this dissertation is to investigate the possibility of utilizing lightweight concrete with pumice aggregate in the seismic design of ordinary reinforced concrete structures. The work comprises two parts: In the first part, it is attempted to determine the optimum composition of lightweight concrete, as well as its physical and mechanical characteristics. In the second part, lightweight concrete beams with pumice aggregate were constructed using the specific provisions governing the construction of lightweight case according to Eurocode - 2: "Design of Concrete, Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings» (EC-2 / EN1992-1 -1) and Eurocode - 8: "Seismic Design, Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings» (EC-8 / EN1998-1), in order to study the mechanical characteristics by subjecting them to monotonic and cyclic static loading.

*Keywords: lightweight concrete, pumice aggregate, optimum composition, seismic design, monotonic loading, cyclic static loading.*

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	1
1.0. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	6
1.1. Τσιμέντο .....	7
1.2. Αδρανή .....	12
1.2.1. Χαρακτηριστικά Ελαφροβαρών Αδρανών .....	12
1.2.1.1. Φυσικά Χαρακτηριστικά Ελαφροβαρών Αδρανών.....	12
1.2.1.2. Μηχανικά Χαρακτηριστικά ελαφροβαρών αδρανών .....	15
1.2.1.3. Αδρανή και θερμική αγωγιμότητα.....	18
1.2.2. Κυριότερο Ελαφροβαρές Αδρανές στον ελλαδικό χώρο: Κίσσηρης.....	18
1.3. Χάλυβας .....	20
1.3.1. Γενικά .....	20
1.3.2. Χημική Σύσταση Χάλυβα Οπλισμού.....	21
1.3.3. Διάκριση και Μορφές Χαλύβων.....	22
1.3.4. Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβων.....	24
1.4. Πρόσθετα Σκυροδέματος .....	25
1.4.1. Γενικά .....	25
1.4.2. Ρευστοποιητές & Υπερ – ρευστοποιητές.....	26
1.4.2.1. Γενικά .....	26
1.4.2.2. Αποτελεσματικότητα .....	28
1.5. Ελαφροσκυρόδεμα .....	29
1.5.1. Φυσικά Χαρακτηριστικά Ελαφροσκυροδέματος – Σύγκριση .....	29
1.5.2. Αντοχή- Ειδικό βάρος- Πυκνότητα.....	32
1.5.3. Κίνδυνος Αντίστροφου Διαχωρισμού- Εργασιμότητα .....	33
1.5.4. Οπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα .....	34
1.5.4.1. Εισαγωγή.....	34
2.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....	38
2.1. Χαρακτηρισμός Α' Υλών .....	38
2.1.1. Αδρανή .....	38
2.1.2. Τσιμέντο .....	41
2.1.3. Υπερ-ρευστοποιητής.....	42
2.1.4. Χάλυβας .....	42
2.2. Μελέτη Σύθεσης και Ιδιότητες.....	43
2.2.1. Εργαστηριακές Δοκιμές Νωπού Σκυροδέματος.....	44
2.2.1.1. Δοκιμή Κάθισης .....	44
2.2.1.2. Μέτρηση Μοναδιαίου Βάρους .....	45
2.2.1.3. Μέτρηση Αέρα .....	46
2.2.2. Εργαστηριακές Δοκιμές Σκληρυμένου Σκυροδέματος .....	46
2.2.2.1. Δοκιμή Θλίψης.....	47
2.2.2.2. Δοκιμή Διάρρηξης.....	47
2.2.2.3. Δοκιμή Μέτρησης Μέτρου Ελαστικότητας .....	48
2.3. Σχεδιασμός, παρασκευή και έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος.....	50
2.3.1. Μελέτη Σύθεσης οπλισμένων στοιχείων ελαφροσκυροδέματος.....	50
2.3.2. Διαστασιολόγηση γραμμικών στοιχείων (δοκών) ελαφροσκυροδέματος .....	53
2.3.2.1. Απαιτούμενες διατάξεις EN 1992-1-1 & EN 1998-1 για το σχεδιασμό των δοκών της πειραματικής Διαδικασίας.....	53
2.3.2.2. Αποτελέσματα Διαστασιολόγησης πειραματικών δοκών .....	61
2.3.2.3. Διεξαγωγή Πειράματος.....	62
2.3.2.4. Πειραματική Διάταξη .....	65
3.0 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ .....	68
3.1. Μελέτη Σύθεσης και Ιδιότητες.....	68
3.1.1. Εργαστηριακές Δοκιμές Νωπού Σκυροδέματος.....	68

3.1.1.1.	Δοκιμή Κάθισης - Μέτρηση Μοναδιαίου Βάρους - Μέτρηση Αέρα .....	68
3.1.2.	Εργαστηριακές Δοκιμές Σκληρυμένου Σκυροδέματος .....	69
3.1.2.1.	Δοκιμή Θλίψης .....	69
3.1.2.2.	Δοκιμή Διάρρηξης .....	70
3.1.2.3.	Δοκιμή Μέτρησης Μέτρου Ελαστικότητας .....	71
3.2.	Έλεγχος ιδιοτήτων Δοκιμών Οπλισμένου Ελαφροσκυροδέματος .....	74
3.2.1.	Μελέτη Σύνθεσης οπλισμένων στοιχείων ελαφροσκυροδέματος .....	74
3.2.2.	Εργαστηριακές Δοκιμές Σκληρυμένου Σκυροδέματος .....	75
3.2.3.	Εργαστηριακές Δοκιμές Χάλυβα Οπλισμού .....	76
3.3.	Έλεγχος Μηχανικών ιδιοτήτων Δοκιμών Οπλισμένου Ελαφροσκυροδέματος .....	78
3.3.1.	Ανάλυση Αποτελεσμάτων .....	78
3.3.2.	Πειραματικά Αποτελέσματα .....	84
3.3.2.1.	Δοκός Δ1 .....	84
3.3.2.2.	Δοκός Δ2 .....	87
3.3.2.3.	Δοκός Δ3 .....	90
3.3.2.4.	Δοκός Δ4 .....	93
3.3.2.5.	Δοκός Δ5 .....	96
3.3.2.6.	Δοκός Δ6 .....	99
3.4.	Ελαφροσκυρόδεμα – Συμβατικό Σκυρόδεμα .....	102
3.4.1.	Υπολογισμός καμπτικής αντοχής .....	102
3.4.2.	Έλεγχος σε τέμνουσα .....	103
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	105
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	106
I.	Διαστασιολόγηση γραμμικών στοιχείων (δοκών) ελαφροσκυροδέματος .....	106
II.	Υπολογισμός Θεωρητικών Μεγεθών για σύγκριση με Πειραματικά Μεγέθη .....	114
II1.	Υπολογισμός $M_u - P_u$ .....	114
II2.	Υπολογισμός $M_y - P_y$ .....	121
II3.	Έλεγχος σε τέμνουσα για το ελαφροσκυρόδεμα και το συμβατικό σκυρόδεμα 124	
III.	Ορυκτολογική Σύνθεση Κίσηρης .....	131
IV.	Χαρακτηριστικά στοιχεία strain-gages για τον πειραματικό προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας ελαφροσκυροδέματος με τη χρήση Κίσηρης .....	132
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	133

## ΠΙΝΑΚΕΣ

<b>Πίνακας 1:</b> Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις για τα τσιμέντα CEM σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197 – 1 (οι αναγραφόμενες τιμές είναι χαρακτηριστικές τιμές, με συντελεστή αβεβαιότητας 5%) [6] .....	9
<b>Πίνακας 2:</b> Τυπική χημική σύσταση τσιμέντου Portland εκφρασμένη σε οξείδια και συντομογραφία των χημικών τύπων [6] .....	10
<b>Πίνακας 3:</b> Τυπικές ορυκτολογικές φάσεις τσιμέντου Portland [6] .....	11
<b>Πίνακας 4:</b> [6] .....	15
<b>Πίνακας 5:</b> Τυπική χημική σύσταση της κίσηρης [1] .....	19
<b>Πίνακας 6:</b> Χημικές Συνθέσεις, Τρόποι Παραγωγής και Περίοδοι Χρήσης [12] .....	21
<b>Πίνακας 7:</b> Χημικές Συνθέσεις, Τρόποι Παραγωγής και Περίοδοι Χρήσης [14] .....	24
<b>Πίνακας 8:</b> Χημική σύσταση κίσηρης – ελαφρόπετρας .....	39
<b>Πίνακας 9:</b> Κοκκομετρική Διαβάθμιση Χονδρόκοκκου Υλικού Κίσηρης .....	39
<b>Πίνακας 10:</b> Κοκκομετρική Διαβάθμιση Λεπτόκοκκου Υλικού Κίσηρης .....	40
<b>Πίνακας 11:</b> Κοκκομετρική Διαβάθμιση Ασβεστολιθικής Άμμου .....	40
<b>Πίνακας 12:</b> Κοκκομετρική Διαβάθμιση Ρυζάκι .....	40
<b>Πίνακας 13:</b> Φυσικά Χαρακτηριστικά Συστατικών Συνθέσεων .....	41
<b>Πίνακας 14:</b> Χημική Σύσταση Τσιμέντου .....	41
<b>Πίνακας 15:</b> Αντοχές συναρτήσει ηλικίας .....	41

<b>Πίνακας 16:</b> Χάλυβες Φ8, Φ14, Φ16 .....	42
<b>Πίνακας 17:</b> Ποσότητες (κ.β.) Συστατικών Συνθέσεων Σκυροδέματος.....	43
<b>Πίνακας 18:</b> Αναλογία Ανάμιξης Αδρανών (% κ.β.) .....	44
<b>Πίνακας 19:</b> Κατηγορίες Κάθισης .....	45
<b>Πίνακας 20:</b> Εκτιμώμενη περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων κίσηρης της κάθε συνθέσης .....	51
<b>Πίνακας 21:</b> Ποσότητες (κ.β.) Συστατικών Συνθέσεων Σκυροδέματος.....	51
<b>Πίνακας 22:</b> Κατηγορίες πυκνότητας ελαφροσκυροδέματος [14].....	54
<b>Πίνακας 23:</b> Τιμές μεγεθών Ελαφροσκυροδέματος [14] .....	54
<b>Πίνακας 24:</b> Τιμές του $v_{l,min}$ για δεδομένες τιμές των $d$ και $f_{ck}$ [14].....	57
<b>Πίνακας 25:</b> Λεπτομέρειες δοκών πειραματικής διαδικασίας.....	62
<b>Πίνακας 26:</b> Αποτελέσματα δοκιμών νωπού ελαφροσκυροδέματος των διαφόρων συνθέσεων.....	68
<b>Πίνακας 27:</b> Μέση θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμών 100*100mm σε μονοαξονική θλίψη.....	69
<b>Πίνακας 28:</b> Αντοχή κυλινδρικών δοκιμών 100*200mm σε διάρρηξη.....	71
<b>Πίνακας 29:</b> Προσδιορισμός Μέτρου Ελαστικότητας .....	72
<b>Πίνακας 30:</b> Αποτελέσματα δοκιμών νωπού ελαφροσκυροδέματος των διαφόρων συνθέσεων.....	74
<b>Πίνακας 31:</b> Μέση αντοχή κυβικών δοκιμών σε θλίψη.....	75
<b>Πίνακας 32:</b> Δοκιμές Χάλυβα.....	76
<b>Πίνακας 33:</b> Λεπτομέρειες δοκών πειραματικής διαδικασίας.....	79
<b>Πίνακας 34:</b> Αντοχή κυλινδρικών δοκιμών από αναγωγή .....	80
<b>Πίνακας 35:</b> Υπολογιστικές τιμές (θεωρητικές) ροπών & αντίστοιχου φορτίου διαρροής και αστοχίας.....	80
<b>Πίνακας 36:</b> Πειραματικές τιμές τεμνουσών δυνάμεων και συσχέτιση με τις αντίστοιχες υπολογιστικές τιμές .....	81
<b>Πίνακας 37:</b> Υπολογιστικές τιμές φορτίου διαρροής & αστοχίας και αντίστοιχων μετατοπίσεων για τον προσδιορισμό προκύπτουσας πλαστιμότητας.....	82
<b>Πίνακας 38:</b> Μετατοπίσεις του τελευταίου κύκλου κάθε ομάδας ανακύκλισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας.....	83
<b>Πίνακας 39:</b> Συγκριτικά Αποτελέσματα Ελαφροσκυροδέματος – Συμβατικού Σκυροδέματος .....	102
<b>Πίνακας 40:</b> Συγκριτικά Αποτελέσματα Ελέγχου σε Τέμνουσα .....	104

## ΕΙΚΟΝΕΣ

<b>Εικόνα 1:</b> Κίσηρης πιοκίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης [1].....	20
<b>Εικόνα 2:</b> Δοκιμή κάθισης.....	45
<b>Εικόνα 3:</b> Διάταξη μέτρησης περιεχόμενου αέρα.....	46
<b>Εικόνα 4:</b> Δείγμα παραγόμενων δοκιμών .....	46
<b>Εικόνα 5:</b> Μηχανή Δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη-Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ.....	47
<b>Εικόνα 6:</b> Διάταξη κυλινδρικού δοκιμίου για έλεγχο σε διάρρηξη (Brazilian Test) .....	48
<b>Εικόνα 7:</b> Διάγραμμα παραμορφώσεων-Διάγραμμα τάσεων-Εσωτερικές Δυνάμεις.....	55
<b>Εικόνα 8:</b> Πρισματικό δοκίμιο ελαφροσκυροδέματος σε δοκιμή προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας.....	72
<b>Εικόνα 9:</b> Πρισματικό δοκίμιο ελαφροσκυροδέματος σε δοκιμή προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας.....	73
<b>Εικόνα 10:</b> Πειραματική Διάταξη επιβολής μονότονης φόρτισης – Δοκοί Δ1 & Δ2 .....	85
<b>Εικόνα 11:</b> Εμφάνιση κεκλιμένων ρωγμών εντός διαμητρικού μήκους – Δοκός Δ1 .....	86
<b>Εικόνα 12:</b> Συγκέντρωση καμπποδιαμητρικών ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης – Δοκός Δ1 .....	86
<b>Εικόνα 13:</b> Αστοχία δοκιμίου υπό Μονότονη Φόρτιση – Δοκός Δ1 .....	87
<b>Εικόνα 14:</b> Εμφάνιση κεκλιμένων ρωγμών εντός διαμητρικού μήκους – Δοκός Δ2 .....	89

<b>Εικόνα 15:</b> Συγκέντρωση καμπτοδιαμητικών ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης – Δοκός Δ2 .....	89
<b>Εικόνα 16:</b> Αστοχία δοκιμίου υπό Μονότονη Φόρτιση – Δοκός Δ2 .....	90
<b>Εικόνα 17:</b> Πειραματική Διάταξη επιβολής ανακυκλιζόμενης φόρτισης – Δοκοί Δ3 & Δ4 ....	91
<b>Εικόνα 18:</b> Ρωγμές εντός διαμητικού μήκους-Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης-Δοκός Δ3 .....	92
<b>Εικόνα 19:</b> Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα – Δοκός Δ3 .....	93
<b>Εικόνα 20:</b> Ρωγμές εντός διαμητικού μήκους - Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης – Δοκός Δ4 .....	95
<b>Εικόνα 21:</b> Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα μετά τη διαρροή – Δοκός Δ4 .....	96
<b>Εικόνα 22:</b> Ρωγμές εντός διαμητικού μήκους-Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης-Δοκός Δ5 .....	98
<b>Εικόνα 23:</b> Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα μετά τη διαρροή – Δοκός Δ5 .....	99
<b>Εικόνα 24:</b> Ρωγμές εντός διαμητικού μήκους - Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης – Δοκός Δ6 .....	101
<b>Εικόνα 25:</b> Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα μετά τη διαρροή – Δοκός Δ6 .....	102
<b>Εικόνα Π-Ε26:</b> Χαρακτηριστικά στοιχεία strain-gages .....	132

## ΣΧΗΜΑΤΑ

<b>Σχήμα 1:</b> Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη συνήθους σκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολλτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις [6] .....	16
<b>Σχήμα 2:</b> Διαδοχικές φάσεις ρηγμάτωσης σε προσομοίωμα συμβατικού σκυροδέματος [6] 17	
<b>Σχήμα 3:</b> Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη ελαφροσκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολλτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις [6] .....	17
<b>Σχήμα 4:</b> Διαδοχικές φάσεις ρηγμάτωσης σε προσομοίωμα ελαφροσκυροδέματος έως την αστοχία [6] .....	18
<b>Σχήμα 5:</b> Σχηματικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων τυπικού χάλυβα οπλισμού (δίνονται οι απόλυτες τιμές της εφελκυστικής τάσης και της παραμόρφωσης) [14] .....	24
<b>Σχήμα 6:</b> Σχηματικό διάγραμμα φορτίου-παραμορφώσεων [ A: πρώτη ρωγή σκυροδέματος, B: Διαρροή χάλυβα οπλισμού, C: θρυμματισμός επιφάνειας σκυροδέματος, D: αποσάθρωση πυρήνα σκυροδέματος [19] .....	37
<b>Σχήμα 7:</b> Μοντέλο Δικτυώματος [14] .....	59
<b>Σχήμα 8:</b> Στατικό Μοντέλο, και οπλισμός Δοκών Δ1 - Δ2 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & 8 που υποβάλλονται σε μονότονη φόρτιση (διαστάσεις σε mm) .....	62
<b>Σχήμα 9:</b> Ιστορία μονοτονικής φόρτισης .....	63
<b>Σχήμα 10:</b> Στατικό Μοντέλο και οπλισμός Δοκών Δ3 – Δ4 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & 8 που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (διαστάσεις σε mm) .....	63
<b>Σχήμα 11:</b> Στατικό Μοντέλο και οπλισμός Δοκών Δ5 – Δ6 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & 8 που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (διαστάσεις σε mm) .....	64
<b>Σχήμα 12:</b> Ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης .....	64
<b>Σχήμα 13:</b> Πειραματική Διάταξη για μονότονη φόρτιση για τις δοκούς Δ1 & Δ2 .....	66
<b>Σχήμα 14:</b> Πειραματική Διάταξη για ανακυκλιζόμενη φόρτιση για τις δοκούς Δ3 – Δ6 .....	67
<b>Σχήμα 15:</b> Μέση θλιπτική αντοχή ( $f_{c,m}$ ), σε διάφορες ηλικίες ωρίμανσης ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος .....	70
<b>Σχήμα 16:</b> Σχέση μέσης θλιπτικής αντοχής $f_{cm}$ και μοναδιαίου βάρους σε Ελαφροσκυροδέμα .....	75
<b>Σχήμα 17:</b> Διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα Φ8 .....	76
<b>Σχήμα 18:</b> Διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα Φ14 .....	77
<b>Σχήμα 19:</b> Διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα Φ16 .....	77
<b>Σχήμα 20:</b> Δοκός Δ1: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ) .....	85
<b>Σχήμα 21:</b> Δοκός Δ1: διάγραμμα (P/P <sub>t</sub> ) – (δ/δ <sub>ny</sub> ) .....	86



Σχήμα 22: Δοκός Δ2: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης ( $P - \Delta$ ).....	88
Σχήμα 23: Δοκός Δ2: διάγραμμα ( $P/P_f$ ) – ( $\delta/\delta_{ny}$ ) .....	89
Σχήμα 24: Δοκός Δ3: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης ( $P - \Delta$ ).....	91
Σχήμα 25: Δοκός Δ3: διάγραμμα ( $P/P_f$ ) – ( $\delta/\delta_{ny}$ ) .....	92
Σχήμα 26: Δοκός Δ4: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης ( $P - \Delta$ ).....	94
Σχήμα 27: Διάγραμμα ( $P/P_f$ ) – ( $\delta/\delta_{ny}$ ) - Δοκός Δ4.....	95
Σχήμα 28: Δοκός Δ5: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης ( $P - \Delta$ ) .....	97
Σχήμα 29: Δοκός Δ5: διάγραμμα ( $P/P_f$ ) – ( $\delta/\delta_{ny}$ ) .....	98
Σχήμα 30: Διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης ( $P - \Delta$ ) – Δοκός Δ6.....	100
Σχήμα 31: Διάγραμμα ( $P/P_f$ ) – ( $\delta/\delta_{ny}$ ) - Δοκός Δ6 .....	101
Σχήμα Π-Σ32: Ορυκτολογική ανάλυση της Κίσσηρης με τη χρήση περιθλασιόμετρου ακτίνων Χ (XRD) .....	131

## 1.0. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

Ως ελαφροσκυρόδεμα χαρακτηρίζεται γενικά η τσιμεντοκονία ή το σκυρόδεμα με πυκνότητα σαφώς μικρότερη από την πυκνότητα των κανονικών σκυροδεμάτων ( $2150 - 2500 \text{ Kg/m}^3$ ) αλλά και αντοχή καθώς κατά κανόνα η αντοχή αυξάνει ανάλογα με την πυκνότητα. Τα ελαφροσκυροδέματα με μεγάλη σχετικά πυκνότητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για την κατασκευή φερόντων δομικών στοιχείων, ενώ για μη φέροντα δομικά στοιχεία, (κατασκευές πλήρωσης, θερμομονωτικές στρώσεις) χρησιμοποιούνται ελαφροσκυροδέματα χαμηλής σχετικά πυκνότητας. [1] [2]

Το ελαφροσκυρόδεμα ανάλογα με τον τρόπο παρασκευής του και τα συστατικά του, διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- Ελαφροσκυρόδεμα παρασκευασμένο (γενικά) με ελαφροβαρή αδρανή μεγάλου πορώδους, (κίσηρης, περλίτης κλπ.)
- Κυψελωτό ελαφροσκυρόδεμα, το οποίο κατά κανόνα περιέχει χονδρόκοκκα αδρανή, ενώ ο τσιμεντοπολτός του χαρακτηρίζεται από μεγάλο πορώδες και,
- Ελαφροσκυρόδεμα με χονδρόκοκκα αδρανή, επίσης σημαντικού πορώδους. [2], [3] [3] [4]

Η πρώτη κατηγορία ελαφροσκυροδέματος, με ελαφροβαρή αδρανή, γενικά παρασκευάζεται όπως το συνήθες σκυρόδεμα. Η διαφοροποίησή του έγκειται στην αντικατάσταση μέρους ή του συνόλου των αδρανών, με αδρανή αυξημένου πορώδους και συγκριτικά μειωμένου βάρους όπως κίσηρης, περλίτης, σκωρία κλπ..

Το δεύτερο είδος ελαφροσκυροδέματος, (κυψελωτό ή αλλιώς ελαφροσκυρόδεμα με εγκλωβισμένο αέρα), προκύπτει με την εισαγωγή φυσαλίδων διαμέτρου  $0,1 - 1 \text{ mm}$  σε τσιμεντοκονίαμα. Οι φυσαλίδες δημιουργούνται είτε με τον εγκλωβισμό αερίου που παράγεται από κάποια χημική αντίδραση (αεριοσκυρόδεμα), είτε με τον εγκλωβισμό αέρα σε μορφή αφρού (αφροσκυρόδεμα). Τα κονιάματα του τύπου αυτού παρασκευάζονται χωρίς χονδρόκοκκα αδρανή και σε ορισμένες περιπτώσεις χωρίς αδρανή, οπότε χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα ( $200 - 400 \text{ Kg/m}^3$ ) και αντίστοιχα χαμηλή αντοχή. Χρησιμοποιούνται μόνο για θερμομόνωση.

Από άποψη λειτουργίας, το ελαφροσκυρόδεμα διακρίνεται σε:

- Ελαφροσκυρόδεμα ικανοποιητικής αντοχής το οποίο δύναται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φερόντων δομικών στοιχείων,
- Ελαφροσκυρόδεμα μειωμένης αντοχής, το οποίο χρησιμοποιείται σε εφαρμογές μόνωσης (θερμομόνωση, ηχομόνωση) και,

- Ελαφροσκυρόδεμα δόμησης - μόνωσης, που αναπτύσσει μέτρια, φέρει μικρό φορτίο (ίδιον βάρος), λειτουργώντας κυρίως ως μονωτικό. [4] [5]

## 1.1. Τσιμέντο

Το βασικό συστατικό για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος, είναι το τσιμέντο. Γενικά όλα τα τσιμέντα που συμμορφώνονται με το Πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ 197-1 έχουν αποδειχθεί κατάλληλα για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος. [4]

Το τσιμέντο είναι βιομηχανικό προϊόν το οποίο παρασκευάζεται από πρώτες ύλες που βρίσκονται σε αφθονία στη φύση, κυρίως ασβεστόλιθο και άργιλο (αργιλοπυριτικό προϊόν). Σύμφωνα με το ΕΛΟΤ/ΕΝ 197, το τσιμέντο είναι μία υδραυλική συνδετική ύλη, δηλαδή ένα λεπτότατα αλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό, σχηματίζει έναν πολτό που πήζει και σκληραίνει διαμέσου αντιδράσεων και μηχανισμών ενυδάτωσης και το οποίο, μετά τη σκλήρυνση διατηρεί την αντοχή και τη σταθερότητά του ακόμη και μέσα στο νερό. Τα τσιμέντα τα οποία συμμορφώνονται με το πρότυπο EN 197- 1, ονομάζονται τσιμέντα CEM. Το τσιμέντο αυτό όταν αναμιχθεί στις κατάλληλες αναλογίες με αδρανή και νερό, πρέπει να παράγει σκυρόδεμα ή κονίαμα το οποίο να είναι ικανό να

- διατηρεί το εργάσιμό του για επαρκές χρονικό διάστημα (απαραίτητη προϋπόθεση για να μπορεί να διαστρωθεί και να συμπυκνωθεί)
- επιτυγχάνει με την ανάμιξή του με νερό, καθορισμένα επίπεδα αντοχής μετά από ορισμένα χρονικά διαστήματα
- έχει μακρόχρονη σταθερότητα όγκου

Η σκλήρυνση του τσιμέντου CEM οφείλεται κυρίως στην ενυδάτωση των ασβεστοπυριτικών ενώσεών του, αλλά και άλλες χημικές ενώσεις μπορούν να συμμετέχουν στο μηχανισμό σκλήρυνσης όπως αργιλικές ενώσεις. Το άθροισμα των ποσοτήτων του δραστικού οξειδίου του ασβέστιο (CaO) και του δραστικού οξειδίου του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>) πρέπει να είναι το 50% της μάζας του τσιμέντου προκειμένου να χαρακτηριστεί ως τσιμέντο CEM.

Τα τσιμέντα CEM αποτελούνται από διαφορετικά υλικά τα οποία όμως έχουν πλήρως ομογενοποιηθεί χάρις στις μεθόδους παραγωγής που χρησιμοποιούνται. Τα συστατικά των τσιμέντων διακρίνονται (ΕΛΟΤ/ΕΝ 197- 1) σε κύρια και δευτερεύοντα όταν η αναλογία τους κατά μάζα στο άθροισμα των υλικών (κύριων και δευτερευόντων) είναι μεγαλύτερη του 5% και μικρότερη του 5% αντίστοιχα.

Σύμφωνα με τον ορισμό αυτό (EN 197 - 1) τα κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι:

- **Κλίνκερ (K):** Είναι το προϊόν της επίτηξης ενός καθορισμένου μίγματος πρώτων υλών και περιέχει  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  και μικρές ποσότητες άλλων υλικών.
- **Ποζολανικά υλικά (P, Q):** (Φυσική P, φυσική ψημένη Q)
- **Ιπάμενες Τέφρες (V, W):** (Πυριτική V, Ασβεστούχος W)
- **Ασβεστόλιθος (L, LL)**
- **Κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου (S)**
- **Πυριτική παιπάλη (D)**
- **Ψημένος Σχιστόλιθος (T)**

Τα κοινά τσιμέντα Portland ή CEM Τσιμέντα σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197 - 1 ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε κλίνκερ (διακριτικό γράμμα A ή διακριτικό γράμμα B) διακρίνονται στους ακόλουθους τύπους:

- CEM I: Τσιμέντα Portland ( $K > 95\%$ )
- CEM II: Σύνθετα Τσιμέντα Portland (K, P, Q, V, W, T, L, S, D)  
A:  $80\% < K < 94\%$ ,      B:  $65\% < K < 79\%$
- CEM III: Σκωριοσιμέντα (K,S)  
A:  $35\% < K < 65\%$       B:  $20\% < K < 65\%$       C:  $5\% < K < 19\%$
- CEM IV: Ποζολανικά (K, P, Q, V, W, D)  
A:  $65\% < K < 89\%$       B:  $45\% < K < 64\%$
- CEM V: Σύνθετα Τσιμέντα (K, S, P, Q, V)  
A:  $40\% < K < 64\%$       B:  $20\% < K < 39\%$

## ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ

Σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197 ορίζονται τρεις (3) βασικές κατηγορίες αντοχής, 32.5, 42.5, 52.5 (MPa).

Οι τιμές αυτές είναι χαρακτηριστικές, εξασφαλίζονται δηλαδή με ασφάλεια 95%. Σε κάθε κατηγορία χαρακτηριστικής αντοχής εισάγονται και κατηγορίες ταχύτητας ανάπτυξης αντοχής και συγκεκριμένα: α) κανονικής αντοχής **N** και (β) αυξημένης ταχύτητας **R** με αποτέλεσμα να δημιουργούνται συνολικά έξι (6) κατηγορίες αντοχής, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 1:

**Πίνακας 1:** Μηχανικές και φυσικές απαιτήσεις για τα τσιμέντα CEM σύμφωνα με το Πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197 – 1  
(οι αναγραφόμενες τιμές είναι χαρακτηριστικές τιμές, με συντελεστή αβεβαιότητας 5%) [6]

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή σε θλίψη Mpa				Χρόνος αρχής πήξης min	Σταθερότητα όγκου (Διαστολή) mm
	Πρώιμη Αντοχή		Τυπική Αντοχή			
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες			
32,5 N	-	> 16	> 32,5	< 52,5	> 75	< 10
32,5 R	> 10	-				
42,5 N	> 10	-	> 42,5	< 62,5	> 60	
42,5 R	> 20	-				
52,5 N	> 20	-	> 52,5	-	> 45	
52,5 R	> 30	-				

Σύμφωνα με τα παραπάνω, ένα τσιμέντο με κύριο χαρακτηριστικό, πλην του κλίνκερ, φυσική ποζολάνη (P), του οποίου η περιεκτικότητα σε κλίνκερ είναι  $80\% < K < 94\%$  και έχει αντοχή σε 28 ημέρες  $> 32,5$ , κανονικώς αναπτυσσόμενη, θα συντομογραφείται CEM II / A – P 32.5 N.

Από το μεγάλο αριθμό κύριων συστατικών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκύπτει μεγάλος αριθμός και συγκεκριμένα είκοσι επτά (27), τύπων τσιμέντου τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθούν σύμφωνα με το Πρότυπο EN 197 και τα οποία χαρακτηρίζονται ως «προϊόντα τσιμέντου». Αυτό γίνεται διότι το πρότυπο ενθαρρύνει τη χρησιμοποίηση εκείνων των κύριων συστατικών πέραν του κλίνκερ που κάθε χώρα διαθέτει και έχει εμπειρία από τη χρήση τους. Με τον τρόπο αυτό επιδιώκεται η καλύτερη εκμετάλλευση των πρώτων υλών που έχει κάθε χώρα σε όφελος της οικονομίας αλλά και του περιβάλλοντος διότι εξοικονομείται κλίνκερ η παραγωγή του οποίου είναι ενεργειακό βόρος. Μειώνονται έτσι οι επιβαρύνσεις του περιβάλλοντος λόγω της μείωσης των εκπομπών CO<sub>2</sub>, ενώ ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης παραπροϊόντων.

Στην Ελλάδα παράγονται συνήθως οι ακόλουθοι τύποι και κατηγορίες τσιμέντων:

- CEM I      42,5    52,5
- CEM II / A – M    42,5
- CEM II / B – M    32,5    42,5
- CEM II / A – L    42,5
- CEM IV / B        32,5

Εκτός από τα κοινά τσιμέντα Portland, των οποίων οι ιδιότητες και ο έλεγχος γίνονται σύμφωνα με τα Πρότυπα ΕΛΟΤ EN 197 και 196, παράγονται και διάφοροι άλλοι τύποι

τσιμέντου όπως τσιμέντα τοιχοποιίας (EN 143), τσιμέντα ανθεκτικά στα θειικά, τσιμέντα χαμηλής θερμοκρασίας ενυδάτωσης (EN 4216), τσιμέντα ή ορθότερα συνδετικές κονίες για οδοποιία (EN 13282), κ.α..

## ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Στον Πίνακα 2 δίνεται μια «τυπική» χημική σύσταση τσιμέντου Portland, CEM I, μαζί με τη συντομογραφία των χημικών τύπων που επικράτησε στη βιομηχανία τσιμέντου.

Πίνακας 2: Τυπική χημική σύσταση τσιμέντου Portland εκφρασμένη σε οξειδία και συντομογραφία των χημικών τύπων [6]

Οξείδιο	Συντομογραφία	Ονομασία	Περιεκτικότητα κ.β. %	
			Συνήθης Τιμή	Εύρος Τιμών
CaO	C	Οξείδιο του Ασβεστίου	63	60 - 67
SiO <sub>2</sub>	S	Οξείδιο του Πυριτίου	22	17 - 25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	A	Οξείδιο του Αργιλίου	6	3 - 8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	F	Οξείδιο του Σιδήρου	2,5	0,5 - 6
MgO	M	Οξείδιο του Μαγνησίου	2,6	0,1 - 4
K <sub>2</sub> O	K (Αλκάλια)	Οξείδιο του Καλίου	0,6	
Na <sub>2</sub> O	N (Αλκάλια)	Οξείδιο του Νατρίου	0,3	
SO <sub>3</sub>	S	Τριοξείδιο του Θείου	2	1 - 3
CO <sub>2</sub>	C	Διοξείδιο του Άνθρακα	-	
H <sub>2</sub> O	H	Νερό	-	

Τα οξειδία κατά την όπτηση και εν συνεχεία την ψύξη του κλίνκερ σχηματίζουν κυρίως τις ορυκτολογικές φάσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Τυπικές ορυκτολογικές φάσεις τσιμέντου Portland [6]

Χημικό Όνομα	Χημικός Τύπος	Συντομογραφία	Περιεκτικότητα κ.β. %
πυριτικό τριασβέστιο	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50
πυριτικό διασβέστιο	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	25
αργιλικό τριασβέστιο	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	12
σιδηροαργιλικό τετρασβέστιο	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	8
γύψος	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{CSH}_2$	3,5

Εκτός από τις ενώσεις του Πίνακα 3, στο κλίνκερ υπάρχουν ακόμη:

- i. Μαγνησία ( $\text{MgO}$ ), της οποίας η περιεκτικότητα περιορίζεται από τους κανονισμούς γιατί η ενυδάτωσή της προκαλεί διόγκωση. (Κατά το Πρότυπο ΕΛΟΤ –EN 197 – 1, το κλίνκερ δεν επιτρέπεται να περιέχει  $\text{MgO}$  περισσότερο από 5% κ.μ.
- ii. Αλκάλια ( $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ), τα οποία είναι δυνατόν να αντιδράσουν με ορισμένα αδρανή του σκυροδέματος προκαλώντας τη λεγόμενη αλκαλοπυριτική αντίδραση, η οποία συνοδεύεται από διόγκωση και έτσι να προκληθεί αποσάθρωση του σκυροδέματος. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να χρησιμοποιηθεί τσιμέντο με περιορισμένη περιεκτικότητα σε αλκάλια (< 0,6%) ή σε λιγότερο επικίνδυνες περιπτώσεις τσιμέντα με ποζολάνη (Τύπου II ή IV). [6]

Στην παραγωγή ελαφροσκυροδέματος, είναι δυνατή η αντικατάσταση μέρους της ποσότητας του τσιμέντου με συστατικά που προσδίδουν στο μίγμα ποζολανικές ιδιότητες όπως οι ιπτάμενες τέφρες και κυρίως η πυριτική ιπτάμενη τέφρα, η πυριτική παιπάλη αλλά και παραπροϊόντα της βιομηχανίας όπως η κοκκοποιημένη σκωρία υφικαμίνου (τεχνητές ποζολάνες), με αποτέλεσμα τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος και την παράλληλη μείωση του βάρους, του ποσοστού ενυδάτωσης, της αλκαλικής αντίδρασης των αδρανών και της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος. [7]

Από έρευνες και μελέτες που έχουν διεξαχθεί από διάφορους επιστήμονες ανά τον κόσμο, έχει προκύψει ότι η χρήση τεχνητών ποζολανικών συστατικών ως υδραυλικές κονίες ως ένα βαθμό αντικατάστασης του τσιμέντου (έως 30%), έχει επιπλέον πλεονεκτήματα, εκτός της πρόσδοσης στο μίγμα των ποζολανικών ιδιοτήτων που αναφέρθηκαν προωτέρω.

## 1.2. Αδρανή

Τα αδρανή είναι μικρά θραύσματα πετρωμάτων (0,08 έως 80 mm), κυρίως ορυκτής προέλευσης. Τα αδρανή διατίθενται σε διάφορους τύπους: θαλάσσιας, ποτάμιας και χερσαίας προέλευσης. Μπορεί να είναι άμμος, σκύρα ή χαλίκι. Τα αδρανή, αναμεμιγμένα με νερό και τσιμέντο, είναι αναγκαία για την παραγωγή σκυροδέματος. [1]

Κύριο χαρακτηριστικό της δομής του ελαφροσκυροδέματος είναι τα κενά αέρα στα αδρανή του, που είναι και ο λόγος για το μειωμένο βάρος του, συγκριτικά με το συμβατικό σκυρόδεμα. Τα αδρανή του μπορεί να είναι φυσικά ή τεχνητά και πλήρως συμμορφούμενα με βάση τις απαιτήσεις του προτύπου για τα ελαφρά αδρανή, ΕΛΟΤ EN 13055-1-2002 και ΕΛΟΤ EN 13055-2-2004 και εμπίπτουν στο πρότυπο EN- 206-1. [8]

Από τα γνωστότερα φυσικά ελαφροβαρή αδρανή είναι η κίσηρης, ηφαιστειακής προέλευσης και σε αφθονία στον ελληνικό χώρο (Σαντορίνη, Νίσυρος, Γυαλί κλπ.). Άλλο φυσικά ελαφροβαρή αδρανή είναι ο περλίτης κλπ..

Τα τεχνητά ελαφροβαρή αδρανή προέρχονται από ειδική επεξεργασία αργίλου, σχιστόλιθου και απορριμμάτων της βιομηχανίας, όπως η σκωρία των υψικαμίνων που προκύπτει από την παραγωγή του σιδήρου και του χάλυβα και η ιπτάμενη τέφρα που παράγεται κατά την καύση λιγνίτη στους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Άλλα τεχνητά αδρανή είναι ο διογκωμένος περλίτης, που παράγεται με θέρμανση ορυκτού περλίτη στους 800°C, τα ορυκτοποιημένα ροκανίδια ξύλου, οι κόκκοι από ανακυκλωμένο διογκωμένο γυαλί κλπ.. Τα ελαφροβαρή αδρανή χρησιμοποιούνται με ή χωρίς προσθήκη άμμου. Η χρησιμοποίηση των τεχνητών αδρανών συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, καθώς αξιοποιούνται παραπροϊόντα της βιομηχανίας και αποφεύγεται η απόθεση τους στο περιβάλλον. Επίσης μειώνεται σημαντικά η αλόγιστη εκσκαφή για την παραγωγή συμβατικών αδρανών. [3] [8]

### 1.2.1. Χαρακτηριστικά Ελαφροβαρών Αδρανών

#### 1.2.1.1. Φυσικά Χαρακτηριστικά Ελαφροβαρών Αδρανών

Οι σημαντικότεροι παράγοντες, που συνιστούν τροποποίηση στον υπολογισμό των αναλογιών του μίγματος και στον καθορισμό των διαδικασιών για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος σε σύγκριση με το σύνηθες σκυρόδεμα, είναι το μεγαλύτερο ποσοστό υγρασίας και ο ρυθμός απορρόφησης των περισσότερων ελαφροβαρών αδρανών

Η χρήση ελαφροβαρών αδρανών πλήρως κορεσμένων και όχι επιφανειακά στεγνών (με προσροφημένο στην επιφάνεια νερό), είναι προτιμότερη σε σχέση με αυτή των ξηρών,



καθώς κατά την ανάμιξη, δεν απορροφούν νερό και επομένως δεν αναμένεται απώλεια κάθισης του σκυροδέματος κατά τη διάρκεια της ανάμιξης, μεταφοράς και τοποθέτησης. Τα κορεσμένα αδρανή έχουν μικρότερη τάση να διαχωρισθούν κατά την αποθήκευση. Το νερό που θα απορροφηθεί, υπολογίζεται κατά τη διαδικασία υπολογισμού των ποσοτήτων των υλικών της ανάμιξης. Στην περίπτωση που κατασκευάζεται σκυρόδεμα με ελαφροβαρή αδρανή τα οποία έχουν χαμηλά ποσοστά αρχικής υγρασίας (συνήθως λιγότερο από 8-10%) και συγκριτικά υψηλά ποσοστά απορροφητικότητας, χρειάζεται αρχικά η ανάμιξη των αδρανών με το μισό (1/2) ή τα δύο τρίτα (2/3) του συνολικού νερού της ανάμιξης για ένα χρονικό διάστημα πριν την εισαγωγή του τσιμέντου, προσθέτων και αέρα, για να αποφευχθεί η απώλεια κάθισης.

Σκυρόδεμα που παράγεται με τη χρήση κορεσμένων - επιφανειακώς στεγνών ελαφροβαρών αδρανών, αποδεικνύεται πιο ευάλωτο σε κύκλους ψύξης - απόψυξης σε σχέση με σκυρόδεμα που προέρχεται από ελαφροβαρή αδρανή τα οποία μπορεί να είναι ξηρά ή πλήρως κορεσμένα - όχι επιφανειακά στεγνά, εκτός αν το σκυρόδεμα έχει χάσει την επιπλέον υγρασία του μετά την ωρίμανση και πριν από την έκθεσή του σε παγετό.

Πρακτικά στις περισσότερες περιπτώσεις παρασκευής σκυροδέματος, οι αναλογίες των αδρανών θα πρέπει να υπολογίζονται σε καταστάσεις υγρασίας που μπορούν να επιτευχθούν στο εργαστήριο αλλά και στην πράξη. Στην παρασκευή ελαφροσκυροδέματος για δομικές εφαρμογές, το κυριότερο πρόβλημα είναι ο ορθός υπολογισμός του νερού που θα απορροφηθεί εντός - από την μάζα του αδρανούς - και το νερό που θα προσροφηθεί από την επιφάνεια του ελαφροβαρούς αδρανούς. Οι επιπτώσεις της απορροφητικότητας για κάθε περίπτωση εφαρμογής πρέπει να λαμβάνονται υπόψη.

Έχουν καθορισθεί τέσσερις καταστάσεις στις οποίες τα αδρανή δύνανται να βρίσκονται, σε σχέση την υγρασία που περιέχουν. Έτσι έχουμε:

- i. Ξηρά (Oven Dry)
- ii. Μερικώς κορεσμένα (Air Dry)
- iii. Κορεσμένα - επιφανειακά στεγνά (Saturated, Surface Dry)
- iv. Κορεσμένα - επιφανειακά υγρά (Damp or Wet)

Οι περισσότερες περιπτώσεις σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος αφορούν αδρανή κορεσμένα - επιφανειακά στεγνά (SSD) ή ξηρά (OD). Στην πράξη όμως, τα αδρανή είναι συνήθως είτε μερικώς κορεσμένα (AD) είτε κορεσμένα - όχι επιφανειακά στεγνά. Ωστόσο, το ελαφροβαρές αδρανές αντιπροσωπεύει μία μοναδική περίπτωση κάθε φορά. Η πλειοψηφία συνθέσεων για την παραγωγή δομικού ελαφροσκυροδέματος, γίνονται με ξηρά αδρανή. Όμως, στην πράξη τα αδρανή δεν είναι κορεσμένα- επιφανειακά στεγνά (SSD), αλλά κορεσμένα - όχι επιφανειακά στεγνά (Damp or Wet). Η κατάσταση αυτή επιτυγχάνεται μέσω διαβροχής,

«μουλιάσματος». Το βασικότερο πρόβλημα των μελετητών είναι η εύρεση ενός εύκολου τρόπου για την μετατροπή των αναλογιών των ξηρών αδρανών των εργαστηρίων σε αναλογίες των «όπως είναι» (as it is) - σε επίπεδο υγρασίας- αδρανών.

