

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ





Πειραματική διερεύνηση των χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική και διαξονική καταπόνηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗ ΔΙΚΑΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Χ. ΖΕΡΗΣ

> ΑΘΗΝΑ ΙΟΥΛΙΟΣ 2009



ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ

Πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς των χαρακτηριστικών του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό μονοαξονική και διαξονική καταπόνηση

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΙΩΑΝΝΗ ΔΙΚΑΡΟΥ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Χ. Ζέρης Επικ. Καθηγητής ΕΜΠ

> **ΑΘΗΝΑ** Ιούλιος 2009

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την υποχρέωση να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Χρήστο Ζέρη, Επίκουρο Καθηγητή του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τη συνεχή θεωρητική υποστήριζη του για την εκπόνηση της, καθώς και την καθοδήγηση του στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π. Θερμές ευχαριστίες θα ήθελα αποδώσω και στον κ. Ελισσαίο Κατσαραγάκη για τη συμμετοχή και τις παρατηρήσεις του σε όλη τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω για τη συνεργασία τους, από το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Οπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π., τον κ. Π. Παπανδρέου, καθώς και τον Α. Γρατσία για τη σημαντική βοήθεια που προσέφεραν κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων.

Δίκαρος Ιωάννης

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ГЕNIKA	6
1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	8

2 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ	10
2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	13
2.2.1 Μελέτες άοπλου σκυροδέματος υπό διαξονική ένταση	13
2.2.2 Πειραματικές μελέτες ινοπλισμένου σκυροδέματος	31
2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ	54
2.3.1 Γενικές έννοιες και βασικά κριτήρια αστοχίας	54
2.3.2 Μελέτες αναλυτικών κριτηρίων αστοχίας για το ινοπλισμένο	
σκυρόδεμα	77

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	103
3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ	110
3.2.1 Διάταξη πειραμάτων εφελκυσμού-θλίψης	110
3.2.2 Διάταξη πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης	126

4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	130
4.1.1 Άοπλοι κύλινδροι	130
4.1.2 Κύλινδροι με V _f = 0,72 % (DRAMIX)	138
4.1.3 Κύλινδροι με V _f = 1,2 % (DRAMIX)	145
4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	
4.2.1 Δοκίμια από άοπλο σκυρόδεμα	159
4.2.2 Ινοπλισμένα δοκίμια με V _f = 0,72 % (DRAMIX)	
4.2.3 Ινοπλισμένα δοκίμια με V _f = 1,2 % (DRAMIX)	

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ	
ΔΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	180
5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩ	N183
5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ	184

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ПАРАРТНМА А	
ПАРАРТНМА В	
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	

Κεφάλαιο 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η μεγάλη ανάπτυξη των κατασκευών τα τελευταία χρόνια, στο εξωτερικό αλλά και στην Ελλάδα έχει θέσει την ανάγκη για αναβάθμιση των τεχνικών και των υλικών που χρησιμοποιούνται στα έργα του Πολιτικού Μηχανικού. Λόγω των αυξανόμενων κατασκευαστικών απαιτήσεων, γίνεται μεγάλη έρευνα γύρω από τη χρήση νέων υλικών, αλλά και τη βελτίωση των ήδη υπαρχόντων, όπως το σκυρόδεμα. Σκοπός είναι η ανάπτυξη καλύτερων χαρακτηριστικών και παράλληλα η μείωση του κόστους και του χρόνου κατασκευής. Μια από τις προσπάθειες που στοχεύουν στην βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι και η ανάπτυξη του ινοπλισμένου σκυροδέματος (FRC).

Το σκυρόδεμα είναι ένα δομικό υλικό που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις κατασκευές. Τσιμεντοειδή υλικά και ασβεστοκονιάματα με παρόμοια σύσταση και ιδιότητες με το σκυρόδεμα χρησιμοποιούνταν ήδη από τα αρχαία χρόνια. Ωστόσο, η χρήση του σκυροδέματος εδραιώθηκε, κυρίως μετά τα μέσα του 19° αιώνα, όταν η ανάγκη για ανάπτυξη των κατασκευών συνδυάστηκε με την δυνατότητα συστηματικής και βιομηχανικής παραγωγής του υλικού (Το 1860 αρχίζει να χρησιμοποιείται το τσιμέντο Portland με τη σύγχρονη μορφή του). Η ευρεία χρήση του σκυροδέματος έθεσε, συνεπώς, την ανάγκη για την λεπτομερή και ακριβή ανάλυση της σύνθεσης αλλά και των μηχανικών χαρακτηριστικών του. Έτσι, οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί προκείμενου να μελετηθεί επαρκώς η συμπεριφορά του σκυροδέματος, υπό διάφορες εντατικές καταστάσεις, και οι προσπάθειες να μορφωθούν κατάλληλα κριτήρια αστοχίας του, είναι πολυάριθμες. Η μελέτη αυτή δεν είναι ιδιαιτέρως εύκολη, λόγω της μεγάλης ανομοιογένειας που χαρακτηρίζει το υλικό και των πολλών παραμέτρων από τις οποίες εξαρτάται η συμπεριφορά του. Το κυριότερο μειονέκτημα του σκυροδέματος εντοπίζεται στην μειωμένη εφελκυστική του αντοχή και στην έλλειψη πλαστιμότητας μετά την έναρξη της ρηγμάτωσης. Τα χαρακτηριστικά αυτά γίνονται ακόμα πιο φανερά στα υψηλής αντοχής σκυροδέματα (HPC) που έχουν αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια, κυρίως στις ΗΠΑ. Τα σκυροδέματα αυτά παρουσιάζουν υψηλές θλιπτικές αντοχές (Μεγαλύτερες των 60

MPa), γεγονός που ικανοποιεί τις αυξημένες απαιτήσεις για μεγάλες κατασκευές, παρουσιάζουν, ωστόσο, μεγάλη ψαθυρότητα.

Η ανάπτυξη του ινοπλισμένου σκυροδέματος, που εμφανίζεται την δεκαετία του '60 (Ξεκινούν οι πρώτες θεωρητικές και πειραματικές έρευνες από τους Romualdi, Mandel, κ.α.), στοχεύει στην αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων του συμβατικού σκυροδέματος, τα οποία αναφέρθηκαν παραπάνω. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι μια σύνθεση που αποτελείται από τσιμέντο, νερό, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή μέσα στην οποία περιέχονται διακριτές ίνες διεσπαρμένες ομοιόμορφα και με τυχαίο προσανατολισμό. Επίσης, είναι δυνατόν να περιέχονται διάφορα πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται και στο συμβατικό σκυρόδεμα (ποζολάνες κ.α.). Οι ίνες είναι μικρού μήκους, της τάξης των μερικών εκατοστών και διαμέτρου μικρότερης του χιλιοστού. Διασκορπίζονται στη μάζα του υλικού κατά την ανάμειξη των συστατικών του, σε μικρή περιεκτικότητα, της τάξης του 1-3% κατ' όγκον. Οι ίνες που εισάγονται στο υλικό ποικίλουν ως προς το είδος και ως προς τα γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά. Χρησιμοποιούνται ίνες από υλικά όπως χάλυβας και πρόσφατα, πολυμερή, γυαλί, ή και άλλα φυσικά υλικά. Το πιο διαδεδομένο είδος ινών στις κατασκευές, είναι οι ίνες από χάλυβα (SFRC). Από τα κυριότερα χαρακτηριστικά που αποδίδονται στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι η αύξηση της εφελκυστικής και καμπτικής αντοχής, η αυξημένη αντίσταση στη ρηγμάτωση ενώ παρουσιάζει και σημαντική αύξηση της πλαστιμότητας. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, που άρχισε να χρησιμοποιείται από την δεκαετία του '70 και μετά, βρήκε εφαρμογή σε κατασκευές, όπως βιομηχανικά δάπεδα, διαδρόμους αεροδρομίων, parking, πεζοδρόμια, υδραυλικά έργα, ενώ ίνες αρχίζουν να χρησιμοποιούνται και σε εκτοξευόμενο σκυρόδεμα. Μερικές από τις χρήσεις του νέου υλικού, περιελάμβαναν την κατασκευή δαπέδων στάθμευσης αυτοκινήτων στο αεροδρόμιο του Heathrow, την κατασκευή τροχόδρομου στο αεροδρόμιο του Vicksburg και χρήση σε επισκευές σε ιστορικά κτίρια στην Ιταλία.

Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που κερδίζει συνεχώς έδαφος λόγω των ευνοϊκών χαρακτηριστικών που παρουσιάζει. Παρά ταύτα η χρήση του στις κατασκευές είναι ακόμη περιορισμένη. Ο σχεδιασμός και η ανάλυση του βασίζεται σε απλοποιητικές παραδοχές και κατασκευαστικές συστάσεις, ενώ δεν υπάρχουν προβλέψεις στους κατασκευαστικούς κανονισμούς. Το γεγονός αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά του σε όλο το φάσμα των εντατικών καταστάσεων, δεν έχουν μελετηθεί επαρκώς έως τώρα. Η δυσκολία της μελέτης αυτής είναι αυξημένη, καθώς οι παράμετροι στις οποίες πρέπει να δοθεί προσοχή είναι πολλές. Τέτοιες παράμετροι είναι το είδος των ινών (Ινες από χάλυβα, γυαλί, πολυμερή υλικά, κ.α.), τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά τους (Μήκος, διάμετρος), τα μηχανικά χαρακτηριστικά (Ευθύγραμμες ίνες, ίνες με αγκυρώσεις στα άκρα, κ.α.), καθώς και η περιεκτικότητα τους στο μείγμα. Για την διεύρυνση, όμως, της χρήσης του υλικού κρίνεται απαραίτητη η ολοκληρωμένη κατανόηση των μηχανικών χαρακτηριστικών και η ύπαρξη καθολικού κριτηρίου αστοχίας.

1.2 ΣΤΟΧΟΙ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Οι στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας περιλαμβάνουν την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του οπλισμένου, με χαλύβδινες ίνες, σκυροδέματος (SFRC) υπό μονοαζονική θλιπτική ένταση και υπό συνδυασμό εφελκυστικής-θλιπτικής έντασης. Χρησιμοποιείται ένα είδος ίνας (Τύπου DRAMIX) με σταθερά γεωμετρικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, ενώ η επιρροή της παραμέτρου της περιεκτικότητας εξετάζεται με την δοκιμή δύο διαφορετικών ποσοτήτων ινών ($V_f = 0,72\%$ και $V_f = 1,2\%$ κατ' όγκον). Από τις δοκιμές υπό μονοαζονική θλίψη, επιδιώκεται η καταμέτρηση της αντοχής του υλικού σε σχέση με το συμβατικό σκυρόδεμα και η αποτύπωση των καμπυλών τάσεων-παραμορφώσεων με σκοπό την καταγραφή της πλαστιμότητας. Όσον αφορά στις διαξονικές δοκιμές, το ζητούμενο είναι η καταμέτρηση των αντοχών υπό δύο αναλογίες φόρτισης θλίψηςεφελκυσμού, με χρήση μιας πειραματικής διάταξης που προτείνεται από τον Ε. Σ. Κατσαραγάκη σε παρόμοια έρευνα για την συμπεριφορά του άοπλου σκυροδέματος. Η αποτίμηση της συμπεριφοράς και της αποτελεσματικότητας της εν λόγω διάταξης συγκαταλέγεται και στους σκοπούς της παρούσας εργασίας.



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χαρακτηρίζεται από μεγάλη ανομοιογένεια και ιδιαίτερα πολύπλοκους μηχανισμούς θραύσης. Από πολύ νωρίς διαμορφώθηκε η ανάγκη της μελέτης της συμπεριφοράς του υλικού και, ιδιαίτερα, υπό διαξονικές ή τριαξονικές εντάσεις, καθώς η μονοαξονική φόρτιση είναι μια εντατική κατάσταση που σπάνια εντοπίζεται στο σχεδιασμό. Παρά τις διαφορές που προέκυψαν κατά καιρούς στα διάφορα πειραματικά αποτελέσματα, που οφείλονται κυρίως στις διαφορετικές συνθήκες εκτέλεσης των δοκιμών (διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, διαφορετικής μορφής δοκίμια κ.α.), έγινε φανερή η σημαντική επιρροή της ύπαρξης πλευρικών τάσεων στην αντοχή του σκυροδέματος, λόγω της φύσης του υλικού ως γαιώδους υλικού και του τρόπου συμπεριφοράς του (ασθενής εφελκυστική).

Ήδη από τις αργές του εικοστού αιώνα, διεξάγονταν πειραματικές έρευνες που είχαν ως στόχο την μελέτη της συμπεριφοράς του σκυροδέματος υπό διαξονικές φορτίσεις. Μελέτες, όπως αυτές των F \square ppl (1899, 1900), Wästlund (1937), Glomb (1958), Weigler & Becker (1963), Iyengar (1965), Vile (1965) και Robinson (1967), κ.α., στόχευαν στην αποτίμηση της διαξονικής αντοχής του σκυροδέματος υπό διάφορους συνδυασμούς φορτίσεων. Ενώ οι πρώτες έρευνες εστίαζαν την προσοχή τους, κατά κύριο λόγο, στην περιοχή θλίψης-θλίψης, οι Kupfer et al (1969), αφού συγκέντρωσαν και συνέκριναν τα παλαιότερα αποτελέσματα, πραγματοποίησαν μια καλώς σχεδιασμένη σειρά διαξονικών πειραμάτων που παρείχαν στοιχεία και για τα υπόλοιπα πεδία φορτίσεων (διαξονικός εφελκυσμός και συνδυασμός εφελκυσμούθλίψης). Πολυάριθμες πειραματικές έρευνες για την διαξονική ή τριαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος συνέχισαν να διεξάγονται και κατά τα επόμενα χρόνια, με σκοπό τη μόρφωση ενός καθολικού κριτηρίου αστοχίας (Mills & Zimmerman, 1970, Traina, 1983 κ.α.). Ειδικά για το πεδίο ετερόσημης διαξονικής φόρτισης, μελέτες όπως αυτές των Nelissen (1972), Tasuji et al. (1978) και Κατσαραγάκη (1987), παρέχουν σημαντικά στοιχεία.

10

Τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκτεταμένη μελέτη του σκυροδέματος έδωσαν χρήσιμες πληροφορίες και για την διερεύνηση της συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος αργότερα. Από τις έρευνες των Kupfer et al. (1969), Nelissen (1972), Su & Hsu (1988) κ.α. είχε γίνει φανερό ότι η αστοχία του σκυροδέματος, τόσο σε μονοαξονική όσο και σε διαξονική θλίψη, σχετίζεται με τον σχηματισμό εφελκυστικών ρωγμών, παράλληλων στη διεύθυνση της κύριας φόρτισης. Επίσης, από τις θεωρητικές έρευνες των Van Mier (1986) και των Horri & Nemat-Nasser (1986) επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι, όταν σε ένα υλικό, όπως το σκυρόδεμα, ασκούνται πλευρικές θλιπτικές εντάσεις κάθετες στη διεύθυνση του κυρίου φορτίου, η ανάπτυξη των μικρορωγμών αυτών, καθυστερείται. Έτσι, αιτιολογείται η αυξημένη αντοχή του σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη και η, πλέον, διατμητική μορφή αστοχίας, που παρατηρείται πειραματικά. Οι παρατηρήσεις αυτές οδήγησαν στην υπόθεση ότι η ύπαρξη γαλύβδινων ινών στη μάζα, εμποδίζοντας την ανάπτυξη των εφελκυστικών ρωγμών, μπορεί να προσδώσει στο υλικό μια ισοδύναμη πλευρική ένταση που θα οδηγήσει στην αύξηση της θλιπτικής του αντοχής. Παράλληλα, είναι δεδομένο ότι οι ίνες συντελούν στην αύξηση της εφελκυστικής αντοχής και να παρέχουν πλαστιμότητα στο υλικό.

Η ανάπτυξη του ινοπλισμένου σκυροδέματος στόχευε, όπως προκύπτει και από τα παραπάνω, στο να βελτιώσει την συμπεριφορά του σκυροδέματος γεφυρώνοντας τις μικρορωγμές και εμποδίζοντας τες να αναπτυχθούν κατά την αστοχία. Πρώτοι οι Romualdi & Batson (1963), στις αρχές της δεκαετίας του '60, ξεκίνησαν να μελετούν τις ιδιότητες του νέου υλικού και έκτοτε, εκτεταμένες πειραματικές μελέτες διεξήχθησαν με τον ίδιο σκοπό. Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, λόγω βελτιωμένης εφελκυστικής συμπεριφοράς, βρήκε εφαρμογή κυρίως σε κατασκευές όπως βιομηχανικά δάπεδα, δάπεδα αεροδρομίων, υπόγεια έργα (σήραγγες), διάφορα υδραυλικά έργα και γενικά σε επιφανειακά και κελυφοειδή στοιχεία. Στις κατασκευές αυτές, η δράση διαξονικών εντάσεων είναι ιδιαίτερα σημαντική και συνεπώς, αναδεικνύεται, και πάλι, η σημασία μελέτης της διαξονικής συμπεριφοράς του υλικού. Παρά ταύτα, λόγω της σχετικά περιορισμένης χρήσης του ινοπλισμένου σκυροδέματος, ο σχεδιασμός και η ανάλυση του βασίζονταν σε χαρακτηριστικά που προέκυπταν από μονοαξονικές δοκιμές, ενώ οι πειραματικές έρευνες στόχευαν κυρίως στην μελέτη της καμπτικής ή της εφελκυστικής βελτίωσης του σκυροδέματος λόγω των ινών [Henager & Doherty (1976), Lim et al (1987) κ.α.]. Προκαταρκτικές δοκιμές πειραμάτων υπό τριαξονική ένταση πραγματοποιήθηκαν

από τους Brandt et al. το 1981, ενώ από τους πρώτους ερευνητές που προσπάθησαν, πειραματικά, να μορφώσουν την περιβάλλουσα αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονικές εντάσεις, ήταν οι Yin et al (1989) και οι Traina & Mansour (1990, 1991). Οι συγκεκριμένες μελέτες, όμως έδωσαν στοιχεία μόνο για το πεδίο της διαξονικής θλίψης. Η δυσκολία μελέτης του ινοπλισμένου σκυροδέματος οφείλεται κυρίως στο ότι υπεισέρχονται πολλές παράμετροι που καθορίζουν την συμπεριφορά του (γεωμετρικά στοιχεία ινών, μηχανικά χαρακτηριστικά ινών, περιεκτικότητα κ.α). Μελέτες όπως των Pantazopoulou & Zanganeh (2001), στόχευαν στη μελέτη της επιρροής των παραμέτρων αυτών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό τριαξονική ένταση. Όμως από την διερεύνηση της βιβλιογραφίας προκύπτουν ιδιαιτέρως περιορισμένα δεδομένα που να αφορούν την διαξονική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό ετερόσημη φόρτιση, που αφορά και την παρούσα εργασία. Μελέτες που διεξήχθησαν με σκοπό την μελέτη του πεδίου εφελκυσμού-θλίψης ήταν αυτές των Meier et al. (1983) και Demeke & Tegos (1994).

Παράλληλα με τις πειραματικές μελέτες, εκτεταμένη έρευνα διεξαγόταν προκειμένου να διαμορφωθούν κατάλληλα μαθηματικά κριτήρια αστοχίας. Διάφορα κριτήρια αστοχίας υλικού είχαν αναπτυχθεί, ήδη από πολύ παλιά, όπως τα κριτήρια Tresca & Von Mises και Mohr-Coulomb, ενώ σταδιακά αναπτύσσονταν πιο πολύπλοκα, όπως το τετραπαραμετρικό κριτήριο του Ottosen (1977) και το πενταπαραμετρικό κριτήριο των Willam & Warnke (1975). Τα προσομοιώματα αυτά, αναπτύχθηκαν με στόχο την αναλυτική διερεύνηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος, ενώ αποτέλεσαν αργότερα και την βάση για την ανάπτυξη αντιστοίχων προσομοιωμάτων και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Το 1983 οι Tanigawa et al. χρησιμοποίησαν το κριτήριο του Ottosen (1977) για να προβλέψουν την σχέση τάσεων-παραμορφώσεων του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οı Murugappan et al. (1994), βασιζόμενοι και πάλι στο κριτήριο του Ottosen (1977) πρότειναν ένα μαθηματικό προσομοίωμα της περιβάλλουσας αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος, ενώ οι Hu et al. (2003), πρότειναν ένα απλό κριτήριο αστοχίας, που προκύπτει από προσαρμογή πειραματικών δεδομένων. Τέλος οι Seow & Swaddiwudhipong (2005, 2006)διαμόρφωσαν ένα κριτήριο αστογίας τροποποιώντας το κριτήριο των Willam & Warnke (1975), ενώ πραγματοποίησαν και πειράματα προκειμένου να ελεγχθεί η ορθότητα της πρότασης τους.

Στο κεφάλαιο αυτό της παρούσας εργασίας, αναλύονται διάφορες πειραματικές αλλά και θεωρητικές μελέτες που αφορούν το άοπλο και το ινοπλισμένο

12

σκυρόδεμα σε καταστάσεις διαξονικής έντασης. Αρχικά αναλύεται η μελέτη των Kupfer et al. (1969), από την οποία, δημιουργείται μια ολοκληρωμένη εικόνα όσον αφορά την περιβάλλουσα αστοχίας του σκυροδέματος και της γενικότερης συμπεριφοράς του υπό διαξονική ένταση. Ιδιαίτερα για το πεδίο εφελκυσμού-θλίψης, προκύπτουν δεδομένα που μπορούν να φανούν χρήσιμα για την σύγκριση των ιδιοτήτων του ινοπλισμένου σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Η δεύτερη έρευνα που αναλύεται είναι αυτή του Ε.Σ. Κατσαραγάκη (1987), στην οποία γίνεται μια προσπάθεια μελέτης του σκυροδέματος σε καταστάσεις εφελκυσμού-θλίψης, μέσω σχεδιασμού και κατασκευής μιας νέας πειραματικής διάταξης που παρέχει σημαντική ευκολία στην διεξαγωγή των πειραμάτων. Η συγκεκριμένη μελέτη είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη καθώς υιοθετήθηκε (με μικρές παραλλαγές) και στην παρούσα εργασία για την διεξαγωγή των διαξονικών δοκιμών, που περιγράφονται παρακάτω. Στην συνέχεια αναλύονται οι μελέτες των Yin et al (1989) και Traina & Mansour (1991), που αποτελούν τις πρώτες προσπάθειες διαξονικής μελέτης του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα των μελετών αυτών έχουν χρησιμοποιηθεί και κατά την ανάπτυξη διαφόρων μαθηματικών κριτηρίων αστοχίας. Αναλύεται, επίσης, η έρευνα των Demeke & Tegos (1994) καθώς αφορά άμεσα το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, ως προς την πειραματική διερεύνηση της συμπεριφοράς του συνδυασμό ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό εφελκυσμού-θλίψης. Τέλος, περιγράφονται τα αναλυτικά προσομοιώματα της περιβάλλουσας αστοχίας που αναπτύχθηκαν από τους Murugappan et al. (1993), Hu et al. (2003), Seow & Swaddiwudhipong (2005, 2006).

2.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

2.2.1 Μελέτες άοπλου σκυροδέματος υπό διαξονική ένταση

<u>Μελέτη των Kupfer et al (1969)</u>

Σκοπός και ανάλυση παλαιότερων πειραμάτων

Η μελέτη αυτή περιγράφει μια σειρά πειραμάτων σε δοκίμια άοπλου σκυροδέματος με στόχο την λεπτομερή διερεύνηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος σε καταστάσεις διαξονικής έντασης προκειμένου να διαμορφωθεί ένα



καθολικό κριτήριο αστοχίας. Οι παλαιότερες μελέτες που είχαν διεξαχθεί γύρω από το αντικείμενο αυτό, διέφεραν ως προς τις μεθόδους και τον τύπο των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν, 01 περισσότερες εστίαζαν στην περιοχή θλίψης-θλίψης ενώ δεν υπήρχαν καθόλου δεδομένα για διαξονικού την περιοχή εφελκυσμού. Οι Kupfer et al. παρατήρησαν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των

αποτελεσμάτων των παλαιότερων πειραμάτων (Σχήμα 2.2.1) τις οποίες απέδωσαν κυρίως σε δύο λόγους: 1) Στην δυσκολία εφαρμογής ενός καλά καθορισμένου και ομοιόμορφου πεδίου διαξονικής έντασης στο δοκίμιο και 2) Στο γεγονός ότι δεν δόθηκε σε όλες τις μελέτες η ίδια προσοχή στην επιρροή της τριβής μεταξύ του δοκιμίου και της επιφάνειας φόρτισης.

Ο πρώτος λόγος έχει άμεση σχέση με τις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιήθηκαν και με την δυσκολία εφαρμογής τους σε κάθε πείραμα. Σε πειράματα θλίψης-θλίψης χρησιμοποιήθηκαν συμβατικοί κύλινδροι υποβαλλόμενοι σε υδροστατική πίεση ή και κοίλοι κύλινδροι εντεινόμενοι εξωτερικά. Για δοκιμές σε συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης χρησιμοποιήθηκαν κατά καιρούς κοίλοι κύλινδροι υποβαλλόμενοι είτε σε στρέψη με αξονική θλίψη είτε σε εσωτερικές πιέσεις με αξονική θλίψη. Παράγοντες όπως το πάχος των κοίλων κυλίνδρων ή η δυσκολία ιδανικής εφαρμογής των υδροστατικών πιέσεων ευθύνονται για τις διαφορές στα αποτελέσματα.

Όσον αφορά την δράση της τριβής στη διεπιφάνεια δοκιμίου και πλάκας φόρτισης, η επιρροή της τονίστηκε ιδιαίτερα στη συγκεκριμένη έρευνα. Είχε παρατηρηθεί και παλαιότερα σε πρισματικά δοκίμια που φορτίζονταν θλιπτικά, ότι η τριβή επαφής δημιουργούσε περίσφιγξη κοντά στις επιφάνειες φόρτισης, η οποία οδηγούσε σε αύξηση της φαινόμενης αντοχής (A. F□ppl 1899,1900). Η προσπάθεια να μειωθεί αυτή η επιρροή μέσω χρήσης λιπαντικών ουσιών δεν έφερε το επιθυμητό

αποτέλεσμα, ενώ η συνέχιση χρησιμοποίησης συμβατικών πλακών φόρτισης και σε μεταγενέστερα πειράματα οδήγησε στο να υπάρχουν αποκλίσεις στα αποτελέσματα, της τάξης του 80-350%. Επιπλέον, παρατηρήθηκε ότι η ύπαρξη τριβής στις επιφάνειες του δοκιμίου όχι μόνο δημιουργεί περίσφιγξη, αλλά οδηγεί και στο να συγκρατείται ένα μέρος του φορτίου από τις πλάκες φόρτισης, γεγονός που, αν δεν ληφθεί υπόψη, η αντοχή του δοκιμίου υπερεκτιμάται (H. Hilsdorf, 1965). Οι παρατηρήσεις αυτές για την τριβή επιβεβαιώνονται και από την μελέτη που αναλύεται και στο **Σχήμα 2.2.2**, όπου παρουσιάζεται η διαφορά στα αποτελέσματα με την χρήση ή χωρίς, ειδικά τροποποιημένων πλακών φόρτισης.



Σχήμα 2.2.2: Σύγκριση αντοχών με χρήση συμβατικών και τροποποιημένων πλακών φόρτισης

Περιγραφή των πειραμάτων και αποτελέσματα

Λαμβάνοντας υπόψη τις παρατηρήσεις που προέκυψαν και αναφέρθηκαν παραπάνω, οι Kupfer et al. κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για τα διαξονικά πειράματα, προσφορότερη ήταν η χρήση δοκιμίων μορφής παραλληλεπιπέδων πλακιδίων (20 × 20 × 5 cm) που θα χωρίζονταν σε παρτίδες τριών διαφορετικών συνθέσεων σκυροδέματος με μονοαξονικές αντοχές σε θλίψη 19, 31,5 και 59 MPa (190, 315 και 590 kg/cm²). Προκειμένου να εξαλειφθεί η επιρροή της τριβής χρησιμοποιήθηκαν ειδικά διαμορφωμένες πλάκες φόρτισης που είχαν την μορφή



Σχήμα 2.2.3: Πλάκες φόρτισης δοκιμίων

μεταλλικής βούρτσας (Εικ. 2.2.3). Τα «δόντια» της βούρτσας ήταν αρκετά εύκαμπτα ώστε να ακολουθούν την κίνηση του σκυροδέματος κατά την φόρτιση και να μην το περιορίζουν πλευρικά, ενώ τα μήκη τους ποίκιλαν ώστε να μην υπάρχει πρόβλημα λυγισμού για τις διάφορες τιμές φόρτισης. Η χρήση των πλακών αυτών δημιούργησε ελάχιστη απόκλιση από τα νούμερα που υπολογίστηκαν με υπόθεση μηδενικής τριβής. Ενδεικτικά, στην ζώνη θλίψης-εφελκυσμού, η απόκλιση ήταν της τάξης του 3%. Η διάταξη της φόρτισης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.4, επέτρεπε να εφαρμόζονται ελεγχόμενα διάφορες τιμές του λόγου σ₁/σ₂ στα δοκίμια.



Σχήμα 2.2.4: Διάταξη διαξονικής φόρτισης των δοκιμίων

Μετά την διεξαγωγή του πειράματος σε 96 δοκίμια για 4 διαφορετικές τιμές του λόγου σ₁/σ₂ σε κάθε πεδίο έντασης, παρατηρήθηκε ότι οι μορφές των ρωγμών που δημιουργήθηκαν κατά την αστοχία ήταν παρόμοιες με τις αναφερθείσες σε προηγούμενες μελέτες. Οι διάφοροι τύποι αστοχιών παρουσιάζονται στην **Εικ. 2.2.5**. Ιδιαίτερα για την περίπτωση συνδυασμένου εφελκυσμού-θλίψης, παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια για τιμές εφελκυστικής έντασης μικρότερης του 1/15 της αντίστοιχης θλιπτικής συμπεριφέρθηκαν παρόμοια με τα δοκίμια που υποβλήθηκαν σε θλίψηθλίψη. Παρουσίασαν, δηλαδή, μικρορωγμές παράλληλες προς τις ελεύθερες επιφάνειες του δοκιμίου, ενώ κατά την αστοχία μια μεγάλη ρωγμή αναπτύχθηκε με μια γωνία 18-28 μοιρών προς τις ελεύθερες επιφάνειες του δοκιμίου. Για μεγαλύτερες τιμές εφελκυστικής τάσης δημιουργήθηκε μια ενιαία ρωγμή κάθετη στην διεύθυνση της κύριας εφελκυστικής τάσης. Παρόμοια ήταν και η συμπεριφορά και των δοκιμίων που υποβλήθηκαν σε διαξονικό εφελκυσμό, μόνο που στην περίπτωση $\sigma_1/\sigma_2=1$ δεν παρατηρήθηκε κάποια συγκεκριμένη διεύθυνση των ρωγμών θραύσης, οι οποίες ήταν πάντα κατακόρυφες προς τις ελεύθερες επιφάνειες του δοκιμίου.



Σχήμα 2.2.5: Τύποι αστοχίας των δοκιμίων

Όλα τα αποτελέσματα των αντοχών εκφράστηκαν σε κλάσματα της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής β_p των ίδιων δοκιμίων. Για τους τρείς τύπους σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε, παρουσιάζονται οι περιβάλλουσες αστοχίας σε άξονες σ₁/ β_p και σ₂/ β_p (**Σχήμα 2.2.6**). Για την διαξονική θλίψη, οι αντοχές που προέκυψαν ήταν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μονοαξονικές ενώ οι διαφορές στους τύπους των σκυροδεμάτων δεν έδειξαν να έχουν σημαντική επιρροή. Στην περιοχή εφελκυσμού-θλίψης, η οποία παρουσιάζεται και σε μεγαλύτερη κλίμακα στο **Σχήμα 2.2.7**, παρατηρήθηκε ότι η σχετική αντοχή μειώνεται όσο αυξάνει η β_p ενώ η διαξονική εφελκυστική αντοχή φαίνεται σχεδόν ανεξάρτητη από την τιμή του σ₁/σ₂.



Σχήμα 2.2.6: Περιβάλλουσες αστοχίας για τις τρείς συνθέσεις σκυροδέματος



Σχήμα 2.2.7: Περιβάλλουσες αστοχίας στο πεδίο εφελκυσμού-θλίψη

Στην συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων που προέκυψαν από τα πειράματα (Σχήματα 2.2.8, 2.2.9, 2.2.10) για την δεύτερη σύνθεση σκυροδέματος (β_p =315 kg/cm²).



Σχήμα 2.2.8: καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό διαξονική θλίψη



Σχήμα 2.2.9: καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό εφελκυσμό-θλίψη



Σχήμα 2.2.10: καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων υπό διαξονικό εφελκυσμό

Επίσης, στο Σχήμα 2.2.11 παρουσιάζονται οι κύριες ανηγμένες παραμορφώσεις για διάφορους συνδυασμούς τάσεων. Από τα διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι οι ανηγμένες παραμορφώσεις αστοχίας στη διεύθυνση της θλιπτικής τάσης μειώνονται όσο αυξάνει η εφελκυστική τάση, όπως αναμενόταν. Οι τρείς κύριες παραμορφώσεις δίνονται σε συνάρτηση της αναλογίας τάσεων σ_1/σ_2 που εκφράζεται σαν έκφραση μιας γωνίας α, όπου α = tan⁻¹(σ_1/σ_2). Για λόγους σύγκρισης στο Σχήμα 2.2.12 δίνονται και οι κύριες τάσεις σαν συνάρτηση του λόγου σ_1/σ_2 .



Σχήμα 2.2.11: Παραμορφώσεις αστοχίας υπό διαξονικές εντάσεις $\varepsilon = f(\sigma_1/\sigma_2) = f(\alpha)$



Σχήμα 2.2.12: Αντοχή του σκυροδέματος υπό διαξονικές εντάσεις $\varepsilon = f(\sigma_1/\sigma_2) = f(\alpha)$



Σχήμα 2.2.13: Ογκομετρική παραμόρφωση του σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη

Παρατίθεται επίσης, στο Σχήμα 2.2.13 και η καμπύλη που εκφράζει τη μονοαξονική θλιπτική παραμόρφωση σε σχέση με την ογκομετρική παραμόρφωση ΔV/V₀. Από το διάγραμμα αυτό γίνεται φανερό ότι το σκυρόδεμα ξεκινάει την αστοχία του με αντιστροφή του ρυθμού ογκομετρικής παραμόρφωσης από σύνθλιψη σε διόγκωση. Στο Σχήμα 2.2.14 παρουσιάζονται οι σχετικές τάσεις στο ελαστικό



Σχήμα 2.2.14: Τάσεις στο ελαστικό όριο, ελάχιστο όγκο και στην αστοχία

όριο, στο σημείο καμπής, στο σημείο ελαχίστου όγκου και στο σημείο αστοχίας (Τα σημεία αυτά προκύπτουν από την καμπύλη της ογκομετρικής παραμόρφωσης του Σχήματος 2.2.13). Τέλος, για την συγκεκριμένη σύνθεση σκυροδέματος υπολογίστηκαν το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος Poisson. Το μέτρο ελαστικότητας κάτω από το ελαστικό όριο, παίρνει τιμή E=32,5 GPa (325.000 kg/cm^2), timý που φαίνεται να είναι ανεξάρτητη από τις αναλογίες των τάσεων. Ο λόγος Poisson στην περιοχή θλίψης-

θλίψης παίρνει μια σταθερή τιμή v=0,20. Για την περιοχή διαξονικού εφελκυσμού υπολογίστηκε v=0,18, ενώ στην περιοχή εφελκυσμού-θλίψης παίρνει τιμές μεταξύ 0,18 και 0,20.

Συμπερασματικά, λόγω της χρήσης και αξιολόγησης παλαιότερων δεδομένων και της προσεκτικής διεξαγωγής των πειραμάτων που βασίστηκαν στις παρατηρήσεις που προέκυψαν, μπορούμε να πούμε ότι η μελέτη των Kupfer et al (1969) παρέχει χρήσιμες και αξιόπιστες πληροφορίες γύρω από την διαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος. i) Αποκτήθηκε σημαντική γνώση για την επιρροή της τριβής επαφής στις διεπιφάνειες φόρτισης. Έτσι, παρότι επιβεβαιώθηκε το γεγονός ότι οι αντοχές σε διαξονική θλίψη είναι αυξημένες σε σχέση με τις μονοαξονικές, οι τιμές που προέκυψαν ήταν σημαντικά μικρότερες από αυτές προηγούμενων πειραμάτων. ii) Όσον αφορά στην περιοχή διαξονικής ετερόσημης έντασης, τα αποτελέσματα γενικά επιβεβαίωσαν τα περιορισμένα δεδομένα που υπήρχαν και έδειξαν ότι η θλιπτική τάση αστοχίας μειώνεται όσο η εφελκυστική τάση, που επιβάλλεται ταυτόχρονα, αυξάνεται. Η παρούσα εργασία φιλοδοξεί να διερευνήσει ως εκ τούτου, την τασική αυτή περιοχή, και στην περίπτωση του ινοπλισμένου σκυροδέματος με διαφορετικές περιεκτικότητες ινών από χάλυβα.

<u>Μελέτη του Ε. Σ. Κατσαραγάκη (1987)</u>

Αντικείμενο της έρευνας και περιγραφή της πειραματικής διάταξης

Σκοπός της εν λόγω έρευνας ήταν η πειραματική διερεύνηση της διαξονικής συμπεριφοράς του άοπλου σκυροδέματος, εστιάζοντας όμως αυτή τη φορά, στις συνθήκες διαξονικής ετερόσημης έντασης (εφελκυσμός-θλίψη). Στην συγκεκριμένη μελέτη ο Ε. Κατσαραγάκης (1987) προτείνει τη χρήση μιας πειραματικής διάταξης που παρακάμπτει τις συνήθεις πρακτικές πειραμάτων διαξονικής ετερόσημης έντασης, οι οποίες απαιτούν την ύπαρξη δυο μηχανών φόρτισης για την εφαρμογή εφελκυστικής και θλιπτικής έντασης, αντίστοιχα. Όπως προέκυψε από την έρευνα, η πειραματική αυτή διάταξη αποτελεί ένα εργαλείο που διευκολύνει σημαντικά την διεξαγωγή πειραμάτων εφελκυσμού-θλίψης.

Η πειραματική διάταξη που προτείνεται, βασίζεται σε μια ιδέα σύμφωνα με την οποία, αρκεί μόνο η ύπαρξη μιας μηχανής που να εξασκεί θλιπτικό φορτίο για να επιτευχθεί διαξονική φόρτιση εφελκυσμού-θλίψης. Αυτό επιτυγγάνεται χρησιμοποιώντας δύο ζεύγη από τριγωνικά αρθρωτά (βραχίονες), όπου κάθε ζεύγος τοποθετείται στο λαιμό ενός πρισματικού δοκιμίου (Σχήμα 2.2.14). Η μηχανή φόρτισης εξασκεί μια ενιαία θλιπτική δύναμη F, ισομερώς κατανεμημένη σε κάθε πλαίσιο της συμμετρικής διάταξης. Οι οριζόντιες αντιδράσεις F_h των πλαισίων (Σχήμα 2.2.15), οι οποίες εξισορροπούνται στο κέντρο του δοκιμίου, εισάγουν μια εφελκυστική δύναμη στις άκρες του λαιμού του δοκιμίου, ενώ οι κατακόρυφες αντιδράσεις F_v δημιουργούν την θλιπτική ένταση. Οι δυνάμεις F_h, F_v είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των δύο πλαισίων και δημιουργούν ένα πεδίο συνδυασμένης διαξονικής φόρτισης εφελκυσμού-θλίψης, στο κέντρο του δοκιμίου. Σημειώνεται ότι η αναλογία F_h/F_v δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες στήριξης των πλαισίων. Τέλος, δίνεται η δυνατότητα στη διαμόρφωση της γεωμετρίας του σχηματισμού, επιτυγχάνοντας διάφορες τιμές αναλογικής αύξησης στην αναλογία θλίψης-εφελκυσμού (σ_1/σ_2).

Ένα σημαντικό ζήτημα κατά τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης για την εφαρμογή διαξονικών εντάσεων ήταν η εξάλειψη των δυνάμεων τριβής μεταξύ των επιφανειών φόρτισης και του δοκιμίου. Οι δυνάμεις αυτές, όπως αναδείχθηκε και από την έρευνα των Kupfer et al. (1969) που αναλύθηκε προηγουμένως, δημιουργούν σημαντικές αποκλίσεις στην συμπεριφορά του δοκιμίου



Σχήμα 2.2.14: Πειραματική διάταξη



Σχήμα 2.2.15: Κατανομή των δυνάμεων στο δοκίμιο

Στην προτεινόμενη πειραματική διάταξη χρησιμοποιήθηκαν επίπεδα από μικρές χαλύβδινες σφαίρες, διαμέτρου 5mm, οι οποίες τοποθετήθηκαν σε επαφή μεταξύ τους, διαμορφώνοντας μια πυκνή στρώση κάτω από το έλασμα που ασκεί την θλιπτική δύναμη στο δοκίμιο. Το στρώμα των σφαιριδίων ελαχιστοποιεί την τριβή

επαφής, ενώ παράλληλα, η θλιπτική δύναμη που μεταφέρεται διαμέσου της κάθε σφαίρας παραμένει κάθετη στο δοκίμιο καθ' όλη τη διαδικασία της φόρτισης. Έπειτα από μια σειρά αναλύσεων με πεπερασμένα στοιχεία [Κατσαραγάκης (1987)], προκειμένου να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της διάταξης, επιβεβαιώθηκε η ανάπτυξη ενός πεδίου διαξονικής έντασής στο κέντρο του δοκιμίου. Επιπλέον, έγινε φανερή η ευνοϊκή συμπεριφορά της στρώσης των σφαιριδίων στην εξάλειψη της τριβής. Η κατανομή των κύριων τάσεων στον κορμό του δοκιμίου φαίνεται στο **Σχήμα 2.2.16** (μέγεθος και διεύθυνση).



Σχήμα 2.2.16: Κατανομή των τάσεων στον κορμό του δοκιμίου

Περιγραφή των πειραμάτων και αποτελέσματα

Για τις ανάγκες των πειραμάτων, κατασκευάστηκαν 39 πρισματικά δοκίμια, κατάλληλου σχήματος, και 45 ακόμη συνοδευτικά κυλινδρικά δοκίμια για την μέτρηση της μονοαξονικής αντοχής και της δυσκαμψίας των συνθέσεων σκυροδέματος που ελέγχθηκαν. Οι συνθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν περιελάμβαναν τσιμέντο τύπου Portland και πέντε διαφορετικές μίξεις θραυστών αδρανών. Τα δοκίμια κατασκευάστηκαν σε πρισματικά χαλύβδινα καλούπια με κατάλληλη τοποθέτηση ελασμάτων στα πλαϊνά τοιχώματα. Μετά την σκυροδέτηση η συντήρηση όλων των δοκιμίων έγινε κάτω από τις ίδιες συνθήκες: κρατήθηκαν καλυμμένα με λινάτσα για 20 μέρες και έμειναν αποθηκευμένα μέχρι την παρέλευση 28 ημερών.

Η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος της κάθε παρτίδας μετρήθηκε μέσω πρότυπων δοκιμών στα κυλινδρικά δοκίμια. Το μίγμα της κάθε παρτίδας χαρακτηρίζεται από την μέση αντοχή f_c που παρουσιάζεται μαζί με τον συνολικό αριθμό των δοκιμίων κάθε

παρτίδας, στον Πίνακα 2.2.17. Στο συγκεκριμένο πείραμα μελετήθηκαν πέντε διαφορετικές αναλογίες εφελκυσμού/θλίψης που είναι οι εξής: 1/1.5, 1/1.9, 1/2.3, 1/3.6, 1/4.4. Οι θλιπτικές και οι εφελκυστικές παραμορφώσεις μετρήθηκαν από επαγωγικά βελόμετρα, τοποθετημένα στις δύο ελεύθερες επιφάνειες των δοκιμίων.

Mix, f _c (MPa)	f _c 20	f _c 25	f _c 29	f _c 33	f _c 38
ft (MPa)	1.9	2.0	2.0	2.2	2.2
Number of specimens	6	9	9	9	6

Πίνακας 2.2.17: Παρτίδες δοκιμίων

Από την διεξαγωγή των πειραμάτων της συγκεκριμένης ερευνητικής εργασίας, προέκυψαν οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων, για τις διάφορες αναλογίες θλίψης-εφελκυσμού, που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.18. Από τις καμπύλες αυτές, επισημάνθηκε ότι η οριακή θλιπτική παραμόρφωση ε_{cu} μειώνεται ελαφρώς με την αύξηση της αναλογίας εφελκυσμού-θλίψης σ_t/σ_c, παρατήρηση που επιβεβαιώνεται και από τις καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων που προέκυψαν από τα πειράματα των Kupfer et al. (1969) Επίσης, παρατηρήθηκε ότι η οριακή εφελκυστική παραμόρφωση ε_{tu} αυξάνεται, γενικά, με την αύξηση της αναλογίας εφελκυσμού-θλίψης σ_t/σ_c.



Εικ. 2.2.18: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων υπό εφελκυσμό-θλίψη

Οι μέσες διαξονικές αντοχές των παρτίδων σκυροδέματος για τις διάφορες αναλογίες σ_t/σ_c φαίνονται στο **Σχήμα 2.2.19**. Τα μίγματα μικρότερης αντοχής παρατηρήθηκε ότι ήταν πιο ευαίσθητα στην παρουσία πλευρικής ετερόσημης έντασης. Για παράδειγμα, μια μικρή πλευρική θλιπτική ένταση της τάξης του 10% του f_c κυλίνδρου προκάλεσε μείωση της εφελκυστικής αντοχής της τάξης του 50% στα χαμηλής αντοχής μίγματα, ενώ ενδεικτικά, στο μίγμα f_c 38 η αντίστοιχη πτώση ήταν της τάξης του 20%. Για τα σκυροδέματα χαμηλής αντοχής, αύξηση του λόγου σ_t/σ_c από 1/4.4 σε 1/1.9 (2.3 φορές) οδήγησε σε μείωση της θλιπτικής αντοχής κατά 2.7 φορές. Για υψηλότερης αντοχής σκυροδέματα, η αύξηση του λόγου από 1/3.6 σε 1/1.5 (2.4 φορές) είχε σαν αποτέλεσμα αντίστοιχη μείωση της θλιπτικής αντοχής κατά 2.6 φορές. Η διαφοροποίηση αυτή, στην συμπεριφορά των δύο μιγμάτων, αποδόθηκε στο ότι ήταν πιο εύκολη η δημιουργία και διάδοση εφελκυστικών ρωγμών στη μάζα των, χαμηλότερης κατηγορίας (άρα χαμηλότερης αντοχής και ποιότητας), σκυροδεμάτων.



Σχήμα 2.2.19: Διαξονικές αντοχές παρτίδων σκυροδέματος

Περεταίρω παρατηρήσεις έγιναν όσον αφορά και το μέτρο ελαστικότητας. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, $E_c = d\sigma_c/d\epsilon_c$, μειώθηκε από την αρχική του τιμή $E_{c,in}$ σε μια τελική τιμή $E_{c,u}$, υπό την επίδραση των οριακών εντάσεων. Οι λόγοι $E_{c,u}$

/E_{c,in} για τις διάφορες μίξεις σκυροδέματος και συνδυασμούς εντάσεων φαίνονται στον Πίνακα 2.2.20 και στο Σχήμα 2.2.21. Συμπερασματικά, προκύπτει ότι η τελική μείωση του θλιπτικού μέτρου ελαστικότητας επηρεάζεται κυρίως από το δρώντα συνδυασμό των εντάσεων και όχι τόσο από την αντοχή των σκυροδεμάτων. Συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η δρώσα θλιπτική τάση (επομένως η εφελκυστική μειώνεται), τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του θλιπτικού μέτρου ελαστικότητας κατά την οριακή φόρτιση. Τα αποτελέσματα των δοκιμών για την τελική μείωση του εφελκυστικού μέτρου ελαστικότητας, παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2.22 και στο Σχήμα 2.2.23. Η μείωση αυτή, που είναι της τάξης του 50%, φαίνεται να είναι ανεξάρτητη τόσο από την αντοχή των σκυροδεμάτων.

σι /σ _c	f _c 20	f _c 25	f _c 29	f _c 33	f _c 38
1/1.5		0.48		0.52	0.49
1/1.9	0.49				
1/2.3		0.71			
1/3.6		0.71	0.71		
1/4,4	0.63				



σ_t/σ_c					
σt/σc	f _c 20	f _c 25	f _e 29	f _c 33	f _c 38
1/1.5		0.60		0.52	0.54
1/1.9	0.46				
1/2.3		0.60			
1/3.6		0.60	0.53		
1/4.4	0.46	······································			

Σχήμα 2.2.21: Μείωση του θλιπτικού μέτρου ελαστικότητας στην οριακή φόρτιση για διάφορα

Πίνακας 2.2.22: Αναλογίες Ε_{t,u} /Ε_{t,in}



Σχήμα 2.2.23: Μείωση του εφελκυστικού μέτρου ελαστικότητας στην μέγιστη φόρτιση για διάφορα σ_t/σ_c

Συμπερασματικά, για την συμπεριφορά του άοπλου σκυροδέματος, όπως αναλύθηκε παραπάνω, μπορούν να ειπωθούν τα εξής: Τα χαμηλής αντοχής σκυροδέματα φάνηκε να είναι πιο ευαίσθητα στην αναμενόμενη μείωση της αντοχής τους υπό διαξονική ετερόσημη ένταση. Η μείωση του θλιπτικού μέτρου ελαστικότητας κατά την οριακή φόρτιση εξαρτάται κυρίως από το συνδυασμό των φορτίων που εξασκούνται. Η μείωση του εφελκυστικού μέτρου ελαστικότητας κατά την οριακή φόρτιση είναι της τάξης του 50%-60% της αρχικής του τιμής.

Διαπιστώθηκε, εν τέλει, η χρησιμότητα της πειραματικής διάταξης που προτάθηκε η οποία αποδεικνύεται χρήσιμο εργαλείο για την εκτέλεση δοκιμών εφελκυσμού-θλίψης. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία κρίθηκε σκόπιμη η χρήση της διάταξης αυτής για την διεξαγωγή των πειραμάτων ετερόσημης έντασης σε δοκίμια ινοπλισμένου σκυροδέματος.

2.2.2 Πειραματικές μελέτες ινοπλισμένου σκυροδέματος

<u>Μελέτη των Yin et al. (1989)</u>

Σκοπός και περιγραφή πειράματος

Στην μελέτη αυτή, που δημοσιεύτηκε το 1989, γίνεται περιγραφή μιας σειράς πειραμάτων που αφορούν τη διερεύνηση της διαξονικής συμπεριφοράς του άοπλου και του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Τα εν λόγω πειράματα αφορούν δοκιμές υπό καταστάσεις διαξονικής θλίψης. Συνεπώς, δεν αποκτήθηκαν δεδομένα για την συμπεριφορά του υλικού υπό την επίδραση εφελκυσμού-θλίψης ή διαξονικού εφελκυσμού.

Οι πληροφορίες που υπήρχαν σχετικά με την συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε καταστάσεις διαξονικής έντασης, ήταν ιδιαίτερα περιορισμένες. Οι Yin et al. (1989) στην συγκεκριμένη έρευνα παρατήρησαν ότι ενώ η προσθήκη χαλύβδινων ινών επηρέασαν σημαντικά την διαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος, αυτό δεν φάνηκε να ισχύει για την συμπεριφορά υπό μονοαξονική θλίψη.

Για την εκτέλεση των διαξονικών δοκιμών, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια μορφής τετραγωνικών πλακιδίων (15,2 × 15,2 × 3,8 cm) που χωρίστηκαν σε παρτίδες άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι αντοχές των δοκιμίων μετρήθηκαν για τέσσερις τιμές του λόγου σ_2/σ_3 (0, 0,2, 0,5, 1). Για τις τρείς κύριες τάσεις ισχύει $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$, αλγεβρικά (η εφελκυστική τάση παίρνει θετική τιμή, ενώ η θλιπτική αρνητική). Χρησιμοποιήθηκαν δύο είδη χαλύβδινων ινών με μήκη 25 mm και 19 mm και με παραλληλόγραμμη διατομή 0,25 × 0,56 mm, μέσης εφελκυστικής αντοχής 414 MPa. Η σύνθεση του σκυροδέματος ήταν ίδια σε όλα τα δοκίμια. Για τα ινοπλισμένα δοκίμια, ελήφθη υπόψη ως μια ακόμη παράμετρος και η περιεκτικότητα σε ίνες: τα δοκίμια με ίνες 25 mm είχαν περιεκτικότητες 1% και 2% κατ' όγκο, ενώ τα δοκίμια με ίνες 19 mm δοκιμάστηκαν μόνο με περιεκτικότητα 1%.



