

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ

**«ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ
ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΚΑΜΨΗ

ΓΙΑ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΑΔΡΑΝΗ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΚΥΡΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΚΟΛΙΑΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

ΑΘΗΝΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2012

Πρωτίστως ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Στυλιανό Κόλια, ο οποίος με την αμέριστη συμπαράστασή του και την επιστημονική του καθοδήγηση συνετέλεσε καθοριστικά στην εκπόνηση αυτής της ερευνητικής εργασίας.

Επίσης ευχαριστώ θερμά τις Διευθύνσεις των Εταιρειών Έτοιμου Σκυροδέματος ET Beton, Lafarge και Interbeton, για την πολύτιμη βοήθειά τους στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Πιο συγκεκριμένα θερμές ευχαριστίες εκφράζονται στους κ. Χ.Βογιατζή και κ. Γ.Μπαμπάκα της ET beton, στις κα Δ.Τελωνιάτη και κα Σ.Καραμάνου της Lafarge και στους κα Μ.Κατσάκου, κ. Κ.Ζόμπολα και κ. Κ.Δάσκαλο της Interbeton για την παρασκευή των δοκιμών της εργασίας αυτής. Χωρίς την υψηλή επαγγελματική αξιοπιστία και αμέριστη προσοχή που επέδειξαν στην διαδικασία παρασκευής και συντήρησης των δοκιμών τα αποτελέσματα της εργασίας δεν θα είχαν την αξιοπιστία που παρουσιάζουν και η βαρύτητα των αποτελεσμάτων θα ήταν διαφορετική. Επίσης εξίσου θερμές ευχαριστίες εκφράζονται στο Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου ΕΚΕΤ και συγκεκριμένα στους κα Ζ.Τσιμπούκη, κ. Β.Καλοϊδά, κ. Ι.Μαρκυγιάννη και κ. Σ.Μηχαηλίδη για την παροχή της δυνατότητας δοκιμών σε θλίψη και κάμψη και για τις πολύτιμες συμβουλές τους στην διεξαγωγή των δοκιμών.

Στην εργασία αυτή παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν 222 κυβικά και πρισματικά δοκίμια για δοκιμές σε θλίψη και κάμψη αντίστοιχα και διεξήχθησαν 444 δοκιμές ισοδύναμου κύβου. Χωρίς την συνεργασία και τη βοήθεια όλων των ανωτέρω προσώπων οι δοκιμές αυτές δεν θα ήταν δυνατόν να εκτελεστούν σε διάστημα 15 εβδομάδων. Από το σημείο αυτό εκφράζω ένα θερμό ευχαριστώ.

Αθήνα, Ιανουάριος 2012

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
ΜΕΡΟΣ Α	
1 ΓΕΝΙΚΑ	11
1.2 Περιγραφή συμπεριφοράς.....	14
1.2 Τύποι δοκιμών.....	17
1.2.1 Θλίψη	18
1.2.2 Εφελκυσμός.....	23
2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΑΝΤΟΧΩΝ	37
2.1 Γενικά.....	37
2.2 Διάρρηξη – Εφελκυσμός.....	39
2.3 Διάρρηξη – Θλίψη	39
2.4 Διάρρηξη – Κάμψη	42
2.5 Κάμψη - Εφελκυσμός	42
2.6 Κάμψη – Θλίψη	43
ΜΕΡΟΣ Β	
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	47
3.1 Δοκιμή κάμψης.....	48
3.2 Δοκιμή θλίψης.....	54
3.3 Δοκιμή ισοδύναμου κύβου	59
4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	63
5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	65
5.1 Μεταβλητότητα – αξιοπιστία αποτελεσμάτων.....	65
5.2 Συσχετισμός θλίψης - κάμψης	70
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	85
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.....	87

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ικανότητα του σκυροδέματος να παραλαμβάνει εφελκυστικές τάσεις γενικά αμελείται στις συνήθεις κατασκευές ωστόσο η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας στον σχεδιασμό έργων όπως πάσης φύσεως οδοστρώματα, αεροδρομίων, λιμένων, βιομηχανικών δαπέδων κ.α. Σε τέτοιου είδους κατασκευές η πιθανότερη αιτία αστοχίας είναι κάποιου είδους εφελκυστική καταπόνηση κυρίως από κόπωση.

Η μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος απαιτεί ειδικό εξοπλισμό και είναι πιο δυσχερής γενικά σε σχέση με τη μέτρηση της θλιπτικής αντοχής.

Παρόλο που η δοκιμή του μονοαξονικού εφελκυσμού δίνει πιο ορθά αποτελέσματα, από μηχανικής άποψης, σε σχέση με τη δοκιμή σε κάμψη δεν έχει διαδοθεί ευρέως καθώς ενέχει ιδιαίτερες δυσκολίες στην διεξαγωγή της. Για αυτόν τον λόγο έχει περιορισθεί σε χρήση κυρίως σε ερευνητικό επίπεδο. Αντίθετα η δοκιμή σε κάμψη είναι σαφώς ευκολότερη στην διεξαγωγή της και έχει τυποποιηθεί σε διάφορους κανονισμούς. Επίσης προσομοιάζει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης των κατασκευών που αναφέραμε παραπάνω.

Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός της σχέσης μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και της αντοχής σε κάμψη.

Για τον σκοπό αυτό η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος υπάρχει το θεωρητικό υπόβαθρο, όπου εξετάζονται οι βασικές αρχές που διέπουν το άοπλο σκυρόδεμα, οι διάφορες μέθοδοι προσδιορισμού της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής του και παρουσιάζεται ανασκόπηση δημοσιεύσεων, που εντοπίστηκαν από βιβλιογραφική έρευνα, για την συσχέτιση των αντοχών μεταξύ τους. Στο δεύτερο μέρος παρουσιάζεται η ερευνητική - πειραματική διαδικασία, η επεξεργασία των αποτελεσμάτων, η σύγκριση με τα αποτελέσματα άλλων ερευνητών και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτήν.

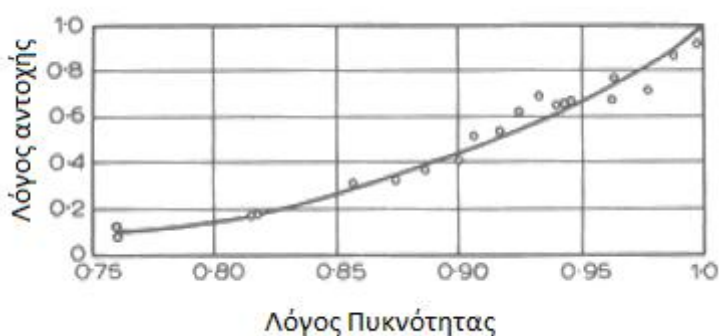
ΜΕΡΟΣ Α

1 ΓΕΝΙΚΑ

Το σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται από παράγοντες όπως η αντοχή, η ανθεκτικότητα, η διαπερατότητα, η σταθερότητα του όγκου του, η εργασιμότητα, ο χρόνος πήξης κ.α.

Από τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος είναι η αντοχή του, καθώς αποτελεί γενικό δείκτη της ποιότητας του αφού είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εσωτερική δομή του (αδρανή-τσιμεντοπολτός) και αποτελεί βασικό στοιχείο για την διαστασιολόγηση των κατασκευών από το υλικό αυτό.

Κύριος παράγοντας που επηρεάζει την αντοχή είναι η παρουσία κενών στον τσιμεντοπολτό. Τα κενά αυτά μπορεί να δημιουργηθούν είτε από αέρα ο οποίος έχει παγιδευτεί στον τσιμεντοπολτό είτε από πλεονάζον νερό το οποίο δεν ήταν απαραίτητο για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου και δεν απομακρύνθηκε. Ο «λόγος πυκνότητας» (density ratio) ή ο «βαθμός συμπίκνωσης» είναι ο λόγος της πυκνότητας του συγκεκριμένου σκυροδέματος ως προς την πυκνότητα του πλήρους συμπυκνωμένου σκυροδέματος ίδιας σύνθεσης. Στο παρακάτω διάγραμμα απεικονίζεται ο λόγος της αντοχής (strength ratio) των δύο δοκιμίων ως προς τον λόγο πυκνότητας.

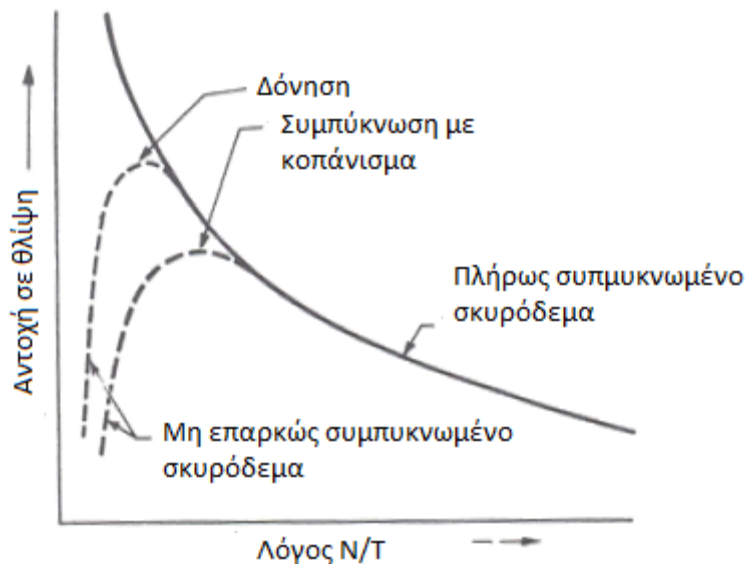


Σχ.1.1 Σχέση μεταξύ του βαθμού συμπίκνωσης και της αντοχής.^[2]

Για δεδομένο βαθμό συμπίκνωσης ο κυριότερος παράγοντας διαμορφώνει την τελική αντοχή είναι ο λόγος νερού – τσιμέντου (N/T). Συγκεκριμένα σε πλήρως συμπυκνωμένο σκυρόδεμα η αντοχή είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου N/T και σύμφωνα με τον Abrams ισχύει η σχέση:

$$f_c = \frac{K_1}{K_2^{w/c}} \quad \text{όπου } K_1, K_2 \text{ εμπειρικές σταθερές}$$