Οι ποσότητες αλλά και η κοκκομετρική διαβάθμιση σε λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα υλικά των αδρανών που θα χρησιμοποιηθούν, έχουν σημαντική επίδραση στο παραγόμενο σκυρόδεμα. Ένα καλά διαβαθμισμένο μίγμα αδρανών, έχει συνεχή συνεισφορά σε μεγέθη κόκκων και παράγει το ελάχιστο περιεχόμενο κενών στο σκυρόδεμα. Έτσι απαιτείται κατ' επέκταση ελάχιστη ποσότητα τσιμεντόπαστας. Η επίτευξη οικονομίας στη χρήση του τσιμέντου συνοδεύεται και από αντίστοιχη βελτιστοποίηση των τεχνικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, καθώς επιτυγχάνεται μέγιστη αντοχή, καλύτερη ανθεκτικότητα και σταθερότητα των γεωμετρικών του χαρακτηριστικών.

Γενικά, μεγίστοποίηση του όγκου των αδρανών στο σκυρόδεμα επιτυγχάνεται όταν:

1. το μίγμα των αδρανών είναι καλά διαβαθμισμένο από τα μεγαλύτερα στα μικρότερα μεγέθη κόκκων,
2. οι κόκκοι διαθέτουν σφαιρικό σχήμα και,
3. η επιφάνεια των αδρανών είναι όσο το δυνατόν λιγότερο πορώδης.

Αντίθετα, σκυρόδεμα που περιέχει χονδρόκοκκα αδρανή με γωνιώδες σχήμα, υψηλό πορώδες και ενεδεχομένως όχι την κατάλληλη διαβάθμιση του μεγέθους των κόκκων, καταλαμβάνουν μικρότερο όγκο στο σκυρόδεμα.

Οι ίδιοι παράγοντες, (κοκκομετρική διαβάθμιση, σχήμα και υφή), επίσης καθορίζουν την ελάχιστη απαιτούμενη ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού (άμμου). Έχει επίσης παρατηρηθεί ότι όταν χρησιμοποιείται κανονικού βάρους άμμος, η ποσότητα του απαιτούμενου χονδρόκοκκου υλικού αυξάνεται. Ωστόσο, το ποσοστό του χονδρόκοκκου υλικού θα πρέπει να πλησιάζει τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή σύμφωνα με την εργασιμότητα και την τελειωσιμότητα του, εκτός εάν δοκιμές υποδεικνύουν ότι λιγότερη ποσότητα παρέχει βέλτιστα χαρακτηριστικά. Εξάλλου σε ορισμένες περιπτώσεις, η αντοχή μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το μέγεθος του ονομαστικού μέγιστου κόκκου χωρίς αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου.

Για κανονικού βάρους αδρανή, το φαινόμενο ειδικό βάρος των κλασμάτων που συγκρατούνται κάθε φορά στα διαφορετικά μεγέθη κοσκίνων είναι σχεδόν ίδιο. Έτσι τα ποσοστά κατά βάρος των συγκρατούμενων υλικών, αντιστοιχούν σε ποσοστά κατ' όγκο. Ωστόσο, το φαινόμενο ειδικό βάρος των διαφόρων μεγεθών των κλασμάτων των ελαφροβαρών αδρανών συνήθως αυξάνεται όσο το μέγεθος του κόκκου μειώνεται. Μερικοί κόκκοι ελαφροβαρών χονδρόκοκκων αδρανών μπορεί να επιπλέουν στο νερό, ενώ το υλικό

που περνά το κόσκινο Νο 100 (0,15 mm) μπορεί να έχει φαινόμενο ειδικό βάρος που να πλησιάζει αρκετά αυτό της κανονικού βάρους άμμο. Η επισήμανση αυτή έχει ιδιαίτερη αξία, καθώς το ποσοστό των κενών και της τσιμεντόπαστας επηρεάζει μεταξύ άλλων και την εργασιμότητα του σκυροδέματος και συναρτάται από τον όγκο που καταλαμβάνει το κάθε κλάσμα υλικού και όχι από το βάρος του.

Έτσι για παράδειγμα μίγμα αδρανών με μέτρο λεπτότητας άμμου 3,23 κατ' όγκο, αντιστοιχεί σε τιμή 3,03 κατά βάρος. Παρόλο που η τιμή 3,23 (κ.ο.) υποδηλώνει αρκετά «χονδροκόκη» διαβάθμιση υλικού, στην πραγματικότητα στο μίγμα των αδρανών περιέχεται μεγαλύτερο ποσοστό άμμου κατά βάρος.

Συμπερασματικά, συγκρίνοντας δυο κοκκομετρικές κατανομές, μία αδρανών κανονικού βάρους και μία ελαφροβαρών αδρανών, που έχουν το ίδιο μέτρο λεπτότητας, στη κατανομή των ελαφροβαρών αδρανών, θα περιέχεται μεγαλύτερο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, κατά βάρος.

Όπως αναφέρθηκε, σκυρόδεμα που εμπεριέχει κανονικού βάρους αδρανή, όπως για παράδειγμα, άμμο, μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαφροσκυρόδεμα μόνο όταν η αντοχή επιτυγχάνεται με χαμηλό μοναδιαίο βάρος. Η χρήση κανονικής άμμου συνήθως ευνοεί την αύξηση της τιμής της αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος και του μέτρου ελαστικότητας. Όμως ταυτόχρονα αυξάνεται το μοναδιαίο βάρος, σε τέτοιο βαθμό που το παραγόμενο σκυρόδεμα να μην χαρακτηρίζεται πλέον ως ελαφροσκυρόδεμα. [9]

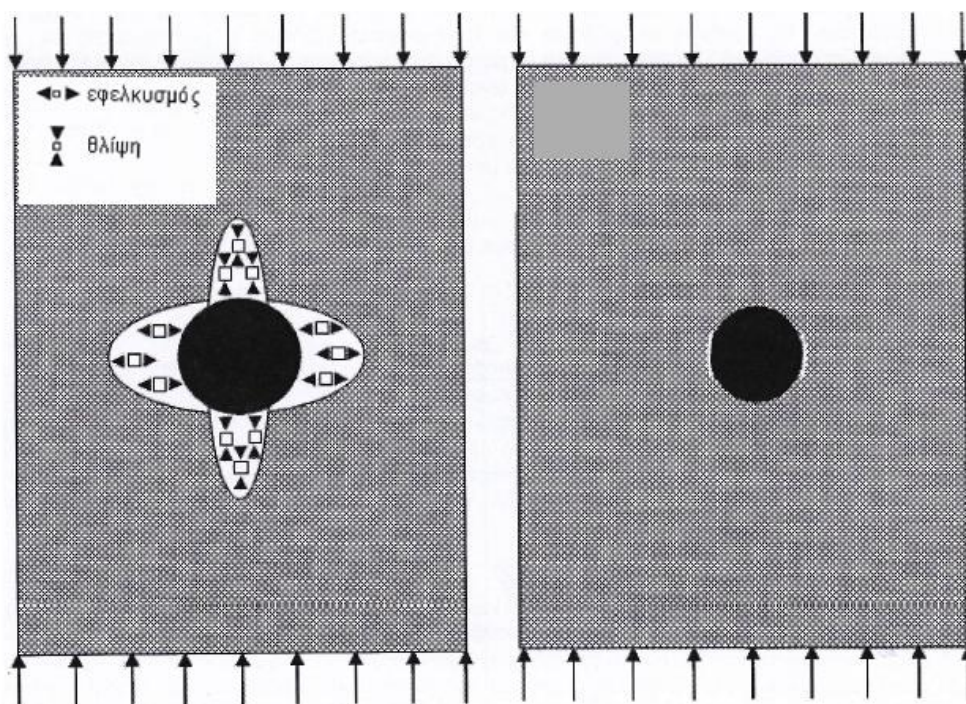
### 1.2.1.2. Μηχανικά Χαρακτηριστικά ελαφροβαρών αδρανών

Τα ελαφροβαρή αδρανή παρουσιάζουν διαφοροποιημένες μηχανικές ιδιότητες συγκριτικά με τα κανονικά αδρανή. Σημαντικές διαφοροποιήσεις παρατηρούνται στο μέτρο ελαστικότητας (E), στην αντοχή σε θλίψη αλλά και στην αντοχή σε εφελκυσμό και συγκεκριμένα τα ελαφροβαρή αδρανή παρουσιάζουν μικρότερες τιμές σε όλα τα παραπάνω μεγέθη, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4: [6]

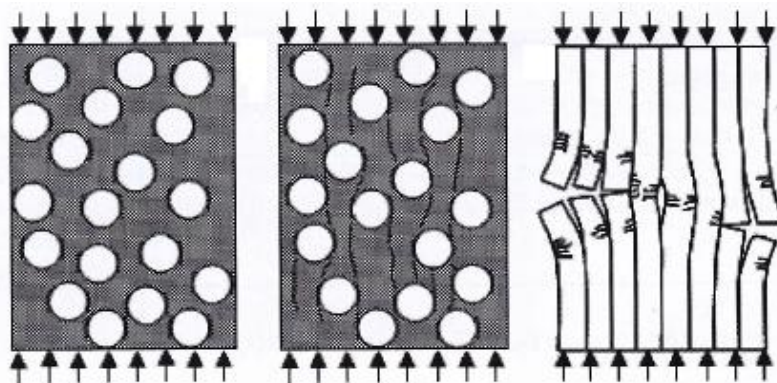
Πίνακας 4: [6]

ΙΔΙΟΤΗΤΑ (MPa)	Συνήθη Αδρανή	Ελαφροβαρή Αδρανή
Μέτρο Ελαστικότητας E	34000 - 70000	3000 – 10000
Αντοχή σε θλίψη	70 - 150	4 - 5
Αντοχή σε κάμψη	1.3 - 1.5	0.3 - 0.7

Απόρροια των διαφοροποιήσεων αυτών, είναι η διαφορά στη μορφή θραύσης σκυροδέματος που περιέχει κανονικά ή ελαφροβαρή αδρανή. Πιο συγκεκριμένα στην περίπτωση σκυροδέματος με συμβατικά αδρανή, δηλαδή στην περίπτωση που τα αδρανή έχουν μεγαλύτερο Μέτρο Ελαστικότητας ( $E$ ) σε σχέση με τον τσιμεντοπολτό, οι αναπτυσσόμενες τάσεις υπό την επιβολή κατακόρυφου θλιπτικού φορτίου έχουν τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 1. Με την αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων θλιπτικών τάσεων και έπειτα από κάποια τιμή του επιβαλλόμενου φορτίου και πάνω, το σκυρόδεμα θα αρχίσει να ρηγματώνεται στις θέσεις των μεγαλύτερων εφελκυστικών τάσεων όταν αυτές θα υπερβούν τις αντίστοιχες αντοχές. Στη συγκεκριμένη περίπτωση η ρωγμή θα δημιουργηθεί στη διεπιφάνεια με αποκόλληση του τσιμεντοπολτού από τη επιφάνεια του αδρανούς με αστοχία σε συνάφεια. Στο Σχήμα 2 φαίνονται οι πρώτες ρωγμές που θα αναπτυχθούν με την αύξηση της τιμής του επιβαλλόμενου φορτίου και η συνένωση τους εν συνεχεία για τη δημιουργία κατακόρυφων στηλών υλικού οι οποίες κατά τη φάση αστοχίας αποχωρίζονται η μια από την άλλη και καταρρέουν.

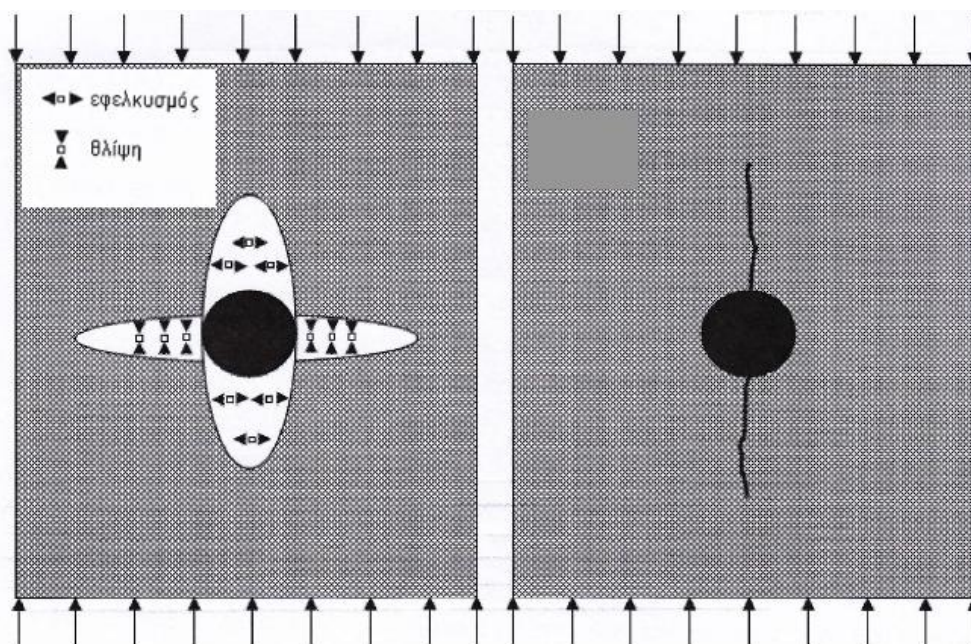


**Σχήμα 1:** Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη συνήθους σκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις [6]

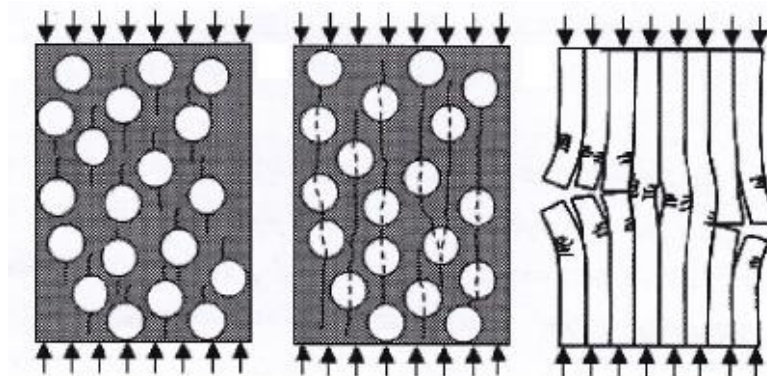


Σχήμα 2: Διαδοχικές φάσεις ρηγματώσης σε προσομοίωμα συμβατικού σκυροδέματος [6]

Στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος, όπου τα ελαφροβαρή αδρανή έχουν μέτρο ελαστικότητας ( $E$ ) μικρότερο από αυτό του τσιμεντοπολτού, η ανάπτυξη τάσεων στο υλικό με την επιβολή εξωτερικής θλιπτικής τάσης είναι διαφορετική. Ειδικότερα, οι εφελκυστικές τάσεις αναπτύσσονται στην πάνω και στην κάτω περιοχή του αδρανούς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3, με αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να ρηγματώνεται σε εκείνες τις θέσεις και οι αναπτυσσόμενες ρωγμές να διαπερνούν τελικά το ίδιο το αδρανές (Σχήμα 4). Διακρίνεται η ίδια μορφή αστοχίας με το σκυρόδεμα με συνήθη αδρανή, με τη δημιουργία παράλληλων με το επιβαλλόμενο θλιπτικό φορτίο λωρίδων στις θέσεις των αναπτυσσόμενων ρωγμών, με τη διαφορά όμως ότι οι ρωγμές πλέον διαπερνούν τα αδρανή και δεν τα παρακάμπτουν. [6] [8]



Σχήμα 3: Μηχανισμός θραύσης σε θλίψη ελαφροσκυροδέματος, αναπτυσσόμενες τάσεις στην περιφέρεια αδρανούς περιβαλλόμενου από σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και προκαλούμενες ρηγματώσεις [6]



Σχήμα 4: Διαδοχικές φάσεις ρηγμάτωσης σε προσομοίωμα ελαφροσκυροδέματος έως την αστοχία [6]

### 1.2.1.3. Αδρανή και θερμική αγωγιμότητα

Χαρακτηριστικό των ελαφροβαρών αδρανών είναι ότι γεγονός ότι εμφανίζουν μεγαλύτερο πορώδες, και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο είναι και πιο ελαφριά από τα συμβατικά. Τα μεγάλα κενά τους απαιτούν και περισσότερη ποσότητα νερού σε σχέση με τα κανονικά αδρανή, εμφανίζουν δηλαδή μεγαλύτερη υδατοαπορροφητικότητα. Όμως η ύπαρξη αυτή των κενών είναι που τα καθιστά θερμομονωτικά υλικά, καθώς παρουσιάζουν αυξημένη πυκνότητα αέρα και επομένως μικρότερη θερμική αγωγιμότητα. Έτσι λοιπόν, καθορίζουν και σε μεγάλο βαθμό τη θερμική αγωγιμότητα του ελαφροσκυροδέματος, καθώς στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος τα αδρανή είναι αυτά που καθορίζουν τη συμπεριφορά του. Αδρανή με μικρότερη θερμική αγωγιμότητα παράγουν σκυρόδεμα λιγότερο θερμικά αγωγίμο συγκριτικά με αδρανή μικρότερης θερμοχωρητικότητας τα οποία παράγουν σκυρόδεμα περισσότερο θερμικά αγωγίμο.

Άλλος παράγοντας που καθορίζει, σε μικρότερο βαθμό όμως, τη θερμική συμπεριφορά των αδρανών είναι η εσωτερική δομή που παρουσιάζουν. Ειδικότερα, αδρανή κρυσταλλικής και υαλώδους δομής, παρουσιάζουν αυξημένη θερμική αγωγιμότητα συγκριτικά με εκείνη των αδρανών άμορφης δομής καθώς συνιστούν μέσω των πλεγμάτων που ορίζονται, έναν ευνοϊκότερο τρόπο μετάδοσης της ενέργειας. [7] [8] [10] [11]

### 1.2.2. Κυριότερο Ελαφροβαρές Αδρανές στον ελλαδικό χώρο: Κίσσηρης

Η κίσσηρης ή αλλιώς ελαφρόπετρα (pumice) αποτελεί το κυριότερο και φθηνότερο φυσικό ελαφροβαρές αδρανές στη χώρα μας. Συναντάται στα νησιά της Δωδεκανήσου Γυαλί (από το οποίο εξορύσσεται σε μεγάλες ποσότητες), Νίσσηρο, Θήρα και Μήλο και προέρχεται από ένα εξαιρετικά πορώδες ηφαιστειακό πέτρωμα (πυριγενές υαλώδους μορφής). Αποτέλεσμα, η κίσσηρης χαρακτηρίζεται από χαμηλή φαινόμενη πυκνότητα (300 – 800 Kg/m<sup>3</sup>) και από υψηλή υδαταπορροφητικότητα (30% - 80% κ.β.).

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

Η κίσηρης είναι κατάλληλη για την παραγωγή ελαφροβαρών δομικών στοιχείων (κίσηρολίθων), ελαφροσκυροδέματος (δομικού και πληρώσεως) ελαφροβαρών προκατασκευασμένων στοιχείων και ελαφροβαρών μονωτικών επιχρισμάτων. Καθώς είναι ισχυρά απορροφητικό υλικό προσφέρεται για την εξυγίανση χαλαρών εδαφών και υπογείων υδάτων σε έργα οδοποιίας, κατασκευή λιμένων, γηπέδων κλπ..

Η κίσηρης ανήκει στην οικογένεια των πυριγενών πετρωμάτων. Πυριγενή είναι εκείνα τα πετρώματα τα οποία δημιουργούνται μετά τη στερεοποίηση του μάγματος. Το μάγμα είναι φυσικό τήγμα το οποίο υπάρχει μέσα στη γη σε διάφορα βάθη και όταν εκχυθεί στην επιφάνεια γίνεται λάβα.

Τα κυριότερα πυριγενή πετρώματα είναι ο γρανίτης, ο ρυόλιθος, ο πηγματίτης ή απλίτης, ο συηνίτης, ο τραχείτης, ο γρανοδιορίτης, ο δακίτης, ο διορίτης, ο ανδεσίτης, ο γάββρος, ο βασάλτης και οι περιδοτίτες.

Συγκεκριμένα, ο ρυόλιθος είναι το αντίστοιχο έκχυτο του γρανίτη. Έχει πορφυριτικό ιστό και αποτελείται από φαινοκρυστάλλους χαλαζία και σανιδίνου. Από τα φεμικά επικρατεί ο βιοτίτης και σπάνια εμφανίζεται η κεροσίλβη. Ρυολιθική λάβα με νερό 3-10% και με σφαιρική μορφή, λέγεται περλίτης, ενώ με κίσηρώδη υφή, λόγω διαφυγής πολλών αερίων λέγεται κίσηρης.

Η κίσηρης είναι ένα χημικά αδρανές, πορώδες, ηφαιστειογενές ορυκτό. Το πορώδες του υλικού οφείλεται στα κενά που δημιουργούνται από τη διαφυγή ατμού κατά την ψύξη της λάβας. Τα γενικά φυσικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Χαμηλό ειδικό βάρος
- Σταθερό ομοιόμορφο χρώμα
- Θερμομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες
- Μεγάλη μηχανική αντοχή

Η τυπική χημική σύσταση της κίσηρης αποτελείται από:

**Πίνακας 5:** Τυπική χημική σύσταση της κίσηρης [1]

Οξείδιο του Πυριτίου	SiO <sub>2</sub>
Οξείδιο του Αργιλίου	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Τριοξειδίου του Σιδήρου	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Οξείδιο του Ασβεστίου	CaO
Οξείδιο του Μαγνησίου	MgO
Τριοξείδιο του Θείου	SO <sub>3</sub>
Οξείδιο του Καλίου	K <sub>2</sub> O
Οξείδιο του Νατρίου	Na <sub>2</sub> O
Απώλεια Πυρώσεως	

Στην Εικόνα 1 φαίνεται δείγμα κίσηρης με προέλευση από τη Ν. Γουαλί της Ν. Νισύρου.



Εικόνα 1: Κίσηρης πιοκίλης κοκκομετρικής διαβάθμισης [1]

### 1.3. Χάλυβας

#### 1.3.1. Γενικά

Ο χάλυβας προέρχεται από το σίδηρο, με κατάλληλη επεξεργασία και κάποιες προσμείξεις. Αποτελεί κράμα σιδήρου - άνθρακα, που περιέχει επίσης πολύ μικρά ποσοστά πυριτίου, φωσφόρου, θείου και άλλων στοιχείων. Τα είδη χαλύβων που παράγονται και διατίθενται στην αγορά είναι πολλά και διαφορετικά, με διαφορετικές ιδιότητες και εφαρμογές. Ένα από αυτά τα είδη είναι και ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος.

Η παραγωγική διαδικασία του χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος περιλαμβάνει μια σειρά σταδίων. Αρχικά γίνεται η παραγωγή ρευστού χάλυβα από τήξη παλαιοσιδήρου (scrap) μέσα σε καμίνους. Εν συνεχεία ο χάλυβας υφίσταται επεξεργασία κατά την οποία αφαιρούνται τα άχρηστα συστατικά. Ακολουθεί η χύτευσή του, με αποτέλεσμα την παραγωγή των λεγόμενων μπιγιετών (ή πρισμάτων), που είναι στην ουσία μεγάλες δοκοί τετραγωνικού ή κυκλικού σχήματος. Σε επόμενο στάδιο οι μπιγιέτες θερμαίνονται και προωθούνται σε διαδοχικά περιστρεφόμενα έλαστρα, τα οποία επιτυγχάνουν τη μείωση του πάχους τους. Με αυτή τη διαδικασία ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος παίρνει την τελική



του μορφή, η οποία είναι μια ράβδος κυκλικού σχήματος, ή καλύτερα πρακτικά κυκλικού, αφού ο μεν πυρήνας της ράβδου είναι κυλινδρικού σχήματος, όμως στην επιφάνειά της φέρει και πλάγιες ανάγλυφες γραμμές, τις λεγόμενες νευρώσεις. Οι νευρώσεις έχουν σχήμα μηνίσκου (μισοφέγγαρου), ο δε λόγος της ύπαρξής τους είναι η αύξηση της συνάφειας μεταξύ της χαλύβδινης ράβδου και του σκυροδέματος για την καλύτερη μεταξύ τους συνεργασία. Για την κατασκευή αντισεισμικών κτιρίων, οι ισχύοντες κανονισμοί επιτρέπουν τη χρήση μόνο χαλύβων με νευρώσεις (νευροχαλύβων).

### 1.3.2. Χημική Σύσταση Χάλυβα Οπλισμού

Ανάλογα με την εποχή ανέγερσης του κάθε δομήματος και με τους τότε ισχύοντες κανονισμούς χρησιμοποιούνταν και συγκεκριμένος τύπος χάλυβα (Πίνακας 6). κατά τα Πρότυπα ΕΛΟΤ και του Νέου Κανονισμού Τεχνολογίας Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008 στην Ελλάδα σήμερα χρησιμοποιούνται οι χάλυβες B500A και B500C. Οι χάλυβες αυτοί παράγονται με κατάλληλη θερμική επεξεργασία. Στην επιφάνεια και στο εξωτερικό πείβλημα των χαλύβων αυτών υπάρχει η σκληρή μαρτενσιτική δομή, η οποία έχει μεγάλη μηχανική αντοχή αλλά μειωμένη πλαστιμότητα. Στο εσωτερικό επικρατεί η φερριτο – περλιτική δομή η οποία έχει υψηλή πλαστιμότητα αλλά μικρότερη μηχανική αντοχή. Ο συνδυασμός αυτός έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή χάλυβα με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες, που είναι ωστόσο ιδιαίτερα ευάλωτος σε διαβρωτικό περιβάλλον. [12]

Πίνακας 6: Χημικές Συνθέσεις, Τρόποι Παραγωγής και Περίοδοι Χρήσης [12]

Κατηγορία Χάλυβα	Τυπική Χημική Σύσταση (% κ.β.)					Τρόπος Παραγωγής	Κύρια Περίοδος Χρήσης
	C	Mn	Si	S	P		
St I & S220	0,08 - 0,12	~0,50	~0,10	0,03 - 0,06	0,01 - 0,05	-	Θ.Ε. - Χ ως '70
St IIIα & S400	0,30 - 0,40	0,80 - 1,00	0,20 - 0,30	0,03 - 0,06		-	Θ.Ε. - Χ '60 ως '95
St IIIβ & ελικ/βας	0,10 - 0,15	~0,50	~0,10			-	Ψ.Κ. - Σ '60 ως '70
S500	0,35 - 0,40	1,00 - 1,20	0,20 - 0,30	0,03 - 0,06		0,02 - 0,03	Θ.Ε. - Χ '90 - '95
S400s	~ 0,15	0,60 - 1,00	0,15 - 0,30	0,03 - 0,05		-	Θ.Ε. - Θ '90 - '96
S500s	0,18 - 0,20	1,00 - 1,20	0,20 - 0,30	0,03 - 0,05		0,04 - 0,09	Θ.Ε. - Χ '90 - '97
S500s	0,15 - 0,20	0,60 - 1,00	0,15 - 0,30	0,03 - 0,05		-	Θ.Ε. - Θ '92- '07
B500A	0,20 - 0,22	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30	0,03 - 0,05		-	Θ.Ε. - Θ ή Ψ.Κ. - Ο από '06
B500c	0,20 - 0,22	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30	0,03 - 0,05		-	Θ.Ε. - Θ από '06

### 1.3.3. Διάκριση και Μορφές Χαλύβων

Βάσει των υφιστάμενων Ευρωπαϊκών Προτύπων που διέπουν την παραγωγή χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος, τρεις είναι οι κατηγορίες ποιότητας στις οποίες κατατάσσεται. Ονομάζονται B500C, B500B και B500A. Τα διακριτικά C, B και A υποδηλώνουν την ολκιμότητα του χάλυβα, με το C να υποδηλώνει την υψηλή ολκιμότητα, το B τη μέση και το A τη χαμηλή. Το Ελληνικό Πρότυπο ορίζει και δέχεται δύο μόνο κατηγορίες εξ αυτών, την C και την A. Η ολκιμότητα είναι όρος που μετράει την παραμόρφωση που μπορεί να υποστεί ένα υλικό χωρίς να σπάσει. Ο χάλυβας οπλισμού σκυροδέματος πρέπει να έχει υψηλή ολκιμότητα, αφού ο όλκιμος χάλυβας οδηγεί σε φέρον οργανισμό υψηλής πλαστιμότητας, υψηλής δηλαδή ικανότητας των μελών του σκελετού να παραμορφώνονται, χωρίς σημαντική μείωση της αντοχής τους. Όλα αυτά συντελούν σε μεγαλύτερη απορρόφηση σεισμικής ενέργειας, μειώνοντας τον κίνδυνο κατάρρευσης του κτιρίου. Έτσι, σε μια κατασκευή σχεδόν στο σύνολό του ο χάλυβας που χρησιμοποιείται είναι ολκιμότητας C, ενώ χάλυβας ολκιμότητας A μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε δομικά στοιχεία που δεν έχουν μεγάλες απαιτήσεις για σιδηρό οπλισμό, όπως οι πλάκες που ακουμπούν στο έδαφος. Για την εύκολη αναγνώριση του Χάλυβα Οπλισμού Σκυροδέματος έχει θεσπιστεί και ισχύει ένα υποχρεωτικό σύστημα σημάσεως. Έτσι, ο χάλυβας αναγνωρίζεται βάσει της διάταξης των νευρώσεων στην επιφάνεια της κάθε ράβδου. Ο τρόπος διάταξης φανερώνει τη χώρα και το εργοστάσιο παραγωγής, καθώς και την κατηγορία του χάλυβα, όπως καθορίζονται από τα Ευρωπαϊκά και διεθνή πρότυπα. [12]

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διακρίνονται καταρχάς σύμφωνα με τη μέθοδο παραγωγής τους σε:

- Θερμής έλασης, χωρίς καμιά άλλη περαιτέρω θερμική ή θερμομηχανική κατεργασία οποιασδήποτε μορφής (χάλυβες ΘΕ – Χ)
- Θερμής έλασης, που ακολουθείται από μια άμεση εν σειρά διαδικασία θερμικής κατεργασίας (χάλυβες ΘΕ – Θ)
- Ψυχρής κατεργασίας, με ολκή ή έλαση του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ – Ο) ή με στρέψη του αρχικού προϊόντος που προέρχεται από θερμή έλαση (χάλυβες ΨΚ – Σ) ή με συνδυασμό των παραπάνω.

Σύμφωνα με τη μορφή της επιφάνειας της ράβδου σε:

- Λείους χάλυβες κυκλικής διατομής
- Χάλυβες με ανάγλυφες νευρώσεις, υψηλής συνάφειας

- Χάλυβες με κοιλότητες (έγγλυφες αυλακώσεις)

Σύμφωνα με την ολκιμότητα, σε:

- Χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας
- Χάλυβες μέσης ολκιμότητας
- Χάλυβες υψηλής ολκιμότητας

Στους χάλυβες χαμηλής ολκιμότητας κατατάσσονται οι χάλυβες κατηγορίας B500A κατά ΕΛΟΤ 1421 – 2 οι οποίοι επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται μόνο για την παραγωγή τυποποιημένων δομικών πλεγμάτων και δικτυωμάτων μέχρι διάμετρο Φ8. Στους χάλυβες υψηλής ολκιμότητας κατατάσσονται οι χάλυβες κατηγορίας B500C κατά ΕΛΟΤ 1421 – 3, οι οποίοι καλύπτουν τις αυξημένες απαιτήσεις για αντισεισμική συμπεριφορά των κατασκευών, όπως προβλέπεται από τον Ελληνικό Κανονισμό Ωπλισμένου Σκυροδέματος (ΕΚΩΣ) και τους Ευρωκώδικες.

Σύμφωνα με τη συγκολλησιμότητα σε:

- Χάλυβες συγκολλησίμους
- Χάλυβες μη συγκολλησίμους ή συγκολλησίμους υπό προϋποθέσεις

Τέλος, με βάση την αντοχή τους σε διάβρωση κατατάσσονται σε:

- Κοινούς χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με άνθρακα (Fe – C) και με άλλα στοιχεία σε μικρές περιεκτικότητες
- Ανοξειδωτους χάλυβες, που είναι κράματα σιδήρου με ελάχιστη περιεκτικότητα σε χρώμιο (Cr) 12%. Οι χάλυβες αυτοί είναι ανθεκτικοί σε διάβρωση και ή αντοχή τους σε διαβρωτικό περιβάλλον είναι μεγαλύτερη αν περιέχουν και άλλα κραματικά στοιχεία όπως νικέλιο (Ni), μολυβδένιο (Mo), τιτάνιο (Ti) κλπ..

Οι χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος διατίθενται με τη μορφή είτε ευθύγραμμων ράβδων, πλεγμάτων, δικτυωμάτων, σε κουλούρες ή ως ευθυγραμμισμένα προϊόντα. [13]

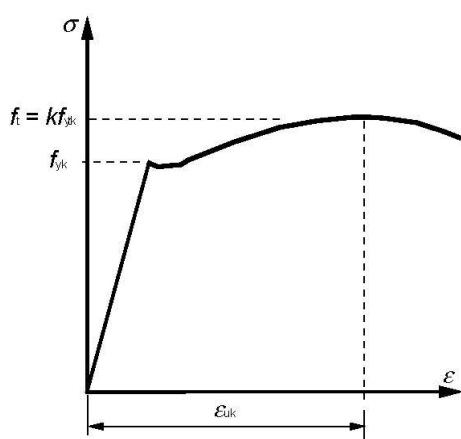
Όπως προαναφέρθηκε, η συνηθέστερη μορφή με την οποία διατίθενται οι χάλυβες οπλισμού είναι η ευθύγραμμη ράβδος, η οποία αποκαλείται και μπετόβεργα ή σιδερόβεργα. Οι ράβδοι του οπλισμού παράγονται σε διαμέτρους που εκφράζονται με τον αριθμό των χιλιοστών, με κατώτατο όριο τα 6 mm και ανώτατο τα 40 mm. Σχετικά με τα μήκη που παράγονται, έχουν επικρατήσει δύο διαστάσεις, των 12 m και των 14 m. [12]

### 1.3.4. Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβων

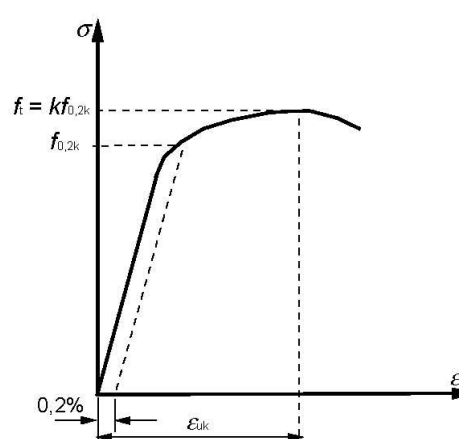
Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 EN 1992 - 1 - 1 οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων συνοψίζονται στον Πίνακα 7 και Σχήμα 5: [14]

Πίνακας 7: Χημικές Συνθέσεις, Τρόποι Παραγωγής και Περίοδοι Χρήσης [14]

Μορφή προϊόντος	Ράβδοι και ράβδοι που προέρχονται από κουλούρες			Πλέγματα			Απαίτηση ή πιθανότητα μη συμμόρφωσης (%)
	A	B	C	A	B	C	
Κατηγορία	A	B	C	A	B	C	-
Χαρακτηριστική αντοχή διαρροής $f_{yk}$ ή $f_{0,2k}$ (MPa)	400 έως 600						5,0
Ελάχιστη τιμή του $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10,0
Χαρακτηριστική ανηγμένη παραμόρφωση στην μέγιστη δύναμη, $\epsilon_{uk}$ (%)	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10,0
Καμψιμότητα	Δοκιμή Κάμψης/Ανάκαμψης			-			
Διατμητική αντοχή	-			0,3 $A f_{yk}$ (A είναι η επιφάνεια της ράβδου)			Ελάχιστη
Μέγιστη απόκλιση από την ονομαστική μάζα (μεμονωμένη ράβδος) (%)	Ονομαστική διάμετρος ράβδου (mm) $\leq 8$ $> 8$			$\pm 6,0$ $\pm 4,5$			5,0



α) Χάλυβας κατεργασμένος εν θερμώ



β) Χάλυβας κατεργασμένος εν ψυχρώ

Σχήμα 5: Σχηματικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων τυπικού χάλυβα σπλισμού (δίνονται οι απόλυτες τιμές της εφελκυστικής τάσης και της παραμόρφωσης) [14]

## 1.4. Πρόσθετα Σκυροδέματος

### 1.4.1. Γενικά

Πρόσθετα ή ακριβέστερα χημικά πρόσθετα είναι χημικές ουσίες οι οποίες προστίθενται στο μίγμα του σκυροδέματος (αλλά και του κονιάματος ή ενέματος) συνήθως κατά τη διάρκεια της ανάμιξης, προκειμένου να βελτιώσουν τις ιδιότητες του νωπού ή και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται είναι πολύ μικρές. Διατίθενται στην αγορά υπό τη μορφή σκόνης ή συνηθέστερα υπό μορφή υδατικού διαλύματος με περιεκτικότητα σε πρόσθετο συνήθως περίπου 35 – 50% για να διευκολύνεται η σωστή δοσολόγηση και ανάμιξή τους. Ακόμη όμως και στη μορφή αυτή, οι ποσότητες που χρησιμοποιούνται είναι τόσο μικρές, που είναι πολύ σπάνιο να αλλοιώνονται σημαντικά οι αναλογίες σύνθεσης του σκυροδέματος και να χρειάζεται να λαμβάνεται υπόψη η επιπλέον ποσότητα νερού, που περιέχεται στο πρόσθετο, στην ολική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται στο μίγμα. Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206 και την ελληνική έκδοσή του ΕΛΟΤ EN 206, αν η συνολική ποσότητα του υγρού προσθέτου υπερβαίνει τα  $3 \text{ l/m}^3$ , τότε είναι απαραίτητο η ποσότητα του νερού που περιέχει το πρόσθετο να λαμβάνεται υπόψη στη σύνθεση του σκυροδέματος και στον υπολογισμό του λόγου N/T.

Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα προσθέτου συνήθως υπολογίζεται ως ποσοστό κατά μάζα του τσιμέντου ή του τσιμέντου και των λοιπών συνδετικών υλικών (πυριτική παιπάλη, ιπτάμενη τέφρα, σκωρία) που μπορεί να περιέχονται στο μίγμα του σκυροδέματος.

Οι ποσότητες αυτές του προσθέτου δεν είναι μεγαλύτερες από 5% κ.μ. αλλά συνήθως σπάνια υπερβαίνουν το 3% με συνηθέστερα ποσοστά που κυμαίνονται μεταξύ του 0,3 – 2%.

Η χρήση των προσθέτων είναι συνεχώς αύξουσα τα τελευταία χρόνια και θα μπορούσε να λεχθεί ότι μόνο ένα μόνο μικρό ποσοστό των παραγόμενων σκυροδεμάτων δεν περιέχουν κάποιο πρόσθετο. Επίσης, θα πρέπει να τονισθεί ότι χάρη στις εξελίξεις των προσθέτων έγινε δυνατή η παραγωγή νέων τύπων σκυροδεμάτων όπως το αυτοσυμπυκνούμενο ή αυτοεπιπεδούμενο σκυρόδεμα και η ευρύτερη στην πράξη παραγωγή σκυροδεμάτων με πολύ μικρή περιεκτικότητα σε νερό και πολύ μεγάλη αντοχή (100 – 140 MPa) (σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας).

Η παραγωγή και χρήση προσθέτων καλύπτονται από Πρότυπα, όπως:

- Ευρωπαϊκού Τύπου Πρότυπα:
  - ΕΛΟΤ EN 934: καλύπτει όλους τους τύπους αλλά δε συμπεριλαμβάνει τύπους όπως αναστολείς διάβρωσης, πρόσθετα παραγωγής αφρού, πρόσθετα παρεμπόδισης ξεπλύματος, παρεμπόδισης συστολής κ.α.

- Αμερικάνικου Τύπου Πρότυπα:
  - ASTM C 494: ρευστοποιητικά και πρόσθετα ρυθμιστικά πήξης
  - ASTM C 260: αερακτικά
  - ASTM D 98: χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ )
  - ASTM C 1017: πρόσθετα για την παραγωγή ρευστού σκυροδέματος
  - ASTM 979: χρωστικές ύλες για χρήση στο σκυρόδεμα

Τα κυριότερα είδη προσθέτων είναι:

- i. Πλαστικοποιητικά ή Ρευστοποιητικά ή μειωτικά νερού
- ii. Υπερ-πλαστικοποιητικά ή Υπερ-ρευστοποιητικά ή ρευστοποιητικά/μειωτές νερού μεγάλης απόδοσης
- iii. Αερακτικά
- iv. Επιταχυντικά
- v. Επιβραδυντικά
- vi. Στεγανοποιητικά ή απωθητικά νερού
- vii. Συνδυασμός ρευστοποιητικών και επιβραδυντικών ή επιταχυντικών
- viii. Περιορισμού Συστολής Ξήρανσης
- ix. Αναστολείς διάβρωσης οπλισμού
- x. Παραγωγής Αφρού

Σημειώνεται ότι πολλά από τα πλαστικοποιητικά (i) είναι και επιβραδυντικά σε ορισμένες σχετικά υψηλές αναλογίες, ενώ τόσο τα πλαστικοποιητικά όσο και τα υπερ-πλαστικοποιητικά μπορεί να συντελέσουν στην απώλεια μέρους του αέρα που σκόπιμα εισήχθη σε μίγμα με χρήση αερακτικών προσθέτων.

Τα πρόσθετα εκτός από την πρωτεύουσα βασική δράση τους έχουν συνήθως και δευτερεύουσες δράσεις, επηρεάζουν την επιλογή τους για μια συγκεκριμένη χρήση. [6]

## 1.4.2. Ρευστοποιητές & Υπερ – ρευστοποιητές

### 1.4.2.1. Γενικά

Είναι επιφανειακώς δρώντα οργανικά πολυμερή υλικά με πολύ μικρότερο μέγεθος από αυτό του τσιμέντου. Για παράδειγμα, το μέγεθος του gel του λιγνοσουλφονικού προσθέτου είναι μικρότερο από το 1/1000 του κόκκου του ανυδάτωτου τσιμέντου.

Τα ρευστοποιητικά/πλαστικοποιητικά και τα υπερ- ρευστοποιητικά/υπερ-πλαστικοποιητικά έχουν πρώτα από όλα τον ίδιο μηχανισμό δράσης και διαφέρουν μεταξύ τους στο βαθμό απόδοσης ο οποίος είναι σημαντικότερος και συγκεκριμένα 3 - 4 φορές μεγαλύτερος, στην περίπτωση των υπερ-ρευστοποιητικών προσθέτων. Ειδικότερα:

- Τα συνήθη ρευστοποιητικά – πλαστικοποιητικά πρόσθετα επιτυγχάνουν μείωση του απαιτούμενου νερού σε σύγκριση με το ίδιο το σκυρόδεμα με την ίδια εργασιμότητα χωρίς πρόσθετο, μέχρι 12%. Συνήθως, όμως επιτυγχάνονται μειώσεις που κυμαίνονται από 5 -10%
- Τα υπέρ- ρευστοποιητικά/υπέρ – πλαστικοποιητικά πρόσθετα επιτυγχάνουν μείωση του απαιτούμενου νερού σε σύγκριση με το ίδιο το σκυρόδεμα με την ίδια εργασιμότητα χωρίς πρόσθετο, μεγαλύτερη από 12% και μπορεί να υπερβεί το 30%.

Τα συνήθη ρευστοποιητικά/πλαστικοποιητικά πρόσθετα περιλαμβάνουν μια σειρά από πρόσθετα με χημική σύσταση όπως:

- i. Λιγνοσουλφονικά άλατα ή παράγωγα λιγνοσουλφονικού οξέος που είναι φυσικά πολυμερή, υποπροϊόντα βιομηχανιών χαρτιού κλπ.
- ii. Υδροξυλιωμένα πολυμερή
- iii. Παράγωγα υδροκαρβοξυλικών οξέων
- iv. Πολυκαρβοξυλικούς αιθέρες (PCE)
- v. Συνδυασμό προσθέτων λιγνοσουλφονικής βάσης i με τα ii, iii, iv ή άλλα χημικά συστατικά για την κατάλληλη μετατροπή τους ως προς τις προστιδόμενες ιδιότητες στο σκυρόδεμα.