Σχήμα 2.2.24: Πειραματική διάταξη



Σχήμα 2.2.25: Πλάκες φόρτισης δοκιμίων

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.2.24, ήταν ειδικά σχεδιασμένη για εκτέλεση διαξονικών δοκιμών, ώστε να παρέχει την δυνατότητα για ελεγχόμενη εφαρμογή των επιθυμητών αναλογιών σ₂/σ₃.Για την εξάλειψη της επιρροής της τριβής επαφής ανάμεσα στο δοκίμιο και στην επιφάνεια

φόρτισης χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες πλάκες φόρτισης με μορφή μεταλλικής βούρτσας. Οι πλάκες αυτές, των οποίων η αποτελεσματικότητα είχε διαπιστωθεί και παλαιότερα (Kupfer et al., 1969), παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.25.

Περιγραφή αποτελεσμάτων

Οι περιβάλλουσες αστοχίας που προέκυψαν, για τα άοπλα και ινοπλισμένα δοκίμια, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.2.26**. Ο αριθμός των ημερών, που συντηρήθηκαν τα δοκίμια πριν διεξαχθούν τα πειράματα, δεν ήταν ίδιος για όλα τα

δοκίμια (από 44 έως 168 ημέρες). Έτσι, για λόγους σύγκρισης, όλες οι τάσεις μετατράπηκαν σε αντοχές 90 ημερών. Αυτό έγινε μέσω πολλαπλασιασμού της αντοχής που παρουσίασε το δοκίμιο κατά την x ημέρα με τον λόγο της αντοχής αναφοράς την 90^η ημέρα προς την αντοχή αναφοράς την x ημέρα, η οποία αποκτήθηκε από καμπύλες αντοχής-ηλικίας για άοπλο σκυρόδεμα. Στην συνέχεια διαιρέθηκαν με την μέση θλιπτική αντοχή 90 ημερών του άοπλου δοκιμίου f_{cp} (-37,6 MPa).



Σχήμα 2.2.26: Περιβάλλουσες αστοχίας άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος

Η επιρροή του λόγου σ_2/σ_3 στις αντοχές που υπολογίστηκαν ήταν πολύ φανερή και στα άσπλα και στα σπλισμένα δοκίμια. Οι διαξονικές αντοχές προέκυψαν μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες μονοαξονικές και το ποσό της αύξησης είχε άμεση σχέση με την αναλογία των κύριων τάσεων. Ενδεικτικά, στα δοκίμια ενισχυμένα με ίνες 25 mm και περιεκτικότητας 1%, παρατηρήθηκε μια αύξηση της τάξης του 70% για αναλογία τάσεων $\sigma_2/\sigma_3 = 1$. Οι Yin et al. παρατήρησαν ότι η προσθήκη ινών δεν επηρεάζει σημαντικά την μονοαξονική αντοχή των δοκιμίων ($\sigma_2/\sigma_3 = 0$), φάνηκε να έχει όμως ιδιαίτερα ευνοϊκή συμπεριφορά στις διαξονικές αντοχές, οπού παρατηρήθηκε αύξηση έως και 35% από την αντίστοιχή αντοχή του άσπλου σκυροδέματος, για μήκος ινών 25 mm, με περιεκτικότητα 2% και λόγο $\sigma_2/\sigma_3 = 0,2$. Επίσης φανερή, ήταν και η επιρροή του μήκους των ινών στην αύξηση της διαξονικής αντοχής, καθώς οι ίνες 25 mm παρουσίασαν πιο ευνοϊκή συμπεριφορά από τις ίνες 19 mm. Η περιεκτικότητα, αντιθέτως, δεν επηρέασε ιδιαιτέρως την



Εικ. 2.2.27: Μορφές αστοχίας ινοπλισμένου σκυροδέματος

συμπεριφορά των δοκιμίων.

Όσον αφορά τους τύπους αστογίας που παρατηρήθηκαν, τα αποτελέσματα στα άοπλα δοκίμια επιβεβαιώνουν, γενικά, τις παρατηρήσεις παλαιότερων πειραμάτων. Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, οι τύποι αστοχίας παρουσιάζονται στις Εικ. 2.2.27(a), (b) και (c). Σε αντίθεση με το άοπλο σκυρόδεμα, ο τύπος αστοχίας που παρατηρήθηκε ήταν διατμητικός. κυρίως Στις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης η θραύση επήλθε με τον σγηματισμό πολλαπλών επιπέδων αστογίας με γωνίες 20-40 μοίρες ως προς το επίπεδο των σ_2 - σ_3 [**Εικ. 2.2.27**(*a*)]. Υπό διαξονική θλίψη, η αστοχία περιελάμβανε τον σχηματισμό ενός επιπέδου αστοχίας κάθετου στο σ_2 - σ_3 και κεκλιμένου κατά περίπου 18 μοίρες σε σχέση με το επίπεδο φόρτισης, σ_2 - σ_3 [Εικ. 2.2.27(b), (c)]. Η προσθήκη των ινών, τελικά, απέτρεψε την δημιουργία του εφελκυστικού μηχανισμού αστοχίας που παρατηρείται στο άοπλο σκυρόδεμα.

Στη συνέχεια, στα Σχήματα 2.2.28, 2.2.29, 2.2.30, 2.2.31, παρατίθενται οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων που προέκυψαν, για το άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα υπό μονοαξονική και διαξονική θλίψη. Σημειώνεται ότι οι αντίστοιχες τάσεις έχουν διαιρεθεί με την μονοαξονική θλιπτική αντοχή f_{cp} του αντίστοιχου δοκιμίου άοπλου σκυροδέματος, την ημέρα του πειράματος.



Σχήμα 2.2.28: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων άοπλου σκυροδέματος για διάφορους λόγους



Strain in Microstrain

Σχήμα 2.2.29: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων ινοπλισμένου σκυροδέματος για διάφορους λόγους σ_2/σ_3 (l = 25 mm, V = 1%)


Σχήμα 2.2.30: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για τους διάφορους τύπους ινοπλισμένου



Σχήμα 2.2.31: Καμπύλες τάσεων παραμορφώσεων για τους διάφορους τύπους ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη ($\sigma_2/\sigma_3 = 1$)

Από τα Σχήματα 2.2.28, 2.2.29 παρατηρείται ότι η εισαγωγή μιας μικρής τάσης σ_2 δημιουργεί μια περίσφιγξη που παρατείνει την παραμονή του υλικού στη ελαστική περιοχή, ενώ αυξάνει και την δυσκαμψία του στην διεύθυνση της σ_3 . Οι παρατηρήσεις αυτές ισχύουν τόσο για το άοπλο όσο και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Όσον αφορά την επιρροή των ινών στον τρόπο παραμόρφωσης του δοκιμίου, δεν παρατηρήθηκε αξιοσημείωτη μεταβολή στη συμπεριφορά των δοκιμίων στις μονοαξονικές δοκιμές, ενώ, αντίθετα, η παρουσία τους στο μείγμα φάνηκε να επηρεάζει ιδιαίτερα στις καταστάσεις διαξονικής θλίψης (Σχήμα 2.2.31). Η προσθήκη των χαλύβδινων ινών, στην ελαστική περιοχή, αύξησε την δυσκαμψία των δοκιμίων και στις τρείς κύριες διευθύνσεις $ε_1$, $ε_2$, $ε_3$, ενώ η ανεμπόδιστη παραμόρφωση της αφόρτιστης παρειάς του δοκιμίου μειώθηκε, γεγονός που αιτιολογεί και την αύξηση της αντοχής σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Γενικά, οι παραμορφώσεις αστοχίας $ε_1$, $ε_2$, $ε_3$, των ινοπλισμένων δοκιμίων αυξήθηκαν, δείχνοντας μια πλάστιμη συμπεριφορά. Το φαινόμενο αυτό, ενισχυόταν με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες.

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι από την πειραματική έρευνα των Yin et al. (1989) προέκυψαν ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις όσον αφορά τις ιδιότητες που προσδίδει η προσθήκη ινών στην συμπεριφορά του σκυροδέματος σε καταστάσεις διαξονικής θλίψης. Ο τρόπος αστοχίας των δοκιμίων έγινε λιγότερο ψαθυρός, με μεγαλύτερες παραμορφώσεις κατά την αστοχία. Επίσης, όπως έγινε φανερό, η ύπαρξη ινών ισοδυναμεί με την εφαρμογή μιας μικρής πλευρικής τάσης σ₂ σε δοκίμιο άοπλου σκυροδέματος που δημιουργεί περίσφιγξη στο δοκίμιο, αυξάνοντας την αντοχή του. Η προσομοίωση της περίσφιγξης που προκαλούν οι, τυχαία προσανατολισμένες, ίνες με μια ισοδύναμη πλευρική τάση αποτελεί και έναν τρόπο προσέγγισης σε διάφορα μαθηματικά κριτήρια αστοχίας που αναπτύχθηκαν εκ των υστέρων [Murugappan et al. (1993)].

<u>Μελέτη των Traina και Mansour (1990,1991)</u>

Αντικείμενο και περιγραφή πειράματος

Η μελέτη αυτή, που διεξήχθη το 1991, έχει, και πάλι, ως στόχο την πειραματική διερεύνηση της διαξονικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος, πάλι υπό συνθήκες διαξονικής θλίψης. Οι περιβάλλουσες αστοχίας που προέκυψαν από την έρευνα αυτή, όπως και αυτές των Yin et al. (1989), χρησιμοποιήθηκαν και εκ των υστέρων ως υπόβαθρο για σύγκριση με αναλυτικά προσομοιώματα που αναπτύχθηκαν. Μέχρι την εποχή εκείνη, ο σχεδιασμός φορέων από ινοπλισμένο σκυρόδεμα γινόταν με χρήση δεδομένων που βασίζονταν μόνο στην μονοαξονική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι Traina και Mansour (1991) επισήμαναν την αναγκαιότητα μελέτης της διαξονικής συμπεριφοράς του υλικού, καθώς η μονοαξονική κατάσταση συναντάται πολύ σπάνια στις εφαρμογές του μηχανικού.

Για την εκτέλεση των πειραμάτων κατασκευάστηκαν κυβικά δοκίμια (76 × 76 × 76 mm) από άσπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Στα οπλισμένα δοκίμια έγινε χρήση δύο κατηγοριών ίνας, σε διάφορες περιεκτικότητες. Οι ίνες της πρώτης κατηγορίας (τύπος Ι) είχαν λόγο μήκους προς διάμετρο l/d = 60 με μήκος 30 mm και κυκλική διατομή διαμέτρου 0,5 mm. Μέσω του σχήματος τους, εξασφαλίζονταν αγκύρωση στα άκρα και η εφελκυστική τους αντοχή ήταν 1.172 MPa. Η δεύτερη κατηγορία (τύπος ΙΙ) περιελάμβανε ίνες με λόγο l/d = 33. Οι ίνες, αυτές, ήταν μήκους 25,4 mm, ημικυκλικής διατομής, με ισοδύναμη διάμετρο $d_e = 0,77$ mm και είχαν πυχώσεις καθ' όλο το μήκος τους. Η εφελκυστική τους αντοχή ήταν 966 MPa. Οι περιεκτικότητες και των δύο τύπων ινών στα δοκίμια που δοκιμάστηκαν ήταν 0,5, 1 και 1,5% κατ' όγκο. Σε όλα τα δοκίμια εφαρμόστηκαν τρείς συνδυασμοί τάσεων, των οποίων οι λόγοι σ_1/σ_2 ήταν 0, 0,5 και 1.

Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε περιελάμβανε μια διάταξη φόρτισης, ειδικά σχεδιασμένη για τριαξονικές δοκιμές. Για την εξάλειψη της τριβής επαφής δοκιμιού-πλάκας φόρτισης, χρησιμοποιήθηκαν δύο στρώματα από φύλλα πολυαιθυλενίου ανάμεσα στα οποία παρεμβαλλόταν μια λεπτή στρώση λιπαντικής ουσίας πάχους 0,1 mm. Αντίστοιχες στρώσεις είχαν χρησιμοποιηθεί και σε παλαιότερες δοκιμές άοπλου σκυροδέματος (Mills, 1967, Mills et al., 1970).

Περιγραφή των αποτελεσμάτων

Μετά την εκτέλεση των πειραμάτων, όσον αφορά στην μονοαξονική θλίψη, παρατηρήθηκε ότι οι ρωγμές που διαμορφώθηκαν για τα δοκίμια άοπλου σκυροδέματος ήταν παράλληλες στο εξασκούμενο φορτίο. Τα ινοπλισμένα δοκίμια παρουσίασαν παρόμοια συμπεριφορά. Τα δοκίμια με ίνες τύπου Ι απέδωσαν



Σχήμα 2.2.32: Μορφές αστοχίας υπό μονοαζονική θλίψη:*a*) άοπλο σκυρόδεμα, *b*) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (V_f = 1%)

καλύτερη συμπεριφορά απ' ότι αυτά με ίνες τύπου ΙΙ, αφού παρατηρήθηκε μια αύξηση της θλιπτικής αντοχής και της δυσκαμψίας τους. Αυτό αποδόθηκε στα καλύτερα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινών τύπου I. που οδήγησαν σε ενεργή μεγαλύτερη περίσφιγξη του σκυροδέματος. Οι μορφές αστοχίας των ινοπλισμένων και άοπλων δοκιμίων υπό μονοαξονική θλίψη παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.32. Παρατίθενται, επίσης, οι καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων των δοκιμίων υπό μονοαξονική θλίψη 2.2.34). (Σχήματα 2.2.33, Από τις καμπύλες, προκύπτει ότι υπήρξε μια αύξηση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας για τα δοκίμια που

περιείχαν ίνες τύπου Ι, κάτι που δεν φαίνεται να συμβαίνει και στα δοκίμια με ίνες τύπου ΙΙ. Η διαφορά στην συμπεριφορά αποδίδεται και πάλι, στα καλύτερα χαρακτηριστικά των ινών τύπου Ι (μέγεθος, σχήμα, λόγος *l/d*). Η ευνοϊκή συμπεριφορά των ινών τύπου Ι γίνεται φανερή και από τις καμπύλες ογκομετρικής παραμόρφωσης (Σχήματα 2.2.35, 2.2.36). Τα αντίστοιχα δοκίμια με 1,5% περιεκτικότητα παρουσίασαν μικρότερη τιμή του ελαχίστου όγκου και σε μεγαλύτερο επίπεδο έντασης σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, γεγονός που εξηγεί και την αύξηση της αντοχής. Οι ίνες τύπου ΙΙ δεν έδειξαν παρόμοια συμπεριφορά και οι αντίστοιχες καμπύλες της ογκομετρικής παραμόρφωσης παρέμεναν πιο χαμηλά από αυτές του άοπλου σκυροδέματος (Σχήμα 2.2.36).



Σχήμα 2.2.33: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου Ι) υπό μονοαζονική θλίψη



Σχήμα 2.2.34: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ) υπό μονοαξονική θλίψη

Κάνοντας σύγκριση με την καμπύλη ογκομετρικής παραμόρφωσης του άοπλου σκυροδέματος σε διαξονική δοκιμή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.37, προκύπτει ότι η μεγαλύτερη αύξηση της διαξονικής αντοχής (15%) προέκυψε σε αναλογία τάσεων 0,5, την στιγμή που ο όγκος έπαιρνε την ελάχιστη τιμή του. Στην συγκεκριμένη αναλογία τάσεων ο όγκος ελαχιστοποιήθηκε σε μεγαλύτερο επίπεδο έντασης, σε σύγκριση με τις άλλες δύο αναλογίες. Αυτή η παρατήρηση μπορεί να εξηγήσει την υψηλότερη μονοαξονική αντοχή και δυσκαμψία που προσέδωσαν οι ίνες τύπου Ι στο σκυρόδεμα.



Σχήμα 2.2.35: Καμπύλη ογκομετρικής παραμόρφωσης-κύριας θλιπτικής τάσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου Ι) υπό μονοαξονική θλίψη



Volume Change in Microstrain

Σχήμα 2.2.36: Καμπύλη ογκομετρικής παραμόρφωσης-κύριας θλιπτικής τάσης για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ) υπό μονοαξονική θλίψη



Σχήμα 2.2.37: Καμπύλη ογκομετρικής παραμόρφωσης-μέγιστης θλιπτικής τάσης για άοπλο σκυρόδεμα υπό διαζονική θλίψη

Οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων που δοκιμάστηκαν υπό διαξονική ένταση, προέκυψαν αρκετά διαφορετικές από τις αντίστοιχες των μονοαξονικών που αποτελούνταν από ρωγμές με αντίστοιχη μορφή με αυτές που συναντώνται στα υποστυλώματα. Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2.38**, οι ρωγμές που αναπτύχθηκαν διαμορφώθηκαν σε κεκλιμένα διατμητικά επίπεδα. Οι γωνίες των επιπέδων αυτών ποικίλουν από 15-40 μοίρες σε σχέση με το επίπεδο σ₁-σ₃, ανάλογα με το είδος και την περιεκτικότητα του δοκιμίου σε ίνες. Είναι φανερό, όπως και στην έρευνα των Yin et al. (1989), ότι η περίσφιγξη που δημιουργούν οι ίνες, άλλαξε τον τρόπο αστοχίας του δοκιμίου και απέτρεψε την εφελκυστική αστοχία.



Σχήμα 2.2.38: Μορφές αστοχίας υπό διαξονική θλίψη ($\sigma_2/\sigma_1 = 1$): a)άοπλο σκυρόδεμα, b) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου Ι, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$), c) ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ, $V_f = 1\%$).

Στα Σχήματα 2.2.39, 2.2.40, 2.2.41 παρουσιάζονται οι καμπύλες τάσεωνπαραμορφώσεων που προέκυψαν από τις διαξονικές δοκιμές. Τόσο στο άοπλο, όσο και στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα, είναι φανερό ότι η εφαρμογή μιας πλευρικής τάσης σ_2 προκαλεί αύξηση της αντοχής και της δυσκαμψίας. Για αναλογία τάσεων 0,5 και περιεκτικότητα ινών 1,5%, τα δοκίμια με ίνες τύπου Ι παρουσίασαν αύξηση αντοχής της τάξης του 85% της μονοαξονικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος. Η αντίστοιχη αύξηση των δοκιμίων με ίνες τύπου ΙΙ ήταν περίπου 45% (Σχήματα 2.2.40, 2.2.41).



Σχήμα 2.2.39: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για άοπλο σκυρόδεμα υπό διαξονική θλίψη



Σχήμα 2.2.40: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου Ι) υπό διαξονική θλίψη



Σχήμα 2.2.41: Καμπύλες τάσεων-παραμορφώσεων για άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ) υπό διαξονική θλίψη



Σχήμα 2.2.42: Περιβάλλουσες αστοχίας γι άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου Ι)



Σχήμα 2.2.43: Περιβάλλουσες αστοχίας γι άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα (ίνες τύπου ΙΙ)

Παρατίθενται, στην συνέχεια, οι περιβάλλουσες αστοχίας για τους δύο τύπους ινών στα Σχήματα 2.2.42, 2.2.43. διαξονικές Οı αντοχές προκύπτουν μεγαλύτερες από αντίστοιγες τις μονοαξονικές για όλες τις αναλογίες φόρτισης και για τους δύο τύπους ινών. Οι διαφορές μεταξύ του τύπου Ι και του τύπου ΙΙ έγιναν για ακόμα μια φορά φανερές. Οι ίνες τύπου Ι έδωσαν σημαντικά μεγαλύτερες διαξονικές Παρατίθενται, αντοχές. επίσης, oι περιβάλλουσες αστοχίας για ίνες τύπου Ι σε σύγκριση με αυτές των Yin et al. (1989). Ο τύπος Ι επιλέχτηκε λόγω του λόγου l/d, που είναι ίδιος με αυτόν των ινών που χρησιμοποίησαν και οι Yin et al. (Σχήμα 2.2.44). Παρά τις διαφορές που φαίνεται υπάρχουν δύο να στα διαγράμματα διαφορές (01 αυτές αποδόθηκαν από τους Traina και Mansour,

στην διαφορετική πειραματική διάταξη, και στον διαφορετικό τύπο ίνας και στην περιεκτικότητα), υπάρχει γενικά μια παρόμοια συμπεριφορά και στις δύο ομάδες πειραμάτων.



Σχήμα 2.2.44: Σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα αντίστοιχα της μελέτης των Yin et al. (1989)

Συμπερασματικά, φαίνεται να επιβεβαιώνεται η παρατήρηση ότι η προσθήκη ινών αυξάνει σημαντικά την διαξονική αντοχή του σκυροδέματος, η αύξηση δε αυτή, εξαρτάται από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινών και την περιεκτικότητα τους. Για χρήση ινών τύπου Ι, η αύξηση αυτή έφτασε το 88% της αντοχής του άοπλου σκυροδέματος. Σε αντίθεση με την έρευνα των Yin et al. (1989), στην παρούσα έρευνα φάνηκε ευνοϊκή επιρροή των ινών και στην μονοαξονική αντοχή, παρόλο που η επίδραση τους δεν ήταν ξεκάθαρη. Η αποτελεσματικότητα των ινών στο να παρέχουν μια πρόσθετη περίσφιγξη, οδηγεί σ' αυτή την αύξηση της μονοαξονικής αντοχής. Η αύξηση αυτή, ενδεικτικά, έφτασε και μέχρι το 22% για τύπο ίνας I (l/d =60, 30 mm × 0,5 mm) σε περιεκτικότητα 1,5%. Ο τύπος της αστοχίας των δοκιμίων μεταβλήθηκε από πλήρως εφελκυστικό σε πιο διατμητικό. Οι παρατηρήσεις αυτές, γενικά, επιβεβαιώνουν και τις παρατηρήσεις των Yin et al. (1989) που αναλύθηκαν και παραπάνω και ενισχύουν τις απόψεις για την βελτίωση που προσδίδουν οι μεταλλικές ίνες στην συμπεριφορά του σκυροδέματος.

• Μελέτη των Demeke και Tegos (1994)

Αντικείμενο και περιγραφή πειράματος

Ο στόχος της έρευνας αυτής, που δημοσιεύτηκε το 1994, είναι η πειραματική διερεύνηση της διαξονικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό καταστάσεις συνδυασμένου εφελκυσμού-θλίψης. Η έρευνα αυτή δίνει χρήσιμα αποτελέσματα για την περιοχή της διαξονικής ετερόσημης έντασης, όπου τα δεδομένα που υπάρχουν στη βιβλιογραφία εξακολουθούν να είναι ιδιαιτέρως περιορισμένα, καθώς οι πειραματικές διατάξεις που απαιτούνται για τέτοιου είδους δοκιμές είναι αρκετά πολύπλοκες. Οι Demeke και Tegos (1994) επισήμαναν την σημασία της μελέτης του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό όλους τους συνδυασμούς των διαξονικών εντάσεων, διότι η ολοκληρωμένη γνώση της συμπεριφοράς αυτής θα οδηγήσει στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου αστοχίας του υλικού.

Για τις ανάγκες των πειραμάτων, αυτών, κατασκευάστηκαν 160 δοκίμια άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος. Οι παράμετροι που εξετάστηκαν ήταν η ποσότητα, κατ' όγκο, των ινών, και ο λόγος των εφελκυστικών-θλιπτικών τάσεων. Για όλες τις παρτίδες χρησιμοποιήθηκε η ίδια σύνθεση σκυροδέματος





αντοχής 30 MPa και ο ίδιος τύπος ινών (χαλύβδινες ίνες με αγκύρωση στα άκρα, l = 30 mm d = 0.5 mm). Τα κύρια δοκίμια γρησιμοποιήθηκαν ήταν που μορφής ορθογωνίου παραλληλεπιπέδου με διατομή διαστάσεων $100 \times 100 \text{ mm}^2$ και μήκος 300mm. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2.45, τα δοκίμια συνδέθηκαν εκατέρωθεν, μέσω χαλύβδινων ράβδων οπλισμού, με δύο οπλισμένου στοιχεία πρισματικά σκυροδέματος. Τα στοιχεία αυτά λειτούργησαν μόνο ως θέσεις αντίδρασης εμβόλων ασκούσαν των που την εφελκυστική δύναμη. Οι ράβδοι οπλισμού

αγκυρώθηκαν σε διάφορα μήκη μέσα στην μάζα του δοκιμίου, αφήνοντας ελεύθερη μια περιοχή γύρω στα 60 mm, στο κέντρο του δοκιμίου. Σημειώνεται, ότι η θραύση

των δοκιμίων επήλθε μέσα στην, ανεπηρέαστη από τις χαλύβδινες ράβδους, ζώνη μόνο υπό την επίδραση των εντατικών καταστάσεων που εφαρμόστηκαν.

Για την εφαρμογή των εντάσεων, έγινε χρήση μιας απλής θλιπτικής μηχανής και ενός συστήματος εμβόλων. Η εφελκυστική ένταση, όπως ήδη αναφέρθηκε, εξασκούταν μέσω των γρύλλων στα δύο πρίσματα από σκυρόδεμα, τα οποία μέσω των ράβδων οπλισμού μετέφεραν το φορτίο στο δοκίμιο (Σχήμα 2.2.46). Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα της τριβής, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαδοχικές στρώσεις από Τεφλόν πάχους 0,26 mm, μία στρώση από ρευστό υλικό με βάση το πετρέλαιο και τρία λεπτά φύλλα από πλαστικό υλικό. Προκαταρκτικές δοκιμές επιβεβαίωσαν την αποτελεσματικότητα των στρώσεων αυτών.



Σχήμα 2.2.46: Λεπτομέρειες φόρτισης των δοκιμίων

Θεωρητική προσέγγιση

Οι Demeke και Tegos (1994), παράλληλα με την πειραματική προσέγγιση του θέματος, επιχείρησαν να μελετήσουν και θεωρητικά το ζήτημα της εφελκυστικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος με την ταυτόχρονη παρουσία θλιπτικής έντασης. Από παλαιότερες έρευνες είχε φανεί ότι η βελτίωση στην συμπεριφορά του σκυροδέματος από την προσθήκη μεταλλικών ινών, μπορεί να συσχετιστεί άμεσα με την περιεκτικότητα, κατ' όγκο, σε ίνες V_f , με τον λόγο των διαστάσεων των ινών l/dκαι με έναν αδιάστατο συντελεστή συνάφειας, που αναφέρεται στα διαφορετικά χαρακτηριστικά εξώλκευσης των διαφόρων τύπων ίνας (Tegos, 1989). Με την υπόθεση ότι οι ίνες και το σκυρόδεμα υφίστανται ίσες ελαστικές παραμορφώσεις, η εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με ίνες μικρού μήκους, τυχαία προσανατολισμένες μέσα στην μάζα του υλικού, μπορεί να εκφραστεί σύμφωνα με τον αθροιστικό νόμο ως εξής:

$$f_{tf} = (1 - V_f) f_{tp} + V_{fe} \sigma_f$$
(2.2.1)

όπου f_{tf} και f_{tp} , είναι οι εφελκυστικές αντοχές του ινοπλισμένου σκυροδέματος (αντοχή του σύμμεικτου υλικού) και του άοπλου σκυροδέματος, αντίστοιχα. σ_f, είναι η εφελκυστική τάση των ινών και V_f και V_{fe} είναι ο ολικός όγκος και ο ενεργός όγκος των ινών στην διεύθυνση της έντασης, αντίστοιχα.

Ο ενεργός όγκος V_{fe} μπορεί να εκφραστεί ως τμήμα του ολικού όγκου V_f :

$$V_{fe} = \alpha V_f \tag{2.2.2}$$

Το επόμενο βήμα, είναι να εισαχθεί μια σχέση που να συνδέει τη μέση εφελκυστική τάση στην ίνα με την μέση τάση συνάφειας τ. Σύμφωνα με τον τύπο που εισήγαγαν οι Swamy και Mangat, για ευθύγραμμες ίνες και με παραδοχή γραμμικής κατανομής τάσεων συνάφειας, η μέγιστη τιμή της τάσης συνάφειας είναι διπλάσια της μέσης τάσης συνάφειας, η δε μέση εφελκυστική τάση στην ίνα, σχετίζεται με την μέση τάση συνάφειας ως εξής:

$$\sigma_f = 2\tau \frac{l}{d} \tag{2.2.3}$$

όπου, *l/d* είναι ο λόγος διαστάσεων των ινών. Στην περίπτωση ινών με αγκύρωση στα άκρα η εξίσωση **2.2.3** μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\sigma_f = \beta \tau \frac{l}{d}, \beta > 2 \tag{2.2.4}$$

Ομοίως, η οριακή τάση συνάφειας f_b μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση της τάξης του σκυροδέματος, εκφρασμένης από την εφελκυστική αντοχή του f_{tp} , και της περίσφιγξης, η οποία εξαρτάται από την τιμή της κύριας θλιπτικής τάσης που εφαρμόζεται στο δοκίμιο. Έτσι είναι:

$$f_b = \tau_u = \gamma_o \delta \sqrt{f_c} = \gamma \delta f_{tp}$$
(2.2.5)

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω εκφράσεις των V_{fe} και σ_f στην εξίσωση 2.2.1 προκύπτει η εφελκυστική αντοχή του σύμμεικτου υλικού που περιέχει τυχαία προσανατολισμένες χαλύβδινες ίνες:

$$f_{tf} = (1 - V_f) f_{tp} + \alpha \beta \gamma \delta f_{tp} V_f \frac{l}{d}$$
(2.2.6)

όπου, α, β, γ και δ είναι σταθερές που σχετίζονται με τον ενεργό όγκο των ινών, την γεωμετρία των ινών, την κατηγορία του σκυροδέματος και την αναλογία των κυρίων τάσεων, αντίστοιχα. Κατά συνέπεια, η τελική έκφραση της οριακής εφελκυστικής αντοχής του σύμμεικτου υλικού είναι:

$$f_{tf} = (1 - V_f) f_{tp} + A f_{tp} V_f \frac{l}{d} \approx f_{tp} + A f_{tp} V_f \frac{l}{d}$$
(2.2.7)

όπου,

$$A = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \tag{2.2.8}$$

Η εγκυρότητα της εξίσωσης **2.2.6** χρειάζεται επαλήθευση και θα τεκμηριωθεί με την χρήση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Περιγραφή αποτελεσμάτων

Οι περιβάλλουσες αστοχίας για το άοπλο και το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, με τις διάφορες περιεκτικότητες ινών, που προέκυψαν, παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.2.47.



Fig. 4—Ultimate strength envelopes of f_{re} under compression-tension, where (\bullet) for plain concrete specimens results and (\Box , \bigcirc , and \blacktriangle) for f_{re} specimen results containing fiber volume fractions $V_1 = 0.5$, 1.0, and 1.5 percent by volume, respectively



Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι η οριακή αντοχή υπό συνδυασμό εφελκυσμούθλίψης είναι, γενικά, μικρότερη της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής. Το ποσοστό της μείωσης αυτής εξαρτάται από την αναλογία των τάσεων που εφαρμόζονται. Για το άοπλο σκυρόδεμα, μια σημαντική μείωση παρατηρήθηκε κοντά στην περιοχή $f_2/f_c = 0,50$, ενώ όσο η αναλογία αυτή αυξάνει στο διάγραμμα, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος κυμαίνεται γύρω στο 50% της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής. Η προσθήκη των ινών προκαλεί αύξηση τόσο της μονοαξονικής, όσο και της διαξονικής εφελκυστικής αντοχής. Η αύξηση, αυτή, εξαρτάται από την ποσότητα των ινών. Για μεγάλα ποσοστά όγκου ινών, η διαξονική αντοχή γίνεται περίπου ίση με την μονοαξονική για σχεδόν όλη την περιοχή. Ενδεικτικά, για ποσοστό ινών 1,5% και κοντά στην περιοχή όπου $f_2 = \Box$ 0,5 f_c , η αντοχή αυξήθηκε περίπου τρείς φορές. Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων της παρούσας έρευνας, επιβεβαιώνεται και πάλι η παρατήρηση της μελέτης των Yin et al. (1989), που αναλύθηκε προηγουμένως, ότι η προσθήκη μεταλλικών ινών, δεν φαίνεται να επηρεάζει σημαντικά την μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Οι μορφές των ρηγματώσεων που παρατηρήθηκαν, παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.2.48**. Για τα ινοπλισμένα δοκίμια η αστοχία επήλθε με μηχανισμό εξώλκευσης των ινών και το εύρος της περιοχής θραύσης ποίκιλε ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες. Τα άοπλα δοκίμια αστόχησαν ξαφνικά και διαχωρίστηκαν σε δύο κομμάτια με το που εμφανίστηκε μια μεγάλη εφελκυστική ρωγμή. Τα δοκίμια αστόχησαν όλα, στην επιθυμητή ζώνη, στο κέντρο του δοκιμίου, όπου το πεδίο εντάσεων που αναπτυσσόταν από την αγκύρωση των ράβδων οπλισμού ήταν ανενεργό.



Σχήμα 2.2.48: a) Τυπικές μορφές ρωγμών b) Τυπικές επιφάνειες αστοχίας

Η οριακή διαξονική εφελκυστική αντοχή f_1 του κάθε δοκιμίου μπορεί να εκφραστεί, συμφώνα με αυτά που προέκυψαν παραπάνω, ως εξής:

$$f_1 = f_{1f} + f_{1p} = f_{1p} + AV_f \frac{l}{d} f_{1p}$$
(2.2.9)

όπου, f_{1f} είναι η αντοχή με την οποία συμβάλλουν οι ίνες και f_{1p} , είναι η αντίστοιχη αντοχή του άοπλου σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα, όπως ειπώθηκε, δείχνουν ότι η αύξηση στην f_{1f} είναι ευθέως ανάλογη με την ποσότητα των ινών και τα αποτελέσματα είναι σε συμφωνία με αυτά που προκύπτουν από την εξίσωση **2.2.9**.

Στην εν λόγω μελέτη, η γεωμετρία και ο λόγος των διαστάσεων των ινών, όπως επίσης και η κατηγορία του σκυροδέματος, έχουν διατηρηθεί σταθερά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι παράμετροι που επηρεάζουν την διαζονική αντοχή είναι η συμβολή του σκυροδέματος f_{1p} και η εφαρμοζόμενη περίσφιγξη. Και οι δύο παράμετροι εξαρτώνται από την κάθετη κύρια θλιπτική τάση f_2 . Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.2.49**, όπου παρουσιάζεται η συμβολή των ινών f_{1f} σε σχέση με την κύρια θλιπτική τάση f_2 για τις διάφορες περιεκτικότητες V_f . Η συμβολή αυτή φαίνεται να είναι σταθερή, χωρίς καμία επιρροή από την τάση f_2 . Η εξομάλυνση των καμπυλών $f_1(f_2)$ που αντιστοιχούν στις διάφορες τιμές του V_f , όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.2.47**, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι οι τιμές της παραμέτρου Α επηρεάζονται σημαντικά από τις τιμές της f_2 (**Σχήμα 2.2.50**).



Σχήμα 2.2.49: Σχέση μεταξύ της συμβολής των ινών στην κύρια αντοχή f_1 και περιεκτικότητας V_f



Σχήμα 2.2.50: Επιρροή της κύριας θλιπτικής τάσης f_2 και της περιεκτικότητας V_f στις τιμές της παραμέτρου Α

Συμπερασματικά, όσον αφορά στην συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό συνθήκες ετερόσημης έντασης, μπορούμε να πούμε ότι η προσθήκη χαλύβδινων ινών με αγκυρώσεις, οδηγεί σε σημαντική αύξηση της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής του υλικού (περίπου διπλάσια αντοχή για V_f = 1,5%). Για την διαξονική αντοχή η αύξηση ήταν μεγαλύτερη ειδικά κοντά στην περιοχή όπου ισχύει f_2 / f_c = 0,50 (περίπου τριπλάσια αντοχή από αυτήν του άοπλου σκυροδέματος). Επίσης, όπως παρατηρήθηκε, οι ίνες οδηγούν σε μεγάλο βαθμό, στην εξομάλυνση της περιβάλλουσας αστοχίας προσεγγίζοντας για μεγάλο εύρος τις τιμές της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής.

Η περιβάλλουσα αστοχίας για το άοπλο σκυρόδεμα, που προέκυψε, βρίσκεται σε συμφωνία με τις αντίστοιχες περιβάλλουσες παλαιότερων μελετών, όπως αυτή των Kupfer et al (1969), γεγονός που επιβεβαιώνει την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Το αντικείμενο της έρευνας που αναλύθηκε, αφορά άμεσα την παρούσα εργασία και

προσφέρει σημαντικά δεδομένα για σύγκριση όσον αφορά την μελέτη της διαξονικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό συνδυασμένο εφελκυσμό-θλίψη.

2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΕΣ ΜΕΛΕΤΕΣ

2.3.1 Γενικές έννοιες και βασικά κριτήρια αστοχίας

Οι αναλλοίωτες του τανυστή των τάσεων

Ένα κριτήριο αστοχίας ισοτροπικού υλικού είναι απαραίτητο να είναι ανεξάρτητο της εντατικής κατάστασης που υφίσταται το υλικό. Δεν πρέπει, δηλαδή, να εξαρτάται από παράγοντες όπως η επιλογή του συστήματος συντεταγμένων ως προς το οποίο ορίζεται η εντατική κατάσταση. Μια πρώτη προσέγγιση, για να διαμορφωθεί ένα τέτοιο κριτήριο, είναι να εκφραστεί η συναρτησιακή μορφή του συναρτήσει των τριών κυρίων τάσεων:

$$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$$
 (2.3.1)

Στην γενική περίπτωση τριαξονικών εντάσεων η προσέγγιση μιας συνάρτησης τέτοιας μορφής είναι δύσκολη. Προκειμένου να ξεπεραστεί η δυσκολία αυτή, οι κύριες τάσεις μπορούν να εκφραστούν συναρτήσει των αναλλοίωτων του τανυστή των τάσεων. Έτσι προκύπτει μια συνάρτηση της μορφής:

$$f(I_1, J_2, J_3) = 0 \tag{2.3.2}$$

Οι τρείς συγκεκριμένες κύριες αναλλοίωτες παρέχουν πιο εύκολα την δυνατότητα για φυσικές και γεωμετρικές ερμηνείες ενώ είναι ανεξάρτητες από τις ιδιότητες του εκάστοτε υλικού.

Εξ' ορισμού η, διατμητική τάση σε ένα σημείο ενός υλικού, μηδενίζεται στο επίπεδο των κυρίων τάσεων σ , το οποίο ορίζεται από το, κάθετο στο επίπεδο, διάνυσμα n_i . Επομένως, στο σημείο αυτό το διάνυσμα της έντασης T_i έχει την ίδια διεύθυνση με το διάνυσμα n_i και έτσι ισχύει ότι $T_i = \sigma n_i$. Για την διεύθυνση αυτή θα είχαμε:

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} n_j = 0 \tag{2.3.3}$$

όπου, ο τανυστής των τάσεων σ_{ij} σχετίζεται με το διάνυσμα της έντασης T_i μέσω του τύπου του Cauchy, $T_i = \sigma_{ij} n_j$ και $\delta_{ij} = \delta_{ji}$ είναι το δέλτα του Kronecker, το οποίο ορίζεται ως +1 αν i = j, ενώ διαφορετικά είναι ίσο με το 0. Η εξίσωση **2.3.3** είναι ένα σύστημα τριών γραμμικών ομογενών εξισώσεων ως προς *n*₁, *n*₂, *n*₃. Το σύστημα έχει λύση αν και μόνο αν η ορίζουσα του συστήματος μηδενίζεται:

$$\det\left(\sigma_{ij} - \sigma\delta_{ij}\right) = 0 \tag{2.3.4}$$

ή

$$\begin{vmatrix} \sigma_{11} - \sigma & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{12} & \sigma_{22} - \sigma & \tau_{23} \\ \tau_{13} & \tau_{23} & \sigma_{33} - \sigma \end{vmatrix} = 0$$
 (2.3.5)

που είναι μια εξίσωση τρίτου βαθμού ως προς σ με τρεις πραγματικές ρίζες.

$$\sigma^3 - I_1 \sigma^2 + I_2 \sigma - I_3 = 0 \tag{2.3.6}$$

Με επιλογή συστήματος συντεταγμένων, ώστε να ταυτίζεται με το κύριο σύστημα, προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις των ποσοτήτων *I*₁, *I*₂, *I*₃.

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \tag{2.3.7}$$

$$I_2 = (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) \tag{2.3.8}$$

$$I_3 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_3 \tag{2.3.9}$$

Οι κύριες τάσεις έχουν τιμές που δεν εξαρτώνται από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων, επομένως και οι τιμές των *I*₁, *I*₂, *I*₃ δεν διαφέρουν, οποιοδήποτε σύστημα συντεταγμένων και αν επιλεγεί. Έτσι οι ποσότητες αυτές αναφέρονται ως οι *αναλλοίωτες* του τανυστή των κυρίων τάσεων.

Ο τανυστής των τάσεων μπορεί να εκφραστεί σαν ένα άθροισμα του ισότροπου ή σφαιρικού τανυστή (*hydrostatic stress tensor*), που αναφέρεται σε πλήρη υδροστατική ένταση και του αποκλίνοντα τανυστή (*deviatoric stress tensor*), ο οποίος παριστά μια κατάσταση πλήρους διάτμησης. Έτσι είναι:

$$\sigma_{ij} = s_{ij} + \sigma_m \delta_{ij} \tag{2.3.10}$$

όπου

$$\sigma_m = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3} \sigma_{ii} = \frac{1}{3} I_1$$
(2.3.11)

αναπαριστά την καθαρή υδροστατική ένταση. Έτσι τα στοιχεία του αποκλίνοντος τανυστή προκύπτουν από την σχέση:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_m \delta_{ij} \tag{2.3.12}$$

Η διαδικασία για την εξαγωγή των εκφράσεων των αναλλοίωτων του αποκλίνοντος τανυστή είναι παρόμοια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως και για τα *I*₁, *I*₂, *I*₃. Μπορούμε, λοιπόν, να γράψουμε:

$$\left|s_{ij} - s\delta_{ij}\right| = 0 \tag{2.3.13}$$

Από την οποία προκύπτει η εξίσωση τρίτου βαθμού:

$$s^3 - J_1 s^2 - J_2 s - J_3 \tag{2.3.14}$$

Από την ανάπτυξη της εξίσωσης 2.3.12, προκύπτει ότι οι κύριες διευθύνσεις του τανυστή των τάσεων και του αποκλίνοντος τανυστή ταυτίζονται. Τελικά, με επιλογή του συστήματος συντεταγμένων, ώστε να ταυτίζεται με το κύριο σύστημα, προκύπτουν:

$$J_1 = s_1 + s_2 + s_3 = 0 \tag{2.3.13}$$

$$I_{2} = \frac{1}{2} \left(s_{1}^{2} + s_{2}^{2} + s_{3}^{2} \right) = \frac{1}{6} \left[\left(\sigma_{1} - \sigma_{2} \right)^{2} + \left(\sigma_{2} - \sigma_{3} \right)^{2} + \left(\sigma_{3} - \sigma_{1} \right)^{2} \right]$$
(2.3.14)

$$J_{3} = \frac{1}{3} \left(s_{1}^{3} + s_{2}^{3} + s_{3}^{3} \right) = s_{1} s_{2} s_{3}$$
(2.3.15)

Όλα τα μεγέθη σ₁, σ₂, σ₃, I₁, I₂, I₃, J₁, J₂, J₃, $\overline{I}_2 = \frac{1}{2} \sigma_{ij} \sigma_{ji}$, και $\overline{I}_3 = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \sigma_{jk} \sigma_{ki}$ είναι βαθμωτά και ανεξάρτητα από την επιλογή του συστήματος συντεταγμένων. Προκειμένου να γίνει η περιγραφή της μαθηματικής έκφρασης του κριτηρίου αστοχίας, εστιάζεται η προσοχή στις ποσότητες I₁, J₂, J₃ οι οποίες είναι πρώτου, δευτέρου και τρίτου βαθμού, αντίστοιχα, ως προς την τάση. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως το I₁, δείχνει μια κατάσταση υδροστατικής πίεσης και τα J₂, J₃ αναφέρονται σε μια κατάσταση καθαρής διάτμησης.

Εξετάζοντας την εξίσωση **2.3.14** παρατηρείται ομοιότητα με την τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$\cos^{3}\theta - \frac{3}{4}\cos\theta - \frac{1}{4}\cos 3\theta = 0$$
 (2.3.16)

Εάν θέσουμε $s = \rho \cos \theta$ και αντικαταστήσουμε στην εξίσωση **2.3.14**, έχουμε:

$$\cos^{3}\theta - \frac{J_{2}}{\rho^{2}}\cos\theta - \frac{J_{3}}{\rho^{3}} = 0$$
 (2.3.17)

Συγκρίνοντας με την εξίσωση 2.3.16 προκύπτει ότι:

$$\rho = \frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{J_2} \tag{2.3.18}$$

$$\cos 3\theta = \frac{4J_3}{\rho_3} = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}}$$
(2.3.19)

και

Εάν θ_0 είναι η πρώτη ρίζα της εξίσωσης **2.3.19** για την γωνία 3 θ , στο διάστημα από 0 έως π, συνεπάγεται ότι η γωνία θ_0 παίρνει τιμές:

$$0 \le \theta_0 \le \frac{\pi}{3} \tag{2.3.20}$$

Οι τιμές των τριών κυρίων τάσεων εκφράζονται από τις τιμές του $\cos \theta_0$:

$$\cos\theta_0 = \cos\left(\theta_0 - \frac{2}{3}\pi\right) = \cos\left(\theta_0 + \frac{2}{3}\pi\right)$$
 (2.3.21)

Λόγω του περιορισμού που θέτει η ανίσωση **2.3.20**, οι τρείς κύριες τάσεις των τανυστών σ_{ii}, s_{ii} μπορούν να δοθούν ως:

$$\begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \sigma_m \\ \sigma_m \\ \sigma_m \end{bmatrix} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_2} \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \cos \left(\theta_0 - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \cos \left(\theta_0 + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix}$$
(2.3.22)

г

me $\sigma_{\rm 1} \geq \sigma_{\rm 2} \geq \sigma_{\rm 3}$. Sthu exisows ${\bf 2.3.22}$ epiléchikan oi treús analloíwtes twu tásewu

$$\sigma_m = \frac{1}{3}I_1 \qquad \sqrt{J_2} \qquad 0 \le \theta_0 \le \frac{\pi}{3} \qquad (2.3.23)$$

σαν εναλλακτική επιλογή των I_1 , J_2 , J_3 . Με την χρήση αυτών των σταθερών ποσοτήτων, τα διάφορα κριτήρια αστοχίας μπορούν να οριστούν με συνάρτηση της μορφής $f(\sigma_m, \sqrt{J_2}, \theta_0) = 0$ ή ισοδύναμα, της μορφής $f(I_1, J_2, \theta_0) = 0$.

Γεωμετρική ερμηνεία της εντατικής κατάστασης και των αναλλοίωτων των τάσεων

Ο πιο απλός τρόπος για να ερμηνευτεί γεωμετρικά η εντατική κατάσταση σε ένα σημείο $P(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ είναι να θεωρήσουμε τις τρείς κύριες τάσεις $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ως συντεταγμένες ενός σημείου σε ένα καρτεσιανό σύστημα αξόνων στο χώρο (**Σχήμα 2.3.1**). Το σύστημα αυτό ονομάζεται χώρος των κυρίων τάσεων, κατά *Haigh-Westergaard*. Θεωρούμε το διάνυσμα **OP** το οποίο παριστά την εντατική κατάσταση στο σημείο *P*. Δεδομένου ότι το κριτήριο αστοχίας, σε ισοτροπικό υλικό, πρέπει να είναι σταθερή συνάρτηση της εντατικής κατάστασης, ένα τέτοιο σύστημα συντεταγμένων είναι κατάλληλο για την μόρφωση της επιφάνειας αστοχίας.



Σχήμα 2.3.1: Ανάλυση της έντασης στον χώρο των κυρίων τάσεων

Ορίζεται, στην συνέχεια, ο υδροστατικός άξονας στον χώρο των κυρίων τάσεων ως η χωροδιαγώνιος d. Το μοναδιαίο διάνυσμα του άξονα αυτού δίνεται από:

$$\mathbf{e} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.3.24)

και κάθε σημείο της διαγωνίου d χαρακτηρίζεται από:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 \tag{2.3.25}$$

δηλαδή, κάθε σημείο της ευθείας αυτής αντιστοιχεί σε υδροστατική εντατική κατάσταση. Τα επίπεδα που είναι κάθετα στον υδροστατικό άξονα ονομάζονται αποκλίνοντα επίπεδα. Το αποκλίνον επίπεδο, όπου ισχύει:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 0 \tag{2.3.26}$$

ονομάζεται και επίπεδο π (Σχήμα 2.3.2). Στο επίπεδο αυτό απεικονίζονται όλες οι καθαρώς αποκλίνουσες από την ισότροπη εντατικές καταστάσεις.



Σχήμα 2.3.2: Υδροστατικός άξονας και αποκλίνον επίπεδο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η εντατική κατάσταση εκφράζεται από το διάνυσμα **OP**, το οποίο μπορούμε να αναλύσουμε σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα είναι το διάνυσμα **ON** που είναι η προβολή του **OP** στον υδροστατικό άξονα και η δεύτερη συνιστώσα είναι το διάνυσμα **NP**, επί του καθέτου, στον άξονα, επιπέδου (**Σχήμα 2.3.1**). Το μέτρο του **ON** δίνεται από:

$$\mathbf{ON} = \boldsymbol{\xi} = \mathbf{OP} \cdot \mathbf{e} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1\\1\\1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \qquad (2.3.27)$$

ή

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 = \sqrt{3}\sigma_m = \sqrt{3}\sigma_{\text{oct}}$$
(2.3.28)

Επίσης, για το ΟΝ ισχύει:

$$\mathbf{ON} = \begin{bmatrix} \sigma_m & \sigma_m \end{bmatrix} = \frac{I_1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.3.29)

Η συνιστώσα ΝΡ ορίζεται ως εξής:

$$\mathbf{NP} = \mathbf{OP} - \mathbf{ON} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 \end{bmatrix} - \frac{I_1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{bmatrix}$$
(2.3.30)

Το τετράγωνο του μέτρου του NP είναι:

$$|\mathbf{NP}|^2 = r^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2 = 2J_2$$
 $r \ge 0$ (2.3.31)

ή

$$r^2 = 2J_2 = 5\tau_m^2 = 2\tau_{\rm oct}^2$$
 (2.3.32)

Όπως, λοιπόν, έγινε φανερό, το διάνυσμα $\mathbf{ON} = \begin{bmatrix} \sigma_m & \sigma_m & \sigma_m \end{bmatrix}$ ορίζει το υδροστατικό τμήμα της εντατικής κατάστασης, η οποία εκφράζεται από το διάνυσμα $\mathbf{OP} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & \sigma_3 \end{bmatrix}$ και το $\mathbf{NP} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{bmatrix}$, που βρίσκεται στο κάθετο στον υδροστατικό άξονα επίπεδο, ορίζει το αποκλίνον τμήμα της εντατικής κατάστασης. Οποιεσδήποτε δύο εντατικές καταστάσεις διαφέρουν μόνο κατά την υδροστατική ένταση, τότε βρίσκονται σε ευθεία παράλληλη στον υδροστατικό άξονα.

Προκείμενου να ερμηνευτεί γεωμετρικά η γωνία ομοιότητος θ, θεωρούμε το αποκλίνον επίπεδο όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 2.3.3**. Στην απεικόνιση αυτή, το επίπεδο, που είναι κάθετο στον υδροστατικό άξονα, ταυτίζεται με το επίπεδο της σελίδας, ενώ οι άξονες σ_1 , σ_2 , σ_3 προβάλλονται στο επίπεδο αυτό. Δεδομένου ότι ο υδροστατικός άξονας σχηματίζει ίσες γωνίες με τους τρείς άξονες του συστήματος, οι άξονες αυτοί, στη συγκεκριμένη προβολή, θα σχηματίζουν ίσες γωνίες μεταξύ τους (2π/3 ή 120°). Η γωνία θ στο Σχήμα 2.3.3 μετριέται από τον θετικό άξονα σ_1 και βρίσκεται επί του αποκλίνοντος επιπέδου. Το μοναδιαίο διάνυσμα **i**, βρίσκεται επί της προβολής του σ_1 , και είναι:

$$\mathbf{i} = \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$
(2.3.33)

στο σύστημα συντεταγμένων σ_1 , σ_2 , σ_3 .