η παραπάνω σχέση απεικονίζεται και στο Σχ.1.2



Σχ.1.2 Σχέση μεταξύ του λόγου N/T και της αντοχής.^[2]

Παρατηρούμε ότι για πολύ μικρούς λόγους N/T, όπου η καλή συμπίκνωση είναι πρακτικά αδύνατη χωρίς περαιτέρω υποβοήθηση, ο παραπάνω κανόνας αποκλίνει. Έτσι βλέπουμε ότι μετά από κάποια τιμή του N/T που αντιστοιχεί σε ορισμένη ποσότητα νερού η συμπίκνωση η συμπίκνωση 'με απλό κοπάνισμα' δεν επαρκεί, η σχέση αντοχής-N/T αποκλίνει της συνεχούς γραμμής και οι αντοχές ελαττώνονται με την μείωση του N/T. Αν χρησιμοποιηθεί δόνηση για τη συμπίκνωση του σκυροδέματος τότε η σχέση f-N/T (συνεχής γραμμή) επεκτείνεται και σε μικρότερες τιμές του λόγου N/T. Η δόνηση φθάνει επίσης σε σημείο που δεν είναι πια επαρκής και περαιτέρω μείωση του N/T συνεπάγεται μείωση της αντοχής. Η επίτευξη μεγαλύτερων τιμών αντοχής γίνεται δυνατή με τη χρήση άλλων ισχυρότερων μεθόδων συμπίκνωσης, όπως συνδυασμός ισχυρής δόνησης και πίεσης αλλά κυρίως με χρήση ρευστοποιητικών ή καλύτερα υπερ-ρευστοποιητικών χημικών πρόσθετων τα οποία μεταβάλλουν τις ρεολογικές ιδιότητες του σκυροδέματος και επεκτείνουν σημαντικά τις δυνατότητες συμπίκνωσης του.

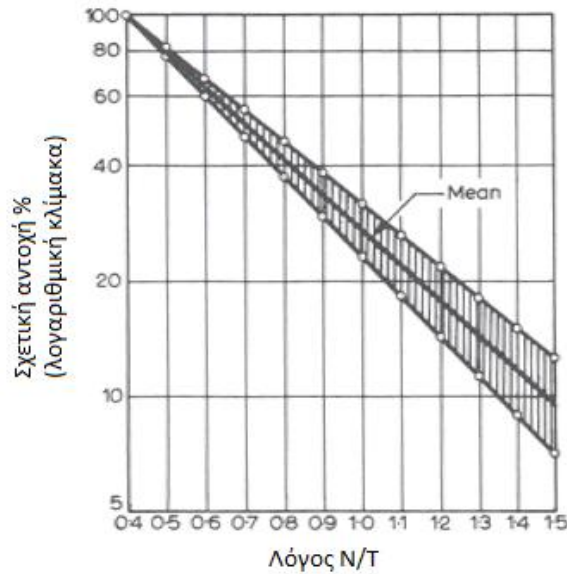
Ο κανόνας του Feret συνδέει την αντοχή με τους όγκους του νερού και του τσιμέντου σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$f_c = K \left(\frac{c}{c+w+a} \right)^2$$

όπου c,w,a οι όγκοι του τσιμέντου, του νερού και του αέρα ενώ το K είναι σταθερά.

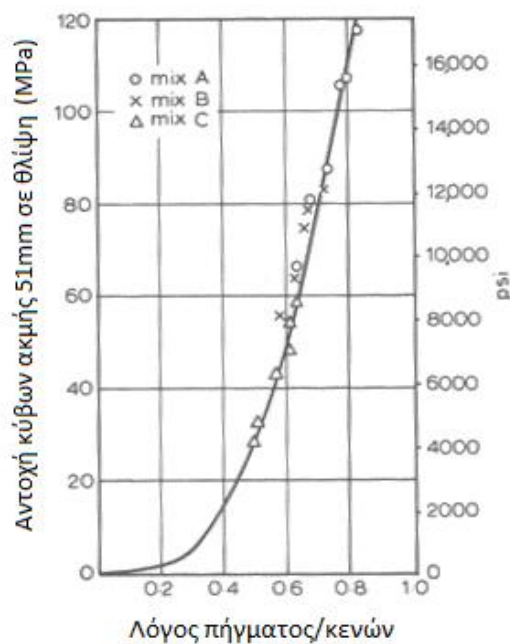
Το πορώδες των τριχοειδών είναι άμεσο αποτέλεσμα του λόγου N/T και μαζί με τους πόρους του πήγματος έχουν καθοριστικό ρόλο στην αντοχή.^[2]

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω σχέσεις δεν είναι ακριβείς, αφήνοντας περιθώρια για προσεγγίσεις. Ο Hummel έχει προτείνει ότι η σχέση του λογάριθμου της αντοχής με τον λόγο N/T μπορεί να θεωρηθεί γραμμική όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα για λόγο N/T = 0.4