Αποτελούν μαζί με τα ρευστοποιητικά πρόσθετα που συνδυάζουν επιπλέον και επιβραδυντική δράση τα συνηθέστερα σήμερα χρησιμοποιούμενα πρόσθετα στη βιομηχανία Έτοιμου Σκυροδέματος.

Τα πρόσθετα αυτά χρησιμοποιούνται για να:

- αυξήσουν την εργασιμότητα, για παράδειγμα κάθιση να γίνει από 75 mm στα 120 mm, χωρίς μεταβολή των ποσοτήτων σύνθεσης του μίγματος, οπότε και δεν μεταβάλλεται και η αντοχή αλλά το σκυρόδεμα μπορεί να διαστρωθεί ικανοποιητικά με τα διατιθέμενα μέσα
- μειώσουν το απαιτούμενο νερό με διατήρηση της ίδιας εργασιμότητας και του τσιμέντου στο μίγμα, οπότε επιτυγχάνεται μείωση του λόγου N/T και επομένως αύξηση της αντοχής και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος
- να επιτευχθεί συνδυασμός των παραπάνω δράσεων δηλαδή, μείωση του νερού αλλά και αύξηση της εργασιμότητας σε μικρότερη όμως κλίμακα από τις παραπάνω δράσεις

Τα υπερ-ρευστοποιητικά/υπερ-πλαστικοποιητικά πρόσθετα έχουν κύριο συστατικό:

- i. Σουλφοριωμένα συμπυκνώματα ναφθαλενίου – φορμαλδεΰδης (SNF)
- ii. Σουλφοριωμένα συμπυκνώματα μελαμίνης φορμαλδεΰδης (SMF)

- iii. Πολυκαρβοξυλικοί αιθέρες
- iv. Παράγωγα συμπολυμερών βινιλίου και συμπυκνώματα αμινοσουλφονικής φορμαλδεΐδης

Τα κύρια συστατικά μπορούν να συνδυασθούν μεταξύ τους ή με πρόσθετα λιγνοσουλφονικής δράσης, δηλαδή συνήθη ρευστοποιητικά, προκειμένου να προσδώσουν νέα πρόσθετα με μεγάλο εύρος ρεολογικών και λοιπών χαρακτηριστικών που μπορεί να ικανοποιήσει συγκεκριμένες απαιτήσεις,

Τα υπερ-ρευστοποιητικά πρόσθετα αναπτύχθηκαν τη δεκαετία του 1970 – ταυτόχρονα στη Γερμανία και την Ιαπωνία – και χρησιμοποιούνται στην προκατασκευή, στο Έτοιμο Σκυρόδεμα και στα επί τόπου σκυροδέματα για να επιτευχθεί:

- Μεγάλη αντοχή σε μικρή αλλά και σε μεγάλη ηλικία
- Μεγάλη ρευστότητα/ εργασιμότητα στο σκυρόδεμα σε περιπτώσεις πυκνού οπλισμού
- Μεγάλη ανθεκτικότητα (μικρός λόγος N/T, μικρή διαπερατότητα)
- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα ή σκυρόδεμα μεγάλης επιτελεστικότητας (high performance concrete) [6] [15]

#### 1.4.2.2. Αποτελεσματικότητα

Η ομοιόμορφη και πλήρης ανάμιξη των προσθέτων με το σκυρόδεμα είναι βασική προϋπόθεση αλλά πέραν αυτής η αποτελεσματικότητα των πρόσθετων αυτών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από:

- το είδος του τσιμέντου και συγκεκριμένα την περιεκτικότητα σε  $C_3A$ , αλκάλια (K, Na), ποζολάνες, θειικά  $SO_3$ , και την λεπτότητά του
- την ποσότητα του τσιμέντου στο μίγμα – η απαιτούμενη δόση μπορεί να μειώνεται όσο αυξάνει η περιεκτικότητα σε τσιμέντο
- την ποσότητα του νερού
- το είδος των αδρανών
- την ύπαρξη αερακτικού
- τη θερμοκρασία
- τη χρονική στιγμή που γίνεται η ανάμιξη του προσθέτου. Έχει παρατηρηθεί ότι η αποτελεσματικότητα βελτιώνεται σημαντικά αν το πρόσθετο αναμιχθεί με μια μικρή καθυστέρηση σε σχέση με το νερό, έστω και 20 sec. Καθυστερήσεις όμως μεγαλύτερες των 6 min, δε φαίνεται να επιφέρουν περαιτέρω βελτίωση. Έχει διατυπωθεί η άποψη ότι η θεωρητικά βέλτιστη στιγμή ανάμιξης του προσθέτου είναι η έναρξη της περιόδου αδράνειας της χημικής αντίδρασης ενυδάτωσης, αλλά αυτό



δεν είναι πρακτικά εύκολο να πραγματοποιηθεί. Επισημαίνεται ότι τα πρόσθετα δεν πρέπει σε καμία περίπτωση να προστίθενται στα ξηρά αδρανή, ή στο μίγμα τσιμέντου – αδρανών πριν από την προσθήκη του μεγαλύτερου αν όχι όλου του νερού διότι ένα μεγάλο μέρος αυτών εξουδετερώνεται αναλίσκόμενο στην επιφάνεια των αδρανών.

- την αρχική κάθιση χωρίς πρόσθετο του σκυροδέματος. Όσο μικρότερη είναι τόσο λιγότερο αποτελεσματικό είναι το πρόσθετο. Αυτό είναι μια επιπλέον απόδειξη ότι τα πρόσθετα δε χρησιμοποιούνται για διόρθωση σφαλμάτων στη σύνθεση του σκυροδέματος και ότι κάθε προσπάθεια πρέπει να καταβάλλεται έτσι ώστε η σύνθεση να είναι η καλύτερη δυνατή για να επιτευχθεί και η μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα των προσθέτων. [6] [15]

## 1.5. Ελαφροσκυρόδεμα

### 1.5.1. Φυσικά Χαρακτηριστικά Ελαφροσκυροδέματος – Σύγκριση

Η λογική της χρήσης ελαφροσκυροδέματος στις κατασκευές έγκειται πρωτίστως στην προσπάθεια μείωσης του ίδιου βάρους των κατασκευών, καθώς το ελαφροσκυρόδεμα είτε με μείωση της ποσότητας τσιμέντου λόγω αντικατάστασης με υδραυλικά συστατικά (ποζολάνες) είτε με τη χρήση ελαφροβαρών αδρανών κίσηρης, περλίτης κλπ.), παρουσιάζει μικρότερο ειδικό βάρος. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται και τα σεισμικά φορτία που αναλαμβάνουν οι κατασκευές σε περίπτωση σεισμικής φόρτισης, καθώς είναι ανάλογα της μάζας τους και επομένως μειώνεται ο κίνδυνος αστοχίας λόγω σεισμού. Επιπρόσθετα, μικρότερο βάρος στο υλικό κατασκευής σημαίνει και μικρότερο συνολικό φορτίο, άρα και μικρότερες διαστάσεις διατομών των μελών της κατασκευής το οποίο μεταφράζεται σε λιγότερο σπλισμό, μικρότερη επιβάρυνση στη θεμελίωση και επομένως μείωση του κόστους. Επιπλέον, η δυνατότητα για μικρότερες διατομές δίνει ένα ακόμα πλεονέκτημα στην αισθητική διάσταση των κατασκευών καθώς επιτρέπεται μεγαλύτερη ελευθερία σχεδιασμού με μεγαλύτερα ανοίγματα και ύψη και δεν είναι λίγες οι φορές που η χρήση του ελαφροσκυροδέματος μπορεί να έχει εφαρμογή σε αρχιτεκτονικές λύσεις που είναι αδύνατες με το κανονικό σκυρόδεμα. [8] [16]

Ένα ακόμα πλεονέκτημα στη χρήση ελαφροσκυροδέματος είναι οι θερμομονωτικές ικανότητες που αυτό προσφέρει. Τα τελευταία χρόνια, στις χώρες ήπιου κλίματος, συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας, δίνεται έμφαση στην ενεργειακή πλευρά των κατασκευών και συγκεκριμένα στην μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης αυτών. Προς αυτή την κατεύθυνση, είναι και η προσπάθεια εύρεσης καινοτόμων και αποτελεσματικών λύσεων για τη θερμομόνωση των κτιρίων. Η μεταφορά της θερμότητας με τον αποδοτικότερο τρόπο

χρησιμοποιώντας επαρκή υλικά μεταξύ των εσωτερικών και εξωτερικών στοιχείων της κατασκευής, είναι εξίσου σημαντική με την αποφυγή των ενεργειακών απωλειών μιας κατοικίας. Έτσι, η γνώση των φυσικών ιδιοτήτων των υλικών κατασκευής και ειδικότερα του σκυροδέματος, είναι απαραίτητη σε όλα τα έργα πολιτικού μηχανικού. [7]

Η ύπαρξη κενών αέρα και η κρυσταλλική δομή του, δίνει στο ελαφροσκυρόδεμα τη δυνατότητα, πέραν του μικρού βάρους, να είναι και πιο θερμομονωτικό, άρα λιγότερο ενεργειακό. [6] Επίσης, η χρήση του στα δομικά στοιχεία της κατασκευής, μπορεί να αποτρέψει τις απώλειες από τη διαφορά θερμοκρασίας και επομένως τη δημιουργία θερμογεφυρών, που ενδέχεται να προκύψουν με τη χρησιμοποίηση συμβατικού σκυροδέματος σε πρέκια παραθύρων, κολώνες και δοκούς από σκυρόδεμα οι οποίες συνδέουν την εσωτερική με την εξωτερική πλευρά των τοίχων. [9] [17]

Η θερμική συμπεριφορά του σκυροδέματος και επομένως και του ελαφροσκυροδέματος, όπως αναφέρθηκε και πρωτίτερα, εξαρτάται πρωτίστως από το είδος και την ποσότητα των αδρανών που περιέχει. Χαλαζιτικά και ψαμμιτικά αδρανή έχουν την υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα, γρανιτικά, σχιστολιθικά και δολομιτικά ενδιάμεση θερμική αγωγιμότητα, ενώ αδρανή όπως ο βασάλτης παρουσιάζουν την ελάχιστη. Αδρανή με μικρή θερμική αγωγιμότητα παράγουν σκυρόδεμα χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τη χρήση αδρανών χαμηλής θερμοχωρητικότητας. Έχει αποδειχθεί από έρευνες ότι το είδος του αδρανούς ενδέχεται ακόμα και να διπλασιάσει τη θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος.

Έτσι, είναι δυνατή η παρασκευή σκυροδέματος ιδιαίτερα χαμηλού ειδικού βάρους, αλλά και αρκετά χαμηλής πυκνότητας η οποία δεν ξεπερνά τα  $800 \text{ Kg/m}^3$  με συνέπεια να χρησιμοποιείται αποκλειστικά σε ανάγκες μόνωσης. Παρόλη την υψηλή θερμομονωτική αξία που παρουσιάζει αυτού του είδους ελαφροσκυρόδεμα, οι αντοχές που εμφανίζει δεν είναι μεγαλύτερες από  $7,0 \text{ MPa}$ , και συγκεκριμένα σε ένα εύρος τιμών μεταξύ  $0,7- 7,0 \text{ MPa}$ . Τα πιο συνήθη χρησιμοποιούμενα αδρανή στην παρασκευή τέτοιου είδους ελαφροσκυροδέματος είναι ο περλίτης και ο βερμικουλίτης. Ο βερμικουλίτης είναι φτιαγμένος από ένα φυσικό ορυκτό, τη μίκα (μαρμαρυγίας).

Εκτός από το είδος του αδρανούς, ένας άλλος σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά του σκυροδέματος, είναι το περιεχόμενο ποσοστό υγρασίας. Η θερμική αγωγιμότητα του σκυροδέματος αυξάνει με την αύξηση της περιεχόμενης υγρασίας. [11]

Μία ακόμη παράμετρος που φαίνεται να επηρεάζει τη θερμική συμπεριφορά του σκυροδέματος, είναι το πορώδες. Ελαφροσκυρόδεμα που προκύπτει με αντικατάσταση ποσότητας τσιμέντου με τεχνητά ποζολανικά συστατικά όπως ιπτάμενη τέφρα και πυριτική

παιπάλη, φαίνεται να παρουσιάζει μικρότερη θερμική αγωγιμότητα σε σύγκριση με συμβατικά παραγόμενο σκυρόδεμα. Παρόμοιος μηχανισμός λειτουργεί και στην περίπτωση παραγωγής σκυροδέματος με τη χρήση ελαφροβαρών αδρανών όπως περλίτης κλπ.. [16] [17]

Γενικά, ελαφροσκυροδέματα που έχουν προκύψει με τη χρήση ελαφροβαρών αδρανών παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και έχουν ευνοϊκότερες ιδιότητες σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα, για το λόγο ότι παρουσιάζουν μικρότερο ίδιοι βάρος, άρα καλύτερη σεισμική συμπεριφορά, καλύτερη συμπεριφορά σε επίπεδο θερμικής και μονωτικής συμπεριφοράς καθώς εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή σε συνθήκες απότομης αλλαγής θερμοκρασίας (συστοδιαστολές) και αξιοσημείωτη ικανότητα αντοχής στην φωτιά εξαιτίας της χαμηλής θερμικής του αγωγιμότητας και του αργού ρυθμού μετάδοσης της θερμότητας. [17]

Στις περισσότερες περιπτώσεις παραγωγής σκυροδέματος με τη χρήση ελαφροβαρών αδρανών συνίσταται η εισαγωγή αέρα, όπως και στις περισσότερες περιπτώσεις σύνθεσης συμβατικού σκυροδέματος (βλ. ACI 201.2R και 213R). Η εισαγωγή αέρα ενισχύει την εργασιμότητα, βελτιώνει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος σε συνθήκες ψύξης-απόψυξης, μειώνει το φαινόμενο της εξίδρωσης και τείνει να καλύπτει τυχόν μικρές ατέλειες στην κοκκομετρική διαβάθμιση. Όταν δεν αναμένεται σημαντικού βαθμού έκθεση σε ακραία φαινόμενα, η εισαγωγή αέρα στο σκυρόδεμα μπορεί να παραλειφθεί, εντούτοις τα παρεχόμενα οφέλη από την εισαγωγή αέρα κατά τη σύνθεση όσον αφορά την εργασιμότητα και τη συνοχή είναι επιθυμητά και επιτυγχάνονται για ποσοστό εισαγωγής αέρα όχι λιγότερο από 4%. Επιπρόσθετα, η εισαγωγή αέρα στο σκυρόδεμα έχει ως συνέπεια τη μείωση του μοναδιαίου του βάρους.

Το ποσοστό του εισαγόμενου αέρα που συνίσταται για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος το οποίο υπόκειται σε φαινόμενα ψύξης- απόψυξης ή είναι εκτεθειμένο σε άλατα κυμαίνεται από 4 - 6% όταν ο μέγιστος κόκκος αδρανούς είναι 19 mm, και 4,5 - 7,5% όταν ο μέγιστος κόκκος αδρανούς είναι 9,50 mm.

Η αντοχή του ελαφροσκυροδέματος μπορεί να μειωθεί στην περίπτωση που γίνει εισαγωγή υψηλών ποσοστών αέρα. Σε φυσιολογικά επίπεδα εισαγόμενου αέρα (4 - 6%), η μείωση στην αντοχή είναι μικρή, αν η κάθιση είναι στις 127 mm και αν έχουν χρησιμοποιηθεί οι συνιστώμενες ποσότητες τσιμέντου.

Η μέθοδος όγκου για τη μέτρηση αέρα, όπως περιγράφεται στο ACTM C 173, είναι η πιο αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης αέρα είτε στην περίπτωση παραγωγής δομικού σκυροδέματος με εισαγωγή αέρα, είτε όχι, και είναι αυτή που συνίσταται.

Επιφυλάξεις για την καταλληλότητα του υλικού τίθενται στα πλαίσια της ανάπτυξης ικανοποιητικής στάθμης αντοχής σε περιπτώσεις λυγηρών φορέων υπό θλιπτική επιπόνηση

μικρής εκκεντρότητας και φορέων υπό εναλλασσόμενη καμπτοδιαμητική επιπόνηση (σεισμική επιπόνηση).

Οι σημαντικότερες παράμετροι που καθορίζουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος αυτού είναι:

- Η ποσότητα και η πυκνότητα των ελαφροβαρών αδρανών
- Η ποσότητα και η πυκνότητα των τσιμεντοειδών υλικών
- Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T)
- Οι ποσότητες των εκάστοτε πρόσθετων και πρόσμικτων (υπερρρευστοποιητές, ρευστοποιητές, σταθεροποιητές, πληρωτικά πρόσθετα)

Ρυθμίζοντας τα χαρακτηριστικά αυτά είναι δυνατόν να παραχθεί σκυρόδεμα υψηλής αντοχής και σε συνδυασμό με τα πλεονεκτήματά του, καθίσταται άκρως ανταγωνιστικό και ικανό να αντικαταστήσει το συμβατικό σκυρόδεμα. [4]

### 1.5.2. Αντοχή- Ειδικό βάρος- Πυκνότητα

Το συμβατικό σκυρόδεμα παρουσιάζει ειδικό βάρος της τάξης των 2.400 Kg/m<sup>3</sup>. Τις τελευταίες δεκαετίες έχει επιτευχθεί παραγωγή σκυροδέματος με εξαιρετικά υψηλές αντοχές σε θλίψη με την προσθήκη ειδικών συστατικών όπως πρόσθετα ανάμιξης, ρευστοποιητές, υπερ-ρρευστοποιητές κλπ.. Όμως, το σύνθετο σκυρόδεμα παρουσιάζει και κάποια μειονεκτήματα, όπως μεγαλύτερο μεταφορικό κόστος λόγω του βάρους του και κακή θερμοκή συμπεριφορά, συγκριτικά με την τοιχοποιία. Παρόλα αυτά, παραμένει το πιο δημοφιλές υλικό στον τομέα των κατασκευών, καθώς στις σωστές αναλογίες του όταν είναι νωπό είναι εύπλαστο, παρουσιάζει υψηλή αντοχή σε θλίψη και με την ενίσχυσή του με χάλυβα καλύπτει τις ανάγκες των κατασκευών για αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση. Τέλος είναι σχετικά οικονομικό καθώς είναι διαθέσιμο σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο.

Το ελαφροσκυρόδεμα παρουσιάζει ειδικά βάρη που κυμαίνονται μεταξύ 300 -1.800 Kg/m<sup>3</sup>. Ακόμα, και στην πιο υδαρή κατάστασή του, η συμπεριφορά που παρουσιάζει είναι καλύτερη από το απλά συμπακνωμένο έδαφος. Για το λόγο αυτό έχει χρήση σε πολλές γεωτεχνικές εφαρμογές όπως αντικατάσταση εδάφους, προστασία πρανών κλπ.. Η παραγωγή του κυρίως στηρίζεται στη χρήση ελαφροβαρών αδρανών όπως, διογκωμένος σχιστόλιθος, κίσηρης (ελαφρόπετρα), σκωρία, περλίτης, κλπ.. Το κάθε ένα από αυτά έχει τις ιδιαιτερότητές του βασικότερα όσον αφορά την απορροφημένη υγρασία, λόγω αυξημένου πορώδους πρώτα σε απαιτήσεις τα ελαφροβαρή αδρανή ηφαιστειακής προέλευσης.

Το σημαντικότερο πλεονέκτημα είναι ότι το ελαφροσκυρόδεμα ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζεται μπορεί να ρυθμιστεί σε αναλογίες και υλικά, έτσι ώστε να ικανοποιεί στην κάθε περίπτωση τις απαιτούμενες αντοχές. Για παράδειγμα, σε περιπτώσεις δόμησης

μπορεί να επιτευχθεί και αντοχή ελαφροσκυροδέματος σε θλίψη έως και 40 MPa με τη χρήση χονδρόκοκκων αλλά και λεπτόκοκκων ελαφροβαρών αδρανών (π.χ. σκωρία) και αντικατάσταση μάζας τσιμέντου με υδραυλικές κονίες όπως πυριτική παιπάλη [18], ενώ σε περιπτώσεις παρασκευής ελαφροσκυροδέματος για πλήρωση κενών, θερμομόνωσης, κονιαμάτων για δάπεδα και οροφές, όπου απαιτούνται χαμηλές πυκνότητες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ελαφροσκυρόδεμα χαμηλών πυκνοτήτων ( $300 - 800 \text{ Kg/m}^3$ ). η παραγωγή του οποίου προκύπτει είτε με τον εγκλωβισμό αερίου που παράγεται από κάποια χημική αντίδραση (αεριοσκυρόδεμα), είτε με τον εγκλωβισμό αέρα σε μορφή αφρού (αφροσκυρόδεμα). [16]

Στην περίπτωση παραγωγής ελαφροσκυροδέματος με τη χρησιμοποίηση ελαφροβαρών αδρανών και κυρίως φυσικών όπως η κίσηρης, καθοριστική για την αντοχή του σκυροδέματος είναι η αντοχή των χρησιμοποιούμενων αδρανών υλικών και σε αυτή καθοριστικό ρόλο παίζει η αντοχή και το βάρος του κόκκου του αδρανούς τα οποία αυξάνονται όσο μειώνεται το μέγεθος του κόκκου. [8]

### 1.5.3. Κίνδυνος Αντίστροφου Διαχωρισμού- Εργασιμότητα

Το σκυρόδεμα μπορεί να διακριθεί σε τρία επιμέρους βασικά συστατικά: το νερό, το τσιμέντο και τα αδρανή. Στη νωπή φάση που ο δεσμοί μεταξύ των συστατικών αυτών με την ενυδάτωση του τσιμέντου και τη συνάφεια του τσιμεντοπολτού και αδρανών είναι ασθενείς, υπάρχει κίνδυνος διαχωρισμού των συστατικών. Μετά ορισμένο χρόνο από την ανάμιξη των τριών συστατικών του μίγματος η διαστρωμάτωση των υλικών θα περιλαμβάνει στην επιφάνεια τους πιο μεγάλους κόκκους του ελαφροβαρούς αδρανούς και στο υπόλοιπο τμήμα τον τσιμεντοπολτό και τα πιο λεπτόκοκκα αδρανή. Στην περίπτωση αυτή δηλαδή της χρήσης ελαφροσκυροδέματος, υφίσταται ο κίνδυνος του αντίστροφου διαχωρισμού. Σε ένα μίγμα μέτριας ρευστότητας, η κίνηση των πιο χονδρόκοκκων υλικών προς την επιφάνεια, θα παρεμποδίζεται από τις τριβές στο εσωτερικό του τσιμεντοπολτού μεταξύ τσιμεντόπαστας και αδρανών αλλά και λόγω της αλληλεμπλοκής των αδρανών. Όσο μεγαλύτερες είναι οι εσωτερικές αυτές τριβές, τόσο πιο δύσκολη είναι η άνοδος των χονδρών αδρανών προς την επιφάνεια και έτσι μειώνεται ο κίνδυνος του διαχωρισμού. Για να επιτύχουμε μεγαλύτερες εσωτερικές τριβές, απαραίτητη είναι η ύπαρξη όσο το δυνατόν πιο λεπτόκοκκων αδρανών και όσο το δυνατόν λιγότερης ποσότητας νερού.

Έτσι καθοριστικής σημασίας για την αποφυγή διαχωρισμού του σκυροδέματος στη νωπή φάση είναι η ελάττωση του μέγιστου κόκκου του αδρανούς.

Από έρευνες που έχουν διεξαχθεί, έχει προκύψει ότι με την αντικατάσταση μέρους των ελαφροβαρών αδρανών με κανονικά αδρανή π.χ. άμμος, μπορεί να επιτευχθεί αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος άλλα και αύξηση της εργασιμότητας.

Καλύτερη εργασιμότητα εξασφαλίζεται στην περίπτωση που οι κόκκοι των αδρανών έχουν σχετικά σφαιρικό σχήμα. Στην περίπτωση όμως των περισσότερων φυσικών ελαφροβαρών αδρανών, το λεπτόκοκκο υλικό τους είναι αρκετά γωνιώδες με αποτέλεσμα μικρότερη εργασιμότητα. [8]

Όμως, σε επίπεδο τσιμεντόπαστας, αύξηση της εργασιμότητας μπορεί να επιτευχθεί με την αντικατάσταση μέρους τσιμέντου με πυριτική ιπτάμενη τέφρα η οποία διακρίνεται για τα σφαιρικά σωματίδια που περιέχει τα οποία διαθέτουν και ποζολανικές ιδιότητες. Το σχήμα των κόκκων της μειώνει την τριβή τσιμεντόπαστας και αδρανούς δημιουργώντας έναν μηχανισμό σαν «ρουλεμάν» στο σημείο της επαφής, επιτρέποντας το σκυρόδεμα να ρέει με μεγαλύτερη ελευθερία.

Σε πείραμα που διεξάχθηκε για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος με τη χρήση διογκωμένου περλίτη ως αδρανές, η προσθήκη στο μίγμα πυριτικής ιπτάμενης τέφρας, αύξησε την εργασιμότητα του σε σύγκριση με το μίγμα που δεν περιείχε ποσοστό ιπτάμενης τέφρας. Ειδικότερα, η πυριτική ιπτάμενη τέφρα μείωσε περίπου κατά  $3\text{dm}^3$  το απαιτούμενο για το διογκωμένο περλίτη νερό για κάθε 10% αντικατάσταση ποσότητας τσιμέντου με πυριτική ιπτάμενη τέφρα, για την ίδια εργασιμότητα σε  $1\text{m}^3$  σκυροδέματος. Αντίθετα, η αντικατάσταση μέρους τσιμέντου με πυριτική παιπάλη, μείωσε την εργασιμότητα του μίγματος καθώς αύξησε τη συνοχή και την τριβή μεταξύ των στερεών υλικών του μίγματος καθιστώντας το μίγμα πιο ανθεκτικό στην απόμιξη των υλικών. Συγκεκριμένα, η ύπαρξη πυριτικής παιπάλης στο μίγμα αύξησε κατά  $5 - 7\text{dm}^3$  το απαιτούμενο για την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος νερό για κάθε 10% αντικατάστασης ποσότητας τσιμέντου με πυριτική παιπάλη, για την ίδια εργασιμότητα σε  $1\text{m}^3$  σκυροδέματος. Ο λόγος της διαφοροποίησης της εργασιμότητας στο μίγμα που περιείχε πυριτική ιπτάμενη τέφρα και στο μίγμα με την πυριτική παιπάλη, είναι το σφαιρικό σχήμα των κόκκων της πυριτικής ιπτάμενης τέφρας, που καθιστά τον ευνοϊκό μηχανισμό κίνησης των κόκκων μέσα στο μίγμα. [17]

#### **1.5.4. Οπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα**

##### **1.5.4.1. Εισαγωγή**

Η εμπορική ανάγκη για «ελαφρύ» αλλά εντούτοις «δυνατό» σε αντοχή σκυρόδεμα, έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας της σύμφυτης οικονομικότητάς του και των πλεονεκτημάτων που παρέχει σε ένα μεγάλο εύρος σύγχρονων κατασκευών. Πολυάριθμα

οικοδομήματα κατασκευασμένα με τη χρήση ελαφροσκυροδέματος, τα οποία περιλαμβάνουν χαμηλού ύψους κατασκευές αλλά και πολυώροφα κτίρια, γέφυρες και υπέργειες διαβάσεις, θαλάσσιες και παράκτιες κατασκευές, εντοπίζονται σε διάφορα σημεία του κόσμου. Πλέον, Διεθνή Πρότυπα Σχεδιασμού και Μελέτης Κατασκευών όπως το Αμερικάνικο Πρότυπο ACI 514, το Βρετανικό Πρότυπο BS 8110 αλλά και οι Ευρωπαϊκοί Κανονισμοί Σχεδιασμού Σκυροδέματος (EC 2) έχουν εισάγει ειδικές διατάξεις που αφορούν την κατασκευή έργων από ελαφροσκυρόδεμα. Στη χώρα μας, όπως και σε άλλες χώρες του εξωτερικού, η χρήση του ελαφροσκυροδέματος ως δομικό υλικό, δηλαδή για την κατασκευή φερόντων στοιχείων με τον απαιτούμενο οπλισμό για την ανάληψη των επιβαλλόμενων φορτίων, δεν είναι αρκετά διαδεδομένη. Πρώτα από όλα, αυτό συμβαίνει λόγω της γενικής έλλειψης γνώσης και εμπειρίας στην παρασκευή του υλικού, η οποία απαιτεί μία πιο εξειδικευμένη γνώση και μελέτη στη σύνθεσή του, συγκριτικά με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος. Επιπρόσθετα, σε τοπικό επίπεδο κάθε φορά, η διαθέσιμη γνώση για την χρήση ελαφροσκυροδέματος ως δομικό υλικό είναι ανεπαρκής προκειμένου να παράσχει ικανοποιητικού βαθμού οδηγίες και ως εκ τούτου εμπιστοσύνη στη χρήση του από τους κατασκευαστές.

Όσον αφορά την κάμψη, όπως προαναφέρθηκε, τα Διεθνή κανονιστικά Πρότυπα και Οδηγίες σχεδιασμού κατασκευών οπλισμένου σκυροδέματος (ACI 318, BS 8110, EC 2) περιέχουν διατάξεις για το σχεδιασμό μελών από ελαφροσκυρόδεμα. Κάνοντας μία αναζήτηση στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, αποκαλύπτεται ότι οι κανόνες που ορίζονται στα διάφορα Πρότυπα, είναι απόρροια ερευνών που έχουν διενεργηθεί κυρίως τη δεκαετία του '60 οι οποίες στο μεγαλύτερο ποσοστό τους έχουν παραμείνει αδημοσίευτες ή μη προσβάσιμες στο ευρύ κοινό. Βέβαια, υπήρξαν και έρευνες όπως αυτές των "*Swamy and Lambert, 1984, Ahmad and Barker, 1991 και Ahmad and Batts, 1991*", των οποίων όμως εύρος μελέτης ήταν αρκετά περιορισμένο. Παρόλα αυτά, αν και σε περιορισμένο βαθμό, υπάρχει μία γενική γνώση της συμπεριφοράς του οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, ενδεικτική της απόκρισης του υλικού σε συνήθεις πραγματικές συνθήκες φόρτισης.

Από πειράματα και έρευνες που έχουν διενεργηθεί σε γραμμικά στοιχεία (δοκούς) τα οποία διαστασιολογήθηκαν με βάση Διεθνείς Κανονισμούς και κατασκευάστηκαν με ελαφροσκυρόδεμα πυκνότητας κατά μέσο όρο  $1.850 \text{ Kg/m}^3$ , προέκυψε ότι η απόκρισή τους στην επιβολή καμπτικού φορτίου είναι παρόμοια αυτής των μελών που είναι κατασκευασμένα από συμβατικό σκυρόδεμα.

Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί ότι η αστοχία και στα κατασκευασμένα με ελαφροσκυρόδεμα στοιχεία επήλθε με θραύση του σκυροδέματος στη θλιβόμενη ζώνη και διαρροή του χάλυβα, όπως ακριβώς συμβαίνει και στα κανονικού τύπου στοιχεία, που είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε η καμπτική αστοχία να προηγηθεί της διατμητικής. Επιπρόσθετα, όπως και στα

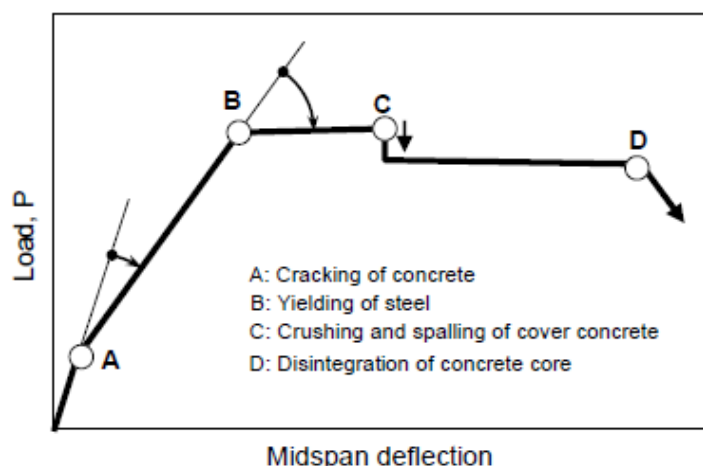
συμβατικού τύπου παρασκευασμένα στοιχεία, έτσι και στα κατασκευασμένα με ελαφροσκυρόδεμα στοιχεία, οι παράγοντες που φαίνεται να επηρεάζουν στο μέγιστο βαθμό τη συμπεριφορά τους, είναι η ονομαστική αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$ , το ποσοστό του διαμήκους οπλισμού (εφελκυόμενου και θλιβόμενου) και το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού κυρίως στη ζώνη επιρροής επιβολής του καμπτικού φορτίου.

Αναλυτικότερα, οι παράμετροι οι οποίες φαίνεται να επηρεάζουν και να διαφοροποιούν την απόκριση των δομικών γραμμικών στοιχείων στην επιβολή καμπτικού φορτίου, είναι η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ( $f_c$ ) η οποία είναι και συνάρτηση του είδους του ελαφροβαρούς αδρανούς που έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του, το ποσοστό του εφελκυόμενου αλλά και θλιβόμενου οπλισμού κάμψης και το ποσοστό του εγκάρσιου οπλισμού το οποίο καθορίζεται από τη μεταξύ απόσταση με την οποία οι εγκάρσιοι συνδετήρες διατάσσονται κατά μήκος του γραμμικού στοιχείου και οι οποίοι έχουν σχεδιασθεί για την ανάληψη των τεμνουσών δυνάμεων που αναπτύσσονται λόγω φόρτισης σε κάμψη. Οι διαφοροποιήσεις που προκύπτουν στην απόκριση των στοιχείων σε κάμψη, έχουν κυρίως να κάνουν με το συχνότητα εμφάνισης ρωγμών και το εύρος αυτών, το βέλος κάμψης, το μέγιστο φορτίο θραύσης και την πλαστιμότητα που εμφανίζεται στο εκάστοτε μέλος.

Ειδικότερα, το οπλισμένο ελαφροσκυρόδεμα είναι σε θέση να εμφανίζει επαρκή πλαστιμότητα η οποία εξαρτάται από την ονομαστική αντοχή του σκυροδέματος ( $f_c$ ) και αυξάνεται με τη βελτίωση της ποιότητας του παραγόμενου σκυροδέματος. *[Με τον όρο πλαστιμότητα, εννοούμε την ικανότητα ενός φορέα ή μέλους να υπόκεινται σε πλαστικές παραμορφώσεις, σε μικρό ή μεγάλο βαθμό, χωρίς απώλεια – μείωση της φέρουσας ικανότητας].*

Σε πειράματα που διεξήχθησαν ανά τον κόσμο, όπως αυτό των «*H S Lim, T H Wee, M A Mansur και K H Kong, "Flexural Behavior Reinforced Lightweight Aggregate Concrete", 2006, Kuala Lumpur, Malaysia*» αποδείχθηκε ότι η συμπεριφορά του οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος συνοψίζεται στο παρακάτω διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων, όπως συμβαίνει και με το συμβατικό σκυρόδεμα. Μάλιστα στην περίπτωση που επιτυγχάνεται και παρόμοια αντοχή, τα δύο είδη δοκιμών - με και χωρίς τη χρήση του ελαφροσκυροδέματος-, παρουσιάζουν και παρόμοια απόκριση με πολύ μικρές διαφορές στη συσχέτιση φορτίου – παραμορφώσεων, με αυτό της δοκού με ελαφροσκυρόδεμα να παρουσιάζει ελαφρώς πιο πρόωμη θραύση (σημείο C της καμπύλης). [19]





**Σχήμα 6:** Σχηματικό διάγραμμα φορτίου-παραμορφώσεων [A: πρώτη ρωγμή σκυροδέματος, B: Διαρροή χάλυβα οπλισμού, C: θρυμματισμός επιφάνειας σκυροδέματος, D: αποσάθρωση πυρήνα σκυροδέματος [19]

Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι αύξηση στην ονομαστική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος  $f_c$ , έχει ως συνέπεια αξιοσημείωτη αύξηση του πρώτου φορτίου θραύσης (σημείο A – Σχήμα 6), καθώς επίσης αυξάνει την ακαμψία μετά την εμφάνιση των ρωγμών του σκυροδέματος, το φορτίο θραύσης (σημείο C – Σχήμα 6) καθώς και την πλαστιμότητα (και κατά συνέπεια την παραμένουσα αντοχή).

Όπως παρατηρείται και στα παρασκευασμένα με συμβατικό σκυρόδεμα δοκίμια, αύξηση στην ποσότητα του οπλισμού κάμψης, μειώνει το εύρος των ρωγμών, αυξάνει τη μετά τη ρηγμάτωση ακαμψία και την αντοχή των στοιχείων, αλλά μειώνει δραστικά την πλαστιμότητα.

Η συμπεριφορά των γραμμικών στοιχείων όσον αφορά την ανάπτυξη του μέγιστου φορτίου θραύσης, δεν επιφέρει κάποια διαφοροποίηση με την αύξηση του ποσοστού του θλιβόμενου οπλισμού. Παρόλα αυτά, μια τέτοια αύξηση διαφοροποιεί τη συμπεριφορά των στοιχείων καθώς οδηγεί σε μεγαλύτερη παραμένουσα παραμόρφωση (σημείο πτώσης C – Σχήμα 6) και επεκτείνει το πλάτω των αύξανόμενων παραμορφώσεων υπό την επιβολή σταθερού φορτίου.

Παρόμοια απόκριση των στοιχείων με αυτή της διαφοροποίησης του θλιβόμενου οπλισμού, επιφέρει και η μεταβολή του ποσοστού του κατακόρυφου οπλισμού διάτμησης στη ζώνη επιρροής του επιβαλλόμενου φορτίου, καθώς αυτό που μεταβάλλεται είναι η συμπεριφορά του στοιχείου στη μετά θραύση κατάσταση, δηλαδή έως την πλήρη αποσάθρωση του πυρήνα του σκυροδέματος. Όμοια με πριν, αύξηση του ποσοστού του εγκάρσιου οπλισμού, οδηγεί σε μικρότερη πτώση τάσης (σημείο C της καμπύλης – Σχήμα 6) και εν συνεχεία σε εκτεταμένη γραμμική αύξηση των παραμορφώσεων υπό την επιβολή σταθερής φόρτισης. [19], [20], [21]

## 2.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

---

### Περιγραφή

Το πειραματικό μέρος της παρούσας έρευνας, διακρίνεται σε δύο (2) τμήματα.

Το πρώτο περιλαμβάνει την διεξαγωγή μίας σειράς διαδοχικών συνθέσεων με στόχο τη βελτιστοποίηση της σύνθεσης και την αναγνώριση των δυσκολιών που θα πρέπει να αναμένονται κατά τη διαδικασία παραγωγής ελαφροσκυροδέματος με τη χρήση της κίσηρης ως αδρανές. Το δεύτερο μέρος της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει την κατασκευή οπλισμένων γραμμικών στοιχείων (δοκών) μήκους δύο (2) μέτρων βάσει της μελέτης σύνθεσης του πρώτου μέρους της πειραματικής διαδικασίας.

Κατά το πρώτο τμήμα, πραγματοποιήθηκαν πέντε (5) συνθέσεις στις οποίες οι παράμετροι που κάθε φορά διαφοροποιούνταν ήταν η αναλογία λεπτόκοκκων και χονδρόκοκκων αδρανών. Η βελτιστοποίηση της σύνθεσης πραγματοποιήθηκε για σταθερό (ενεργό) λόγο N/T, με σκοπό τη επίτευξη συγκεκριμένων ρεολογικών χαρακτηριστικών (κάθιση κατηγορίας S2) και πυκνότητας σκυροδέματος της τάξης των 1600 -1800 Kg/m<sup>3</sup>.

Κατά το δεύτερο μέρος κατασκευάστηκαν έξι (6) δοκοί οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος μήκους δύο (2) μέτρων και ποικίλης διατομής. Πραγματοποιήθηκαν δώδεκα (12) συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος βασιζόμενες κάθε φορά στην περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων των αδρανών (κίσηρης) που χρησιμοποιήθηκαν. Σκοπός της παρούσας διαδικασίας ήταν η μελέτη των μηχανικών χαρακτηριστικών των δοκών οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, μέσω της υποβολής αυτών σε μονότονη – στατική και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

### 2.1. Χαρακτηρισμός Α' Υλών

#### 2.1.1. Αδρανή

Το αδρανές το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του ελαφροσκυροδέματος είναι η κίσηρης ή αλλιώς ελαφρόπετρα (pumice). Η κίσηρης ανήκει στην κατηγορία των εκρηξιγενών ή πυριγενών πετρωμάτων. Αποτελείται κυρίως από άστριο με χρώμα φάιολευκο. Είναι πέτρωμα όξινο, πορώδες, πιο ελαφρύ από το νερό και εύθραυστο. Η κίσηρης είναι εξαιρετικά λειαντικό μέσο, καθώς και θερμομονωτικό υλικό

Η χημική σύσταση της κίσηρης που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία δίνεται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 8: Χημική σύσταση κίσηρης – ελαφρόπετρας

Χημική ένωση	% κ.β.
SiO <sub>2</sub>	68.58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.16
CaO	4.11
MgO	0.44
K <sub>2</sub> O	4.02
Na <sub>2</sub> O	2.77
SO <sub>3</sub>	0.00
TiO <sub>2</sub>	0.12
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.03
Απώλεια πύρωσης	7.41

Η ορυκτολογική ανάλυση της Κίσηρης πραγματοποιήθηκε με τη χρήση περιθλασιόμετρου ακτίνων Χ (XRD) (παράρτημα, σχήμα Π-Σ1). Η κύρια ορυκτολογική φάση που περιέχεται στην Κίσηρη, είναι αυτή του Χαλαζία.

Πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση της κίσηρης βάσει του Αμερικάνικου Προτύπου ASTM C 1367. Στους Πίνακες 9 & 10 δίνεται η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού. [22] [23]

Πίνακας 9: Κοκκομετρική Διαβάθμιση Χονδρόκοκκου Υλικού Κίσηρης

Κόσκινα		ΑΘΡΟΙΣΤ % ΔΙΕΡΧ
in	mm	
3/4	19.0500	100.0%
1/2	12.7000	99.5%
3/8	9.5250	99.0%
1/4	6.3500	95.2%
4	4.7500	87.9%
8	2.3800	

**Πίνακας 10:** Κοκκομετρική Διαβάθμιση Λεπτόκοκκου Υλικού Κίσσηςρης

Κόσκινα		ΑΘΡΟΙΣΤ % ΔΙΕΡΧ
in	mm	
4	4.7500	34.5%
8	2.380	53.0%
16	1.191	65.3%
30	0.589	74.1%
50	0.297	80.5%
100	0.150	85.3%
200	0.075	

Στην περίπτωση παρασκευής δοκιμίων συμβατικού σκυροδέματος, έγινε χρήση ασβεστολιθικής άμμου και ρυζάκι από την περιοχή Ξηρορέματος, η κοκκομετρική ανάλυση της οποίας; σύμφωνα με το Πρότυπο EN 933 – 1, φαίνεται στους Πίνακες 11 και 12.