Σχήμα 2.3.3: Προβολές των αξόνων σ_1 , σ_2 , σ_3 στο αποκλίνον επίπεδο

Στη συνέχεια, μπορούμε να πούμε:

$$\mathbf{NP} \cdot \mathbf{i} = r \cos \theta \tag{2.3.34}$$

Από την σχέση αυτή υπολογίζεται η γωνία ομοιότητας:

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{2J_2}} \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \end{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} \begin{bmatrix} 2\\ -1\\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}\sqrt{J_2}} \left(2s_1 - s_2 - s_3 \right)$$
(2.3.35)

Eán $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, tóte:

$$0^{\circ} \le \theta \le 60^{\circ} \tag{2.3.36}$$

Χρησιμοποιώντας την τριγωνομετρική ταυτότητα:

$$\cos 3\theta = 4\cos^3 \theta - 3\cos \theta \tag{2.3.37}$$

προκύπτει η σχέση 2.3.19 που προέκυψε και παραπάνω:

$$\cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} = \frac{\sqrt{2}J_3}{\tau_{\rm oct}^3}$$
(2.3.38)

Συνεπώς, οι επιφάνειες αστοχίας $f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) = 0$ ή $f(I_1, J_2, J_3) = 0$ μπορούν να εκφραστούν με πιο κατάλληλες μορφές όπως $f(\xi, r, \theta) = 0$ (Σχήματα 2.3.1, 2.3.3) ή $f(\sigma_{oct}, \tau_{oct}, \theta)$ (Σχήμα 2.3.4).



Σχήμα 2.3.4: Γεωμετρική ερμηνεία των (ξ , r, θ) και (σ_{ocb} τ_{oct} , θ)

<u>Χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας αστοχίας του σκυροδέματος</u>

Τα γενικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας αστοχίας του σκυροδέματος, τα οποία περιγράφονται στην ενότητα αυτή, έχουν προκύψει από πειραματικά αποτελέσματα. Τα πειραματικά δεδομένα είναι, επίσης, απαραίτητα και για την ανάπτυξη των διαφόρων απλών ή σύνθετων κριτηρίων αστοχίας για τα υλικά με βάση το σκυρόδεμα.

Το σχήμα της επιφάνειας αστοχίας σε ένα τρισδιάστατο χώρο εντάσεων, μπορεί να περιγραφεί από τα σχήματα των διατομών της στα αποκλίνοντα επίπεδα και από τις γενέτειρες που βρίσκονται στα επίπεδα των γενέτειρων (meridian planes). Οι διατομές της επιφάνειας αστοχίας διαμορφώνονται από την τομή της επιφάνειας με το αποκλίνον επίπεδο, το οποίο είναι κάθετο στον υδροστατικό άξονα, με ξ = σταθερό. Οι γενέτειρες της επιφάνειες αστοχίας είναι οι τομές της επιφάνειας με το επίπεδο που περιέχει τον υδροστατικό άξονα με θ = σταθερό. Για ένα ισοτροπικό υλικό η επιλογή τοποθέτησης των σ_1 , σ_2 , σ_3 στους άξονες του συστήματος συντεταγμένων είναι αυθαίρετη, επομένως το σχήμα των διατομών της επιφάνειας **2.3.3**. Συνεπώς, κατά την διεξαγωγή πειραμάτων αρκεί να μελετώνται οι περιπτώσεις όπου $\theta = 0$ έως 60°.

Από τα πειραματικά δεδομένα προκύπτει ότι η καμπύλη αστοχίας στα αποκλίνοντα επίπεδα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- 1. Η καμπύλη αστοχίας είναι ομαλή.
- Η καμπύλη αστοχίας είναι κυρτή, τουλάχιστον στην περιοχή των θλιπτικών τάσεων. Η συνθήκη κυρτότητας απαιτεί ότι:

$$\frac{\partial^2 r}{\partial \theta^2} < r + \frac{2}{r} \left(\frac{\partial r}{\partial \theta} \right)$$
(2.3.39)

- Η καμπύλη αστοχίας, όπως έχει διαπιστωθεί, παρουσιάζει μια μορφή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3.3.
- Για το άοπλο σκυρόδεμα, πειραματικά διαπιστώνεται ότι η καμπύλη αστοχίας είναι σχεδόν τριγωνικής μορφής για εφελκυστικές και μικρές θλιπτικές τάσεις, ενώ προοδευτικά προσεγγίζει την μορφή κύκλου για υψηλές θλιπτικές τάσεις.

Τα δύο ακραία επίπεδα γενέτειρων για $\theta = 0^{\circ}$ και $\theta = 60^{\circ}$ ονομάζονται γενέτειρα υπό προέχοντα εφελκυσμό (εφελκυστική γενέτειρα) και γενέτειρα υπό προέχουσα θλίψη (θλιπτική γενέτειρα) αντίστοιχα (Σχήμα 2.3.5). Επιπροσθέτως, η γενέτειρα που ορίζεται από γωνία $\theta = 30^{\circ}$ αναφέρεται ως διατμητική γενέτειρα. Η πλειοψηφία των πειραματικών δεδομένων αφορά την θλιπτική γενέτειρα, λόγω του



Σχήμα 2.3.5: Γενικά χαρακτηριστικά των γενέτειρων [πειράματα Launay et al (1970-1972)]

ότι οι πειραματικές δυσκολίες για την μόρφωση τους είναι λιγότερες. Στο Σχήμα 2.3.6 παρουσιάζονται τυπικά πειραματικά δεδομένα για τις γενέτειρες της επιφάνειας αστοχίας σε άξονες ξ/f'_c - r/f'_c , όπου μονοαξονική f'_c η θλιπτική αντοχή κυλίνδρου σκυροδέματος με $f'_c > 0$

[μελέτες των Richart et al. (1928), Balmer (1949) και Kupfer et al. (1969, 1973)]. Από τα Σχήματα 2.3.5, 2.3.6, παρατηρείται ότι η επιφάνεια αστοχίας στο επίπεδο των γενετειρών παρουσιάζει τα εξής γενικά χαρακτηριστικά:

1. Οι καμπύλες αστοχίας εξαρτώνται από το υδροστατικό τμήμα της έντασης I_1 ή

- 2. Οι καμπύλες αστοχίας είναι ομαλές και κυρτές.
- 3. $r_t/r_c < 1$, όπου οι δείκτες *t* και *c* αντιστοιχούν στην εφελκυστική και θλιπτική γενέτειρα αντίστοιχα.
- 4. Η τιμή του r_t/r_c αυξάνει με την αύξηση της υδροστατικής έντασης.
- 5. Η καθαρή υδροστατική ένταση δεν μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία. Από πειράματα των Chinn & Zimmerman (1965), όπου διαμορφώθηκε μια καμπύλη κατά την θλιπτική γενέτειρα μέχρι την τιμή I₁ = □ 79f'_c, δεν παρατηρήθηκε καμία τάση της γενέτειρας να προσεγγίσει τον υδροστατικό άξονα.



Σχήμα 2.3.6: Διάφορα πειραματικά δεδομένα για την θλιπτική και εφελκυστική γενέτειρα (μελέτες των Richart et al., Balmer και Kupfer et al.)

Το κριτήριο αστοχίας του Ottosen (1977)

Ο Ottosen το 1977 πρότεινε το ακόλουθο κριτήριο που χρησιμοποίει τις τασικές αναλλοίωτες I_1, J_2 , cos 3 θ :

$$f(I_1, J_2, \cos 3\theta) = \alpha \frac{J_2}{f_c^{\prime 2}} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_c^{\prime}} + b \frac{I_1}{f_c^{\prime}} - 1 = 0$$
(2.3.40)

όπου, $\lambda = \lambda(\cos 3\theta)$ και α και b είναι σταθερές.

Η επιφάνεια αστοχίας **2.3.40** έχει καμπύλες γενέτειρες και μη κυκλικές διατομές. Το κριτήριο αυτό είναι ένα τετραπαραμετρικό κριτήριο αστοχίας, καθώς εξαρτάται από τις ποσότητες *a*, *b* (οι ποσότητες αυτές καθορίζουν την καμπύλη

μορφή των γενέτειρων) και $\lambda_t = 1/r_t$ και $\lambda_c = 1/r_c$ (οι ποσότητες αυτές καθορίζουν την μη κυκλική μορφή των διατομών της επιφάνειας αστοχίας.

Τα κύρια χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει μια καμπύλη αστοχίας αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό που πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι το ότι οι διατομές τις καμπύλης στα αποκλίνοντα επίπεδα πρέπει να έχουν την ιδιότητα να αλλάζουν σχήμα από σχεδόν τριγωνικό σε σχεδόν κυκλικό, καθώς αυξάνεται η υδροστατική ένταση. Για την κατασκευή μιας τέτοιας καμπύλης, κρίνεται σκόπιμη η χρήση ενός αναλόγου μεμβράνης (membrane analogy), προσέγγιση που έχει χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση του κλασικού προβλήματος στρέψης.

Θεωρούμε ένα ισόπλευρο τρίγωνο (Σχήμα 2.3.7) και υποθέτουμε ότι μια μεμβράνη, που υπόκειται σε ομοιόμορφη ένταση, στηρίζεται στις γωνίες του τριγώνου. Στη συνέχεια, μια ομοιόμορφη πλευρική πίεση ασκείται στην μεμβράνη. Η κατακόρυφη μετατόπιση *z* ακολουθεί την εξίσωση Poisson:

$$\frac{\partial^2 z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 z}{\partial y^2} = -k \tag{2.3.41}$$

όπου, kείναι σταθερά και z
 είναι 0στις γωνίες του τριγώνου.



Equilateral triangle Σχήμα 2.3.7: Ανάλογο μεμβράνης για την συνάρτηση λ

Είναι φανερό ότι οι καμπύλες του περιγράμματος της μεμβράνης, έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες της συμμετρίας, της ομαλότητας, της κυρτότητας και η μορφή τους ποικίλει ανάμεσα στο σχήμα του ισόπλευρου τριγώνου και του κύκλου. Είναι γνωστό ότι η μετατόπιση z δίνεται από την σχέση:

$$z = m\left(\sqrt{3}x + y + \frac{2}{3}h\right)\left(\sqrt{3}x + y - \frac{2}{3}h\right)\left(y - \frac{1}{3}h\right)$$
(2.3.42)

που προκύπτει από τις τρείς εξισώσεις των πλευρών του τριγώνου του Σχήματος 2.3.7 με ύψος *h*. Αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.3.41 προκύπτει:

$$m = \frac{k}{4h} \tag{2.3.43}$$

εάν διαλέξουμε m = 1/2h που αντιστοιχεί σε k = 2, η κατακόρυφη μετατόπιση μπορεί να γραφτεί :

$$z = \frac{1}{2h} \left(\frac{h}{3} - y\right) \left[\left(y + \frac{2}{3}h\right)^2 - 3x^2 \right]$$
(2.3.44)

Προκειμένου να εκφραστεί η καμπύλη της εξίσωσης **2.3.44** στην μορφή του $\lambda = 1/r$ ως συνάρτηση του cos 3θ, εισάγονται οι πολικές συντεταγμένες (r, θ) :

$$x = r\sin\theta \qquad y = r\cos\theta \tag{2.3.45}$$

Η εξίσωση του z γίνεται:

$$r^{3}\cos 3\theta + hr^{2} - \frac{4}{27}h^{3} + 2hz = 0$$
 (2.3.56)

Αφού είναι $r \neq 0$, που σημαίνει ότι $2hz - \frac{4}{27}h^3 \neq 0$, η εξίσωση **2.3.56** μπορεί να ξαναγραφτεί:

$$\frac{1}{r^3} + \frac{h}{2hz - \frac{4}{27}h^3r} \frac{1}{r} + \frac{\cos 3\theta}{2hz - \frac{4}{27}h^3r} = 0$$
(2.3.57)

Για μια αυθαίρετη σταθερή τιμή του z ($0 \le z \le \frac{2}{27}h^2$), η εξίσωση ορίζει την αντίστοιχη μορφή του περιγράμματος της καμπύλης. Χάριν απλότητας θέτουμε:

$$\lambda = \frac{1}{r} \qquad p = \frac{1}{3} \frac{1}{2z - \frac{4}{27}h^2} \qquad q = \frac{1}{2} \frac{\cos 3\theta}{h\left(2z - \frac{4}{27}h^2\right)}$$
(2.3.58)

και η εξίσωση 2.3.57 γράφεται:

$$\lambda^3 + 3p\lambda + 2q = 0 \tag{2.3.59}$$

όπου

$$p < 0 \qquad \text{kat} \qquad q \begin{cases} \geq 0 & \text{av} & \cos 3\theta \leq 0 \\ \leq 0 & \text{av} & \cos 3\theta \geq 0 \end{cases}$$
(2.3.60)

και όπου

$$|p|^3 > q^2$$
 (2.3.61)

Εισάγονται, στην συνέχεια, δύο νέες παράμετροι k₁, k₂:

$$k_1 = \frac{2}{\sqrt{3\left(\frac{4}{27}h^2 - 2z\right)}} \tag{2.3.62}$$

$$k_2 = \frac{3}{2h\sqrt{3\left(\frac{4}{27}h^2 - 2z\right)}} = \frac{3k_1}{4h}$$
(2.3.63)

Εάν $\cos 3\theta \ge 0$ ($q \le 0$), η μόνη πραγματική ρίζα εύκολα προκύπτει ότι είναι:

$$\lambda = \frac{1}{r} = k_1 \cos\left[\frac{1}{3}\cos^{-1}(k_2 \cos 3\theta)\right] \qquad \gamma \iota \alpha \qquad \cos 3\theta \ge 0 \qquad (2.3.64)$$

Eάν cos 3θ ≤ 0(q ≥ 0), η μόνη θετική ρίζα που δίνει την ίδια τιμή, για το 1/r, με την παραπάνω εξίσωση για cos 3θ είναι:

$$\lambda = \frac{1}{r} = k_1 \cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\cos^{-1}(-k_2\cos 3\theta)\right] \qquad \gamma \iota \alpha \qquad \cos 3\theta \le 0 \qquad (2.3.65)$$

Οι δύο τελευταίες εξισώσεις περιγράφουν την συνάρτηση λ στο αποκλίνον επίπεδο. Γίνεται χρήση δύο παραμέτρων (k_1 και k_2). Εάν χρησιμοποιηθούν οι δείκτες t και cπου αναφέρονται στην θλιπτική και εφελκυστική γενέτειρα, δηλαδή:

1

και

$$\lambda_{c} = \lambda(\cos 3\theta) = \lambda(-1) = \frac{1}{r_{c}} \quad \gamma \iota \alpha \qquad \theta = 60^{\circ}$$

$$\lambda_{t} = \lambda(\cos 3\theta) = \lambda(1) = \frac{1}{r_{t}} \quad \gamma \iota \alpha \qquad \theta = 0^{\circ}$$
(2.3.66)

τότε οι σταθερές k_1 και k_2 καθορίζονται από τις τιμές των λ_c και λ_t ή r_c και r_t . Η παράμετρος k_1 αποτελεί ένα συντελεστή μεγέθους και η παράμετρος k_2 είναι ένας συντελεστής σχήματος με $0 \le k_2 \le 1$.

Οι εξισώσεις **2.3.64** και **2.3.65** ισχύουν για όλες τις τιμές της θ . Η καμπύλη αστοχίας είναι περιοδική με περίοδο 120° και παρουσιάζει συμμετρία ανά 60°, όπως απαιτείται. Η ομαλή και κυρτή αυτή καμπύλη, στο αποκλίνον επίπεδο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για όλες τις αναλογίες r_t/r_c μέσα στο διάστημα

$$\frac{1}{2} < \frac{r_t}{r_c} < 1 \tag{2.3.67}$$

Για τις τιμές των παραμέτρων a > 0 και b > 0 στην εξίσωση **2.3.40**, οι γενέτειρες είναι παραβολικές. Οι τιμές του λ_t / λ_c , όπως θα αναφερθεί και παρακάτω, κυμαίνονται από 0,54 έως 0,58, γεγονός που εξαρτάται από τις τιμές του λόγου f'_t / f'_c

(Πίνακας 2.3.8) και αντιστοιχούν σε σχεδόν τριγωνικό σχήμα της καμπύλης στο αποκλίνον επίπεδο για χαμηλές εντάσεις. Επιπλέον, για αρκετά υψηλές θλιπτικές εντάσεις (ή $I_1 \rightarrow -\infty$) η καμπύλη στο αποκλίνον επίπεδο παίρνει σχεδόν κυκλική μορφή (ή $r_t/r_c \rightarrow 1$).

Οι τέσσερις παράμετροι του κριτηρίου του Ottosen (1977) προσδιορίστηκαν από τέσσερις τιμές που προέκυψαν από τυπικές μονοαξονικές διαξονικές και τριαξονικές πειραματικές δοκιμές:

- 1. Την μονοαξονική θλιπτική αντοχή $f'_{\rm c}$ ($\theta = 60^{\circ}$).
- 2. Την μονοαξονική εφελκυστική αντοχή f'_t ($\theta = 0^{\circ}$).
- 3. Την διαξονική θλιπτική αντοχή ($\theta = 0^{\circ}$). Συγκεκριμένα, επιλέχθηκαν $\sigma_1 = \sigma_2$ = -1,16 f'_c , $\sigma_3 = 0$, που αντιστοιχούν στα πειράματα των Kupfer et al (1969,1973).
- 4. Την τριαξονική εντατική κατάσταση $(\xi/f'_c, r/f'_c) = (-5, 4)$ στην θλιπτική γενέτειρα ($\theta = 60^{\circ}$) (Σχήμα 2.3.6), που παρέχει την καλύτερη εφαρμογή της καμπύλης στα δεδομένα των Balmer (1949) και Richart et al. (1928).

Με την χρήση των δεδομένων αυτών, προέκυψαν οι τιμές των παραμέτρων και η εξάρτηση τους από την τιμή του λόγου $\overline{f'}_t = f'_t/f'_c$, γίνεται φανερή στους **Πίνακες 2.3.8** και **2.3.9**. Παρ' όλο που οι παράμετροι *a*, *b*, *k*₁ και *k*₂ εξαρτώνται σημαντικά από τις τιμές του $\overline{f'}_t = f'_t/f'_c$, όταν υπάρχουν μόνο θλιπτικές τάσεις, οι τάσεις αστοχίας επηρεάζονται σε μικρότερο βαθμό.

]; = f;/f;	a	ь	k,	k 1
0.08	1.8076	4.0962	14.4863	0.9914
0.10	1.2759	3.1962	11.7365	0.9801
0.12	0.9218	2.5969	9.9110	0.9647

[†]The values of k_1 and k_2 correspond to the values of λ , and λ , given in Table 5.2.

Πίνακας 2.3.8: Τιμές παραμέτρων και η εξάρτηση τους από τις τιμές Του λόγου $\overline{f'}_t = f'_t / f'_c$ †

]: - f:/f:	۸.	λ,	λ./λ.
0.08	14.4725	7.7834	0.5378
0.10	11.7109	6.5315	0.5577
0.12	9.8720	5.6979	0.5772

Πίνακας 2.3.9: Τιμές συνάρτησης λ και η εξάρτηση τους από τις τιμές Του λόγου $\overline{f'}_t = f'_t / f'_c$

Μετά τον προσδιορισμό των παραμέτρων έγινε διασταύρωση των αποτελεσμάτων που δίνει το συγκεκριμένο κριτήριο αστοχίας με διάφορα αποτελέσματα πειραματικών ερευνών (Σχήματα 2.3.10, 2.3.11 και 2.3.12). Διαπιστώθηκε ότι το κριτήριο παρέχει σχετικά ακριβείς εκτιμήσεις σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα και έχει ισχύ για όλους τους συνδυασμούς εντάσεων. Επιπλέον, παρέχει όλα τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά όσον αφορά την ομαλότητα, την κυρτότητα, την συμμετρία και την καμπυλότητα των γενετειρών, ενώ η μαθηματική μορφή του και η χρήση των τασικών αναλλοίωτων το καθιστούν κατάλληλο για υπολογιστικές εφαρμογές. Παρουσιάζεται, στη συνέχεια, στο Σχήμα 2.3.13 το διάγραμμα σχεδιασμού για την περίπτωση διαξονικής ετερόσημης έντασης, σύμφωνα με το κριτήριο του Ottosen (1977).



Σχήμα 2.3.10: Σύγκριση του κριτηρίου του Ottosen με τριαζονικές δοκιμές στα επίπεδα των γενέτειρων (μελέτες των Richart et al., Balmer και Kupfer et al.)



Σχήμα 2.3.11: Σύγκριση του κριτηρίου του Ottosen με πειραματικά δεδομένα στα επίπεδα των γενέτειρων [Launay et al (1970-1972), Chinn et al. (1965), Mills et al. (1970)]



Σχήμα 2.3.12: Σύγκριση του κριτηρίου του Ottosen $(f'_t/f'_c = 0,08)$ με διαξονικές δοκιμές των Kupfer et al. $(f'_c = 59,4$ MPa)



Σχήμα 2.3.13: Διάγραμμα σχεδιασμού σύμφωνα με το κριτήριο του Ottosen για περίπτωση διαξονικής έντασης: $\sigma_1 > \sigma_2$ (θετικές οι εφελκυστικές)

• Το κριτήριο αστοχίας των Willam & Warnke (1975)

Οι Willam & Warnke το 1975 πρότειναν ένα κριτήριο αστοχίας τριών παραμέτρων για το σκυρόδεμα για τις περιοχές εφελκυσμού και χαμηλής θλίψης. Η καμπύλη αστοχίας που παράγει το κριτήριο αυτό έχει ευθείες γενέτειρες και μη κυκλικές διατομές. Οι ίδιοι ερευνητές εξέλιξαν, αργότερα το κριτήριο αυτό, προσθέτοντας δύο ακόμη παραμέτρους, ώστε να οριστούν καμπύλες γενέτειρες, επεκτείνοντας έτσι, το εύρος εφαρμογής του και στην ζώνη υψηλής θλίψης.



Σχήμα 2.3.14: Διατομή της επιφάνειας αστοχίας στο αποκλίνον επίπεδο

Παρατίθεται, αρχικά, ο τρόπος κατασκευής της μη κυκλικής διατομής, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται σαν βάση για την ανάπτυξη μιας κωνικής επιφάνειας αστοχίας με τον υδροστατικό άξονα ως άξονα περιστροφής. Θεωρούμε

ένα τυπικό αποκλίνον επίπεδο, όπως φαίνεται στο **Σχήμα 2.3.14**. Λόγω της τριπλής συμμετρίας, αρκεί να θεωρήσουμε το τμήμα $0^{\circ} \le \theta \le 60^{\circ}$. Η ζητούμενη καμπύλη μπορεί να θεωρηθεί σαν τμήμα μιας ελλειπτικής καμπύλης. Ο τύπος της έλλειψης με ημιάξονες *α* και *b* είναι:



Σχήμα 2.3.15: Ελλειπτικό τμήμα της επιφάνειας αστοχίας για $0 \le \theta \le 60^{\circ}$

Στο Σχήμα 2.3.15 φαίνονται οι γεωμετρικές σχέσεις του τμήματος της έλλειψης P_1 - P_2 - P_3 , των αξόνων x και y και της καμπύλης αστοχίας P_1 - P_2 με τα r και θ ως πολικές συντεταγμένες. Η συνθήκη συμμετρίας, για $\theta = 0^\circ$ και $\theta = 60^\circ$, επιβάλει στα διανύσματα θέσης r_t και r_c να είναι κάθετα στην έλλειψη, στα σημεία $P_1(0,b)$ και $P_2(m,n)$, αντίστοιχα. Συνεπώς, η διεύθυνση του άξονα y επιλέγεται έτσι ώστε να ταυτίζεται με την διεύθυνση του διανύσματος θέσης r_t , ώστε να εξασφαλίζεται πάντα η καθετότητα στο σημείο P_1 . Οι ημιάξονες a και b μπορούν να οριστούν συναρτήσει των διανυσμάτων θέσης r_t και r_c με βάση την συνθήκη ότι η έλλειψη περνάει από το σημείο $P_2(m,n)$ μαζί με το κάθετο διάνυσμα:

$$\mathbf{n} = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}\right) \tag{2.3.68}$$

Οι συντεταγμένες του διανύσματος αυτού μπορούν να υπολογιστούν από την γεωμετρία του Σχήματος 2.3.15. Μπορούν επίσης να προκύψουν από την μερική παραγώγιση της εξίσωσης 2.3.67:
$$\mathbf{n} = \frac{\left(\partial f \,\partial x, \partial f \,\partial y\right)}{\left[\left(\partial f \,\partial x\right)^2 + \left(\partial f \,\partial y\right)^2\right]^{1/2}} = \frac{\left(m/a^2, n/b^2\right)}{\left[m^2/a^4 + n^2/b^4\right]^{1/2}}$$
(2.3.69)

Οι δύο αυτές σχέσεις ορίζουν μια συνθήκη για τα α και b:

$$a^{2} = \frac{m}{\sqrt{3n}}b^{2}$$
(2.3.70)

Οι συντεταγμένες του σημείου $P_2(m,n)$ εκφράζονται συναρτήσει των διανυσμάτων θέσης r_t και r_c και του ημιάξονα b ως εξής:

$$m = \frac{\sqrt{3}}{2}r_c \qquad n = b - \left(r_t - \frac{1}{2}r_c\right) \tag{2.3.71}$$

Επίσης, δεδομένου ότι η έλλειψη περνάει από το σημείο $P_2(m,n)$ έχουμε:

$$\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} = 1 \tag{2.3.72}$$

Αν αντικαταστήσουμε τις εξισώσεις **2.3.70** και **2.3.71** στην εξίσωση **2.3.72** οι ημιάξονες α και b ορίζονται ως εξής:

$$a^{2} = \frac{r_{c} \left(r_{t} - 2r_{c}\right)^{2}}{5r_{c} - 4r_{t}}$$

$$b = \frac{2r_{t}^{2} - 5r_{t}r_{c} + 2r_{c}^{2}}{4r_{c} - 5r_{c}}$$
(2.3.73)

Επομένως η περιγραφή της έλλειψης μπορεί να γίνει με χρήση πολικών συντεταγμένων r και θ με κέντρο το σημείο O. Με τον τρόπο αυτό η καμπύλη αστοχίας μπορεί επαρκώς να περιγραφεί από την ακτίνα r συναρτήσει της γωνίας θ . Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις ανάμεσα στις καρτεσιανές συντεταγμένες x και y και τις πολικές συντεταγμένες r και θ

$$x = r\sin\theta \qquad y = r\cos\theta - (r_t - b) \tag{2.3.74}$$

η εξίσωση 2.3.67 γίνεται:

$$\frac{r^{2}\sin^{2}\theta}{a^{2}} + \frac{\left[r\cos\theta - (r_{t} - b)\right]^{2}}{b^{2}} = 1$$
(2.3.75)

Η μορφή, τελικά, της σχέσης $r(\theta)$ συναρτήσει των παραμέτρων r_t και r_c είναι:

$$r(\theta) = \frac{2r_c \left(r_c^2 - r_t^2\right) \cos \theta + r_c \left(2r_t - r_c\right) \left[4\left(r_c^2 - r_t^2\right) \cos^2 \theta + 5r_t^2 - 4r_t r_c\right]^{1/2}}{4\left(r_c^2 - r_t^2\right) \cos^2 \theta + \left(r_c - 2r_t\right)^2}$$
(2.3.76)

με γωνιά ομοιότητος θ

$$\cos\theta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2} \left[\left(\sigma_1 - \sigma_2\right)^2 + \left(\sigma_2 - \sigma_3\right)^2 + \left(\sigma_3 - \sigma_1\right)^2 \right]^{1/2}}$$
(2.3.77)

Σημειώνεται ότι η έλλειψη εκφυλίζεται σε κύκλο για $r_t = r_c$ ή ισοδύναμα για $\alpha = b$. Στις γενέτειρες, $\theta = 0^\circ$ και $\theta = 60^\circ$, το διάνυσμα θέσης $r(\theta)$ γίνεται r_t ή r_c , αντίστοιχα.

Η διατομή στο αποκλίνον επίπεδο, όπως έχει αναφερθεί, χρησιμοποιείται ως βάση μιας κωνικής επιφάνειας αστοχίας, για την περίπτωση του τριπαραμετρικού κριτηρίου αστοχίας. Η έκφραση του κριτηρίου είναι ως εξής:

$$f(\sigma_m, \tau_m, \theta) = \frac{1}{\rho} \frac{\sigma_m}{f'_c} + \frac{1}{r(\theta)} \frac{\tau_m}{f'_c} - 1 = 0$$
(2.3.78)

όπου,

$$\sigma_{m} = \frac{1}{3} (\sigma_{1} + \sigma_{2} + \sigma_{3})$$

$$\tau_{m} = \frac{1}{\sqrt{15}} \left[(\sigma_{1} - \sigma_{2})^{2} + (\sigma_{2} - \sigma_{3})^{2} + (\sigma_{3} - \sigma_{1})^{2} \right]^{1/2}$$
(2.3.79)

Η συνάρτηση 2.3.78 μπορεί να ξαναγραφτεί ως:

$$\frac{\tau_m}{f'_c} = r(\theta) \left(1 - \frac{1}{\rho} \frac{\sigma_m}{f'_c} \right)$$
(2.3.80)

Οι τρείς παράμετροι του κριτηρίου είναι τα *r_t*, *r_c* και *ρ*. Η μορφή της επιφάνειας αστοχίας του τριπαραμετρικού κριτηρίου αστοχίας των Willam-Warnke φαίνεται στα Σχήματα 2.3.16 και 2.3.17.



(a) (b) Σχήμα 2.3.16: Επιφάνεια αστοχίας του κριτηρίου Willam-Warnke



(a) (b) Σχήμα 2.3.17: Σύγκριση της επιφάνειας αστοχίας του κριτηρίου Willam-Warnke με πειραματικά αποτελέσματα τριαζονικών δοκιμών [Launay et al. (1972)]

Η εξέλιξη του κριτηρίου αστοχίας των Willam-Warnke, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, περιελάμβανε την πρόσθεση δύο ακόμη παραμέτρων, με στόχο την διαμόρφωση καμπύλων γενέτειρων. Η εξίσωση **2.3.78** αντικαθίσταται από μια πιο γενική έκφραση από την οποία προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις των ακραίων γενέτειρων (εφελκυστική και θλιπτική).

$$\frac{\tau_{mt}}{f'_c} = \frac{r_t}{\sqrt{5}f'_c} = a_0 + a_1 \frac{\sigma_m}{f'_c} + a_2 \left(\frac{\sigma_m}{f'_c}\right)^2 \qquad \gamma \iota \alpha \quad \theta = 0^\circ$$
(2.3.81)

$$\frac{\tau_{mc}}{f'_{c}} = \frac{r_{c}}{\sqrt{5}f'_{c}} = b_{0} + b_{1}\frac{\sigma_{m}}{f'_{c}} + b_{2}\left(\frac{\sigma_{m}}{f'_{c}}\right)^{2} \qquad \gamma \iota \alpha \quad \theta = 60^{\circ}$$
(2.3.82)

Λόγω του περιορισμού ότι οι δύο γενέτειρες τέμνονται με τον υδροστατικό άξονα στο ίδιο σημείο $\sigma_{m0}/f'_c = \rho$ (που αντιστοιχεί σε υδροστατικό εφελκυσμό), οι ανεξάρτητες παράμετροι μειώνονται σε πέντε. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών καθορίζονται από πειραματικά δεδομένα. Οι δύο παραβολικές καμπύλες των γενέτειρων συνδέονται με την μη κυκλική επιφάνεια που αναλύθηκε παραπάνω και δίνεται από την εξίσωση **2.3.76**, η έκφραση της οποίας τροποποιήθηκε για να συμπεριλάβει την εξάρτηση των r_t και r_c από την μέση ορθή τάση σ_m (0° < θ < 60°):

$$r(\sigma_{m},\theta) = \frac{2r_{c}\left(r_{c}^{2} - r_{t}^{2}\right)\cos\theta + r_{c}\left(2r_{t} - r_{c}\right)\left[4\left(r_{c}^{2} - r_{t}^{2}\right)\cos^{2}\theta + 5r_{t}^{2} - 4r_{t}r_{c}\right]^{1/2}}{4\left(r_{c}^{2} - r_{t}^{2}\right)\cos^{2}\theta + \left(r_{c} - 2r_{t}\right)^{2}}$$
(2.3.83)

Σημειώνεται ότι $\tau_m = r/\sqrt{5}$ είναι συνάρτηση των σ_m , θ αντί να είναι παράγωγο δύο αποζευγμένων συναρτήσεων ως προς σ_m και θ (εξίσωση **2.3.80**). Συνεπώς, το πενταπαραμετρικό κριτήριο αφαιρεί την ομοπαραλληλία των διατομών στα αποκλίνοντα επίπεδα, γεγονός που συνέβαινε στο τριπαραμετρικό κριτήριο.

Ο καθορισμός των πέντε παραμέτρων, που χρησιμοποιούνται στο κριτήριο που αναλύεται, γίνεται μέσω χρήσης των παρακάτω δεδομένων:

- 1. Την μονοαξονική θλιπτική αντοχή ($\theta = 60^{\circ}, f_{c}^{\circ} > 0$).
- 2. Την μονοαξονική εφελκυστική αντοχή f'_t ($\theta = 0^\circ$) με αναλογία αντοχής $\overline{f}' = f'_t / f'_c$.
- 3. Την διαξονική θλιπτική αντοχή με ίσες θλιπτικές τάσεις f'_{bc} ($\theta = 0^{\circ}, f'_{bc} > 0$) με αναλογία αντοχής $\overline{f'}_{bc} = f'_{bc}/f'_{c}$.
- 4. Το σημείο υψηλής θλιπτικής έντασης $(\sigma_m/f'_c, \tau_m/f'_c) = (-\overline{\xi}_1, \overline{r}_1)$ στην εφελκυστική γενέτειρα $(\theta = 0^\circ, \overline{\xi}_1 > 0)$.
- 5. Το σημείο υψηλής θλιπτικής έντασης $(\sigma_m/f'_c, \tau_m/f'_c) = (-\overline{\xi}_2, \overline{r}_2)$ στην θλιπτική γενέτειρα ($\theta = 0^\circ$, $\overline{\xi}_2 > 0$).

Επιπροσθέτως, λόγω του ότι οι δύο παραβολικές γενέτειρες, τέμνονται στο ίδιο σημείο στον υδροστατικό άξονα εισάγεται και η εξής σχέση:

$$r_t(\rho) = r_c(\rho) = 0$$
 yia $\rho = \frac{\sigma_{m0}}{f'_c} > 0$ (2.3.84)

Οι εντατικές καταστάσεις των πέντε δοκιμών συνοψίζονται στον Πίνακα 2.3.18.

Test	σ"//,	T_//S.	Ø, deg	r(a ()
1. $\sigma_1 = f_1^c$	17:	$\sqrt{\frac{1}{2}}J$	0	$r_i = \sqrt{f_i}$
$2. \sigma_1 = \sigma_1 = -f_{1'}$	-1760	$\sqrt{h}J_{n}$	0	$r_i = \sqrt{\frac{1}{2}} f'_{in}$
3. $(-\xi_i, \bar{r}_i)$	- ξ ,	7,	0	$r_i = \sqrt{5r_i}f'_i$
4. $\sigma_3 = -f_i^2$	-1	VA	60	$r_i = \sqrt{i}f_i$
5. $(-\bar{\xi}_2, \bar{r}_2)$	- ξ 2	r 1	60	$r_r = \sqrt{5}\bar{r}_1 f_r^r$
6. Eq. (5.179)	p	0	0, 60	$r_1 = r_c = 0$

Πίνακας 2.3.18: Καθορισμός των έξι παραμέτρων στις εξισώσεις 2.3.81 και 2.3.82

Αντικαθιστώντας τις τρείς πρώτες τιμές αντοχής του Πίνακα 2.3.18 στην εξίσωση αστοχίας 2.3.81, προκύπτουν οι παράμετροι στην εφελκυστική γενέτειρα $\theta = 0^{\circ}$.

$$a_{0} = \frac{2}{3} \overline{f'}_{bc} a_{1} - \frac{4}{9} \overline{f'}_{bc} a_{2} + \sqrt{\frac{2}{15}} \overline{f'}_{bc}$$

$$a_{1} = \frac{1}{3} \left(2 \overline{f'}_{bc} - \overline{f'}_{t} \right) a_{2} - \left(\frac{6}{5} \right)^{1/2} \frac{\overline{f'}_{t} - \overline{f'}_{bc}}{2 \overline{f'}_{bc} + \overline{f'}_{t}}$$

$$a_{2} = \frac{\sqrt{\frac{6}{5}} \overline{\xi}_{1} \left(\overline{f'}_{t} - \overline{f'}_{bc} \right) - \sqrt{\frac{6}{5}} \overline{f'}_{t} \overline{f'}_{bc} + \overline{r}_{1} \left(2 \overline{f'}_{bc} + \overline{f'}_{t} \right)}{\left(2 \overline{f'}_{bc} + \overline{f'}_{t} \right) \left(\overline{\xi}_{1}^{2} - \frac{2}{3} \overline{f'}_{bc} \overline{\xi}_{1} + \frac{1}{3} \overline{f'}_{t} \overline{\xi}_{1} - \frac{2}{9} \overline{f'}_{t} \overline{f'}_{bc} \right)}$$

$$(2.3.85)$$

Από την συνθήκη 6 του Πίνακα 2.1.18 προκύπτει ότι στο σημείο κορυφής της επιφάνειας αστοχίας ισχύει ότι:

$$a_2 \rho^2 + a_1 \rho + a_0 = 0 \tag{2.3.86}$$

Από την οποία προκύπτει:

$$\rho = \frac{-\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_0 \alpha_2}}{2\alpha_2} \tag{2.3.87}$$

Αντικαθιστώντας τις τελευταίες τρείς τιμές αντοχών του Πίνακα 2.3.18 στην εξίσωση αστοχίας 2.3.82, προκύπτουν οι τρείς παράμετροι στην θλιπτική γενέτειρα θ = 60°.

$$b_{0} = -\rho b_{1} - \rho^{2} b_{2}$$

$$b_{1} = \left(\overline{\xi}_{2} + \frac{1}{3}\right) b_{2} + \frac{\sqrt{\frac{6}{5}} - 3\overline{r}_{2}}{3\overline{\xi}_{2} - 1}$$

$$b_{2} = \frac{\overline{r}_{2} \left(\rho + \frac{1}{3}\right) - \sqrt{\frac{2}{15}} \left(\rho + \overline{\xi}_{2}\right)}{\left(\overline{\xi}_{2} + \rho\right) \left(\overline{\xi}_{2} - \frac{1}{3}\right) \left(\rho + \frac{1}{3}\right)}$$
(2.3.88)

Συμπερασματικά το κριτήριο αστοχίας των Willam & Warnke (1975) αναπαράγει τα κύρια χαρακτηριστικά της τριαξονικής επιφάνειας αστοχίας που αναπτύχθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Αποτελείται από μια κωνική επιφάνεια με καμπύλες γενέτειρες και μη κυκλικές διατομές και αποτελεί ένα ολοκληρωμένο προσομοίωμα που δεν χρήζει περαιτέρω τροποποιήσεων, όπως προκύπτει και από τις συγκρίσεις με τα πειραματικά δεδομένα. Παρατίθεται, στο **Σχήμα 2.3.19** η σύγκριση της καμπύλης του κριτηρίου των Willam & Warnke (1975) με τα αποτελέσματα της πειραματικής έρευνας των Launay & Gachon (1970).



Σχήμα 2.3.19: Σύγκριση του κριτηρίου αστοχίας των Willam-Warnke με πειραματικά δεδομένα των Launay & Gachon (1972) στο σχήμα (a) και Willam-Warnke (1975) στο σχήμα (b)

2.3.2 Μελέτες αναλυτικών κριτηρίων αστοχίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα

<u>Μελέτη των Murugappan et al. (1993)</u>

Αντικείμενο και θεωρητικό υπόβαθρο

Ο σκοπός της μελέτης αυτής, που δημοσιεύτηκε το 1993 από τους Murugappan et al., ήταν ο προσδιορισμός μιας μαθηματικής έκφρασης της περιβάλλουσας αστοχίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα **στο πεδίο της διαξονικής θλίψης**. Για την κατασκευή μιας τέτοιας έκφρασης οι ερευνητές, χρησιμοποίησαν την έκφραση του τετραπαραμετρικού κριτηρίου αστοχίας του Ottosen (1977), που αναλύθηκε και στην ενότητα **2.3.1**, προσαρμόζοντας κατάλληλα την επιρροή των χαλύβδινων ινών στην συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Για να ληφθεί υπόψη η επίδραση αυτή των ινών, χρησιμοποιήθηκε η παραμένουσα εφελκυστική αντοχή $σ_{tu}$, του ινοπλισμένου σκυροδέματος, μετά τη μέγιστη αντίσταση (**Σχήμα 2.3.20**). Το μέγεθος αυτό μπορεί να προκύψει, για συγκεκριμένη σύνθεση σκυροδέματος και περιεχόμενο ινών, από τυπικές εφελκυστικές δοκιμές [Lim et al. (1987a)].



Σχήμα 2.3.20: Ιδεατό διάγραμμα εφελκυστικής τάσης-παραμόρφωσης για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (Lim et al.)

Για το άοπλο σκυρόδεμα, οι κύριοι τύποι αστοχίας για όλους τους συνδυασμούς διαξονικών εντάσεων (σ_2 και σ_3), παρουσιάζονται στο **Σχήμα 2.3.21** [Nelissen (1972)]. Υπό διαξονική θλίψη, το άοπλο σκυρόδεμα ακολουθεί εφελκυστική αστοχία με ρωγμές παράλληλες προς την αφόρτιστη πλευρά για υψηλές αναλογίες τάσεων σ_2/σ_3 , ενώ για μικρότερες αναλογίες σ_2/σ_3 οι ρωγμές εμφανίζονται κάθετες και στις δύο διευθύνσεις σ_1 και σ_2 .



Σχήμα 2.3.21: Τύποι αστοχίας σκυροδέματος υπό διαξονικές εντάσεις (Nelissen 1972)

Η προσθήκη χαλύβδινων ινών δεν επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του σκυροδέματος πριν την ρηγμάτωση. Μετά την ρηγμάτωση, αντιθέτως, η παρουσία των ινών μειώνει την παραμόρφωση κατά την διεύθυνση της κύριας εφελκυστικής παραμόρφωσης, παρέχοντας περίσφιγξη. Όπως φάνηκε και από τις πειραματικές έρευνες των Yin et al. (1989) (βλ. ενότητα 2.2.2) και Kosaka et al. (1985), η αύξηση της διαξονικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος, οφείλεται στην περίσφιγξη αυτή. Επίσης, οι Tanigawa et al. (1983) πρότειναν την θεώρηση ότι η ανελαστική συμπεριφορά του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη είναι παρόμοια με την συμπεριφορά του άσπλου σκυροδέματος υπό τριαξονική θλίψη.

Ακολουθώντας τις παρατηρήσεις αυτές, οι Murugappan et al. (1993) προσομοίωσαν την περίσφιγξη που δημιουργούν οι χαλύβδινες ίνες με μια ισοδύναμη πλευρική ένταση κατά την διεύθυνση της σ_1 (**Σχήμα 2.3.22**). Συνεπώς η περιβάλλουσα αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη (σ_2 , σ_3), μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη της περιβάλλουσας αστοχίας του άοπλου σκυροδέματος υπό τριαξονική θλίψη (σ_1 , σ_2 , σ_3), όπου σ_1 είναι η τάση περίσφιγξης.



Σχήμα 2.3.22: Μοντέλο για την θλιπτική διαξονική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος

Στην εν λόγω έρευνα γίνεται η παραδοχή ότι η τάση σ_1 είναι ίση με – σ_{tu} . Σύμφωνα με τους Lim et al. (1987), η εφελκυστική αντοχή σ_{tu} εξαρτάται από την περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών (V_f), έναν συντελεστή προσανατολισμού (η_0), έναν συντελεστή αποδοτικότητας μήκους (η_l), τον λόγο διαστάσεων (l_f / d_f , όπου l_f είναι το μήκος της ίνας και d_f η διάμετρος αυτής), και την οριακή τάση συνάφειας (τ_u) των ινών και είναι:

$$\sigma_{tu} = \frac{\eta_l \eta_0 V_f l_f \tau_u}{2r'} \tag{2.3.89}$$

όπου, r' είναι ο λόγος του εμβαδού διατομής προς την περίμετρο της ίνας. Οι τιμές των η_0 και η_l μπορούν να υπολογιστούν, όπως προτείνεται από τους Lim et al. (1987), ως εξής:

$$\eta_l = \begin{cases} 0,5 & \gamma \iota \alpha \quad l_f \le l_c \\ 1 & \gamma \iota \alpha \quad l_f > l_c \end{cases}$$
(2.3.90)

όπου, l_f και l_c είναι το πραγματικό και το κρίσιμο μήκος, αντίστοιχα, της ίνας. Το κρίσιμο μήκος l_c υποδηλώνει το απαιτούμενο μήκος, ώστε να αναπτυχθεί η οριακή

τάση σ_{fu} , της ίνας, με υπόθεση ομοιόμορφης τάσης συνάφειας τ_u . Είναι, $l_c = 0.5\sigma_{fu}d/\tau_u$ με d την διάμετρο της ίνας.

$$\eta_0 = \int_0^{\overline{\rho}} \int_0^{\overline{\theta}} \cos\theta \cos\rho d\theta d\rho \Big/ \int_0^{\overline{\rho}} \int_0^{\overline{\theta}} d\theta d\rho = \sin\overline{\theta} \sin\overline{\rho}/\overline{\theta} \,\overline{\rho}$$
(2.3.91)

όπου

$$\overline{\theta} = \sin^{-1} \left(h / l_f \right) \le \frac{\pi}{2}$$

$$\overline{\rho} = \sin^{-1} \left(b / l_f \right) \le \frac{\pi}{2}$$
(2.3.92)



όπου *h* και *b* το πάχος και το πλάτος του δοκιμίου σε σχέση με το μήκος της ίνας (**Σχήμα 2.3.23**), για ίνες τυχαία κατανεμημένες, στον τρισδιάστατο χώρο. Για *h*, $b > l_f$, $\eta_0 = 0,405$.

Σημειώνεται, επίσης, ότι στην θεώρηση του αναλόγου άοπλου σκυροδέματος, που χρησιμοποιείται στην συγκεκριμένη μελέτη, η τριαξονική φόρτιση

Σχήμα 2.3.23: Σύμμεικτο στοιχείο υπό μονοαξονική ένταση

που εφαρμόζεται στο σκυρόδεμα δεν είναι πλήρως αναλογική, καθώς η μια εκ των τριών κυρίων τάσεων ($\sigma_1 = -\sigma_{tu}$) θεωρείται σταθερή καθ' όλη την εξέλιξη της φόρτισης. Το κριτήριο αστοχίας του Ottosen (1977), που επιλέχθηκε από τους ερευνητές για την απλότητα της εφαρμογής του, είναι κατάλληλο τόσο για αναλογικές όσο και για μη αναλογικές φορτίσεις.

Υπενθυμίζεται, σύμφωνα με όσα αναλύθηκαν στην ενότητα **2.3.1**, ότι η έκφραση του κριτηρίου του Ottosen είναι:

$$f(I_1, J_2, \cos 3\theta) = A \frac{J_2}{f_{cp}^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_{cp}} + B \frac{I_1}{f_{cp}} - 1 = 0$$
(2.3.90)

όπου, f_{cp} είναι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του άοπλου σκυροδέματος και λ είναι συνάρτηση του cos 3 θ :

$$\lambda = \frac{1}{r} = K_1 \cos\left[\frac{1}{3}\cos^{-1}(K_2 \cos 3\theta)\right] \qquad \gamma \iota \alpha \qquad \cos 3\theta \ge 0 \qquad (2.3.91)$$

και

$$\lambda = \frac{1}{r} = K_1 \cos\left[\frac{\pi}{3} - \frac{1}{3}\cos^{-1}(-K_2\cos 3\theta)\right] \qquad \gamma \iota \alpha \qquad \cos 3\theta \le 0 \qquad (2.3.92)$$

Οι παράμετροι A, B, K_1 και K_2 εξαρτώνται από τον λόγο της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής προς την μονοαξονική θλιπτική αντοχή (f_{tp}/f_{cp}). Για τιμή f_{tp}/f_{cp} = 0,08, που προσεγγίζει την τιμή για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα με αμελητέα ποσότητα ινών, οι τιμές των A, B, K_1 και K_2 είναι αντίστοιχα 1,8076, 4,0962, 14,4863 και 0,9914 (Ottosen 1977).

Περιβάλλουσες αστοχίας και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Για την κατασκευή της περιβάλλουσας αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε διαξονική θλίψη, η τιμή του σ_{tu} υπολογίζεται από την σχέση **2.3.89**. Κρατώντας την τιμή της $\sigma_1 = -\sigma_{tu}$ σταθερή, η αναλογία σ_2/σ_3 παίρνει τιμές από 0 έως 1 σε κατάλληλα διαστήματα. Οι τυπικές διαξονικές θλιπτικές περιβάλλουσες αστοχίας με μονοαξονική θλιπτική αντοχή 40 MPa δίνονται στο **Σχήμα 2.3.24** για διάφορες περιεκτικότητες ινών. Από το σχήμα γίνεται φανερό ότι η αύξηση της περιεκτικότητας των ινών οδηγεί σε αύξηση της διαξονικής αντοχής. Στην ίδια παρατήρηση είχαν καταλήξει και οι Yin et al. (1989) και Traina & Mansour (1991), όπως αναλύθηκε και στην ενότητα **2.2.2**.



Σχήμα 2.3.24: Περιβάλλουσες αστοχίας υπό διαξονική θλίψη για ινοπλισμένο σκυρόδεμα

Στα πειράματα των Traina & Mansour (1991), δοκιμάστηκαν κυβικά δοκίμια πλευράς 76 mm και έγινε χρήση χαλύβδινων ινών με αγκυρώσεις στα άκρα. Για τον συγκεκριμένο τύπο ίνας είναι γνωστή η τιμή της τ_u , καθώς είχε προσδιοριστεί στην έρευνα των Lim et al (1987a). Χρησιμοποιώντας το μέγεθος αυτό, υπολογίστηκαν οι τιμές του σ_{tu} ως 0,84 MPa, 1,68 MPa και 2,52 MPa, αντίστοιχα για περιεκτικότητες V_f 0,5%, 1% και 1,5% αντίστοιχα. Οι τιμές των οριακών φορτίων συνοψίζονται στον **Πίνακα 2.3.25** και παρουσιάζεται η σύγκριση των περιβαλλουσών αστοχίας, στο **Σχήμα 2.3.26**. Γενικά, παρατηρείται ότι η πρόβλεψη του αναλυτικού προσομοιώματος αστοχίας που αναπτύχθηκε, συμφωνεί γενικά με τα πειραματικά δεδομένα των Traina & Mansour, για τις διάφορες περιεκτικότητες ινών και κυρίως στην περιεκτικότητα 1,5% (Είναι ιδιαίτερα εμφανές για $\sigma_1 = \sigma_2$).

Serial number (1)	V _f % (2)	σ ₂ /σ ₃ (3)	$(\sigma_3/f_{cp})_{ult}$ test (4)	$(\sigma_3/f_{cp})_{ult}$ analytical (5)	Col(4)/col(5) (6)
1	0.5	0.5	1.53	1.55	0.99
2	0.5	1.0	1.46	1.33	1.09
3	1.0	0.5	1.79	1.73	1.03
4	1.0	1.0	1.56	1.49	1.05
5	1.5	0.5	1.82	1.90	0.96
6	1.5	1.0	1.85	1.65	1.12

Πίνακας 2.3.25: Σύγκριση αντοχών με τα αποτελέσματα των Traina & Mansour (1991) σ_3 / f_{cp}



Σχήμα 2.3.26: Περιβάλλουσες αστοχίας ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη [Σύγκριση με τις καμπύλες των Traina & Mansour (1991)]

Οι Yin et al. χρησιμοποίησαν για τις ανάγκες των πειραμάτων τους, δοκίμια μορφής πλακιδίου ($152 \times 152 \times 38$ mm) και λείες, ευθύγραμμες ίνες για τις οποίες, η τιμή της τ_u δεν καταγράφηκε. Στην έρευνα που αναλύεται, έγινε υπόθεση ότι ισχύει τ_u = 4,15 MPa για τον συγκεκριμένο τύπο ινών. Η υπόθεση, αυτή, βασίστηκε στην τιμή της τ_{μ} για λείες ίνες, όπως είχε υπολογιστεί από τους Swamy & Mangat (1974), Maage (1978) και Mansur et al. (1989). Χρησιμοποιώντας αυτή την τιμή, οι τιμές της σ_{tu} υπολογίστηκαν ως 1,153 MPa, και 2,306 MPa για περιεκτικότητες ινών 1% και 2% με μήκος 25 mm και ως 0,756 MPa για 1% περιεκτικότητας ινών 19 mm. Η σύγκριση των αντοχών παρατίθεται στον Πίνακα 2.3.27 και οι περιβάλλουσες αστοχίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.28. Παρατηρείται ότι υπάρχει μια καλή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων από την περιβάλλουσα που προέκυψε από το αναλυτικό κριτήριο. Οι σχετικά μεγάλες διαφορές στις αντοχές του άοπλου σκυροδέματος, αποδίδονται στο γεγονός ότι για την κατασκευή των δοκιμίων οι Yin et al. χρησιμοποίησαν αδρανή υψηλής αντοχής. Επίσης κάποια αναλυτικά αποτελέσματα για περιεκτικότητα 2% δεν δίνουν συντηρητικά αποτελέσματα και αυτό αποδίδεται στην δυσκολία ανάμιξης και συμπύκνωσης του σκυροδέματος όσο αυξάνει το περιεγόμενο σε ίνες (Λόγω του πάχους των 38 mm σε σχέση με το μήκος της ίνας $l_f = 25$ mm). Ακόμη, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 2.3.28 για αναλογία τάσεων $\sigma_2/\sigma_3 = 1$ η αντοχή για περιεκτικότητα 2% είναι μικρότερη από την αντίστοιχή για περιεκτικότητα 1%. Αυτό δείχνει ότι ίσως θα έπρεπε να τεθεί κάποιο όριο στις τιμές της σ_{tu} .