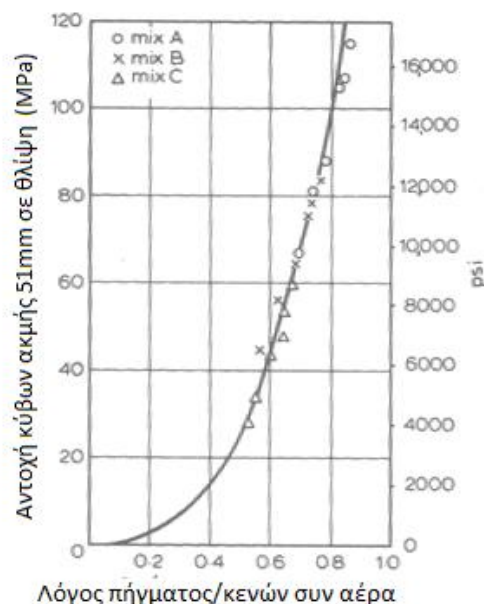
Σχ1.3 Σχέση μεταξύ της σχετικής αντοχής και του λόγου N/T.^[5]

Παρ' όλα αυτά λόγος N/T δεν μπορεί να αποτελέσει αποκλειστικό μέτρο της αντοχής καθώς για δεδομένο λόγο N/T η αντοχή εξαρτάται επίσης από παράγοντες όπως ο βαθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου καθώς και από τις χημικές και φυσικές ιδιότητες του, τη θερμοκρασία στην οποία έγινε η ενυδάτωση και την ποσότητα του παγιδευμένου αέρα στον τσιμεντοπολτό.^[6] Για αυτό τον λόγο είναι προτιμότερος ο συσχετισμός της αντοχής με τη συγκέντρωση των στερεών προϊόντων της ενυδάτωσης του τσιμέντου στον διαθέσιμο χώρο για αυτά. Σύμφωνα με τον Powers η σχέση της (θλιπτικής) αντοχής ως προς το λόγο πήγματος / κενών (gel/space) έχει την μορφή που φαίνεται στο Σχ.1,4.



Σχ.1.4 Σχέση μεταξύ του λόγου πήγματος/κενών και της αντοχής κύβων 51mm σε θλίψη.^[7]
Ο λόγος πήγματος / κενών ορίζεται ως ο όγκος της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας προς το άθροισμα των όγκων του ενυδατωμένου τσιμέντου και των τριχοειδών πόρων.

Εάν λάβουμε υπόψη και τον παγιδευμένο αέρα στο πήγμα τότε το διάγραμμα είναι το ακόλουθο:



Σχ.1.4 Σχέση του λόγου πήγματος/κενών και αέρα με την αντοχή κύβων 51mm θλίψη.^[8]

1.2 Περιγραφή συμπεριφοράς

Το σκυρόδεμα, λόγω της σύνθεσης του είναι άκρως ετερογενές τόσο λόγω των διαφορετικών συστατικών του αλλά και λόγω του διαφορετικού μεγέθους των αδρανών που εμπεριέχει. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σκυρόδεμα είναι υλικό δύο φάσεων, τα αδρανή και τον τσιμεντοπολτό. Στον τσιμεντοπολτό συμπεριλαμβάνονται παράγοντες που επιτείνουν την ετερογένεια, όπως νερό, κενά αέρα και λεπτόκοκκα αδρανή. Η κύρια διαφορά των συστατικών του σκυροδέματος θα μπορούσε να αποδοθεί στη διαφορά μέτρων ελαστικότητας μεταξύ του τσιμεντοπολτού που συνιστά το μέσον διασποράς και των αδρανών που περιβάλλονται και συγκρατούνται από τον τσιμεντοπολτό. Τα συνήθη αδρανή έχουν πολύ μεγαλύτερο μέτρο ελαστικότητας από τον τσιμεντοπολτό και το αντίθετο συμβαίνει στην περίπτωση των ελαφρών αδρανών. Συνέπεια αυτής της διαφοράς είναι η ανάπτυξη συγκεντρώσεων τάσεων στη διεπιφάνεια αδρανών τσιμεντοπολτού. Οι συγκεντρώσεις αυτές αναπτύσσονται τόσο σε αφόρτιστη κατάσταση όσο και σε φορτισμένη κατάσταση του σκυροδέματος. Η αφόρτιστη κατάσταση χαρακτηρίζεται από επιβολή επιβεβλημένων παραμορφώσεων (θερμικής ή χημικής ή ξήρανσης αιτιολογίας) οι οποίες προκαλούν την ανάπτυξη τάσεων ορισμένες των οποίων θα οδηγήσουν σε τοπική προμικρορηγματώση του σκυροδέματος. Στη φορτισμένη κατάσταση (σε χαμηλότερο επίπεδο από το επίπεδο αστοχίας) η διαφορά μέτρων ελαστικότητας θα προκαλέσει επίσης ανάπτυξη συγκεντρώσεων τάσεων, ορισμένες των οποίων είναι εφελκυστικές, που επίσης θα προκαλέσουν την έναρξη ρηγματώσεων αποκόλλησης του τσιμεντοπολτού από τα αδρανή οι οποίες με την αύξηση της φόρτισης θα επιμηκυνθούν και σταδιακά θα επιφέρουν την αστοχία του υλικού. Η εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού γίνεται ακόμη πιο