**Πίνακας 11:** Κοκκομετρική Διαβάθμιση Ασβεστολιθικής Άμμου

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΑΘΡΟΙΣΤ % ΔΙΕΡΧ
in	mm	
5.6	0	100
4	4	96
2	31	69
1	54	46
0.5	70	30
0.25	79	21
ΠΑΙΠΑΛΗ		11

**Πίνακας 12:** Κοκκομετρική Διαβάθμιση Ρυζάκι

ΚΟΣΚΙΝΑ		ΑΘΡΟΙΣΤ % ΔΙΕΡΧ
in	mm	
11.2	0	100
8	0	100
5.6	45	55
4	90	10
2	99	1
1	99	1

Τα φυσικά χαρακτηριστικά των επιμέρους συστατικών ανάμιξης για τις διάφορες συνθέσεις, συνοψίζονται στον Πίνακα 13:

**Πίνακας 13:** Φυσικά Χαρακτηριστικά Συστατικών Συνθέσεων

	Φαινόμενη πυκνότητα (Bulk Density) (Kg/m <sup>3</sup> )	Φαιν. ειδικό βάρος (Apparent Spec. Gravity)	Μικτό Φαιν. ειδικό βάρος εν ξηρώ (Relative Spec. Gravity-OD)	Μικτό Φαιν. ειδικό βάρος εν Κορεσμώ (Relative Spec. Gravity-SSD)	Απορροφητικότητα (water absorption) (%)
<b>Άμμος</b>		2.71	2.56	2.61	2.14
<b>Ρυζάκι</b>		2.71	2.65	2.67	0.90
<b>Κίσηρης (0-3 mm)</b>	841.00	1.88	1.46	1.68	15.20
<b>Κίσηρης(4-7mm)</b>	678.30	1.63	1.31	1.51	14.80
<b>Κίσηρης (0-7 mm)</b>			1.44	1.66	15.15

### 2.1.2. Τσιμέντο

Τόσο για τη μελέτη σύνθεσης όσο και για τα σπλισμένα γραμμικά στοιχεία από ελαφροσκυρόδεμα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου CEM II/A-M(P-LL)42,5N. Στον Πίνακα 14 δίνεται η χημική σύσταση του τσιμέντου, ενώ στον Πίνακα 15 τα μηχανικά του χαρακτηριστικά.

**Πίνακας 14:** Χημική Σύσταση Τσιμέντου

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O eq	LOI
24.16	5.27	3.4	59.06	3.21	2.76	0.84	0.4	0.95	3.55

**Πίνακας 15:** Αντοχές συναρτήσει ηλικίας

Ηλικία	Αντοχή (Mpa)
2 ημέρες	25.3
7 ημέρες	39.0
28 ημέρες	51.3

Μία ακόμα φυσική ιδιότητα που χαρακτηρίζει το σκυρόδεμα είναι η λεπτότητα του η οποία προσδιορίστηκε με τη συσκευή Blaine, βάσει του Προτύπου ASTM C 204 – 11, και ισούται με 4364,42 cm<sup>2</sup>/g.

### 2.1.3. Υπερ-ρευστοποιητής

Χρησιμοποιήθηκε ο υπερ-ρευστοποιητής CHEMIUM 174 της εταιρείας DOMYLCO σε όλες τις περιπτώσεις παρασκευής σκυροδέματος. Ο υπερ-ρευστοποιητής CHEMIUM 174 είναι υδατικό διάλυμα τροποποιημένων πολυμερών έτοιμο για χρήση, πολύ μεγάλης απόδοσης τόσο σε ρευστότητα όσο και σε διάρκεια της ρευστότητας. Πληροί τις προδιαγραφές των Προτύπων EN 934-2 § 3.1. - 3.2, ASTM C 494 A & F (ΣΚ 308) και C 1 017 (ΣΚ 316).

### 2.1.4. Χάλυβας

Για την παρασκευή των οπλισμένων γραμμικών στοιχείων χρησιμοποιήθηκε χάλυβας οπλισμού κατηγορίας B500C, με διάμετρο στην περίπτωση των διαμήκων οπλισμών εφελκυσμού και θλίψης Φ14 και Φ16 και στην περίπτωση του κατακόρυφου οπλισμού διάτμησης Φ8. Οι ονομαστικές διαμέτροι, οι ονομαστικές διατομές καθώς και η ονομαστική μάζα δίνονται στον Πίνακα 16. Οι τιμές βρίσκονται σε συμφωνία με τα Πρότυπα ΕΛΟΤ 971 και ΕΛΟΤ 1421.

Πίνακας 16: Χάλυβες Φ8,Φ14,Φ16

Ονομαστική Διάμετρος	Ονομαστική διατομή		Ονομαστική μάζα
	A (mm <sup>2</sup> )	Ανοχές (%)	
8	50,3	± 6	0,395
14	154	± 4,5	1,21
16	201	± 4,5	1,58

## 2.2. Μελέτη Σύνθεσης και Ιδιότητες

Πραγματοποιήθηκαν έξι (6) συνθέσεις, τα επιμέρους στοιχεία των οποίων φαίνονται στον Πίνακα 17. Στις συνθέσεις **1 – 5** γίνεται παραγωγή ελαφροσκυροδέματος, με διαφοροποίηση της αναλογίας χονδρόκοκκων – λεπτόκοκκων, και χρήση κατάλληλης ποσότητας ρευστοποιητή και ενεργού νερού για την επίτευξη συγκρίσιμων ρεολογικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων. Η **Σύνθεση 0** αφορά σε συμβατικό σκυρόδεμα με κανονικού βάρους αδρανή με στόχο τη σύγκριση του με το ελαφροσκυρόδεμα, τόσο σε επίπεδο ιδιοτήτων νωπού σκυροδέματος (κενά, μοναδιαίο βάρος, κάθιση) όσο και σε επίπεδο μηχανικών χαρακτηριστικών σκληρυμένου σκυροδέματος (αντοχή σε μονοαξονική θλίψη, αντοχή σε διάρρηξη, στατικό μέτρο ελαστικότητας – E).

Πίνακας 17: Ποσότητες (κ.β.) συστατικών συνθέσεων σκυροδέματος

Συστατικά (kg/m <sup>3</sup> )	ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ					
	0	1	2	3	4	5
Τσιμέντο	350	350	350	350	421	350
Κίσηρης (0-3 mm)	-	534	534	-	-	-
Κίσηρης (4-7 mm)	-	438	438	-	-	-
Κίσηρης (0-7mm)	-	-	-	1010	1090	1162
Ρυζάκι	727	-	-	-	-	-
Άμμος	1090	-	-	-	-	-
Συνολικό Νερό	177	233	293	330	289	279
Ρευστοποιητής (Chemium 174)	3.0	2.0	2.0	3.5	3.5	4.5
Ενεργός Λόγος N/T <sub>Εν</sub>	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42

Σε όλες τις συνθέσεις διατηρήθηκε σταθερός ο (ενεργός) λόγος νερού προς τσιμέντο ίσος με 0,42 ((N/T)<sub>Εν</sub> = 0,42). Τα αδρανή στην κάθε περίπτωση σύνθεσης είχαν την αναλογία που φαίνεται στον Πίνακα 18:

Στις **Συνθέσεις 1 & 2** χρησιμοποιήθηκε διαβαθμισμένο δείγμα κίσηρης. Συγκεκριμένα, διαχωρίστηκε το μίγμα των αδρανών στο κλάσμα 0-3 mm (Special Besser) και στο κλάσμα 4

-7 mm. Τα δύο κλάσματα αναμίχθηκαν σε αναλογία 55 – 45% αντίστοιχα. Στον Πίνακα 18 δίνεται η κ.β. αναλογία ανάμιξης των αδρανών.

Πίνακας 18: Αναλογία Ανάμιξης Αδρανών (% κ.β.)

	Σύνθεση 0	Συνθέσεις 1, 2	Συνθέσεις 3, 4, 5
Άμμος	60%	-	-
Ρυζάκι	40%	-	-
Κίσηρης (0-3 mm)	-	55%	-
Κίσηρης(4-7mm)	-	45%	-
Κίσηρης (0-7 mm)	-	-	100%

Επιπρόσθετα, οι διαφοροποιήσεις στις συνθέσεις 1 - 5 ως προς τις κ.β. αναλογίες των αδρανών και της ποσότητας του συνολικού νερού, έγκεινται εκτός της χρήσης διαβαθμισμένου ή μη υλικού, και στη διαφορετική εκτιμώμενη κάθε φορά περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων των αδρανών. Μετρήθηκε η υγρασία σε αντιπροσωπευτικό δείγμα αδρανών και αυτή κυμαινόταν από 3,95% έως και 7,95%.

## 2.2.1. Εργαστηριακές Δοκιμές Νωπού Σκυροδέματος

### 2.2.1.1. Δοκιμή Κάθισης

Η κάθιση αποτελεί μέτρο εργασιμότητας που εκφράζεται με την απώλεια ύψους, σε cm, που παρουσιάζει μια κωνική στήλη νωπού σκυροδέματος, όταν ανασυρθεί η κωνική μήτρα (κώνος καθίσεως) με την οποία μορφώθηκε [§ 3.20. ΚΤΣ 97] [24]. Η δοκιμή της κάθισης νωπού σκυροδέματος περιγράφεται σε διάφορα πρότυπα, όπως το ASTM C143, το οποίο και εφαρμόστηκε στα πλαίσια της παρούσας ερευνητικής εργασίας. Σκοπός για την εξαγωγή συγκρίσιμων αποτελεσμάτων ήταν το κάθε φορά παρασκευόμενο ελαφροσκυρόδεμα να παρουσιάζει κατηγορία κάθισης S2 (Πίνακας 19).



Πίνακας 19: Κατηγορίες Κάθισης

Κατηγορία	Κάθιση σε mm
S1	10 - 40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥ 220



Εικόνα 2: Δοκιμή κάθισης

### 2.2.1.2. Μέτρηση Μοναδιαίου Βάρους

Μοναδιαίο βάρος ή πυκνότητα ορίζεται ως το βάρος (Kg) ενός  $m^3$  σκυροδέματος. Εκφράζει το βαθμό συμπύκνωσης του μίγματος και σχετίζεται άμεσα με την τιμή της αντοχής. Για τη μέτρηση μοναδιαίου βάρους του παραγόμενου ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε δοχείο 8L, το οποίο ζυγίζεται σε ηλεκτρονικό ζυγό, σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C138.

### 2.2.1.3. Μέτρηση Αέρα

Για τη μέτρηση του περιεχόμενου αέρα στο παραγόμενο ελαφροσκυρόδεμα χρησιμοποιείται ειδική διάταξη σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM 231, όπως αυτή που φαίνεται στην Εικόνα 3:



Εικόνα 3: Διάταξη μέτρησης περιεχόμενου αέρα

### 2.2.2. Εργαστηριακές Δοκιμές Σκληρυμένου Σκυροδέματος

Οι εργαστηριακές δοκιμές σκληρυμένου σκυροδέματος κυρίως εντοπίζονται στο προσδιορισμό της μηχανικής αντοχής του υλικού. Χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων επηρεάζονται από διάφορους δευτερογενείς παράγοντες, πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός και τρόπος επιβολής του φορτίου, οι αναπτυσσόμενες εντατικές και παραμορφωσιακές συνθήκες στην περιοχή επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και η διάταξη στην οποία γίνεται η δοκιμή. [25]



Εικόνα 4: Μέρος παραγόμενων δοκιμίων

### 2.2.2.1. Δοκιμή Θλίψης

Αυτή η δοκιμή δίνει ακριβή αποτελέσματα για την αντοχή του σκυροδέματος σε (μονοαξονική) θλίψη. Η αντοχή του κυλίνδρου είναι ανάλογη της αντοχής του κύβου και είναι περίπου το 80% αυτής. Εντούτοις, από λεπτομερέστερη θεώρηση του μηχανισμού αστοχίας σε θλίψη του σκυροδέματος προκύπτει ότι η αστοχία του υλικού προκαλείται από αστοχία σε έμμεσο εφελκυσμό που αναπτύσσεται μεταξύ τσιμεντοπολτού και αδρανών στη περιοχή της Διεπιφανειακής Μεταβατικής Ζώνης (υποδεέστερα μηχανικά χαρακτηριστικά). Είναι επομένως φανερό ότι η ονομαζόμενη αντοχή σε θλίψη δεν είναι πραγματική αντοχή σε θλίψη αλλά προϊόν μιας πολύπλοκης εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης. [25]

Στην προκειμένη περίπτωση υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλίψη δεκαεπτά (17) κυβικά δοκίμια ελαφροσκυροδέματος διαστάσεων 100\*100 mm, σε διαφορετικές ηλικίες ωρίμανσης (7, 28, 90 ημέρες & 180 ημέρες) και εννέα (9) κυβικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος διαστάσεων 100\*100 mm. Προσδιορίστηκε η αντοχή των παραγόμενων σκυροδεμάτων σε μονοαξονική θλίψη, σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C 39 (Εικόνα 4).



Εικόνα 5: Μηχανή δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη-Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος ΕΜΠ

### 2.2.2.2. Δοκιμή Διάρρηξης

Η μέθοδος της διάρρηξης αποτελεί έμμεσο τρόπο υπολογισμού της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό με σχετικά απλή πειραματική διαδικασία. Εντούτοις, ο

υπολογισμός της αντοχής στηρίζεται στη θεώρηση ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά μέχρι την αστοχία του.

Η μέγιστη τιμή  $f_{ct,sp}$  της εφελκυστικής τάσης, οριζόμενη ως εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, δίνεται συναρτήσει του μέγιστου θλιπτικού φορτίου διάρρηξης  $P_{SP}$  από τη σχέση:

$$f_{ct,sp} = 2 P_{SP} / \pi d l \quad (2.2.1)$$

Από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι  $f_{ct} \approx 0.9 f_{ct,sp}$  [26]

Για τον προσδιορισμό της αντοχής σε εφελκυσμό με τη δοκιμή της διάρρηξης, χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) κυλινδρικά δοκίμια ελαφροσκυροδέματος διαστάσεων 100\*200 mm και έξι (6) κυλινδρικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος ίδιων διαστάσεων, σύμφωνα με το Πρότυπο ASTM C 496.



Εικόνα 6: Διάταξη δοκιμής σε διάρρηξη (Brazilian Test) κυλινδρικού δοκιμίου

### 2.2.2.3. Δοκιμή Μέτρησης Μέρου Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας ( $E_c$ ) εκφράζει το μέτρο αντίστασης του σκυροδέματος στην παραμόρφωσή του υπό μονοαξονική επιπόνηση και προσδιορίζεται ως η κλίση της καμπύλης τάσεων ( $\sigma$ ) – παραμορφώσεων ( $\epsilon$ ) κυλινδρικών ή πρισματικών δοκιμίων υπό μονοαξονική βραχυχρόνια θλιπτική επιπόνηση. [26]

Βάσει του Προτύπου ASTM C 496 χρησιμοποιήθηκαν τρία (3) πρισματικά δοκίμια και ένα (1) κυλινδρικό δοκίμιο διαστάσεων 100 \* 200 mm (H / D= 1 : 2) τα οποία υποβλήθηκαν σε μονοαξονική θλιπτική επιπόνηση, προκειμένου να προσδιορισθεί το μέτρο ελαστικότητας της Σύνθεσης 5 ελαφροσκυροδέματος.

Για λόγους παράθεσης των ανωτέρω αποτελεσμάτων υποβλήθηκαν σε μονοαξονική επιπόνηση και δύο (2) πρισματικά δοκίμια 100 \* 200 mm συμβατικού σκυροδέματος της Σύνθεσης 0.

Σε κάθε πρισματικό δοκίμιο τοποθετήθηκαν σε δύο αντικριστές πλευρές από δύο (2) διασταυρούμενα strain gages και σε μία τρίτη πλευρά ένα ακόμη κατακόρυφο. Στο κυλινδρικό δοκίμιο τοποθετήθηκαν σε τρεις συμμετρικές γενέτειρες (ανά 120°) τρία ζεύγη διασταυρούμενων strain gages.

Τα χαρακτηριστικά στοιχεία των strain gages που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Εικόνα Π-Ε1: Χαρακτηριστικά στοιχεία strain-gages).

## **2.3. Σχεδιασμός, παρασκευή και έλεγχος μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος**

Η φάση αυτή της πειραματικής διαδικασίας περιλαμβάνει την παρασκευή γραμμικών οπλισμένων στοιχείων (δοκών) ελαφροσκυροδέματος μήκους δύο (2) μέτρων και ποικίλης διατομής με στόχο τη μελέτη της συμπεριφοράς τους σε μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση.

Παρασκευάστηκαν έξι (6) δοκοί μήκους δύο μέτρων ποικίλης διατομής. Οι τέσσερις (4) είναι ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 150\*300 mm και οι δύο (2) τετραγωνικής διατομής 200\*200 mm.

Το πρώτο μέρος αφορά την κατασκευή των δοκών και συγκεκριμένα την παρασκευή του ελαφροσκυροδέματος και τη διαστασιολόγηση τους.

Το δεύτερο μέρος αφορά τον έλεγχο των μηχανικών ιδιοτήτων των οπλισμένων γραμμικών στοιχείων (δοκών) ελαφροσκυροδέματος.

### **2.3.1. Μελέτη Σύνθεσης οπλισμένων στοιχείων ελαφροσκυροδέματος**

Για την παρασκευή των έξι (6) οπλισμένων δοκών προετοιμάστηκαν δώδεκα (12) συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος με αδρανές την κίσηρη. Η βασικότερη διαφοροποίηση έχει να κάνει με την περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων των αδρανών, η οποία καθορίζει κάθε φορά την ποσότητα των αδρανών και του νερού που θα απαιτηθούν στο κάθε μίγμα. Η ποσότητα του υπέρ-ρυστοποιητή διαφοροποιείται σε κάθε σύνθεση με στόχο την επίτευξη ίδιας κατηγορίας κάθισης (S2). [9] [27]

Οι υγρασία των δειγμάτων του αδρανούς της κίσηρης που χρησιμοποιήθηκαν στην κάθε σύνθεση παρατίθενται στον Πίνακα 20. Επιπλέον, στον Πίνακα 21 καταγράφονται οι ποσότητες των συστατικών της κάθε περίπτωσης μίξης.

Πίνακας 20: Περιεχόμενη υγρασία των δειγμάτων κίσηρης της κάθε συνθέσης

Δοκός	Σύνθεση	Υγρασία Δείγματος Κίσηρης (%)
Δ1	Δ1 - 1	19.40
	Δ1 - 2	19.40
Δ2	Δ2 - 1	19.40
	Δ2 - 2	19.40
Δ3	Δ3 - 1	4.60
	Δ3 - 2	4.60
Δ4	Δ4 - 1	4.60
	Δ4 - 2	4.60
Δ5	Δ5 - 1	3.60
	Δ5 - 2	6.84
Δ6	Δ6 - 1	6.84
	Δ6 - 2	6.84

Πίνακας 21: Ποσότητες (κ.β.) Συστατικών Συνθέσεων Σκυροδέματος

Δοκός	Σύνθεση	Ποσότητες Συστατικών Σύνθεσης (kg/m <sup>3</sup> )				
		Τσιμέντο	Νερό		Κίσηρης (0-7 mm)	Ρευστοποιητής (Chemium 174)
			Ενεργός Λόγος N/T <sub>εv</sub>	Συνολικό Νερό		
Δ1	Δ1 - 1	350.00	0.42	131.84	1252.50	6.00
	Δ1 - 2	350.00	0.42	131.84	1252.50	8.00
Δ2	Δ2 - 1	350.00	0.42	141.26	1252.50	5.00
	Δ2 - 2	350.00	0.42	131.84	1252.50	7.00
Δ3	Δ3 - 1	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
	Δ3 - 2	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
Δ4	Δ4 - 1	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
	Δ4 - 2	350.00	0.42	258.50	1058.34	4.00
Δ5	Δ5 - 1	350.00	0.42	266.66	738.00	4.00
	Δ5 - 2	350.00	0.42	243.80	738.00	3.00
Δ6	Δ6 - 1	350.00	0.42	243.80	1161.90	3.00
	Δ6 - 2	350.00	0.42	243.80	1161.90	3.00

Μελετήθηκαν οι ιδιότητες νωπού σκυροδέματος που προέκυπτε από την κάθε σύνθεση και συγκεκριμένα η κάθιση και το μοναδιαίο βάρος.

Επιπρόσθετα, από τη δεύτερη σύνθεση της κάθε δοκού ( $\Delta_i-2$ ), ελήφθη δείγμα προκειμένου να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή του παραγόμενου κάθε φορά ελαφροσκυροδέματος. Πραγματοποιήθηκε δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη κυβικών δοκιμίων διαστάσεων 100\*100 mm και προσδιορίσθηκε η αντοχή του ελαφροσκυροδέματος. Συνολικά λήφθηκαν δεκαοκτώ (18) κυβικά δοκίμια.



### 2.3.2. Διαστασιολόγηση γραμμικών στοιχείων (δοκών) ελαφροσκυροδέματος

Η διαστασιολόγηση των γραμμικών στοιχείων (δοκών) έγινε με τη χρήση των Ευρωπαϊκών Προτύπων και συγκεκριμένα του Ευρωκώδικα - 2: «Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα, Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για Κτίρια» (EC-2/ EN1992-1-1) και Ευρωκώδικα - 8: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια» (EC- 8/ EN1998-1), οι οποίοι εγκρίθηκαν από τη CEN στις 16 Απριλίου 2004.

Συγκεκριμένα, εκτός των διατάξεων που αφορούν το σχεδιασμό φορέων από σκυρόδεμα, έγινε ιδιαίτερη μνεία στο Κεφάλαιο 11 του Ευρωκώδικα - 2: «Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα» Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για Κτίρια» (EC-2/ EN1992-1-1), το οποίο περιέχει διατάξεις που αφορούν το σχεδιασμό κατασκευών από ελαφροσκυρόδεμα.

Τα γραμμικά στοιχεία που διαστασιολογήθηκαν είναι δοκοί μήκους δύο (2) μέτρων. Οι τέσσερις (4) δοκοί είναι ορθογωνικής διατομής 150\*300 mm και οι υπόλοιπες δύο (2) τετραγωνικής 200\*200 mm.

#### 2.3.2.1. Απαιτούμενες διατάξεις EN 1992-1-1 & EN 1998-1 για το σχεδιασμό των δοκών της πειραματικής Διαδικασίας

Ο Ευρωκώδικας 2 (EN1992-1-1), όπως προαναφέρθηκε περιλαμβάνει διατάξεις ειδικά για τις κατασκευές από ελαφροσκυρόδεμα, οι οποίες διαφοροποιούν κάποια δεδομένα κατά τη διαδικασία διαστασιολόγησης και σχεδιασμού των στοιχείων των κατασκευών και θα πρέπει να αντικαθιστούν αντίστοιχες διατάξεις των λοιπών κεφαλαίων του Προτύπου.

Καταρχάς εισάγονται νέοι συμβολισμοί που αφορούν το ελαφροσκυρόδεμα και οι οποίοι είναι:

**LC** οι κατηγορίες αντοχής του ελαφροσκυροδέματος χαρακτηρίζονται από το σύμβολο **LC**

**$\eta_E$**  είναι συντελεστής μετατροπής για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας

**$\eta_1$**  είναι συντελεστής για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής

**$\eta_2$**  είναι συντελεστής για τον προσδιορισμό του συντελεστή ερπυσμού

**$\eta_3$**  είναι συντελεστής για τον προσδιορισμό της συρρίκνωσης

**$\rho$**  είναι η πυκνότητα ελαφροσκυροδέματος σε kg/m<sup>3</sup> μετά από ξήρανση σε κλίβανο

Για τις μηχανικές ιδιότητες, χρησιμοποιείται ο επιπρόσθετος κάτω δείκτης l (lightweight)

Η εφελκυστική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος μπορεί να ληφθεί με πολλαπλασιασμό των τιμών  $f_{ct}$  που δίνονται στο Πίνακα 23 με τον συντελεστή:

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60\rho/2200 \quad (2.3.1)$$

Όπου  $\rho$  είναι το άνω όριο της πυκνότητας για την αντίστοιχη κατηγορία σύμφωνα με το Πίνακα 22.

Πίνακας 22: Κατηγορίες πυκνότητας ελαφροσκυροδέματος [14]

Κατηγορία πυκνότητας		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ )		801-1000	1001-1200	1201-1400	1401-1600	1601-1800	1801-2000
Πυκνότητα Σχεδιασμού	Άοπλο σκυρόδεμα	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Οπλ.σκυρόδεμα	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Έτσι, ελαφροσκυρόδεμα πυκνότητας περίπου  $1.560 \text{ Kg/m}^3$  από τον Πίνακα 22 εντάσσεται σε κατηγορία πυκνότητας 1,6 με άνω όριο πυκνότητας  $\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$ . [EN 1992-1-1 Κεφάλαιο 11 § 11.3.1.(2)].

$$\text{Από σχέση (2.1): } \eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot 1600/2200 = 0,836 \quad (2.3.2)$$

Πίνακας 23: Τιμές μεγεθών Ελαφροσκυροδέματος [14]

Κατηγορίες αντοχών ελαφροσκυροδέματος													
$f_{lck}(\text{MPa})$	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
$f_{lck,cube}(\text{MPa})$	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	66	77	88
$f_{lcm}(\text{MPa})$	17	22	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88
$f_{lctm}(\text{MPa})$	$f_{lctm} = f_{lcm} \cdot \eta_1$												
$f_{lctk,0,05}(\text{MPa})$	$f_{lctk,0,05} = f_{lck,0,05} \cdot \eta_1$												
$f_{lctk,0,95}(\text{MPa})$	$f_{lctk,0,95} = f_{lck,0,95} \cdot \eta_1$												
$E_{lcm}(\text{GPa})$	$E_{lcm} = E_{cm} \cdot \eta_E$												
$\epsilon_{lc1}(\text{‰})$	$k f_{lcm} / (E_{lci} \cdot \eta_E)$						$k = 1,1$ για ελαφροσκυρόδεμα με άμμο						
$\epsilon_{lcu1}(\text{‰})$	$\epsilon_{lc1}$												
$\epsilon_{lc2}(\text{‰})$	2,0								2,2	2,3	2,4	2,5	
$\epsilon_{lcu2}(\text{‰})$	$3,5 \eta_1$								$3,1 \eta_1$	$2,9 \eta_1$	$2,7 \eta_1$	$2,6 \eta_1$	
$n$	2,0								1,75	1,6	1,45	1,4	
$\epsilon_{lc3}(\text{‰})$	1,75								1,8	1,9	2,0	2,2	
$\epsilon_{lcu3}(\text{‰})$	$3,5 \eta_1$								$3,1 \eta_1$	$2,9 \eta_1$	$2,7 \eta_1$	$2,6 \eta_1$	

Για ελαφροσκυρόδεμα κατηγορίας LC 25/28, από τον Πίνακα 23:

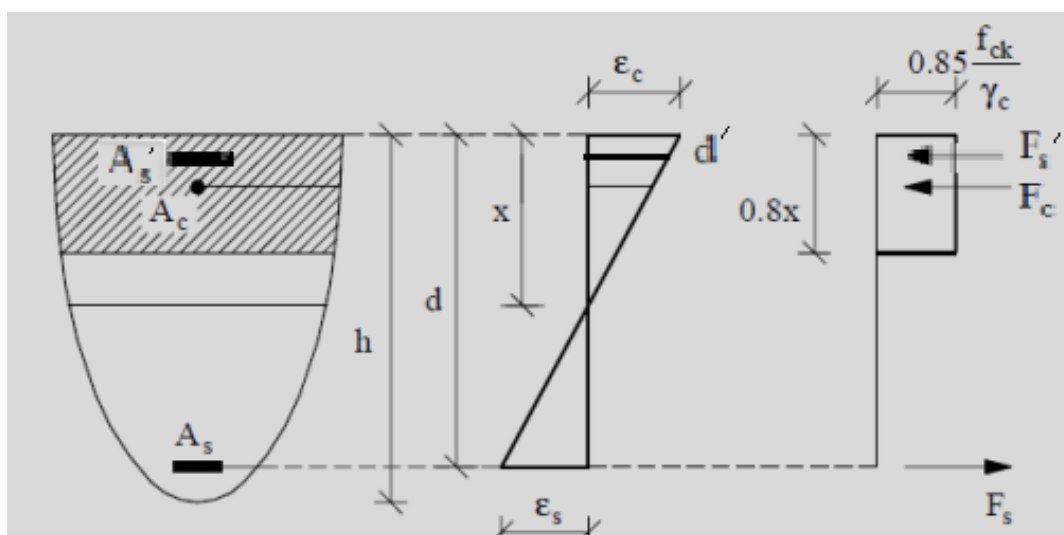
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$\varepsilon_{lcu2} = 3,5 * \eta_1 \quad (2.3.3)$$

$$\text{Από τη (2.3.) } \varepsilon_{lcu2} (\text{‰}) = 3,5 * 0,836 = \mathbf{2,93 \text{ ‰}} \quad (2.3.4)$$

### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ



Εικόνα 7: Διάγραμμα παραμορφώσεων-Διάγραμμα τάσεων-Εσωτερικές Δυνάμεις

### ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Οι σχέσεις υπολογισμού για την εύρεση της ροπής αντοχής της διατομής και κατ' επέκταση του οριακού φορτίου θραύσης είναι οι εξής:

$$F_c = 0,85 * f_c * 0,8 * x * b \quad (2.3.5)$$

$$F_s = A_s * f_y \quad (2.3.6)$$

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_c * (x - d') / x \quad (2.3.7)$$

$$F_s' = A_s' * \varepsilon_s' * E_s \quad (2.3.8)$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s \quad (2.3.9)$$

Όπου,  $F_c$ : Θλιπτική Δύναμη Σκυροδέματος (Nmm)

$F_s$ : Εφελκυστική Δύναμη Χάλυβα (Nmm)

$F_s'$ : Θλιπτική Δύναμη Χάλυβα (Nmm)

$A_s$ : Εμβαδόν Διατομής Εφελκυσμένου Οπλισμού ( $\text{mm}^2$ )

$A_s'$ : Εμβαδόν Διατομής Θλιβόμενου Οπλισμού ( $mm^2$ )

$x$ : Μήκος Θλιβόμενης Ζώνης (mm)

$\epsilon_c$ : παραμόρφωση σκυροδέματος σε θλίψη ( $‰$ )

$\epsilon_s$ : παραμόρφωση εφελκόμενου χάλυβα ( $‰$ )

$\epsilon_s'$ : παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα ( $‰$ )

$\epsilon_y$ : παραμόρφωση διαρροής χάλυβα ( $‰$ )

$f_c$ : θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

$f_y$ : τάση διαρροής χάλυβα (Nmm)

$E_s$ : Τιμή σχεδιασμού του μέτρου ελαστικότητας του χάλυβα του οπλισμού (GPa)

$d$ : στατικό ύψος διατομής (mm)

$d'$ : δευτερεύον στατικό ύψος διατομής (mm)

$z$ : μοχλοβραχίονας εσωτερικών δυνάμεων (mm)

$h$ : ύψος διατομής (mm)

$b$ : πλάτος διατομής (mm)

### ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (απουσία Αξονικής Δύναμης $N_{Ed}=0$ )

$$F_c + F_s' = F_s \quad (2.3.10)$$

Από τη σχέση (2.9.) προκύπτει το βάθος της θλιβόμενης ζώνης  $x$  και πλέον υπολογίζεται η ροπή αντοχής διατομής,  $M_f$  από την ακόλουθη σχέση:

$$M_f = F_c * (d - 0,4 * x) + F_s' * (d - d') \quad (2.3.11)$$

Από τη σχέση (2.12) υπολογίζεται η τέμνουσα δύναμη σχεδιασμού,  $V_f$ :

$$V_f = 1,2 * M_f / \alpha_v, \text{ όπου } \alpha_v: \text{ διατμητικό μήκος} \quad (2.3.12)$$

$$P_f = 2 * V_f \quad (2.3.13)$$

όπου  $P_f$ : το φορτίο αστοχίας

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ [Ευρωκώδικας 2 (EN 1992- 1 – 1)]

Η τιμή σχεδιασμού της αντοχής σε τέμνουσα δομικού στοιχείου από ελαφροσκυρόδεμα χωρίς οπλισμό διάτμησης  $V_{IRd,c}$  είναι ίση προς:

$$V_{IRd,c} = [C_{IRd,c} * \eta_1 * k * (100\rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{l,min} + k_1 \sigma_{cp}) * b_w * d \quad (2.3.14)$$

όπου το  $\eta_1$  καθορίζεται στη σχέση (2.2), το  $f_{ck}$  λαμβάνεται από το Πίνακα 23 και  $\sigma_{cp}$  είναι η μέση θλιπτική τάση στη διατομή λόγω της αξονικής δύναμης και της προέντασης.

Οι συνιστώμενες τιμές για το  $C_{IRd,c}$  είναι  $0,15/\gamma_c$ , για το  $v_{l,min}$  είναι  $0,030k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$  και για το  $k_1$  είναι 0,15.

**Πίνακας 24:** Τιμές του  $v_{l,min}$  για δεδομένες τιμές των  $d$  και  $f_{ck}$  [14]

d (mm)	$v_{l,min}$ (MPa)						
	$f_{ck}$ (MPa)						
	20	30	40	50	60	70	80
<b>200</b>	0,35	0,44	0,50	0,56	0,61	0,65	0,70
<b>400</b>	0,29	0,35	0,39	0,44	0,48	0,52	0,55
<b>600</b>	0,25	0,31	0,35	0,39	0,42	0,46	0,49
<b>800</b>	0,24	0,28	0,32	0,36	0,39	0,42	0,45
<b>≥ 1000</b>	0,22	0,27	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43

Για μηδενική αξονική δύναμη ( $N_{Ed} = 0$ ), η σχέση (2.3.14) γίνεται:

$$V_{IRd,c} = [C_{IRd,c} * \eta_1 * k * (100\rho_l f_{ck})^{1/3}] b_w d \geq 0,030k^{3/2}f_{ck}^{1/2} * b_w * d \quad (2.3.15)$$

Όπου  $\rho_l$ : ποσοστό διαμήκους οπλισμού σε απόσταση  $l_{bd} + d$ , με

$$\rho_l = A_{sl} / (b * d) \quad (2.3.16)$$

Όπου,  $A_{sl}$ : διαμήκους οπλισμού σε απόσταση  $l_{bd} + d$

$l_{bd}$ : μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού

### Υπολογισμός $\rho_l$

Οριακή τάση συνάφειας για ράβδους με νευρώσεις:

$$f_{bd} = 2,25 * n_1 * n_2 * f_{lctd} \quad (2.3.17)$$

$$f_{lctd} = f_{lctk,0.05} / \gamma_c, \quad \alpha_{lct} = 0,85 \text{ και}$$

$$f_{lctk,0.05} = f_{ctk,0.05} * \eta_1 \quad (2.3.18)$$

όπου  $\eta_1$  από τη σχέση (2.2)

Βασικό μήκος αγκύρωσης:

$$l_{b,rqd} = (\phi/4) * (\sigma_{sd}/f_{bd}) \quad (2.3.19)$$

όπου  $\sigma_{sd}$ : τάση σχεδιασμού της ράβδου στη θέση όπου αρχίζει να μετράται η αγκύρωση

Μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού:

$$l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{bmin} \quad (2.3.20)$$

η οποία σχέση βάσει της § 8.4.4.2. του EN 1992 – 1 – 1 απλοποιείται στην:

$$l_{bd} = \alpha_1 * l_{b,rqd} \geq l_{bmin} \quad (2.3.21)$$

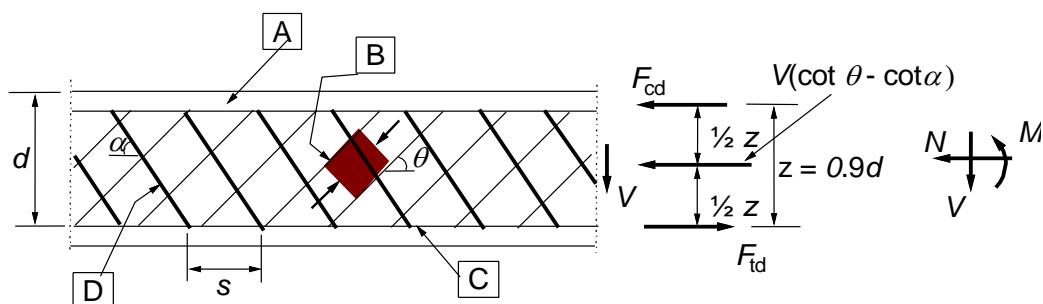
με  $l_{bmin}$  ελάχιστο μήκος αγκύρωσης το οποίο ορίζεται ως:

$$l_{bmin} > \max \{0,3 * l_{b,rqd}, 10\phi, 100 \text{ mm}\} \text{ για αγκύρωση υπό εφελκυσμό} \quad (2.3.22)$$

$$l_{bmin} > \max \{0,6 * l_{b,rqd}, 10\phi, 100 \text{ mm}\} \text{ για αγκύρωση υπό θλίψη} \quad (2.3.23)$$

Στην περίπτωση που  $V_f > V_{IRd,c}$ , απαιτείται οπλισμός διάτμησης για την ανάληψη της πλήρους τέμνουσας.

Ο σχεδιασμός των στοιχείων με οπλισμό διάτμησης βασίζεται σε ένα μοντέλο δικτυώματος (Σχήμα 7).



**A** θλιβόμενο πέλμα, **B** θλιπτήρες, **C** εφελκούμενη χορδή, **D** οπλισμός διάτμησης

Σχήμα 7: Μοντέλο Δικτυώματος [14]

Όπου,

$\alpha$  είναι η γωνία που σχηματίζει ο οπλισμός διάτμησης με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού (η θετική φορά της φαίνεται στο Σχήμα 7)

$\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέματος με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού

$F_{td}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης στο διαμήκη οπλισμό

$F_{cd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της θλιπτικής δύναμης στο σκυροδέμα στη διεύθυνση του διαμήκους άξονα του στοιχείου

$b_w$  είναι το ελάχιστο πάχος του στοιχείου μεταξύ της εφελκόμενης χορδής και του θλιβόμενου πέλματος του δικτυώματος

$z$  είναι ο μοχλοβραχίονας της διατομής σε ένα στοιχείο σταθερού ύψους, ο οποίος αντιστοιχεί στην καμπτική ροπή που δρα στο στοιχείο. Στο σχεδιασμό έναντι διάτμησης στοιχείων οπλισμένου σκυροδέματος χωρίς αξονικό φορτίο, μπορεί ενγένη να ληφθεί για το μοχλοβραχίονα η προσεγγιστική τιμή  $z = 0,9d$ .

Η γωνία  $\theta$  δεν πρέπει να ξεπερνά συγκεκριμένα όρια:

$$1 \leq \cot \theta \leq 2,5 \quad (2.3.24)$$

Για στοιχεία με κατακόρυφο οπλισμό διάτμησης, η αντοχή σε τέμνουσα,  $V_{Rd}$  λαμβάνεται ως η μικρότερη τιμή που προκύπτει από τις σχέσεις:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} * z * f_{ywd} * \cot \theta \quad (2.3.25)$$

και

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} * b_w * z * v_1 * f_{cd} / (\cot\theta + \tan\theta) \quad (2.3.26)$$

όπου:

$A_{sw}$  είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης

$s$  είναι η απόσταση των συνδετήρων

$f_{ywd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης

$v_1$  είναι ένας δείκτης μείωσης της αντοχής για σκυρόδεμα ρηγματωμένο λόγω διάτμησης

$\alpha_{cw}$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την εντατική κατάσταση στη θλιβόμενη διαγώνιο

$$v_1 = 0,5 * \eta_1 * (1 - f_{tck}/250) \quad (2.3.27)$$

[14]

Ο Ευρωκώδικας 8 - EN1998-1, αναφέρεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών. Ορίζει τρεις κατηγορίες μελών:

- i. Υψηλής Πλαστιμότητας (ΚΠΥ)
- ii. Μέσης Πλαστιμότητας (ΚΠΜ)
- iii. Χαμηλής Πλαστιμότητας (ΚΠΧ)

Εκτός κρίσιμων περιοχών ορίζει μέγιστες αποστάσεις των εγκαρσίων ράβδων για όλες τις κατηγορίες πλαστιμότητας:

$$s_w = 0,75 * d \quad (2.3.28)$$

Εντός κρίσιμων περιοχών, οι οποίες αφορούν τα ΚΠΥ και ΚΠΜ μέλη ορίζονται:

$$d_{bw} \geq 6 \text{ mm } (\Phi 10, \Phi 8, \Phi 10) \quad (2.3.29)$$

- Για ΚΠΥ:

$$s_w \leq \{6d_{bL}, 4h_w, 24d_{bw}, 175 \text{ mm}\} \quad (2.3.30)$$

- Για ΚΠΜ:

$$s_w \leq \{8d_{bL}, 4h_w, 24d_{bw}, 225 \text{ mm}\} \quad (2.3.31)$$

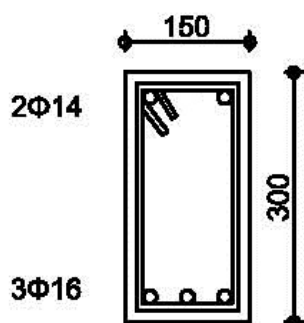
[28]



### 2.3.2.2. Αποτελέσματα Διαστασιολόγησης πειραματικών δοκών

#### Δοκοί ορθογωνικής διατομής 150\*300 mm

##### 1<sup>η</sup> Περίπτωση



$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s = 2,75 \text{ (‰)}$$

$$f_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = f_{ykwd} = 550 \text{ MPa}$$

$$M_f = 78,80 \text{ kNm}$$

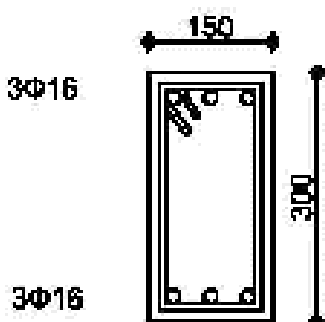
$$V_f = 93,01 \text{ kN}$$

$$P_f = 186,02 \text{ Kn}$$

$$x = 84,47 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,89 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

##### 2<sup>η</sup> Περίπτωση



$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s = 2,75 \text{ (‰)}$$

$$f_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = f_{ykwd} = 550 \text{ MPa}$$

$$M_f = 80,52 \text{ kNm}$$

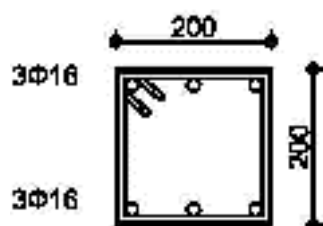
$$V_f = 96,63 \text{ kN}$$

$$P_f = 193,25 \text{ kN}$$

$$x = 60,37 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,47 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

#### Δοκοί τετραγωνικής διατομής 200\*200 mm



$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s = 2,75 \text{ (‰)}$$

$$f_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = f_{ykwd} = 550 \text{ MPa}$$

$$M_f = 53,52 \text{ kNm}$$

$$V_f = 64,21 \text{ kN}$$

$$P_f = 128,42 \text{ kN}$$

$$x = 42,52 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,55 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

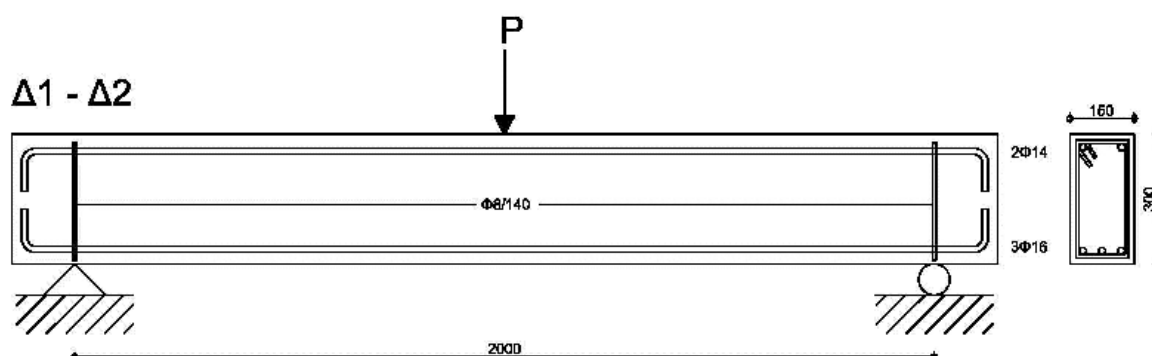
Όλα τα παραπάνω αποτελέσματα, συνοψίζονται στον Πίνακα 25:

Πίνακας 25: Λεπτομέρειες δοκών πειραματικής διαδικασίας

Δοκός	Διατομή		Διαμήκης Εφελκυσμένος Οπλισμός	Διαμήκης Θλιβόμενος Οπλισμός	Εγκάρσιος Οπλισμός Διάτμησης		Είδος Φόρτισης
	b (mm)	h (mm)			Διατμητικό Μήκος	Κρίσιμο Μήκος	
Δ1	150	300	3Φ16	2Φ14	Φ8/140	Φ8/140	Μονότονη
Δ2	150	300	3Φ16	2Φ14	Φ8/140	Φ8/140	Μονότονη
Δ3	150	300	3Φ16	3Φ16	Φ8/150	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη
Δ4	150	300	3Φ16	3Φ16	Φ8/150	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη
Δ5	200	200	3Φ16	3Φ16	Φ8/125	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη
Δ6	200	200	3Φ16	3Φ16	Φ8/125	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη

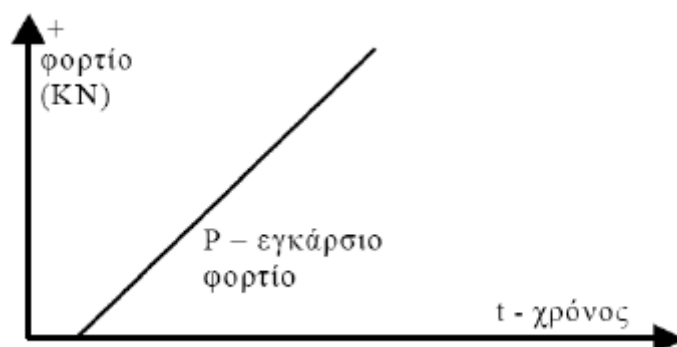
### 2.3.2.3. Διεξαγωγή Πειράματος

Οι δοκοί Δ1, Δ2 είναι αμφιέρειστες και θα υποβληθούν σε στατική – μονότονη φόρτιση με ένα συγκεντρωμένο φορτίο στο μέσον.