S1. no. (1)	<i>l_r</i> (mm) (2)	V _f % (3)	σ ₂ /σ ₃ (4)	$(\sigma_3/f_{cp})_{ult}$ test (5)	$(\sigma_3/f_{cp})_{ult}$ analytical (6)	Col(5)/col(6) (7)
1	25.40	1.0	0.2	1.53	1.55	0.99
2	25.40	1.0	0.5	1.70	1.64	1.04
3	25.40	1.0	1.0	1.66	1.41	1.18
4	25.40	2.0	0.2	1.68	1.78	0.94
5	25.40	2.0	0.5	1.73	1.90	0.91
6	25.40	2.0	1.0	1.62	1.64	0.99
7	19.05	1.0	0.2	1.58	1.46	1.08
8	19.05	1.0	0.5	1.54	1.55	1.00
9	19.05	1.0	1.0	1.54	1.33	1.16

Σχήμα 2.3.27: Σύγκριση αντοχών με τα αποτελέσματα των Yin et al. (1989)



Σχήμα 2.3.28: Περιβάλλουσες αστοχίας ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονική θλίψη [Σύγκριση με τις καμπύλες των Yin et al. (1989)]

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι το αναλυτικό κριτήριο αστοχίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, που αναπτύχθηκε από τους Murugappan et al., προσφέρει μια καλή προσέγγιση των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων, με τα οποία συγκρίθηκε. Οι πληροφορίες που αποκτώνται, όμως, αφορούν μόνο το πεδίο της διαξονικής θλίψης. Η έκφραση του προσομοιώματος που αναλύθηκε περιλαμβάνει την χρήση ενός αποδεκτού αναλυτικού κριτηρίου αστοχίας του άοπλου σκυροδέματος, στο οποίο προσαρμόζεται με κατάλληλες παραδοχές η επιρροή των χαλύβδινών ινών. Οι παραδοχές, αυτές, των Murugappan et al. (1993) που έγιναν με σκοπό την προσομοίωση της παρουσίας των ινών με μια ισοδύναμη πλευρική τάση, υιοθετήθηκαν και από μεταγενέστερους μελετητές. Το εν λόγω κριτήριο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εξίσου, και για την κατασκευή διαγραμμάτων τάσεωνπαραμορφώσεων υπό διαξονική θλίψη.

<u>Μελέτη των Hu et al. (2003)</u>

Αντικείμενο και θεωρητικό υπόβαθρο

Η συγκεκριμένη μελέτη, που δημοσιεύτηκε από τους Hu et al. το 2003, στόχευε στον προσδιορισμό μιας μαθηματικής έκφρασης της περιβάλλουσας αστοχίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όμως, έγινε προσπάθεια να διαμορφωθεί ένα κριτήριο αστοχίας που να καλύπτει όλα τα πεδία διαξονικών φορτίσεων (διαξονική θλίψη, διαξονικό εφελκυσμό και συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης). Στα περισσότερα μαθηματικά κριτήρια η καμπύλη αστοχίας κατασκευάζεται με διαδοχική παράθεση διαφόρων καμπύλων τμημάτων. Η απουσία εφαπτομενικής συνέχειας στα σημεία τομής των τμημάτων αυτών οδηγεί σε αριθμητικές δυσκολίες, οι οποίες, για να ξεπεραστούν απαιτούνται πολύπλοκες διαδικασίες. Στην εν λόγω έρευνα οι Hu et al. παρουσίασαν ένα σχετικά απλό κριτήριο αστοχίας, που περιλαμβάνει την κατασκευή μιας συνεχούς καμπύλης που καλύπτει όλα τα πεδία εντάσεων.

Το σχήμα της καμπύλης αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό διαξονική ένταση είναι, γενικά, ωοειδές. Για την κατασκευή μιας τέτοιας καμπύλης, χρησιμοποιείται μια κεκλιμένη έλλειψη η οποία, παραμορφώνεται, κατάλληλα, στο επίπεδο. Η έκφραση της έκκεντρης έλλειψης, δίνεται από την εξής σχέση:

$$\frac{\left(x-c\right)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$
(2.3.93)

ή

$$\frac{y^2}{b^2} = 1 - \frac{\left(x - c\right)^2}{a^2}$$
(2.3.94)

Η έλλειψη μπορεί να παραμορφωθεί με χρήση μιας καμπύλης (Σχήμα 2.3.29), ως εξής:

$$\frac{y^2}{b^2} = \left(1 - \frac{(x-c)^2}{a^2}\right) (A + Bx)^a$$
(2.3.95)



Σχήμα 2.3.29: Παραμόρφωση της έλλειψης

Για τιμή του εκθέτη a = 0, προκύπτει μια έκκεντρη έλλειψη, η οποία μετά από περιστροφή είναι κατάλληλη μόνο για την περιοχή της διαξονικής θλίψης (Buyukozturk 1977). Για τιμή a = 1, προκύπτει και πάλι μια έκκεντρη έλλειψη, κατάλληλη μόνο για το πεδίο διαξονικής θλίψης (Khennane & Baker 1992a). Για a > 1, προκύπτει μια αρκετά παραμορφωμένη έλλειψη που προσεγγίζει την πραγματική μορφή της περιβάλλουσας αστοχίας του ινοπλισμένου σκυροδέματος, με αποδεκτή ακρίβεια όπως φαίνεται και στο **Σχήμα 2.3.30**.

Στην εξίσωση 2.3.95 τίθενται ορισμένοι περιορισμοί:

- 1. Το x πρέπει να παίρνει τιμές μέσα στην έλλειψη, δηλαδή, πρέπει $c -a \le x \le c +a$.
- 2. A + B x ≥ 0, ο περιορισμός αυτός είναι απαραίτητος τη στιγμή που το a, δεν είναι ζυγός ακέραιος. Η συνθήκη ικανοποιείται αν A ≥ 0 και x ≥ -A/B, όπου B ≥ 0, ή x ≤ -A/B, όπου B ≤ 0.
- Πρέπει να εξασφαλίζεται η κυρτότητα. Πρέπει, λοιπόν, να πληρούνται ταυτόχρονα οι δύο παρακάτω συνθήκες:
 - Η καμπύλη $y_a = (A + B)^a$ πρέπει να μη έχει σημείο καμπής στο διάστημα

[*c* -*a*, *c* +*a*] (Σχήμα 2.3.29). Είναι:

$$\frac{d^2 y_a}{dx^2} = a(a-1)B^2 (A+Bx)^{a-2} = a(a-1)B^2 \frac{(A+Bx)^a}{(A+Bx)^2}$$
(2.3.96)

Аπό τον περιορισμό 2., είναι $A + B x \ge 0$, και συνήθως $a \ge 1$, οπότε $d^2 y_a/dx^2 \ge 0$, συνεπώς δεν υπάρχει σημείο καμπής και το y_a είναι κυρτή συνάρτηση μέσα στο διάστημα. Επομένως η εξίσωση **2.3.95** μπορεί επίσης, να είναι κυρτή μέσα στο διάστημα ενδιαφέροντος.

• Н каµти́л $y_a = (A + Bx)^a$ δεν πρέπει να τέµνεται µε την έλλειψη (Σχήµа 2.3.29). Θεωρούµε το πάνω µισό τµήµα της έλλειψης, το οποίο µπορεί να εκφραστεί ως $y_e = b\sqrt{1 - (x - c)^2/a^2}$. Η συγκεκριµένη απαίτηση, µπορεί να εκπληρωθεί εάν η τεταγµένη y της συνάρτησης y_a είναι µεγαλύτερη ή ίση της τεταγµένης y_e για όλα τα x:

$$Dy = y_{a} - y_{e} = (A + Bx)^{a} - b\sqrt{1 - (x - c)^{2}/a^{2}} \ge 0$$

$$x \in [c - a, c + a]$$
(2.3.97)



Σχήμα 2.3.30: Προτεινόμενες περιβάλλουσες αστοχίας

Συνεπώς,

$$(A+Bx)^{a} \ge b\sqrt{1-(x-c)^{2}/a^{2}} = y_{e}$$
 (2.3.98)

Aφού A + B x ≥ 0 , όπως απαιτήθηκε παραπάνω, η εξίσωση **2.3.98** μπορεί να γραφτεί:

$$A + Bx \ge \sqrt[a]{y_e} \tag{2.3.99}$$



Σχήμα 2.3.31: Παραμορφωμένες ελλείψεις

Βιβλιογραφική διερεύνηση

Επομένως, μπορεί να γίνει μια σύγκριση μεταξύ μιας ευθείας και μιας παραμορφωμένης έλλειψης (Σχήμα 2.3.31). Σημειώνεται, ότι το δεξί σκέλος της ανισότητας 2.3.99 στρέφει πάντα τα κοίλα προς τα κάτω αν $a \ge 1$ και το αριστερό σκέλος είναι ευθεία γραμμή. Στην οριακή της θέση, η

ευθεία είναι εφαπτόμενη στην παραμορφωμένη έλλειψη. Σαν αποτέλεσμα η παράμετρος *B* μπορεί να θεωρηθεί ως η κλίση της εφαπτομένης στην ελλειπτική καμπύλη. Έστω:

$$F_{\rm a} = \sqrt[4]{y_e} = \left[b \left(1 - \frac{\left(x - c\right)^2}{a^2} \right)^{1/2} \right]^{1/a}$$
(2.3.100)

Επομένως η κλίση της εφαπτομένης είναι:

$$F'_{a} = B = \frac{b^{1/a}}{aa^{2}} (c - x) \left(1 - \frac{(x - c)^{2}}{a^{2}} \right)^{1/2a - 1}$$
(2.3.101)

Από τις εξισώσεις 2.3.100 και 2.3.101 γίνεται φανερό ότι η κλίση της εφαπτομένης μεταβάλλεται ομαλά και παίρνει τιμές από $+\infty$ μέχρι $-\infty$ όσο το x κινείται από (-|c|-a) έως (-|c|+a), επομένως το B παίρνει οποιαδήποτε πραγματική τιμή.

Παρατηρώντας την εξίσωση **2.3.100**, γίνεται φανερό ότι η παράμετρος Aπρέπει να ικανοποιεί ένα συγκεκριμένο κριτήριο, προκειμένου να ισχύει η απαίτηση, να μην τέμνεται η ευθεία με την έλλειψη. Υποθέτοντας ότι η (A + Bx) εφάπτεται της έλλειψης στο $P(x^*, y_e^*)$, με $x^* \in [c - a, c + a]$, τότε η κλίση εφαπτομένης δίνεται από:

$$B^{*} = \frac{b^{1/a}}{aa^{2}} (c - x^{*}) \left(1 - \frac{(x^{*} - c)^{2}}{a^{2}} \right)^{1/2a - 1}$$
(2.3.102)

επομένως, η παράμετρος Α δίνεται από:

$$A \ge y_e^* - B^* x^* \tag{2.3.103}$$

Η έκφραση **2.3.103** δείχνει ότι για δεδομένη τιμή του *B*, υπάρχει ένα κατώτατο όριο για την τιμή της παραμέτρου *A*, τέτοιο ώστε να ικανοποιεί τις συνθήκες **2.3.98**, **2.3.99**. Συνεπώς η καμπύλη $y_a = (A + Bx)^a$ δεν τέμνει την έλλειψη (Σχήμα 2.3.29).

Συνοψίζοντας, εάν η ευθεία γραμμή A + Bx, βρίσκεται πάνω και παράλληλα σε μια εφαπτομένη της καμπύλης που κατασκευάζεται με βάση την έλλειψη, ενώ η παράμετρος a είναι μεγαλύτερη ή ίση της μονάδας, τότε η συνθήκη κυρτότητας είναι θεωρητικά εξασφαλισμένη.

Προσέγγιση της Περιβάλλουσας αστοχίας και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Η πρακτική προσέγγιση της περιβάλλουσας αστοχίας, βασίζεται στα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα. Κάνοντας χρήση του αναπτύγματος σειράς Taylor για τον όρο $(A + Bx)^a$ με a = 3, η εξίσωση **2.3.95**, μπορεί να γραφτεί ως:

$$y^{2} = \lambda_{1} + \lambda_{2}x + \lambda_{3}x^{2} + \lambda_{4}x^{3} + \lambda_{5}x^{4} + \lambda_{6}x^{5}$$
(2.3.104)

όπου,

$$\lambda_{1} = (b/a)^{2} (a^{2} - c^{2}) A^{3}$$
$$\lambda_{2} = (b/a)^{2} [3(a^{2} - c^{2})B + 2cA] A^{2}$$
$$\lambda_{3} = (b/a)^{2} [3(a^{2} - c^{2})B^{2} - A^{2} + 6cAB] A$$
$$\lambda_{4} = (b/a)^{2} [(a^{2} - c^{2})B^{2} - 3A^{2} + 6cAB] B$$
$$\lambda_{5} = (b/a)^{2} [-3A + 2cB] B^{2}$$
$$\lambda_{6} = -(b/a)^{2} B^{3}$$

Οι παραπάνω έξι παράμετροι (λ₁ έως λ₂) μπορούν να προσδιοριστούν από έξι αντιπροσωπευτικά πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 2.3.32). Η εξίσωση 2.3.104 ορίζει μια παραμορφωμένη καμπύλη που παρέχει την ζητούμενη περιβάλλουσα αστοχίας, η οποία είναι κατάλληλη και για το άοπλο σκυρόδεμα.



Μετασχηματίζοντας την εξίσωση **2.3.104**, μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂ (Σχήμα **2.3.32**).

$$\frac{1}{2}(\sigma_{2}-\sigma_{1})^{2} = \lambda_{1} + \frac{\sqrt{2}}{2}\lambda_{2}(\sigma_{1}+\sigma_{2}) + \frac{1}{2}\lambda_{3}(\sigma_{1}+\sigma_{2})^{2} + \left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{3}\lambda_{4}(\sigma_{1}+\sigma_{2})^{3} + \frac{1}{4}\lambda_{5}(\sigma_{1}+\sigma_{2})^{4}$$
(2.3.105)
$$+\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\right)^{5}\lambda_{6}(\sigma_{1}+\sigma_{2})^{5}$$

Τροποποιώντας την εξίσωση έχουμε:

$$\frac{1}{2}(\sigma_{2} - \sigma_{1})^{2} = \kappa_{1} - 2\sigma_{1}\sigma_{2} + \kappa_{2}(\sigma_{1} + \sigma_{2}) + \kappa_{3}(\sigma_{1} + \sigma_{2})^{2} + \kappa_{4}(\sigma_{1} + \sigma_{2})^{3} + \kappa_{5}(\sigma_{1} + \sigma_{2})^{4} + \kappa_{6}(\sigma_{1} + \sigma_{2})^{5}$$
(2.3.106)

όπου

$$\kappa_{1} = -\lambda_{1}, \qquad \kappa_{2} = -(\sqrt{2}/2)\lambda_{2}, \qquad \kappa_{3} = -(\lambda_{3}-1)/2, \kappa_{4} = -(\sqrt{2}/2)^{3}\lambda_{4}, \qquad \kappa_{5} = -\lambda_{5}/4, \qquad \kappa_{6} = -(\sqrt{2}/2)^{5}\lambda_{6}$$
(2.3.107)

Εισάγοντας τις αναλλοίωτες των τάσεων, οι οποίες ορίστηκαν εκτενώς στην ενότητα 2.3.1 για $\sigma_3 = 0$:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 \tag{2.3.108}$$
$$I_2 = \sigma_1 \sigma_2$$

η εξίσωση 2.3.106 γίνεται:

$$F(I_1, I_2) = \kappa_1 - 2I_2 + \kappa_3 I_1^2 + \kappa_4 I_1^3 + \kappa_5 I_1^4 + \kappa_6 I_1^5 = 0$$
(2.3.109)

Οι έξι παράμετροι της εξίσωσης **2.3.104** ή **2.3.106** ή **2.3.109** μπορούν να προσδιοριστούν, με την λύση ενός συστήματος έξι γραμμικών εξισώσεων που προκύπτουν από έξι σημεία από πειραματικές δοκιμές. Αριθμητικές δοκιμές έδειξαν, ότι το εξαπαραμετρικό κριτήριο, με a = 3, δίνει καλύτερη προσέγγιση της πειραματικής περιβάλλουσας, σε σχέση με το πενταπαραμετρικό η το τετραπαραμετρικό κριτήριο (για a = 2 ή 1).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του παραπάνω κριτηρίου ήταν τα πειραματικά αποτελέσματα των Yin et al. (1989) και Traina & Mansour (1991). Οι πειραματικές αυτές, έρευνες και τα αποτελέσματα τους αναλύθηκαν εκτενώς στην ενότητα **2.2.2**. Λόγω της απουσίας δεδομένων για τις περιπτώσεις διαξονικού εφελκυσμού και εφελκυσμού-θλίψης έγιναν οι εξής υποθέσεις: 1) Η μονοαξονική εφελκυστική αντοχή θεωρήθηκε ίση με το 12% της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ($f'_t = 0,12 f'_c$). 2) Η διαξονική εφελκυστική αντοχή θεωρήθηκε ίση με το 8% της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής ($f'_{bt} = 0,08 f'_c$, για $+\sigma_1/+\sigma_2 = 1$). Η σύγκριση της περιβάλλουσας αστοχίας, που προτάθηκε, με τα πειραματικά δεδομένα των μελετών των Yin et al. (1989) και Traina & Mansour (1991), παρουσιάζονται στα **Σχήματα 2.3.33** και **2.3.34**.



Σχήμα 2.3.33: Σύγκριση προτεινόμενης περιβάλλουσας αστοχίας με αποτελέσματα μελέτης Yin et



Σχήμα 2.3.34: Σύγκριση προτεινόμενης περιβάλλουσας αστοχίας με αποτελέσματα μελέτης Traina & Mansour (1991), για ίνες τύπου Ι με αγκυρώσεις στα άκρα και λόγο L/d = 60

Συμπερασματικα, μπορούμε να πούμε ότι το κριτήριο αστοχίας που αναπτύχθηκε, δίνει μια καλή προσέγγιση των πειραματικών δεδομένων με τα οποία συγκρίθηκε. Η περιβάλλουσα που περιγράφεται από την εξίσωση 2.3.104 ή 2.3.106 ή 2.3.109 (Σχήμα 2.3.30) παρουσιάζει το πλεονέκτημα ότι είναι ομαλή σε όλα τα πεδία εντάσεων. Παρέχει στοιχεία και για τα πεδία εφελκυσμού-εφελκυσμού και εφελκυσμού-θλίψης, ενώ δεν δημιουργεί αριθμητικές δυσκολίες λόγω ύπαρξης γωνιών.

<u>Μελέτη των Seow & Swaddiwudhipong (2005, 2006)</u>

Αντικείμενο και θεωρητικό υπόβαθρο

Η συγκεκριμένη μελέτη, που δημοσιεύτηκε το 2005, είχε ως σκοπό την μόρφωση ενός καθολικού κριτηρίου αστοχίας για το άοπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα, ώστε να είναι εφικτή η πρόβλεψη της εντατικής κατάστασης στην αστοχία του υλικού υπό οποιαδήποτε τριαξονική φόρτιση. Σε αντίθεση με το άοπλο σκυρόδεμα, οι μελέτες που έχουν διεξαχθεί για την δημιουργία ενός κριτηρίου αστοχίας για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα είναι πρόσφατες και περιορισμένες. Η συνήθης τακτική για την εξαγωγή της μαθηματικής έκφρασης ενός κριτηρίου αστοχίας, είναι η τροποποίηση ήδη υπαρχόντων κριτηρίων αστοχίας του άοπλου σκυροδέματος. Κριτήρια που είχαν χρησιμοποιηθεί από ερευνητές, για το σκοπό



Σχήμα 2.3.34: προτεινόμενη επιφάνεια αστοχίας

αυτό, ήταν κυρίως αυτά των Ottosen (1977) και Willam & Warnke (1975) (Ενότητα **2.3.1**).

Οι Seow & Swaddiwudhipong (2005), στην συγκεκριμένη μελέτη, προτείνουν μια μαθηματική έκφραση της περιβάλλουσας αστοχίας που βασίζεται στο κριτήριο των Willam & Warnke (1975), με ορισμένες τροποποιήσεις. Οι διαφορές του εν λόγω αναλυτικού προσομοιώματος συνίστανται, κυρίως, στην έκφραση των γενέτειρων της επιφάνειας αστοχίας. Όπως προκύπτει και από την συμπεριφορά του σκυροδέματος, οι γενέτειρες πρέπει να μην τέμνονται με τον υδροστατικό άξονα, υπό υψηλές θλιπτικές εντάσεις, όπως συμβαίνει στο κριτήριο των Willam & Warnke (1975) (Σχήμα 2.3.34). Οι συναρτήσεις που επιλέχθηκαν ικανοποιούν την απαίτηση αυτή. Επίσης, η επιφάνεια αστοχίας που αναπτύσσεται, ικανοποιεί τα γενικά χαρακτηριστικά της περιβάλλουσας αστοχίας, όπως αυτά περιγράφηκαν στην ενότητα 2.3.1. Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν το εν λόγω κριτήριο.

$$\frac{\xi}{f_{cu}} = a_2 \left(\frac{k\rho_t}{f_{cu}}\right)^2 + a_1 \left(\frac{k\rho_t}{f_{cu}}\right) + a_0, \quad k \le 1$$
(2.3.110)

$$\frac{\xi}{f_{cu}} = b_2 \left(\frac{\rho_c}{f_{cu}}\right)^2 + b_1 \left(\frac{\rho_c}{f_{cu}}\right) + b_0$$
(2.3.111)

$$\rho(\xi,\theta) = \frac{2\rho_c \left(\rho_c^2 - \rho_t^2\right) \cos\theta + \rho_c \left(2\rho_t - \rho_c\right) \left[4\left(\rho_c^2 - \rho_t^2\right) \cos^2\theta + 5\rho_t^2 - 4\rho_t \rho_c\right]^{1/2}}{4\left(\rho_c^2 - \rho_t^2\right) \cos^2\theta + \left(\rho_c - 2\rho_t\right)^2}$$
(2.3.112)

όπου,

$$\cos\theta = \frac{3(\sigma_3 - \sigma_m)}{\sqrt{6}\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 3\sigma_m^2}}, \quad \gamma \iota \alpha \sigma_3 \ge \sigma_2 \ge \sigma_1 \quad (2.3.113)$$

όπου σ_m, η μέση τάση και f_{cu} , η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. Τα a_0 , a_1 , a_2 , b_2 , b_1 και b_0 είναι σταθερές που θα προσδιοριστούν. Η παράμετρος k στην εξίσωση **2.3.110**, χρησιμεύει για την τροποποίηση του κριτηρίου, ώστε να περιλαμβάνει και την παρουσία ινών. Για την περίπτωση του άοπλου σκυροδέματος το k παίρνει την τιμή 1. Οι παράμετροι a_0 και b_0 αναφέρονται στο σημείο τομής της θλιπτικής και της εφελκυστικής γενέτειρας με τον υδροστατικό άζονα. Στο σημείο αυτό το σκυρόδεμα υπόκειται σε τριαξονικό εφελκυσμό. Λόγω της περιορισμένης ύπαρξης πειραματικών δεδομένων στην περιοχή αυτή, η τιμή τις τριαξονικής εφελκυστικής αντοχής λαμβάνεται ως, $f_{ttt} = 1,0$ $f_t = 0,1$ f_{cu} , τιμή που δίνει ικανοποιητική προσέγγιση στα αποτελέσματα. Συνεπώς τα a_0 και b_0 υπολογίζονται ως εξής:

$$a_0 = b_0 = \frac{\sqrt{3}f_{ttt}}{f_{cu}} = 0,1732$$
 (2.3.114)

Οι τιμές των υπολοίπων παραμέτρων υπολογίστηκαν με χρήση πειραματικών δεδομένων. Στο **Σχήμα 2.3.35** παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα που χρησιμοποιήθηκαν, τα οποία έχουν διαιρεθεί με την αντίστοιχη μονοαξονική θλιπτική

αντοχή. Οι αντοχές των σκυροδεμάτων που αφορούν τα δεδομένα αυτά, ποικίλουν από 20 έως 132 MPa. Το γεγονός αυτό απαλείφει την ανάγκη για προσαρμογή της καμπύλης, ανάλογα με την κατηγορία του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται. Συνεπώς η μόνη πειραματική τιμή που απαιτείται για την χρήση του προτεινόμενου κριτηρίου είναι η μονοαξονική θλιπτική αντοχή f_{cu} . Τελικά, οι υπόλοιπες παράμετροι υπολογίστηκαν ως εξής:

$$a_2 = -0,1597, \quad a_1 = -1,455$$

 $b_2 = -0,1746, \quad b_2 = -0,788$ (2.3.115)



Σχήμα 2.3.35: (a) Προσέγγιση της θλιπτικής και εφελκυστικής γενέτειρας (b) Λεπτομέρεια κοντά στην αρχή των αξόνων

Οι χαλύβδινες ίνες, όπως έχει αναφερθεί, καθυστερούν την έναρξη των εφελκυστικών ρωγμών, περιορίζοντας την επέκταση των μικρορωγμών που ήδη υπάρχουν στην μάζα του σκυροδέματος. Δεδομένου, λοιπόν, ότι οι ίνες γεφυρώνουν αυτές τις ρωγμές και μεταφέρουν το φορτίο, η ευνοϊκή επίδραση τους είναι περισσότερο φανερή όταν το σκυρόδεμα αστοχεί από εφελκυσμό παρά από θλίψη

(Chern et al., 1992). Συνεπώς, μπορεί να γίνει η υπόθεση, ότι η προσθήκη ινών επηρεάζει κυρίως την εφελκυστική γενέτειρα ρ_t , έτσι η προτεινόμενη θλιπτική γενέτειρα ρ_c για το άσπλο σκυρόδεμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα. Από προκαταρκτική διερεύνηση στα πειραματικά δεδομένα, προέκυψε ότι υπάρχει μια ξεκάθαρη αύξηση της ρ_t για αυξανόμενη περιεκτικότητα ινών. Έτσι, λόγω των ανωτέρω, εισάγεται η παράμετρος k στην εξίσωση της εφελκυστικής γενέτειρας, που καθορίζει την επιρροή των ινών στη συμπεριφορά του υλικού. Με την παράμετρο αυτή, λαμβάνεται υπόψη η αύξηση της τάσης αστοχίας λόγω της περίσφιγξης, που δημιουργείται από τις διάφορες ποσότητες και τύπους ινών, και έτσι περιστρέφεται ανάλογα η εφελκυστική γενέτειρα.

Ο προσδιορισμός της παραμέτρου k, στην εξίσωση **2.3.110** γίνεται με περιστροφή της εφελκυστικής γενέτειρας του άοπλου σκυροδέματος, ρ_t , κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να περάσει από ένα γνωστό σημείο ελέγχου στην $\rho_{t(SFRC)}$. Το σημείο αυτό, επιλέγεται να είναι το (σ_1 , σ_2 , σ_3) = ($-f_{cc}$, $-f_{cc}$, 0) όπου $-f_{cc}$ είναι η διαξονική θλιπτική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος με αναλογία φόρτισης 1:1:0. Αν είναι γνωστή η πειραματική τιμή της $-f_{cc}$ για κάποιο συγκεκριμένο τύπο ινοπλισμένου σκυροδέματος, και ξ_(SFRC) που αντιστοιχούν στο σημείο ($-f_{cc}$, $-f_{cc}$, 0) μπορούν να υπολογιστούν ως:

$$\rho_{t(\text{SFRC})} = \sqrt{\frac{2}{3}} f_{cc} \qquad (2.3.116)$$

$$\xi_{\rm (SFRC)} = \frac{-2f_{cc}}{\sqrt{3}} \tag{2.3.117}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση **2.3.110** και χρησιμοποιώντας τις τιμές των παραμέτρων *α*₀, *α*₁, *α*₂ που προέκυψαν παραπάνω (Σχέσεις **2.3.114** και **2.3.115**), η παράμετρος *k* προκύπτει ως εξής:

$$k = \frac{-a_{1} - \sqrt{a_{1}^{2} - 4a_{2} \left[a_{0} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\frac{f_{cc}}{f_{c}}\right)\right]}}{a_{2} \sqrt{\frac{8}{3} \left(\frac{f_{cc}}{f_{c}}\right)}}$$
(2.3.118)

Σε περίπτωση που δεν είναι δυνατός ο πειραματικός προσδιορισμός της τιμής της *f_{cc}*, προτείνεται ένας τρόπος για τον μαθηματικό υπολογισμό της. Υιοθετείται η υπόθεση ότι ίνες δημιουργούν περίσφιγξη στο υλικό, ίση με την εφελκυστική αντοχή του ινοπλισμένου σκυροδέματος μετά το μέγιστο φορτίο, σ_{tu}. Η υπόθεση αυτή είχε χρησιμοποιηθεί και από τους Murugappan et al. (1993), η μελέτη των οποίων αναλύεται στην αρχή της παρούσας ενότητας. Υπενθυμίζεται ότι για την σ_{tu} ισχύει (Lim et al., 1987):

$$\sigma_{uu} = \frac{\eta_l \eta_0 V_f l_f \tau_u}{2r'}$$
(2.3.119)

όπου V_f η περιεκτικότητα κατ' όγκο των ινών, η_0 ένας συντελεστής προσανατολισμού, η_l ένας συντελεστής αποδοτικότητας μήκους, l_f/d_f ο λόγος μήκους προς διάμετρο της ίνας, τ_u η οριακή τάση συνάφειας των ινών και r' είναι ο λόγος του εμβαδού διατομής προς την περίμετρο της ίνας. Οι Murugappan et al. (1993) πρότειναν την θεώρηση ότι η εντατική κατάσταση ενός δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος, το οποίο αστοχεί κατά την εφελκυστική γενέτειρα $\rho_{t(SFRC)}$, με μια εσωτερική τάση περίσφιγξης σ_{tu} , ισοδυναμεί με την εντατική κατάσταση ενός αντίστοιχου δοκιμίου άοπλου σκυροδέματος με μια πρόσθετη πλευρική ένταση $\sigma_3 =$ σ_{tu} . Συνεπώς για ένα δοκίμιο ινοπλισμένου σκυροδέματος που φορτίζεται διαξονικά με αναλογία εντάσεων 1:1, η εντατική κατάσταση αστοχίας εκφράζεται από το σημείο ($-f_{cc}$, $-f_{cc}$, 0), που αντιστοιχεί στο σημείο ($-f_{cc}$, $-\sigma_{tu}$) για το ανάλογο



Σχήμα 2.3.36: Εντατική κατάσταση δοκιμίου ινοπλισμένου σκυροδέματος και

αναλόγου άοπλου σκυροδέματος

άοπλο δοκίμιο (**Σχήμα 2.3.36**). Οι τιμές ρ_{t(Plain)} και ξ_(Plain) για την ανάλογη, αυτή, εντατική κατάσταση εκφράζονται ως ακολούθως:

$$\rho_{t(\text{Plain})} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(f_{cc} - \sigma_{tu} \right) \quad (2.3.120)$$

$$\xi_{(\text{Plain})} = \frac{-2f_{cc} - \sigma_{tu}}{\sqrt{3}}$$
(2.3.121)

Αντικαθιστώντας τις τιμές αυτές στην εξίσωση 2.3.110 για k = 1, προκύπτει η

ζητούμενη τιμή της f_{cc} . Στην συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η τιμή της παραμέτρου k, για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, εάν αντικατασταθεί η τιμή της f_{cc} , που υπολογίστηκε, στην εξίσωση **2.3.118**.

Αποτελέσματα του αναλυτικού κριτηρίου αστοχίας και σύγκριση με πειραματικά δεδομένα

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διαξονικές περιβάλλουσες αστοχίας για το άοπλο και το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, που προέκυψαν με την εφαρμογή του κριτηρίου που αναπτύχθηκε παραπάνω. Όσον αφορά στο άοπλο σκυρόδεμα, από τα **Σχήματα 2.3.37** και **2.3.38**, γίνεται φανερό ότι το κριτήριο αστοχίας δίνει μια ικανοποιητική προσέγγιση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Για την σύγκριση της διαξονικής περιβάλλουσας αστοχίας χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά αποτελέσματα των ερευνών των Kupfer & Gerstle (1973), Hussein & Marzouk (2000), ενώ τα αποτελέσματα των Hong et al. (2001), Lahlou et al. (1992) και O'Shea & Bridge (2000) χρησιμοποιήθηκαν για σύγκριση της θλιπτικής γενέτειρας.



Σχήμα 2.3.37: Περιβάλλουσες αστοχίας άοπλου σκυροδέματος (Συμβατικού και υψηλής αντοχής)



Σχήμα 2.3.38: Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με την προτεινόμενη γενέτειρα ρ_c

Για τη σύγκριση των αποτελεσμάτων του ινοπλισμένου σκυροδέματος, χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές μελέτες των Yin et al. (1989) και Traina & Mansour (1991), που έχουν αναλυθεί εκτενώς (Ενότητα 2.2.2). Στον πίνακα 2.3.39 συνοψίζονται τα γενικά στοιχεία των ινών που χρησιμοποιήθηκαν, οι περιεκτικότητες, οι τιμές των σ_{tu} , k και τις προβλεπόμενες τιμές της f_{cc} που χρησιμοποιήθηκαν για την περιστροφή της ρ_t , για διάφορες συνθέσεις ινοπλισμένου σκυροδέματος.

Experiment	Aspect ratio, 1/d	Volume fraction, Vf (%)	σ_{tu} (MPa)	k	Predicted f_{cc} (MPa)	Experimental f _{cc} (MPa)	Predicted/experimental f_{cc}
Hooked fibers		44 XC	04 <i>68</i>		CS 11	423 VV	a
Traina 0.5	60	0.5	0.84	0.978	54.2	60.0	0.90
Traina 1.0	60	1.0	1.68	0.961	59.3	62.8	0.94
Traina 1.5	60	1.5	2.52	0.951	74.9	74.3	1.01
Straight fibers							
Yin 45-1	45	1.0	0.76	0.979	49.1	57.5	0.85
Yin 59-1	59	1.0	1.15	0.972	56.3	61.4	0.92
Yin 59-2	59	2.0	2.31	0.947	60.4	59.9	1.01

Πίνακας 2.3.39: Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την περιστροφή της ρ_t

Η σύγκριση της προβλεπόμενης τιμής της f_{cc} με τις πειραματικές τιμές, δείχνει ότι η μέθοδος που προτείνεται για τον υπολογισμό της f_{cc} παρέχει αρκετά ακριβή αποτελέσματα και οι προβλέψεις είναι, γενικά, συντηρητικές. Η αναλυτική τιμή της f_{cc} και συνεπώς, της ρ_t είναι ευαίσθητη στις αλλαγές τόσο της περιεκτικότητας όσο και της αναλογίας διαστάσεων των ινών, που χρησιμοποιούνται. Όσο αυξάνει η σ_{tu} , τόσο αυξάνει και η ρ_t , γεγονός που αντικατοπτρίζει και τις πειραματικές παρατηρήσεις. Στο Σχήμα 2.3.40 (a και b) παρουσιάζονται οι διαξονικές περιβάλλουσες αστοχίας που προέκυψαν σε σύγκριση με τις πειραματικές τιμές των Yin et al. (1989) και Traina & Mansour (1991). Δεδομένου ότι η διαξονική περιβάλλουσα προκύπτει ως η τομή της τρισδιάστατης καμπύλης αστοχίας με το επίπεδο σ_1 - σ_2 , μια μικρή αύξηση της ρ_t οδηγεί σε φανερή μεγέθυνση της διαξονικής περιβάλλουσας για αναλογία θλιπτικών δυνάμεων 1:1. Η μεγέθυνση αυτή για αυξανόμενη σ_{tu} , συμφωνεί και με τα πειραματικά δεδομένα.



Σχήμα 2.3.40: Σύγκριση της προτεινόμενης περιβάλλουσας αστοχίας με πειραματικά αποτελέσματα:a) Ίνες με αγκυρώσεις (Traina & Mansour) b) Ευθύγραμμες ίνες (Yin et al.)

Για περαιτέρω διερεύνηση της ισχύος του κριτηρίου αστοχίας που προτάθηκε, διεξήχθη μια σειρά πειραμάτων, από τους Seow & Swaddiwudhipong το 2006, σε δοκίμια άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος. Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν μορφή τετραγωνικού πλακιδίου (150 × 150 × 40 mm) τα οποία ελέγχθηκαν υπό διαξονική θλίψη σε διάφορες αναλογίες τάσεων. Χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες ίνες τύπου DRAMIX (άκρα με αγκυρώσεις) με μήκος 30 mm και διάμετρο 0,55 mm, σε περιεκτικότητες 0,5%, 1%, 1,5 %. Για την εξάλειψη της τριβής στις επιφάνειες επαφής δοκιμίου και πλάκας φόρτισης, χρησιμοποιήθηκαν πλάκες με μορφή χτένας. Η μονοαξονική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας για κάθε τύπο δοκιμίου μετρήθηκαν με τυπικές δοκιμές σε κυλίνδρους. Μια σύνοψη των αποτελεσμάτων και των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την περιστροφή της ρ_t παρουσιάζονται στον πίνακα **2.3.41**.

Proposed biaxial curve	Experimental mix	Volume fraction, $V_{\rm f}$ (%)	k	Experimental f_{cc} (MPa)	Predicted f_{cc} (MPa)	Experimental $f_{\rm ec}$ /predicted $f_{\rm ec}$
I	NC	0.0	1.000	27.09	26.04	1.040
2	SC-0.5	0.5	0.980	28.15	28.92	0.974
3	SC-1.0	1.0	0.962	29.17	30.52	0.956
4	SC-1.5	1.5	0.949	34.90	34.74	1.005

Σχήμα 2.3.41: Τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την περιστροφή της ρ_t

Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν από τον έλεγχο των δοκιμίων με τις διαξονικές περιβάλλουσες που προέκυψαν από την εφαρμογή του αναλυτικού κριτηρίου αστοχίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3.42. Παρατηρείται, επίσης, μια ικανοποιητική προσέγγιση των αποτελεσμάτων.



Σχήμα 2.3.42: Πειραματικές και αναλυτικές περιβάλλουσες αστοχίας των Seow & Swaddiwudhipong

Συμπερασματικά, μπορούμε να πούμε ότι η μελέτη που αναλύθηκε, αποτελεί μια ολοκληρωμένη προσπάθεια κατανόησης και προσομοίωσης της τριαξονικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος. Το αναλυτικό κριτήριο που προτείνεται, βελτιώνει τον τρόπο πρόβλεψης της συμπεριφοράς του συμβατικού και σκυροδέματος υψηλής αντοχής ενώ, με κατάλληλη επέκταση, συμπεριλαμβάνει και

την επιρροή των ινών στη μάζα του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εφαρμογή του, προσεγγίζουν τα υπάρχοντα πειραματικά δεδομένα με αποδεκτή ακρίβεια, ενώ η πειραματική έρευνα των ίδιων ερευνητών, επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις αυτές. Για την χρησιμοποίηση του, απαιτείται μόνο η γνώση της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής *f*_{cu} του υλικού, ενώ δεν είναι απαραίτητη η διόρθωση της μορφής της καμπύλης λόγω διαφορών στην τάξη του σκυροδέματος. Έτσι μειώνονται σημαντικά τα σφάλματα που θα μπορούσαν να προκύψουν σε περίπτωση που υπεισέρχονταν περισσότερες παράμετροι. Επίσης η ανάπτυξη συνάρτησης κλειστής μορφής για το εν λόγω κριτήριο, το καθιστά εύχρηστο και για εφαρμογές πεπερασμένων στοιχείων. Πρόκειται, λοιπόν, για ένα αρκετά χρηστικό και αξιόπιστο κριτήριο αστοχίας τόσο για το άοπλο όσο και για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα.

Κεφάλαιο 3

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ

3.1 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για την πειραματική διερεύνηση της διαξονικής συμπεριφοράς του ινοπλισμένου σκυροδέματος, κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του Ε.Μ.Π., δεκαοκτώ πρισματικά δοκίμια διαμορφωμένα, σύμφωνα με τις απαιτήσεις της πειραματικής διάταξης, για την εκτέλεση διαξονικών δοκιμών υπό εφελκυσμό-θλίψη, με σκοπό την αποτίμηση της διαξονικής αντοχής του υλικού. Για την κατασκευή των δοκιμίων αυτών, χρησιμοποιήθηκε η ίδια σύνθεση σκυροδέματος και χαλύβδινες ίνες σε διαφορετικές περιεκτικότητες. Διαμορφώθηκαν, έτσι, τρείς ομάδες δοκιμίων με περιεκτικότητες ινών 0, 60 και 100 kg/m³ σκυροδέματος. Για κάθε μια από τις τρείς ομάδες κατασκευάστηκαν, επίσης, τρία επιπλέον κυλινδρικά δοκίμια ύψους 30 cm και διαμέτρου 15 cm, για δοκιμές μονοαξονικής θλίψης, με σκοπό την καταγραφή των αντιστοίχων καμπυλών τάσεωνπαραμορφώσεων.

Οι δύο ομάδες που περιλαμβάνουν τα οπλισμένα, με ίνες, δοκίμια περιέχουν ίνες τύπου DRAMIX RC65/35BN (l = 35 mm, l/d = 65, με αγκυρώσεις στα άκρα) για κάθε περιεκτικότητα V_f . Οι περιεκτικότητες σε ίνες των δύο αυτών ομάδων ήταν $V_f = 0,72\%$ και 1,2%, που αντιστοιχούν σε 60 και 100 kg/m³.



Σχήμα 3.1.1: (a) Μορφή ινών τύπου DRAMIX (b) Διαστάσεις ινών τύπου DRAMIX RC65/35BN

Για την παρασκευή του μείγματος του σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε η ακόλουθη σύνθεση, με προδιαγραφή για σκυρόδεμα C 20/25:

- Τσιμέντο τύπου ΙΙ: 280 kg/m³
- Άμμος : 819 kg/m³
- Γαρμπίλι: 700 kg/m³
- Χαλίκι: 350 kg/m³
- Νερό: 171 kg/m³

Για την καλύτερη εργασιμότητα, κατά τη σκυροδέτηση κάθε δοκιμίου, χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής τύπου AXIM της LAFARGE, σε διαφορετική δοσολογία για κάθε ομάδα δοκιμίων ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες. Αναλυτικά οι ποσότητες, για την κάθε σκυροδέτηση, ήταν:

- 0% κ.ό. σκυροδέματος (0 kg/m³): 240 gr ρευστοποιητή ανά 0,1 m³
- 1.2% κ.ό. σκυροδέματος (100 kg/m³): 295 gr ρευστοποιητή ανά 0,1 m³

0,72% κ.ό. σκυροδέματος (60 kg/m³): 770 gr ρευστοποιητή ανά 0,1 m³. Η αυξημένη ποσότητα ρευστοποιητή, στην περίπτωση αυτή οφείλεται στις αρκετά διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος κατά τη σκυροδέτηση (σχετικά υψηλή θερμοκρασία).

Στους Πίνακες 3.1.2 και 3.1.3 παρουσιάζεται συνοπτικά η κωδικοποίηση των πρισματικών και κυλινδρικών δοκιμίων των τριών ομάδων για διευκόλυνση στην περιγραφή του πειράματος, στη συνέχεια.

Ονομασία δοκιμίου	Τύπος ινών	V _f (%)	Περιεκτικό- Τητα (kg/m ³)	Ονομασία δοκιμίου	Τύπος ινών	V_f (%)	Περιεκτικό- Τητα (kg/m ³)
0/1	-	0	0	60/4	DRAMIX	0,72	60
0/2	-	0	0	60/5	DRAMIX	0,72	60
0/3	-	0	0	60/6	DRAMIX	0,72	60
0/4	-	0	0	100/1	DRAMIX	1,2	100
0/5	—	0	0	100/2	DRAMIX	1,2	100
0/6	—	0	0	100/3	DRAMIX	1,2	100
60/1	DRAMIX	0,72	60	100/4	DRAMIX	1,2	100
60/2	DRAMIX	0,72	60	100/5	DRAMIX	1,2	100
60/3	DRAMIX	0,72	60	100/6	DRAMIX	1,2	100

Πίνακας 3.1.2: Ονομασίες πρισματικών δοκιμίων για δοκιμές υπό διαξονική ετερόσημη φόρτιση

Ονομασία δοκιμίου	Τύπος ινών	V _f (%)	Περιεκτικό- Τητα (kg/m ³)
K 0/1	_	0	0
K 0/2	_	0	0
K 0/3	_	0	0
K 60/1	DRAMIX	0,72	60
K 60/2	DRAMIX	0,72	60
K 60/3	DRAMIX	0,72	60
K 100/1	DRAMIX	1,2	100
K 100/2	DRAMIX	1,2	100
K 100/3	DRAMIX	1,2	100

Πίνακας 3.1.3: Ονομασίες κυλινδρικών δοκιμίων για δοκιμές υπό κεντρική θλίψη

Για την κατασκευή των πρισματικών δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινα καλούπια διαστάσεων 70 × 15 × 10 cm. Τα εν λόγω καλούπια, όπως και αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των κυλίνδρων, παρουσιάζονται στις Εικ. 3.1.4 και 3.1.5.



Εικ. 3.1.4: Χαλύβδινα καλούπια πρισματικών δοκιμίων



Εικ. 3.1.5: Χαλύβδινα καλούπια κυλινδρικών δοκιμίων

Η μορφή και οι διαστάσεις των πρισματικών δοκιμίων που κατασκευάστηκαν για τις διαξονικές δοκιμές, παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.6. Στις εσοχές που διαμορφώθηκαν στις δύο επιφάνειες του δοκιμίου, προσαρμόστηκε η χαλύβδινη διάταξη για την εκτέλεση του πειράματος, η οποία θα περιγραφεί αναλυτικά στην Ενότητα 3.2. Για την διαμόρφωση των εσοχών αυτών, χρησιμοποιήθηκαν κομμάτια από ξύλο Betoform διαστάσεων 45 × 10 × 2 cm, που τοποθετήθηκαν και στερεώθηκαν με βίδες στις δύο πλαϊνές πλευρές των χαλύβδινων καλουπιών, όπως φαίνεται στην **Εικ. 3.1.7**.



Σχήμα 3.1.6: Διαστάσεις πρισματικού δοκιμίου για διαξονικές δοκιμές



Εικ. 3.1.7: Διαμόρφωση των χαλύβδινων πρισματικών καλουπιών

Για την ανάμειξη του σκυροδέματος των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκε ο αναμικτήρας του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος Ε.Μ.Π. Η ανάμειξη των χαλύβδινων ινών έγινε «εν υγρώ», με προσθήκη στον αναμικτήρα κατά τη διάρκεια ανάδευσης του σκυροδέματος (Εικ. 3.1.8 και 3.1.9). Οι ίνες της DRAMIX που χρησιμοποιήθηκαν ήταν σε δέσμες και ο διαχωρισμός τους έγινε με την βοήθεια του ρευστοποιητή.



Εικ. 3.1.8: Αναμικτήρας του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος


Εικ. 3.1.9: Μείγμα ινοπλισμένου σκυροδέματος στον αναμικτήρα

Μετά την ανάμειξη των υλικών, το άσπλο και ινοπλισμένο σκυρόδεμα εγχύθηκε στα καλούπια των δοκιμίων. Κατά την τοποθέτηση του σκυροδέματος στα καλούπια απαιτήθηκε συνεχής δόνηση του υλικού για την καλύτερη ομογενοποίηση των συστατικών του μείγματος (ίνες, τσιμεντοπολτός και αδρανή). Τα πρισματικά και κυλινδρικά δοκίμια δονήθηκαν εξωτερικά επί της δονητικής τράπεζας του Εργαστηρίου. (**Εικ. 3.1.10**).



Σχήμα 3.1.10: Δονητική τράπεζα του Εργαστηρίου Ωπλισμένου Σκυροδέματος

Μετά τη σκυροδέτηση, τα δοκίμια καλύφθηκαν με υγρές λινάτσες και παρέμειναν έτσι στο εργαστήριο, για 4 ημέρες, με συνεχή διαβροχή, μέχρι την αφαίρεση των καλουπιών. Παρέμειναν, στη συνέχεια, αποθηκευμένα σε συνθήκες περιβάλλοντος μέχρι το χρόνο εκτέλεσης των πειραμάτων, ο οποίος ήταν μεγαλύτερος των 28 ημερών για κάθε δοκίμιο. Ο χρόνος των 28 ημερών είναι ο ελάχιστος απαιτούμενος προκειμένου να αποκτήσει το σκυρόδεμα την αντοχή του, ώστε τα δοκίμια να είναι έτοιμα για δοκιμές. Ο ακριβής αριθμός ημερών, για κάθε ομάδα δοκιμίων, που παρήλθε μέχρι την εκτέλεση των πειραμάτων, θα αναφέρεται κατά την περιγραφή της κάθε δοκιμής (Ενότητες **4.1** και **4.2**).

Για την διεξαγωγή των θλιπτικών δοκιμών στα κυλινδρικά δοκίμια, οι κύλινδροι προετοιμάστηκαν κατάλληλα, ώστε να είναι δυνατή η κατακόρυφη τοποθέτηση δύο επαγωγικών βελομέτρων αντιδιαμετρικά, κατά τη διεύθυνση της φόρτισης, για την καταγραφή των παραμορφώσεων, σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Τοποθετήθηκαν σε αντιδιαμετρικές θέσεις της περιμέτρου, κατάλληλες υποδοχές για τα βελόμετρα, όπως φαίνεται στις **Εικ. 3.1.11** και **3.1.12**. Οι υποδοχές αυτές κολλήθηκαν με σιδηρόστοκο, σε δεδομένες αποστάσεις (περίπου 11 cm) πάνω στην επιφάνεια του δοκιμίου, αφού προηγουμένως η επιφάνεια του σκυροδέματος είχε υποστεί τοπική λείανση.



Εικ. 3.1.11: Υποδοχές και στόχοι βελομέτρων που τοποθετήθηκαν στα κυλινδρικά δοκίμια



Εικ. 3.1.12: Κύλινδροι με τις υποδοχές και τους στόχους των βελομέτρων

3.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

Στην ενότητα αυτή, γίνεται λεπτομερής περιγραφή των πειραματικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των πειραμάτων ετερόσημης διαξονικής καταπόνησης σε άοπλα και ινοπλισμένα δοκίμια, καθώς και για τη διεξαγωγή δοκιμών μονοαξονικής θλίψης στα κυλινδρικά δοκίμια. Όσον αφορά στην διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τις διαξονικές δοκιμές, όπως έχει αναφερθεί και στη βιβλιογραφία (Ενότητα 2.2.1), βασίζεται στη διάταξη και ερευνητική εργασία που προτάθηκε στην μελέτη του Ε. Σ. Κατσαραγάκη (1987), η οποία είχε ως στόχο τη μελέτη της διαξονικής συμπεριφοράς του άοπλου σκυροδέματος υπό συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης.

3.2.1 Διάταξη πειραμάτων εφελκυσμού-θλίψης

Η πειραματική διάταξη, περιλαμβάνει δύο πανομοιότυπα ζεύγη από χαλύβδινους αρθρωτούς βραχίονες. Το κάθε ζεύγος έχει τη μορφή, που παρουσιάζεται στην **Εικ. 3.2.1**.



Εικ. 3.2.1: Βραχίονες της Πειραματικής διάταξης

Οι βραχίονες αυτοί τοποθετούνται στην εσοχή των πρισματικών δοκιμίων που κατασκευάστηκαν (Ενότητα **3.1**). Λόγω της μορφής που αποκτά το σύστημα δοκίμιο-βραχίονες, αρκεί μόνο η άσκηση ενός ενιαίου θλιπτικού φορτίου στην κορυφή της διάταξης για να επιτευχθεί διαξονική φόρτιση εφελκυσμού-θλίψης. Η

εφαρμογή της παραπάνω βασικής ιδέας καθώς και το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου και της διάταξης παρουσιάζονται στα Σχήματα 3.2.2 και 3.2.3. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2.2, το κάθε πλαίσιο, που αποτελείται από τα δύο χαλύβδινα ελάσματα ορθογωνικής διατομής (a), στηρίζεται στο μέσο του δοκιμίου στη χαλύβδινη βάση (b), κάτω από την οποία τοποθετείται μια χαλύβδινη επιφάνεια (διαστάσεων 8 × 10 × 1 cm) (c), ώστε να κατανέμει ομοιόμορφα την εξασκούμενη θλιπτική δύναμη στην επιφάνεια του δοκιμίου. Στις παρυφές του λαιμού, το πλαίσιο έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο μέσω της βάσης (d), ώστε να αποφεύγονται οι τοπικές συγκεντρώσεις τάσεων, που οδηγούν σε πρόωρη τοπική αποδιοργάνωση του δοκιμίου. Επιπλέον, είναι δυνατή η τοποθέτηση ενός επιθυμητού αριθμού πρόσθετων χαλύβδινων πρισμάτων (e) ανάμεσα στα ελάσματα έδρασης (d) και το δοκίμιο, μεταβάλλοντας έτσι την γεωμετρία του πλαισίου κατά βούληση (και άρα την αναλογία σ_1/σ_2).