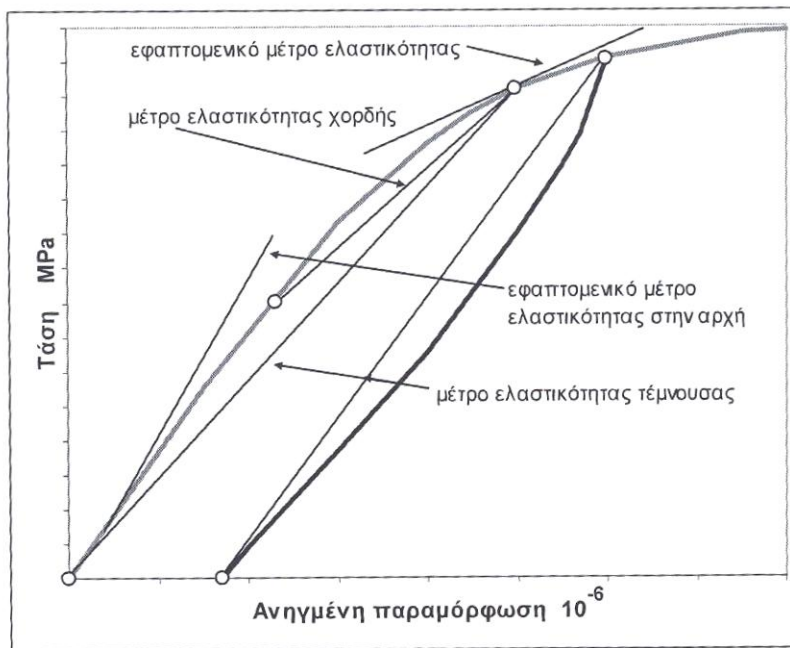
πολύπλοκη λόγω της ύπαρξης της διεπιφανειακής μεταβατικής ζώνης. Η μεταβατική ζώνη βρίσκεται στη διεπιφάνεια μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού και σε αυτή οι συνθήκες της μικροδομής του υλικού διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με τον υπόλοιπο τσιμεντοπολτό (μικρότερη πυκνότητα και αντοχή μεγαλύτερη διαπερατότητα κ.α.). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η περιοχή του τσιμεντοπολτού στη γειτονιά των αδρανών υφίσταται την επίδραση του φαινομένου παρειάς (wall effect) δηλ μία διατάραξη της ομοιογένειάς του και μία αδυναμία κανονικής συμμετρικής ανάπτυξης των προϊόντων ενυδάτωσης λόγω της ύπαρξης της παρειάς του αδρανούς (asymmetrical growth). Η ύπαρξη της Διεπιφανειακής Μεταβατικής Ζώνης (DMZ) αποτελεί για πολλούς ερευνητές τον λόγο θεώρησης του σκυροδέματος ως υλικού τριών φάσεων όπου η DMZ είναι η Τρίτη φάση.

Το σκυρόδεμα μπορεί να θεωρηθεί ότι συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι ένα επίπεδο φόρτισης και μη ελαστικά, με μη γραμμική σχέση τάσεων – παραμορφώσεων για υψηλότερα επίπεδα φόρτισης. Συγκεκριμένα μπορούμε να διακρίνουμε τις ακόλουθες φάσεις.

1. Την ελαστική φάση, μέχρι περίπου την επιβολή φορτίου μικρότερου από το 40% της αντοχής.
2. Την φάση ανάπτυξης μικρορωγμών, όπου το μέτρο ελαστικότητας μικραίνει ενώ ο λόγος του Poisson παραμένει σχεδόν σταθερός
3. Την φάση της ρηγμάτωσης, όπου το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται σταδιακά μέχρι το μισό της αρχικής του τιμής και ο λόγος του Poisson αυξάνει σταδιακά μέχρι τρεις φορές της αρχικής τιμής του.
4. Την τελική φάση στην οποία οι ρωγμές γίνονται ασταθείς και τελικά επέρχεται η θραύση.^[9]

Εάν το σκυρόδεμα υποβληθεί σε φόρτιση για μεγάλο χρονικό διάστημα τότε υφίσταται παραμορφώσεις πέραν των αρχικών παραμορφώσεων και το φαινόμενο ονομάζεται ερπυσμός. Για φορτία άνω του 75 ή 80% του φορτίου θραύσεως υπό τις συμβατικές συνθήκες φόρτισης (ds/dt ή de/dt) το σκυρόδεμα αστοχεί αν το φορτίο διατηρηθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα και αυτό αποδίδεται στο ότι οι δημιουργηθείσες με τη φόρτιση ρωγμές δεν είναι σταθερές αλλά προωθούνται και οδηγούν σε αστοχία για μικρότερο φορτίο εκείνου της συμβατικής δοκιμής (στατική αντοχή κόπωσης, αντοχή χρόνιας φόρτισης).