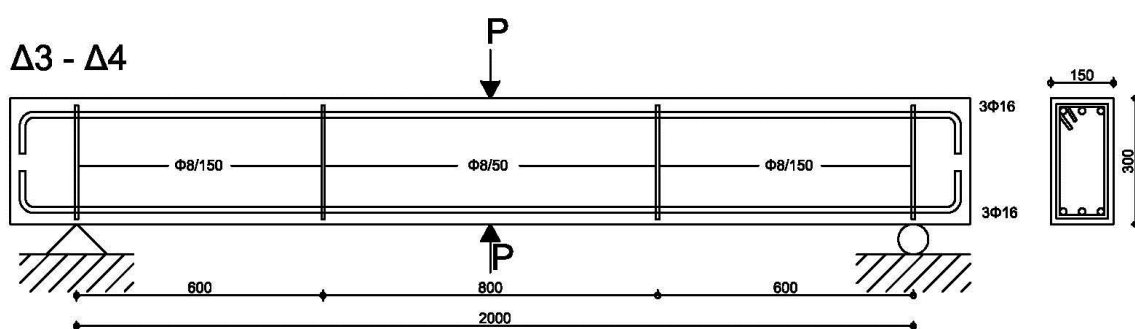
Σχήμα 8: Στατικό Μοντέλο, και οπλισμός Δοκών Δ1 - Δ2 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & 8 που υποβάλλονται σε μονότονη φόρτιση (διαστάσεις σε mm)

Η ιστορία της μονοτονική φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 9:

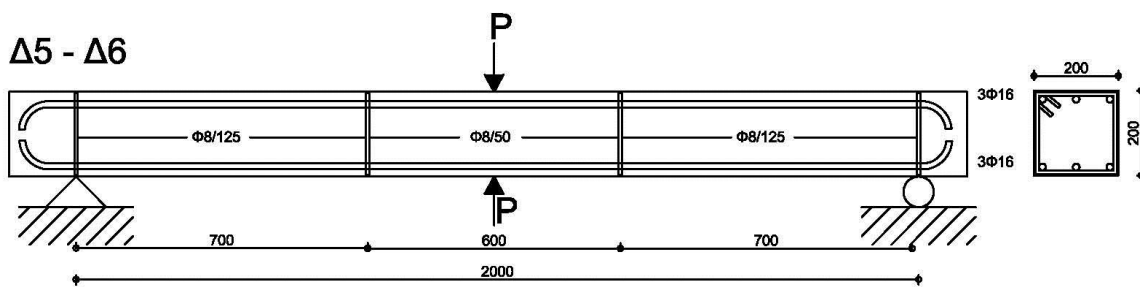


Σχήμα 9: Ιστορία μονοτονικής φόρτισης

Οι δοκοί Δ3, Δ4, Δ5, Δ6 είναι επίσης αμφιέριστες και θα υποβληθούν σε συνεχή ανακυκλιζόμενη φόρτιση έως τη θραύση τους.



Σχήμα 10: Στατικό Μοντέλο και οπλισμός Δοκών Δ3 – Δ4 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & 8 που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (διαστάσεις σε mm)

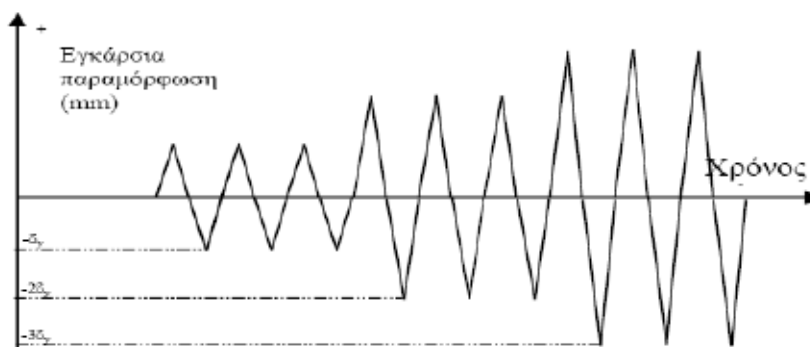


**Σχήμα 11:** Στατικό Μοντέλο και οπλισμός Δοκών Δ5 – Δ6 σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 & 8 που υποβάλλονται σε ανακυκλιζόμενη φόρτιση (διαστάσεις σε mm)

Στα δοκίμια με ανακυκλιζόμενο φορτίο (Δ3 – Δ6) η φόρτιση επιβάλλεται αρχικά μέχρι μετατόπιση τιμής  $\delta_y$  (μετατόπιση που αντιστοιχεί στη διαρροή). Ακολούθως, αναστρέφεται η φόρτιση μέχρι  $-\delta_y$ . Όταν συμπληρωθούν τρεις ανακυκλίσεις, τότε θεωρούμε ότι έχουμε επιτυχή κύκλο και συνεχίζουμε σε φόρτιση για  $2\delta_y$  και ούτω καθ' εξής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι, όπως συμβαίνει και με το σκυρόδεμα, η περιβάλλουσα της επαναλαμβανόμενης φόρτισης ταυτίζεται περίπου με την καμπύλη που αντιστοιχεί σε μονότονη φόρτιση.

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται η ιστορία της ανακυκλιζόμενης φόρτισης.



**Σχήμα 12:** Ιστορία ανακυκλιζόμενης φόρτισης

#### 2.3.2.4. Πειραματική Διάταξη

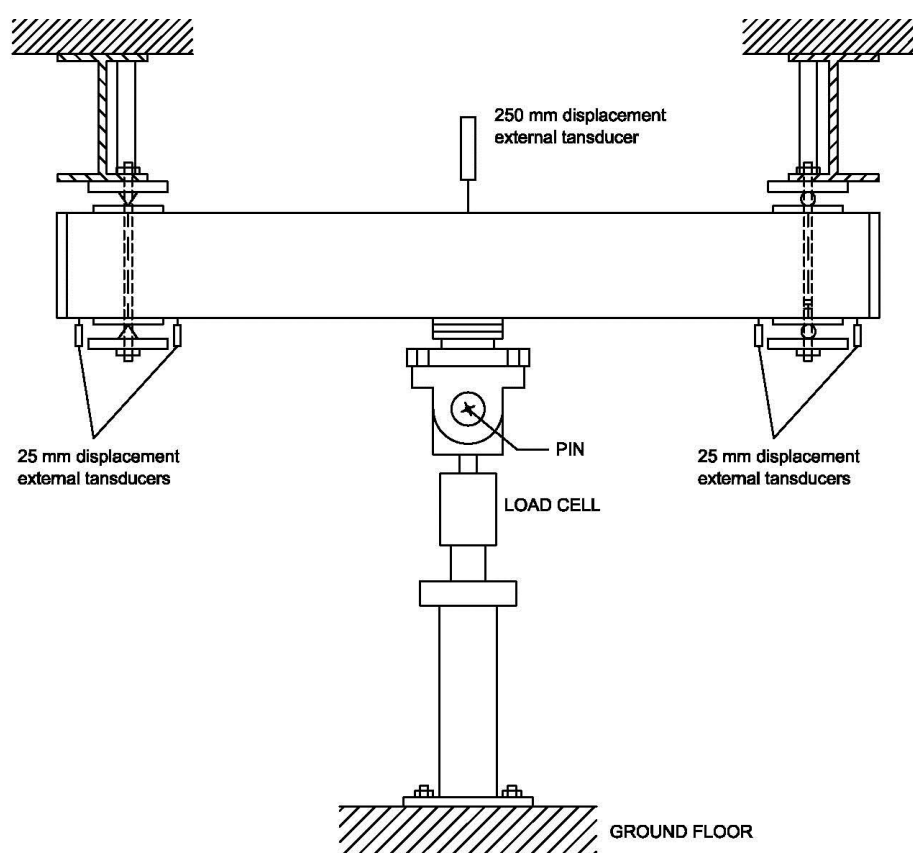
Στην παράγραφο αυτή γίνεται παρουσίαση της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας που έχει περιγραφεί παραπάνω. Η πειραματική διάταξη σχεδιάστηκε έτσι ώστε να μπορεί να επιβάλλεται μονότονη και ανακυκλιζόμενη φόρτιση στο μέσο του δοκιμίου. Επίσης, ο σχεδιασμός είχε ως στόχο την εύκολη και άμεση καταγραφή όλων των στοιχείων και των μετρήσεων που προέκυπταν από την πειραματική διαδικασία. Για την υλοποίηση του σχεδιασμού της πειραματικής διάταξης χρησιμοποιήθηκε ένα ισχυρό πλαίσιο του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Το πλαίσιο προσέφερε τη δυνατότητα της χρήσης ενός συστήματος με ισχυρό δάπεδο και ακλόνητους τοίχους αντίδρασης. Το πλαίσιο διαθέτει οπές σε συγκεκριμένα σημεία, οι οποίες επιτρέπουν την διέλευση ράβδων προέντασης ώστε να δημιουργούνται οι απαιτούμενες συνθήκες άρθρωσης για τη στήριξη των δοκών της πειραματικής διαδικασίας. Στα Σχήματα 13 & 14 φαίνεται η χρησιμοποιούμενη πειραματική διάταξη για την επιβολή της μονότονης και ανακυκλιζόμενης φόρτισης αντίστοιχα.

Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμη μια γενική περιγραφή του συστήματος της πειραματικής διάταξης, καθώς και των οργάνων που χρησιμοποιήθηκαν, προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λήψης των επιθυμητών στοιχείων από κάθε πείραμα. Το βασικό μέρος της πειραματικής διάταξης είναι το υδραυλικό έμβολο που προκαλεί την πλευρική φόρτιση.

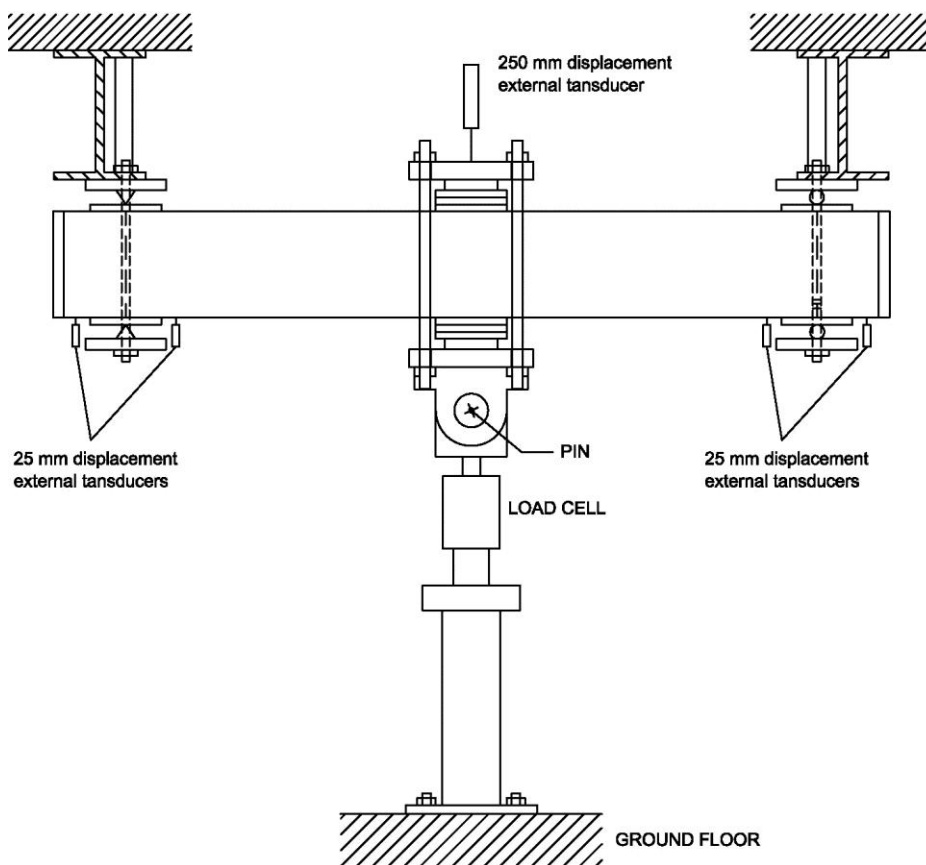
Η επιβολή της οριζόντιας εξαναγκασμένης μετατόπισης γίνεται με τη βοήθεια υδραυλικού εμβόλου (MTS). Είναι σημαντικό το υδραυλικό έμβολο να έχει τη δυνατότητα καταγραφής της εφαρμοζόμενης μετατόπισης και του ασκούμενου φορτίου. Για αυτό το λόγο, το κινούμενο στέλεχος του πιστονιού διαθέτει επιμηκυνσιόμετρο, ενώ στο μπροστινό τμήμα του εμβόλου υπάρχει ενσωματωμένο δυναμόμετρο (load cell). Οι ενδείξεις του δυναμόμετρου και του επιμηκυνσιόμετρου καταγράφονται ως ηλεκτρικό σήμα στο υπολογιστικό σύστημα και με τον κατάλληλο συντελεστή βαθμονόμησης βρίσκονται οι επιθυμητές τιμές δύναμης και μετατόπισης. Εκτός από τον βασικό εξοπλισμό που αναφέρθηκε παραπάνω, υπήρξε ανάγκη μέτρησης και άλλων στοιχείων αναφορικά με τη δοκιμή για το λόγο αυτό τοποθετήθηκαν στις στηρίξεις επιμηκυνσιόμετρα προκειμένου να είναι δυνατή η καταγραφή του πραγματικού βέλους κάμψης της δοκού.

Η διαδικασία που ακολουθείται κατά την εκτέλεση των δοκιμών είναι απλή. Στην περίπτωση επιβολής της μονότονης φόρτισης επιβάλλεται η οριζόντια φόρτιση έως τη θραύση του δοκιμίου ενώ στην περίπτωση της ανακυκλιζόμενης φόρτισης, η οριζόντια μετατόπιση επιβάλλεται η οριζόντια φόρτιση με τη μορφή χρονοϊστορίας από κύκλους εξαναγκασμένων μετατοπίσεων στο μεσαίο τμήμα της δοκού. Το εύρος κάθε μετατόπισης αυξάνεται βαθμιαία σε κάθε κύκλο. Το μέγιστο πλευρικό φορτίο που εφαρμόζεται από το έμβολο της MTS είναι

$\pm 500\text{KN}$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός φόρτισης δεν είναι σταθερός σε όλη τη διάρκεια του πειράματος. Στους πρώτους κύκλους της φόρτισης ο ρυθμός είναι αργός ενώ στη συνέχεια αυξάνεται χωρίς να επηρεάζεται η συμπεριφορά του δοκιμίου. Όλα τα όργανα είναι συνδεδεμένα με ένα υπολογιστικό σύστημα και καταγράφονται οι τιμές τους. Η καταγραφή των δεδομένων είναι συγχρονισμένη μέσω εσωτερικού χρονομέτρου, έτσι ώστε να είναι δυνατή ανά πάσα στιγμή η σύγκριση των μετρήσεων. Οι μετρήσεις των οργάνων καταγράφονται σε μονάδες ηλεκτρικής τάσης και στη συνέχεια κάθε τιμή πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο συντελεστή βαθμονόμησης ώστε να προκύψει το επιθυμητό μέγεθος. Το βασικό σημείο της καταγραφής, είναι η καταγραφή της οριζόντιας μετατόπισης στο μεσαίο τμήμα της δοκού, η οποία ουσιαστικά περιγράφει την ακριβή μετατόπιση της κορυφής της σε σχέση με την αρχική θέση. Η καταγραφή αυτή γίνεται απευθείας από το επιμηκυνσιομέτρο που υπάρχει ενσωματωμένο στο πίσω τμήμα του δοκιμίου. Από το έμβολο οριζόντιας μετατόπισης γίνεται επίσης και η καταγραφή της ασκούμενης οριζόντιας δύναμης. Τέλος, κατά τη διάρκεια της δοκιμής γίνεται η καταγραφή των μετρήσεων των τριών επιμηκυνσιομέτρων.



**Σχήμα 13:** Πειραματική Διάταξη για μονότονη φόρτιση για τις δοκούς Δ1 & Δ2



Σχήμα 14: Πειραματική Διάταξη για ανακυκλιζόμενη φόρτιση για τις δοκούς Δ3 – Δ6

### 3.0 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας έρευνας. Το πρώτο μέρος αφορά τα αποτελέσματα που αφορούν τις δοκιμές του νωπού ελαφροσκυροδέματος (Μελέτη Σύνθεσης & Ιδιότητες). Το δεύτερο μέρος αφορά την παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων για τις δοκούς οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, καθώς και την επεξεργασία αυτών για τη σύγκριση με το θεωρητικό υπόβαθρο που τα πλαισιώνει (Έλεγχος Μηχανικών Ιδιοτήτων Δοκιμών Οπλισμένου Ελαφροσκυροδέματος).

#### 3.1. Μελέτη Σύνθεσης και Ιδιότητες

##### 3.1.1. Εργαστηριακές Δοκιμές Νωπού Σκυροδέματος

###### 3.1.1.1. Δοκιμή Κάθισης - Μέτρηση Μοναδιαίου Βάρους - Μέτρηση Αέρα

Τα παραγόμενα δείγματα ελαφροσκυροδέματος υπόκεινται σε μια σειρά δοκιμών νωπού σκυροδέματος. Σκοπός αυτών είναι ο προσδιορισμός των ιδιοτήτων τους και κατ' επέκταση η επίδρασή τους στην αναπτυσσόμενη αντοχή αλλά και σε άλλα χαρακτηριστικά (Μέτρο Ελαστικότητας  $E$ , κλπ) του σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος. Στον Πίνακα 26 συγκεντρώνονται τα αποτελέσματα των δοκιμών νωπού σκυροδέματος και συγκεκριμένα της κάθισης, του περιεχόμενου αέρα και της μέτρησης του μοναδιαίου βάρους:

Πίνακας 26: Αποτελέσματα δοκιμών νωπού ελαφροσκυροδέματος των διαφόρων συνθέσεων

Σύνθεση	ΚΑΘΙΣΗ (mm)	ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΒΑΡΟΣ ( $\text{kg/m}^3$ )	ΑΕΡΑΣ (%)
0	50	2363,25	3,9
1	-	-	-
2	-	-	-
3	60	1571	8
4	70	1608,25	6,8
5	60	1556,63	9,8



### 3.1.2. Εργαστηριακές Δοκιμές Σκληρυμένου Σκυροδέματος

Από τις Συνθέσεις 0 - 5 που περιγράφηκαν και παραπάνω (§ 2.2.), παράχθηκαν συνολικά δεκαεπτά (17) κυβικά, έξι (6) κυλινδρικά και δύο (2) πρισματικά δοκίμια ελαφροσκυροδέματος. διαστάσεων 100\*100mm. Επιπρόσθετα, παράχθηκαν εννέα (9) κυβικά, έξι (6) κυλινδρικά και δύο (2) πρισματικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος.

Σε όλες τις περιπτώσεις, τα κυβικά δοκίμια ήταν διαστάσεων 100\*100 mm, τα κυλινδρικά διαστάσεων 100\*200 mm και τα πρισματικά διαστάσεων 100\*100\*500 mm. Τα παραγόμενα δοκίμια υποβλήθηκαν σε δοκιμές θλίψης, εφελκυσμού και μέτρησης μέτρου ελαστικότητας σε διάφορες ηλικίες ωρίμανσης (7, 14, 28, 90 και 180 ημέρες).

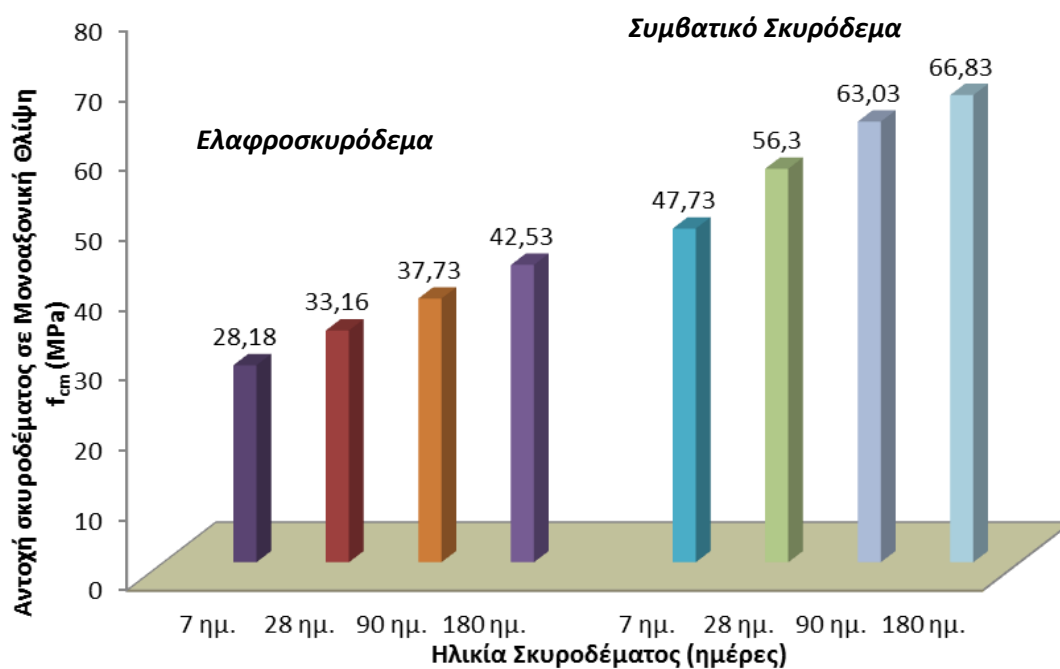
#### 3.1.2.1. Δοκιμή Θλίψης

Τα αποτελέσματα σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης των κυβικών δοκιμίων του παραγόμενου ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος φαίνονται στον Πίνακα 27:

Πίνακας 27: Μέση θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων 100\*100mm σε μονοαξονική θλίψη

Είδος Σκυροδέματος	Κωδικός Δοκιμίων	Ηλικία	Μέση θλιπτική αντοχή (Μρα)
Συμβατικό Σκυρόδεμα	0a/0b/0c	7 ημέρες	47,73
	0d/0e/0f	28 ημέρες	56,30
	0g/0h/0i	90 ημέρες	63,03
	0j/0k/0l	180 ημέρες	66,83
Ελαφρο-σκυρόδεμα	2a/3a/4a/5a/5b/5c	7 ημέρες	28,18
	1b/2b/3b/4b/5d/5e/5f	28 ημέρες	33,16
	5g/5h/5i	90 ημέρες	37,73
	5j/5k/5l	180 ημέρες	42,53

Στο Σχήμα 15, παρουσιάζονται διαγραμματικά η θλιπτική αντοχή συμβατικού σκυροδέματος και ελαφροσκυροδέματος, ανάλογα με την ηλικία.



**Σχήμα 15:** Μέση θλιπτική αντοχή ( $f_{c,m}$ ), σε διάφορες ηλικίες ωρίμανσης ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, το ελαφροσκύροδεμα εντάσσεται στη κατηγορία LC25/28, καθώς αναπτύσει μέση θλιπτική αντοχή 28 ημερών, 33,16 MPa. Επίσης, η ανάπτυξη αντοχών του ελαφροσκυροδέματος σε σχέση με το χρόνο ωρίμανσης είναι ανάλογη με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος.

### 3.1.2.2. Δοκιμή Διάρρηξης

Τα αποτελέσματα σε δοκιμή διάρρηξης (Brazilian Test) των κυλινδρικών δοκιμών του παραγόμενου ελαφροσκυροδέματος και συμβατικού σκυροδέματος φαίνονται στον Πίνακα 28:

**Πίνακας 28:** Αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων 100\*200mm σε διάρρηξη

Είδος Σκυροδέματος	Κωδικός Δοκιμίων	Ηλικία	Μέση αντοχή σε διάρρηξη (MPa)
Συμβατικό σκυρόδεμα	0α/0β	28 ημέρες	3,63
	0γ/0δ/0ε/0στ	90 ημέρες	3,52
Ελαφροσκυρόδεμα	5α/5β	28 ημέρες	2,38
	5γ/5δ/5ε/5στ	90 ημέρες	2,42

Παρατηρείται ότι οι αντοχές σε εφελκυσμό των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε δοκιμή διάρρηξης (Brazilian Test) είναι πρακτικά ίδιες στις ηλικίες των 28 και 90 ημερών, τόσο για τα δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος όσο και για εκείνα του ελαφροσκυροδέματος.

### 3.1.2.3. Δοκιμή Μέτρησης Μέτρου Ελαστικότητας

Το μέτρο ελαστικότητας  $E_c$  του σκυροδέματος μπορεί να προσδιορισθεί από διάφορους εμπειρικούς τύπους συναρτήσει της θλιπτικής αντοχής του.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206-1 ισχύει:

$$E_c = 22 \cdot (f_{cm} / 10)^{0,3}, \quad E_c \text{ (MPa) και } f_c \text{ (GPa)} \quad (3.1)$$

Επίσης από στατιστική με επεξεργασία πειραματικών αποτελεσμάτων, η μέση τιμή  $E_{cm}$  του μέτρου ελαστικότητας έχει συσχετισθεί με τη μέση τιμή  $f_{cm}$  της θλιπτικής αντοχής και δίνεται από τη σχέση [26]:

$$E_{cm} = 9500 \cdot (f_{cm})^{1/3}, \quad E_c \text{ (MPa) και } f_c \text{ (MPa)} \quad (3.2)$$

Από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων για τον προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας κατά ASTM 469, με τη χρήση πρισματικών και κυλινδρικών δοκιμίων και strain-gages, προέκυψε για την περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος,  $E_{cm} = 42623$  MPa. Η αντίστοιχη πειραματική τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας για την περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος μετρήθηκε ίση με  $E_{cm} = 14844$  MPa.

Στον Πίνακα 29 δίνονται συγκριτικά οι προκύπτουσες θεωρητικές τιμές και η πειραματική τιμή:

Πίνακας 29: Προσδιορισμός Μέτρου Ελαστικότητας

ΜΕΘΟΔΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ	$E_{cm}$ (MPa)
Συμβατικό Σκύροδεμα	
Πειραματική ASTM 469	42623
Θεωρητική Σχέση 3.1	35555
Θεωρητική Σχέση 3.2	34890
Ελαφροσκυρόδεμα	
Πειραματική ASTM 469	14844

Παρατηρούμε και στις δύο περιπτώσεις θεωρητικού προσδιορισμού, το Μέτρο Ελαστικότητας για το συμβατικό σκυρόδεμα να είναι μειωμένο σε τάξη του 23% συγκριτικά με αυτό του πειραματικού προσδιορισμού. Επίσης παρατηρείται η πειραματική τιμή του Μέτρου Ελαστικότητας για το ελαφροσκυρόδεμα να είναι 2,87 φορές μικρότερη σε σχέση με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος.

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ελαφροσκυροδέματος, που προσδιορίστηκε πειραματικά είναι αντίστοιχη αυτών που συναντώνται στη βιβλιογραφία., για ελαφροσκυρόδεμα αντίστοιχης κατηγορία αντοχής και μοναδιαίου βάρους. [8] [29]

Στις Εικόνες 8 & 9 απεικονίζονται δοκίμια υποβαλλόμενα στη δοκιμή προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας.



Εικόνα 8: Πρισματικό δοκίμιο ελαφροσκυροδέματος σε δοκιμή προσδιορισμού του Μέτρου Ελαστικότητας



Εικόνα 9: Πρισματικό δοκίμιο ελαφροσκυροδέματος σε δοκιμή προσδιορισμού του Μέρους Ελαστικότητας

### 3.2. Έλεγχος ιδιοτήτων Δοκιμών Οπλισμένου Ελαφροσκυροδέματος

Για την παρασκευή των έξι (6) δοκιμών – δοκών οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, παρασκευάστηκαν δώδεκα συνθέσεις ελαφροσκυροδέματος με αδρανές την κίσηρη.

#### 3.2.1. Μελέτη Σύνθεσης οπλισμένων στοιχείων ελαφροσκυροδέματος

Σε κάθε σύνθεση Δi-j που παρασκευαζόταν για την κατασκευή των δοκιμών οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές νωπού σκυροδέματος και συγκεκριμένα δοκιμή κάθισης και μοναδιαίου βάρους. Τα αποτελέσματα των δοκιμών παρουσιάζονται στον Πίνακα 30:

**Πίνακας 30:** Αποτελέσματα δοκιμών νωπού ελαφροσκυροδέματος των διαφόρων συνθέσεων

Σύνθεση	ΚΑΘΙΣΗ (mm)	ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΒΑΡΟΣ (kg/m <sup>3</sup> )
Δ1 - 1	60	1612,875
Δ1 - 2	100	1643,125
Δ2 - 1	120	1669,125
Δ2 - 2	50	1630,625
Δ3 - 1	55	1577,875
Δ3 - 2	50	1556,875
Δ4 - 1	160	1533,125
Δ4 - 2	50	1459,125
Δ5 - 1	100	1343,625
Δ5 - 2	70	1476,125
Δ6 - 1	50	1477,875
Δ6 - 2	100	1460,875

Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στην κάθιση και στο μοναδιαίο βάρος υφίστανται λόγω των διαφορετικών ποσοτήτων περιεχόμενης υγρασίας στα αδρανή (κίσηρη) που χρησιμοποιούταν κάθε φορά, καθώς δεν υπήρχε η δυνατότητα για λήψη των απαραίτητων αδρανών από τον ίδιο σωρό. Η διαφορετική περιεχόμενη υγρασία στην κίσηρη μετέβαλλε κάθε φορά την απαιτούμενη ποσότητα νερού καθώς και την απαιτούμενη ποσότητα υπερρευστοποιητή προκειμένου το παραγόμενο ελαφροσκυρόδεμα να παρουσιάζει ικανοποιητική εργασιμότητα.

### 3.2.2. Εργαστηριακές Δοκιμές Σκληρυμένου Σκυροδέματος

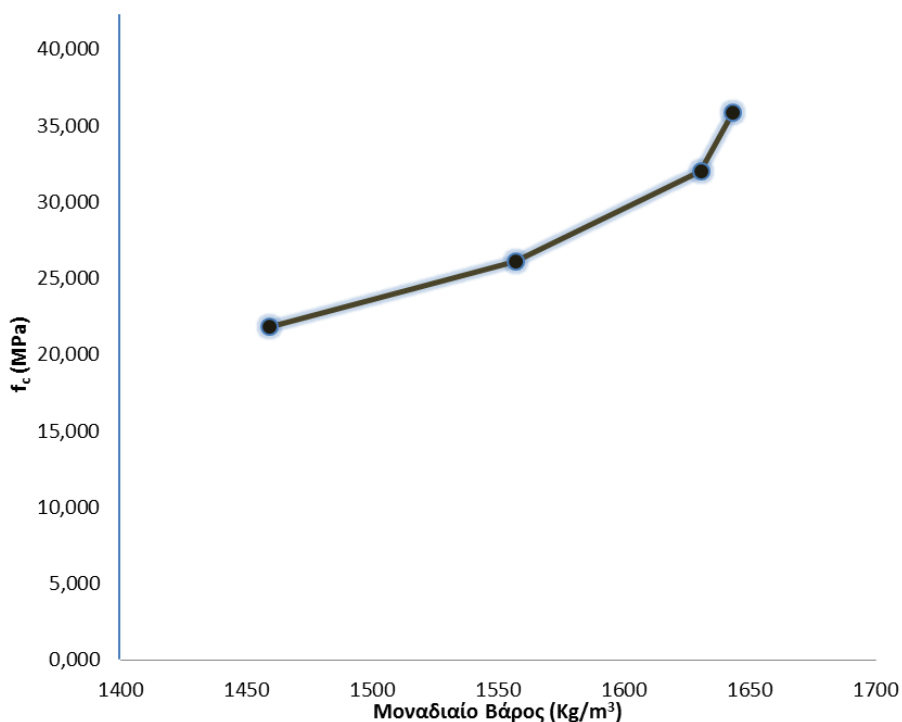
Όπως έχει επισημανθεί, προκειμένου να προσδιορισθεί η ονομαστική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή των οπλισμένων δοκών, ελήφθησαν τρία (3) δείγματα από κάθε συνθεση και παρασκευάσθηκαν συνολικά δεκαοκτώ (18) κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100\*100 mm τα οποία δοκιμάστηκαν σε μονοαξονική θλίψη μετά το πέρας των 28 ημερών.

Οι μέση αντοχή 28 ημερών ανά δοκό παρουσιάζεται στον Πίνακα 31.

Πίνακας 31: Μέση αντοχή κυβικών δοκιμών σε θλίψη

Δοκός	Δ1 - 2	Δ2 - 2	Δ3 - 2	Δ4 - 2	Δ5 - 2	Δ6 - 2
Μέση Αντοχή σε θλίψη $f_{c,m}$ (MPa)	36,40	32,40	26,50	22,80	25,20	28,00

Στο Σχήμα 16, παρουσιάζεται η συσχέτιση του μοναδιαίου βάρους με τη μέση αντοχή σε θλίψη στην ηλικία των 28 ημερών, κυβικών δοκιμών 100\*100 mm ελαφροσκυροδέματος. Όπως φαίνεται και από το σχήμα η θλιπτική αντοχή αυξάνεται όσο αυξάνεται το μοναδιαίο βάρος του σκυροδέματος.



Σχήμα 16: Σχέση μέσης θλιπτικής αντοχής  $f_{cm}$  και μοναδιαίου βάρους σε Ελαφροσκυρόδεμα

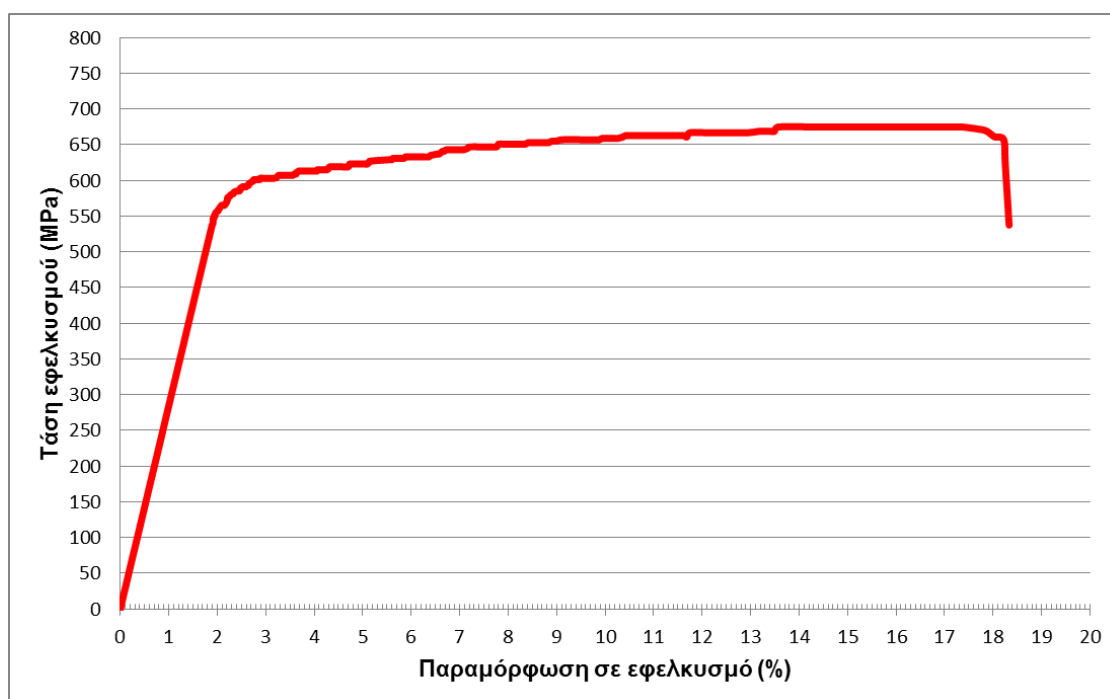
### 3.2.3. Εργαστηριακές Δοκιμές Χάλυβα Οπλισμού

Πραγματοποιήθηκε πειραματικά ο προσδιορισμός της αντοχής σε εφελκυσμό του χάλυβα οπλισμού και τα αποτελέσματα δίνονται στον Πίνακα 32.

Τα διαγράμματα τάσεων – ανηγμένων παραμορφώσεων των χαλύβων που χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτά που φαίνονται στα Σχήματα 17, 18 & 19 και από τα οποία προκύπτουν οι τιμές του Πίνακα 32:

Πίνακας 32: Δοκιμές Χάλυβα

Ονομαστική Διάμετρος	Τάση διαρροής $f_y$ (Μpa)	Τάση θραύσης $f_u$ (Μpa)
Φ8	550	670
Φ14	610	740
Φ16	560	680

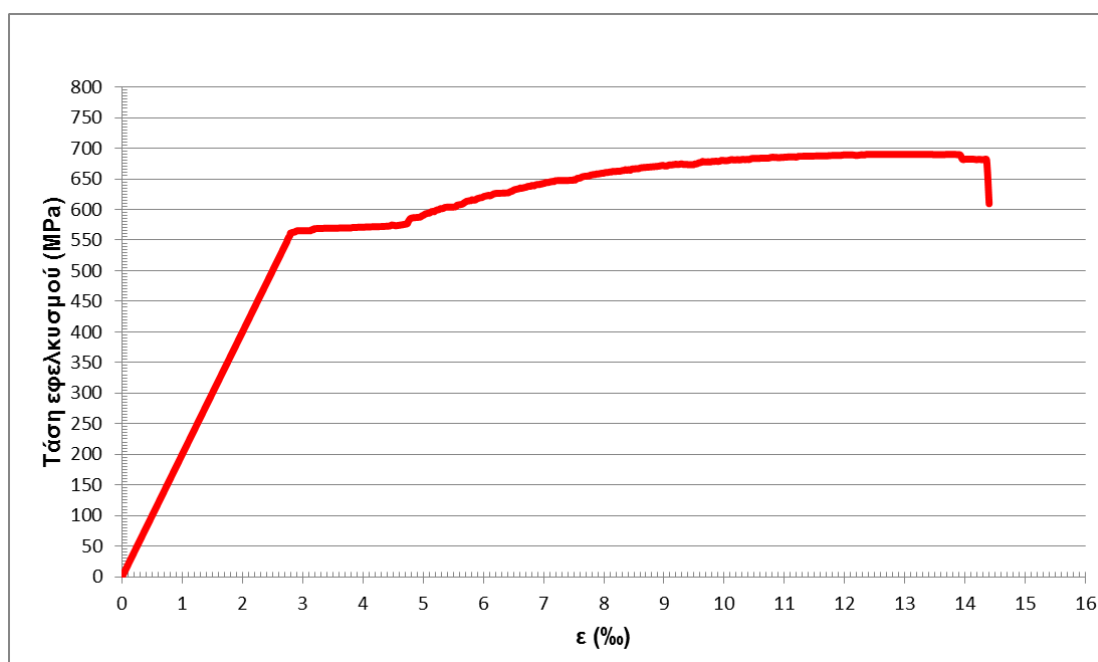


Σχήμα 17: Διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα Φ8





Σχήμα 18: Διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα Φ14



Σχήμα 19: Διάγραμμα τάσεων - ανηγμένων παραμορφώσεων χάλυβα Φ16

### **3.3. Έλεγχος Μηχανικών ιδιοτήτων Δοκιμίων Οπλισμένου Ελαφροσκυροδέματος**

Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα από τη διαδικασία πειραματικού ελέγχου έξι οπλισμένων δοκών ελαφροσκυροδέματος. Τα πειράματα αυτά έχουν ως σκοπό τη διερεύνηση της συμπεριφοράς του ελαφροσκυροδέματος ως δομικού υλικού υπό μονότονη φόρτιση έως την αστοχία. Επίσης παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανακυκλιζόμενης φόρτισης που πραγματοποιήθηκε για παραμορφώσεις 1δy, 2δy, 3δy, 4δy, και σε ορισμένες περιπτώσεις έως 5δy.

Όπως έχει προαναφερθεί παρασκευάστηκαν έξι (6) δοκοί μήκους δύο μέτρων ποικίλης διατομής. Οι τέσσερις (4) είναι ορθογωνικής διατομής διαστάσεων 150\*300 mm (Δ1, Δ2, Δ3, Δ4) και οι δύο (2) τετραγωνικής διατομής 200\*200 mm (Δ5, Δ6).

Τα πειραματικά αποτελέσματα καθώς και η σύγκριση με τια αναμενόμενες τιμές του σχεδιασμού, παρουσιάζονται στους Πίνακες 34, 36, 37 & 38.

Επίσης γίνεται αναφορά στη μαθηματική ανάλυση των μετρήσεων, μέσα από την οποία προέκυψαν όλες οι σημαντικές παράμετροι για το σχολιασμό των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας.

#### **3.3.1. Ανάλυση Αποτελεσμάτων**

Στον Πίνακα 33 παρουσιάζονται ανάλογα με τις διαστάσεις της διατομής και τον τρόπο επιβολής της πειραματικής φόρτισης, οι υπολογιστικές τιμές των ροπών διαρροής και αστοχίας και των αντίστοιχων φορτίων. Επίσης δίνεται η μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος που παρασκευάστηκε για την κατασκευή των δοκών.

Πίνακας 33: Λεπτομέρειες δοκών πειραματικής διαδικασίας

Δοκός	Διατομή		$f_{m,c}$ (MPa)	Διαμήκης Εφελκόμενος Οπλισμός	Διαμήκης Θλιβόμενος Οπλισμός	Εγκάρσιος Οπλισμός Διάτμησης		Είδος Φόρτισης
	b (mm)	h (mm)				Διατμητικό Μήκος	Κρίσιμο Μήκος	
Δ1	150	300	36,4	3Φ16	2Φ14	Φ8/140	Φ8/140	Μονότονη
Δ2	150	300	32,4	3Φ16	2Φ14	Φ8/140	Φ8/140	Μονότονη
Δ3	150	300	26,5	3Φ16	3Φ16	Φ8/150	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη
Δ4	150	300	22,8	3Φ16	3Φ16	Φ8/150	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη
Δ5	200	200	25,2	3Φ16	3Φ16	Φ8/125	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη
Δ6	200	200	28	3Φ16	3Φ16	Φ8/125	Φ8/50	Ανακυκλιζόμενη

Η αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$  σε μονοαξονική θλίψη και η τάση διαρροής του χάλυβα σε εφελκυσμό, προσδιορίστηκαν από δοκιμές σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος 100\*100 mm τα οποία ελήφθησαν κατά την σκυροδέτηση (Πίνακας 31) και από δοκιμές σε ράβδους χάλυβα (Πίνακας 32) που πραγματοποιήθηκε τόσο στον εγκάρσιο όσο και στον διαμήκη οπλισμό, αντίστοιχα. Η τιμή της αντοχής του σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στους υπολογισμούς ήταν η αντίστοιχη τιμή που προκύπτει για δοκιμή σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος 150\*300 mm. Για το προσδιορισμό της αντοχής των αντίστοιχων κυλινδρικών δοκιμών πραγματοποιήθηκε αρχικά αναγωγή της αντοχής των κυβικών δοκιμών των 28 ημερών σε αντοχή των ημερών που πραγματοποιήθηκε η δοκιμή δηλαδή σε αντοχή των 90 ημερών, έπειτα αναγωγή σε αντοχή κυβικών δοκιμών 150\*150 mm βάσει πειραματικού συντελεστή [30], και τέλος αναγωγή της προκύπτουσας αντοχής σε αντοχή κυλινδρικών δοκιμών διαστάσεων 150\*300 mm [31], όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 34.