Σχήμα 3.2.2: Πειραματική διάταξη: (a), αρθρωτά ορθογώνια ελάσματα του πλαισίου, επί των οποίων θα ασκηθεί το κατακόρυφο φορτίο (b), χαλύβδινη βάση που μεταφέρει το φορτίο στο κέντρο του δοκιμίου (c), χαλύβδινο έλασμα που διανέμει το κατακόρυφο φορτίο στην επιφάνεια του δοκιμίου (d) χαλύβδινη βάση με την οποία έρχεται σε επαφή η διάταξη στο λαιμό του δοκιμίου για αποφυγή τοπικών θραύσεων (e) χαλύβδινα πρίσματα που αλλάζουν την γεωμετρία του πλαισίου (f) στρώση σφαιριδίων 5 mm για την εξάλειψη της επιρροής της τριβής επαφής διάταξης-δοκιμίου.



Σχήμα 3.2.3: Διαστάσεις διάταξης

Η μηχανή φόρτισης εξασκεί μια αυξανόμενη θλιπτική δύναμη F (μέσω ελεγχόμενης δύναμης και όχι παραμόρφωσης), ισομερώς κατανεμημένη σε κάθε πλαίσιο της συμμετρικής διάταξης. Οι οριζόντιες αντιδράσεις F_h των πλαισίων (Σχήμα 3.2.4), οι οποίες εξισορροπούνται στο κέντρο του δοκιμίου, εισάγουν μια εφελκυστική δύναμη στις άκρες του λαιμού του δοκιμίου, ενώ οι κατακόρυφες αντιδράσεις F_v δημιουργούν την θλιπτική ένταση. Οι δυνάμεις F_h , F_v είναι συνάρτηση της γεωμετρίας των δύο πλαισίων και δημιουργούν ένα πεδίο συνδυασμένης διαζονικής ετερόσημης φόρτισης εφελκυσμού-θλίψης, στο κέντρο του δοκιμίου. Τέλος, μέσω της δυνατότητας στη διαμόρφωση της γεωμετρίας του σχηματισμού, επιτυγχάνονται διάφορες τιμές στην αναλογία θλίψης-εφελκυσμού.



Σχήμα 3.2.4: Κατανομή δυνάμεων από τη διάταξη στο δοκίμιο

Η ανάπτυξη του διαξονικού πεδίου εφελκυσμού-θλίψης στο κέντρο του δοκιμίου, επιβεβαιώνεται και από ανάλυση που έγινε με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με χρήση του προγράμματος LS-DYNA v971 (2008). Ο τύπος του πεπερασμένου στοιχείου που γρησιμοποιήθηκε, ήταν κυβικό οκτακομβικό στοιγείο πλήρους ολοκλήρωσης και το υλικό που επιλέχθηκε για την προσομοίωση του δοκιμίου ήταν το Model 072-R3 (concrete), που παρέχεται στη βιβλιοθήκη υλικών του εν λόγω λογισμικού. Σημειώνεται ότι κατά την προσομοίωση η διάταξη προσομοιώθηκε με κυβικά στοιχεία (εδράσεις) και επίπεδα στοιχεία κελύφους (βραχίονες), με ελαστικά χαρακτηριστικά χάλυβα (MAT 02 linear elastic). Επιπλέον η διεπιφάνεια μεταξύ των δύο προσομοιώθηκε με στοιχεία Contact (ανένδοτη επαφή) με μικρή τριβή. Η προσομοίωση της διάταξης και το αναπτυσσόμενο πεδίο τάσεων, παρουσιάζονται στις Εικ. 3.2.5 και 3.2.6.



Εικ. 3.2.5: Διακριτοποίηση δοκιμίου και πειραματικής διάταξης με πεπερασμένα στοιχεία



Σχήμα 3.2.6: Ανάπτυξη εντατικού πεδίου στο κέντρο του δοκιμίου

Για την εξάλειψη της τριβής επαφής ανάμεσα στο ενδιάμεσο έλασμα [Σχήμα 3.2.2, (c)] και στο δοκίμιο, επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθούν χαλύβδινα σφαιρίδια με διάμετρο 5 mm τα οποία τοποθετήθηκαν σε μια στρώση ανάμεσα στη διάταξη και το δοκίμιο. Η χρήση των σφαιρών ελαχιστοποιεί την τριβή επαφής, ενώ το θλιπτικό φορτίο μεταφέρεται ανεπηρέαστο, καθώς παραμένει κάθετο καθ' όλη την διάρκεια της φόρτισης. Για την συγκράτηση των σφαιριδίων και την εύκολη χρήση της στρώσης αυτής, χρησιμοποιήθηκε συνδετική ουσία με την οποία καλύφθηκαν τα σφαιρίδια, σχηματίζοντας, έτσι, ένα ενιαίο στρώμα αμελητέας δυσκαμψίας (Εικ. 3.2.7). Η συνδετική ουσία τοποθετήθηκε με προσοχή, ώστε οι σφαίρες να παραμένουν σε επαφή μεταξύ τους. Η αποτελεσματικότητα των στρωμάτων αυτών, έχει αποδειχθεί πειραματικά [Κατσαραγάκης (1987)].



Εικ. 3.2.7: Δοκίμιο με τις στρώσεις εξάλειψης της τριβής

Όπως γίνεται φανερό από την παρουσίαση της γεωμετρίας της διάταξης (Σχήματα 3.2.2, 3.2.3 και 3.2.4), η αναλογία φόρτισης του δοκιμίου F_v/F_h εξαρτάται άμεσα από τις διαστάσεις του δοκιμίου. Η διάσταση του ανοίγματος της εσοχής, μέσα στην οποία τοποθετείται η χαλύβδινη διάταξη, επηρεάζει την κλίση των βραχιόνων. Έτσι μια ενδεχόμενη μεταβολή της διάστασης αυτής (θεωρούμε δεδομένο ότι οι διαστάσεις της χαλύβδινης διάταξης δεν μεταβάλλονται), μπορεί να επιφέρει μεταβολή στην αναλογία θλίψης-εφελκυσμού. Ένας ακόμα γεωμετρικός παράγοντας που επηρεάζει την τιμή του λόγου F_v/F_h είναι η υψομετρική διαφορά που αποκτά η ενδιάμεση χαλύβδινη βάση (b) (Σχήμα 3.2.2) από τις ακραίες βάσεις (d), λόγω της παρούσα περίπτωση η υψομετρική αυτή διαφορά ισούται με 15 mm, ενώ, όπως γίνεται αντιληπτό, οι γωνίες των βραχιόνων μπορούν να μεταβληθούν ανάλογα με αυτήν την τιμή.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, κρίθηκε σκόπιμη η διερεύνηση της επιρροής της γεωμετρίας της διάταξης στην τιμή του λόγου F_v/F_h . Υπολογίστηκαν, λοιπόν, οι λόγοι F_v/F_h για διάφορες τιμές του ανοίγματος L της εσοχής του δοκιμίου και της υψομετρικής διαφοράς a της ενδιάμεσης βάσεις. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στο **Σχήμα 3.2.8**. Η διερεύνηση αυτή αποδεικνύεται ιδιαιτέρως χρήσιμη σε περιπτώσεις χρήσης της παρούσας διάταξης. Όπως θα γίνει φανερό και από την περιγραφή των αποτελεσμάτων, οι διαστάσεις της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκαν, δίνουν σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας πολύ κοντά στον εφελκυστικό άξονα. Η προσθήκη των χαλύβδινων ελασμάτων (e) (**Σχήμα 3.2.2**) δεν μεταβάλλουν σημείων πιο κοντά στον θλιπτικό άξονα, είναι απαραίτητη η κατασκευή δοκιμίων με διαφορετικές διαστάσεις.



Σχήμα 3.2.8: Επιρροή γεωμετρίας στην τιμή του λόγου $F_v\!/F_h$

Η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε για την εκτέλεση των διαξονικών δοκιμών ήταν η μηχανή TONI PACT 3000 της TONI TECHNIK. Στην εν λόγω μηχανή, που παρουσιάζεται στην **Εικ. 3.2.9**, γίνεται συνεχής καταγραφή του φορτίου που ασκείται και η φόρτιση γίνεται με σταθερή ταχύτητα, που ορίζεται από τον χρήστη. Το ανώτατο φορτίο που μπορεί να ασκηθεί είναι 600 KN. Για τα πρισματικά δοκίμια η ταχύτητα φόρτισης επιλέχθηκε να είναι 1 KN/sec για τα άοπλα και 2 KN/sec για τα ινοπλισμένα.και η τιμή του μέγιστου φορτίου καταγράφηκε από τη θλιπτική μηχανή. Στην **Εικ. 3.2.10** φαίνεται το δοκίμιο με την διάταξη, τοποθετημένο στην εν λόγω μηχανή θλίψης.



Εικ. 3.2.9: Θλιπτική μηχανή ΤΟΝΙ PACT 3000 του εργαστηρίου Ω.Σ.



Εικ. 3.2.10: Δοκίμιο με την διάταξη στην θλιπτική μηχανή

Όσον αφορά στο ζήτημα της τοποθέτησης των δοκιμίων στη μηχανή θλίψης, η διαδικασία που ακολουθήθηκε ήταν ως εξής: Αρχικά το πρώτο τμήμα των δύο βραχιόνων τοποθετούνταν στην εσοχή του δοκιμίου. Ύστερα το τμήμα αυτό σταθεροποιούταν στη θέση αυτή, με χρήση δύο καταλλήλων λεπτών χαλύβδινων ελασμάτων, τα οποία πρόσφεραν τη δυνατότητα βιδώματος στις πλαϊνές πλευρές. Στη συνέχεια γινόταν η τοποθέτηση του τμήματος αυτού των βραχιόνων, το οποίο δεν είχε πλέον τη δυνατότητα μετακινήσεων, στη μηχανή θλίψης (**Εικ. 3.2.11** και **3.2.12**).

Η διευκόλυνση που παρείχε η χρήση των ελασμάτων αυτών στην τοποθέτηση του δοκιμίου ήταν σημαντική. Τελικά, αφού το δοκίμιο έπαιρνε τη θέση του επάνω από το πρώτο τμήμα, γινόταν η τοποθέτηση του επάνω τμήματος. Σημειώνεται, ότι πριν την εφαρμογή του φορτίου, τα εν λόγω ελάσματα αφαιρούνταν, ώστε να δοθεί στους κάτω βραχίονες η δυνατότητα κίνησης, προκειμένου να κατανείμουν το φορτίο ανεπηρέαστα.



Εικ. 3.2.11: Χαλύβδινα ελάσματα σταθεροποίησης των βραχιόνων



Εικ. 3.2.12: Το κάτω τμήμα τοποθετημένο στη μηχανή θλίψης

Κατά την διάρκεια προκαταρκτικών δοκιμών σε τέσσερα πρισματικά δοκίμια (δοκίμια 0/1, 60/1, 100/1 και 100/2), παρατηρήθηκε ότι η αστοχία των δοκιμίων

προέκυψε με τον σχηματισμό μιας εφελκυστικής ρωγμής, η οποία ξεκινούσε είτε κοντά στις άκρες του λαιμού του δοκιμίου (Εικ. 3.2.13), είτε ανάμεσα στη χαλύβδινη βάση (d) και στο έλασμα (c) στον πόδα της βάσης (Το άοπλο δοκίμιο υπέστη ξαφνική θραύση κατά μήκος της εν λόγω ρωγμής και χωρίστηκε σε δύο τμήματα) (Σχήμα 3.2.2, Εικ. 3.2.14).



Εικ. 3.2.13: Δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής στην άκρη της εσοχής του δοκιμίου όπου εδράζεται η βάση (d)



Εικ. 3.2.14: Δημιουργία εφελκυστικής ρωγμής ανάμεσα στη βάση (d) και στο έλασμα (c)

Σε καμία, λοιπόν, από τις περιπτώσεις η αστοχία δεν επήλθε μέσα στο πεδίο διαζονικής έντασης που αναπτύσσεται στο κέντρο του δοκιμίου, στην περιοχή κάτω από τα ελάσματα (c), όπως θα ήταν επιθυμητό. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στο ότι το εξασκούμενο θλιπτικό φορτίο στις βάσεις (d), οι οποίες έχουν μικρότερη επιφάνεια έδρασης από το έλασμα (c), δεν κατανέμεται σε ολόκληρο το πλάτος του δοκιμίου με αποτέλεσμα η ασκούμενη τάση να είναι υψηλότερη στο άκρο απ' ότι στο μέσο. Επιπροσθέτως, η διαφορά ύψους της ενδιάμεσης χαλύβδινης βάσης οδηγεί στο να εξασκείται μεγαλύτερη θλιπτική δύναμη στα άκρα απ' ότι στο κέντρο, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται, τελικά, δυσμενέστερη εντατική κατάσταση στις άκρες των εσοχών. Η αστοχία εκτός της επιθυμητής ζώνης, επιβεβαιώνεται και από την ανάλυση με πεπερασμένα στοιχεία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.2.15.



Σχήμα 3.2.15: Αστοχία του δοκιμίου στο αριστερό άκρο

Μια ενδιάμεση προσπάθεια να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα με τοποθέτηση μικρών τμημάτων ξύλου κόντρα-πλακέ κάτω από τις βάσεις (d) (δεν ήταν εφικτό να τοποθετηθούν πρόσθετα ελάσματα βάσης στα άκρα λόγω του ύψους της εσοχής, το οποίο δεν επαρκούσε), δεν έφερε το επιθυμητό αποτέλεσμα. Κρίθηκε, συνεπώς,

σκόπιμη η ενίσχυση των άκρων του δοκιμίου, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η αστοχία θα επέλθει στην επιθυμητή περιοχή. Για τον σκοπό αυτό, επιλέχθηκε να γίνει χρήση υφάσματος ανθρακονημάτων (CFRP). Το ύφασμα κόπηκε σε ορθογώνια τμήματα διαστάσεων 11 × 30 cm, περίπου, τα οποία τοποθετήθηκαν στα άκρα ενός δοκιμίου (δοκίμιο 60/2) αφήνοντας ακάλυπτη μια ζώνη εμβαδού 11 × 10 cm, περίπου, στο κέντρο. Τα τμήματα CFRP κολλήθηκαν με χρήση ειδικής εποξειδικής ρητίνης εμποτισμού τύπου SIKADUR 330. Ο τύπος υφάσματος που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου SIKAWRAP HEX-230C με ονομαστική αντοχή σε εφελκυσμό 4,1 KN/mm² και ελάχιστη αντοχή σε εφελκυσμό 3,65 KN/mm² (**Εικ 3.2.16**). Το ονομαστικό πάχος του υφάσματος λαμβάνεται ως 0,12 mm, για το οποίο προκύπτει ότι η ενίσχυση κάθε άκρου αντέχει τουλάχιστον 96,40 KN εφελκυστικής δύναμης (2 × 0,12 mm × 110 mm × 3,65 KN/mm²). Η εν λόγω αντοχή υπερκαλύπτει τις ανάγκες σε φορτίο, καθώς στις δοκιμές δεν αναπτύσσονται τέτοιου μεγέθους εφελκυστικές δυνάμεις στα άκρα του δοκιμίου. Η μορφή των δοκιμίου, μετά την τοποθέτηση των τμημάτων CFRP, παρουσιάζεται στις **Εικ. 3.2.17** και **3.2.18**.



Εικ. 3.2.16: Τμήματα CFRP και εποξειδική ρητίνη για την ενίσχυση των άκρων του πρισματικού δοκιμίου



Εικ. 3.2.17: Μορφή πρισματικού δοκιμίου μετά την τοποθέτηση των CFRP. Διακρίνεται το άοπλο τμήμα ελέγχου στο μέσον



Εικ. 3.2.18: Ενισχυμένο δοκίμιο με τη διάταξη στη μηχανή θλίψης

Από τη δοκιμή του ενισχυμένου πρισματικού δοκιμίου προέκυψε ότι η λύση της ενίσχυσης των άκρων με ύφασμα από ανθρακονήματα ήταν αποτελεσματική, αφού το δοκίμιο αστόχησε εντός της επιθυμητής ζώνης. Αρχικά, με την αύξηση του φορτίου αναπτύχθηκε ρηγμάτωση μέσα στην περιοχή που καλύφθηκε με CFRP (όπως αναπτύχθηκε και στα μη ενισχυμένα δοκίμια), η οποία προκάλεσε μια πτώση αντοχής. Την πτώση αυτή, ακολούθησε η ενεργοποίηση των CFRP, τα οποία ανέλαβαν το εξασκούμενο φορτίο μέχρις ότου το δοκίμιο αστοχήσει στο κέντρο, λόγω συνδυασμού εφελκυσμού-θλίψης. Το δοκίμιο που αστόχησε, παρουσιάζεται στις Εικ. 3.2.19 και 3.2.20.



Εικ. 3.2.19: Αστοχία δοκιμίου στο κέντρο. Διακρίνεται η ρηγμάτωση στο μέσον



Εικ. 3.2.20: Αστοχία στο κέντρο και πέραν από το CFRP

Στη συνέχεια εφαρμόστηκε η ίδια μέθοδος ενίσχυσης και στα υπόλοιπα πρισματικά δοκίμια με χρήση ανθρακονημάτων που αναφέρθηκε παραπάνω (**Εικ. 3.2.21**). Επίσης, με τον ίδιο τρόπο επισκευάστηκαν και τα τρία οπλισμένα δοκίμια (δοκίμια 60/1, 100/1 και 100/2), τα οποία είχαν αρχικά δοκιμαστεί χωρίς ενίσχυση στα άκρα. Το άοπλο δοκίμιο 0/1 ήταν αδύνατο να αποκατασταθεί λόγω του μεγέθους της βλάβης (χωρίστηκε σε δύο τμήματα).



Εικ. 3.2.21: Ενισχυμένα δοκίμια πριν τις δοκιμές

Σημειώνεται ότι όλα ανεξαιρέτως τω ινοπλισμένα δοκίμια αστόχησαν εντός της επιθυμητής περιοχής, πλην του δοκιμίου 60/1, που είχε δοκιμαστεί και χωρίς ενίσχυση, στο οποίο επήλθε αστοχία της αγκύρωσης του CFRP (το CFRP αποκολλήθηκε από την επιφάνεια του δοκιμίου, ενώ το ίδιο παρέμεινε ανέπαφο). Αναποτελεσματικός ήταν ο τρόπος ενίσχυσης και στα άοπλα δοκίμια, καθώς στα δοκίμια 0/2 και 0/3, η αστοχία επήλθε με ξαφνική θραύση και αποκόλληση της αγκύρωσης του CFRP. Συνεπώς, επιλέχθηκε στα υπόλοιπα άοπλα δοκίμια (0/4, 0/5, 0/6) όπως και στο δοκίμιο 60/1, να τοποθετηθεί πρόσθετο ύφασμα περιτυλίξεως CFRP γύρω από τις άκρες του λαιμού του δοκιμίου, στο ήδη διαμήκως ενισχυμένο τμήμα, ώστε να επιτευχθεί εξασφάλιση της αγκύρωσης των υφασμάτων ενίσχυσης στις κρίσιμες περιοχές των άκρων. Για την εκτέλεση, λοιπόν, της ενίσχυσης χρησιμοποιήθηκαν τα υλικά που αναφέρθηκαν και παραπάνω (ύφασμα SIKAWRAP HEX-230C και ρητίνη SIKADUR 330). Η τελική μορφή των τεσσάρων αυτών δοκιμίων παρουσιάζεται στην Εικ. 3.2.22. Η περιτύλιξη του κάθε άκρου αποτελείτο από μια στροφή του υφάσματος περιμετρικά, με υπερκάλυψη στην παρειά περίπου 11 cm.



Σχήμα 3.2.22: Ενίσχυση των CFRP στα άκρα του πρισματικού δοκιμίου με πρόσθετη εγκάρσια περιτύλιξη

Τελικά από τις τέσσερις τελικές δοκιμές, αποδείχτηκε ότι η πρόσθετη ενίσχυση ήταν αποτελεσματική για όλα τα δοκίμια. Η αστοχία επήλθε εντός της ακάλυπτης ζώνης στο κέντρο, όπου αναπτύσσεται το συνδυασμένο πεδίο εφελκυσμού-θλίψης. Η αγκύρωση παρέμεινε εξασφαλισμένη ακόμα και στα ευαίσθητα άοπλα δοκίμια, τα οποία αστόχησαν με ξαφνική θραύση στο μέσον. Η αστοχία των άοπλων δοκιμίων παρουσιάζεται στην **Εικ. 3.2.23**.



Σχήμα 3.2.23: Αστοχία των άοπλων δοκιμίων στην επιθυμητή ζώνη

3.2.2 Διάταξη πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης

Για τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης στα άσπλα κυλινδρικά δοκίμια χρησιμοποιήθηκε η ίδια θλιπτική μηχανή (TONI PACT 3000), που χρησιμοποιήθηκε και για τις διαξονικές δοκιμές. Τα οπλισμένα, με ίνες, κυλινδρικά δοκίμια, λόγω του περιορισμού του φορτίου στα 600 KN, απαιτήθηκε να δοκιμαστούν σε θλιπτική μηχανή με μεγαλύτερο όριο φορτίου. Έτσι έγινε χρήση της θλιπτικής μηχανής WYKEHAM FARRANCE του Εργαστηρίου Ω.Σ. του Ε.Μ.Π., που παρέχει δυνατότητα φόρτισης μέχρι 3000 KN. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα ρύθμισης της ταχύτητας φόρτισης και γίνεται συνεχής καταγραφή της δύναμης με την οποία φορτίζεται το δοκίμιο. Η εν λόγω μηχανή παρουσιάζεται στην **Εικ. 3.2.24**.



Εικ. 3.2.24: Θλιπτική μηχανή WYKEHAM FARRANCE που χρησιμοποιήθηκε για τις μονοαξονικές δοκιμές των ινοπλισμένων κυλινδρικών δοκιμίων

Η καταγραφή των παραμορφώσεων κατά την διάρκεια φόρτισης των κυλίνδρων έγινε με χρήση δύο επαγωγικών βελομέτρων (LVDT) τύπου GT 2500 της RDP ELECTRONICS, μεγίστου εύρους μετακίνησης 5 mm. Τα δύο βελόμετρα ήταν συνδεδεμένα με δύο ψηφιακά καταγραφικά τύπου E725 της RDP ELECTRONICS (Κανάλια 84472 και 84474), τα οποία καταγράφουν ανά πάσα στιγμή οποιαδήποτε

βράχυνση ή επιμήκυνση των βελομέτρων με ακρίβεια χιλιοστού του mm (**Εικ. 3.2.25**). Τα βελόμετρα τοποθετήθηκαν στις υποδοχές που επικολλήθηκαν στην περίμετρο των κυλίνδρων (Ενότητα **3.1**). Στην **Εικ. 3.2.26** παρουσιάζεται το κυλινδρικό δοκίμιο, μαζί με τα βελόμετρα, στην θλιπτική μηχανή. Πριν την εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου, τοποθετήθηκε στην κορυφή των κυλίνδρων μια λεπτή πλάκα από μόλυβδο, προκειμένου να εξομαλυνθεί η επιφάνεια επαφής του δοκιμίου και να κατανεμηθεί ομαλά το φορτίο.



Εικ. 3.2.25: Ψηφιακά καταγραφικά βελομέτρων τύπου Ε725



Εικ. 3.2.26: Κυλινδρικό δοκίμιο με βελόμετρα στην μηχανή θλίψης

Για κάθε κύλινδρο που δοκιμάστηκε, μετρήθηκαν οι αποστάσεις ανάμεσα στις βάσεις των βελομέτρων και τους στόχους τους, προκειμένου υπολογιστεί αργότερα η ανηγμένη παραμόρφωση. Οι αποστάσεις ήταν της τάξης των 10 έως 11cm, προκειμένου να παρεμβάλλεται ικανός αριθμός αδρανών του σκυροδέματος και το μήκος μετρήσεως να απέχει από τα άκρα που επηρεάζονται από τη μηχανή, ώστε τα αποτελέσματα των καταγραφών να είναι ακριβή. Η ταχύτητα με την οποία εξασκήθηκε το θλιπτικό φορτίο ήταν 1 KN/sec για τα άοπλα δοκίμια και 2 KN/sec για τα ινοπλισμένα. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις πειραματικές δοκιμές.

Κεφάλαιο 4

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

4.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Από τις δοκιμές σε μονοαξονική θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος προέκυψαν τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στην παρούσα ενότητα. Όπως έχει περιγραφεί, χρησιμοποιήθηκαν εννέα κυλινδρικά δοκίμια ενιαίας, σύνθεσης σκυροδέματος, χωρισμένα σε τρείς ομάδες: Αοπλα, οπλισμένα με ίνες τύπου DRAMIX, με ποσότητα $V_f = 0,72\%$ (60 kg/m³) και οπλισμένα με ίνες τύπου DRAMIX, με ποσότητα $V_f = 1,2\%$ (100 kg/m³).

4.1.1 Άοπλοι κύλινδροι

• Κύλινδρος Κ 0/1: Το πρώτο άοπλο κυλινδρικό δοκίμιο δοκιμάστηκε 349 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στη μηχανή TONI PACT 3000. Το δοκίμιο μετά την έναρξη της φόρτισης με ταχύτητα 1 KN/sec, υπέστη αποφόρτιση όταν το φορτίο έφτασε την τιμή των 194 KN, περίπου. Στη συνέχεια επαναφορτίστηκε μέχρι το μέγιστο φορτίο που, ήταν 331,9 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 18,78 MPa. Το δοκίμιο αστόχησε με την δημιουργία, τυπικών για το σκυρόδεμα, κατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών [Εικ. 4.1.1 (a)&(b)].





Εικ. 4.1.1 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 0/1

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 0/1, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.2



Σχήμα 4.1.2: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 0/1

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 0/1 υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε για τον πρώτο κλάδο φόρτισης υπολογίστηκε στα 25,22 GPa. Για τον δεύτερο κλάδο φόρτισης υπολογίστηκε στα 17,63 GPa (Σχήμα 4.1.3).



Σχήμα 4.1.3: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 0/1

• Κύλινδρος Κ 0/2: Το κυλινδρικό αυτό δοκίμιο δοκιμάστηκε 349 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στη μηχανή ΤΟΝΙ ΡΑCT 3000. Η φόρτιση έγινε με ταχύτητα 1 KN/sec. Το μέγιστο φορτίο ήταν 337,9 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 19,12 MPa. Το δοκίμιο αστόχησε, επίσης, με την δημιουργία τυπικών, κατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών [Εικ. 4.1.4 (a)&(b)].





Εικ. 4.1.4 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 0/2

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 0/2, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.5.



Σχήμα 4.1.5: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου
Κ0/2

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 0/2 υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 29,55 GPa (Σχήμα 4.1.6).



Σχήμα 4.1.6: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 0/2

• Κύλινδρος Κ 0/3: Το κυλινδρικό αυτό δοκίμιο δοκιμάστηκε 349 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στη μηχανή ΤΟΝΙ ΡΑCT 3000. Η φόρτιση έγινε με ταχύτητα 1 KN/sec. Το μέγιστο φορτίο ήταν 345,9 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 19,58 MPa. Ο τύπος αστοχίας περιελάμβανε την δημιουργία των κατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών, καθώς και, περισσότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια, αποφλοιώσεις στην κορυφή [Εικ. 4.1.7 (a)&(b)].





Εικ. 4.1.7 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 0/3

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 0/3, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.8.



Σχήμα 4.1.8: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 0/3

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 0/3 υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 31,87 GPa (Σχήμα 4.1.9).



Σχήμα 4.1.9: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 0/3

Συνολικά για τα άοπλα δοκίμια, αυτό που παρατηρείται είναι ότι οι αντοχές που προέκυψαν, είναι σημαντικά μικρότερες από αυτές που αναμένονταν. Δεχόμενοι ότι η σύνθεση σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε (Ενότητα **3.1**), προορίζεται για σκυρόδεμα κατηγορίας C20/25, προκύπτει ότι η χαρακτηριστική αντοχή του κυλίνδρου στις 28 ημέρες, πρέπει να είναι $f_{ck} = 20$ MPa. Σύμφωνα, λοιπόν, με τον ΕΚΩΣ 2000 η μέση θλιπτική αντοχή f_{cm} των κυλίνδρων θα ήταν:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8(\text{MPa})$$
 (4.1.1)

Από την σχέση **4.1.1** υπολογίζεται ότι η μέση θλιπτική αντοχή των κυλίνδρων στις 28 ημέρες θα ήταν $f_{cm} = 28$ MPa. Για να λάβουμε υπόψη και τον παράγοντα της ηλικίας του σκυροδέματος, καθ' ότι παρήλθε σημαντικός αριθμός ημερών μέχρι την δοκιμή των κυλίνδρων, δεχόμαστε την σχέση αντοχής-ηλικίας σκυροδέματος του Σχήματος **4.1.10** (Hummel, 1959), που παρουσιάζει μια γραμμική σχέση της αντοχής του σκυροδέματος (σε ποσοστά της αντοχής των 28 ημερών) σε σχέση με την ηλικία σε λογαριθμική κλίμακα. Σύμφωνα, λοιπόν, με την σχέση αυτή, μπορούμε να πούμε ότι στις 350 ημέρες (τόσες είναι, περίπου, οι μέρες που παρήλθαν από την σκυροδέτηση μέχρι την διεξαγωγή των πειραμάτων), το σκυρόδεμα θα έχει μια μέση αντοχή της τάξης του 130% της αντοχής των 28 ημερών, που αντιστοιχεί σε τιμή $f_{cm} = 36,4$ MPa.



Σχήμα 4.1.10: Αύξηση αντοχής σκυροδέματος συναρτήσει του χρόνου

Από τις παρούσες δοκιμές η αντοχή που προέκυψε ήταν $f_{cm} = 19,16$ MPa. Υπάρχει, δηλαδή, μια απόκλιση της τάξης του 47,4 % της θεωρητικής τιμής. Η μεγάλη απόκλιση που υπάρχει στις αντοχές των άοπλων δοκιμίων που δοκιμάστηκαν, σε σχέση με τις αναμενόμενες, αποδίδεται στην εσφαλμένη εκτίμηση της ποσότητας του νερού που προστέθηκε κατά την διάρκεια της ανάμειξης των υλικών του σκυροδέματος. Η αύξηση νερού προκαλεί αύξηση των μικρορωγμών και των πόρων και συνεπώς οδηγεί σε πτώση της αντοχής. Λόγω του μεγέθους της απόκλισης, που παρατηρήθηκε, κρίθηκε σκόπιμή η επανάληψη δοκιμών μονοαζονικής θλίψης σε τρία ακόμα άοπλα κυλινδρικά δοκίμια. Τα δοκίμια αυτά, ήταν της ίδιας επιδιωκόμενης σύνθεσης σκυροδέματος (Ενότητα 3.1) και είχαν παραμείνει σε συνθήκες περιβάλλοντος για αριθμό ημερών περίπου ίσο με τα δοκίμια που δοκιμάστηκαν. Στις νέες δοκιμές έγινε καταγραφή μόνο της αντοχής του υλικού. Από τα εν λόγω δοκίμια, προέκυψε μέση αντοχή $f_{cm} = 31,30$ MPa (Οι τιμές φορτίου που καταγράφηκαν ήταν 577, 508 και 574 KN). Η τιμή αυτή, βρίσκεται σε συμφωνία με την αναμενόμενη θεωρητική τιμή και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτική τιμή της αντοχής του υλικού για την σύγκριση των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά το μέσο μέτρο ελαστικότητας, από τις μετρήσεις τάσεωνπαραμορφώσεων των κυλινδρικών δοκιμίων, προκύπτει η τιμή $E_{cm} = 28,88$ GPa. Για τον υπολογισμό του μέσου μέτρου ελαστικότητας των τριών επιπλέον δοκιμίων χρησιμοποιείται η σχέση που προτείνει ο ΕΚΩΣ 2000:

$$E_{cm} = 9,5 (f_{ck} + 8)^{1/3} = 9,5 (f_{cm})^{1/3}$$

$$E_{cm} \sigma \epsilon \quad \text{GPa}$$

$$f_{ck} \sigma \epsilon \quad \text{MPa}$$
(4.1.2)

Από την τιμή της f_{cm} που προέκυψε από τα πειράματα υπολογίζεται ότι $E_{cm} = 29,93$ GPa. Οι δύο τιμές βρίσκονται πολύ κοντά. Στην συνέχεια, για την σύγκριση των αποτελεσμάτων με τα ινοπλισμένα δοκίμια, θα χρησιμοποιείται ως μέση αντοχή άοπλου σκυροδέματος η τιμή $f_{cm} = 31,30$ MPa και ως μέσο μέτρο ελαστικότητας η τιμή $E_{cm} = 28,88$ GPa.

4.1.2 Κύλινδροι με V_f = 0,72 % (DRAMIX)

• Κύλινδρος Κ 60/1: Το ινοπλισμένο, αυτό, κυλινδρικό δοκίμιο δοκιμάστηκε 350 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στην μηχανή WYKEHAM FARRANCE. Το μέγιστο φορτίο ήταν 647 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 36,62 MPa. Ο τύπος αστοχίας δεν περιλαμβάνει, πλέον, ξεκάθαρες κατακόρυφες ρωγμές, όπως συμβαίνει στο άοπλο σκυρόδεμα. Έχει γίνει σχηματισμός πολλαπλών επιπέδων αστοχίας υπό γωνία σε σχέση με τον άξονα φόρτισης (Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως διατμητική αστοχία) [Εικ. 4.1.11 (a)&(b)]. Επίσης, όπως θα φανεί και στο διάγραμμα τάσεωνπαραμορφώσεων στη συνέχεια, η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο ήταν αρκετά παρατεταμένη σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα.





Εικ. 4.1.11 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 60/1

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 60/1, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.12.



Σχήμα 4.1.12: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 60/1

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 60/1 υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 43,1 GPa (Σχήμα 4.1.13).



Σχήμα 4.1.13: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 60/1

• Κύλινδρος Κ 60/2: Το ινοπλισμένο, αυτό, κυλινδρικό δοκίμιο δοκιμάστηκε 350 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στην μηχανή WYKEHAM FARRANCE. Το μέγιστο φορτίο ήταν 701 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 39,67 MPa. Ο τύπος αστοχίας περιλαμβάνει, και πάλι, τον σχηματισμό πολλαπλών κεκλιμένων ρωγμών, σε σχέση με τον άξονα φόρτισης [Eικ. 4.1.14 (a)&(b)]. Η αστοχία, και πάλι, ήταν αρκετά παρατεταμένη σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα.





Εικ. 4.1.14 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 60/2

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 60/2, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.15.



Σχήμα 4.1.15: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 60/2

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 60/2 υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 64,22 GPa (Σχήμα 4.1.16).



Σχήμα 4.1.16: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 60/2

• Κύλινδρος Κ 60/3: Το ινοπλισμένο, αυτό, κυλινδρικό δοκίμιο δοκιμάστηκε 351 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στην μηχανή WYKEHAM FARRANCE. Το μέγιστο φορτίο ήταν 645 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 36,5 MPa. Χαρακτηριστικός είναι και πάλι ο διατμητικός τύπος αστοχίας, ενώ η συμπεριφορά του δοκιμίου ήταν εξίσου πλάστιμη και με τα παραπάνω ινοπλισμένα δοκίμια [Εικ. 4.1.17 (a)&(b)].





Εικ. 4.1.17 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 60/3

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 60/2, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.18.



Σχήμα 4.1.18: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 60/3

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 60/3 υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 62,77 GPa (Σχήμα 4.1.19).


Σχήμα 4.1.19: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 60/3

Συνολικά για τα δοκίμια με περιεκτικότητα $V_f = 0,72\%$, οι αντοχές που προέκυψαν, είναι αυξημένες σε σχέση με αυτές των άοπλων δοκιμίων. Η μέση αντοχή που υπολογίστηκε ήταν $f_{cm} = 37,6$ MPa, που σημαίνει ότι η αύξηση είναι της τάξης του 20% της μέσης αντοχής του άοπλου σκυροδέματος, που όπως προέκυψε από τα προηγούμενα είναι 31,3 MPa. Παρατηρείται ότι η αύξηση είναι ξεκάθαρη και αρκετά μεγάλη σε σχέση με τις συνήθεις παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας (Κεφάλαιο 2), όπου γενικά, παρατηρείται μικρή έως αμελητέα συμβολή των ινών στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος (Η αύξηση της αντοχής που έχει παρατηρηθεί κυμαίνεται από 4%-22% και για περιεκτικότητες μεγαλύτερες από την παρούσα).

Η τιμή του μέσου μέτρου ελαστικότητας, του ινοπλισμένου σκυροδέματος με $V_f = 0,72\%$, υπολογίστηκε ως $E_{cm} = 56,7$ GPa. Προκύπτει, λοιπόν, μια αύξηση της τάξης του 96% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα ($E_{cm} = 28,88$ GPa). Η τιμή που προκύπτει είναι σημαντικά μεγαλύτερη και από αυτήν που υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση που προτείνεται στην βιβλιογραφία για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα (RILEM TC 162 – TDF):

$$E_{cm} = 9500 (f_{cm})^{1/3}$$

$$E_{cm}, \sigma \varepsilon \qquad \text{MPa}$$

$$(4.1.3)$$

Από την σχέση **4.1.3** προκύπτει η τιμή $E_{cm} = 31,82$ GPa, που είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή που προέκυψε από τις πειραματικές μετρήσεις.

Η μεγαλύτερη διαφορά που παρατηρήθηκε αφορά τον τύπο αστοχίας, καθώς και την συμπεριφορά του υλικού μετά το μέγιστο φορτίο. Η αστοχία των ινοπλισμένων δοκιμίων δεν συνέβη με τον σχηματισμό κατακόρυφων εφελκυστικών ρωγμών, όπως συμβαίνει στο άοπλο σκυρόδεμα. Σχηματίστηκαν σταδιακά, πολλές ρωγμές σε κεκλιμένα επίπεδα ως προς τον κατακόρυφο άξονα μέχρι την τελική αστοχία του δοκιμίου. Επίσης αξιοσημείωτη ήταν και η ικανότητα που επέδειξε το υλικό, να παραμορφώνεται μετά την εφαρμογή του μέγιστου φορτίου. Ο διατμητικός τρόπος αστοχίας και η μεγάλη πλαστιμότητα είναι στοιχεία που επιβεβαιώνονται και από τις μελέτες της βιβλιογραφίας.

4.1.3 Κύλινδροι με V_f = 1,2 % (DRAMIX)

• Κύλινδρος Κ 100/1: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 350 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του. Αρχικά τοποθετήθηκε για δοκιμή στην μηχανή TONI PACT 3000 (ήταν το πρώτο ινοπλισμένο δοκίμιο που δοκιμάστηκε). Λόγω του περιορισμού φόρτισης της μηχανής στα 600 KN, διακόπηκε η φόρτιση καθώς το δοκίμιο επέδειξε μεγαλύτερη αντοχή. Στην συνέχεια τοποθετήθηκε στην μηχανή WYKEHAM FARRANCE ώστε να επαναφορτιστεί. Η ταχύτητα φόρτισης ήταν 2 KN/sec. Το μέγιστο φορτίο ήταν 788 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 44,6 MPa. Το δοκίμιο επέδειξε ιδιαίτερη πλαστιμότητα και ο τύπος αστοχίας ήταν διατμητικός [Εικ. 4.1.20 (a)&(b)].





Εικ. 4.1.20 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 100/1

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 100/1, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου και μετατοπίσεων και για τις δύο φορτίσεις που υπέστη, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.21.



Σχήμα 4.1.21: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 100/1

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 100/1, και για τις δύο φορτίσεις, υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 41,57 για πλήρες διάγραμμα (Σχήμα 4.1.22).



Σχήμα 4.1.22: Υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 100/1

• Κύλινδρος Κ 100/2: Το ινοπλισμένο, αυτό, κυλινδρικό δοκίμιο δοκιμάστηκε 350 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στην μηχανή WYKEHAM FARRANCE, με ταχύτητα 2 KN/sec. Το μέγιστο φορτίο ήταν 796 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 45 MPa. Χαρακτηριστικός είναι και πάλι ο διατμητικός τύπος αστοχίας και η ιδιαίτερα πλάστιμη συμπεριφορά του δοκιμίου [Εικ. 4.1.23 (a)&(b)].





Εικ. 4.1.23 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 100/2

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 100/2, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.24.



Σχήμα 4.1.24: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 100/2

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 100/2, υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 54,22 GPa (Σχήμα 4.1.25).



Σχήμα 4.1.25: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 100/2

• Κύλινδρος Κ 100/3: Το ινοπλισμένο, αυτό, κυλινδρικό δοκίμιο δοκιμάστηκε 350 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του, στην μηχανή WYKEHAM FARRANCE, με ταχύτητα 2 KN/sec. Το μέγιστο φορτίο ήταν 730 KN, που αντιστοιχεί σε τάση 41,31 MPa. Χαρακτηριστικός είναι και πάλι ο διατμητικός τύπος αστοχίας και η ιδιαίτερα πλάστιμη συμπεριφορά του δοκιμίου [**Εικ. 4.1.26** (**a**)&(**b**)].





Εικ. 4.1.26 (a)&(b): Τύπος αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου Κ 100/2

Το διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων για το δοκίμιο Κ 100/3, όπως προέκυψε από την συνεχή καταγραφή φορτίου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.27.



Σχήμα 4.1.27: Καμπύλη τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου Κ 100/3

Ο υπολογισμός του επιβατικού μέτρου ελαστικότητας του δοκιμίου Κ 100/3, υπολογίστηκε από την κλίση της ευθείας που ξεκινάει από την αρχή των αξόνων και τέμνεται με την καμπύλη στο ύψος του 40% της αντοχής του δοκιμίου. Η τιμή του Ε υπολογίστηκε στα 45,45 GPa (Σχήμα 4.1.28).



Σχήμα 4.1.28: Υπολογισμός μέτρου ελαστικότητας δοκιμίου Κ 100/3

Από τα πειράματα στα δοκίμια με περιεκτικότητα $V_f = 1,2\%$, προέκυψαν αντοχές υψηλότερες από εκείνες των δοκιμίων με $V_f = 0,72\%$. Η μέση αντοχή που υπολογίστηκε ήταν $f_{cm} = 43,64$ MPa. Έχουμε δηλαδή αύξηση της τάξης του 39,4% της μέσης αντοχής του άοπλου σκυροδέματος και της τάξης του 16% ως προς τη μέση αντοχή των δοκιμίων με $V_f = 0,72\%$. Η αύξηση που παρατηρείται, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι αρκετά υψηλή σε σχέση με αυτήν που αναφέρεται στην βιβλιογραφία.

Η τιμή του μέσου μέτρου ελαστικότητας, του ινοπλισμένου σκυροδέματος με $V_f = 1,2\%$, υπολογίστηκε ως $E_{cm} = 47,1$ GPa. Η τιμή που προκύπτει είναι σημαντικά μικρότερη από αυτήν που μετρήθηκε στα δοκίμια με περιεκτικότητα ινών $V_f = 0,72\%$, ενώ και πάλι είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τιμή που υπολογίζεται βάσει της σχέσης **4.1.3**, και προκύπτει 33,45 GPa για $f_{cm} = 43,64$ MPa.

Όσον αφορά τον τύπο αστοχίας, ήταν διατμητικός, όπως και στους κυλίνδρους με μικρότερη περιεκτικότητα σε ίνες. Ακόμη, όπως γίνεται φανερό και από τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, που καταγράφηκαν, η αύξηση της περιεκτικότητας των ινών, οδήγησε σε αύξηση της πλαστιμότητας του υλικού.

Στην συνέχεια παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης (Πίνακας 4.1.29). Ακόμη παρουσιάζονται, τα διαγράμματα που δείχνουν την αύξηση της αντοχής, του μέτρου ελαστικότητας και του δείκτη πλαστιμότητας της κάθε ομάδας ινοπλισμένων δοκιμών σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (Σχήματα 4.1.30, 4.1.31 και 4.1.32). Τέλος, παρουσιάζονται συγκεντρωμένα, για λόγους σύγκρισης, όλα τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων, που καταγράφηκαν (Σχήμα 4.1.33). Οι αναλυτικοί πίνακες με τις καταγραφές του φορτίου και των μετατοπίσεων των βελομέτρων καθώς και τα διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων για κάθε βελόμετρο, παρατίθενται στο παράρτημα Α της παρούσας εργασίας.

Περιεκτικότητα σε ίνες V _f (%)	Αντοχή (MPa)	Πειραματικό μέτρο ελαστικότη- τας (GPa)	Θεωρητικό Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Ποσοστό αντοχής σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (%)	Ποσοστό πειραματικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (%)	Δείκτης πλαστιμότητας μ = ε _{c2} / ε _{c1}
$V_f = 0\%$	31,3	28,9	29,93	100	100	1
$V_f = 0,72\%$	37,6	56,7	31,82	120	196	1,8
<i>V_f</i> = 1,2%	43,64	47,1	33,45	139,4	163	2,1

Πίνακας 4.1.29: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης



Σχήμα 4.1.30: Αύξηση της μονοαξονικής αντοχής του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με το άοπλο, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες V_f (οι αντοχές εκφρασμένες σε ποσοστά της αντοχής του άοπλου σκυροδέματος f_{cm})



Σχήμα 4.1.31: Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με το άοπλο, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες V_f (τα μέτρα ελαστικότητας εκφρασμένα σε ποσοστά του μέτρου ελαστικότητας του άοπλου σκυροδέματος E_{cm})



Σχήμα 4.1.32: Αύξηση του δείκτη πλαστιμότητας του ινοπλισμένου σκυροδέματος σε σχέση με το άοπλο, ανάλογα με την περιεκτικότητα σε ίνες V_f



Σχήμα 4.1.33: Διαγράμματα τάσεων-παραμορφώσεων όλων των δοκιμίων

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΔΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις διαξονικές δοκιμές υπό συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης στα 18 κατάλληλα διαμορφωμένα πρισματικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος του ΕΜΠ. Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 3.1, τα δοκίμια αυτά είναι χωρισμένα σε τρείς κατηγορίες, ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε χαλύβδινες ίνες. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει άοπλα δοκίμια, η δεύτερη περιλαμβάνει ινοπλισμένα δοκίμια με περιεκτικότητα $V_f = 0.72\%$ (60 kg/m³) σε ίνες τύπου DRAMIX και η τρίτη, δοκίμια με περιεκτικότητα $V_f = 1,2\%$ (100 kg/m³) σε ίνες DRAMIX. Η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την επίτευξη των δοκιμών και ο τρόπος φόρτισης των δοκιμίων περιγράφονται λεπτομερώς στην ενότητα 3.2. Σημειώνεται, ότι τα αποτελέσματα που περιγράφονται στην παρούσα ενότητα, προέκυψαν από τις δοκιμές μετά την εφαρμογή ενίσχυσης (Ενότητα 3.2) στα δοκίμια, με χρήση υφασμάτων από ανθρακονήματα (CFRP). Δεν περιγράφονται, δηλαδή, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από προκαταρκτικές δοκιμές πριν τη εφαρμογή της ενίσχυσης, που αφορούν αστοχία του δοκιμίου εκτός της κεντρικής ζώνης, όπου αναπτύσσεται το πεδίο συνδυασμένης ετερόσημης έντασης.

Κάθε ομάδα δοκιμίων, προορίζονταν για δοκιμή με δύο διαφορετικές αναλογίες F_v/F_h (θλιπτική δύναμη / εφελκυστική δύναμη). Η διαφοροποίηση της αναλογίας αυτής, δεδομένων των διαστάσεων του δοκιμίου και της χαλύβδινης διάταξης, επιτυγχάνεται με την εισαγωγή ενός μικρού πρίσματος από χάλυβα, διαστάσεων 1,5 × 1,5 × 10 cm ανάμεσα στο δοκίμιο και την εξωτερική βάση της διάταξης. Στην ενότητα **3.2** παρουσιάστηκε και διερεύνηση της μεταβολής του λόγου F_v/F_h συναρτήσει του ανοίγματος του δοκιμίου, η οποία είναι ιδιαιτέρως χρήσιμη σε περίπτωση διεξαγωγής παρόμοιων πειραμάτων μελλοντικά. Η διαμόρφωση που χρησιμοποιήθηκε για τις ανάγκες του παρόντος πειράματος (η εισαγωγή ενδιάμεσου πρίσματος), παρουσιάζεται στην **Εικ. 4.2.1**.



Σχήμα 4.2.1: Ενισχυμένο δοκίμιο με τη διάταξη και τα δυο χαλύβδινα πρίσματα για τη μεταβολή της αναλογίας της φόρτισης

Από τις δύο αναλογίες φορτίων που εφαρμόστηκαν, προκύπτουν αντίστοιχα και δύο αναλογίες κυρίων τάσεων σ₁/σ₂. Αποκτώνται, λοιπόν, δύο σημεία στο τεταρτημόριο εφελκυσμού-θλίψης για κάθε ομάδα δοκιμίων. Οι δύο αναλογίες, φορτίων υπολογίζονται από την γεωμετρία του σχηματισμού, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2.2.



Σχήμα 4.2.2: Αναλογίες φόρτισης: (a) 1^η αναλογία με F_v/F_h = 0,42 και (b) 2^η αναλογία με F_v/F_h = 0,60

Οι αναλογίες που υπολογίζονται, είναι $F_v/F_h = 0.42$ και $F_v/F_h = 0.60$. Από τις τιμές των μεγίστων φορτίων που προκύπτουν για τα δοκίμια της κάθε ομάδας και για κάθε αναλογία φόρτισης, υπολογίζονται οι μέσες τιμές των κυρίων τάσεων κατά την αστοχία, οι οποίες δίνουν τα ζητούμενα σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας.

Για τον υπολογισμό των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, σε κάθε δοκίμιο που δοκιμάστηκε, λαμβάνονται υπόψη τα εξής:

-Η συνολική κατακόρυφη θλιπτική δύναμη που εισάγεται στην κεντρική ζώνη του δοκιμίου έχει τιμή $2 \times F_v$ και γίνεται η θεώρηση ότι κατανέμεται σε μια επιφάνεια εμβαδού 8×10 cm. Η επιφάνεια αυτή, αντιστοιχεί στο εμβαδό του ενδιάμεσου χαλύβδινου ελάσματος που εδράζεται στο κέντρο το δοκιμίου. Η θεώρηση αυτή μπορεί να γίνει, καθώς είναι πολύ κοντά στην πραγματική κατάσταση, όπως φαίνεται και από την ανάλυση με την μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, στο φορτιζόμενο δοκίμιο με την παρούσα διάταξη (Ενότητα **3.2**). Συνεπώς η κύρια τάση σ₁ μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\sigma_{1}[MPa] = \frac{1}{1000} \frac{2 \times F_{\nu}[KN]}{(0,08 \times 0,10)}$$
(4.2.1)

-Η συνολική οριζόντια εφελκυστική δύναμη που εισάγεται στο δοκίμιο έχει τιμή $2 \times F_h$ και κατανέμεται σε μια επιφάνεια εμβαδού 10×11 cm, όση είναι δηλαδή η επιφάνεια της διαμήκους διατομής του δοκιμίου ανάμεσα στις δύο διαμορφωμένες εσοχές. Συνεπώς η κύρια τάση σ₂ υπολογίζεται ως εξής:

$$\sigma_{2}[\text{MPa}] = \frac{1}{1000} \frac{2 \times F_{h}[\text{KN}]}{(0,10 \times 0,11)}$$
(4.2.2)

Από τις παραπάνω σχέσεις, προκύπτει ότι οι δύο αναλογίες των κυρίων τάσεων που εφαρμόστηκαν είναι $\sigma_1/\sigma_2 = 0,58$ και $\sigma_1/\sigma_2 = 0,83$, για την 1^{η} αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και για την 2^{η} αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,6$), αντίστοιχα. Στην περιγραφή των αποτελεσμάτων, στη συνέχεια, θα παρουσιάζονται κατευθείαν οι τιμές των κυρίων τάσεων που υπολογίστηκαν για κάθε αναλογία και τύπο δοκιμίου. Οι αναλυτικοί συγκεντρωτικοί πίνακες, με τα φορτία και τις τιμές των τάσεων που προέκυψαν παρατίθενται στο παράρτημα **B** της παρούσης.