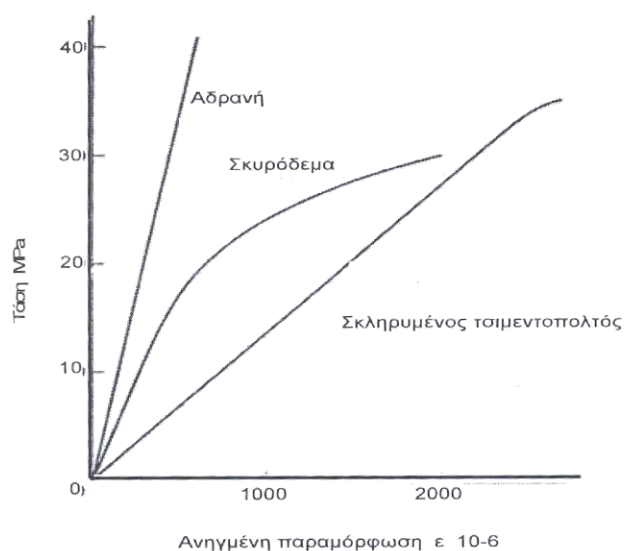
Στο Σχ. 1.5 παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων για φόρτιση και αποφόρτιση.



Σχ.1.5 Σχέση της ανοιγμένης παραμόρφωσης ως προς την επιβαλλόμενη τάση για ένα κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης.^[11]

Για μικρά φορτία (<40%) το διάγραμμα είναι ευθύγραμμο και μπορεί να θεωρηθεί ότι το για το μέτρο ελαστικότητας ισχύει η σχέση $E = \sigma/\epsilon$ (γραμμική). Όσο αυξάνεται η φόρτιση η καμπυλότητα του διαγράμματος αυξάνεται και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας εξαρτάται πλέον και από την επιβαλλόμενη τάση.

Η σχέση τάσεων – παραμορφώσεων για τα δύο συστατικά του σκυροδέματος σε αντίθεση με τα παραπάνω είναι γραμμική. Λόγω του ότι τα μέτρα ελαστικότητας των δύο υλικών είναι διαφορετικά, στη διεπιφάνεια των δύο υλικών (ΔΜΖ) αναπτύσσονται μικρο-ρηγματώσεις, γεγονός που εξηγεί το καμπύλο διάγραμμα τάσεων - παραμορφώσεων του σκυροδέματος. Επίσης ενώ και τα αδρανή αλλά και ο τσιμεντοπολτός είναι ψαθυρά το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ψεύδο-πλαστικά. Το παραπάνω εξηγεί και το γεγονός ότι στην περίπτωση διαξονικής ή τριαξονικής θλιπτικής καταπόνησης, εξαιτίας της πιο ομοιόμορφης κατανομής των τάσεων γύρω από τα αδρανή, η αντοχή είναι μεγαλύτερη.^[12]



Σχ.1.6 Σχέση της ανοιγμένης παραμόρφωσης με την επιβαλλόμενη τάση για τα δύο υλικά ξεχωριστά και μαζί.^[1]

Στην περίπτωση που τα αδρανή έχουν μέτρο ελαστικότητας κοντά σε αυτό του τσιμεντοπολτού η δημιουργία μικρορωγμών περιορίζεται. Σε ελαφροσκυρόδεμα, όπου τα μέτρα ελαστικότητας αδρανών και τσιμεντοπολτού είναι παραπλήσια υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή τάσεων, γεγονός που συντελεί στην αύξηση της τελικής αντοχής, αλλά και της αδιαπερατότητας.^[13]

1.2 Τύποι δοκιμών

Καμία δοκιμή δεν ανταποκρίνεται στις συνθήκες που καταπονούν το σκυρόδεμα στην πραγματικότητα. Οι διάφορες εργαστηριακές δοκιμές μας δίνουν ένα μέτρο της αντοχής του υλικού. Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, ο τρόπος επιβολής του φορτίου και οι αναπτυσσόμενες εντατικές και παραμορφωσιακές συνθήκες στην περιοχή επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχανήμα στο οποίο γίνεται η δοκιμή.

Αναλυτικότερα οι δοκιμές που είναι ευρύτερα διαδεδομένες είναι:

Δοκιμή σε θλίψη κυλίνδρου ή κύβου

Αυτή η δοκιμή δίνει ακριβή αποτελέσματα για την αντοχή του σκυροδέματος σε (μονοαξονική) θλίψη. Η αντοχή του κυλίνδρου είναι ανάλογη της αντοχής του κύβου και είναι περίπου το 80% αυτής. Εντούτοις, από λεπτομερέστερη θεώρηση του μηχανισμού αστοχίας σε θλίψη του σκυροδέματος προκύπτει ότι η αστοχία του υλικού προκαλείται από αστοχία σε έμμεσο εφελκυσμό που αναπτύσσεται μεταξύ τσιμεντοπολτού και αδρανών στη περιοχή της Διεπιφανειακής Μεταβατικής Ζώνης (υποδεέστερα μηχανικά χαρακτηριστικά).