Στον Πίνακα 35 παρουσιάζονται οι υπολογιστικές τιμές ροπών και αντίστοιχου φορτίου διαρροής και αστοχίας.

**Πίνακας 34:** Υπολογισμός μέσης αντοχής κυλινδρικών δοκιμών κατά το χρόνο δοκιμής

Δοκός	$f_{m,cc}$ (MPa) 100*100mm (28 ημερών)	$f_{m,cc}$ (MPa) 100*100mm (ηλικία δοκιμής - 90 ημέρες)	$f_{m,cc}$ (MPa) 150*150 mm (ηλικία δοκιμής - 90 ημέρες)	$f_{m,c}$ (MPa)
<b>Δ1</b>	35,87	40,80	40,02	<b>36,40</b>
<b>Δ2</b>	31,97	36,38	35,69	<b>32,40</b>
<b>Δ3</b>	26,1	29,70	29,14	<b>26,50</b>
<b>Δ4</b>	22,42	25,50	25,02	<b>22,80</b>
<b>Δ5</b>	24,78	28,19	27,66	<b>25,20</b>
<b>Δ6</b>	27,62	31,43	30,83	<b>28,00</b>

Η καμπτική αντοχή υπολογίσθηκε στην τάση διαρροής της εφελκυστικής αντοχής του διαμήκους οπλισμού χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος:

$$\sigma_c = f_c + 5 \text{lf}_t, \quad \text{όπου} \quad f_t = 1,40 [(f_c - 8)/10]^{2/3} \quad (3.3)$$

Τέλος σημειώνεται ότι όλοι οι υπολογισμοί έγιναν χωρίς συντελεστές ασφαλείας.

**Πίνακας 35:** Υπολογιστικές τιμές (θεωρητικές) ροπών & αντίστοιχου φορτίου διαρροής και αστοχίας

ΔΟΚΟΣ	Υπολογισθέντα στοιχεία			
	$P_{u,calc}$ (kN)	$P_{y,calc}$ (kN)	$M_{y,calc}$ (kNm)	$M_{f,calc}$ (kNm)
<b>Δ1</b> (150*300mm) Μονότονη Φόρτιση	175,02	163,56	79,74	85,32
<b>Δ2</b> (150*300mm) Μονότονη Φόρτιση	174,01	162,97	79,45	84,83
<b>Δ3</b> (150*300mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	172,61	164,42	80,15	84,15
<b>Δ4</b> (150*300mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	171,56	164,11	80,00	83,64
<b>Δ5</b> (200*200mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	114,29	109,38	53,32	55,72
<b>Δ6</b> (200*200mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	114,77	109,52	53,39	55,95

Στον Πίνακα 36 παρουσιάζονται οι μέγιστες τιμές των φορτίων που αναπτύχθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία και οι συσχέτιση των τεμνουσών δυνάμεων και των αντίστοιχων ροπών που καταγράφηκαν σε σχέση με τις υπολογιστικές τιμές βάσει του Ευρωκώδικα 2. Το  $\delta_{y,exp}$  είναι η μετατόπιση που αντιστοιχεί στο μέγιστο φορτίο διαρροής σχηματισμού μιας πλαστικής άρθρωσης.

**Πίνακας 36:** Πειραματικές τιμές τεμνουσών δυνάμεων και συσχέτιση με τις αντίστοιχες υπολογιστικές τιμές

ΔΟΚΟΣ	Πειραματικές τιμές					
	$P_{max,exp}$ (kN)	$\delta_{y,exp}$ (mm)	$V_{exp}$ (kN)	$M_{exp}$ (kNm)	$M_{exp}/$ $M_{f,calc}$	$V_{exp}/$ $V_{calc}$
<b>Δ1</b> (150*300 mm) Μονότονη Φόρτιση	206,02	10,07	103,01	100,43	1,18	1,18
<b>Δ2</b> (150*300 mm) Μονότονη Φόρτιση	206,95	9,55	103,48	100,89	1,19	1,19
<b>Δ3</b> (150*300 mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	184,94	8,49	92,47	90,16	1,07	1,07
<b>Δ4</b> (150*300 mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	184,34	8,50	92,17	89,87	1,07	1,07
<b>Δ5</b> (200*200 mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	108,92	13,46	54,46	53,10	0,95	0,95
<b>Δ6</b> (200*200 mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	108,80	13,00	54,40	53,04	0,95	0,95

Στον Πίνακα 37 παρουσιάζονται οι υπολογιστικές τιμές των φορτίων διαρροής και αστοχίας  $P_{y,calc}$ ,  $P_{u,calc}$  αντιστοίχως, για τις Δοκούς Δ1 & Δ2 οι οποίες υπόκεινται σε μονότονη φόρτιση και οι αντίστοιχες μετατοπίσεις για τον προσδιορισμό της αναπτυσσόμενης πλαστιμότητας.

Ένα από τα μεγέθη που μπορεί να υπολογιστεί με τη βοήθεια των προηγούμενων μετρήσεων, είναι ονομαστική τιμή μετακίνησης ( $\delta_{ny}$ ). Πρόκειται ουσιαστικά για την τιμή της

μετατόπισης που αντιστοιχεί στο πειραματικό φορτίο της καμπύλης (P - Δ) αυξημένο με λόγο που είναι ίσος με  $P_{max,calc} / P_{y,calc}$ .

Ισχύει  $\delta_{ny} = \delta_y * P_{u,calc} / P_{y,calc}$  και οι τιμές για το  $\delta_u$  λαμβάνονται αυτές που αντιστοιχούν στη θραύση του δοκιμίου.

Ο δείκτης πλαστιμότητας  $\mu$  προσδιορίζεται ως  $\mu = \delta_u / \delta_{ny}$ .

**Πίνακας 37:** Υπολογιστικές τιμές φορτίου διαρροής & αστοχίας και αντίστοιχων μετατοπίσεων για τον προσδιορισμό προκύπτουσας πλαστιμότητας

ΔΟΚΟΣ	$P_{y,calc}$ (kN)	$P_{u,calc}$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_{ny}$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\mu$
<b>Δ1</b> (150*300mm) Μονότονη Φόρτιση	163,56	175,02	9,13	9,77	120	12,28
<b>Δ2</b> (150*300mm) Μονότονη Φόρτιση	162,97	174,01	8,22	8,79	110	12,51

Στον Πίνακα 38 παρουσιάζονται οι μετατοπίσεις που αντιστοιχούν στον τελευταίο κύκλο της κάθε ομάδας ανακύκλισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας. Οι τιμές που επισημαίνονται με έντονη γραμματοσειρά (bold), αντιστοιχούν στις μετατοπίσεις για το μέγιστο φορτίο πριν τη θραύση ( $\delta_{fail}$ ) και οι αντίστοιχες πλαστιμότητες είναι οι  $\mu_{fail} = \delta_{fail} / \delta_{ny}$ . Όσον αφορά τις Δοκούς Δ3 - Δ5 όπου η θραύση επέρχεται στην τέταρτη (4<sup>η</sup>) ομάδα ανακυκλίσεων ισχύει  $\delta_{fail} = \delta_{4κ}$ , ενώ για τη Δοκό Δ6,  $\delta_{fail} = \delta_{5κ}$  καθώς η θραύση επέρχεται στην πέμπτη (5<sup>η</sup>) ομάδα ανακύκλισης. Οι μετατοπίσεις του τελευταίου κύκλου της προηγούμενης από τη θραύση ομάδα είναι οι  $\delta_{sust}$  και ο δείκτης πλαστιμότητας ορίζεται ως  $\mu_{sust} = \delta_{sust} / \delta_{ny}$  και επισημαίνονται με πλάγια γραφή (Italian).

**Πίνακας 38:** Μετατοπίσεις του τελευταίου κύκλου κάθε ομάδας ανακύκλισης και οι αντίστοιχες τιμές του δείκτη πλαστιμότητας

<b>ΔΟΚΟΣ</b>	<b>δ<sub>1κ</sub></b>	<b>δ<sub>2κ</sub></b>	<b>δ<sub>3κ</sub></b>	<b>δ<sub>4κ</sub></b>	<b>δ<sub>5κ</sub></b>	<b>μ<sub>1κ</sub></b>	<b>μ<sub>2κ</sub></b>	<b>μ<sub>3κ</sub></b>	<b>μ<sub>4κ</sub></b>	<b>μ<sub>5κ</sub></b>
<b>Δ3</b> (150*300mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	13,78	20,05	29,89	39,43	-	1,26	1,83	2,73	<b>3,60</b>	-
<b>Δ4</b> (150*300mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	9,35	17,64	27,09	35,22	-	1,14	2,16	3,31	<b>4,31</b>	-
<b>Δ5</b> (200*200mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	13,24	26,09	39,09	53,03	-	0,90	1,77	2,65	<b>3,60</b>	-
<b>Δ6</b> (200*200mm) Ανακυκλιζόμενη Φόρτιση	13,08	25,10	37,38	49,60	54,6	0,91	1,74	2,59	3,44	<b>3,79</b>

### 3.3.2. Πειραματικά Αποτελέσματα

#### 3.3.2.1. Δοκός Δ1

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο, το οποίο υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση, εφαρμόσθηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 120,19 mm.

Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν  $P_{\max, \exp} = 206,02$  kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση  $\delta = 107,60$  mm.

Με την αύξηση επιβολής της μετατόπισης αρχικά παρατηρήθηκαν λοξές ρωγμές στην περιοχή του φορέα μεταξύ της μέγιστης τέμνουσας και της μέγιστης ροπής, δηλαδή ενδιάμεσα των στηρίξεων και του σημείου επιβολής της φόρτισης οι οποίες κατακορυφώνονται όσο πλησιάζουν το θλιβόμενο πέλμα. Με την αύξηση της επιβολής της εφαρμοζόμενης μετατόπισης οι λοξές ρωγμές γίνονται εντονότερες κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου καθώς επίσης στην περιοχή αυτή εμφανίζονται κατακόρυφες ρωγμές οι οποίες συσσωρεύονται περί του πλάτους επιβολής της πλάκας φόρτισης (εντός κρίσιμου μήκους). Επίσης παρατηρούνται οριζόντιες ρωγμές στο θλιβόμενο πέλμα της δοκού σε πλάτος περίπου όσο η πλάκα φόρτισης, οι οποίες οδηγούν σε αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στην περιοχή αυτή.

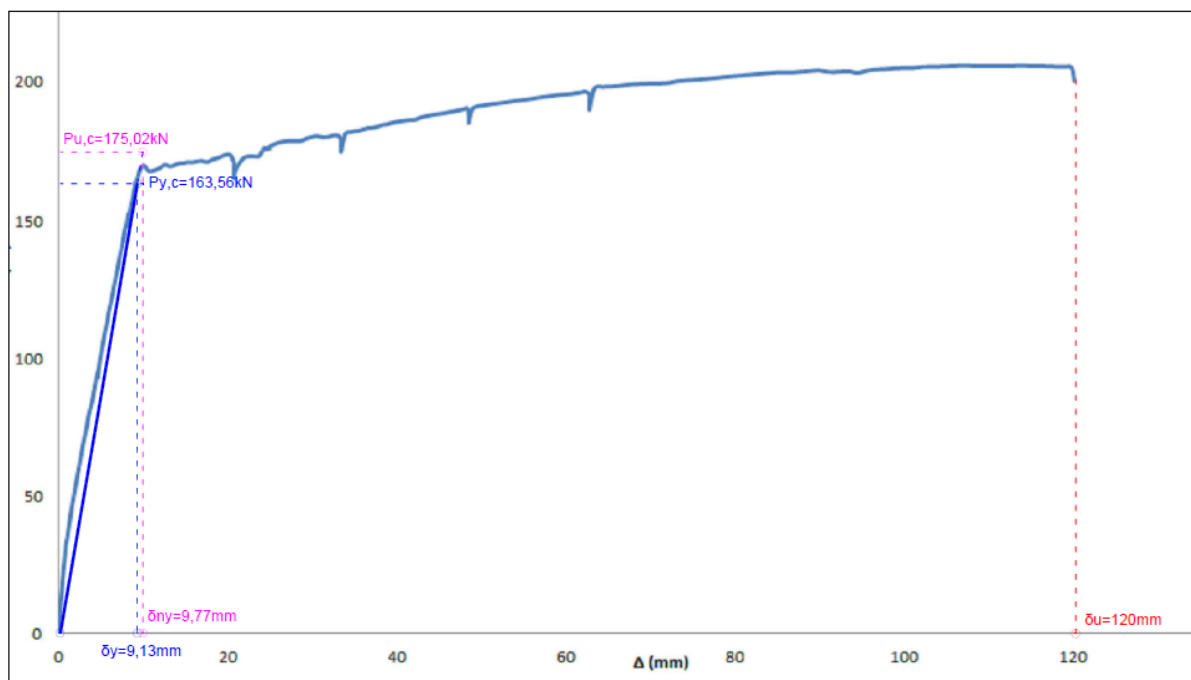
Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπποδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς τη δεξιά στήριξη προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά.

Βάσει της πλαστικής ανάλυσης, η δοκός έχει σχεδιασθεί για φορτίο αστοχίας  $P_{u, \text{calc}} = 175,02$  kN και φορτίο διαρροής  $P_{y, \text{calc}} = 163,56$  kN με την πλαστική άρθρωση να επέρχεται για  $\delta_{ny} = 9,77$  mm και το δείκτη πλαστιμότητας να παίρνει την τιμή 12,28 (Πίνακας 37).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τις ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Ειδικότερα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο σημείο επιβολής της φόρτισης παρουσιάζεται 18% αυξημένη σε σχέση με την υπολογιζόμενη κατά το σχεδιασμό. (Πίνακας 36).

Επιπρόσθετα, το μήκος της θλιβόμενης ζώνης  $x$  που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάστηκε μεγαλύτερο περίπου κατά 29,80% σε σχέση με το θεωρητικό και ήταν ίσο με  $x_{\exp} = 55,7$  mm ενώ κατά το σχεδιασμό υπολογίστηκε ίσο με  $x_{\text{calc}} = 39,10$  mm.

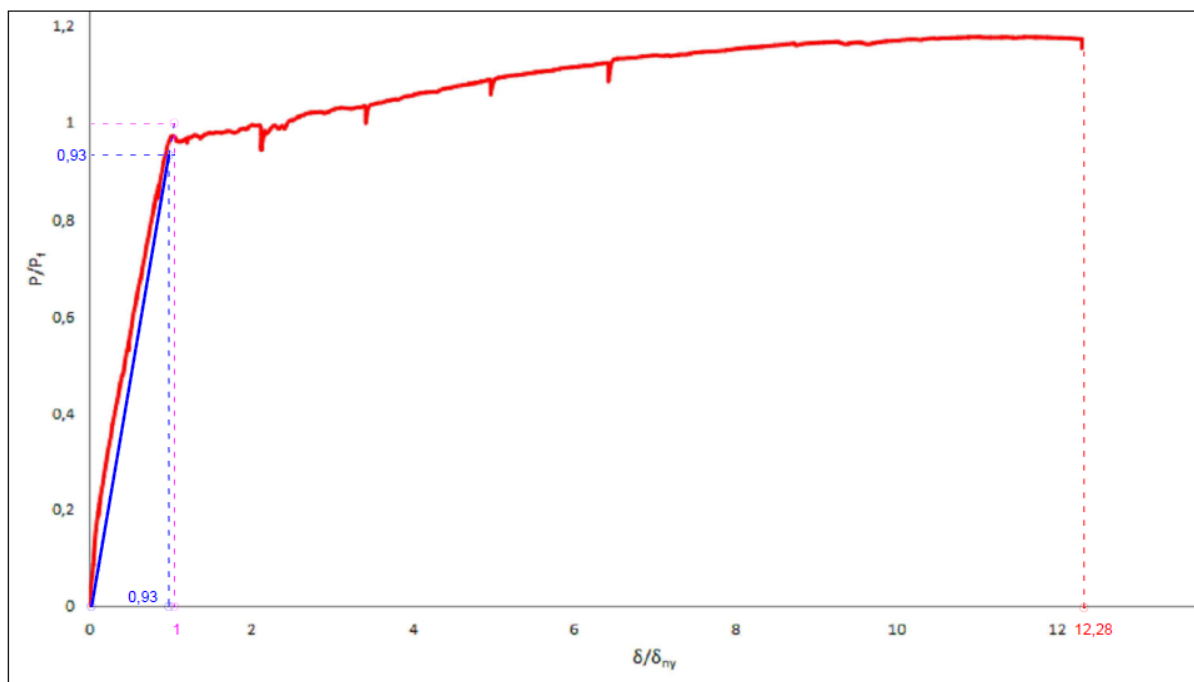




Σχήμα 20: Δοκός Δ1: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ )



Εικόνα 10: Πειραματική Διάταξη επιβολής μονότονης φόρτισης (Δοκοί Δ1 & Δ2)



Σχήμα 21: Δοκός Δ1: διάγραμμα  $(P/P_t) - (\delta/\delta_{ny})$



Εικόνα 11: Δοκός Δ1: εμφάνιση κεκλιμένων ρωγμών εντός διαμητικού μήκους



Εικόνα 12: Δοκός Δ1: συγκέντρωση καμπτοδιαμητικών ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης



Εικόνα 13: Δοκός Δ1: αστοχία δοκιμίου υπό Μονότονη Φόρτιση

### 3.3.2.2. Δοκός Δ2

Στο συγκεκριμένο δοκίμιο το οποίο υποβλήθηκε σε μονοτονική φόρτιση, εφαρμόσθηκε μια διαρκώς αυξανόμενη μετατόπιση έως τη μέγιστη τιμή των 110,52 mm.

Το μέγιστο φορτίο το οποίο αναπτύχθηκε κατά τη διεξαγωγή του πειράματος ήταν  $P_{\max, \exp} = 206,95$  kN και εμφανίστηκε για μετατόπιση  $\delta = 100,01$  mm.

Με την αύξηση επιβολής της μετατόπισης αρχικά παρατηρήθηκαν λοξές ρωγμές στην περιοχή του φορέα μεταξύ της μέγιστης τέμνουσας και της μέγιστης ροπής, δηλαδή ενδιάμεσα των στηρίξεων και του σημείου επιβολής της φόρτισης οι οποίες κατακορυφώνονται όσο πλησιάζουν το θλιβόμενο πέλμα. Με την αύξηση της επιβολής της εφαρμοζόμενης μετατόπισης οι λοξές ρωγμές γίνονται εντονότερες κοντά στο σημείο επιβολής του φορτίου καθώς επίσης στην περιοχή αυτή εμφανίζονται κατακόρυφες ρωγμές οι οποίες συσσωρεύονται περί του πλάτους επιβολής της πλάκας φόρτισης (εντός κρίσιμου μήκους). Επίσης παρατηρούνται οριζόντιες ρωγμές στο θλιβόμενο πέλμα της δοκού σε πλάτος περίπου όσο η πλάκα φόρτισης, οι οποίες οδηγούν σε αποδιοργάνωση του σκυροδέματος στην περιοχή αυτή.

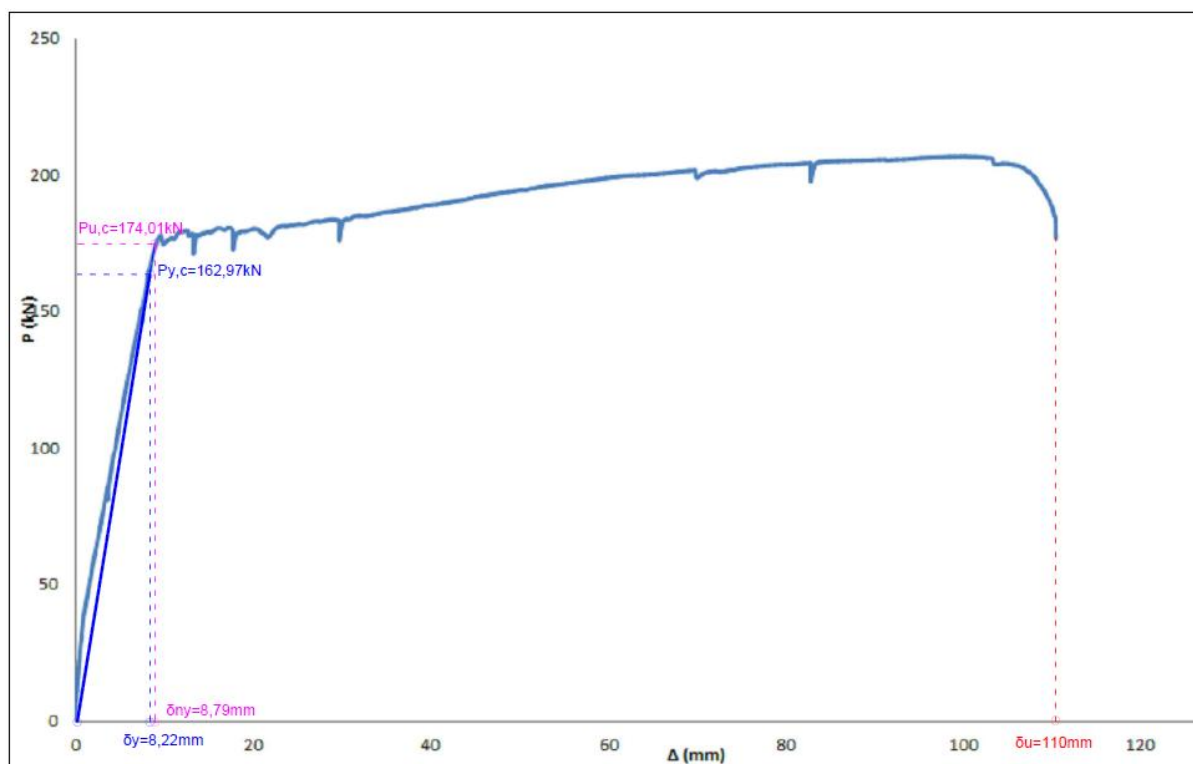
Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς τη δεξιά στήριξη προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά.

Βάσει της πλαστικής ανάλυσης, η δοκός έχει σχεδιασθεί για φορτίο αστοχίας  $P_{u, \text{calc}} = 174,01$  kN και φορτίο διαρροής  $P_{y, \text{calc}} = 162,97$  kN με την πλαστική άρθρωση να επέρχεται για  $\delta_{ny} = 8,79$  mm και το δείκτη πλαστιμότητας να παίρνει την τιμή 12,51. (Πίνακας 37).

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι όσον αφορά τις ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Ειδικότερα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο σημείο

επιβολής της φόρτισης παρουσιάζεται 19% αυξημένη σε σχέση με την υπολογιζόμενη κατά το σχεδιασμό. (Πίνακας 36).

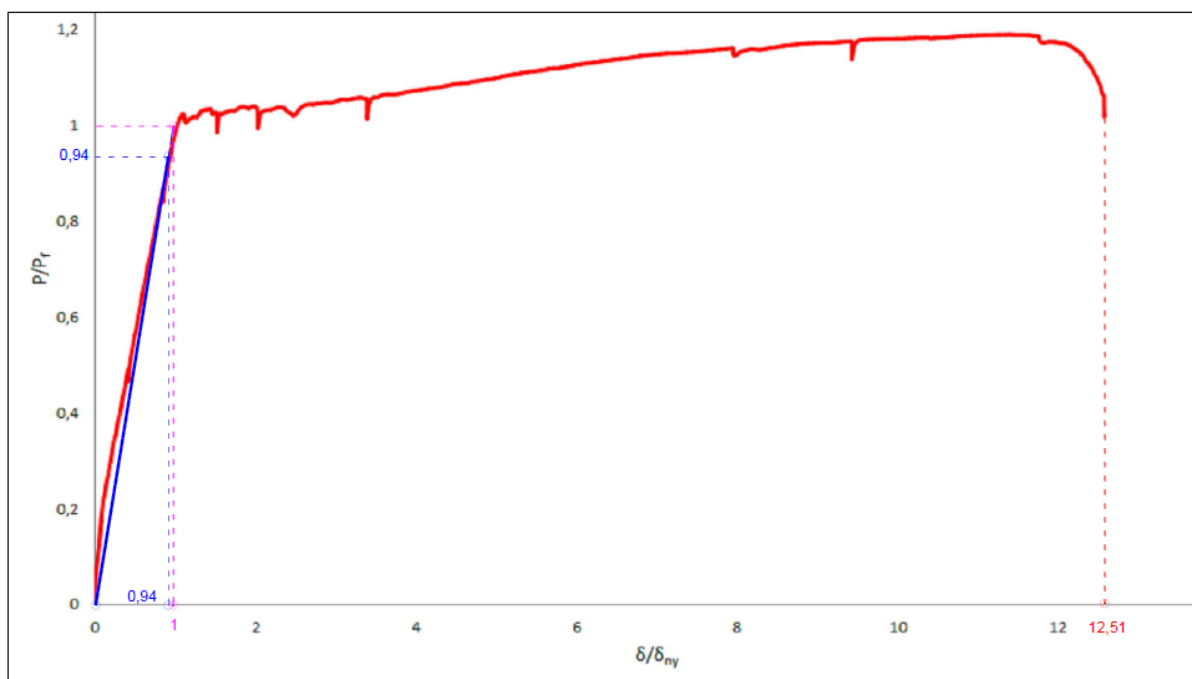
Επιπρόσθετα, το μήκος της θλιβόμενης ζώνης  $x$  που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάστηκε μεγαλύτερο περίπου κατά 28,9% σε σχέση με το θεωρητικό και ήταν ίσο με  $x_{exp} = 59,69$  mm ενώ κατά το σχεδιασμό υπολογίστηκε ίσο με  $x_{calc} = 42,43$  mm (ομοίως με Δ1).



Σχήμα 22: Δοκός Δ2: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ )



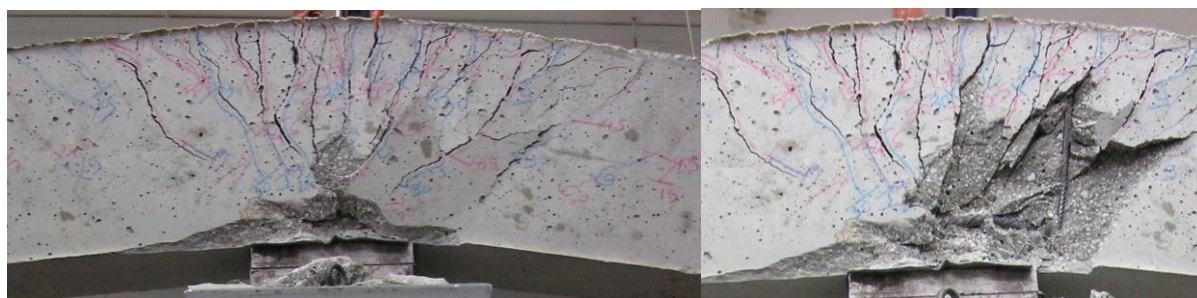
Εικόνα 14: Δοκός Δ2: εμφάνιση κεκλιμένων ρωγμών εντός διαμητικού μήκους



Σχήμα 23: Δοκός Δ2: διάγραμμα  $(P/P_t) - (\delta/\delta_{Ny})$



Εικόνα 15: Δοκός Δ2: συγκέντρωση καμπτοδιαμητικών ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης



Εικόνα 16: Δοκός Δ2: αστοχία δοκιμίου υπό Μονότονη Φόρτιση

### 3.3.2.3. Δοκός Δ3

Το εν λόγω δοκίμιο (Δ3) υποβλήθηκε σε τέσσερις (4) ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση 1δ, 2δ, 3δ & 4δ αντίστοιχα.

Οι τρεις (3) πρώτες ομάδες αποτελούνται από τρεις (3) ολοκληρωμένους κύκλους φόρτισης, ενώ στο δεύτερο κύκλο φόρτισης της τέταρτης ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου.

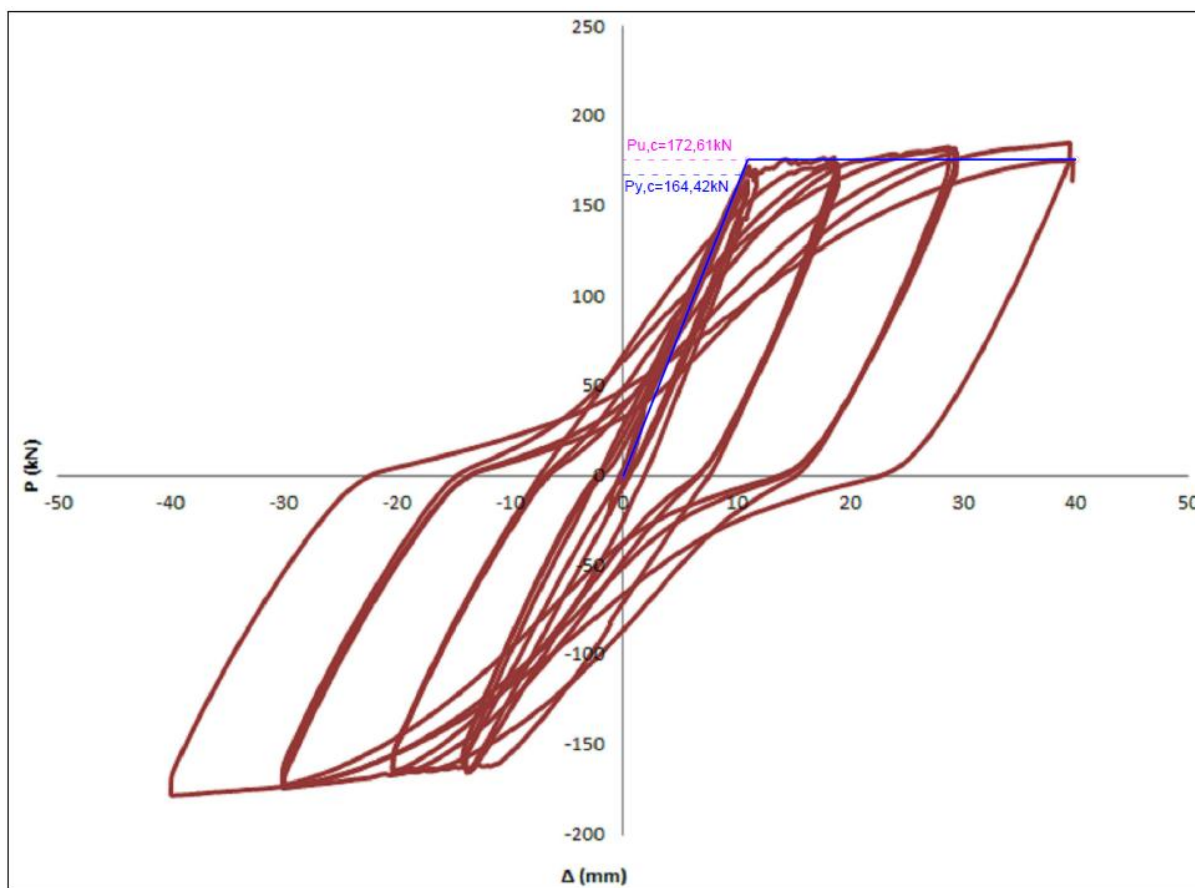
Αρχικά, παρατηρούνται λοξές ρωγμές οι οποίες γίνονται πιο πυκνές στο σημείο επιβολής της φόρτισης πλησιάζοντας το θλιβόμενο πέλμα. Με την εναλλαγή της φοράς φόρτισης παρατηρούνται όμοιας μορφής και πυκνότητας ρωγμές κάθετες στις προϋπάρχουσες, ενώ οι νέες κατακόρυφες ρωγμές τείνουν να ενωθούν με τις προηγούμενες. Με την πάροδο της πειραματικής διαδικασίας εμφανίζονται και κάποιες νέες ρωγμές και οι ήδη υπάρχουσες διευρύνονται και συγκεντρώνονται στο σημείο επιβολής της φόρτισης.

Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιαμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς την αριστερή στήριξη προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά. Επίσης παρατηρήθηκε στρέβλωση του διαμήκους οπλισμού στην περιοχή περί του πλάτους των πλακών φόρτισης.

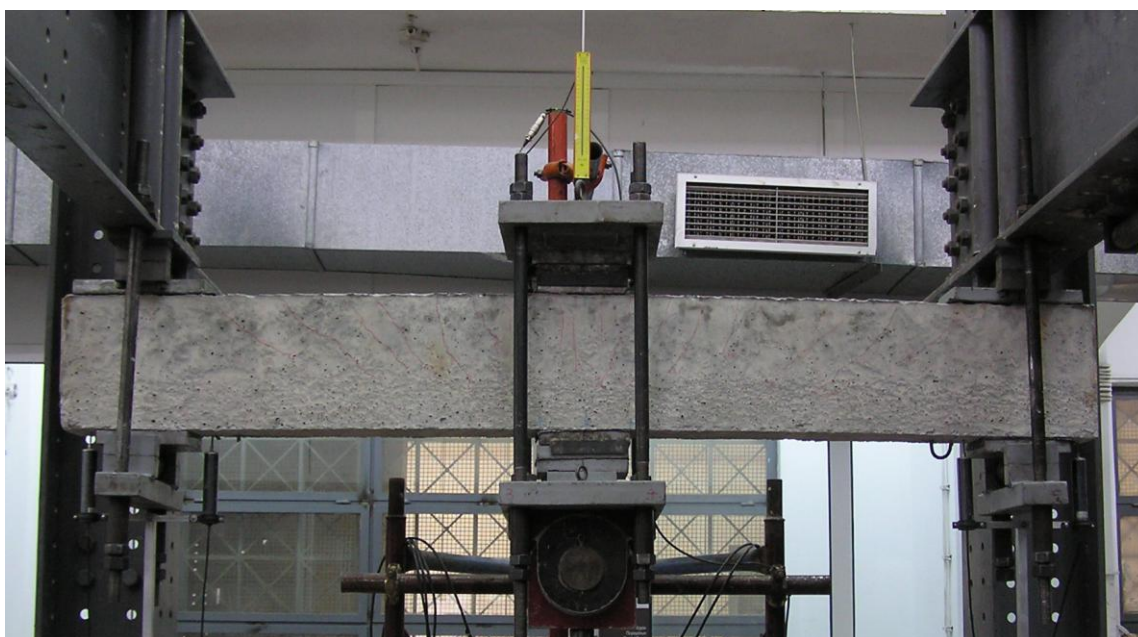
Επομένως, από την τρίτη (3<sup>η</sup>) ομάδα ανακυκλίσεων προκύπτει  $\delta_{sust} = 29,89$  mm και η πλαστιμότητα καταγράφεται σε 2,73. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{fail} = 39,43$  mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι 3,60. (Πίνακας 38)

Το μέγιστο φορτίο που παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 184,94 kN και εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο της τέταρτης ομάδας για μετατόπιση 39,43 mm.

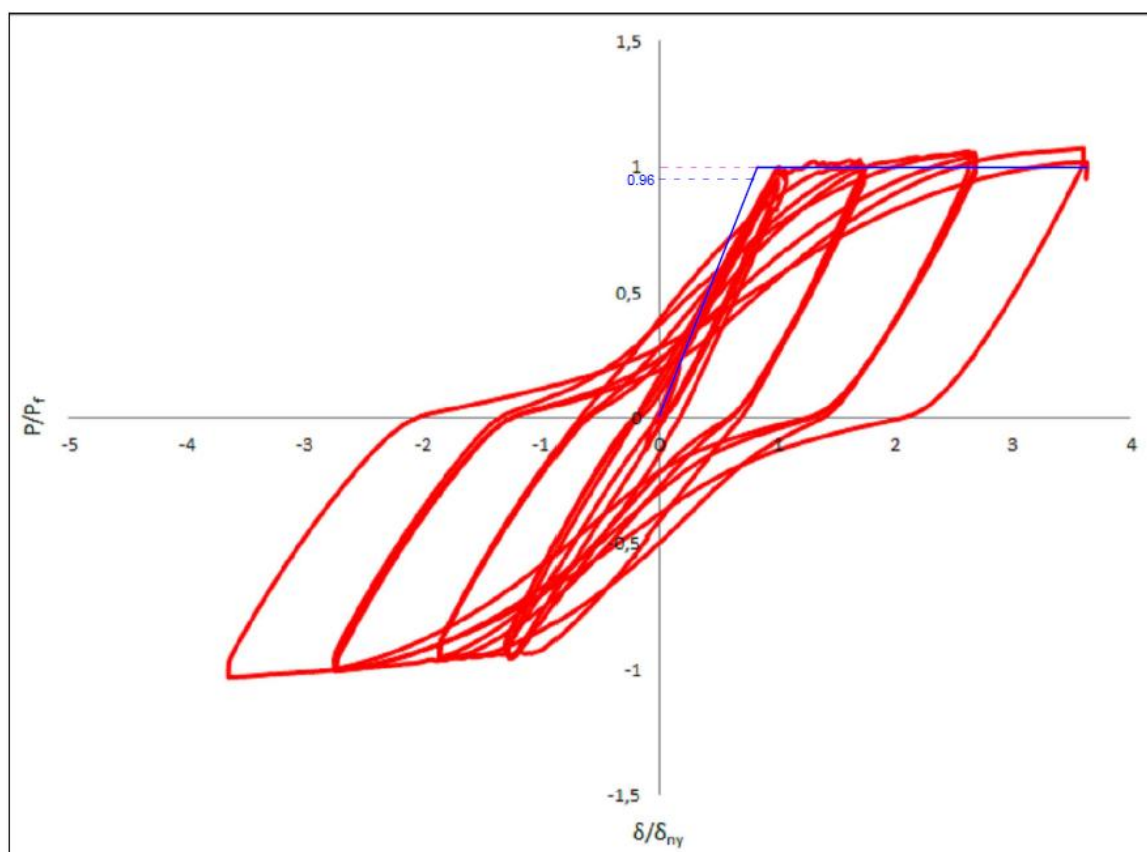
Επιπρόσθετα, όσον αφορά τις ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Ειδικότερα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο σημείο επιβολής της φόρτισης παρουσιάζεται 7% μεγαλύτερη σε σχέση με την υπολογιζόμενη κατά το σχεδιασμό (Πίνακας 36).



Σχήμα 24: Δοκός Δ3: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ )



Εικόνα 17: Πειραματική Διάταξη επιβολής ανακυκλιζόμενης φόρτισης (Δοκοί Δ3 & Δ4)



Σχήμα 25: Δοκός Δ3: διάγραμμα  $(P/P_f) - (\delta/\delta_{ny})$



Εικόνα 18: Δοκός Δ3: Ρωγμές εντός διαμητικού μήκους. Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης





Εικόνα 19: Δοκός Δ3: ρηγματωμένη κατάσταση φορέα

#### 3.3.2.4. Δοκός Δ4

Το εν λόγω δοκίμιο (Δ4) υποβλήθηκε σε τέσσερις (4) ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση 1δ, 2δ, 3δ & 4δ αντίστοιχα.

Οι τρεις (3) πρώτες ομάδες αποτελούνται από τρεις (3) ολοκληρωμένους κύκλους φόρτισης, ενώ στο δεύτερο κύκλο φόρτισης της τέταρτης ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου.

Αρχικά, παρατηρούνται λοξές ρωγμές οι οποίες γίνονται πιο πυκνές στο σημείο επιβολής της φόρτισης πλησιάζοντας το θλιβόμενο πέλμα. Με την εναλλαγή της φοράς φόρτισης παρατηρούνται όμοιας μορφής και πυκνότητας ρωγμές κάθετες στις προϋπάρχουσες, ενώ οι νέες κατακόρυφες ρωγμές τείνουν να ενωθούν με τις προηγούμενες. Με την πάροδο της πειραματικής διαδικασίας εμφανίζονται και κάποιες νέες ρωγμές και οι ήδη υπάρχουσες διευρύνονται και συγκεντρώνονται στο σημείο επιβολής της φόρτισης.

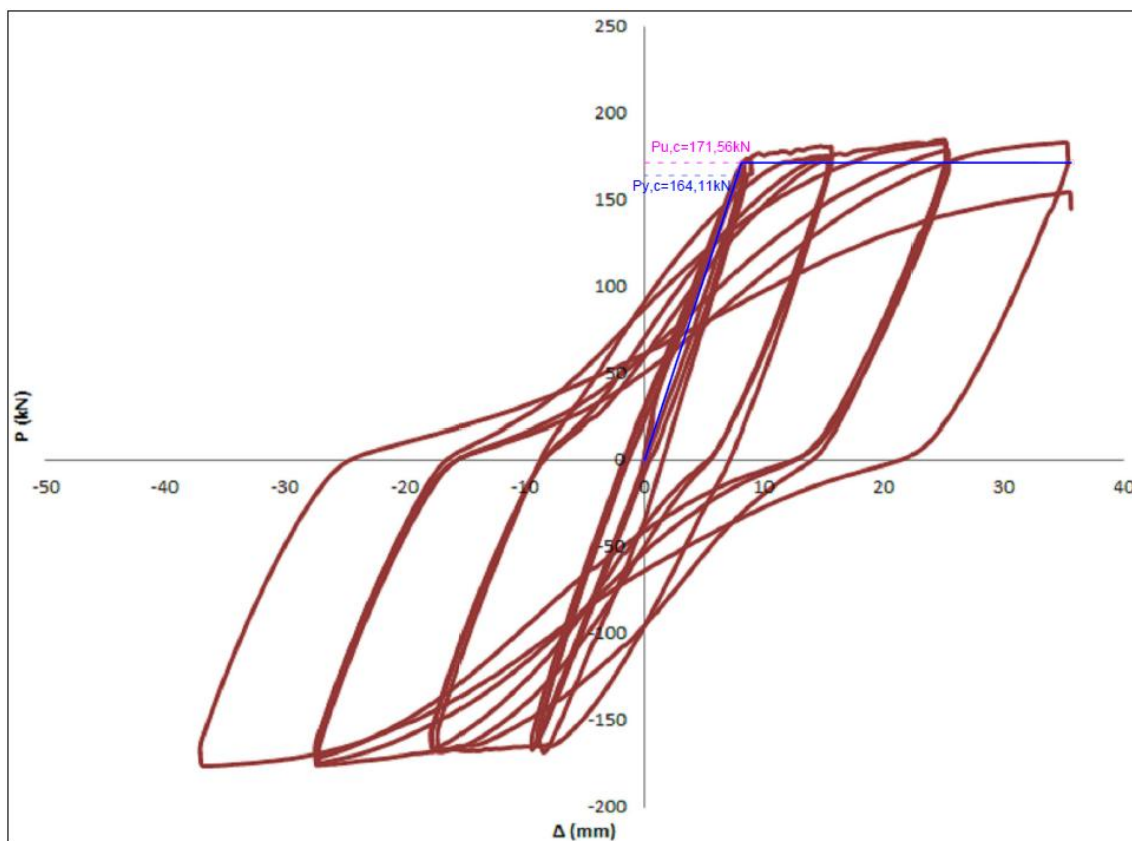
Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιαμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς τη δεξιά στήριξη προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά. Επίσης παρατηρήθηκε στρέβλωση του διαμήκους οπλισμού στην περιοχή περί του πλάτους των πλακών φόρτισης.