4.2.1 Δοκίμια από άοπλο σκυρόδεμα

• Δοκίμια 0/1, 0/2 και 0/3: Τα άσπλα αυτά δοκίμια δοκιμάστηκαν 325 (το 0/1) και 365 (Τα 0/2 και 0/3) ημέρες μετά την σκυροδέτηση τους. Η δοκιμή έγινε, όπως και σε όλα τα υπόλοιπα πρισματικά δοκίμια, στην θλιπτική μηχανή TONI PACT 3000. Η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 1 KN/sec. Στα δοκίμια αυτά χρησιμοποιήθηκε η 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$). Και τα τρία δοκίμια αστόχησαν εκτός της κεντρικής ζώνης, συνεπώς τα φορτία που προέκυψαν δεν λαμβάνονται υπόψη. Στο δοκίμιο 0/1 δεν είχε εφαρμοστεί ενίσχυση στα άκρα, ενώ στα άλλα δύο, που είχε εφαρμοστεί, αποδείχτηκε ανεπαρκής καθώς η αστοχία επήλθε με την αποκόλληση της αγκύρωσης των CFRP και την τελική θραύση του δοκιμίου εκτός της επιθυμητής περιοχής. Η αστοχία των τριών, πρώτων, άοπλων δοκιμίων παρουσιάζεται στις **Εικ. 4.2.3, 4.2.4** και **4.2.5**.



Εικ. 4.2.3: Αστοχία του δοκιμίου 0/1



Εικ. 4.2.4: Αστοχία δοκιμίου 0/2



Εικ. 4.2.5: Αστοχία δοκιμίου 0/3

• Δοκίμιο 0/4: Το άοπλο, αυτό δοκίμιο δοκιμάστηκε 371 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του. Επιλέχτηκε η 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 1 KN/sec. Στο δοκίμιο είχε εφαρμοστεί πρόσθετη εγκάρσια ενίσχυση για την εξασφάλιση της αγκύρωσης των CFRP, όπως περιγράφεται στην ενότητα 3.2. Η αστοχία του δοκιμίου επήλθε με την ακαριαία θραύση κατά μήκος εφελκυστικής ρωγμής που σχηματίστηκε στο κέντρο του δοκιμίου (**Εικ. 4.2.6**). Το φορτίο που επέφερε την αστοχία μετρήθηκε ως F = 26,63

KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.7.



Εικ. 4.2.6: Αστοχία δοκιμίου 0/4

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 0/4	26,63	0,83	1,36	1,65

Πίνακας 4.2.7: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 0/4

• Δοκίμιο 0/5: Το άοπλο, αυτό δοκίμιο δοκιμάστηκε 371 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0.6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 1 KN/sec. Και στο δοκίμιο αυτό, είχε εφαρμοστεί πρόσθετη ενίσχυση για την εξασφάλιση της αγκύρωσης των CFRP. Η αστοχία του δοκιμίου επήλθε με την ακαριαία θραύση κατά μήκος εφελκυστικής ρωγμής, στο κέντρο του δοκιμίου (**Εικ. 4.2.8**). Το φορτίο που επέφερε την αστοχία μετρήθηκε ως F = 30,73 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.9**.



Εικ. 4.2.8: Αστοχία δοκιμίου 0/5

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 0/5	30,73	0,83	1,57	1,90

Πίνακας 4.2.9: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 0/5

• Δοκίμιο 0/6: Το άοπλο, αυτό δοκίμιο δοκιμάστηκε 371 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0.6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 1 KN/sec. Στο δοκίμιο αυτό, επίσης, είχε εφαρμοστεί πρόσθετη ενίσχυση για την εξασφάλιση της αγκύρωσης των CFRP. Η αστοχία του δοκιμίου επήλθε με την ακαριαία θραύση κατά μήκος εφελκυστικής ρωγμής, στο κέντρο του δοκιμίου (**Εικ. 4.2.10**). Το φορτίο που επέφερε την αστοχία μετρήθηκε ως F = 36,12 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.11**.



Εικ. 4.2.10: Αστοχία δοκιμίου 0/6

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 0/6	36,12	0,83	1,84	2,23

Πίνακας 4.2.11: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 0/6

4.2.2 Ινοπλισμένα δοκίμια με V_f = 0,72 % (DRAMIX)

• Δοκίμιο 60/1: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 360 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Το δοκίμιο είχε δοκιμαστεί χωρίς την εφαρμογή ενίσχυσης και αστόχησε στα άκρα του λαιμού. Αποκαταστάθηκε, στη συνέχεια, για να επαναφορτιστεί και τελικά απαιτήθηκε να υποστεί και περαιτέρω ενίσχυση μαζί με τα άοπλα δοκίμια, λόγω αστοχίας της αγκύρωσης των CFRP. Τελικά, μετά την εφαρμογή της πρόσθετης ενίσχυσης, η αστοχία επήλθε στην επιθυμητή ζώνη με την δημιουργία μιας κατακόρυφης εφελκυστικής ρωγμής (Εικ. 4.2.12). Η διαφορά με την αστοχία των άοπλων δοκιμίων ήταν φανερή, καθώς στην εν λόγω περίπτωση (όπως

και στα υπόλοιπα ινοπλισμένα δοκίμια) δεν υπήρξε βίαιη ψαθυρής μορφής θραύση του δοκιμίου. Οι ίνες εμπόδισαν σημαντικά την ανάπτυξη των εφελκυστικών ρωγμών με αποτέλεσμα τον σημαντικό περιορισμό της βλάβης και αύξηση της αντοχής. Το φορτίο που επέφερε την αστοχία μετρήθηκε ως F = 50,36 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.13**.



Εικ. 4.2.12: Αστοχία δοκιμίου 60/1

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ1/σ2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 60/1	50,36	0,83	2,57	3,11

• Δοκίμιο 60/2: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 347 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Το δοκίμιο είχε δοκιμαστεί χωρίς τη εφαρμογή ενίσχυσης και αστόχησε στα άκρα του λαιμού. Αποκαταστάθηκε, με την χρήση τμημάτων CFRP για να επαναφορτιστεί και η αστοχία επήλθε στην επιθυμητή ζώνη με την δημιουργία κατακόρυφης εφελκυστικής ρωγμής (Εικ. 4.2.14). Η αντοχή παρατηρείται και πάλι αυξημένη σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Το φορτίο

αστοχίας μετρήθηκε ως F = 39,45 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.2.15.



Εικ. 4.2.14: Αστοχία δοκιμίου 60/2

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 60/2	39,45	0,58	1,95	3,34

Πίνακας 4.2.15: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 60/2

• Δοκίμιο 60/3: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 354 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην κεντρική ζώνη με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.16**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 45,08 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.17**.



Εικ. 4.2.16: Αστοχία δοκιμίου 60/3

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ1/σ2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 60/3	45,08	0,58	2,23	3,82

Πίνακας 4.2.17: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 60/3

• Δοκίμιο 60/4: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 355 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην επιθυμητή ζώνη με την δημιουργία κατακόρυφης εφελκυστικής ρωγμής (**Εικ. 4.2.18**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 56,4 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.19**.



Εικ. 4.2.18: Αστοχία δοκιμίου 60/4

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Ολιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ1/σ2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 60/4	56,4	0,83	2,88	3,49

Πίνακας 4.2.19: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 60/4

• Δοκίμιο 60/5: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 354 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην κεντρική ζώνη με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.20**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 31,82 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.21**.



Εικ. 4.2.20: Αστοχία δοκιμίου 60/5

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 60/5	31,82	0,58	1,57	2,69

Πίνακας 4.2.21:	Τιμές κυρίων	τάσεων που	προέκυψαν για	το δοκίμιο	60/5

• Δοκίμιο 60/6: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 354 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην κεντρική ζώνη με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.22**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 40,36 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.23**.



Εικ. 4.2.22: Αστοχία δοκιμίου 60/6

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Ολιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ1/σ2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 60/6	40,36	0,58	1,99	3,42

Πίνακας 4.2.23: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 60/6

4.2.2 Ινοπλισμένα δοκίμια με $V_f = 1,2 \%$ (DRAMIX)

• Δοκίμιο 100/1: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 355 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0.6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Το δοκίμιο είχε δοκιμαστεί χωρίς τη εφαρμογή ενίσχυσης και αστόχησε στα άκρα του λαιμού. Αποκαταστάθηκε και επαναφορτίστηκε μέχρι την αστοχία της κεντρικής ζώνης με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.24**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 39,67 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.25**.



Εικ. 4.2.24: Αστοχία δοκιμίου 100/1

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 100/1	39,67	0,83	2,03	2,45

Πίνακας 4.2.25:	Τιμές κυ	ρίων τάσεων	που προέκυψαν	για το δοκίμιο	100/1
-----------------	----------	-------------	---------------	----------------	-------

• Δοκίμιο 100/2: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 355 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0.6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Το δοκίμιο είχε δοκιμαστεί χωρίς τη εφαρμογή ενίσχυσης και αστόχησε στα άκρα του λαιμού. Αποκαταστάθηκε και επαναφορτίστηκε μέχρι την αστοχία της κεντρικής ζώνης με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.26**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 44,45 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.27**.



Εικ. 4.2.26: Αστοχία δοκιμίου 100/2

	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
A/A	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ $_1$	τάση σ ₂
	(KN)	σ_1/σ_2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 100/2	44,45	0,83	2,27	2,75

Πίνακας 4.2.27:	Τιμές κυ	οίων τάσεων	που προέκυψα	ν για το δοκί	iuro 100/2

• Δοκίμιο 100/3: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 355 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 2^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,6$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Το δοκίμιο ενισχύθηκε στα άκρα και φορτίστηκε για πρώτη φορά μέχρι την αστοχία του κέντρου του δοκιμίου με την τυπική εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.28**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 62,10 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.29**.



Εικ. 4.2.28: Αστοχία δοκιμίου 100/3

	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
A/A	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ1	τάση σ ₂
	(KN)	σ_1/σ_2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 100/3	62,10	0,83	3,17	3,84

• Δοκίμιο 100/4: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 354 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην κεντρική ζώνη με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.30**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 40,81 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.31**.



Εικ. 4.2.30: Αστοχία δοκιμίου 100/4

	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
A/A	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ $_1$	τάση σ ₂
	(KN)	σ_1/σ_2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 100/4	40,81	0,58	2,02	3,45

Πίνακας 4.2.31: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 100/4

• Δοκίμιο 100/5: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 354 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην κεντρική ζώνη με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.32**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 40,16 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.33**.



Εικ. 4.2.32: Αστοχία δοκιμίου 100/5

	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
A/A	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ $_1$	τάση σ2
	(KN)	σ_1/σ_2	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 100/5	40,16	0,58	1,98	3,40

Πίνακας 4.2.33: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 100/5

• Δοκίμιο 100/6: Το δοκίμιο αυτό, δοκιμάστηκε 354 ημέρες μετά την σκυροδέτηση του με την 1^η αναλογία φόρτισης ($F_v/F_h = 0,42$) και η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν 2 KN/sec. Η αστοχία επήλθε στην κεντρική ζώνη με κατακόρυφη εφελκυστική ρωγμή (**Εικ. 4.2.34**). Το φορτίο αστοχίας μετρήθηκε ως F = 35,89 KN. Οι τιμές και η αναλογία των κυρίων τάσεων σ₁ και σ₂, που υπολογίστηκαν, παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2.35**.



Εικ. 4.2.34: Αστοχία δοκιμίου 100/6

Α/Δ	Μεγιστο	Αναλογία	Θλιπτική κύρια	Εφελκυστική κύρια
	φορτίο	κύριων τάσεων	τάση σ ₁	τάση σ ₂
	(KN)	σ ₁ /σ ₂	(MPa)	(MPa)
Δοκίμιο 100/6	35,89	0,58	1,77	3,04

Πίνακας 4.2.35: Τιμές κυρίων τάσεων που προέκυψαν για το δοκίμιο 100/6

Στη συνέχεια παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τα σημεία της διαξονικής περιβάλλουσας αστοχίας του άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος, όπως προέκυψαν από τις παρούσες δοκιμές (Σχήματα 4.2.36 και 4.2.37). Τα σημεία αυτά υπολογίστηκαν ως οι μέσες τιμές των κυρίων τάσεων που υπολογίστηκαν από τα δοκίμια της ίδιας ομάδας που φορτίστηκαν με την ίδια αναλογία φόρτισης σ_1/σ_2 . Οι τιμές των τάσεων εκφράστηκαν ως κλάσμα της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος, όπως αυτή προέκυψε από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίμης ($f_{cm} = 31,30$ MPa). Αποκτήθηκαν λοιπόν δύο σημεία για τις ομάδες με $V_f = 0,72$ % και $V_f = 1,2$ % και ένα σημείο για την ομάδα των άοπλων δοκιμίων, καθώς τα τρία πρώτα δοκίμια, δεν έδωσαν αξιοποιήσιμα αποτελέσματα. Στο Σχήμα 4.2.36 παρουσιάζονται τα εν λόγω σημεία σε λεπτομέρεια κοντά στην αρχή των αξόνων. Στο Σχήμα 4.2.37 παρουσιάζονται τα σημεία αυτά μαζί με τα αντίστοιχα σημεία για κάθε ομάδα, που προέκυψαν από τις μονοαξονικές δοκιμές, προκειμένου να αποκτηθεί μια εικόνα της περιβάλλουσας αστοχίας του άοπλου και του ινοπλισμένου

σκυροδέματος στο τεταρτημόριο εφελκυσμού-θλίψης. Τα σημεία που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο κάθε ομάδας και αναλογίας φόρτισης παρατίθενται σε διαγράμματα στο παράρτημα **B** της παρούσας εργασίας.



Σχήμα 4.2.36: Σημεία της περιβάλλουσας αστοχίας που προέκυψαν από τις δοκιμές εφελκυσμούθλίψης σε κλάσμα της θλιπτικής μονοαξονικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος (Λεπτομέρεια κοντά στους άξονες)



Σχήμα 4.2.37: Σημεία των περιβαλλουσών αστοχίας με χρήση δεδομένων των δοκιμών υπό μονοαζονική θλίψη και συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης (Οι τάσεις έχουν εκφραστεί σε κλάσμα της μέσης μονοαζονικής θλιπτικής αντοχής του άοπλου σκυροδέματος f_{cm})

Συνολικά αυτό που μπορεί να ειπωθεί για την διαξονική συμπεριφορά των δοκιμίων είναι ότι, γενικά, επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας (ενότητες **2.2.1** και **2.2.2**). Οι μορφές των περιβαλλουσών αστοχίας που προέκυψαν, δεν σχηματίστηκαν με χρήση πολλών σημείων, όπως θα ήταν επιθυμητό, καθώς δεν το επέτρεπε η κλίμακα του πειράματος. Ωστόσο, επιβεβαιώνουν την, γενικά, φθίνουσα γραμμική μορφή της περιβάλλουσας στο τεταρτημόριο εφελκυσμούθλίψης, όπως αυτή παρουσιάζεται στην βιβλιογραφία. Γίνεται δηλαδή φανερό, ότι η θλιπτική τάση αστοχίας μειώνεται όσο η εφελκυστική τάση αστοχίας αυξάνεται [Kupfer et al. (1969), Demeke & Tegos (1994)]. Όσον αφορά στο άοπλο σκυρόδεμα, οι Kupfer et al. αναφέρουν ότι για λόγο τάσεων σ₂/σ₁ < 1/15 = 0,067, η αστοχία επέρχεται με την δημιουργία κεκλιμένων μικρορωγμών, ενώ για σ₂/σ₁ > 0,067, η αστοχία που σχηματισμό ενιαίας εφελκυστικής ρωγμής. Αυτό έρχεται σε συμφωνία και με τις παρούσες παρατηρήσεις στα άοπλα δοκίμια, όπου ο λόγος σ₂/σ₁ >> 0,067 και η τελική αστοχία είναι απότομη και κατά μήκος μιας ενιαίας κατακόρυφης ρωγμής.

Όσον αφορά στην προσθήκη των ινών, παρατηρήθηκε ότι προσδίδουν αξιοσημείωτη αύξηση στην αντοχή του υλικού. Για την 2^η αναλογία φόρτισης (F_v/F_h = 0,6), όπου έχουμε δεδομένα και για τις τρείς κατηγορίες δοκιμίων, στα δοκίμια με $V_f = 0,72$ % προκύπτει μια αύξηση της τάξης του 71,3% της θλιπτικής τάσης σ₁ και της εφελκυστικής τάσης σ₂ έναντι του άσπλου σκυροδέματος. Η αντίστοιχη αύξηση για τα δοκίμια με $V_f = 1,2$ % είναι της τάξης του 56,4%. Στην συγκεκριμένη αναλογία, τα δοκίμια με $V_f = 1,2$ % επέδειξαν μικρότερη αντοχή από τα αντίστοιχα με $V_f = 0,72$ %. Όπως συμπεραίνεται και από την βιβλιογραφία [Demeke & Tegos, (1994)], θα αναμενόταν, τα δοκίμια με $V_f = 1,2$ % να επιδείξουν την μεγαλύτερη αντοχή. Από τα αποτελέσματα της 1^{ης} αναλογίας (F_v/F_h = 0,42) προκύπτει ότι οι δύο κατηγορίες ($V_f = 0,72$ % και $V_f = 1,2$ %) έδωσαν παραπλήσιες διαξονικές αντοχές, γεγονός που πάλι δεν φαίνεται να επιβεβαιώνεται από την βιβλιογραφία.

Σημαντική ήταν, επίσης, η επίδραση των ινών στον τρόπο αστοχίας των ινοπλισμένων δοκιμίων. Όπως έχει αναφερθεί και πιο πάνω, στην περιγραφή των αποτελεσμάτων του κάθε δοκιμίου, η αστοχία των ινοπλισμένων δοκιμίων είναι πολύ πιο ήπια από την αστοχία των άοπλων. Η δημιουργία της εφελκυστικής ρωγμής ήταν ξεκάθαρη σε όλες τις περιπτώσεις και για τις δύο περιεκτικότητες ινών. Ωστόσο, δεν υπήρξε σε καμία περίπτωση βίαιη θραύση και διαχωρισμός του δοκιμίου, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις είχαν κάνει την εμφάνιση τους και διάφορες παράλληλες μικρορωγμές. Οι ίνες γεφύρωσαν τις εφελκυστικές ρωγμές, εμποδίζοντας την έναρξη και την επέκταση τους. Επίσης, λόγω του ότι συγκράτησαν την δομή του δοκιμιού, υπήρξε περιθώριο και για τον σχηματισμό των επιπλέον μικρορωγμών, γεγονός που δείχνει μια σχετικά πλάστιμη αστοχία. Σημειώνεται, ότι η βλάβη περιορίστηκε σε τέτοιο βαθμό, σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, που ήταν δυνατή η εφαρμογή της αποκατάστασης με CFRP και τα δοκίμια που είχαν δοκιμαστεί προκαταρκτικά ήταν και πάλι έτοιμα να δεχτούν φόρτιση χωρίς κανένα πρόβλημα. Η γεφύρωση των ρωγμών είναι και ο λόγος που συντελεί στην αύξηση της αντοχής του υλικού.



ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ
5.1 ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΔΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Από την παρούσα εργασία έγινε ιδιαιτέρως φανερή η χρησιμότητα της πειραματικής διάταξης, που προτείνεται στην μελέτη του Ε. Κατσαραγάκη (1987). Όπως είναι γνωστό, η διεξαγωγή πειραμάτων υπό συνδυασμένη ένταση εφελκυσμούθλίψης, είναι ιδιαιτέρως δύσκολο εγχείρημα καθώς οι συνήθεις μέθοδοι απαιτούν την ύπαρξη εξειδικευμένων και πολύπλοκων πειραματικών διατάξεων που συχνά επηρεάζουν την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Αυτός είναι και ο κυριότερος λόγος, της περιορισμένης ύπαρξης πειραματικών δεδομένων στην βιβλιογραφία. Η δυσκολία αυτή, λοιπόν, μπορεί να ξεπεραστεί με την χρήση των χαλύβδινων βραχιόνων, που περιγράφηκαν αναλυτικά στην Ενότητα **3.2** της παρούσας εργασίας. Από την διεξαγωγή των πειραμάτων σε δοκίμια άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος υπό συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης, με χρήση της εν λόγω διάταξης, αποκτήθηκαν χρήσιμες γνώσεις γύρω από την εφαρμογή της. Αναδείχτηκαν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της διάταξης, τα οποία χρήζουν περεταίρω διερεύνησης, προκειμένου να είναι δυνατή η αξιοποίηση της και σε μελλοντικά πειράματα, με ακόμα μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα.

Σύμφωνα με την βασική ιδέα της διάταξης που χρησιμοποιείται, η μελέτη της διαξονικής αντοχής, προκύπτει από την φόρτιση του πρισματικού δοκιμίου μαζί με τους βραχίονες, οι οποίοι εφαρμόζουν μια συνδυασμένη ένταση εφελκυσμού-θλίψης. Απαραίτητη προϋπόθεση για την ορθότητα του αποτελέσματος είναι, **η αστοχία του δοκιμίου να επέλθει στην κεντρική ζώνη του**, καθώς τα εντατικό πεδίο δεν είναι ομοιόμορφο σε όλη την έκταση του δοκιμίου. Ωστόσο, όπως έγινε φανερό τόσο πειραματικά όσο και αναλυτικά, η προϋπόθεση αυτή ήταν δύσκολο να εξασφαλιστεί με αξιοπιστία. Η αστοχία των δοκιμίων που δοκιμάστηκαν προέκυπτε πολύ κοντά στα άκρα τους, δίνοντας μη αξιόπιστη εικόνα για την διαξονική συμπεριφορά του υλικού. Το γεγονός αυτό, ήταν και το κυριότερο μειονέκτημα της διάταξης. Η λύση που προτάθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν η ενίσχυση των άκρων του δοκιμίου με ύφασμα ανθρακονημάτων (Ενότητα **3.2**). Σημειώνεται ότι τα άκρα του δοκιμίου χρησιμεύουν στη στήριξη της διάταξης και δεν παίζουν ρόλο στην διαμόρφωση της διαξονικής αντοχής. Η λύση που επιλέχθηκε, όπως έγινε φανερό και από τα προηγούμενα, αποδείχτηκε αποτελεσματική, προσφέροντας μια ικανοποιητική αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος. Παρόλα αυτά και η εν λόγω λύση προσθέτει επιπλέον παραμέτρους οι οποίες πρέπει να ελεγχθούν, προκειμένου να είναι αποτελεσματική η εκτέλεση των πειραμάτων. Πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε τα υφάσματα να κολληθούν σωστά και το μήκος αγκύρωσης τους να είναι εξασφαλισμένο έναντι αποκόλλησης.

Με αφορμή τα παραπάνω, αναφέρονται διάφορες τροποποιήσεις που μπορούν να γίνουν στην μορφή της χαλύβδινης διάταξης προκειμένου να εξαλειφθεί το σημαντικό μειονέκτημα που περιγράφηκε και να μην είναι αναγκαία η ενίσχυση των άκρων. Προτείνεται η κατασκευή μεγαλύτερων ακραίων βάσεων ή η ενσωμάτωση χαλύβδινων ελασμάτων κάτω από τις υπάρχουσες, με πλάτος ίσο με το πλάτος του δοκιμίου. Η τροποποίηση αυτή θα συντελέσει στο να κατανέμεται σε όλο το πλάτος του δοκιμίου η θλιπτική δύναμη που εξασκείται στα άκρα, συντελώντας σε μια πιο ήπια εντατική κατάσταση. Ο στόχος είναι η θλιπτική τάση που θα εξασκείται στα άκρα να είναι μικρότερη από την τάση που θα εξασκείται στο κέντρο. Ομοίως, προτείνεται η κατασκευή πλατύτερης κεντρικής βάσης ή ενσωμάτωσης χαλύβδινου ελάσματος στην υπάρχουσα. Επιπροσθέτως, οι δύο τροποποιήσεις θα διευκολύνουν σημαντικά και την τοποθέτηση του δοκιμίου πάνω στους βραχίονες εξαλείφοντας και τις πιθανότητες έκκεντρης φόρτισης λόγω ασύμμετρης τοποθέτησης (Όπως αποδείχτηκε στην πράξη με τις παρούσες διαστάσεις, λόγω ανάγκης μέτρησης για την ορθή τοποθέτηση του δοκιμίου, οι πιθανότητες τέτοιων σφαλμάτων ήταν σημαντικές). Ιδιαίτερη σημασία πρέπει να δοθεί, κατά την εφαρμογή των παραπάνω τροποποιήσεων στην επιρροή της υψομετρικής διαφοράς της κεντρικής βάσης σε σχέση με τις ακραίες (Ενότητα 3.2). Η εν λόγω υψομετρική διαφορά οδηγεί στην άσκηση μεγαλύτερου θλιπτικού φορτίου στις ακραίες βάσεις σε σχέση με την μεσαία, επιδεινώνοντας την εντατική κατάσταση στα άκρα. Σημειώνεται ότι με την παρούσα υψομετρική διαφορά που ήταν 1,5 cm η θλιπτική δύναμη στα άκρα υπολογίζεται περίπου 50% αυξημένη σε σχέση με την θλιπτική δύναμη στο μέσο του δοκιμίου. Για την εξάλειψη αυτής της διαφοράς πρέπει να ληφθεί υπόψη και το ύψος της στρώσης των σφαιριδίων που τοποθετείται κάτω από την κεντρική βάση.

Ένα ακόμη θέμα που αναδείχτηκε κατά την χρήση της παρούσας διάταξης, ήταν ο τρόπος διαχείρισης της γεωμετρίας του σχηματισμού, προκειμένου να

181

προκύπτουν αναλογίες φόρτισης που να καλύπτουν όλο το εύρος της περιβάλλουσας αστοχίας στο τεταρτημόριο εφελκυσμού-θλίψης. Όπως διαπιστώθηκε, η προσθήκη των χαλύβδινων ελασμάτων (1,5 × 1,5 × 10 cm) δεν απέφερε μεγάλη διαφοροποίηση, ενώ έγινε φανερό ότι πρακτικά δεν ήταν εφικτή η τοποθέτηση περισσοτέρων καθώς θα υπήρχε κίνδυνος αστάθειας του σχηματισμού. Προέκυψε λοιπόν το συμπέρασμα, ότι προσφορότερη θα ήταν η διαφοροποίηση του ανοίγματος των δοκιμίων (δεδομένων των διαστάσεων της διάταξης), ούτως ώστε να προκύπτουν διαφορετικές αναλογίες φόρτισης. Παρατίθεται στη συνέχεια το διάγραμμα που προέκυψε από γεωμετρική διερεύνηση και παρουσιάζει την μεταβολή του λόγου F_v/F_h συναρτήσει του κεντρικού ανοίγματος της εσοχής του δοκιμίου (Σχήμα 5.1.1).



Σχήμα 5.1.1: Αναλογίες $F_v\!/\!F_h$ συναρτήσει της γεωμετρίας του δοκιμίου

Το παραπάνω διάγραμμα δίνει ιδιαιτέρως χρήσιμες πληροφορίες για μελλοντικά πειράματα, με χρήση της παρούσας διάταξης. Η περιοχή στο διάγραμμα που περικλείεται από τις δύο κατακόρυφες διακεκομμένες γραμμές είναι η περιοχή στην οποία μπορεί να κινηθεί το εύρος του ανοίγματος της εσοχής του δοκιμίου. Για άνοιγμα μικρότερο των 35 cm οι βραχίονες δεν μπορούν να κλείσουν, ενώ για άνοιγμα μεγαλύτερο των 49 cm οι βραχίονες πλησιάζουν την οριζόντια θέση. Αναδεικνύεται επίσης, η σημαντική επιρροή της υψομετρικής διαφοράς της κεντρικής βάσης στην τιμή του λόγου F_v/F_h. Πρακτικά, λοιπόν, αν επιθυμείται να εφαρμοστεί αναλογία φόρτισης $F_v/F_h > 1$, είναι απαραίτητη η εξάλειψη της υψομετρικής αυτής, διαφοράς.

5.2 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Παρατίθεται ο Πίνακας 5.2.1 όπου παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τις δοκιμές μονοαξονικής θλίψης.

Περιεκτικότητα $ σε$ ίνες V_f (%)	Αντοχή (MPa)	Πειραματικό μέτρο ελαστικότη- τας (GPa)	Θεωρητικό Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Ποσοστό αντοχής σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (%)	Ποσοστό πειραματικού μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (%)	Δείκτης πλαστιμότητας μ = ε _{c2} / ε _{c1}
$V_f = 0\%$	31,3	28,9	29,93	100	100	1
$V_f = 0,72\%$	37,6	56,7	31,82	120	196	1,8
<i>V_f</i> = 1,2%	43,64	47,1	33,45	139,4	163	2,1

Σχήμα 5.2.1: Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης

Από τις δοκιμές έγινε φανερό ότι η πρόσθεση χαλύβδινων ινών με αγκυρώσεις στα άκρα (DRAMIX), προκάλεσαν σαφή αύξηση της αντοχής σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα. Παρατηρήθηκε μια αύξηση της τάξης του 20% για περιεκτικότητα $V_f =$ 0,72% και της τάξης του 39,4% για περιεκτικότητα ινών $V_f =$ 1,2%. Όσον αφορά στις μελέτες της βιβλιογραφίας, το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι δεν υπάρχει ξεκάθαρη βελτίωση στην συμπεριφορά του σκυροδέματος υπό μονοαξονική θλίψη, λόγω προσθήκης ινών. Οι αυξήσεις που έχουν παρατηρηθεί σε έρευνες κυμαίνονται μεταξύ 4% - 13%, ενώ έχει αναφερθεί και αύξηση της τάξης του 22% από τους Traina & Mansour (1991) (Ενότητα **2.2.2**) μόνο όμως για ίνες με l/d = 60 και περιεκτικότητα $V_f =$ 1,5%. Η αύξηση, δηλαδή, εξαρτάται και από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινών. Οι Yin et al. (1989) παρατήρησαν αμελητέα αύξηση της αντοχής, ενώ αναφέρουν ότι η αποτελεσματικότητα των ινών στην συμπεριφορά υπό μονοαξονική θλίψη εξαρτάται από την ποσότητα των χονδρόκοκκων αδρανών που περιέχονται στο μείγμα σκυροδέματος. Σε αμελητέα συμβολή των ινών στην μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, καταλήγουν και οι Demeke & Tegos (1994). Παρατηρούμε, συνεπώς, ότι η αύξηση που πρόεκυψε από τις παρούσες δοκιμές είναι αρκετά μεγάλη σε σχέση με όσα έχουν παρατηρηθεί. Η αύξηση της αντοχής, έχει σχέση με την περίσφιγξη που προκαλεί η παρουσία των ινών στην μάζα του υλικού.

Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι υπάρχει και μια σαφής αύξηση του μέτρου ελαστικότητας των ινοπλισμένων δοκιμίων. Αυτή η αύξηση, όμως, δεν φαίνεται να ακολουθεί γραμμική κατανομή σε σχέση με την περιεκτικότητα, αφού όπως προκύπτει, τα δοκίμια με $V_f = 0,72\%$ επέδειξαν αύξηση του μέτρου ελαστικότητας μέχρι και 96% σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα, σε αντίθεση με τα δοκίμια με $V_f = 1,2\%$ όπου η αύξηση ήταν της τάξης του 63%. Η διαφορά αυτή, μπορεί να αποδοθεί στο γεγονός ότι η αύξηση της περιεκτικότητας των ινών, οδηγεί σε χαλαρότερη σύνδεση των υλικών του μείγματος. Από την έρευνα των Traina & Mansour, προκύπτει ότι η αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, επίσης εξαρτάται, από τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ινών.

Ο τύπος αστοχίας, των δοκιμίων που περιείχαν ίνες προέκυψε σημαντικά διαφορετικός από αυτόν του άοπλου σκυροδέματος. Οι ρωγμές που σχηματίζονταν δεν ήταν πλέον ξεκάθαρα κατακόρυφες (εμφανίζονταν υπό γωνίες 20 - 40° σε σχέση με τον κατακόρυφο άξονα της φόρτισης) και η αστοχία δεν ήταν απότομη. Ο τύπος αυτός, αστοχίας, που περιγράφεται ως διατμητικός, επιβεβαιώνεται από όλες τις πειραματικές μελέτες. Η πλαστιμότητα που επέδειξαν τα ινοπλισμένα δοκίμια ήταν αξιοσημείωτη, όπως φαίνεται και από τον Πίνακα 5.2.1. Η αύξηση της παραμόρφωσης αστοχίας αυξήθηκε και με την αύξηση της περιεκτικότητας σε ίνες.

5.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΕΙΣ ΔΙΑΞΟΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

Παρατίθενται στο Σχήμα 5.3.1 οι περιβάλλουσες αστοχίας, όπως προέκυψαν από τις παρούσες δοκιμές, ενώ προβάλλονται και οι αντίστοιχες περιβάλλουσες στο τεταρτημόριο εφελκυσμού-θλίψης, των Kupfer et al. και των Demeke & Tegos για αντιπαραβολή (Σχήματα 5.3.2 και 5.3.1).



Σχήμα 5.3.1: Περιβάλλουσες αστοχίας άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος με τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας









Σχήμα 5.3.2: Περιβάλλουσες αστοχίας άοπλου σκυροδέματος των Kupfer et al.

Συγκρίνοντας τα διαγράμματα των περιβαλλουσών αστοχίας, παρατηρείται ότι τα δεδομένα που προέκυψαν, επιβεβαιώνουν γενικά, τις παρατηρήσεις που προκύπτουν από τη βιβλιογραφία. Οι εφελκυστικές αντοχές, προκύπτουν σημαντικά μικρότερες από τις αντοχές μονοαξονικής θλίψης. Είναι φανερό ότι η θλιπτική τάση αστοχίας μειώνεται όσο η εφελκυστική τάση αστοχίας αυξάνεται [Kupfer et al. (1969), Demeke & Tegos (1994)], γεγονός που δημιουργεί την περίπου γραμμική μορφή που έχουν οι περιβάλλουσες. Όσον αφορά στις αντοχές, αυτό που παρατηρείται είναι ότι προκύπτουν γενικά, μικρότερες από αυτές που παρουσιάζονται στις πειραματικές έρευνες. Το άοπλο σκυρόδεμα, κοντά στον εφελκυστικό άξονα, επέδειξε μικρότερη αντοχή, με μείωση της τάξης του 20% σε σχέση με τις μελέτες των Kupfer et al. και Demeke & Tegos. Για το ινοπλισμένο σκυρόδεμα η σύγκριση, δεν μπορεί να είναι ξεκάθαρη, καθώς, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικές περιεκτικότητες ινών (Ο τύπος των ινών που χρησιμοποιήθηκε ήταν ίδιος με αυτόν που χρησιμοποίησαν οι Demeke & Tegos). Παρόλα αυτά, μπορεί να παρατηρηθεί ότι οι αντοχές των δύο ομάδων προκύπτουν μικρότερες απ' ότι θα αναμενόταν. Τα σημεία των δοκιμίων με $V_f = 0.72\%$ βρίσκονται πολύ κοντά στην καμπύλη με $V_f = 0.5\%$ της μελέτης των Demeke & Tegos, ενώ πιο μεγάλη μείωση παρουσίασαν τα δοκίμια με $V_f = 1,2\%$ της παρούσας εργασίας, καθώς βρίσκονται πολύ κοντά και χαμηλότερα από τα αντίστοιχα, αυτών με $V_f = 0.72\%$. Και για τις δύο κατηγορίες όμως, οι αντοχές που προέκυψαν είναι μεγαλύτερες σε σχέση με το άοπλο σκυρόδεμα (71,3% για τα δοκίμια με $V_f = 0,72\%$ και 56,4% για τα δοκίμια με $V_f =$ 1,2%), γεγονός που δείχνει την ευνοϊκή επιρροή των ινών στη διαξονική συμπεριφορά του σκυροδέματος και επιβεβαιώνει τις παρατηρήσεις της βιβλιογραφίας. Σημειώνεται ότι για την μείωση των αποκλίσεων των τιμών από τις πραγματικές, θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν περισσότερα δοκίμια, ώστε να είναι πιο αξιόπιστες οι μέσες τιμές των τάσεων που υπολογίστηκαν. Ένας ακόμη παράγοντας που ενδέχεται να δημιούργησε αποκλίσεις στα πειράματα της παρούσας, είναι το γεγονός ότι οι μονοαξονικές και διαξονικές αντοχές μετρήθηκαν σε διαφορετικές μηχανές θλίψης. Η πρακτική αυτή θα πρέπει να αποφεύγεται, καθώς τα διαφορετικά χαρακτηριστικά και το τρόπος μέτρησης της κάθε μηχανής μπορεί να έχουν απόκλιση.

Όσον αφορά στον τρόπο αστοχίας των δοκιμίων, για τα άοπλα δοκίμια, επιβεβαιώνεται η παρατήρηση των Kupfer et al., ότι για λόγο $\sigma_2/\sigma_1 > 0,067$ η αστοχία επέρχεται με θραύση κατά μήκος εφελκυστικής ρωγμής. Όσον αφορά στα ινοπλισμένα δοκίμια η βλάβη κατά την αστοχία, ήταν εμφανώς περιορισμένη και το δοκίμιο διατηρούσε την δομή του ακέραιη. Το γεγονός αυτό έρχεται σε πλήρη συμφωνία με τα όσα αναφέρονται για την αστοχία του υλικού από τους Demeke & Tegos. Η αστοχία των ινοπλισμένων δοκιμίων, αν και ήταν σχετικά απότομη, είχε έναν πιο πλάστιμο χαρακτήρα, καθώς σε πολλές περιπτώσεις, πριν την αστοχία είχαν αρχίσει να κάνουν την εμφάνιση τους και διάφορες μικρορωγμές παραπλεύρως της κύριας ρωγμής.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, από τα πειράματα της παρούσας εργασίας, είναι περιορισμένα και δεν επαρκούν για την ολοκληρωμένη μόρφωση της περιβάλλουσας αστοχίας εφελκυσμού-θλίψης του άοπλου και ινοπλισμένου σκυροδέματος. Παρέχουν ωστόσο, ικανοποιητικές ενδείξεις για την συμπεριφορά τους. Σε γενικές γραμμές επιβεβαιώνουν τα δεδομένα που υπάρχουν, ενώ αναδεικνύουν την χρησιμότητα της πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε. Σε μελλοντικές διεξαγωγές παρόμοιων πειραμάτων θα πρέπει να εξετάζονται περισσότερες αναλογίες φόρτισης, σε όλο το εύρος της περιβάλλουσας, ενώ τα σημεία που υπολογίζονται θα πρέπει να προκύπτουν ως μέση τιμή από μεγαλύτερο αριθμό δοκιμίων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Στη συνέχεια παρατίθενται, για λόγους πληρότητας, οι πίνακες που περιέχουν αναλυτικά τις τιμές των φορτίων και των μετατοπίσεων, καθώς και τις τιμές των τάσεων και των παραμορφώσεων, που προέκυψαν από την συνεχή καταγραφή του κάθε βελομέτρου και για κάθε κυλινδρικό δοκίμιο που δοκιμάστηκε υπό μονοαξονική θλίψη. Μετά από κάθε πίνακα παρουσιάζεται και το αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων, στο οποίο φαίνονται οι καμπύλες για κάθε βελόμετρο ξεχωριστά, καθώς και η τελική καμπύλη που προέκυψε και έχει καταχωρηθεί στο κεφάλαιο της παρουσίασης των αποτελεσμάτων.

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 0/1										
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)	APIΣTEPO (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ		
0	0	129	0	0	122	0	0	0		
5,27	0,29824561	130	-0,001	-9,09091E-06	120	0,002	1,81818E-05	4,5455E-06		
10,48	0,59309564	130	-0,001	-9,09091E-06	118	0,004	3,63636E-05	1,3636E-05		
15	0,84889643	129	0	0	117	0,005	4,54545E-05	2,2727E-05		
20,39	1,15393322	128	0,001	9,09091E-06	116	0,006	5,45455E-05	3,1818E-05		
25,23	1,4278438	128	0,001	9,09091E-06	114	0,008	7,27273E-05	4,0909E-05		
30,37	1,71873231	127	0,002	1,81818E-05	113	0,009	8,18182E-05	0,00005		
35,35	2,00056593	126	0,003	2,72727E-05	113	0,009	8,18182E-05	5,4545E-05		
40,05	2,26655348	125	0,004	3,63636E-05	112	0,01	9,09091E-05	6,3636E-05		
45,51	2,57555178	124	0,005	4,54545E-05	111	0,011	0,0001	7,2727E-05		
50,64	2,86587436	123	0,006	5,45455E-05	111	0,011	0,0001	7,7273E-05		
60,8	3,44086022	120	0,009	8,18182E-05	110	0,012	0,000109091	9,5455E-05		
65,9	3,729485	119	0,01	9,09091E-05	110	0,012	0,000109091	0,0001		
70,5	3,98981324	117	0,012	0,000109091	109	0,013	0,000118182	0,00011364		
75,1	4,25014148	115	0,014	0,000127273	109	0,013	0,000118182	0,00012273		
80,4	4,55008489	113	0,016	0,000145455	109	0,013	0,000118182	0,00013182		
85,5	4,83870968	111	0,018	0,000163636	108	0,014	0,000127273	0,00014545		
90,4	5,11601585	109	0,02	0,000181818	108	0,014	0,000127273	0,00015455		
95,2	5,38766271	108	0,021	0,000190909	108	0,014	0,000127273	0,00015909		
100,4	5,6819468	106	0,023	0,000209091	107	0,015	0,000136364	0,00017273		
110,3	6,24221845	102	0,027	0,000245455	105	0,017	0,000154545	0,0002		
120	6,79117148	97	0,032	0,000290909	102	0,02	0,000181818	0,00023636		
130,3	7,37408036	88	0,041	0,000372727	99	0,023	0,000209091	0,00029091		
140,5	7,95132994	75	0,054	0,000490909	95	0,027	0,000245455	0,00036818		
150,5	8,51726089	58	0,071	0,000645455	91	0,031	0,000281818	0,00046364		
160,2	9,06621392	42	0,087	0,000790909	86	0,036	0,000327273	0,00055909		
170,4	9,6434635	26	0,103	0,000936364	79	0,043	0,000390909	0,00066364		
180,4	10,2093945	8	0,121	0,0011	72	0,05	0,000454545	0,00077727		
190,1	10,7583475	-5	0,134	0,001218182	65	0,057	0,000518182	0,00086818		
194,4	11,0016978	-10	0,139	0,001263636	63	0,059	0,000536364	0,0009		

0	0	79	0,05	0,000454545	122	0	0	0,00022727
5,69	0,32201471	78	0,051	0,000463636	120	0,002	1,81818E-05	0,00024091
10,24	0,5795133	77	0,052	0,000472727	118	0,004	3,63636E-05	0,00025455
15,36	0,86926995	76	0,053	0,000481818	115	0,007	6,36364E-05	0,00027273
20,11	1,13808715	75	0,054	0,000490909	113	0,009	8,18182E-05	0,00028636
25,73	1,45614035	73	0,056	0,000509091	111	0,011	0,0001	0,00030455
30,21	1,70967742	71	0,058	0,000527273	109	0,013	0,000118182	0,00032273
35,45	2,00622524	70	0,059	0,000536364	107	0,015	0,000136364	0,00033636
40,44	2,28862479	68	0,061	0,000554545	105	0,017	0,000154545	0,00035455
45,46	2,57272213	66	0,063	0,000572727	103	0,019	0,000172727	0,00037273
50,28	2,84550085	65	0,064	0,000581818	101	0,021	0,000190909	0,00038636
60,2	3,40690436	61	0,068	0,000618182	97	0,025	0,000227273	0,00042273
65,4	3,70118846	59	0,07	0,000636364	96	0,026	0,000236364	0,00043636
70,3	3,97849462	57	0,072	0,000654545	94	0,028	0,000254545	0,00045455
75,3	4,2614601	55	0,074	0,000672727	92	0,03	0,000272727	0,00047273
80,3	4,54442558	53	0,076	0,000690909	91	0,031	0,000281818	0,00048636
85,2	4,82173175	51	0,078	0,000709091	89	0,033	0,0003	0,00050455
90,5	5,12167516	49	0,08	0,000727273	88	0,034	0,000309091	0,00051818
100,3	5,67628749	45	0,084	0,000763636	85	0,037	0,000336364	0,00055
110	6,22524052	41	0,088	0,0008	82	0,04	0,000363636	0,00058182
120,1	6,79683079	37	0,092	0,000836364	80	0,042	0,000381818	0,00060909
130,3	7,37408036	32	0,097	0,000881818	77	0,045	0,000409091	0,00064545
140,5	7,95132994	28	0,101	0,000918182	75	0,047	0,000427273	0,00067273
150,3	8,50594228	23	0,106	0,000963636	73	0,049	0,000445455	0,00070455
160,4	9,07753254	18	0,111	0,001009091	71	0,051	0,000463636	0,00073636
170,1	9,62648557	13	0,116	0,001054545	69	0,053	0,000481818	0,00076818
180,5	10,2150538	7	0,122	0,001109091	67	0,055	0,0005	0,00080455
190,4	10,7753254	1	0,128	0,001163636	65	0,057	0,000518182	0,00084091
200,3	11,3355971	-4	0,133	0,001209091	63	0,059	0,000536364	0,00087273
210,5	11,9128466	-11	0,14	0,001272727	61	0,061	0,000554545	0,00091364
220,6	12,4844369	-21	0,15	0,001363636	60	0,062	0,000563636	0,00096364
230,4	13,0390492	-33	0,162	0,001472727	59	0,063	0,000572727	0,00102273
240,4	13,6049802	-47	0,176	0,0016	60	0,062	0,000563636	0,00108182
250	14,1482739	-60	0,189	0,001718182	60	0,062	0,000563636	0,00114091
260,6	14,7481607	-75	0,204	0,001854545	60	0,062	0,000563636	0,00120909
270,4	15,3027731	-89	0,218	0,001981818	60	0,062	0,000563636	0,00127273
280,2	15,8573854	-103	0,232	0,002109091	58	0,064	0,000581818	0,00134545
290,6	16,4459536	-117	0,246	0,002236364	56	0,066	0,0006	0,00141818
300,8	17,0232032	-134	0,263	0,002390909	51	0,071	0,000645455	0,00151818
310,3	17,5608376	-162	0,291	0,002645455	45	0,077	0,0007	0,00167273
320,1	18,1154499	-195	0,324	0,002945455	38	0,084	0,000763636	0,00185455
330,1	18,6813809	-240	0,369	0,003354545	30	0,092	0,000836364	0,00209545
331,9	18,7832484	-290	0,419	0,003809091	23	0,099	0,0009	0,00235455



ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 0/2										
ΔYNAMH (KN)	ТАΣН (Мра)	ΑΡΙΣΤΕΡΟ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ		
0	0	817	0	0	231	0	0	0		
6,03	0,34125637	816	0,001	9,25926E-06	229	0,002	1,8182E-05	1,3721E-05		
11,32	0,64063384	816	0,001	9,25926E-06	227	0,004	3,6364E-05	2,2811E-05		
15,75	0,89134126	817	0	0	225	0,006	5,4545E-05	2,7273E-05		
20,58	1,16468591	817	0	0	223	0,008	7,2727E-05	3,6364E-05		
25,92	1,46689304	818	-0,001	-9,25926E-06	220	0,011	0,0001	4,537E-05		
30,68	1,73627617	818	-0,001	-9,25926E-06	217	0,014	0,00012727	5,9007E-05		
35,95	2,03452179	819	-0,002	-1,85185E-05	214	0,017	0,00015455	6,8013E-05		
40,65	2,30050934	819	-0,002	-1,85185E-05	212	0,019	0,00017273	7,7104E-05		
45,94	2,59988681	820	-0,003	-2,77778E-05	209	0,022	0,0002	8,6111E-05		
50,14	2,83757782	820	-0,003	-2,77778E-05	207	0,024	0,00021818	9,5202E-05		
55,9	3,16355405	820	-0,003	-2,77778E-05	204	0,027	0,00024545	0,00010884		
60,8	3,44086022	820	-0,003	-2,77778E-05	202	0,029	0,00026364	0,00011793		
65,8	3,72382569	821	-0,004	-3,7037E-05	200	0,031	0,00028182	0,00012239		
70,5	3,98981324	821	-0,004	-3,7037E-05	198	0,033	0,0003	0,00013148		
75,3	4,2614601	821	-0,004	-3,7037E-05	196	0,035	0,00031818	0,00014057		
80,5	4,5557442	821	-0,004	-3,7037E-05	193	0,038	0,00034545	0,00015421		
85,8	4,85568761	821	-0,004	-3,7037E-05	190	0,041	0,00037273	0,00016785		
90,5	5,12167516	822	-0,005	-4,62963E-05	188	0,043	0,00039091	0,00017231		
95,7	5,41595925	822	-0,005	-4,62963E-05	186	0,045	0,00040909	0,0001814		
101,5	5,74419921	822	-0,005	-4,62963E-05	183	0,048	0,00043636	0,00019503		
110,4	6,24787776	822	-0,005	-4,62963E-05	179	0,052	0,00047273	0,00021322		
120,9	6,84210526	822	-0,005	-4,62963E-05	174	0,057	0,00051818	0,00023594		
130,3	7,37408036	822	-0,005	-4,62963E-05	171	0,06	0,00054545	0,00024958		
141,8	8,02490096	820	-0,003	-2,77778E-05	167	0,064	0,00058182	0,00027702		
150,8	8,53423882	818	-0,001	-9,25926E-06	165	0,066	0,0006	0,00029537		
160,9	9,10582909	816	0,001	9,25926E-06	163	0,068	0,00061818	0,00031372		

172,4	9,75664969	813	0,004	3,7037E-05	160	0,071	0,00064545	0,00034125
180,4	10,2093945	811	0,006	5,55556E-05	159	0,072	0,00065455	0,00035505
190,3	10,7696661	808	0,009	8,33333E-05	157	0,074	0,00067273	0,00037803
200,3	11,3355971	805	0,012	0,000111111	155	0,076	0,00069091	0,00040101
210,7	11,9241653	802	0,015	0,000138889	154	0,077	0,0007	0,00041944
220,8	12,4957555	798	0,019	0,000175926	152	0,079	0,00071818	0,00044705
230,7	13,0560272	794	0,023	0,000212963	150	0,081	0,00073636	0,00047466
240,7	13,6219581	790	0,027	0,00025	149	0,082	0,00074545	0,00049773
250,8	14,1935484	786	0,031	0,000287037	147	0,084	0,00076364	0,00052534
260,1	14,7198642	780	0,037	0,000342593	146	0,085	0,00077273	0,00055766
270,6	15,3140917	773	0,044	0,000407407	145	0,086	0,00078182	0,00059461
280,6	15,8800226	766	0,051	0,000472222	144	0,087	0,00079091	0,00063157
290,7	16,4516129	755	0,062	0,000574074	142	0,089	0,00080909	0,00069158
304,8	17,2495756	733	0,084	0,000777778	139	0,092	0,00083636	0,00080707
310,6	17,5778155	725	0,092	0,000851852	138	0,093	0,00084545	0,00084865
320,5	18,1380872	704	0,113	0,001046296	135	0,096	0,00087273	0,00095951
331,5	18,7606112	676	0,141	0,001305556	129	0,102	0,00092727	0,00111641
337,9	19,122807	647	0,17	0,001574074	123	0,108	0,00098182	0,00127795



	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 0/3										
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (Mpa)	ΑΡΙΣΤΕΡΟ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	∆EΞI (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ			
0	0	-404	0	0	308	0	0	0			
5,13	0,2903226	-404	0	0	308	0	0	0			
11,3	0,639502	-405	0,001	9,346E-06	306	0,002	1,852E-05	1,393E-05			
16,45	0,9309564	-405	0,001	9,346E-06	305	0,003	2,778E-05	1,856E-05			
21,41	1,2116582	-406	0,002	1,869E-05	304	0,004	3,704E-05	2,786E-05			
25,81	1,4606678	-406	0,002	1,869E-05	303	0,005	4,63E-05	3,249E-05			