Είναι επομένως φανερό ότι η ονομαζόμενη αντοχή σε θλίψη δεν είναι πραγματική αντοχή σε θλίψη αλλά προϊόν μιας πολύπλοκης εντατικής και παραμορφωσιακής κατάστασης

Δοκιμή άμεσου εφελκυσμού

Με αυτή τη μέθοδο προκύπτουν ακριβέστερα μεγέθη αντοχής σε εφελκυσμό διότι με τη θραύση του δοκιμίου είναι ακριβές να διατυπωθεί η σχέση :

αντοχή = φορτίο / φορτιζόμενη επιφάνεια.

Η σχέση αυτή ισχύει ανεξάρτητα από την γραμμικώς ελαστική ή μη γραμμικώς ελαστική συμπεριφορά του υλικού

Ωστόσο λόγω της δυσκολίας διεξαγωγής της δοκιμής, η χρήση της έχει περιορισθεί για ερευνητικούς κυρίως σκοπούς.

Δοκιμή διάρρηξης

Η μέθοδος της διάρρηξης αποτελεί έμμεσο τρόπο υπολογισμού της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό με σχετικά πιο απλή πειραματική διαδικασία σε σχέση με τη δοκιμή σε εφελκυσμό. Εντούτοις, ο υπολογισμός της αντοχής στηρίζεται στη θεώρηση ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά μέχρι την αστοχία του γεγονός αναληθές που καθιστά το αποτέλεσμα "θεωρητικό"

Δοκιμή Κάμψης

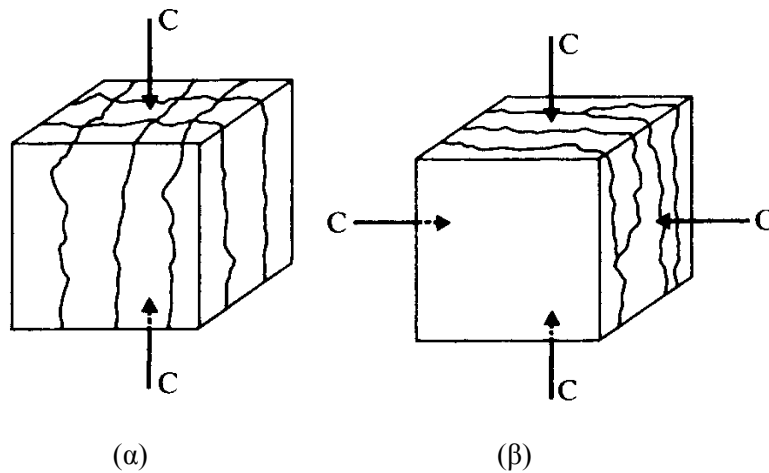
Η δοκιμή κάμψης είναι μια ακόμα μέθοδος εκτίμησης της αντοχής σε εφελκυσμό. Τα δύο τμήματα που προκύπτουν από το δοκίμιο μετά τη θραύση του μπορούν να χρησιμοποιηθούν για δοκιμή θλίψης (ισοδύναμου κύβου). Και στην περίπτωση αυτή όμως πρέπει να παρατηρηθεί ότι ο υπολογισμός της αντοχής σε κάμψη στηρίζεται στη θεώρηση ότι το υλικό συμπεριφέρεται γραμμικώς ελαστικά μέχρι την αστοχία του γεγονός αναληθές που καθιστά το αποτέλεσμα "θεωρητικό"

1.2.1 Θλίψη

Η δοκιμή σε θλίψη αποτελεί την πιο κοινή ίσως δοκιμή για το σκυρόδεμα, κυρίως λόγω του ότι είναι απλή στη διεξαγωγή της. Επίσης η αντοχή σε θλίψη είναι ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος απαραίτητο για κάθε υπολογισμό.

Γενικά χρησιμοποιούνται δοκίμια μικρού μεγέθους για πρακτικούς λόγους. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενδέχεται να επηρεαστούν από διάφορους άλλους δευτερογενείς παράγοντες πέρα από το μέγεθος του δοκιμίου, όπως ο ρυθμός επιβολής του φορτίου, η υγρασία ή ακόμα και το μηχάνημα στο οποίο γίνεται η δοκιμή και οι επιβαλλόμενες συνθήκες φόρτισης και παραμόρφωσης στα σημεία επιβολής του φορτίου.

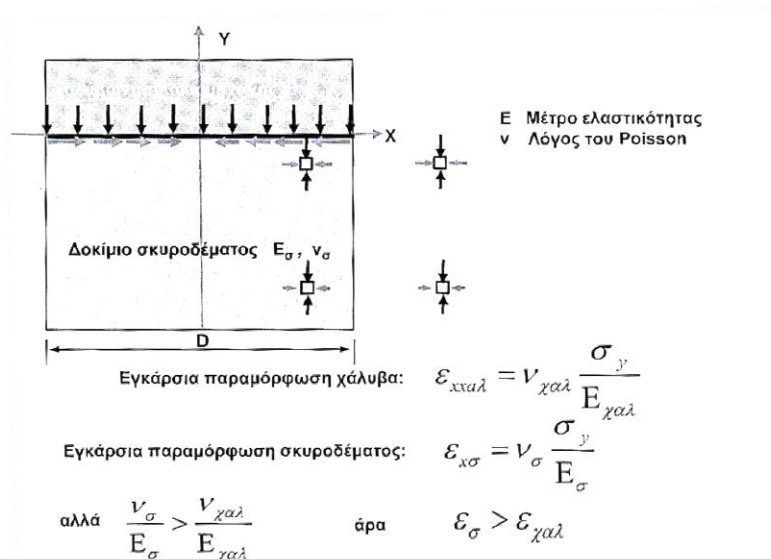
Στη συνέχεια απεικονίζονται οι μορφές θραύσης κυβικού δοκιμίου υπό μονοαξονική και διαξονική θλίψη.