Επομένως, από την τρίτη (3<sup>η</sup>) ομάδα ανακυκλίσεων προκύπτει  $\delta_{sust} = 27,09$  mm και η πλαστιμότητα καταγράφεται σε 3,31. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{fail} = 35,22$  mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι 4,31. (Πίνακας 38)

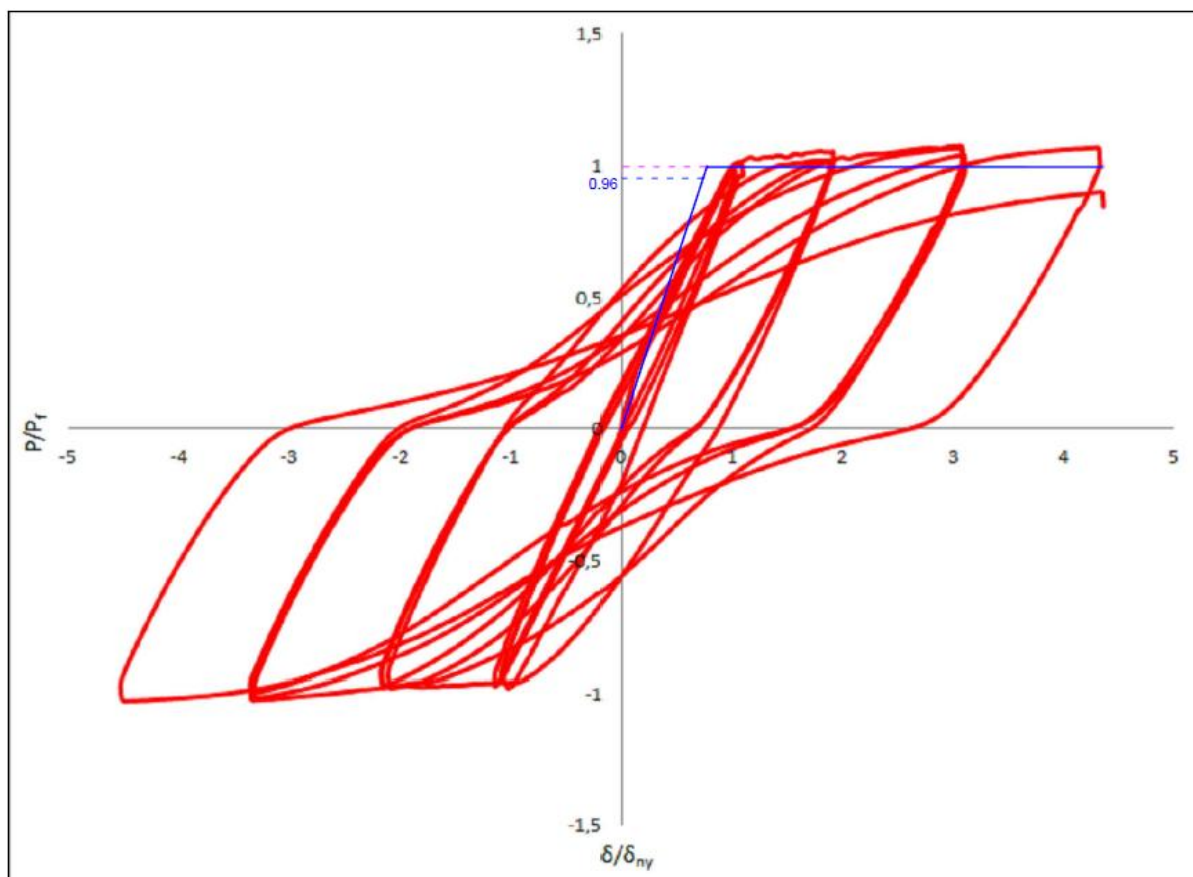
Το μέγιστο φορτίο που παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 184,34 kN και εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο της τρίτης ομάδας για μετατόπιση 25,09 mm.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά τις ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται ελαφρώς αυξημένες σε σχέση με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Ειδικότερα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο σημείο επιβολής της φόρτισης παρουσιάζεται 7% μεγαλύτερη σε σχέση με την υπολογιζόμενη κατά το σχεδιασμό. (Πίνακας 36)

Γενικά, παρατηρήθηκε όμοια συμπεριφορά με αυτή της δοκού Δ3.



**Σχήμα 26:** Δοκός Δ4: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ )



Σχήμα 27: Διάγραμμα  $(P/P_t) - (\delta/\delta_{ny})$  - Δοκός Δ4



Εικόνα 20: Δοκός Δ4: Ρωγμές εντός διαμητρικού μήκους. Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης



Εικόνα 21: Δοκός Δ4: Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα μετά τη διαρροή

### 3.3.2.5. Δοκός Δ5

Το εν λόγω δοκίμιο (Δ5) υποβλήθηκε σε τέσσερις (4) ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση δ, 2δ, 3δ & 4δ αντίστοιχα.

Οι τρεις (3) πρώτες ομάδες αποτελούνται από τέσσερις (3) ολοκληρωμένους κύκλους φόρτισης, ενώ στο δεύτερο κύκλο φόρτισης της τέταρτης ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου.

Αρχικά, παρατηρούνται λοξές ρωγμές οι οποίες γίνονται πιο πυκνές στο σημείο επιβολής της φόρτισης πλησιάζοντας το θλιβόμενο πέλμα. Με την εναλλαγή της φοράς φόρτισης παρατηρούνται όμοιας μορφής και πυκνότητας ρωγμές κάθετες στις προϋπάρχουσες, ενώ οι νέες κατακόρυφες ρωγμές τείνουν να ενωθούν με τις προηγούμενες. Με την πάροδο της πειραματικής διαδικασίας εμφανίζονται και κάποιες νέες ρωγμές και οι ήδη υπάρχουσες διευρύνονται και συγκεντρώνονται στο σημείο επιβολής της φόρτισης.

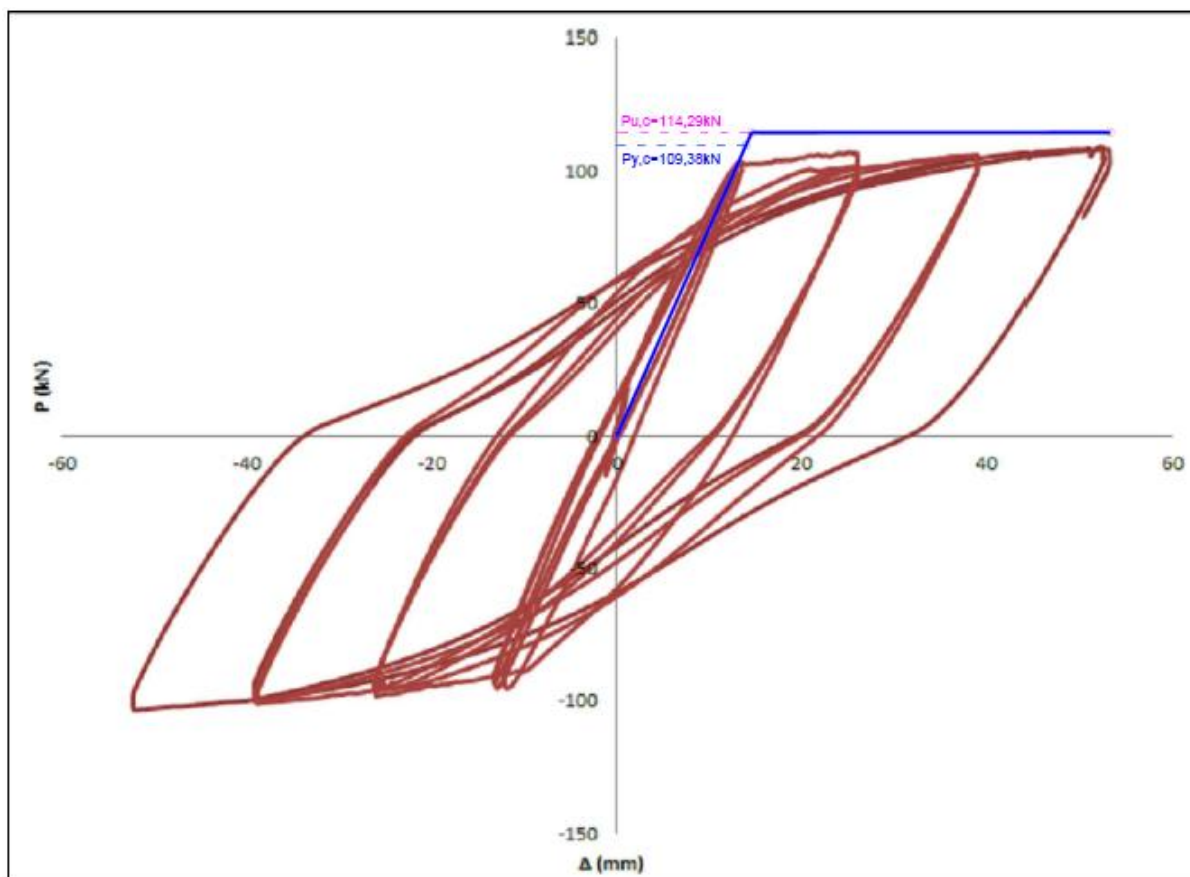
Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς την αριστερή στήριξη προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά. Επίσης παρατηρήθηκε στρέβλωση του διαμήκους οπλισμού στην περιοχή περί του πλάτους των πλακών φόρτισης.

Επομένως, από την τρίτη (3<sup>η</sup>) ομάδα ανακυκλίσεων προκύπτει  $\delta_{sust} = 39,09$  mm και η πλαστιμότητα καταγράφεται σε 2,65. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{fail} = 53,03$  mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι 3,60. (Πίνακας 38)

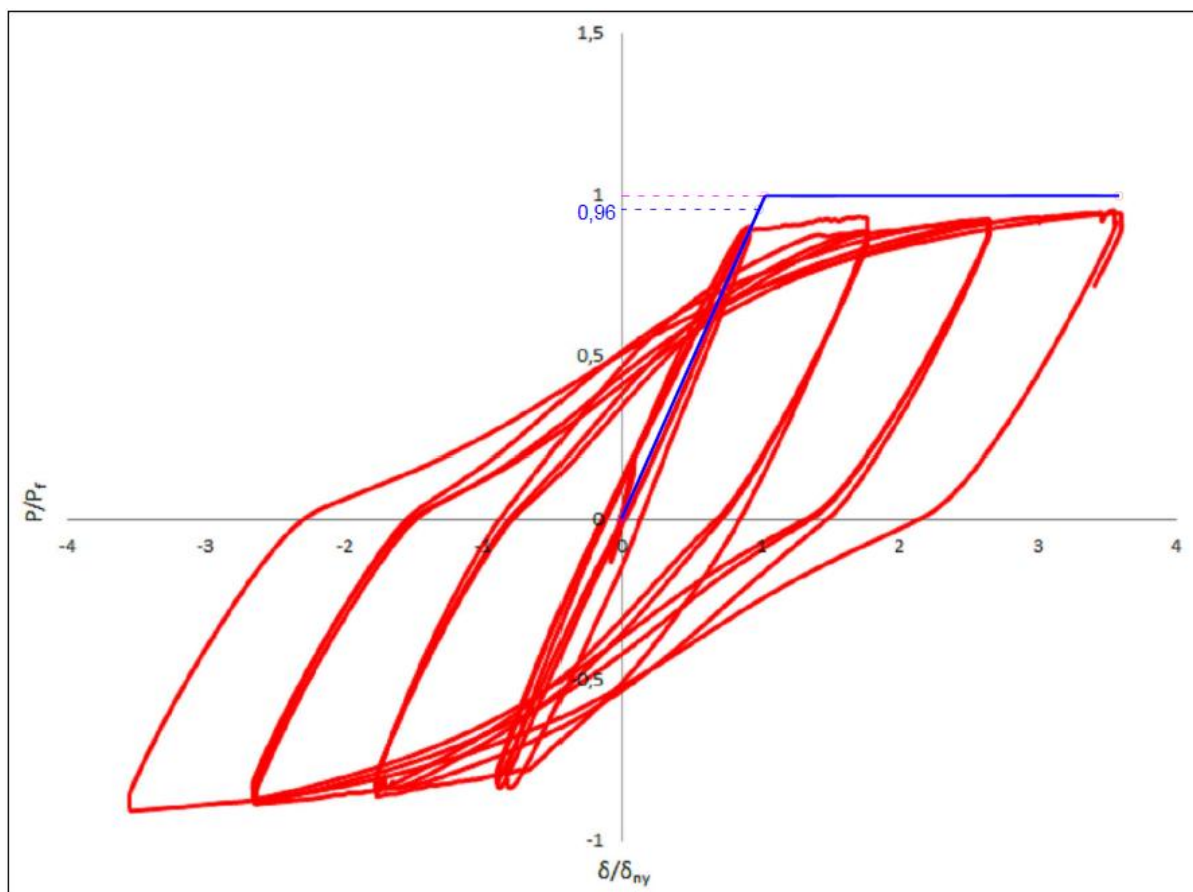
Το μέγιστο φορτίο που παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 108,92 kN και εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο της τέταρτης ομάδας για μετατόπιση 52,35 mm.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά τις ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται ελαφρώς μειωμένες σε σχέση με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Ειδικότερα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο σημείο

επιβολής της φόρτισης παρουσιάζεται 5% μικρότερη σε σχέση με την υπολογιζόμενη κατά το σχεδιασμό. (Πίνακας 36)



Σχήμα 28: Δοκός Δ5: διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ )



Σχήμα 29: Δοκός Δ5: διάγραμμα  $(P/P_t) - (\delta/\delta_{ny})$



Εικόνα 22: Δοκός Δ5: ρωγμές εντός διαμητικού μήκους. Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης



Εικόνα 23: Δοκός Δ5: Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα μετά τη διαρροή

### 3.3.2.6. Δοκός Δ6

Το εν λόγω δοκίμιο (Δ6) υποβλήθηκε σε τέσσερις (4) ομάδες ανακυκλίσεων οι οποίες αντιστοιχούν σε μετατόπιση 1δ, 2δ, 3δ, 4δ & 5δ αντίστοιχα.

Οι τέσσερις (4) πρώτες ομάδες αποτελούνται από τέσσερις (3) ολοκληρωμένους κύκλους φόρτισης, ενώ στον πρώτο κύκλο φόρτισης της πέμπτης ομάδας, επέρχεται αστοχία του δοκιμίου.

Αρχικά, παρατηρούνται λοξές ρωγμές οι οποίες γίνονται πιο πυκνές στο σημείο επιβολής της φόρτισης πλησιάζοντας το θλιβόμενο πέλμα. Με την εναλλαγή της φοράς φόρτισης παρατηρούνται όμοιας μορφής και πυκνότητας ρωγμές κάθετες στις προϋπάρχουσες, ενώ οι νέες κατακόρυφες ρωγμές τείνουν να ενωθούν με τις προηγούμενες. Με την πάροδο της πειραματικής διαδικασίας εμφανίζονται και κάποιες νέες ρωγμές και οι ήδη υπάρχουσες διευρύνονται και συγκεντρώνονται στο σημείο επιβολής της φόρτισης.

Η αστοχία επήλθε λόγω των κεκλιμένων καμπτοδιατμητικών ρωγμών που εμφανίζονται κοντά στην περιοχή της επιβολής του φορτίου και προς τη δεξιά στήριξη προκαλώντας σταδιακά ψαθυρή συμπεριφορά. Επίσης παρατηρήθηκε στρέβλωση του διαμήκους οπλισμού στην περιοχή περί του πλάτους των πλακών φόρτισης.

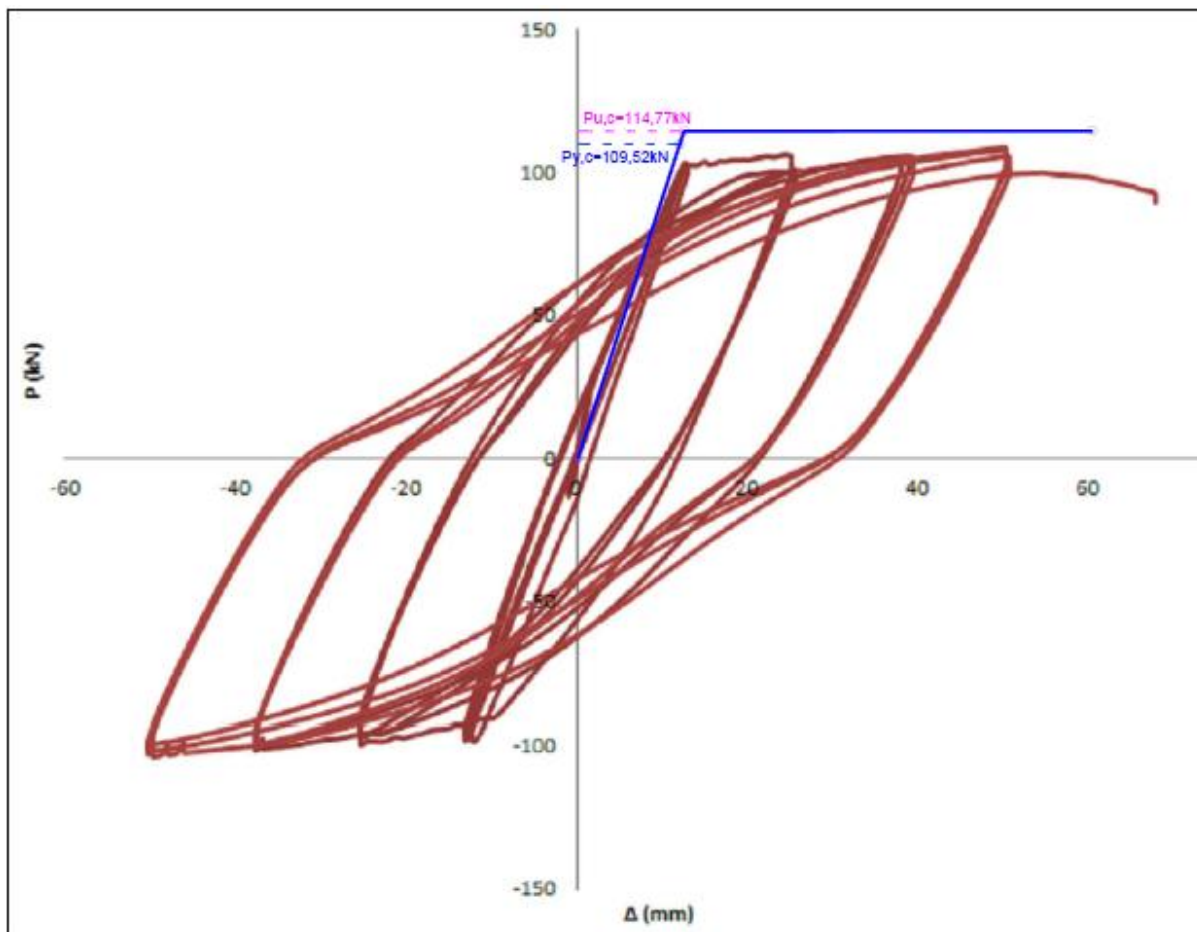
Επομένως, από την τέταρτη (4<sup>η</sup>) ομάδα ανακυκλίσεων προκύπτει  $\delta_{\text{sust}} = 49,60$  mm και η πλαστιμότητα καταγράφεται σε 3,44. Όσον αφορά την παραμόρφωση αστοχίας παίρνει την τιμή  $\delta_{\text{fail}} = 54,60$  mm με την αντίστοιχη πλαστιμότητα να είναι 3,79. (Πίνακας 38)

Το μέγιστο φορτίο που παραλαμβάνει το δοκίμιο είναι 108,80 kN και εμφανίζεται στον πρώτο κύκλο της τέταρτης ομάδας για μετατόπιση 50,25 mm.

Επιπρόσθετα, όσον αφορά τις ροπές που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας παρουσιάζονται ελαφρώς μειωμένες σε σχέση με αυτές που υπολογίσθηκαν κατά τη διαδικασία του σχεδιασμού. Ειδικότερα, η μέγιστη αναπτυσσόμενη ροπή στο σημείο

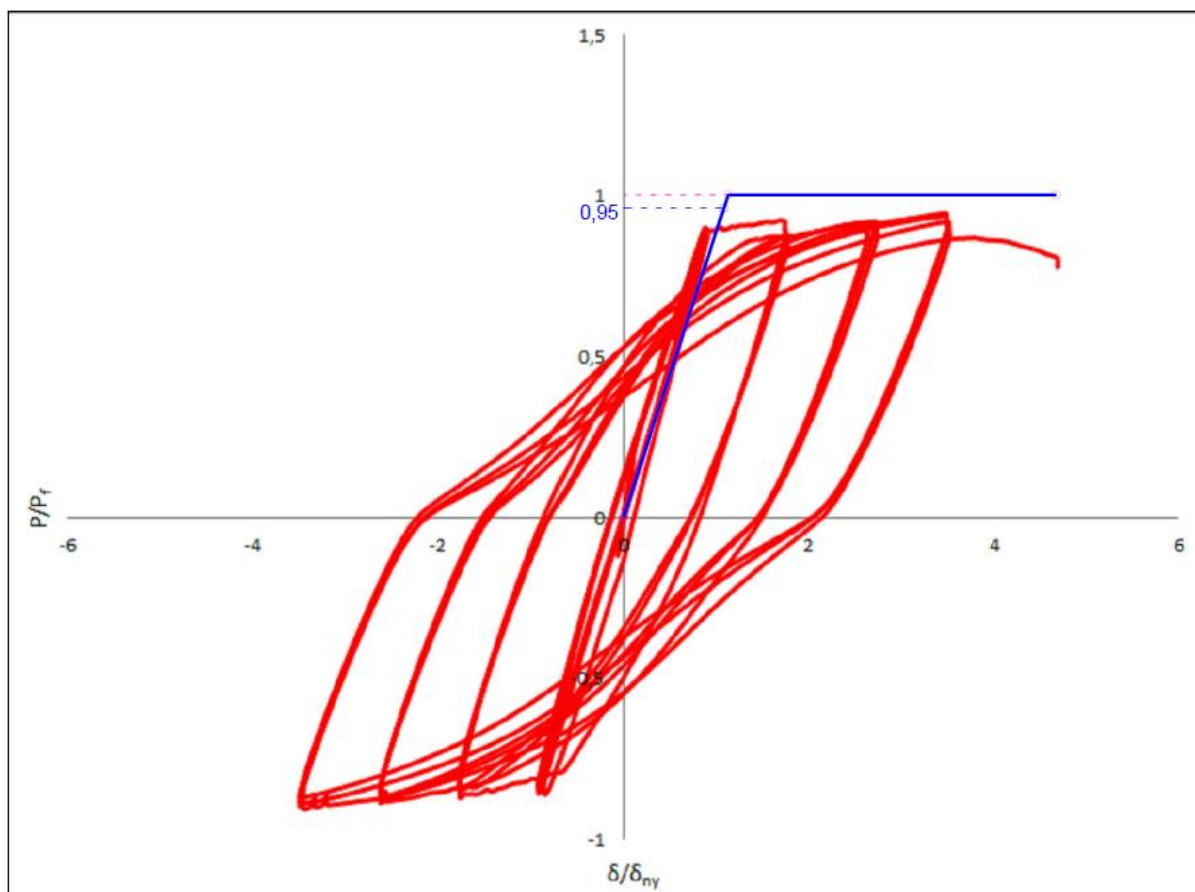
επιβολής της φόρτισης παρουσιάζεται 5% μικρότερη σε σχέση με την υπολογιζόμενη κατά το σχεδιασμό. (Πίνακας 36)

Γενικά, παρατηρήθηκε όμοια συμπεριφορά με αυτή της δοκού Δ5.



Σχήμα 30: Διάγραμμα φόρτισης Φορτίου – Βέλους Κάμψης (P – Δ) – Δοκός Δ6





Σχήμα 31: Διάγραμμα  $(P/P_t) - (\delta/\delta_{ny})$  - Δοκός Δ6



Εικόνα 24: Δοκός Δ6: Ρωγμές εντός διαμητικού μήκους. Συγκέντρωση ρωγμών στο σημείο επιβολής της φόρτισης



Εικόνα 25: Δοκός Δ6: Ρηγματωμένη κατάσταση φορέα μετά τη διαρροή

### 3.4. Ελαφροσκυρόδεμα – Συμβατικό Σκυρόδεμα

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει μια προσπάθεια σύγκρισης της συμπεριφοράς του ελαφροσκυρόδεματος των δοκιμών με την αντίστοιχη συμπεριφορά που θα παρουσιαζόταν στην περίπτωση χρήσης συμβατικού σκυροδέματος ίδιων αντοχών με το παραγόμενο.

#### 3.4.1. Υπολογισμός καμπτικής αντοχής

Στον υπολογισμό της καμπτικής αντοχής η διαφοροποίηση έγκειται στη χρήση ενός μειωτικού συντελεστή  $n_1$ , ο οποίος είναι συναρτήσεως της πυκνότητας του παραγόμενου σκυροδέματος και ο οποίος, στους δεδομένους υπολογισμούς, διαφοροποιεί την μέγιστη θλιπτική παραμόρφωση του ελαφροσκυροδέματος. Ειδικότερα, ισχύει [14]:

$$\epsilon_{icu2} = n_1 * \epsilon_{cu2} \quad (3.4)$$

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 39:

Πίνακας 39: Συγκριτικά Αποτελέσματα Ελαφροσκυροδέματος – Συμβατικού Σκυροδέματος

Δοκός	$\epsilon_{cu2} = 3,5 \%$			$\epsilon_{icu2} = 2,93 \%$		
	$M_u$	$P_u$	$V_u$	$M_u$	$P_u$	$V_u$
<b>Δ1</b>	85,32	175,02	87,51	85,32	175,02	87,51
<b>Δ2</b>	84,83	174,01	87,01	84,83	174,01	87,01
<b>Δ3</b>	84,15	172,62	86,31	84,15	172,61	86,31
<b>Δ4</b>	83,69	171,67	85,84	83,64	171,56	85,78
<b>Δ5</b>	55,76	114,38	57,19	55,72	114,29	57,15
<b>Δ6</b>	55,97	114,81	57,41	55,95	114,77	57,39

Παρατηρείται ότι η μείωση στη παραμόρφωση του σκυροδέματος σε θλίψη ουσιαστικά δεν μεταβάλλει την αντοχή σε κάμψη με τη μέθοδο υπολογισμού που περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.

Αναλυτικά οι υπολογισμοί περιγράφονται στο Παράρτημα του παρόντος.

### 3.4.2. Έλεγχος σε τέμνουσα

Και σε αυτή την περίπτωση το στοιχείο που διαφοροποιεί τους υπολογισμούς στον έλεγχο σε τέμνουσα δύναμη, είναι ο ίδιος συντελεστής  $\eta_1$ , που περιγράφηκε και παραπάνω (§ 3.4.1). Ειδικότερα, μεταβάλλεται ο μειωτικός συντελεστής για την αντοχή σε συντριβή των θλιπτήρων ο οποίος ισούται με:

$$v_1 = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot (1 - f_{tck}/250) \quad (3.5)$$

όπου  $f_{tck}$  σε MPa για την περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος

$$v_1 = 0,6 \cdot (1 - f_{ck}/250) \quad (3.6)$$

όπου  $f_{ck}$  σε MPa για την περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος

Ο συντελεστής αυτός λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό της  $V_{Rd,max}$ , δηλαδή της τιμής σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από το στοιχείο, όπως καθορίζεται από τη συντριβή των λοξών θλιπτήρων σύμφωνα με τον τύπο:

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta) \quad (3.7)$$

Τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον Πίνακα 40:

Πίνακας 40: Συγκριτικά Αποτελέσματα Ελέγχου σε Τέμνουσα

Συμβατικό Σκυρόδεμα								
Δοκός	$f_{mc}$ (MPa)	$V_u$	$V_{rds}$	$\theta_{\text{προκύπτουσα}}$	$\theta_{\text{επιτρεπόμενη}}$	$A_{sw}/S_{\text{πραγμ}}$	$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}}$	$A_{sw}/S_{\text{επιτρ}}$
Δ1	36,40	87,51	239,95	7,46°	21,8°	Φ8/140	Φ8/380	Φ8/200
Δ2	32,40	87,01	239,95	8,19°	21,8°	Φ8/140	Φ8/380	Φ8/200
Δ3	26,50	86,31	223,95	9,73°	21,8°	Φ8/150	Φ8/390	Φ8/200
Δ4	22,80	85,84	223,95	11,14°	21,8°	Φ8/150	Φ8/390	Φ8/200
Δ5	25,20	57,19	179,16	7,53°	21,8°	Φ8/125	Φ8/390	Φ8/135
Δ6	28,00	57,41	179,16	6,87°	21,8°	Φ8/125	Φ8/390	Φ8/135
Ελαφροσκυρόδεμα								
Δοκός	$f_{mc}$ (MPa)	$V_u$	$V_{rds}$	$\theta_{\text{προκύπτουσα}}$	$\theta_{\text{επιτρεπόμενη}}$	$A_{sw}/S_{\text{πραγμ}}$	$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}}$	$A_{sw}/S_{\text{επιτρ}}$
Δ1	36,40	87,51	239,95	10,83°	21,8°	Φ8/140	Φ8/380	Φ8/200
Δ2	32,40	87,01	239,95	11,95°	21,8°	Φ8/140	Φ8/380	Φ8/200
Δ3	26,50	86,31	223,95	14,28°	21,8°	Φ8/150	Φ8/390	Φ8/200
Δ4	22,80	85,78	223,95	16,47°	21,8°	Φ8/150	Φ8/390	Φ8/200
Δ5	25,20	57,15	179,16	10,94°	21,8°	Φ8/125	Φ8/390	Φ8/135
Δ6	28,00	57,39	179,16	9,97°	21,8°	Φ8/125	Φ8/390	Φ8/135

Οι αλλαγές έγκεινται στην προκύπτουσα γωνία  $\theta$  που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέματος με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού. Παρόλα αυτά και επειδή πρέπει  $1 \leq \cot\theta \leq 2,5$  ( $21,8^\circ < \theta < 45^\circ$ ), οι αντοχές σε τέμνουσα είναι πρακτικά οι ίδιες. [14]

Αναλυτικά οι υπολογισμοί του ελέγχου περιγράφονται στο Παράρτημα του παρόντος.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

---

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές του νωπού και σκληρυμένου ελαφροσκυροδέματος κατά τη διαδικασία της μελέτης σύνθεσης, συμπεραίνεται ότι:

- είναι εφικτή η παραγωγή ελαφροσκυροδέματος μέσης χαρακτηριστικής αντοχής 28 ημερών 33,16 MPa, η οποία αντιστοιχεί σε κατηγορία ελαφροσκυροδέματος LC 25/28 (και συμβατικού C 25/30).
- Το ελαφροσκυρόδεμα που παράχθηκε εντάσσεται στην κατηγορία D1.6 (1560 Kg/m<sup>3</sup>)
- Το μέτρο ελαστικότητας του ελαφροσκυροδέματος, προσδιορίστηκε πειραματικά και η τιμή είναι αντίστοιχη αυτών που συναντώνται στη βιβλιογραφία, για ελαφροσκυρόδεμα αντίστοιχης κατηγορίας αντοχής και μοναδιαίου βάρους.

Όσον αφορά τον πειραματικό έλεγχο των ιδιοτήτων οπλισμένου ελαφροσκυροδέματος, προέκυψαν τα συμπεράσματα:

- Όλα τα δοκίμια ανέπτυξαν τον απαιτούμενο από τους ευρωπαϊκούς κανονισμούς δείκτη πλαστιμότητας για μεσαίας πλαστιμότητας κατηγορίας στοιχεία (DCM) ( $1,5 < q < 4$ ) ενώ ένα από αυτά, το Δ4 ανέπτυξε δείκτη πλαστιμότητας ( $q > 4$ ) που αντιστοιχεί σε υψηλής κατηγορίας πλαστιμότητας στοιχεία (DCH). Οι δείκτες αυτοί αναφέρονται σε ισοστατικά συστήματα (inverted pendulum system).
- Όλες οι τιμές για πλαστιμότητα που καταγράφηκαν ήταν μεγαλύτερες του ενός και η αστοχία σε όλα τα δοκίμια προκλήθηκε λόγω αποδιοργάνωσης της θλιβόμενης ζώνης.
- Στα δοκίμια με μικρότερο λόγο διάτμησης (Δ3 – Δ4) παρατηρήθηκε ταχύτερος ρυθμός απομείωσης της αντοχής στους κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης σε σχέση με αυτά με μεγαλύτερο λόγο διάτμησης (Δ5 – Δ6).

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### I. Διαστασιολόγηση γραμμικών στοιχείων (δοκών) ελαφροσκυροδέματος

Η διαστασιολόγηση των γραμμικών στοιχείων (δοκών) έγινε με τη χρήση των Ευρωπαϊκών Προτύπων και συγκεκριμένα του Ευρωκώδικα - 2: «Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα, Μέρος 1-1: Γενικοί Κανόνες και Κανόνες για Κτίρια» (EC-2/ EN1992-1-1) και Ευρωκώδικα - 8: «Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια» (EC- 8/ EN1998-1), οι οποίοι εγκρίθηκαν από τη CEN στις 16 Απριλίου 2004.

### Απαιτούμενες διατάξεις EN 1992-1-1 & EN 1998-1 για το σχεδιασμό των δοκών της πειραματικής Διαδικασίας

Οι συμβολισμοί που αφορούν το ελαφροσκυρόδεμα είναι:

**LC** οι κατηγορίες αντοχής του ελαφροσκυροδέματος χαρακτηρίζονται από το σύμβολο **LC**

$\eta_E$  είναι συντελεστής μετατροπής για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας

$\eta_1$  είναι συντελεστής για τον προσδιορισμό της εφελκυστικής αντοχής

$\eta_2$  είναι συντελεστής για τον προσδιορισμό του συντελεστή ερπυσμού

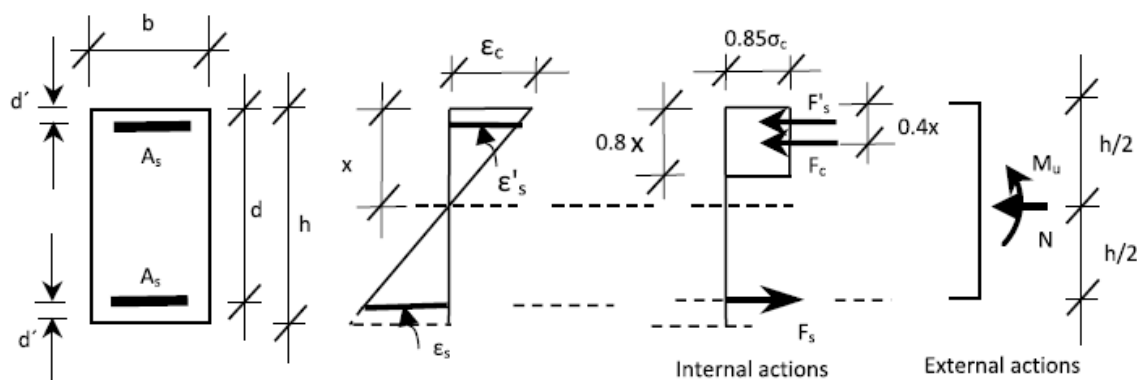
$\eta_3$  είναι συντελεστής για τον προσδιορισμό της συρρίκνωσης

$\rho$  είναι η πυκνότητα ελαφροσκυροδέματος σε  $\text{kg/m}^3$  μετά από ξήρανση σε κλίβανο

$\eta_1 = 0,40 + 0,60\rho/2200 = 0,40 + 0,60*(1600/2200)=0,836$  (βλ. Κεφάλαιο «2.3.2.1. Απαιτούμενες διατάξεις EN 1992-1-1 & EN 1998-1 για το σχεδιασμό των δοκών της πειραματικής Διαδικασίας»)

$$\epsilon_{icu2} (\text{‰}) = 3,5 * 0,836 = 2,93 \text{ ‰}$$

### ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΕΣΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ



### ΣΧΕΣΕΙΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ

Οι σχέσεις υπολογισμού για την εύρεση της ροπής αντοχής της διατομής και κατ' επέκταση του οριακού φορτίου θραύσης είναι οι εξής:

$$F_c = 0,85 * f_c * 0,8 * x * b$$

$$F_s = A_s * f_y$$

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_c * (x - d') / x$$

$$F_s' = A_s' * \varepsilon_s' * E_s$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s$$

### ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (απουσία Αξονικής Δύναμης $N_{Ed}=0$ )

$$F_c + F_s' = F_s$$

$$M_f = F_c * (d - 0,4 * x) + F_s' * (d - d')$$

$$V_f = 1,2 * M_f / \alpha_v$$

$$P_f = 2 * V_f$$

### ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΔΙΑΤΜΗΣΗ [Ευρωκώδικας 2 (EN 1992- 1 – 1)]

(βλ. Κεφάλαιο «2.3.2.1. Απαιτούμενες διατάξεις EN 1992-1-1 & EN 1998-1 για το σχεδιασμό των δοκών της πειραματικής Διαδικασίας»)

$$V_{IRd,c} = [C_{IRd,c} * \eta_1 * k * (100\rho_l f_{lck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp}] b_w d \geq (v_{l,min} + k_1 \sigma_{cp}) * b_w * d$$

$$N = 0, V_{IRd,c} = [C_{IRd,c} * \eta_1 * k * (100\rho_l f_{lck})^{1/3}] b_w d \geq 0,030 k^{3/2} f_{lck}^{1/2} * b_w * d$$

$$\rho_l = A_{sl} / (b * d)$$

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ  $\rho_l$

$$f_{bd} = 2,25 * \eta_1 * \eta_2 * f_{lctd}$$

$$f_{lctd} = f_{lctk,0.05} / \gamma_c$$

$$\alpha_{lct} = 0,85 \text{ και}$$

$$f_{lctk,0.05} = f_{ctk,0.05} * \eta_1$$

Βασικό μήκος αγκύρωσης:

$$l_{b,rqd} = (\sigma_{sd} / f_{bd})$$

Μήκος αγκύρωσης σχεδιασμού:

$$l_{bd} = \alpha_1 * \alpha_2 * \alpha_3 * \alpha_4 * \alpha_5 * l_{b,rqd} \geq l_{bmin}$$

η οποία σχέση βάσει της § 8.4.4.2. του EN 1992 – 1 – 1 απλοποιείται στην:

$$l_{bd} = \alpha_1 * l_{b,rqd} \geq l_{bmin}$$

με  $l_{bmin}$  ελάχιστο μήκος αγκύρωσης το οποίο ορίζεται ως:

$I_{bmin} > \max \{0,3 * I_{b,rqd}, 10\Phi, 100 \text{ mm}\}$  για αγκύρωση υπό εφελκυσμό

$I_{bmin} > \max \{0,6 * I_{b,rqd}, 10\Phi, 100 \text{ mm}\}$  για αγκύρωση υπό θλίψη

Στην περίπτωση που  $V_f > V_{IRd,c}$ , απαιτείται οπλισμός διάτμησης για την ανάληψη της πλήρους τέμνουσας.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} * z * f_{ywd} * \cot \theta$$

και

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} * b_w * z * v_1 * f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

όπου:

$A_{sw}$  είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης

$s$  είναι η απόσταση των συνδετήρων

$f_{ywd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης

$v_1$  είναι ένας δείκτης μείωσης της αντοχής για σκυρόδεμα ρηγματωμένο λόγω διάτμησης

$\alpha_{cw}$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την εντατική κατάσταση στη θλιβόμενη διαγώνιο

$$v_1 = 0,5 * \eta_1 * (1 - f_{ck}/250)$$

Ο Ευρωκώδικας 8 - EN1998-1, αναφέρεται στον αντισεισμικό σχεδιασμό των κατασκευών.

Ορίζει τρεις κατηγορίες μελών:

- iv. Υψηλής Πλαστιμότητας (ΚΠΥ)
- v. Μέσης Πλαστιμότητας (ΚΠΜ)
- vi. Χαμηλής Πλαστιμότητας (ΚΠΧ)

Εκτός κρίσιμων περιοχών ορίζει μέγιστες αποστάσεις των εγκαρσίων ράβδων για όλες τις κατηγορίες πλαστιμότητας:

$$s_w = 0,75 * d$$

Εντός κρίσιμων περιοχών, οι οποίες αφορούν τα ΚΠΥ και ΚΠΜ μέλη ορίζονται:

$$d_{bw} \geq 6 \text{ mm } (\Phi 10, \Phi 8, \Phi 10)$$

- Για ΚΠΥ:

$$s_w \leq \{6d_{bL}, 4h_w, 24d_{bw}, 175 \text{ mm}\}$$

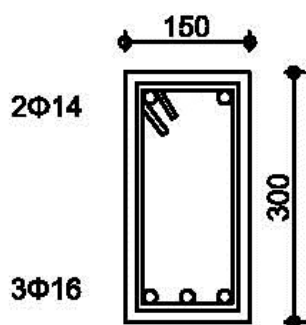
- Για ΚΠΜ:

$$s_w \leq \{8d_{bL}, 4h_w, 24d_{bw}, 225 \text{ mm}\}$$

Αναλυτικά οι υπολογισμοί για τις Δοκούς Δ1 – Δ6 είναι:



### 1. Δοκοί ορθογωνικής διατομής 150\*300 mm Δ1 – Δ2



$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

$$f_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = f_{ykwd} = 550 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x \quad (1)$$

$$F_c = 0,85 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot x \cdot 150 \quad (2)$$

$$F_s = 603,2 \cdot 550 \quad (3)$$

$$F_s' = A_s' \cdot \varepsilon_s' \cdot E_s = 307,9 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200 \quad (4)$$

$$[0,85 \cdot 25 \cdot 0,8 \cdot x \cdot 150] + \{307,9 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200\} = 603,2 \cdot 550 \quad (5)$$

Από (1), (2), (3), (4) και λύνοντας την (5) ως προς x, προκύπτει:

$$x = 84,47 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,89 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

$$M_f = 78,80 \text{ kNm}$$

$$V_f = 93,01 \text{ kN}$$

$$P_f = 186,02 \text{ kN}$$

#### Ελέγχος σε Διάτμηση

$$n_1 = 0,836$$

$$f_{lck} = 25 \text{ MPa}$$

$$C_{IRdc} = 0,15$$

$$k_1 = 0,15$$

$$k = 1 + (200/270)^{(1/2)} = 1,86 < 2$$

$$f_{lctk0.05} = 0,836 \cdot 1,86 = 1,5048$$

$$a_{lct} = 0,85$$

$$f_{lctd} = 0,85 \cdot 1,5048 = 1,28 \text{ MPa}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$f_{bd} = 2,25 * 1,28 = 2,88 \text{ MPa}$$

$$l_{brqd} = (16/4) * (550/2,88) = 763,88 \text{ mm}$$

$$l_{bmin} > \max \{229,16, 160, 100\} = 229,16 \text{ mm}$$

$$l_{bd} = 763,88 \text{ mm} > l_{bmin} = 229,16 \text{ mm}$$

$$\rho_l = 310,648/150*270 = 7,67 * 10^{-3} < 0,02$$

$$N=0, \quad V_{IRd,c} = 0,1*0,836*1,86*(100*7,67 * 10^{-3}*25)^{1/3}*150*270 = 16.855,96\text{N} > 0,030*1,86^{3/2}*25^{1/2}*150*270 (= v_{l,min}),$$

Οπότε,

Απαιτείται οπλισμός διάτμησης για την ανάληψη της πλήρους τέμνουσας κατά την αστοχία των διαγώνιων θλιπτήρων του σκυροδέματος

$$z = 0,9 * 270 = 243\text{mm}$$

$$v_1 = 0,5 * 0,836 * (1 - 25/250) = 0,3762$$

$$V_{Rd,max} = 1*0,15*0,9*270*0,3762*25*10^3*(\sin 2\theta)/2 = 171,41 \sin 2\theta \quad (\alpha)$$

$$\text{Για } \theta = 21,8^\circ, V_{Rd,max} = 118,21\text{kN} > V_f = 93,01 \text{ kN}$$

Υπολογισμός συνδετήρων σε όλο το διατμητικό μήκος:

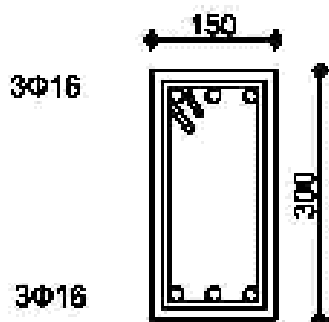
$$\frac{A_{sw}}{s} = 93,01/09 * 0,270 * 550 * 1000 * \cot 21,8 = 0,278 * 10^{-3} > 0,08 * (25/550)^{1/2} * 0,15 = 0,11 * 10^{-3}$$

Δίτητοι Φ8 από Ευρωκώδικα 8:

$$s_w = 0,75 * 270 = 200$$

Τοποθετήθηκε Φ8/140 σε όλο το μήκος της δοκού.