30,72	1,7385399	-407	0,003	2,804E-05	301	0,007	6,481E-05	4,643E-05
36,16	2,0464063	-407	0,003	2,804E-05	300	0,008	7,407E-05	5,106E-05
40,49	2,2914544	-408	0,004	3,738E-05	298	0,01	9,259E-05	6,499E-05
45,93	2,5993209	-408	0,004	3,738E-05	297	0,011	0,0001019	6,962E-05
50,27	2,8449349	-408	0,004	3,738E-05	295	0,013	0,0001204	7,888E-05
60,9	3,4465195	-408	0,004	3,738E-05	291	0,017	0,0001574	9,74E-05
65,9	3,729485	-408	0,004	3,738E-05	289	0,019	0,0001759	0,0001067
71,3	4,0350877	-408	0,004	3,738E-05	287	0,021	0,0001944	0,0001159
75,7	4,2840973	-407	0,003	2,804E-05	284	0,024	0,0002222	0,0001251
80,6	4,5614035	-407	0,003	2,804E-05	282	0,026	0,0002407	0,0001344
86,1	4,8726655	-407	0,003	2,804E-05	280	0,028	0,0002593	0,0001436
91	5,1499717	-407	0,003	2,804E-05	278	0,03	0,0002778	0,0001529
95,8	5,4216186	-407	0,003	2,804E-05	276	0,032	0,0002963	0,0001622
100,7	5,6989247	-407	0,003	2,804E-05	274	0,034	0,0003148	0,0001714
111	6,2818336	-407	0,003	2,804E-05	270	0,038	0,0003519	0,0001899
120,8	6,836446	-407	0,003	2,804E-05	266	0,042	0,0003889	0,0002085
130,5	7,385399	-407	0,003	2,804E-05	262	0,046	0,0004259	0,000227
140,8	7,9683079	-404	0	0	254	0,054	0,0005	0,00025
151,1	8,5512168	-404	0	0	248	0,06	0,0005556	0,0002778
160,7	9,0945105	-404	0	0	241	0,067	0,0006204	0,0003102
171,1	9,6830787	-404	0	0	235	0,073	0,0006759	0,000338
180,8	10,232032	-405	0,001	9,346E-06	228	0,08	0,0007407	0,000375
191,1	10,814941	-406	0,002	1,869E-05	218	0,09	0,0008333	0,000426
200,8	11,363894	-408	0,004	3,738E-05	208	0,1	0,0009259	0,0004817
210,6	11,918506	-413	0,009	8,411E-05	191	0,117	0,0010833	0,0005837
220,9	12,501415	-418	0,014	0,0001308	168	0,14	0,0012963	0,0007136
230,6	13,050368	-422	0,018	0,0001682	134	0,174	0,0016111	0,0008897
240,9	13,633277	-427	0,023	0,000215	106	0,202	0,0018704	0,0010427
250,6	14,18223	-431	0,027	0,0002523	88	0,22	0,002037	0,0011447
259,8	14,702886	-435	0,031	0,0002897	59	0,249	0,0023056	0,0012976
270,7	15,319751	-442	0,038	0,0003551	32	0,276	0,0025556	0,0014553
280,9	15,897001	-446	0,042	0,0003925	7	0,301	0,002787	0,0015898
290,1	16,417657	-450	0,046	0,0004299	-14	0,322	0,0029815	0,0017057
301	17,034522	-455	0,051	0,0004766	-43	0,351	0,00325	0,0018633
311,2	17,611771	-460	0,056	0,0005234	-79	0,387	0,0035833	0,0020533
321	18,166384	-466	0,062	0,0005794	-130	0,438	0,0040556	0,0023175
330,7	18,715337	-436	0,032	0,0002991	-199	0,507	0,0046944	0,0024968
340,4	19,26429	-430	0,026	0,000243	-266	0,574	0,0053148	0,0027789
345,9	19,575552	-424	0,02	0,0001869	-333	0,641	0,0059352	0,0030611



ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 60/1									
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)	ΑΡΙΣΤΕΡΟ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ	
0	0	2244	0	0	1167	0	0	0	
6,1	0,34521788	2243	0,001	9,25926E-06	1166	0,001	9,3458E-06	9,3025E-06	
12,8	0,72439162	2242	0,002	1,85185E-05	1165	0,002	1,8692E-05	1,8605E-05	
16,8	0,95076401	2243	0,001	9,25926E-06	1164	0,003	2,8037E-05	1,8648E-05	
20,2	1,14318053	2242	0,002	1,85185E-05	1163	0,004	3,7383E-05	2,7951E-05	
25,5	1,44312394	2242	0,002	1,85185E-05	1162	0,005	4,6729E-05	3,2624E-05	
30,5	1,72608942	2242	0,002	1,85185E-05	1160	0,007	6,5421E-05	4,197E-05	
36,3	2,05432937	2243	0,001	9,25926E-06	1159	0,008	7,4766E-05	4,2013E-05	
40	2,26372383	2243	0,001	9,25926E-06	1157	0,01	9,3458E-05	5,1359E-05	
45,9	2,59762309	2243	0,001	9,25926E-06	1156	0,011	0,0001028	5,6031E-05	
50,1	2,83531409	2243	0,001	9,25926E-06	1155	0,012	0,00011215	6,0704E-05	
55,3	3,12959819	2243	0,001	9,25926E-06	1153	0,014	0,00013084	7,005E-05	
60,3	3,41256367	2244	0	0	1151	0,016	0,00014953	7,4766E-05	
65,7	3,71816638	2244	0	0	1149	0,018	0,00016822	8,4112E-05	
71	4,01810979	2244	0	0	1148	0,019	0,00017757	8,8785E-05	
75,3	4,2614601	2245	-0,001	-9,25926E-06	1146	0,021	0,00019626	9,3501E-05	
81	4,58404075	2245	-0,001	-9,25926E-06	1144	0,023	0,00021495	0,00010285	
85,3	4,82739106	2246	-0,002	-1,85185E-05	1142	0,025	0,00023364	0,00010756	
90,6	5,12733447	2246	-0,002	-1,85185E-05	1140	0,027	0,00025234	0,00011691	
95,8	5,42161856	2246	-0,002	-1,85185E-05	1139	0,028	0,00026168	0,00012158	
100,6	5,69326542	2247	-0,003	-2,77778E-05	1137	0,03	0,00028037	0,0001263	
105,6	5,9762309	2247	-0,003	-2,77778E-05	1135	0,032	0,00029907	0,00013564	
111,5	6,31013016	2248	-0,004	-3,7037E-05	1133	0,034	0,00031776	0,00014036	
121,3	6,8647425	2248	-0,004	-3,7037E-05	1130	0,037	0,00034579	0,00015438	
125,1	7,07979626	2248	-0,004	-3,7037E-05	1129	0,038	0,00035514	0,00015905	
131,3	7,43067346	2248	-0,004	-3,7037E-05	1127	0,04	0,00037383	0,0001684	

135,9	7,6910017	2249	-0,005	-4,62963E-05	1125	0,042	0,00039252	0,00017311
141,5	8,00792303	2249	-0,005	-4,62963E-05	1124	0,043	0,00040187	0,00017779
145,7	8,24561404	2249	-0,005	-4,62963E-05	1122	0,045	0,00042056	0,00018713
151,3	8,56253537	2249	-0,005	-4,62963E-05	1120	0,047	0,00043925	0,00019648
155,9	8,82286361	2250	-0,006	-5,55556E-05	1119	0,048	0,0004486	0,00019652
161,1	9,11714771	2250	-0,006	-5,55556E-05	1117	0,05	0,00046729	0,00020587
165,9	9,38879457	2250	-0,006	-5,55556E-05	1116	0,051	0,00047664	0,00021054
170,9	9,67176005	2250	-0,006	-5,55556E-05	1114	0,053	0,00049533	0,00021989
175,7	9,9434069	2250	-0,006	-5,55556E-05	1113	0,054	0,00050467	0,00022456
180,9	10,237691	2251	-0,007	-6,48148E-05	1111	0,056	0,00052336	0,00022927
185,7	10,5093379	2251	-0,007	-6,48148E-05	1109	0,058	0,00054206	0,00023862
190,7	10,7923033	2251	-0,007	-6,48148E-05	1108	0,059	0,0005514	0,00024329
195,3	11,0526316	2251	-0,007	-6,48148E-05	1106	0,061	0,00057009	0,00025264
200,5	11,3469157	2251	-0,007	-6,48148E-05	1105	0,062	0,00057944	0,00025731
211,2	11,9524618	2251	-0,007	-6,48148E-05	1101	0,066	0,00061682	0,000276
220,3	12,467459	2252	-0,008	-7,40741E-05	1098	0,069	0,00064486	0,00028539
230,6	13,0503679	2252	-0,008	-7,40741E-05	1095	0,072	0,0006729	0,00029941
240,5	13,6106395	2251	-0,007	-6,48148E-05	1092	0,075	0,00070093	0,00031806
250,4	14,1709111	2251	-0,007	-6,48148E-05	1089	0,078	0,00072897	0,00033208
260	14,7142049	2251	-0,007	-6,48148E-05	1087	0,08	0,00074766	0,00034142
270	15,2801358	2250	-0,006	-5,55556E-05	1085	0,082	0,00076636	0,0003554
280,4	15,868704	2248	-0,004	-3,7037E-05	1084	0,083	0,0007757	0,00036933
290,7	16,4516129	2247	-0,003	-2,77778E-05	1082	0,085	0,00079439	0,00038331
300	16,9779287	2246	-0,002	-1,85185E-05	1080	0,087	0,00081308	0,00039728
310,7	17,5834748	2245	-0,001	-9,25926E-06	1077	0,09	0,00084112	0,00041593
320,7	18,1494058	2244	0	0	1075	0,092	0,00085981	0,00042991
330,5	18,7040181	2243	0,001	9,25926E-06	1073	0,094	0,0008785	0,00044388
341,2	19,3095642	2242	0,002	1,85185E-05	1071	0,096	0,0008972	0,00045786
350,6	19,8415393	2241	0,003	2,77778E-05	1069	0,098	0,00091589	0,00047183
360,6	20,4074703	2239	0,005	4,62963E-05	1066	0,101	0,00094393	0,00049511
370,6	20,9734012	2238	0,006	5,55556E-05	1064	0,103	0,00096262	0,00050909
380,4	21,5280136	2237	0,007	6,48148E-05	1061	0,106	0,00099065	0,00052773
390,6	22,1052632	2235	0,009	8,33333E-05	1059	0,108	0,00100935	0,00054634
400	22,6372383	2234	0,01	9,25926E-05	1056	0,111	0.00103738	0,00056499
414	23,4295416	2227	0.017	0.000157407	1043	0,124	0.00115888	0,00065814
425	24.0520656	2225	0.019	0.000175926	1037	0.13	0.00121495	0.00069544
431	24.3916242	2224	0.02	0.000185185	1034	0.133	0.00124299	0.00071409
441	24.9575552	2221	0.023	0.000212963	1027	0.14	0.00130841	0.00076069
450	25.466893	2219	0.025	0.000231481	1021	0.146	0.00136449	0.00079798
460	26.032824	2217	0.027	0.00025	1014	0.153	0.00142991	0.00083995
470	26.598755	2215	0.029	0.000268519	1006	0.161	0.00150467	0.0008866
481	27.221279	2215	0.029	0.000268519	996	0,171	0.00159813	0.00093332
491	27 78721	2209	0.035	0.000324074	986	0 181	0.00169159	0.00100783
500	28 2965478	2205	0.038	0.000351852	975	0,101	0.00179439	0.00107312
521	29 4850028	2198	0.046	0.000425026	949	0.218	0.00203738	0.00123165
540	30 5602716	2100	0.052	0.000420320	016	0.251	0.00234570	0.001/1207
561	31 7497267	2131	0.061	0.000564815	876	0.201	0,00204019	0.00141027
501	32 8220055	2103	0.060	0,000004010	828	0,230	0,00271900	0,00104222
600	33 0559574	2170	0,009	0,00030003	752	0,339	0,00310022	0,00190300
620	35,9000074	2103	0,001	0,00016667	610	0,414	0.00520561	0,00200900
624	25 7400404	2140	0,099		010	0,007	0,00020001	0,00377047
031	35,7102434	2115	0,129	0,001194444	480	0,001	0,00054000	0,00510990
647	36,615/329	2045	0,199	0,001842593	253	0,914	0,00854206	0,00519232

647	36,6157329	1918	0,326	0,003018519	61	1,106	0,01033645	0,00667748
647	36,6157329	1832	0,412	0,003814815	-64	1,231	0,01150467	0,00765974
647	36,6157329	1713	0,531	0,004916667	-230	1,397	0,01305607	0,00898637
647	36,6157329	1625	0,619	0,005731481	-348	1,515	0,01415888	0,00994518
647	36,6157329	1628	0,616	0,005703704	-124	1,291	0,01206542	0,00888456



	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 60/2											
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)	AΡΙΣΤΕΡΟ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ				
0	0	1175	0	0	1859	0	0	0				
7	0,3961517	1175	0	0	1857	0,002	1,835E-05	9,174E-06				
13,9	0,786644	1175	0	0	1855	0,004	3,67E-05	1,835E-05				
16,8	0,950764	1175	0	0	1855	0,004	3,67E-05	1,835E-05				
20	1,1318619	1175	0	0	1855	0,004	3,67E-05	1,835E-05				
25,9	1,4657612	1175	0	0	1854	0,005	4,587E-05	2,294E-05				
30,9	1,7487267	1175	0	0	1853	0,006	5,505E-05	2,752E-05				
35,5	2,0090549	1175	0	0	1852	0,007	6,422E-05	3,211E-05				
41,2	2,3316355	1175	0	0	1851	0,008	7,339E-05	3,67E-05				
46	2,6032824	1175	0	0	1850	0,009	8,257E-05	4,128E-05				
56,6	3,2031692	1175	0	0	1849	0,01	9,174E-05	4,587E-05				
66,8	3,7804188	1175	0	0	1847	0,012	0,0001101	5,505E-05				
70,6	3,9954726	1174	0,001	9,174E-06	1847	0,012	0,0001101	5,963E-05				
75,8	4,2897566	1174	0,001	9,174E-06	1846	0,013	0,0001193	6,422E-05				
81	4,5840407	1174	0,001	9,174E-06	1845	0,014	0,0001284	6,881E-05				
86,9	4,91794	1174	0,001	9,174E-06	1845	0,014	0,0001284	6,881E-05				

96,3	5,4499151	1173	0,002	1,835E-05	1843	0,016	0,0001468	8,257E-05
100,8	5,704584	1173	0,002	1,835E-05	1843	0,016	0,0001468	8,257E-05
110,8	6,270515	1173	0,002	1,835E-05	1842	0,017	0,000156	8,716E-05
120,9	6,8421053	1172	0,003	2,752E-05	1840	0,019	0,0001743	0,0001009
130,7	7,3967176	1172	0,003	2,752E-05	1839	0,02	0,0001835	0,0001055
141,3	7,9966044	1171	0,004	3,67E-05	1838	0,021	0,0001927	0,0001147
150,9	8,5398981	1170	0,005	4,587E-05	1836	0,023	0,000211	0,0001284
160,7	9,0945105	1170	0,005	4,587E-05	1835	0,024	0,0002202	0,000133
170,9	9,67176	1169	0,006	5,505E-05	1834	0,025	0,0002294	0,0001422
185,1	10,475382	1168	0,007	6,422E-05	1832	0,027	0,0002477	0,000156
191,8	10,854556	1168	0,007	6,422E-05	1831	0,028	0,0002569	0,0001606
201,8	11,420487	1167	0,008	7,339E-05	1830	0,029	0,0002661	0,0001697
210,8	11,929825	1166	0,009	8,257E-05	1829	0,03	0,0002752	0,0001789
220,8	12,495756	1165	0,01	9,174E-05	1828	0,031	0,0002844	0,0001881
231,7	13,11262	1165	0,01	9,174E-05	1826	0,033	0,0003028	0,0001972
240,8	13,627617	1164	0,011	0,0001009	1825	0,034	0,0003119	0,0002064
251,1	14,210526	1163	0,012	0,0001101	1824	0,035	0,0003211	0,0002156
261,3	14,787776	1162	0,013	0,0001193	1823	0,036	0,0003303	0,0002248
271,1	15,342388	1161	0,014	0,0001284	1822	0,037	0,0003394	0,0002339
281,1	15,908319	1160	0,015	0,0001376	1820	0,039	0,0003578	0,0002477
290	16,411998	1159	0,016	0,0001468	1819	0,04	0,000367	0,0002569
300,3	16,994907	1158	0,017	0,000156	1818	0,041	0,0003761	0,0002661
311,4	17,62309	1157	0,018	0,0001651	1816	0,043	0,0003945	0,0002798
320,5	18,138087	1156	0,019	0,0001743	1815	0,044	0,0004037	0,000289
331	18,732315	1155	0,02	0,0001835	1814	0,045	0,0004128	0,0002982
340,8	19,286927	1154	0,021	0,0001927	1813	0,046	0,000422	0,0003073
350,8	19,852858	1153	0,022	0,0002018	1811	0,048	0,0004404	0,0003211
360,8	20,418789	1152	0,023	0,000211	1810	0,049	0,0004495	0,0003303
370,8	20,98472	1151	0,024	0,0002202	1809	0,05	0,0004587	0,0003394
380,8	21,550651	1150	0,025	0,0002294	1807	0,052	0,0004771	0,0003532
390,6	22,105263	1149	0,026	0,0002385	1806	0,053	0,0004862	0,0003624
400	22,637238	1147	0,028	0,0002569	1804	0,055	0,0005046	0,0003807
423	23,938879	1138	0,037	0,0003394	1799	0,06	0,0005505	0,000445
432	24,448217	1136	0,039	0,0003578	1793	0,066	0,0006055	0,0004817
449	25,4103	1133	0,042	0,0003853	1788	0,071	0,0006514	0,0005183
454	25,693265	1131	0,044	0,0004037	1787	0,072	0,0006606	0,0005321
461	26,089417	1129	0,046	0,000422	1784	0,075	0,0006881	0,000555
471	26,655348	1126	0,049	0,0004495	1781	0,078	0,0007156	0,0005826
482	27,277872	1123	0,052	0,0004771	1777	0,082	0,0007523	0,0006147
492	27,843803	1121	0,054	0,0004954	1774	0,085	0,0007798	0,0006376
502	28,409734	1118	0,057	0,0005229	1770	0,089	0,0008165	0,0006697
521	29,485003	1113	0,062	0,0005688	1763	0,096	0,0008807	0,0007248
540	30,560272	1107	0,068	0,0006239	1754	0,105	0,0009633	0,0007936
560	31,692134	1100	0,075	0,0006881	1743	0,116	0,0010642	0,0008761
580	32,823995	1091	0,084	0,0007706	1729	0,13	0,0011927	0,0009817
601	34,01245	1077	0,098	0,0008991	1710	0,149	0,001367	0,001133
620	35,087719	1058	0,117	0,0010734	1687	0,172	0,001578	0,0013257
640	36,219581	1029	0,146	0,0013394	1657	0,202	0,0018532	0,0015963
650	36,785512	1002	0,173	0,0015872	1634	0,225	0,0020642	0,0018257
661	37,408036	964	0,211	0,0019358	1606	0,253	0,0023211	0,0021284
671	37,973967	927	0,248	0,0022752	1579	0,28	0,0025688	0,002422
684	38,709677	891	0,284	0,0026055	1542	0,317	0,0029083	0,0027569
	1							

690	39,049236	872	0,303	0,0027798	1521	0,338	0,0031009	0,0029404
700	39,615167	830	0,345	0,0031651	1467	0,392	0,0035963	0,0033807
701	39,67176	802	0,373	0,003422	1426	0,433	0,0039725	0,0036972
701	39,67176	763	0,412	0,0037798	1363	0,496	0,0045505	0,0041651
701	39,67176	735	0,44	0,0040367	1326	0,533	0,0048899	0,0044633
701	39,67176	706	0,469	0,0043028	1297	0,562	0,005156	0,0047294
701	39,67176	663	0,512	0,0046972	1264	0,595	0,0054587	0,005078



ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 60/3											
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)	AΡΙΣΤΕΡΟ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ			
0	0	1696	0	0	1575	0	0	0			
6,9	0,39049236	1697	-0,001	-9,25926E-06	1574	0,001	9,2593E-06	0			
10,8	0,61120543	1696	0	0	1574	0,001	9,2593E-06	4,6296E-06			
16,9	0,95642332	1696	0	0	1574	0,001	9,2593E-06	4,6296E-06			
20,8	1,17713639	1695	0,001	9,25926E-06	1574	0,001	9,2593E-06	9,2593E-06			
26,9	1,52235427	1695	0,001	9,25926E-06	1574	0,001	9,2593E-06	9,2593E-06			
31,4	1,7770232	1694	0,002	1,85185E-05	1574	0,001	9,2593E-06	1,3889E-05			
35,9	2,03169213	1693	0,003	2,77778E-05	1573	0,002	1,8519E-05	2,3148E-05			
40,9	2,31465761	1692	0,004	3,7037E-05	1573	0,002	1,8519E-05	2,7778E-05			
45,9	2,59762309	1692	0,004	3,7037E-05	1573	0,002	1,8519E-05	2,7778E-05			
50,9	2,88058857	1691	0,005	4,62963E-05	1573	0,002	1,8519E-05	3,2407E-05			
55,9	3,16355405	1690	0,006	5,55556E-05	1573	0,002	1,8519E-05	3,7037E-05			
61,8	3,49745331	1689	0,007	6,48148E-05	1573	0,002	1,8519E-05	4,1667E-05			
66,8	3,78041879	1688	0,008	7,40741E-05	1573	0,002	1,8519E-05	4,6296E-05			
71,8	4,06338427	1687	0,009	8,33333E-05	1573	0,002	1,8519E-05	5,0926E-05			
76	4,30107527	1687	0,009	8,33333E-05	1573	0,002	1,8519E-05	5,0926E-05			
82,9	4,69156763	1685	0,011	0,000101852	1573	0,002	1,8519E-05	6,0185E-05			

86,8	4,9122807	1685	0,011	0,000101852	1573	0,002	1,8519E-05	6,0185E-05
91,8	5,19524618	1684	0,012	0,000111111	1573	0,002	1,8519E-05	6,4815E-05
95,8	5,42161856	1683	0,013	0,00012037	1573	0,002	1,8519E-05	6,9444E-05
101,5	5,74419921	1682	0,014	0,00012963	1573	0,002	1,8519E-05	7,4074E-05
110,2	6,23655914	1680	0,016	0,000148148	1573	0,002	1,8519E-05	8,3333E-05
120,6	6,82512733	1678	0,018	0,000166667	1573	0,002	1,8519E-05	9,2593E-05
130,9	7,40803622	1676	0,02	0,000185185	1573	0,002	1,8519E-05	0,00010185
140,4	7,94567063	1674	0,022	0,000203704	1573	0,002	1,8519E-05	0,00011111
151,3	8,56253537	1672	0,024	0,000222222	1573	0,002	1,8519E-05	0,00012037
160,9	9,10582909	1670	0,026	0,000240741	1574	0,001	9,2593E-06	0,000125
170,9	9,67176005	1667	0,029	0,000268519	1574	0,001	9,2593E-06	0,00013889
180,9	10,237691	1665	0,031	0,000287037	1574	0,001	9,2593E-06	0,00014815
190,3	10,7696661	1662	0,034	0,000314815	1575	0	0	0,00015741
202,3	11,4487832	1659	0,037	0,000342593	1575	0	0	0,0001713
211,8	11,9864177	1657	0,039	0,000361111	1575	0	0	0,00018056
221	12,5070741	1655	0,041	0,00037963	1575	0	0	0,00018981
230,8	13,0616865	1652	0,044	0,000407407	1575	0	0	0,0002037
240,8	13,6276174	1650	0,046	0,000425926	1575	0	0	0,00021296
251,7	14,2444822	1647	0,049	0,000453704	1575	0	0	0,00022685
261,9	14,8217317	1645	0,051	0,000472222	1575	0	0	0,00023611
270,7	15,319751	1643	0,053	0,000490741	1575	0	0	0,00024537
280,9	15,8970006	1640	0,056	0,000518519	1575	0	0	0,00025926
290,9	16,4629315	1638	0,058	0,000537037	1575	0	0	0,00026852
300,9	17,0288625	1635	0,061	0,000564815	1575	0	0	0,00028241
312,5	17,6853424	1632	0,064	0,000592593	1575	0	0	0,0002963
322,9	18,2739106	1629	0,067	0,00062037	1575	0	0	0,00031019
331,8	18,7775891	1627	0,069	0,000638889	1575	0	0	0,00031944
340	19,2416525	1624	0,072	0,000666667	1575	0	0	0,00033333
351,7	19,9037917	1621	0,075	0,000694444	1575	0	0	0,00034722
361,6	20,4640634	1618	0,078	0,000722222	1575	0	0	0,00036111
371,5	21,024335	1615	0,081	0,00075	1575	0	0	0,000375
380,8	21,5506508	1613	0,083	0,000768519	1574	0,001	9,2593E-06	0,00038889
391,9	22,1788342	1609	0,087	0,000805556	1574	0,001	9,2593E-06	0,00040741
400	22,6372383	1606	0,09	0,000833333	1573	0,002	1,8519E-05	0,00042593
414	23,4295416	1591	0,105	0,000972222	1571	0,004	3,7037E-05	0,00050463
422	23,8822864	1586	0,11	0,001018519	1571	0,004	3,7037E-05	0,00052778
431	24,3916242	1581	0,115	0,001064815	1570	0,005	4,6296E-05	0,00055556
441	24,9575552	1574	0,122	0,00112963	1568	0,007	6,4815E-05	0,00059722
450	25,466893	1568	0,128	0,001185185	1567	0,008	7,4074E-05	0,00062963
460	26,032824	1559	0,137	0,001268519	1565	0,01	9,2593E-05	0,00068056
470	26,598755	1551	0,145	0,001342593	1562	0,013	0,00012037	0,00073148
481	27,221279	1542	0,154	0,001425926	1559	0,016	0,00014815	0,00078704
494	27,9569892	1529	0,167	0,001546296	1555	0,02	0,00018519	0.00086574
501	28,3531409	1522	0,174	0.001611111	1552	0.023	0,00021296	0.00091204
521	29,4850028	1498	0,198	0,001833333	1543	0,032	0,0002963	0,00106481
540	30,5602716	1470	0,226	0,002092593	1533	0,042	0,00038889	0,00124074
562	31,8053198	1441	0,255	0,002361111	1520	0,055	0,00050926	0,00143519
581	32,8805886	1406	0.29	0.002685185	1505	0.07	0.00064815	0.00166667
601	34,0124505	1367	0,329	0,003046296	1487	0,088	0,00081481	0,00193056
610	34,5217883	1349	0,347	0,003212963	1476	0.099	0,00091667	0,00206481
620	35,0877193	1319	0.377	0.003490741	1450	0.125	0.00115741	0.00232407
630	35,6536503	1273	0,423	0,003916667	1409	0,166	0,00153704	0,00272685
		-	· · ·		-		the second se	

635	35,9366157	1257	0,439	0,004064815	1365	0,21	0,00194444	0,00300463
641	36,2761743	1278	0,418	0,00387037	1277	0,298	0,00275926	0,00331481
645	36,5025467	1337	0,359	0,003324074	1110	0,465	0,00430556	0,00381481
645	36,5025467	1330	0,366	0,003388889	923	0,652	0,00603704	0,00471296
645	36,5025467	1320	0,376	0,003481481	699	0,876	0,00811111	0,0057963
645	36,5025467	1310	0,386	0,003574074	413	1,162	0,01075926	0,00716667
645	36,5025467	1300	0,396	0,003666667	244	1,331	0,01232407	0,00799537
645	36,5025467	1270	0,426	0,003944444	70	1,505	0,01393519	0,00893981



	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 100/1											
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)	APIΣTEPO (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ				
0	0	265	0	0	1009	0	0	0				
6,73	0,3808715	265	0	0	1009	0	0	0				
10,61	0,6004527	263	0,002	1,852E-05	1008	0,001	9,091E-06	1,38E-05				
15,87	0,8981324	261	0,004	3,704E-05	1008	0,001	9,091E-06	2,306E-05				
20,86	1,180532	260	0,005	4,63E-05	1007	0,002	1,818E-05	3,224E-05				
26,34	1,4906621	259	0,006	5,556E-05	1007	0,002	1,818E-05	3,687E-05				
30,73	1,7391058	258	0,007	6,481E-05	1006	0,003	2,727E-05	4,604E-05				
35,64	2,0169779	258	0,007	6,481E-05	1005	0,004	3,636E-05	5,059E-05				
40,61	2,2982456	257	0,008	7,407E-05	1004	0,005	4,545E-05	5,976E-05				
45,56	2,5783814	256	0,009	8,333E-05	1003	0,006	5,455E-05	6,894E-05				
51,08	2,8907753	255	0,01	9,259E-05	1003	0,006	5,455E-05	7,357E-05				
60,9	3,4465195	253	0,012	0,0001111	1001	0,008	7,273E-05	9,192E-05				
65,1	3,6842105	252	0,013	0,0001204	1000	0,009	8,182E-05	0,0001011				
70,5	3,9898132	251	0,014	0,0001296	999	0,01	9,091E-05	0,0001103				
76,4	4,3237125	250	0,015	0,0001389	998	0,011	0,0001	0,0001194				
81,3	4,6010187	249	0,016	0,0001481	998	0,011	0,0001	0,0001241				

r								
85,6	4,844369	248	0,017	0,0001574	997	0,012	0,0001091	0,0001332
91	5,1499717	247	0,018	0,0001667	996	0,013	0,0001182	0,0001424
95,3	5,393322	246	0,019	0,0001759	996	0,013	0,0001182	0,0001471
100,3	5,6762875	245	0,02	0,0001852	995	0,014	0,0001273	0,0001562
111	6,2818336	243	0,022	0,0002037	993	0,016	0,0001455	0,0001746
120,7	6,8307866	241	0,024	0,0002222	991	0,018	0,0001636	0,0001929
130,4	7,3797397	239	0,026	0,0002407	990	0,019	0,0001727	0,0002067
140,8	7,9683079	236	0,029	0,0002685	988	0,021	0,0001909	0,0002297
151,1	8,5512168	234	0,031	0,000287	986	0,023	0,0002091	0,0002481
160,3	9,0718732	232	0,033	0,0003056	985	0,024	0,0002182	0,0002619
170,6	9,6547821	229	0,036	0,0003333	984	0,025	0,0002273	0,0002803
180,9	10,237691	227	0,038	0,0003519	982	0,027	0,0002455	0,0002987
190,1	10,758347	225	0,04	0,0003704	981	0,028	0,0002545	0,0003125
201	11,375212	222	0,043	0,0003981	979	0,03	0,0002727	0,0003354
210,8	11,929825	220	0,045	0,0004167	977	0,032	0,0002909	0,0003538
220,6	12,484437	217	0,048	0,0004444	976	0,033	0,0003	0,0003722
230,9	13,067346	214	0,051	0,0004722	974	0,035	0,0003182	0,0003952
240,7	13,621958	212	0,053	0,0004907	972	0,037	0,0003364	0,0004136
251	14,204867	209	0,056	0,0005185	970	0,039	0,0003545	0,0004365
260,7	14,75382	207	0,058	0,000537	969	0,04	0,0003636	0,0004503
270,6	15,314092	204	0,061	0,0005648	967	0,042	0,0003818	0,0004733
281	15,90266	201	0,064	0,0005926	965	0,044	0,0004	0,0004963
290,2	16,423316	198	0,067	0,0006204	963	0,046	0,0004182	0,0005193
301,1	17,040181	195	0,07	0,0006481	961	0,048	0,0004364	0,0005423
310,9	17,594793	192	0,073	0,0006759	959	0,05	0,0004545	0,0005652
321,8	18,211658	189	0,076	0,0007037	957	0,052	0,0004727	0,0005882
331,1	18,737974	186	0,079	0,0007315	955	0,054	0,0004909	0,0006112
340,8	19,286927	183	0,082	0,0007593	953	0,056	0,0005091	0,0006342
350,6	19,841539	180	0,085	0,000787	951	0,058	0,0005273	0,0006572
361	20,430108	177	0,088	0,0008148	948	0,061	0,0005545	0,0006847
370,7	20,979061	173	0,092	0,0008519	946	0,063	0,0005727	0,0007123
380,5	21,533673	170	0,095	0,0008796	944	0,065	0,0005909	0,0007353
390,8	22,116582	166	0,099	0,0009167	941	0,068	0,0006182	0,0007674
400,5	22,665535	163	0,102	0,0009444	938	0,071	0,0006455	0,0007949
410,9	23,254103	159	0,106	0,0009815	935	0,074	0,0006727	0,0008271
420,8	23,814375	155	0,11	0,0010185	932	0,077	0,0007	0,0008593
431,1	24,397284	151	0,114	0,0010556	929	0,08	0,0007273	0,0008914
440,4	24,923599	147	0,118	0,0010926	925	0,084	0,0007636	0,0009281
450,1	25,472552	142	0,123	0,0011389	922	0,087	0,0007909	0,0009649
461,1	26,095076	137	0,128	0,0011852	917	0,092	0,0008364	0,0010108
470,7	26,63837	132	0,133	0,0012315	913	0,096	0,0008727	0,0010521
481	27,221279	127	0,138	0,0012778	908	0,101	0,0009182	0,001098
490,4	27,753254	121	0,144	0,0013333	904	0,105	0,0009545	0,0011439
500,8	28,341822	114	0,151	0,0013981	898	0,111	0,0010091	0,0012036
510,9	28,913413	107	0,158	0,001463	892	0,117	0,0010636	0,0012633
520.9	29,479344	100	0,165	0,0015278	885	0,124	0,0011273	0,0013275
530,1	30	92	0,173	0,0016019	879	0,13	0,0011818	0,0013918
540.3	30,57725	82	0,183	0,0016944	871	0.138	0,0012545	0,0014745
550.3	31,143181	71	0,194	0,0017963	863	0,146	0,0013273	0,0015618
560.5	31,72043	57	0,208	0,0019259	853	0,156	0,0014182	0,0016721
570,9	32,308998	43	0,222	0,0020556	843	0,166	0,0015091	0,0017823
0	0	83	0	0	783	0	0	0