## 2. Δοκοί ορθογωνικής διατομής 150\*300 mm Δ3 – Δ4



$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

$$f_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = f_{ykwd} = 550 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x \quad (6)$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$F_c = 0,85 * 25 * 0,8 * x * 150 \quad (7)$$

$$F_s = 603,2 * 550 \quad (8)$$

$$F_s' = A_s' * \varepsilon_s' * E_s = 603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200 \quad (9)$$

$$[0,85 * 25 * 0,8 * x * 150] + \{603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200\} = 603,2 * 550 \quad (10)$$

Από (6), (7), (8), (9) και λύνοντας την (10) ως προς x, προκύπτει:

$$x = 60,37 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,47 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

$$M_f = 80,52 \text{ kNm}$$

$$V_f = 96,63 \text{ kN}$$

$$P_f = 193,25 \text{ kN}$$

### Ελέγχος σε Διάτμηση

$$n_1 = 0,836$$

$$f_{lck} = 25 \text{ MPa}$$

$$C_{lRdc} = 0,15$$

$$k_1 = 0,15$$

$$k = 1 + (200/270)^{(1/2)} = 1,86 < 2$$

$$f_{lctk0.05} = 0,836 * 1,86 = 1,5048$$

$$a_{lct} = 0,85$$

$$f_{lctd} = 0,85 * 1,5048 = 1,28 \text{ MPa}$$

$$f_{bd} = 2,25 * 1,28 = 2,88 \text{ MPa}$$

$$l_{brqd} = (16/4) * (550/2,88) = 763,88 \text{ mm}$$

$$l_{bmin} > \max \{229,16, 160, 100\} = 229,16 \text{ mm}$$

$$l_{bd} = 763,88 \text{ mm} > l_{bmin} = 229,16 \text{ mm}$$

$$\rho_l = 310,648/150 * 270 = 7,67 * 10^{-3} < 0,02$$

$$N=0, \quad V_{lRd,c} = 0,1 * 0,836 * 1,86 * (100 * 7,67 * 10^{-3} * 25)^{1/3} * 150 * 270 = 16.855,96 \text{ N} > 0,030 * 1,86^{3/2} * 25^{1/2} * 150 * 270 (= v_{l,min}),$$

Οπότε,

Απαιτείται οπλισμός διάτμησης για την ανάληψη της πλήρους τέμνουσας κατά την αστοχία των διαγώνιων θλιπτήρων του σκυροδέματος

$$z = 0,9 * 270 = 243 \text{ mm}$$

$$v_1 = 0,5 * 0,836 * (1 - 25/250) = 0,3762$$

$$V_{Rd,max} = 1 * 0,15 * 0,9 * 270 * 0,3762 * 25 * 10^3 * (\sin 2\theta) / 2 = 171,41 \sin 2\theta \quad (\alpha)$$

$$\text{Για } \theta = 21,8^\circ, \quad V_{Rd,max} = 118,21 \text{ kN} > V_f = 96,63 \text{ kN}$$

Υπολογισμός συνδετήρων σε όλο το διατμητικό μήκος:

$$\frac{A_{sw}}{s} = 96,63 / 0,9 * 0,270 * 550 * 1000 * \cot 21,8 = 0,29 * 10^{-3} > 0,08 * (25/550)^{1/2} * 0,15 = 0,11 * 10^{-3}$$

Δίτητοι Φ8 από Ευρωκώδικα 8:

$$s_w = 0,75 * 270 = 200$$

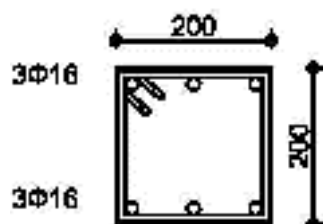
Τοποθετήθηκε Φ8/150 εκτός κρίσιμων περιοχών

Για τις κρίσιμες περιοχές ισχύει:

$$s_w \leq \{128, 75, 192, 225\} = 75$$

Τοποθετήθηκε Φ8/50 σε απόσταση 2\*300 εκατέρωθεν του σημείου επιβολής της φόρτισης.

### 3. Δοκοί ορθογωνικής διατομής 150\*300 mm Δ5 – Δ6



$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s = 2,75 \text{ ‰}$$

$$f_c = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{yk} = f_{ykwd} = 550 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} * (x - 20) / x \tag{11}$$

$$F_c = 0,85 * 25 * 0,8 * x * 200 \tag{12}$$

$$F_s = 603,2 * 550 \tag{13}$$

$$F_s' = 603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 20) / x] * 200 \tag{14}$$

$$[0,85 * 25 * 0,8 * x * 200] + \{603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 20) / x] * 200\} = 603,2 * 550 \tag{15}$$

Από (11), (12), (13), (14) και λύνοντας την (15) ως προς x, προκύπτει:

$$x = 42,52 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,55 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,75 \text{ ‰}$$

$$M_f = 53,52 \text{ kNm}$$

$$V_f = 64,21 \text{ kN}$$

$$P_f = 128,42 \text{ kN}$$

#### Ελέγχος σε Διάτμηση

$$n_1 = 0,836$$

$$f_{\text{tck}} = 25 \text{ MPa}$$

$$C_{\text{IRdc}} = 0,15$$

$$k_1 = 0,15$$

$$k = 1 + (200/180)^{(1/2)} = 2,05 > 2, \text{ άρα } k = 2$$

$$f_{\text{tctk}0.05} = 0,836 * 2 = 1,672$$

$$a_{\text{lct}} = 0,85$$

$$f_{\text{lctd}} = 0,85 * 1,672 = 1,42 \text{ MPa}$$

$$f_{\text{bd}} = 2,25 * 1,42 = 3,20 \text{ MPa}$$

$$l_{\text{brqd}} = (16/4) * (550/3,20) = 687,50 \text{ mm}$$

$$l_{\text{bmin}} > \max \{229,16, 160, 100\} = 229,16 \text{ mm}$$

$$l_{\text{bd}} = 687,50 \text{ mm} > l_{\text{bmin}} = 229,16 \text{ mm}$$

$$\rho_l = 261,64/200 * 180 = 7,27 * 10^{-3} < 0,02$$

$$N=0, \quad V_{\text{Rd,c}} = 0,1 * 0,836 * 2 * (100 * 7,27 * 10^{-3} * 25)^{1/3} * 200 * 180 = 15.825,72 \text{ N} > 0,030 * 2^{3/2} * 25^{1/2} * 200 * 180 (= v_{\text{l,min}}),$$

Οπότε,

Απαιτείται οπλισμός διάτμησης για την ανάληψη της πλήρους τέμνουσας κατά την αστοχία των διαγώνιων θλιπτήρων του σκυροδέματος

$$z = 0,9 * 180 = 162 \text{ mm}$$

$$v_1 = 0,5 * 0,836 * (1 - 25/250) = 0,3762$$

$$V_{\text{Rd,max}} = 1 * 0,15 * 0,9 * 180 * 0,3762 * 25 * 10^3 * (\sin 2\theta) / 2 = 114,27 \sin 2\theta \quad (\alpha)$$

$$\text{Για } \theta = 21,8^\circ, \quad V_{\text{Rd,max}} = 78,80 \text{ kN} > V_f = 64,21 \text{ kN}$$

Υπολογισμός συνδετήρων σε όλο το διατμητικό μήκος:

$$\frac{A_{\text{sw}}}{s} = 64,21 / 0,9 * 0,180 * 550 * 1000 * \cot 21,8 = 1,80 * 10^{-3} < 0,08 * (25/550)^{1/2} * 0,15 = 0,11 * 10^{-3}$$

Δίτητοι Φ8 από Ευρωκώδικα 8:

$$s_w = 0,75 * 180 = 135$$

Τοποθετήθηκε Φ8/125 εκτός κρίσιμων περιοχών

Για τις κρίσιμες περιοχές ισχύει:

$$s_w \leq \{128, 50, 192, 225\} = 50$$

Τοποθετήθηκε Φ8/50 σε απόσταση 2\*200 εκατέρωθεν του σημείου επιβολής της φόρτισης.

## II. Υπολογισμός Θεωρητικών Μεγεθών για σύγκριση με Πειραματικά Μεγέθη

### II.1. Υπολογισμός $M_u - P_u$

Η αντοχή του σκυροδέματος  $f_c$  σε μονοαξονική θλίψη ελήφθη από πειραματικές δοκιμές κυβικών δοκιμίων κατά τη σκυροδέτηση με αναγωγή σε ισοδύναμη θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων 150\*300 mm.

Η καμπτική αντοχή υπολογίστηκε στην τάση διαρροής της εφελκυστικής αντοχής του διαμήκους οπλισμού χρησιμοποιώντας τις παρακάτω σχέσεις για τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος:

$$\sigma_c = f_c + 5 |f_t|, \quad \text{όπου} \quad f_t = 1,40 [(f_c - 8)/10]^{2/3}$$

Τέλος σημειώνεται ότι όλοι οι υπολογισμοί έγιναν χωρίς συντελεστές ασφαλείας και με τη θεώρηση ότι  $\varepsilon_{cu} = 2,93\%$ .

Κατά τα λοιπά οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν όπως και κατά τη διαδικασία της διαστασιολόγησης. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι:

$$F_c = \sigma_c \cdot x \cdot b$$

$$F_s = A_s \cdot f_y$$

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_c \cdot (x - d') / x$$

$$F_s' = A_s' \cdot \varepsilon_s' \cdot E_s$$

$$\varepsilon_y = f_y / E_s$$

### ΙΣΟΡΡΟΠΙΑ ΕΣΩΤΕΡΙΚΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΔΙΑΤΟΜΗΣ (απουσία Αξονικής Δύναμης $N_{Ed}=0$ )

$$F_c + F_s' = F_s$$

$$M_u = F_c \cdot (d - 0,4 \cdot x) + F_s' \cdot (d - d')$$

$$P_u = 2 M_u / \alpha_v$$

### Περίπτωση Ελαφροκυροδέματος

#### 1. Δοκός Δ1 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 36,4 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(36,4 - 8)/10]^{2/3} = 2,807633$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$\sigma_c = 36,4 + 5 \cdot 2,8076331 = 50,438163$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x$$

$$F_c = 50,438163 \cdot x \cdot 150$$

$$F_s = 603,2 \cdot 560$$

$$F_s' = 307,92 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200, \text{ οπότε}$$

$$[50,438163 \cdot x \cdot 150] + \{307,92 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200\} = 603,2 \cdot 560$$

Λύνοντας ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$x = 39,10 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,682 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 85,32 \text{ kNm}$$

$$P_u = 175,02 \text{ kN}$$

$$V_u = 87,51 \text{ kN}$$

## 2. Δοκός Δ2 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 32,4 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(32,4 - 8) / 10]^{2/3} = 2,537394$$

$$\sigma_c = 32,4 + 5 \cdot 2,537394 = 45,086970$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x$$

$$F_c = 45,086970 \cdot x \cdot 150$$

$$F_s = 603,2 \cdot 560$$

$$F_s' = 307,92 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200, \text{ οπότε}$$

$$[45,086970 \cdot x \cdot 150] + \{307,92 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200\} = 603,2 \cdot 560$$

Λύνοντας ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$x = 42,23 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,849 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 84,83 \text{ kNm}$$

$$P_u = 174,01 \text{ kN}$$

$$V_u = 87,01 \text{ kN}$$

## 3. Δοκός Δ3 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$f_{mc} = 26,5 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(26,5 - 8)/10]^{2/3} = 2,109806$$

$$\sigma_c = 26,5 + 5 |2,109806| = 37,049030$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x$$

$$F_c = 37,049030 * x * 150$$

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200, \text{ οπότε}$$

$$[37,049030 * x * 150] + \{603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς x, προκύπτει:

$$x = 42,295 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,852 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 84,15 \text{ kNm}$$

$$P_u = 172,61 \text{ kN}$$

$$V_u = 86,31 \text{ kN}$$

#### 4. Δοκός Δ4 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 22,80 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(22,8 - 8)/10]^{2/3} = 1,818176$$

$$\sigma_c = 22,80 + 5 |1,818176| = 31,890878$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x$$

$$F_c = 31,890878 * x * 150$$

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200, \text{ οπότε}$$

$$[31,890878 * x * 150] + \{603,2 * [2,93 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς x, προκύπτει:

$$x = 45,47 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,997 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 83,63 \text{ kNm}$$

$$P_u = 171,56 \text{ kN}$$

$$V_u = 85,78 \text{ kN}$$



### 5. Δοκός Δ5 (200\*200 mm)

$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 25,20 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(25,20 - 8)/10]^{2/3} = 2,009773$$

$$\sigma_c = 25,20 + 5 |2,009773| = 35,248865$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 20) / x$$

$$F_c = 35,248865 \cdot x \cdot 200$$

$$F_s = 603,2 \cdot 560$$

$$F_s' = 603,2 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 20) / x] \cdot 200, \text{ οπότε}$$

$$[35,248865 \cdot x \cdot 200] + \{603,2 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 20) / x] \cdot 200\} = 603,2 \cdot 560$$

Λύνοντας ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$x = 30,573 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,013 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 55,72 \text{ kNm}$$

$$P_u = 114,29 \text{ kN}$$

$$V_u = 57,15 \text{ kN}$$

### 6. Δοκός Δ6 (200\*200 mm)

$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 28 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(28 - 8)/10]^{2/3} = 2,222361$$

$$\sigma_c = 28 + 5 |2,222361| = 39,111807$$

$$\varepsilon_s' = 2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 20) / x$$

$$F_c = 39,111807 \cdot x \cdot 200$$

$$F_s = 603,2 \cdot 560$$

$$F_s' = 603,2 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 20) / x] \cdot 200$$

$$[39,111807 \cdot x \cdot 200] + \{603,2 \cdot [2,93 \text{ ‰} \cdot (x - 20) / x] \cdot 200\} = 603,2 \cdot 560$$

Λύνοντας ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$x = 29,075 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,915 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 55,95 \text{ kNm}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$P_u = 114,77 \text{ kN}$$

$$V_u = 57,39 \text{ kN}$$

### Περίπτωση Συμβατικού Σκυροδέματος

Οι υπολογισμοί έγιναν χωρίς συντελεστές ασφαλείας και με  $\epsilon_{cu} = 3,50 \text{ ‰}$ .

#### 1. Δοκός Δ1 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 36,4 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(36,4 - 8)/10]^{2/3} = 2,807633$$

$$\sigma_c = 36,4 + 5 \cdot 2,807633 = 50,438163$$

$$\epsilon_s' = 3,5 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x$$

$$F_c = 50,438163 \cdot x \cdot 150$$

$$F_s = 603,2 \cdot 560$$

$$F_s' = 307,92 \cdot [3,5 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200, \text{ οπότε}$$

$$[50,438163 \cdot x \cdot 150] + \{307,92 \cdot [3,5 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x] \cdot 200\} = 603,2 \cdot 560$$

Λύνοντας ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$x = 38,41 \text{ mm}$$

$$\epsilon_s' = 0,766 \text{ ‰} < \epsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 85,32 \text{ kNm}$$

$$P_u = 175,02 \text{ kN}$$

$$V_u = 86,31 \text{ kN}$$

#### 2. Δοκός Δ2 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\epsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 32,4 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(32,4 - 8)/10]^{2/3} = 2,537394$$

$$\sigma_c = 32,4 + 5 \cdot 2,537394 = 45,086970$$

$$\epsilon_s' = 3,5 \text{ ‰} \cdot (x - 30) / x$$

$$F_c = 45,086970 \cdot x \cdot 150$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 307,92 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200, \text{ οπότε}$$

$$[45,086970 * x * 150] + \{307,92 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς x, προκύπτει:

$$x = 41,25 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,955 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 84,83 \text{ kNm}$$

$$P_u = 174,01 \text{ kN}$$

$$V_u = 86,31 \text{ kN}$$

### 3. Δοκός Δ3 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 26,5 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(26,5 - 8) / 10]^{2/3} = 2,109806$$

$$\sigma_c = 26,5 + 5 |2,109806| = 37,049030$$

$$\varepsilon_s' = 3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x$$

$$F_c = 37,049030 * x * 150$$

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200, \text{ οπότε}$$

$$[37,049030 * x * 150] + \{603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς x, προκύπτει:

$$x = 420,74 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,923 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 84,15 \text{ kNm}$$

$$P_u = 172,61 \text{ kN}$$

$$V_u = 86,31 \text{ kN}$$

### 4. Δοκός Δ4 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 22,80 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(22,8 - 8) / 10]^{2/3} = 1,818176$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$\sigma_c = 22,80 + 5 |1,818176| = 31,890878$$

$$\varepsilon_s' = 3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x$$

$$F_c = 31,890878 * x * 150$$

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200, \text{ οπότε}$$

$$[31,890878 * x * 150] + \{603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 30) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς x, προκύπτει:

$$x = 43,382 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,080 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 83,69 \text{ kNm}$$

$$P_u = 171,67 \text{ kN}$$

$$V_u = 85,84 \text{ kN}$$

### **5. Δοκός Δ5 (200\*200 mm)**

$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 25,20 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(25,20 - 8) / 10]^{2/3} = 2,009773$$

$$\sigma_c = 25,20 + 5 |2,009773| = 35,248865$$

$$\varepsilon_s' = 3,50 \text{ ‰} * (x - 20) / x$$

$$F_c = 35,248865 * x * 200$$

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 20) / x] * 200, \text{ οπότε}$$

$$[35,248865 * x * 200] + \{603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 20) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς x, προκύπτει:

$$x = 29,135 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 1,097 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 55,76 \text{ kNm}$$

$$P_u = 114,38 \text{ kN}$$

$$V_u = 57,19 \text{ kN}$$

### **6. Δοκός Δ6 (200\*200 mm)**

$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 * 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$f_{mc} = 28 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$f_t = 1,40 [(28 - 8)/10]^{2/3} = 2,222361$$

$$\sigma_c = 28 + 5 |2,222361| = 39,111807$$

$$\varepsilon_s' = 3,50 \text{ ‰} * (x - 20) / x$$

$$F_c = 39,111807 * x * 200$$

$$F_s = 603,2 * 560$$

$$F_s' = 603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 20) / x] * 200$$

$$[39,111807 * x * 200] + \{603,2 * [3,50 \text{ ‰} * (x - 20) / x] * 200\} = 603,2 * 560$$

Λύνοντας ως προς  $x$ , προκύπτει:

$$x = 27,899 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_s' = 0,991 \text{ ‰} < \varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$M_u = 55,97 \text{ kNm}$$

$$P_u = 114,81 \text{ kN}$$

$$V_u = 57,41 \text{ Kn}$$

## II2. Υπολογισμός $M_y$ - $P_y$

Ως ροπή διαρροής μιας διατομής νοείται η ροπή εκείνη που καταπονεί την διατομή και η οποία προκαλεί ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής στο πρώτο από τα στοιχεία: άνω θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος ή εφελκόμενος οπλισμός.

Ως ανηγμένη παραμόρφωση διαρροής σκυροδέματος νοείται  $\varepsilon_c = 2 \text{ ‰}$  ενώ για τον συγκεκριμένο χάλυβα  $\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$ . Λόγω της παρουσίας αξονικού θλιπτικού φορτίου, το πιθανότερο είναι η ακραία θλιβόμενη ίνα σκυροδέματος να λαμβάνει τιμή ανηγμένης παραμόρφωση ίση με την παραμόρφωση διαρροής προτού διαρρεύσει ο εφελκόμενος οπλισμός (η υπόθεση αυτή ελέγχεται από το συμβιβαστό των παραμορφώσεων μετά τον προσδιορισμό του βάθους της θλιβόμενης ζώνης).

Για το υπολογισμό της ροπής διαρροής θεωρούμε ότι οι θλιπτικές τάσεις στην θλιβόμενη ζώνη έχουν τριγωνική κατανομή και η θλιπτική δύναμη δίνεται από τη σχέση:

$$F_c = 1/2 * f_{mc} * b * x$$

Όπου,

$F_c$  : η θλιπτική δύναμη του σκυροδέματος

$x$  : το βάθος της θλιβόμενης ζώνης του σκυροδέματος

b : το πλάτος του δοκιμίου

$f_{mc}$  : μέση θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη (αντοχή κυλινδρικών δοκιμών ελαφροσκυροδέματος 150\*300 mm)

### **1. Δοκός Δ1 (150\*300 mm)**

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 36,40 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$F_c = 258665,45 \text{ N}$$

$$F_s = 337784,042 \text{ N}$$

$$F_s' = 79145,995 \text{ N}$$

$$x = 105,51 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = 1,796 \text{ ‰} < 2,00 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s' = 1,285 \text{ ‰} < 2,80 \text{ ‰}$$

*Διαρρέει πρώτος ο εφελκυσμένος χάλυβας*

$$M_y = 79,74 \text{ kNm}$$

$$P_y = 163,56 \text{ kN}$$

### **2. Δοκός Δ2 (150\*300 mm)**

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 32,4 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$F_c = 252750,78 \text{ N}$$

$$F_s = 337784,042 \text{ N}$$

$$F_s' = 85038,735 \text{ N}$$

$$x = 109,275 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = 1,904 \text{ ‰} < 2,0 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s' = 1,381 \text{ ‰} < 2,80 \text{ ‰}$$

*Διαρρέει πρώτος ο εφελκυσμένος χάλυβας*

$$M_y = 79,45 \text{ kNm}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$P_y = 162,97 \text{ kN}$$

### 3. Δοκός Δ3 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 26,5 \text{ MPa}$$

$$F_c = 184896,78 \text{ N}$$

$$F_s = 337784,042 \text{ N}$$

$$F_s' = 152883,977 \text{ N}$$

$$x = 104,78 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = 1,776 \text{ ‰} < 2,0 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s' = 1,267 \text{ ‰} < 2,80 \text{ ‰}$$

*Διαρρέει πρώτος ο εφελκούμενος χάλυβας*

$$M_y = 80,16 \text{ kNm}$$

$$P_y = 164,42 \text{ kN}$$

### 4. Δοκός Δ4 (150\*300 mm)

$$d = 270 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 22,80 \text{ MPa}$$

$$f_y = 560 \text{ MPa}$$

$$F_c = 173982,65 \text{ N}$$

$$F_s = 337784,042 \text{ N}$$

$$F_s' = 163807,140 \text{ N}$$

$$x = 108,378 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = 1,878 \text{ ‰} < 2,0 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s' = 1,358 \text{ ‰} < 2,80 \text{ ‰}$$

*Διαρρέει πρώτος ο εφελκούμενος χάλυβας*

$$M_y = 80,00 \text{ kNm}$$

$$P_y = 164,11 \text{ kN}$$

### 5. Δοκός Δ5 (200\*200 mm)

$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 25,20 \text{ MPa}$$

$$F_c = 172681,04 \text{ N}$$

$$F_s = 337784,042 \text{ N}$$

$$F_s' = 165095,282 \text{ N}$$

$$x = 72,528 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = 1,89 \text{ ‰} < 2,00 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s' = 1,369 \text{ ‰} < 2,80 \text{ ‰}$$

Διαρρέει πρώτος ο εφελκόμενος χάλυβας

$$M_y = 53,32 \text{ kNm}$$

$$P_y = 109,38 \text{ kN}$$

### 6. Δοκός Δ6 (200\*200 mm)

$$d = 180 \text{ mm}$$

$$E_s = 200 \cdot 10^3 \text{ MPa}$$

$$\varepsilon_y = 2,80 \text{ ‰}$$

$$f_{mc} = 28 \text{ MPa}$$

$$F_c = 180358,61 \text{ N}$$

$$F_s = 337784,042 \text{ N}$$

$$F_s' = 157418,790 \text{ N}$$

$$x = 70,862 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_c = 1,818 \text{ ‰} < 2,00 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s = 2,80 \text{ ‰}$$

$$\varepsilon_s' = 1,305 \text{ ‰} < 2,80 \text{ ‰}$$

Διαρρέει πρώτος ο εφελκόμενος χάλυβας

$$M_y = 53,39 \text{ kNm}$$

$$P_y = 109,52 \text{ Kn}$$

### II3. Έλεγχος σε τέμνουσα για το ελαφροσκυρόδεμα και το συμβατικό σκυρόδεμα

$V_{Rd,s}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από τον οπλισμό διάτμησης τη στιγμή της διαρροής του.

$V_{Rd,max}$  είναι η τιμή σχεδιασμού της μέγιστης τέμνουσας που μπορεί να αναληφθεί από το στοιχείο, όπως καθορίζεται από τη συντριβή των λοξών θλιπτήρων.

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} z f_{ywd} \cot \theta$$



$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} b_w z v_1 f_{cd} / (\cot \theta + \tan \theta)$$

όπου:

- $\theta$  είναι η γωνία που σχηματίζουν οι λοξοί θλιπτήρες σκυροδέματος με τον κάθετο προς τη διεύθυνση της τέμνουσας άξονα της δοκού με  $1 \leq \cot \theta \leq 2,5$
- $A_{sw}$  είναι το εμβαδόν της διατομής του οπλισμού διάτμησης
- $s$  είναι η απόσταση των συνδετήρων
- $f_{ywd}$  είναι η τιμή σχεδιασμού του ορίου διαρροής του οπλισμού διάτμησης
- $v_1$  είναι ένας δείκτης μείωσης της αντοχής για σκυρόδεμα ρηγματωμένο λόγω διάτμησης
- $\alpha_{cw}$  είναι ένας συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την εντατική κατάσταση στη θλιβόμενη διαγώνιο ( $\alpha_{cw} = 1$ )

Για την περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος λαμβάνεται μειωτικός συντελεστής για την αντοχή σε συντριβή των θλιπτήρων ο οποίος ισούται με:

$$v_1 = 0,5 \cdot \eta_1 \cdot (1 - f_{tck}/250) \quad \text{όπου } f_{tck} \text{ σε MPa \&}$$

$\eta_1$  μειωτικός συντελεστής για το ελαφροσκυρόδεμα λόγω πυκνότητας

Για την περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος λαμβάνεται μειωτικός συντελεστής για την αντοχή σε συντριβή των θλιπτήρων ο οποίος ισούται με:

$$v_1 = 0,6 \cdot (1 - f_{ck}/250) \quad \text{όπου } f_{ck} \text{ σε MPa}$$

## ΕΛΕΓΧΟΣ

### ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

#### 1. Δοκός Δ1 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 87,51 \text{ kN}$$

$$\alpha_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 36,4 \text{ MPa}$$

$$d = 0,27 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,3571392$$

$$\theta = 10,83^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/140$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 239,95 \text{ MPa} \gg V_u = 87,51 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 87,51 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/380 \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/140$$

## 2. Δοκός Δ2 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 87,01 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 32,4 \text{ MPa}$$

$$d = 0,27 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,3638272$$

$$\theta = 11,95^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/140$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 239,95 \text{ MPa} \gg V_u = 87,01 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 87,01 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/380 \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/140$$

## 3. Δοκός Δ3 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 86,31 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 26,5 \text{ MPa}$$

$$d = 0,27 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,373692$$

$$\theta = 14,28^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/150$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 223,95 \text{ MPa} \gg V_u = 86,31 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 86,31 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/150$$

## 4. Δοκός Δ4 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 85,78 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 22,8 \text{ MPa}$$

$$d = 0,27 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243 \text{ m}$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$v1 = 0,3798784$$

$$\theta = 16,47^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/150$  ο σπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 223,95 \text{ MPa} \gg V_u = 85,78 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 85,78 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/150$$

### 5. Δοκός Δ5 (200\*200 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 57,15 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,20 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 25,2 \text{ MPa}$$

$$d = 0,18 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,162 \text{ m}$$

$$v1 = 0,3758656$$

$$\theta = 10,94^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/125$  ο σπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 179,16 \text{ MPa} \gg V_u = 57,15 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 57,15 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/125$$

### 6. Δοκός Δ6 (200\*200 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 57,39 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,20 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 28,0 \text{ MPa}$$

$$d = 0,18 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,162 \text{ m}$$

$$v1 = 0,371184$$

$$\theta = 9,97^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/125$  ο σπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 179,16 \text{ MPa} \gg V_u = 57,39 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 57,39 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/125$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

## ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 1. Δοκός Δ1 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 87,51 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 36,4 \text{ MPa}$$

$$d = 0,27 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,51264$$

$$\theta = 7,46^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/140$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 239,95 \text{ MPa} \gg V_u = 87,51 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 87,51 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/380 \gg A_{sw}/S_{\text{επιτρ}} = \Phi 8/200, \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/140$$

### 2. Δοκός Δ2 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 87,01 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 32,4 \text{ MPa}$$

$$d = 0,27 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,52224$$

$$\theta = 8,19^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/140$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 239,95 \text{ MPa} \gg V_u = 87,01 \text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 87,01 \text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/380 \gg A_{sw}/S_{\text{επιτρ}} = \Phi 8/200, \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/140$$

### 3. Δοκός Δ3 (150\*300 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 86,31 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$b_w = 0,15\text{ m}$$

$$f_{mc} = 26,5\text{ MPa}$$

$$d = 0,27\text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243\text{ m}$$

$$v_1 = 0,5364$$

$$\theta = 9,73^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550\text{ MPa}$  και  $\Phi 8/150$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 223,95\text{ MPa} \gg V_u = 86,31\text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 86,31\text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550\text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \gg A_{sw}/S_{\text{επιτρ}} = \Phi 8/200, \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/150$$

#### **4. Δοκός Δ4 (150\*300 mm)**

$$V_{Rd,max} = V_u = 85,84\text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,15\text{ m}$$

$$f_{mc} = 22,8\text{ MPa}$$

$$d = 0,27\text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,243\text{ m}$$

$$v_1 = 0,54528$$

$$\theta = 11,14^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550\text{ MPa}$  και  $\Phi 8/150$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

$$V_{Rd,s} = 223,95\text{ MPa} \gg V_u = 85,84\text{ KN}$$

ή

για  $V_{Rd,s} = V_u = 85,84\text{ KN}$ ,  $\theta = 21,8^\circ$  και  $f_{ywd} = 550\text{ MPa}$ ,

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \gg A_{sw}/S_{\text{επιτρ}} = \Phi 8/200, \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/150$$

#### **5. Δοκός Δ5 (200\*200 mm)**

$$V_{Rd,max} = V_u = 57,19\text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,20\text{ m}$$

$$f_{mc} = 25,2\text{ MPa}$$

$$d = 0,18\text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,162\text{ m}$$

$$v_1 = 0,53952$$

$$\theta = 7,53^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550\text{ MPa}$  και  $\Phi 8/125$  ο οπλισμός έναντι τέμνουσας:

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«Μελέτη σύνθεσης ελαφροσκυροδέματος με κίσηρη και εφαρμογή του στον αντισεισμικό σχεδιασμό»

$$V_{Rd,s} = 179,16 \text{ MPa} \gg V_u = 57,19 \text{ KN}$$

ή

$$\text{για } V_{Rd,s} = V_u = 57,19 \text{ KN}, \theta = 21,8^\circ \text{ και } f_{ywd} = 550 \text{ MPa},$$

$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \gg A_{sw}/S_{\text{επιτρ}} = \Phi 8/135, \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/125$$

### 6. Δοκός Δ6 (200\*200 mm)

$$V_{Rd,max} = V_u = 57,41 \text{ kN}$$

$$a_{cw} = 1$$

$$b_w = 0,20 \text{ m}$$

$$f_{mc} = 28,0 \text{ MPa}$$

$$d = 0,18 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,162 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,5328$$

$$\theta = 6,87^\circ \quad \text{άρα} \quad \theta = 21,8^\circ$$

Για  $\theta = 21,8^\circ$ ,  $f_{ywd} = 550 \text{ MPa}$  και  $\Phi 8/125$  ο σπλισμός έναντι τέμνουσας:

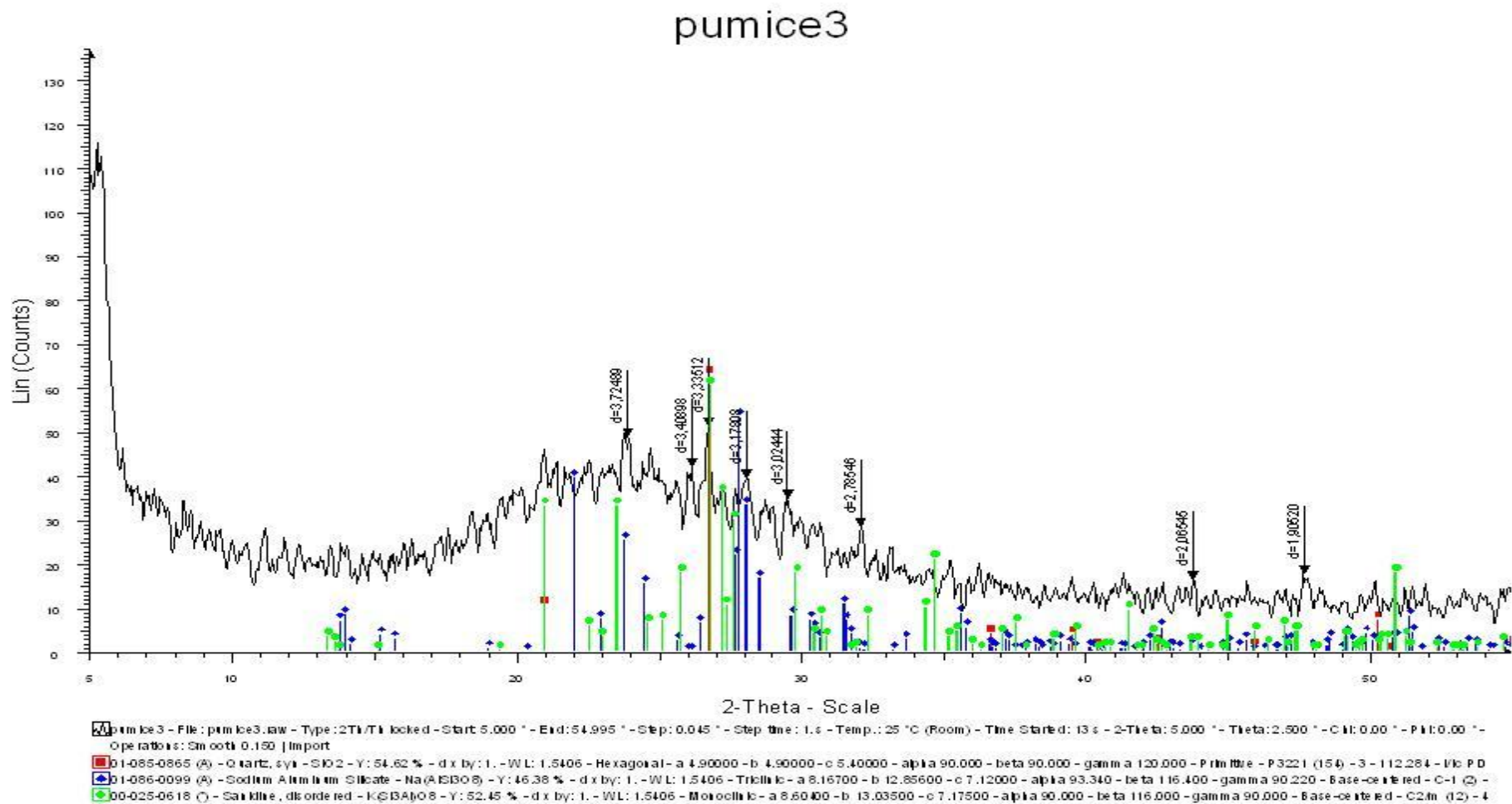
$$V_{Rd,s} = 179,16 \text{ MPa} \gg V_u = 57,41 \text{ KN}$$

ή

$$\text{για } V_{Rd,s} = V_u = 57,41 \text{ KN}, \theta = 21,8^\circ \text{ και } f_{ywd} = 550 \text{ MPa},$$

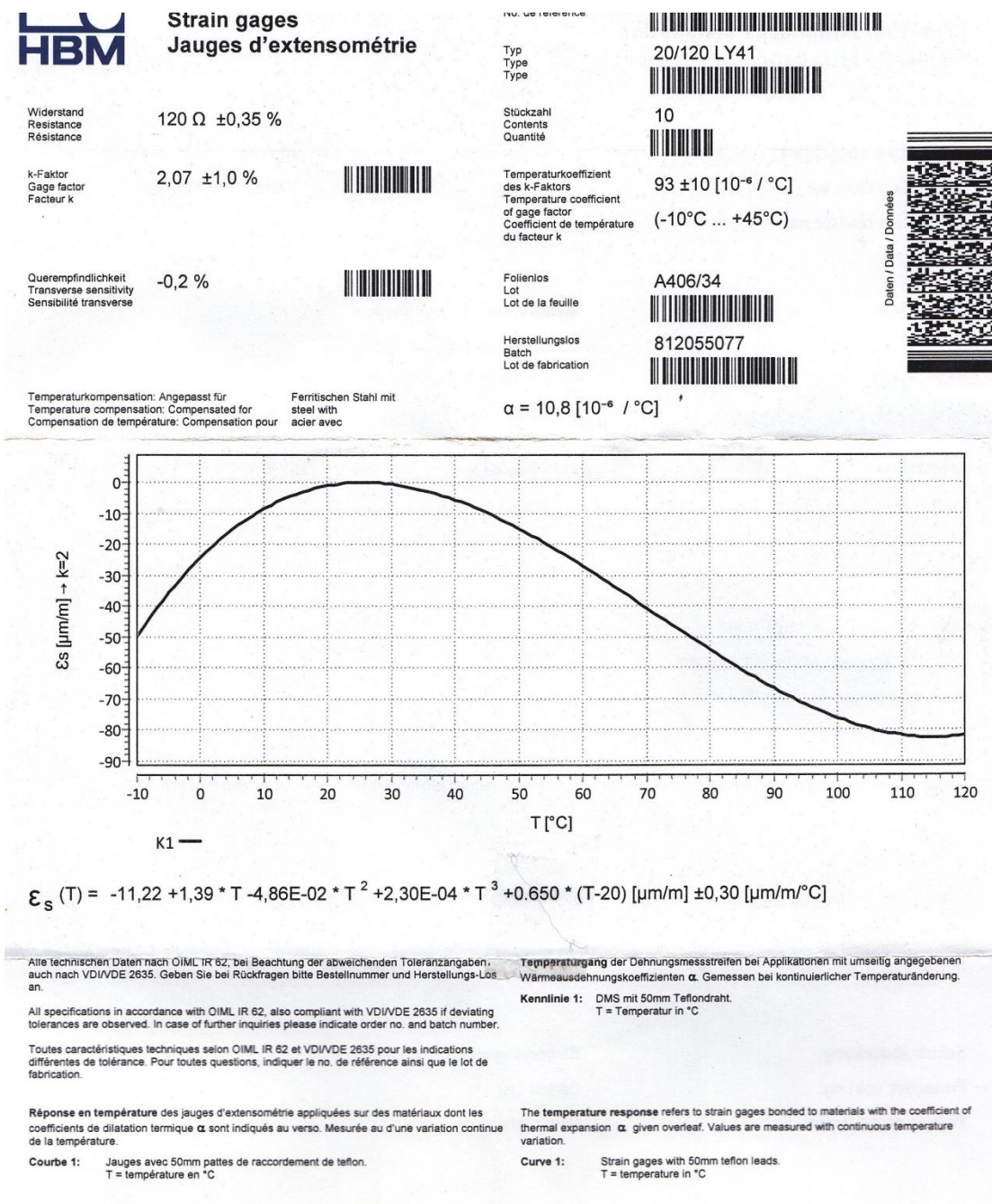
$$A_{sw}/S_{\text{απαιτ}} = \Phi 8/390 \gg A_{sw}/S_{\text{επιτρ}} = \Phi 8/135, \text{ ενώ } A_{sw}/S_{\text{πραγμ}} = \Phi 8/125$$

### III. Ορυκτολογική Σύνθεση Κίσσηςρης



Σχήμα Π-Σ32: Ορυκτολογική ανάλυση της Κίσσηςρης με τη χρήση περιθλασιόμετρου ακτίνων X (XRD)

#### IV. Χαρακτηριστικά στοιχεία strain-gages για τον πειραματικό προσδιορισμό του Μέτρου Ελαστικότητας ελαφροσκυροδέματος με τη χρήση Κίσσης



Εικόνα Π-E26: Χαρακτηριστικά στοιχεία strain-gages



## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

- [1] <http://www.lafarge.gr>
- [2] <http://www.monoseisgoumas.gr/el/services/lightweight-concrete.html>
- [3] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL\\_GUIDES/PIRANT\\_YLIKA/pir\\_5\\_6.htm](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/PIRANT_YLIKA/pir_5_6.htm)
- [4] Γκιόκας Ιωάννης: Το αυτοσυμπυκνούμενο ελαφροσκυρόδεμα στην επισκευή & ενίσχυση κατασκευών από Ω. Σ., 2010
- [5] A. Short & W. Kinniburgh: Lightweight Concrete, 3rd Edition, 1978
- [6] Στ. Κόλιας: Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος, 2011
- [7] Ramazan Demirboğa: Thermal Conductivity and Compressive Strength of Concrete Incorporation with Mineral Admixtures, 2002
- [8] Α. Μπάκα: Κατασκευές από Σκυρόδεμα, Έκδοση 2008
- [9] ACI 211.2-98, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete
- [10] Ramazan Demirboğa: Influence of Mineral Admixtures on Thermal Conductivity and Compressive Strength of Mortar, 2002
- [11] M I Khan: Factors affecting the Thermal Properties of Concrete and Applicability of its Prediction Models, 2001
- [12] Τσώνη Νικολέττα: Η Διάβρωση του Χάλυβα στο Σκυρόδεμα, Πρόληψη, Έλεγχοι & Επεμβάσεις σε Υφιστάμενες Κατασκευές – Τρωτότητα των Ενισχύσεων, 2010
- [13] Νέος Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, ΦΕΚ 1416/Β/17.07.08 & ΦΕΚ 2113/Β/13.10.08, 2008
- [14] EN 1992-1-1:2004, ΕΥΡΩΚΩΔΙΚΑΣ 2: «Σχεδιασμός φορέων από Σκυρόδεμα», Μέρος 1 -1: Γενικοί Κανόνες και κανόνες για κτίρια, Ελληνική Έκδοση, 2004
- [15] Sun Dao Jun: Effect of a newly developed lignosulphonate superplasticizer on properties of cement pastes and mortars, 2008
- [16] Ahmet Tandiroglu: Temperature - Dependent Thermal Conductivity of High Strength Lightweight Raw Perlite Aggregate Concrete, 2010
- [17] Ramazan Demirboğa & Rüstem Gül: Thermal Conductivity and Compressive Strength of Expanded Perlite aggregate Concrete with Mineral admixtures, 2003

- [18] Alaettin Kilç, Cengiz Duran Atiş, Ergül Yaşar & Fatih Özcan: High Strength Lightweight Concrete made with scoria aggregate containing Mineral Admixtures, 2003
- [19] H S Lim, T H Wee, M A Mansur & K H Kong, Flexural Behavior of Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Beams, 2006
- [20] Delsye C L Teo, Md. Abdul Mannan & John V. Kurian: Flexural Behavior of Reinforced Lightweight Concrete Beams Made with Oil Palm Shell (OPS), 2006
- [21] Alan H Mattock, W K Li & T C Wang: Shear Transfer in Lightweight Reinforced Concrete, 1976
- [22] ASTM C 136 – 01, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates
- [23] ASTM C 117 – 03, Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing
- [24] Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος, ΥΑ Δ14/19164 - ΦΕΚ/315B/28.05.97, 1997
- [25] Κυριακόπουλος Βασίλειος: Σχέση αντοχής Σκυροδέματος σε θλίψη και Κάμψη, ΕΜΠ, 2011
- [26] Μ.Δ. Κωτσοβός: Οπλισμένο Σκυρόδεμα, Εισαγωγή στο Σχεδιασμό με βάση το Θεωρητικό Υπόβαθρο των Κανονισμών, 2005
- [27] ACI E Education Bulletin E1-99, Aggregates for Concrete, Developed by Committee E-701, Materials for Concrete Construction
- [28] EN 1998-1 :2004, Ευρωκώδικας 8: Αντισεισμικός Σχεδιασμός, Μέρος 1: Γενικοί κανόνες, σεισμικές δράσεις και κανόνες για κτίρια, Ελληνική Έκδοση, 2004
- [29] <http://concretestructures.blogspot.gr/2012/03/blog-post.html>
- [30] Economic Design and Construction with Lightweight Aggregate Concrete, Document BE96-3942/R1, April 1988
- [31] A.M. Neville: Properties of Concrete, 4th & Final Edition, Standards updated to 2002, 2002