13.8 0.760847 81 0.002 1.852E-05 781 0.002 1.835E-05 20.7 1.1714771 98 0.002 1.825E-05 771 0.002 1.181E-05 1.835E-05 20.7 1.1714771 98 0.005 4.785E-05 779 0.003 2.272E-05 3.676E-05 31.4 1.7770232 77 0.006 6.565E-05 780 0.003 2.272E-05 4.141E-05 34.0 2.200718 76 0.006 5.656E-05 779 0.004 3.636E-05 5.656E-05 44.2 2.414001 75 0.008 7.477E-05 779 0.005 4.545E-05 6.439E-05 56.2 3.18052 71 0.012 0.001111 777 0.006 5.456E-05 8.238E-05 66.2 3.446625 70 0.013 0.001204 777 0.006 5.456E-05 8.238E-05 75.6 4.274438 86 0.015 0.0001399 777 0.006 5.456E-0	-	r	1	1	1		1		
15.5 0.877183 81 0.002 1,852E-05 781 0.002 1,818E-05 2,288E-05 28.2 1,4827391 78 0.003 2,778E-06 780 0.003 2,272E-05 3,878E-05 31.4 1,7770222 77 0.006 6,566E-05 780 0.003 2,272E-05 4,141E-05 40.2 2,646701 77 0.006 6,566E-05 770 0.004 3,356E-05 5,552E-05 41.2 2,882479 74 0.009 8,333E-06 7778 0.005 4,545E-05 6,632E-05 56.2 3,180532 72 0.011 0.00119 778 0.006 5,45E-05 9,202E-05 66.2 3,746422 70 0.013 0.001296 777 0.006 5,45E-05 9,202E-05 75.6 4,27438 88 0.015 0.001296 7777 0.006 5,45E-05 9,208E-05 75.6 4,27438 88 0.014 0.0001747 777 0.006 <td>13,8</td> <td>0,7809847</td> <td>81</td> <td>0,002</td> <td>1,852E-05</td> <td>781</td> <td>0,002</td> <td>1,818E-05</td> <td>1,835E-05</td>	13,8	0,7809847	81	0,002	1,852E-05	781	0,002	1,818E-05	1,835E-05
20.7 1,1714771 80 0.005 4,281-45 780 0.003 2,272F-05 3,478-05 31,4 1,7770232 77 0.006 5,556F-05 780 0.003 2,272F-05 4,141E-05 30,3 2,260718 77 0.006 5,556F-05 780 0.003 2,272F-05 4,141E-05 30,3 2,267018 77 0.004 3,438F-05 5,666E-05 6,638E-05 5,666E-05 44,2 2,614001 775 0.008 7,477E-05 778 0.005 4,545E-05 6,438E-05 6,438E-05 6,438E-05 6,438E-05 6,438E-05 8,28E-05 6,438E-05 8,28E-05 6,438E-05 8,28E-05 7,38E-05 8,28E-05 8,28E-05 8,28E-05 8,28E-05 8,28E-05 7,38E-05 8,28E-05	15,5	0,877193	81	0,002	1,852E-05	781	0,002	1,818E-05	1,835E-05
28.2 1,4827391 78 0,005 4,2727E-05 3,672E-05 31.4 1,777032 77 0,006 5,556E-05 780 0,003 2,727E-05 4,141E-05 30.2 2,2048701 77 0,006 5,556E-05 778 0,004 3,636E-05 5,059E-05 40.2 2,41401 75 0,007 6,401E-05 778 0,005 4,542E-05 6,339E-05 778 0,005 4,542E-05 7,385E-05 51 2,8802470 74 0,009 8,332E-05 778 0,005 4,542E-05 7,385E-05 64.2 3,746429 70 0,0113 0,0001294 777 0,006 5,455E-05 8,238E-05 70.2 3,724533 69 0,014 0,0001294 777 0,006 5,455E-05 0,0001099 73.6 4,272438 66 0,017 0,000174 775 0,006 7,272E-05 0,0001151 73.6 4,3483942 66 0,017 0,000167 <	20,7	1,1714771	80	0,003	2,778E-05	781	0,002	1,818E-05	2,298E-05
31,4 1,7770322 77 0,006 5,566-05 780 0,003 2,727E-05 4,141E-05 40,3 2,280701 76 0,007 6,491E-06 779 0,004 3,636E-05 5,056E-05 5,056E-05 7,078 0,004 3,636E-05 5,052E-05 40,2 2,614601 75 0,008 7,407E-05 778 0,005 4,445E-05 6,522E-05 56,2 3,180532 72 0,011 0,0001191 778 0,005 4,545E-05 8,736E-05 66,2 3,7464829 70 0,013 0,0001204 777 0,006 5,455E-05 8,746E-05 75,6 4,27483 68 0,014 0,0001398 777 0,006 5,455E-05 0,0001031 80,8 4,6814036 67 0,016 0,000157 7775 0,006 7,273E-05 0,0001151 80,4 5,398643 66 0,017 0,000177 773 0,001 8,102E-05 0,0001141 9,01244	26,2	1,4827391	78	0,005	4,63E-05	780	0,003	2,727E-05	3,678E-05
36.2 2,046701 77 0,006 5,558E-05 780 0,003 2,727E-05 4,141E-05 46.2 2,614601 75 0,008 7,407E-05 778 0,004 3,638E-05 5,552E-05 51 2,8862473 74 0,009 8,338E-05 778 0,005 4,545E-05 6,438E-05 7,85E-05 51 2,8862473 74 0,011 0,0001019 778 0,005 4,545E-05 6,438E-05 7,85E-05 66.2 3,746452 70 0,012 0,0001124 777 0,006 5,455E-05 8,766-05 70.2 3,7728353 69 0,014 0,000124 777 0,006 5,455E-05 0,0001059 75.6 4,27438 68 0,017 0,000174 775 0,008 7,273E-05 0,0001161 50.6 5,127344 64 0,019 0,000172 774 0,008 8,132E-05 0,000142 10.0.8 5,127345 66 0,017 0,000	31,4	1,7770232	77	0,006	5,556E-05	780	0,003	2,727E-05	4,141E-05
40.3 2.2807018 76 0.007 6.481E-05 779 0.004 3.638E-05 5.658E-05 46.2 2.64401 76 0.008 7.407E-06 779 0.005 4.545E-05 5.652E-05 51 2.8862473 74 0.009 6.333E-05 778 0.005 4.545E-05 8.233E-05 66.2 3.742482 70 0.013 0.0001111 777 0.006 5.455E-05 8.745E-05 75.6 4.274483 68 0.014 0.0001296 777 0.006 5.455E-05 8.745E-05 76.6 0.27438 68 0.015 0.000139 776 0.007 6.364E-05 0.0001013 86.3 4.858402 66 0.017 0.0001574 775 0.008 7.273E-05 0.0001142 90.6 5.127345 66 0.017 0.0001577 775 0.008 7.1278E-05 0.000142 91.0 5.3989813 65 0.021 0.0001737 775 0.008<	36,2	2,0486701	77	0,006	5,556E-05	780	0,003	2,727E-05	4,141E-05
44e,2 2,614601 75 0,008 7,407E-05 779 0,005 4,545E-05 5,522E-05 51 2,8862479 74 0,001 8,33E-05 778 0,005 4,545E-05 6,532E-05 64 3,4521788 71 0,012 0,0001111 777 0,006 5,455E-05 8,238E-05 66.2 3,7464629 70 0,013 0,0001296 7777 0,006 5,455E-05 8,248E-05 70.2 3,9728353 69 0,011 0,0001389 776 0,007 6,34E-05 0,0001031 66.6 4,274343 66 0,017 0,000174 775 0,008 7,273E-05 0,0001151 96.6 5,1727345 66 0,017 0,000174 775 0,008 7,273E-05 0,0001154 10.9 5,7102434 64 0,019 0,000177 74 0,008 8,182E-05 0,000134 10.9 5,71743 62 0,022 0,000144 0,000147 0,00	40,3	2,2807018	76	0,007	6,481E-05	779	0,004	3,636E-05	5,059E-05
51 2,862479 74 0,009 8,332-65 778 0,005 4,545-05 6,438-05 56.2 3,18032 72 0,011 0,000119 778 0,006 4,545-05 8,282-05 61 3,4521788 71 0,012 0,0001204 777 0,006 5,455-05 8,282-05 62.2 3,7464629 70 0,0113 0,0001204 777 0,006 5,455-05 8,208-05 75.8 4,278438 68 0,015 0,0001741 776 0,007 6,364-05 0,0001151 80.6 4,5814335 66 0,017 0,000174 775 0,008 7,273E-05 0,0001151 90.6 5,172334 65 0,018 0,000167 774 0,008 1,727E-05 0,0001142 100.9 5,7102434 64 0,019 0,000175 775 0,014 0,0001142 0,0001142 120.7 6,8307866 60 0,022 0,000257 779 0,014	46,2	2,614601	75	0,008	7,407E-05	779	0,004	3,636E-05	5,522E-05
66.2 3.180322 72 0.011 0.0001191 778 0.006 4.545E-05 7.365E-05 61 3.4521788 71 0.012 0.0001111 777 0.006 5.455E-05 8.283E-05 75.6 4.278433 68 0.014 0.0001296 777 0.006 5.45E-05 9.208E-05 75.6 4.27843 68 0.015 0.000139 776 0.007 6.364E-05 0.0001131 80.6 4.5614335 67 0.016 0.0001674 775 0.008 7.273E-05 0.0001151 90.6 5.172345 68 0.017 0.0001677 774 0.008 7.273E-05 0.0001141 10.9 6.271743 62 0.02173 7775 0.008 7.273E-05 0.0001141 10.9 6.271743 62 0.021 0.000177 774 0.008 8.182E-05 0.0001141 10.9 0.271743 62 0.022 0.000213 7771 0.011 0.000173<	51	2,8862479	74	0,009	8,333E-05	778	0,005	4,545E-05	6,439E-05
61 3,4521788 71 0,012 0,00011204 777 0,006 5,455E-05 8,288E-05 66.2 3,726353 69 0,014 0,0001296 777 0,006 5,455E-05 8,748E-05 77,0 3,728353 69 0,014 0,0001398 776 0,007 5,34E-05 0,0001131 80,6 4,5514035 67 0,017 0,0001481 776 0,008 7,273E-05 0,0001151 90,6 5,1273345 66 0,017 0,0001674 775 0,008 7,273E-05 0,0001131 90,6 5,389813 65 0,398813 66 0,017 0,0001677 774 0,008 7,273E-05 0,0001131 110,9 5,7102434 64 0,019 0,0001759 773 0,011 0,0001142 0,0001142 12,0,7 6,397865 60 0,222 0,000231 771 0,0113 0,0001142 0,0001142 13,09 7,4080382 58 0,022 <td< td=""><td>56,2</td><td>3,180532</td><td>72</td><td>0,011</td><td>0,0001019</td><td>778</td><td>0,005</td><td>4,545E-05</td><td>7,365E-05</td></td<>	56,2	3,180532	72	0,011	0,0001019	778	0,005	4,545E-05	7,365E-05
662 3.744629 70 0.013 0.0001204 777 0.006 5.455E-05 8.748E-05 70.2 3.9728353 69 0.014 0.0001296 777 0.006 5.455E-05 9.209E-05 75.6 4.278438 68 0.015 0.0001181 776 0.007 6.364E-05 0.0001191 80.6 4.6839842 66 0.017 0.0001574 775 0.008 7.273E-05 0.0001151 90.6 5.1273345 666 0.017 0.0001574 775 0.008 7.273E-05 0.0001141 10.9 5.7102434 644 0.001 0.0001759 777 0.01 9.091E-05 0.000134 10.9 5.7102434 64 0.021 0.000213 771 0.012 0.000142 10.9 5.7102434 64 0.025 769 0.014 0.0001142 0.0001748 13.9 7.4030352 58 0.022 766 0.017 0.00001748 0.0001748 <	61	3,4521788	71	0,012	0,0001111	777	0,006	5,455E-05	8,283E-05
70.2 3.972833 669 0.014 0.0001386 777 0.006 5.456455 9.2086-05 75.6 4.278438 668 0.015 0.00011389 7776 0.007 6.304E-05 0.0001103 80.6 4.5839842 666 0.017 0.00011574 7775 0.008 7.273E-05 0.0001151 90.6 5.1273345 666 0.017 0.00011574 7775 0.008 7.273E-05 0.0001131 90.6 5.7102434 644 0.019 0.0001759 7773 0.011 9.091E-05 0.000134 110.9 5.7102434 644 0.012 0.000213 771 0.013 0.0001182 0.0001472 110.9 5.7102434 640 0.027 0.00025 769 0.014 0.0001182 0.0001182 110.9 7.480362 50.028 0.00225 769 0.014 0.000134 0.000176 113.9 7.480362 50.028 0.0022 0.0023 0.0023 0.00	66,2	3,7464629	70	0,013	0,0001204	777	0,006	5,455E-05	8,746E-05
75.6 4,278438 68 0.015 0.0001389 776 0.007 6,384E-05 0.000103 80.6 4,6614035 67 0.061 0.0001181 776 0.007 6,384E-05 0.0001151 90.6 5,1273345 66 0.017 0.0001574 775 0.008 7,273E-05 0.0001161 95.4 5,3988813 665 0.018 0.0001667 774 0.001 8,182E-05 0.0001334 110.9 6,2761743 62 0.021 0.0001144 772 0.011 0.00011 0.0001472 120.7 6,830786 60 0.023 0.000213 771 0.012 0.0001748 0.0001748 141.4 8.002837 56 0.027 0.00025 769 0.014 0.000173 0.0001748 150.3 8.538881 55 0.028 0.002258 768 0.017 0.0001748 0.000273 0.000238 150.3 8.079803 474 0.033 0.000277 <t< td=""><td>70,2</td><td>3,9728353</td><td>69</td><td>0,014</td><td>0,0001296</td><td>777</td><td>0,006</td><td>5,455E-05</td><td>9,209E-05</td></t<>	70,2	3,9728353	69	0,014	0,0001296	777	0,006	5,455E-05	9,209E-05
80.6 4.5614035 67 0.016 0.0001891 776 0.008 7.273E-05 0.00010591 86.3 4.839842 66 0.017 0.0001674 775 0.008 7.273E-05 0.0001151 95.4 5.3298813 65 0.018 0.0001674 774 0.009 8.182E-05 0.0001242 100.9 5.710244 64 0.019 0.0001730 773 0.01 9.0011 0.0001742 110.9 5.70244 64 0.023 0.0002131 771 0.012 0.0001182 0.0001141 120.7 6.830786 60 0.023 0.000257 769 0.014 0.0001182 0.0001748 130.9 7.7483985 55 0.028 0.00253 768 0.017 0.0001545 0.00023 160.3 9.0716732 53 0.03 0.000233 763 0.021 0.0001645 0.00023 160.8 10.239252 44 0.038 0.000333 763 0.021 </td <td>75,6</td> <td>4,278438</td> <td>68</td> <td>0,015</td> <td>0,0001389</td> <td>776</td> <td>0,007</td> <td>6,364E-05</td> <td>0,0001013</td>	75,6	4,278438	68	0,015	0,0001389	776	0,007	6,364E-05	0,0001013
88,3 4,8339842 66 0,017 0,0001574 775 0,008 7,273E-05 0,0001151 90,6 5,1273345 66 0,018 0,0001667 774 0,009 8,182E-05 0,000134 100,9 5,7102434 64 0,019 0,0001759 773 0,01 9,091E-05 0,000134 110,9 5,7102434 64 0,019 0,0001789 773 0,011 0,000114 0,00011472 120,7 6,830766 60 0,023 0,000213 771 0,013 0,0001182 0,00011472 130,9 7,406032 58 0,026 0,002 769 0,014 0,000164 0,000178 141,4 8,0022837 56 0,027 0,0002 768 0,015 0,000164 0,000178 150,9 8,5681007 51 0,32 0,000233 763 0,019 0,000172 0,0002438 190,8 10,75763 47 0,33 0,000333 763 0,024	80,6	4,5614035	67	0,016	0,0001481	776	0,007	6,364E-05	0,0001059
99.6 5,1273345 66 0,017 0,0001574 775 0,008 7,273E-05 0,0001151 95,4 5,389813 65 0,018 0,0001667 774 0,009 8,182E-05 0,0001242 110,9 6,2761743 62 0,021 0,0001759 773 0,01 9,0010191 0,0001674 130,9 7,4003052 56 0,022 0,000253 7769 0,013 0,000184 0,0001748 130,9 7,4003052 55 0,028 0,000253 7768 0,015 0,000184 0,000173 160,3 9,067107 51 0,032 0,0002783 7766 0,017 0,000184 0,000278 160,3 9,067107 51 0,032 0,0002763 776 0,018 0,000172 0,000243 160,8 1,02302 49 0,034 0,000334 763 0,017 0,000243 0,000276 110,8 1,023023 49 0,034 0,000376 759 0,024	86,3	4,8839842	66	0,017	0,0001574	775	0,008	7,273E-05	0,0001151
95.4 5.3989813 65 0.018 0.0001667 774 0.009 8.182E-05 0.0001324 100.9 5.7102434 64 0.019 0.0001759 773 0.01 9.091E-05 0.0001432 110.9 6.2761743 62 0.22 0.0001944 772 0.011 0.00011 0.0001472 120.7 6.8307866 60 0.023 0.002315 770 0.013 0.0001182 0.000178 130.9 7.480362 55 0.026 0.0002533 768 0.015 0.0001364 0.000178 150.9 8.5398981 55 0.028 0.0002563 768 0.017 0.0001364 0.0002162 170.8 9.6661007 51 0.022 0.0002438 763 0.012 0.000177 0.0002438 180.8 10.797963 47 0.036 0.000333 763 0.02 0.0001184 0.0002438 201 11.37512 46 0.037 0.0003412 0.021 <th< td=""><td>90,6</td><td>5,1273345</td><td>66</td><td>0,017</td><td>0,0001574</td><td>775</td><td>0,008</td><td>7,273E-05</td><td>0,0001151</td></th<>	90,6	5,1273345	66	0,017	0,0001574	775	0,008	7,273E-05	0,0001151
100.9 5,710243 64 0,01 0,0001759 773 0,01 9,001E-05 0,0001472 110.9 6,2671743 62 0,021 0,000213 771 0,012 0,000191 0,000161 120.7 6,830786 60 0,02 0,000213 771 0,012 0,0001782 0,0001783 131.9 7,408036 55 0,02 0,000253 769 0,014 0,0001545 0,0002163 150.3 9,071873 55 0,02 0,0002963 765 0,018 0,0001727 0,0002454 170.8 9,666107 51 0,32 0,0002963 765 0,018 0,0001727 0,0002451 180.8 10,22032 49 0,34 0,0002162 762 0,21 0,0001727 0,0002451 190.8 10,72751 0,33 0,002 0,0002456 762 0,21 0,0002162 0,000256 201.8 11,37521 44 0,30 0,0002456 755 0,22 <td>95,4</td> <td>5,3989813</td> <td>65</td> <td>0,018</td> <td>0,0001667</td> <td>774</td> <td>0,009</td> <td>8,182E-05</td> <td>0,0001242</td>	95,4	5,3989813	65	0,018	0,0001667	774	0,009	8,182E-05	0,0001242
110.9 6.27617.3 62 0.021 0.0001944 772 0.011 0.0001 0.0001472 120.7 6.830786 60 0.023 0.000213 771 0.012 0.0001091 0.0001748 130.9 7.4080382 58 0.027 0.00025 769 0.014 0.000173 0.000178 150.9 8.539891 55 0.028 0.0002583 768 0.015 0.0001364 0.0002162 170.8 9.6661007 51 0.032 0.0002983 765 0.018 0.0001365 0.000233 180.8 10.232032 49 0.034 0.0003333 763 0.022 0.0002867 2011 11.375212 46 0.039 0.0003426 762 0.021 0.0002181 0.0002861 210.1 11.375212 44 0.039 0.000341 760 0.023 0.0002182 0.0002861 220.8 12.49576 42 0.041 0.000376 759 0.024 0.000	100,9	5,7102434	64	0,019	0,0001759	773	0,01	9,091E-05	0,0001334
120,7 6,8307866 60 0,023 0,000213 771 0,012 0,0001091 0,000161 130,9 7,4080382 58 0,025 0,000253 769 0,014 0,0001182 0,0001748 141,4 8,0022637 55 0,028 0,0002593 768 0,015 0,0001544 0,0002162 150,9 8,538981 55 0,028 0,0002593 766 0,017 0,0001545 0,0002162 160,3 9,0718732 53 0,03 0,000278 766 0,018 0,0001545 0,00023 180,8 10,232032 49 0,036 0,000333 763 0,02 0,0001618 0,0002576 201 11,35712 46 0,37 0,0003796 759 0,024 0,0002011 0,000281 220,8 13,65388 41 0,042 0,0003899 758 0,025 0,000273 0,000364 240,7 13,621958 39 0,044 0,0004527 754 0,02	110,9	6,2761743	62	0,021	0,0001944	772	0,011	0,0001	0,0001472
130.9 7,4080362 58 0,025 0,0002315 770 0,013 0,0001182 0,0001748 141,4 8,002637 56 0,027 0,0002593 769 0,014 0,0001743 0,0001866 150,9 8,5398981 55 0,028 0,0002778 766 0,017 0,0001636 0,0002438 160,3 9,0718732 249 0,034 0,0002148 766 0,018 0,0001145 0,0002438 190.8 10,797963 47 0,036 0,000333 763 0,02 0,0001818 0,0002668 201 11,375212 46 0,037 0,0003426 762 0,021 0,0002182 0,0002668 210.8 11,926825 44 0,039 0,000341 760 0,023 0,0002041 0,0002668 220,8 12,49576 42 0,41 0,000376 759 0,024 0,0002452 0,0003261 240,7 13,621958 39 0,044 0,000474 756	120,7	6,8307866	60	0,023	0,000213	771	0,012	0,0001091	0,000161
141,4 8,0022637 56 0,027 0,00025 769 0,014 0,0001273 0,0001886 150,9 8,539891 55 0,028 0,0002983 768 0,015 0,0001545 0,0002162 170,8 9,6661007 51 0,032 0,0002963 765 0,019 0,0001545 0,00023 180,8 10,232032 49 0,034 0,000348 764 0,019 0,0001727 0,0002438 190,8 10,797963 47 0,036 0,000333 763 0,02 0,0001909 0,0002661 2010 11,375212 46 0,037 0,0003426 762 0,024 0,0002182 0,0002861 200,8 12,495756 42 0,041 0,0003796 759 0,024 0,0002182 0,0002861 201,8 13,050368 41 0,042 0,000474 756 0,027 0,0002645 0,0003264 250,7 14,75382 36 0,047 0,0004352 754 <	130,9	7,4080362	58	0,025	0,0002315	770	0,013	0,0001182	0,0001748
150,9 8,5398981 55 0,028 0,0002593 768 0,015 0,0001364 0,0001978 180,3 9,071472 53 0,03 0,0002778 766 0,017 0,0001636 0,0002162 170,8 9,6661007 51 0,032 0,0002963 765 0,018 0,0001636 0,00023 180,8 10,232032 49 0,034 0,0003333 763 0,02 0,0001727 0,0002576 201 11,375212 46 0,037 0,000331 760 0,023 0,0002182 0,0002868 210,8 11,249576 42 0,041 0,000376 759 0,024 0,0002182 0,0002898 230,6 13,050368 41 0,042 0,0004074 756 0,027 0,0002455 0,0003264 240,7 13,621958 39 0,044 0,000472 751 0,028 0,0002455 0,0003264 250,9 14,199208 37 0,046 0,000472 751 <	141,4	8,0022637	56	0,027	0,00025	769	0,014	0,0001273	0,0001886
160.3 9,0718732 53 0,03 0,0022778 766 0,017 0,0001545 0,0002162 170.8 9,6661007 51 0,032 0,0002963 765 0,018 0,0001536 0,000233 180.8 10,232032 49 0,034 0,0003333 763 0,022 0,0001188 0,0002576 201 11,375212 46 0,037 0,0003426 762 0,021 0,0001909 0,0002851 220.8 12,495756 42 0,041 0,0003796 759 0,024 0,0002182 0,0002891 230.6 13,050368 41 0,042 0,000474 756 0,027 0,0002273 0,000381 240,7 13,621958 39 0,044 0,0004537 755 0,028 0,0002545 0,000378 250,9 14,19208 37 0,046 0,0004537 752 0,031 0,0002636 0,0003873 280,5 16,640294 31 0,052 754 0,032 <t< td=""><td>150,9</td><td>8,5398981</td><td>55</td><td>0,028</td><td>0,0002593</td><td>768</td><td>0,015</td><td>0,0001364</td><td>0,0001978</td></t<>	150,9	8,5398981	55	0,028	0,0002593	768	0,015	0,0001364	0,0001978
170.8 9.6661007 51 0.032 0.0002963 765 0.018 0.0001636 0.00023 180.8 10.232032 49 0.034 0.0003148 764 0.019 0.0001727 0.0002438 190.8 10.79763 47 0.036 0.0003333 763 0.02 0.0001818 0.0002576 201 11.375212 46 0.037 0.0003611 762 0.023 0.0002182 0.0002851 200.8 12.495756 42 0.041 0.0003796 759 0.024 0.0002182 0.0002851 230.6 13.050368 41 0.042 0.0004074 756 0.027 0.0002455 0.0003264 240.7 13.621958 39 0.044 0.0004729 755 0.028 0.0002455 0.0003404 270.3 14.199208 37 0.046 0.0004527 754 0.029 0.0002636 0.0003494 270.3 15.297114 34 0.049 0.0005 748	160,3	9,0718732	53	0,03	0,0002778	766	0,017	0,0001545	0,0002162
180.8 10,232032 49 0,034 0,0003148 764 0,019 0,0001727 0,0002438 190.8 10,797963 47 0,036 0,0003333 763 0,02 0,0001727 0,0002668 201 11,375212 46 0,037 0,0003426 762 0,021 0,000201 0,0002861 210.8 11,929825 44 0,039 0,0003796 759 0,024 0,0002182 0,0003811 230.6 13,050368 41 0,042 0,0003899 758 0,025 0,0002273 0,0003861 240.7 13,621958 39 0,044 0,000474 756 0,027 0,0002455 0,0003764 250.9 14,199208 37 0,046 0,000452 754 0,029 0,0002636 0,0003768 260.7 14,75382 36 0,047 0,0004537 752 0,031 0,0002818 0,0003678 280.5 15,89714 34 0,052 0,0004155 750	170,8	9,6661007	51	0,032	0,0002963	765	0,018	0,0001636	0,00023
190,8 10,797963 47 0,036 0,0003333 763 0,02 0,0001818 0,0002576 201 11,375212 46 0,037 0,0003426 762 0,021 0,0001909 0,0002668 210.8 11,929825 44 0,039 0,0003766 759 0,023 0,0002182 0,0002891 230,6 13,050368 41 0,042 0,0003796 759 0,025 0,0002273 0,0003264 240,7 13,621958 39 0,044 0,000474 756 0,027 0,0002455 0,0003264 250,9 14,199208 37 0,046 0,0004557 755 0,028 0,0002636 0,0003402 260,7 14,75382 36 0,047 0,0004537 752 0,031 0,0002636 0,0003878 280,7 15,88682 32 0,051 0,0004722 751 0,032 0,0003907 300,5 17,006225 29 0,054 0,0005 748 0,038 <td< td=""><td>180,8</td><td>10,232032</td><td>49</td><td>0,034</td><td>0,0003148</td><td>764</td><td>0,019</td><td>0,0001727</td><td>0,0002438</td></td<>	180,8	10,232032	49	0,034	0,0003148	764	0,019	0,0001727	0,0002438
201 11,375212 46 0,037 0,0003426 762 0,021 0,0001909 0,0002681 210,8 11,929825 44 0,039 0,0003611 760 0,023 0,0002091 0,0002851 220,8 12,495766 42 0,041 0,0003796 759 0,024 0,0002182 0,000381 230,6 13,651958 39 0,044 0,0004074 756 0,027 0,0002455 0,0003244 240,7 13,621958 39 0,046 0,0004259 755 0,028 0,0002455 0,0003244 250,7 14,199208 37 0,046 0,0004537 752 0,031 0,0002836 0,0003494 270,3 15,297114 34 0,049 0,0004537 752 0,031 0,0002818 0,0003678 280,7 15,885682 32 0,051 0,0004722 751 0,032 0,0003182 0,000491 300,5 17,06225 29 0,054 0,0005 748	190,8	10,797963	47	0,036	0,0003333	763	0,02	0,0001818	0,0002576
210,8 11,929825 44 0,039 0,0003611 760 0,023 0,0002091 0,0002851 220,8 12,495756 42 0,041 0,0003796 759 0,024 0,0002182 0,0002899 230,6 13,050368 41 0,042 0,0003899 758 0,025 0,0002273 0,000381 240,7 13,621958 39 0,044 0,000474 756 0,027 0,0002455 0,0003402 260,7 14,199208 37 0,046 0,0004352 754 0,023 0,0002636 0,0003404 270,3 15,297114 34 0,049 0,0004357 752 0,031 0,0002818 0,0003678 280,7 15,885682 32 0,051 0,0004722 751 0,032 0,0002909 0,0003678 290,5 16,440294 31 0,652 0,0005 748 0,033 0,0003 0,0003494 310,6 17,577816 27 0,566 0,0005185 747	201	11,375212	46	0,037	0,0003426	762	0,021	0,0001909	0,0002668
220,8 12,495756 42 0,041 0,0003796 759 0,024 0,0002182 0,0002989 230,6 13,050368 41 0,042 0,0003889 758 0,025 0,0002273 0,0003081 240,7 13,621958 39 0,044 0,0004074 756 0,027 0,0002455 0,0003264 250,9 14,199208 37 0,046 0,0004259 755 0,028 0,0002545 0,0003402 260,7 14,75382 36 0,047 0,0004357 752 0,031 0,0002818 0,0003816 270,3 15,297114 34 0,049 0,0004537 752 0,031 0,0002818 0,0003816 280,7 15,85682 32 0,051 0,000472 751 0,032 0,00033 0,0003907 300,5 17,06625 29 0,054 0,0005 748 0,033 0,0003455 0,0004229 320,8 18,15505 26 0,057 0,0005278 745	210,8	11,929825	44	0,039	0,0003611	760	0,023	0,0002091	0,0002851
230.6 13,050368 41 0,042 0,0003889 758 0,025 0,0002273 0,0003081 240,7 13,621958 39 0,044 0,0004074 756 0,027 0,0002455 0,0003264 250,9 14,199208 37 0,046 0,0004259 755 0,028 0,0002545 0,0003042 260,7 14,75382 36 0,047 0,0004352 754 0,029 0,0002636 0,0003494 270,3 15,297114 34 0,049 0,0004722 751 0,032 0,0002999 0,0003816 280,7 15,885682 32 0,051 0,0004722 751 0,032 0,0002999 0,0003816 290,5 16,440294 31 0,52 0,0005 748 0,035 0,0003182 0,000491 310,6 17,57816 27 0,566 0,0005185 747 0,038 0,0003455 0,0004229 320,8 18,155056 26 0,057 0,0005278 745	220,8	12,495756	42	0,041	0,0003796	759	0,024	0,0002182	0,0002989
240,7 13,621958 39 0,044 0,0004074 756 0,027 0,0002455 0,0003264 250,9 14,199208 37 0,046 0,0004259 755 0,028 0,0002545 0,0003402 260,7 14,75382 36 0,047 0,0004352 754 0,029 0,0002636 0,0003494 270,3 15,297114 34 0,049 0,0004537 752 0,031 0,0002818 0,0003678 280,7 15,885682 32 0,051 0,0004722 751 0,032 0,0002909 0,0003816 290,5 16,440294 31 0,052 0,0004815 750 0,033 0,0003 0,0003907 300,5 17,006225 29 0,054 0,0005 748 0,035 0,0003455 0,0004229 320,8 18,155065 26 0,057 0,0005278 745 0,338 0,0003455 0,0004364 340,4 19,26429 22 0,061 0,0005463 744	230,6	13,050368	41	0,042	0,0003889	758	0,025	0,0002273	0,0003081
250,914,199208370,0460,00042597550,0280,00025450,0003402260,714,75382360,0470,00043527540,0290,00026360,0003494270,315,297114340,0490,00045377520,0310,00028180,0003678280,715,885682320,0510,00047227510,0320,00029090,0003816290,516,440294310,0520,00048157500,0330,00030,0003907300,517,006225290,0540,00057480,0350,00031820,0004091310,617,577816270,0560,00051857470,0360,00034550,0004229320,818,155065260,0570,00052787450,0380,00034550,0004366330,418,698359240,0590,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00043640,0005239390,722,110922130,070,00066677340,0490,00044550,000561142123,82569310,0820,00075937250,0580,00052730,0006622 <td< td=""><td>240,7</td><td>13,621958</td><td>39</td><td>0,044</td><td>0,0004074</td><td>756</td><td>0,027</td><td>0,0002455</td><td>0,0003264</td></td<>	240,7	13,621958	39	0,044	0,0004074	756	0,027	0,0002455	0,0003264
260,7 14,75382 36 0,047 0,0004352 754 0,029 0,0002636 0,0003494 270,3 15,297114 34 0,049 0,0004537 752 0,031 0,0002818 0,0003678 280,7 15,885682 32 0,051 0,0004722 751 0,032 0,0002909 0,0003816 290,5 16,440294 31 0,052 0,0004815 750 0,033 0,0003 0,0003907 300,5 17,006225 29 0,054 0,0005 748 0,036 0,0003273 0,0004229 320,8 18,155065 26 0,057 0,0005278 745 0,038 0,0003455 0,0004366 330,4 18,698359 24 0,059 0,0005648 742 0,041 0,0003727 0,0004688 340,4 19,26429 22 0,061 0,0005926 740 0,043 0,0003818 0,0004779 360,6 20,40747 19 0,066 0,0006111 738	250,9	14,199208	37	0,046	0,0004259	755	0,028	0,0002545	0,0003402
270,315,297114340,0490,00045377520,0310,00028180,0003678280,715,885682320,0510,00047227510,0320,00029090,0003816290,516,440294310,0520,00048157500,0330,00030,0003907300,517,006225290,0540,00057480,0350,00031820,0004091310,617,577816270,0560,00051857470,0360,00032730,0004229320,818,155055260,0570,00052787450,0380,00034550,0004566330,418,698359240,0590,00054637440,0390,00035450,0004688350,419,26429220,0610,00059267400,0410,00039090,0004918360,620,40747190,0660,00061117380,0450,0004910,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00043640,0005239390,722,110922130,070,00066677340,0490,00044550,000542340022,637238110,0720,00066677230,0680,00052730,000643343124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000666244124,957555-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892 <td>260,7</td> <td>14,75382</td> <td>36</td> <td>0,047</td> <td>0,0004352</td> <td>754</td> <td>0,029</td> <td>0,0002636</td> <td>0,0003494</td>	260,7	14,75382	36	0,047	0,0004352	754	0,029	0,0002636	0,0003494
280,715,885682320,0510,00047227510,0320,00029090,0003816290,516,440294310,0520,00048157500,0330,00030,0003907300,517,006225290,0540,00057480,0350,00031820,0004091310,617,577816270,0560,00051857470,0360,00032730,0004229320,818,155065260,0570,00052787450,0380,00034550,0004366330,418,698359240,0590,00054637440,0390,00034550,0004504340,419,26429220,0610,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00041820,0005239390,722,110922130,070,00066677340,0490,00044550,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00044550,000543342123,82569310,0820,00075937250,0580,00054550,000666244124,95755-50,0880,0007877230,060,00054560,0006892 <td>270,3</td> <td>15,297114</td> <td>34</td> <td>0,049</td> <td>0,0004537</td> <td>752</td> <td>0,031</td> <td>0,0002818</td> <td>0,0003678</td>	270,3	15,297114	34	0,049	0,0004537	752	0,031	0,0002818	0,0003678
290,516,440294310,0520,00048157500,0330,00030,0003907300,517,006225290,0540,00057480,0350,00031820,0004091310,617,577816270,0560,00051857470,0360,00032730,0004229320,818,155065260,0570,00052787450,0380,00034550,0004366330,418,698359240,0590,00054637440,0390,00035450,0004504340,419,26429220,0610,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0005101370,920,990379170,0660,00062967370,0460,00043640,0005239390,722,110922130,070,00064817350,0480,00043640,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00044550,000556142123,82569310,0820,00078937250,0580,00052730,000643343124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000666244124,95755-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892 <td>280,7</td> <td>15,885682</td> <td>32</td> <td>0,051</td> <td>0,0004722</td> <td>751</td> <td>0,032</td> <td>0,0002909</td> <td>0,0003816</td>	280,7	15,885682	32	0,051	0,0004722	751	0,032	0,0002909	0,0003816
300,517,006225290,0540,00057480,0350,00031820,0004091310,617,577816270,0560,00051857470,0360,00032730,0004229320,818,155065260,0570,00052787450,0380,00034550,0004366330,418,698359240,0590,000564837440,0390,00034550,0004688340,419,26429220,0610,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00041820,0005239390,722,110922130,070,0066677340,0490,0044550,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00052730,000643343124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000662244124,95755-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892	290,5	16,440294	31	0,052	0,0004815	750	0,033	0,0003	0,0003907
310,6 17,577816 27 0,056 0,0005185 747 0,036 0,0003273 0,0004229 320,8 18,155065 26 0,057 0,0005278 745 0,038 0,0003455 0,0004366 330,4 18,698359 24 0,059 0,0005463 744 0,039 0,0003545 0,0004504 340,4 19,26429 22 0,061 0,0005648 742 0,041 0,0003727 0,0004688 350,4 19,830221 21 0,062 0,0005741 741 0,042 0,0003818 0,0004779 360,6 20,40747 19 0,064 0,0005926 740 0,043 0,0003909 0,0005101 370,9 20,990379 17 0,066 0,0006111 738 0,045 0,0004182 0,0005239 390,7 22,110922 13 0,07 0,0006481 735 0,048 0,0004364 0,0005423 400 22,637238 11 0,072 0,0006667 734	300,5	17,006225	29	0,054	0,0005	748	0,035	0,0003182	0,0004091
320,818,155065260,0570,00052787450,0380,00034550,0004366330,418,698359240,0590,00054637440,0390,00035450,0004504340,419,26429220,0610,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0004918370,920,990379170,0660,00061117380,0450,00040910,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00043640,0005239390,722,110922130,070,00066677340,0490,00043640,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00052730,000643342123,82569310,0820,00078937250,0580,00052730,000643343124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000666244124,957555-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892	310,6	17,577816	27	0,056	0,0005185	747	0,036	0,0003273	0,0004229
330,418,698359240,0590,00054637440,0390,00035450,0004504340,419,26429220,0610,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0004918370,920,990379170,0660,00061117380,0450,00040910,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00041820,0005239390,722,110922130,070,00066677340,0490,00044550,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00052730,000643342123,82569310,0820,00075937250,0580,00052730,000666243124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000669244124,95755-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892	320,8	18,155065	26	0,057	0,0005278	745	0,038	0,0003455	0,0004366
340,419,26429220,0610,00056487420,0410,00037270,0004688350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0004918370,920,990379170,0660,00061117380,0450,00040910,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00041820,0005239390,722,110922130,070,00066817350,0480,00043640,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00044550,000556142123,82569310,0820,00075937250,0580,00052730,000643343124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000666244124,957555-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892	330,4	18,698359	24	0,059	0,0005463	744	0,039	0,0003545	0,0004504
350,419,830221210,0620,00057417410,0420,00038180,0004779360,620,40747190,0640,00059267400,0430,00039090,0004918370,920,990379170,0660,00061117380,0450,00040910,0005101380,921,55631150,0680,00062967370,0460,00041820,0005239390,722,110922130,070,00064817350,0480,00043640,000542340022,637238110,0720,00066677340,0490,00044550,000556142123,82569310,0820,00075937250,0580,00052730,000643343124,391624-20,0850,0007877230,060,00054550,000666244124,957555-50,0880,00081487210,0620,00056360,0006892	340,4	19,26429	22	0,061	0,0005648	742	0,041	0,0003727	0,0004688
360,6 20,40747 19 0,064 0,0005926 740 0,043 0,0003909 0,0004918 370,9 20,990379 17 0,066 0,0006111 738 0,045 0,0004091 0,0005101 380,9 21,55631 15 0,068 0,0006296 737 0,046 0,0004182 0,0005239 390,7 22,110922 13 0,07 0,0006481 735 0,048 0,0004364 0,0005423 400 22,637238 11 0,072 0,0006667 734 0,049 0,0004455 0,0005561 421 23,825693 1 0,082 0,0007593 725 0,058 0,0005273 0,0006433 431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,06 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	350,4	19,830221	21	0,062	0,0005741	741	0,042	0,0003818	0,0004779
370,9 20,990379 17 0,066 0,0006111 738 0,045 0,0004091 0,0005101 380,9 21,55631 15 0,068 0,0006296 737 0,046 0,0004182 0,0005239 390,7 22,110922 13 0,07 0,0006681 735 0,048 0,0004364 0,0005423 400 22,637238 11 0,072 0,0006667 734 0,049 0,0004455 0,0005561 421 23,825693 1 0,082 0,0007593 725 0,058 0,0005425 0,0006433 431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,062 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	360,6	20,40747	19	0,064	0,0005926	740	0,043	0,0003909	0,0004918
380,9 21,55631 15 0,068 0,0006296 737 0,046 0,0004182 0,0005239 390,7 22,110922 13 0,07 0,0006481 735 0,048 0,0004182 0,0005239 400 22,637238 11 0,072 0,0006667 734 0,049 0,0004455 0,0005561 421 23,825693 1 0,082 0,0007593 725 0,058 0,0005273 0,0006433 431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,062 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	370,9	20,990379	17	0,066	0,0006111	738	0,045	0,0004091	0,0005101
390,7 22,110922 13 0,07 0,0006481 735 0,048 0,0004364 0,0005423 400 22,637238 11 0,072 0,0006667 734 0,049 0,0004455 0,0005561 421 23,825693 1 0,082 0,0007593 725 0,058 0,0005273 0,0006433 431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,06 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	380,9	21,55631	15	0,068	0,0006296	737	0,046	0,0004182	0,0005239
400 22,637238 11 0,072 0,0006667 734 0,049 0,0004455 0,0005561 421 23,825693 1 0,082 0,0007593 725 0,058 0,0005273 0,0006662 431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,06 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	390,7	22,110922	13	0,07	0,0006481	735	0,048	0,0004364	0,0005423
421 23,825693 1 0,082 0,0007593 725 0,058 0,0005273 0,0006433 431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,06 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	400	22,637238	11	0,072	0,0006667	734	0,049	0,0004455	0,0005561
431 24,391624 -2 0,085 0,000787 723 0,06 0,0005455 0,0006662 441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	421	23,825693	1	0,082	0,0007593	725	0,058	0,0005273	0,0006433
441 24,957555 -5 0,088 0,0008148 721 0,062 0,0005636 0,0006892	431	24,391624	-2	0,085	0,000787	723	0,06	0,0005455	0,0006662
	441	24,957555	-5	0,088	0,0008148	721	0,062	0,0005636	0,0006892

450	25,466893	-7	0,09	0,0008333	719	0,064	0,0005818	0,0007076
460	26,032824	-11	0,094	0,0008704	716	0,067	0,0006091	0,0007397
470	26,598755	-14	0,097	0,0008981	714	0,069	0,0006273	0,0007627
481	27,221279	-17	0,1	0,0009259	711	0,072	0,0006545	0,0007902
491	27,78721	-20	0,103	0,0009537	709	0,074	0,0006727	0,0008132
501	28,353141	-24	0,107	0,0009907	706	0,077	0,0007	0,0008454
521	29,485003	-31	0,114	0,0010556	700	0,083	0,0007545	0,0009051
542	30,673458	-38	0,121	0,0011204	695	0,088	0,0008	0,0009602
561	31,748727	-46	0,129	0,0011944	689	0,094	0,0008545	0,0010245
571	32,314658	-51	0,134	0,0012407	686	0,097	0,0008818	0,0010613
590	33,389926	-61	0,144	0,0013333	680	0,103	0,0009364	0,0011348
610	34,521788	-74	0,157	0,0014537	673	0,11	0,001	0,0012269
631	35,710243	-88	0,171	0,0015833	666	0,117	0,0010636	0,0013235
651	36,842105	-105	0,188	0,0017407	659	0,124	0,0011273	0,001434
670	37,917374	-125	0,208	0,0019259	652	0,131	0,0011909	0,0015584
690	39,049236	-150	0,233	0,0021574	643	0,14	0,0012727	0,0017151
711	40,237691	-184	0,267	0,0024722	633	0,15	0,0013636	0,0019179
730	41,31296	-223	0,306	0,0028333	620	0,163	0,0014818	0,0021576
751	42,501415	-278	0,361	0,0033426	601	0,182	0,0016545	0,0024986
770	43,576684	-354	0,437	0,0040463	563	0,22	0,002	0,0030231
778	44,029428	-406	0,489	0,0045278	529	0,254	0,0023091	0,0034184
780	44,142615	-417	0,5	0,0046296	520	0,263	0,0023909	0,0035103
786	44,482173	-477	0,56	0,0051852	450	0,333	0,0030273	0,0041062
788	44,595359	-491	0,574	0,0053148	424	0,359	0,0032636	0,0042892
788	44,595359	-502	0,585	0,0054167	388	0,395	0,0035909	0,0045038
788	44,595359	-512	0,595	0,0055093	370	0,413	0,0037545	0,0046319
788	44,595359	-620	0,703	0,0065093	-27	0,81	0,0073636	0,0069364
788	44,595359	-710	0,793	0,0073426	-355	1,138	0,0103455	0,008844
788	44,595359	-749	0,832	0,0077037	-876	1,659	0,0150818	0,0113928
788	44,595359	-781	0,864	0,008	-948	1,731	0,0157364	0,0118682
788	44,595359	-835	0,918	0,0085	-1085	1,868	0,0169818	0,0127409





ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 100/2										
ΔYNAMH (KN)	ΤΑΣΗ (MPa)	ΑΡΙΣΤΕΡΟ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ		
0	0	1591	0	0	1537	0	0	0		
0,7	0,03961517	1591	0	0	1536	0,001	9,17431E-06	4,5872E-06		
5,8	0,32823995	1591	0	0	1537	0	0	0		
11,8	0,66779853	1590	0,001	9,1743E-06	1538	-0,001	-9,17431E-06	0		
15,9	0,89983022	1589	0,002	1,8349E-05	1538	-0,001	-9,17431E-06	4,5872E-06		
20,9	1,1827957	1588	0,003	2,7523E-05	1538	-0,001	-9,17431E-06	9,1743E-06		
25,9	1,46576118	1587	0,004	3,6697E-05	1538	-0,001	-9,17431E-06	1,3761E-05		
30,7	1,73740804	1586	0,005	4,5872E-05	1538	-0,001	-9,17431E-06	1,8349E-05		
36,2	2,04867006	1585	0,006	5,5046E-05	1536	0,001	9,17431E-06	3,211E-05		
43,1	2,43916242	1584	0,007	6,422E-05	1538	-0,001	-9,17431E-06	2,7523E-05		
47,7	2,69949066	1583	0,008	7,3394E-05	1538	-0,001	-9,17431E-06	3,211E-05		
51,2	2,8975665	1583	0,008	7,3394E-05	1537	0	0	3,6697E-05		
56	3,16921336	1583	0,008	7,3394E-05	1536	0,001	9,17431E-06	4,1284E-05		
60,8	3,44086022	1582	0,009	8,2569E-05	1536	0,001	9,17431E-06	4,5872E-05		
66,2	3,74646293	1582	0,009	8,2569E-05	1535	0,002	1,83486E-05	5,0459E-05		
71,2	4,02942841	1582	0,009	8,2569E-05	1535	0,002	1,83486E-05	5,0459E-05		
75,8	4,28975665	1582	0,009	8,2569E-05	1534	0,003	2,75229E-05	5,5046E-05		
80,2	4,53876627	1582	0,009	8,2569E-05	1533	0,004	3,66972E-05	5,9633E-05		
86,9	4,91794001	1581	0,01	9,1743E-05	1532	0,005	4,58716E-05	6,8807E-05		
90,8	5,13865308	1581	0,01	9,1743E-05	1532	0,005	4,58716E-05	6,8807E-05		
100,8	5,70458404	1580	0,011	0,00010092	1530	0,007	6,42202E-05	8,2569E-05		
111,9	6,3327674	1579	0,012	0,00011009	1529	0,008	7,33945E-05	9,1743E-05		
121,3	6,8647425	1578	0,013	0,00011927	1528	0,009	8,25688E-05	0,00010092		
130,5	7,38539898	1578	0,013	0,00011927	1527	0,01	9,17431E-05	0,0001055		
140,5	7,95132994	1576	0,015	0,00013761	1526	0,011	0,000100917	0,00011927		
150,9	8,53989813	1575	0,016	0,00014679	1525	0,012	0,000110092	0,00012844		

160.9	9,10582909	1574	0.017	0.00015596	1524	0.013	0.000119266	0.00013761
170.7	9.66044143	1573	0.018	0.00016514	1523	0.014	0.00012844	0.00014679
180.2	10 1980758	1572	0.019	0.00017431	1522	0.015	0.000137615	0.00015596
192.3	10.8828523	1572	0.019	0.00017431	1521	0.016	0.000146789	0.00016055
201.4	11 3978495	1571	0.02	0.00018349	1519	0.018	0.000165138	0.00017431
210.8	11 9298246	1570	0.021	0.00019266	1518	0,019	0.000174312	0.00018349
220.4	12 4731183	1569	0,021	0,00010200	1517	0.02	0.000183486	0.00019266
220,4	12,4731105	1567	0,022	0.00020105	1516	0,02	0,000103400	0,00010200
201,0	13,6049802	1566	0,024	0,00022010	1514	0,021	0,000192001	0,00020042
240,4	14 1002077	1565	0,025	0,00022950	1512	0,023	0,000211003	0,00022010
250,9	14,1992077	1505	0,020	0,00023833	1515	0,024	0,000220183	0,00022930
201,3	15 3876627	1562	0,027	0,00024771	1500	0,020	0,000256881	0,00024312
271,9	15,3070027	1561	0,029	0,00020000	1509	0,020	0,000230881	0,00020147
200,7	16,4516120	1560	0,03	0,00027323	1507	0,03	0,000273223	0,00027323
290,7	17.0245219	1500	0,031	0,0002044	1505	0,032	0,000293578	0,00020099
211.4	17,0343210	1009	0,032	0,00029336	1503	0,034	0,000311927	0,00030275
311,4	17,62309	1000	0,035	0,00030275	1001	0,036	0,000330275	0,00031651
320,8	18,1550651	1556	0,035	0,0003211	1499	0,038	0,000348624	0,00033486
330,1	18,6813809	1555	0,036	0,00033028	1497	0,04	0,000366972	0,00034862
340,8	19,286927	1554	0,037	0,00033945	1495	0,042	0,000385321	0,00036239
350,8	19,852858	1553	0,038	0,00034862	1493	0,044	0,00040367	0,00037615
360,2	20,3848331	1552	0,039	0,0003578	1491	0,046	0,000422018	0,00038991
370,1	20,9451047	1551	0,04	0,00036697	1488	0,049	0,000449541	0,00040826
380,7	21,5449915	1550	0,041	0,00037615	1486	0,051	0,00046789	0,00042202
391,8	22,1731749	1549	0,042	0,00038532	1483	0,054	0,000495413	0,00044037
400	22,6372383	1547	0,044	0,00040367	1481	0,056	0,000513761	0,00045872
411	23,2597623	1542	0,049	0,00044954	1471	0,066	0,000605505	0,00052752
421	23,8256933	1539	0,052	0,00047706	1467	0,07	0,000642202	0,00055963
430	24,3350311	1537	0,054	0,00049541	1467	0,07	0,000642202	0,00056881
441	24,9575552	1534	0,057	0,00052294	1458	0,079	0,000724771	0,00062385
451	25,5234861	1531	0,06	0,00055046	1453	0,084	0,000770642	0,00066055
460	26,032824	1528	0,063	0,00057798	1449	0,088	0,000807339	0,00069266
470	26,598755	1525	0,066	0,0006055	1445	0,092	0,000844037	0,00072477
481	27,221279	1522	0,069	0,00063303	1441	0,096	0,000880734	0,00075688
491	27,78721	1519	0,072	0,00066055	1436	0,101	0,000926606	0,00079358
501	28,3531409	1515	0,076	0,00069725	1431	0,106	0,000972477	0,00083486
521	29,4850028	1507	0,084	0,00077064	1420	0,117	0,001073394	0,00092202
540	30,5602716	1498	0,093	0,00085321	1409	0,128	0,001174312	0,00101376
550	31,1262026	1493	0,098	0,00089908	1403	0,134	0,001229358	0,00106422
571	32,3146576	1480	0,111	0,00101835	1389	0,148	0,001357798	0,00118807
590	33,3899264	1466	0,125	0,00114679	1376	0,161	0,001477064	0,00131193
600	33,9558574	1458	0,133	0,00122018	1368	0,169	0,001550459	0,00138532
620	35,0877193	1443	0,148	0,0013578	1353	0,184	0,001688073	0,00152294
642	36,3327674	1425	0,166	0,00152294	1334	0,203	0,001862385	0,00169266
660	37,3514431	1405	0,186	0,00170642	1314	0,223	0,002045872	0,00187615
681	38,5398981	1379	0,212	0,00194495	1287	0,25	0,002293578	0,00211927
690	39,049236	1366	0,225	0,00206422	1274	0,263	0,002412844	0,00223853
700	39,6151669	1350	0,241	0,00221101	1258	0,279	0,002559633	0,00238532
722	40,8602151	1311	0,28	0,00256881	1223	0,314	0,002880734	0,00272477
740	41,8788908	1262	0,329	0,00301835	1182	0,355	0,003256881	0,00313761
760	43,0107527	1188	0,403	0,00369725	1124	0,413	0,003788991	0,00374312
780	44,1426146	1066	0,525	0,00481651	1028	0,509	0,004669725	0,00474312
791	44,7651387	925	0,666	0,00611009	964	0,573	0,005256881	0,00568349

795	44,991511	831	0,76	0,00697248	917	0,62	0,005688073	0,00633028
795	44,991511	747	0,844	0,00774312	888	0,649	0,005954128	0,00684862
796	45,0481041	720	0,871	0,00799083	878	0,659	0,006045872	0,00701835
796	45,0481041	723	0,868	0,0079633	838	0,699	0,006412844	0,00718807
796	45,0481041	628	0,963	0,00883486	841	0,696	0,006385321	0,00761009
796	45,0481041	530	1,061	0,00973394	797	0,74	0,006788991	0,00826147
796	45,0481041	350	1,241	0,01138532	707	0,83	0,007614679	0,0095
796	45,0481041	180	1,411	0,01294495	435	1,102	0,010110092	0,01152752



	ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ Κ 100/3											
ΔYNAMH (KN)	TAΣH (MPa)	APIΣTEPO (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΟ	ΔΕΞΙ (/1000 mm)	(mm)	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΔΕΞΙ	ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ				
0	0	1386	0	0	1488	0	0	0				
7,4	0,41878891	1384	0,002	1,8519E-05	1488	0	0	9,2593E-06				
12,8	0,72439162	1382	0,004	3,7037E-05	1488	0	0	1,8519E-05				
17,2	0,97340125	1382	0,004	3,7037E-05	1488	0	0	1,8519E-05				
20,6	1,16581777	1381	0,005	4,6296E-05	1488	0	0	2,3148E-05				
25,9	1,46576118	1379	0,007	6,4815E-05	1488	0	0	3,2407E-05				
30,4	1,72043011	1378	0,008	7,4074E-05	1488	0	0	3,7037E-05				
35,5	2,0090549	1376	0,01	9,2593E-05	1489	-0,001	-9,25926E-06	4,1667E-05				
40,7	2,30333899	1374	0,012	0,00011111	1489	-0,001	-9,25926E-06	5,0926E-05				
45,9	2,59762309	1373	0,013	0,00012037	1490	-0,002	-1,85185E-05	5,0926E-05				
50,5	2,85795133	1371	0,015	0,00013889	1490	-0,002	-1,85185E-05	6,0185E-05				
55,3	3,12959819	1369	0,017	0,00015741	1490	-0,002	-1,85185E-05	6,9444E-05				
60,3	3,41256367	1368	0,018	0,00016667	1490	-0,002	-1,85185E-05	7,4074E-05				
65,5	3,70684776	1366	0,02	0,00018519	1491	-0,003	-2,77778E-05	7,8704E-05				
71,2	4,02942841	1364	0,022	0,0002037	1491	-0,003	-2,77778E-05	8,7963E-05				
78,4	4,4368987	1361	0,025	0,00023148	1492	-0,004	-3,7037E-05	9,7222E-05				
81,6	4,6179966	1360	0,026	0,00024074	1492	-0,004	-3,7037E-05	0,00010185				

87.8	4 9688738	1359	0.027	0.00025	1493	-0.005	-4 62963E-05	0.00010185
93.4	5,28579513	1357	0.029	0.00026852	1493	-0.005	-4.62963E-05	0.00011111
97.3	5 50650821	1355	0.031	0.00028704	1493	-0.005	-4 62963E-05	0.00012037
101.6	5 74985852	1354	0.032	0.0002963	1493	-0.005	-4 62963E-05	0.000125
111.2	6 29315224	1351	0.035	0.00032407	1493	-0.005	-4 62963E-05	0.00013889
120.8	6 83644595	1348	0.038	0.00035185	1494	-0.006	-5 55556E-05	0.00014815
120,0	7 39105829	1345	0.041	0.00037963	1404	-0.006	-5 55556E-05	0,00014010
1/1 7	8.0102/165	1343	0,041	0,00037303	1494	-0,000	-5,5556E-05	0,00010204
151.3	8 56253537	1342	0,044	0,00040741	1494	-0,000	-5,55550E-05	0,00017595
160.0	0,0020000	1227	0,040	0,00042333	1495	-0,007	5 55556E 05	0,000100007
170.0	9,10382909	1337	0,049	0,0004337	1494	-0,000	-5,5556E 05	0,00019907
170,9	9,07170005	1000	0,051	0,00047222	1494	-0,000	-5,55556E-05	0,00020833
100,9	10,237091	1000	0,055	0,00049074	1494	-0,000	-5,55550E-05	0,00021739
190,7	10,7923033	1001	0,055	0,00050926	1493	-0,005	-4,02903E-05	0,00023148
200,5	11,3469157	1329	0,057	0,00052778	1492	-0,004	-3,7037E-05	0,00024537
210,9	11,9354839	1327	0,059	0,0005463	1492	-0,004	-3,7037E-05	0,00025463
220,9	12,5014148	1326	0,06	0,00055556	1491	-0,003	-2,7778E-05	0,00026389
230,8	13,0616865	1324	0,062	0,00057407	1490	-0,002	-1,85185E-05	0,00027778
240,6	13,6162988	1322	0,064	0,00059259	1489	-0,001	-9,25926E-06	0,00029167
250,6	14,1822298	1320	0,066	0,00061111	1488	0	0	0,00030556
260,2	14,7255235	1318	0,068	0,00062963	1487	0,001	9,25926E-06	0,00031944
270,8	15,3254103	1316	0,07	0,00064815	1486	0,002	1,85185E-05	0,00033333
280,8	15,8913413	1314	0,072	0,00066667	1485	0,003	2,77778E-05	0,00034722
290	16,4119977	1312	0,074	0,00068519	1484	0,004	3,7037E-05	0,00036111
300,5	17,0062252	1310	0,076	0,0007037	1483	0,005	4,62963E-05	0,000375
310,9	17,5947934	1308	0,078	0,00072222	1482	0,006	5,55556E-05	0,00038889
321,1	18,172043	1306	0,08	0,00074074	1480	0,008	7,40741E-05	0,00040741
330,1	18,6813809	1304	0,082	0,00075926	1479	0,009	8,33333E-05	0,0004213
340,7	19,2812677	1302	0,084	0,00077778	1478	0,01	9,25926E-05	0,00043519
351,6	19,8981324	1299	0,087	0,00080556	1477	0,011	0,000101852	0,0004537
360,5	20,401811	1297	0,089	0,00082407	1476	0,012	0,000111111	0,00046759
371,4	21,0186757	1295	0,091	0,00084259	1474	0,014	0,00012963	0,00048611
380,8	21,5506508	1292	0,094	0,00087037	1473	0,015	0,000138889	0,00050463
391,5	22,1561969	1290	0,096	0,00088889	1472	0,016	0,000148148	0,00051852
400	22,6372383	1288	0,098	0,00090741	1471	0,017	0,000157407	0,00053241
410	23,2031692	1278	0,108	0,001	1465	0,023	0,000212963	0,00060648
420	23,7691002	1273	0,113	0,0010463	1462	0,026	0,000240741	0,00064352
432	24,4482173	1268	0,118	0,00109259	1460	0,028	0,000259259	0,00067593
441	24,9575552	1263	0,123	0,00113889	1457	0,031	0,000287037	0,00071296
455	25,7498585	1256	0,13	0,0012037	1454	0,034	0,000314815	0,00075926
463	26,2026033	1253	0,133	0,00123148	1452	0,036	0,000333333	0,00078241
471	26,655348	1248	0,138	0,00127778	1449	0,039	0,000361111	0,00081944
480	27,1646859	1243	0,143	0,00132407	1446	0,042	0,000388889	0,00085648
490	27,7306169	1238	0,148	0,00137037	1442	0,046	0,000425926	0,00089815
500	28,2965478	1231	0,155	0,00143519	1439	0,049	0,000453704	0,00094444
521	29,4850028	1217	0,169	0,00156481	1431	0,057	0,000527778	0,0010463
541	30,6168647	1204	0,182	0,00168519	1423	0,065	0,000601852	0,00114352
560	31,6921336	1192	0,194	0,0017963	1414	0,074	0,000685185	0,00124074
572	32,3712507	1188	0,198	0,00183333	1408	0,08	0,000740741	0,00128704
585	33,106961	1185	0,201	0,00186111	1400	0,088	0,000814815	0,00133796
592	33,5031126	1185	0,201	0,00186111	1395	0,093	0,000861111	0,00136111
601	34,0124505	1185	0,201	0,00186111	1387	0,101	0,000935185	0,00139815
620	35,0877193	1186	0,2	0,00185185	1369	0,119	0,001101852	0,00147685
642	36,3327674	1168	0,218	0,00201852	1345	0,143	0,001324074	0,0016713
661	37,4080362	1140	0,246	0,00227778	1309	0,179	0,001657407	0,00196759

682	38,5964912	1096	0,29	0,00268519	1258	0,23	0,00212963	0,00240741
700	39,6151669	1042	0,344	0,00318519	1042	0,446	0,00412963	0,00365741
710	40,1810979	989	0,397	0,00367593	989	0,499	0,00462037	0,00414815
720	40,7470289	927	0,459	0,00425	927	0,561	0,005194444	0,00472222
725	41,0299943	891	0,495	0,00458333	891	0,597	0,005527778	0,00505556
728	41,1997736	855	0,531	0,00491667	855	0,633	0,005861111	0,00538889
730	41,3129598	808	0,578	0,00535185	808	0,68	0,006296296	0,00582407
730	41,3129598	718	0,668	0,00618519	718	0,77	0,00712963	0,00665741
730	41,3129598	588	0,798	0,00738889	588	0,9	0,008333333	0,00786111
730	41,3129598	462	0,924	0,00855556	462	1,026	0,0095	0,00902778
730	41,3129598	419	0,967	0,0089537	419	1,069	0,009898148	0,00942593
730	41,3129598	376	1,01	0,00935185	376	1,112	0,010296296	0,00982407
730	41,3129598	228	1,158	0,01072222	228	1,26	0,011666667	0,01119444
730	41,3129598	212	1,174	0,01087037	212	1,276	0,011814815	0,01134259



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Στο παρόν παράρτημα, παρατίθενται οι πίνακες που περιέχουν αναλυτικά τις τιμές των φορτίων, των αναλογιών φόρτισης, και των τάσεων, που υπολογίστηκαν για κάθε ένα από τα 18 πρισματικά δοκίμια που δοκιμάστηκαν υπό συνδυασμό εφελκυσμού-θλίψης. Παρουσιάζονται στη συνέχεια διαγράμματα όπου φαίνονται όλα τα σημεία που προέκυψαν για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά.

	1 ^η αναλογία φόρτισης												
	A/A	F (KN)	F/2 (KN)	F√/F _h	F _v (KN)	F _h (KN)	σ ₁ /σ ₂	σ ₁ (MPa)	σ₂ (MPa)	σ_1/f_{cm}	σ_2/f_{cm}	σ_{1m}/f_{cm}	σ_{2m}/f_{cm}
	0/1	-	-	0,42	-	-	-	-	-	-	-		
/ _f = 0 %	0/2	-	-	0,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	60/1	-	-	0,42	-	-	-	-	-	-	-		
	60/2	39,45	19,725	0,42	7,79532	18,36792	0,58	1,94883	3,339622	0,06226294	0,10669718		
,72 %	60/3	45,08	22,54	0,42	8,907808	20,989248	0,58	2,226952	3,816227	0,07114863	0,12192418	0.06182	0.40506
V _f = 0,	60/5	31,82	15,91	0,42	6,287632	14,815392	0,58	1,571908	2,693708	0,0502207	0,08606095	0,06183	0,10596
	60/6	40,36	20,18	0,42	7,975136	18,791616	0,58	1,993784	3,416657	0,06369917	0,10915839		
,0	100/4	40,81	20,405	0,42	8,064056	19,001136	0,58	2,016014	3,454752	0,06440939	0,11037546		
r = 1,2 %	100/5	40,16	20,08	0,42	7,935616	18,698496	0,58	1,983904	3,399727	0,06338351	0,10861746	0,06148	0,105354
>	100/6	35,89	17,945	0,42	7,091864	16,710384	0,58	1,772966	3,038251	0,05664428	0,09706874		

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των τάσεων που προέκυψαν για κάθε ομάδα για την 1^η αναλογία φόρτισης:

	A/A	σ1m (Mpa)	σ2m (MPa)		
	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/1				
Vf = 0 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/2	-	-		
	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/1				
	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/2				
Vf - 0 72 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/3	1 0252695	2 2165525		
VI = 0,72 /8	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/5	1,9333005	3,3105555		
	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/6				
	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/4		3,2975767		
Vf = 1,2 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/5	1,92429467			
	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/6	7			

2 ^η αναλογία φόρτισης													
	A/A	F (KN)	F/2 (KN)	F√/F _h	F _v (KN)	F _h (KN)	σ_1/σ_2	σ ₁ (MPa)	σ₂ (MPa)	σ_1/f_{cm}	σ_2/f_{cm}	σ_{1m}/f_{cm}	σ_{2m}/f_{cm}
V _f = 0 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/4	26,63	13,315	0,6	5,440509	9,056863	0,83	1,36012725	1,646702364	0,043455	0,0526103		
	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/5	30,73	15,365	0,6	6,278139	10,451273	0,83	1,56953475	1,900231455	0,050145	0,0607103	0,050847	0,06156
	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/6	36,12	18,06	0,6	7,379316	12,284412	0,83	1,844829	2,233529455	0,058940	0,0713588		
V 0 72 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/1	50,36	25,18	0,6	10,288548	17,127436	0,83	2,572137	3,114079273	0,082177	0,0994914	0,087105	0,105458
v ₁ = 0,72 /0	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/4	56,4	28,2	0,6	11,52252	19,18164	0,83	2,88063	3,487570909	0,092033	0,1114240		
V _f = 1,2 %	∆ОКІМІО 100/1	39,67	19,835	0,6	8,104581	13,491767	0,83	2,02614525	2,453048545	0,064733	0,078372		
	∆OKIMIO 100/2	44,45	22,225	0,6	9,081135	15,117445	0,83	2,27028375	2,748626364	0,072533	0,0878156	0,079533	0,096291
	∆ОКІМІО 100/3	62,1	31,05	0,6	12,68703	21,12021	0,83	3,1717575	3,840038182	0,101334	0,1226850		

Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι μέσες τιμές των τάσεων που προέκυψαν για κάθε ομάδα για την 1^{η} αναλογία φόρτισης:

	A/A	σ1m (Mpa)	σ2m (MPa)	
	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/4			
Vf = 0 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/5	1,591497	1,9268211	
	ΔΟΚΙΜΙΟ 0/6			
	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/1			
Vf = 0,72 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 60/4	2,7263835	3,3008251	
	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/1	1		
	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/2	1		
	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/3			
Vf = 1,2 %	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/5	2,4893955	3,0139044	
	ΔΟΚΙΜΙΟ 100/6	1		





ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1. Chen W. F., "Plasticity in reinforced concrete", J. Ross Publishing, 1982.
- Neville A. M., "Properties of concrete", *Longman Scientific & Technical*, 1987.
- Κωτσοβός Μ. Δ., "Οπλισμένο σκυρόδεμα Εισαγωγή με βάση το θεωρητικό υπόβαθρο των κανονισμών", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2000.

 Τάσιος Θ., Γιαννόπουλος Π., Τρέζος Κ., Τσουκαντάς Σ., "Ωπλισμένο σκυρόδεμα – με βάση τον νέο κανονισμό σκυροδέματος", Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1998.

Τάσιος Θ., Βιντζηλαίου Ε., Γιαννόπουλος Π., Πλαΐνης Π., Σιγάλας Ι., Τρέζος
 Κ., Τσουκαντάς Σ., "Σημειώσεις για τις κατασκευές από Ω. Σ.", Εκδόσεις Ε.Μ.Π.,
 2003.

6. Katsaragakis E. S., Tassios T. P., "Behavior of concrete under biaxial tensioncompression stresses". 7th Hellenic Conference of Concrete, Technical Chamber of Greece, Xanthi, 1987, pp.351-357.

7. Kupher H., Hilsdorf H. K., Rusch H., "Behaviour of concrete under biaxial stresses" ACI Journal, *Proceedings*, V. 66, No. 8, Aug. 1969, pp. 656-666.

8. Demeke A., Tegos I. A., "Steel fiber reinforced concrete in biaxial stress tension-compression conditions", *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 5, Sept.-Oct. 1994, pp. 579-584.

9. Traina L. A., Mansour S. A., "Biaxial strength and deformational behavior of plain and steel fiber concrete", *ACI Materials Journal*, V. 88, No. 4, July-Aug. 1991, pp. 354-362.

10. Traina L. A., Mansour S. A., "Discussion on 'Biaxial tests of plain and fiber concrete' by Yin W. S., Su E. C. M., Mansur M. A. and Hsu T. T. C.", *ACI Materials*

Journal, V. 87, No. 2, Mar.-April 1990, pp. 179-180.

11. Yin W. S., Su E. C. M., Mansur M. A. and Hsu T. T. C., "Biaxial tests of plain and fiber concrete", *ACI Materials Journal*, V. 86, No. 3, May-June 1989, pp. 236-243.

12. Torrenti J. M., Djebri B., "Behaviour of steel-fibre-reinforced concretes under biaxial compression loads", *Cement & Concrete Composites*, V. 17, 1995, pp. 261-266.

13. Pantazopoulou S. J., Zanganeh M., "Triaxial tests of fiber-reinforced concrete", *Journal of materials in civil engineering*, V. 13, No. 5, Sept.-Oct 2001, pp. 340-348.

14. Chern J. C., Yang H. J., Chen H. W., "Behavior of steel fiber reinforced concrete in multiaxial loading", *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 1, Jan.-Feb. 1992, pp. 32-40.

15. Tanigawa Y., Yamada K., Hatanaka S., Mori H., "A simple constitutive model of steel fibre reinforced concrete", *The international journal of cement composites and lightweight concrete*, V. 5, No. 2, May 1983, pp. 87-96.

16. Murugappan K., Paramasivam P., Tan K. H., "Failure envelope for steel-fiber concrete under biaxial compression", *Journal of materials in civil engineering*, V. 5, No. 4, Nov. 1993, pp. 436-446.

17. Hu X. D., Day R., Dux P., "Biaxial failure model for fiber reinforced concrete", *Journal of materials in civil engineering*, V. 15, No. 6, Dec. 2003, pp. 609-615.

18. Seow P. E. C., Swaddiwudhipong S., "Failure surface for concrete under multiaxial load-a unified approach", *Journal of materials in civil engineering*, V. 17, No. 2, Apr. 2005, pp. 219-228.

19. Swaddiwudhipong S., Seow P. E. C., "Modelling of steel fiber-reinforced concrete under multi-axial loads", *Cement and concrete research*, 36, 2006, pp.1354-

1361.

20. Lim T. Y., Paramasivam P., Lee S. L., "Analytical model for tensile behaviour of steel-fiber concrete", *ACI Materials Journal*, V. 84, No. 4, Oct. 1987, pp. 286-298.

21. Lim T. Y., Paramasivam P., Lee S. L., "Bending behaviour of steel-fiber concrete beams", *ACI Materials Journal*, V. 84, No. 6, Nov.-Dec. 1987, pp. 524-536.

22. Taerwe L., Van Gysel A., "Influence of steel fibers on design stress-strain curve for high strength concrete", *Journal of engineering mechanics*, V. 122, No. 8, Aug. 1996, pp. 695-704.

23. Rossi P., "Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of French research", *ACI Materials Journal*, V. 91, No. 3, May-June 1994, pp. 273-279.

24. Σακελλαρίου Α. Γ. "Σύγκριση ιδιοτήτων άοπλου σκυροδέματος και σκυροδέματος με μεταλλικές ίνες. Επίδραση της ποσότητας των ινών στις ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος".

25. Rilem TC 162-TDF, "Test and design methods for steel fibre reinforced concrete", *Materials and Structures*, V. 33, Jan.-Feb. 2000, pp. 3-5.