Σχ1.7 Μορφές θραύσης για μονοαξονική θλίψη (α) και διαξονική θλίψη (β)

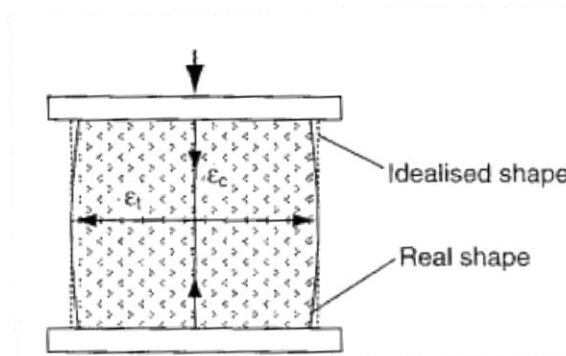
Παρατηρούμε ότι στην περίπτωση της μονοαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές κυρίως παράλληλες με τα επιβαλλόμενα φορτία. Οι ρωγμές σχηματίζουν επίπεδα κάθετα μεταξύ τους και τελικά το δοκίμιο αστοχεί σχηματίζοντας κολονάκια. Αντίθετα στην περίπτωση της διαξονικής θλίψης σχηματίζονται ρωγμές παράλληλες στο επίπεδο που ορίζουν οι δύο φορτίσεις και το δοκίμιο αστοχεί με τον σχηματισμό πλακοειδών στοιχείων. Στην περίπτωση της τριαξονικής θλίψης έχουμε αστοχία λόγω σύνθλιψης και το σκυρόδεμα δεν συμπεριφέρεται πλέον ψαθυρά.

Στις πραγματικές δοκιμές όμως οι μορφές αστοχίας των δοκιμίων είναι διαφορετικές. Αυτό οφείλεται κυρίως στην επαφή του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες της μηχανής στην οποία γίνεται η δοκιμή. Το σκυρόδεμα κατά τη θλίψη παραμορφώνεται εγκάρσια περισσότερο από τις χαλύβδινες πλάκες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να παρεμποδίζεται, λόγω τριβής, η οριζόντια παραμόρφωση και να αναπτύσσονται συνθήκες τριαξονικής θλίψης, όπως φαίνεται παρακάτω. Αποτέλεσμα της τριαξονικής θλίψης είναι να αυξάνεται φαινομενικά η αντοχή του δοκιμίου.

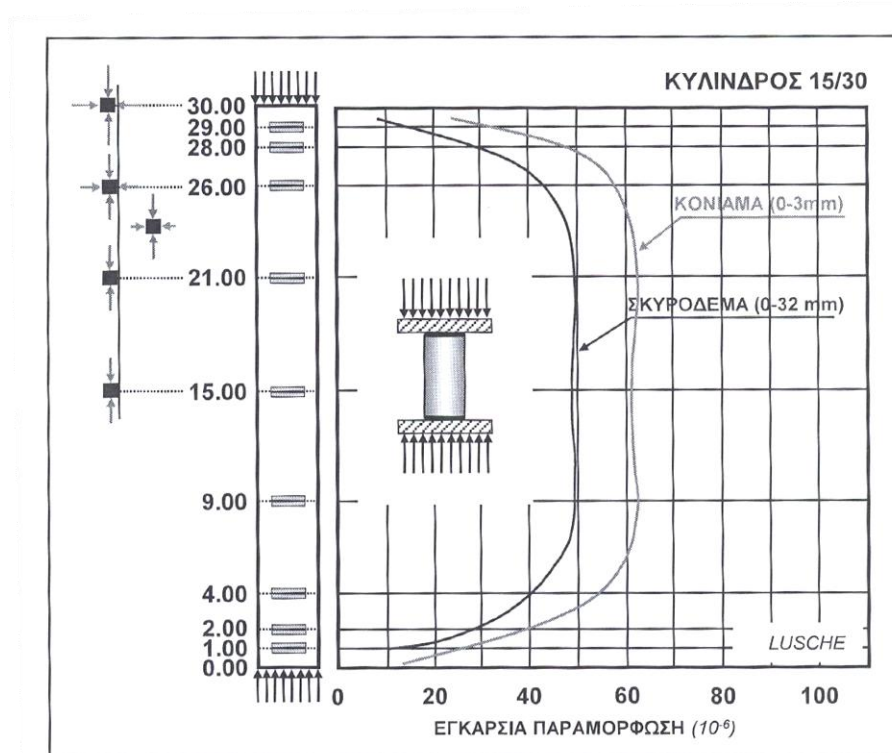


Σχ.1.8 Ανάλυση τάσεων στη διεπιφάνεια χαλύβδινής πλάκας – σκυροδέματος.

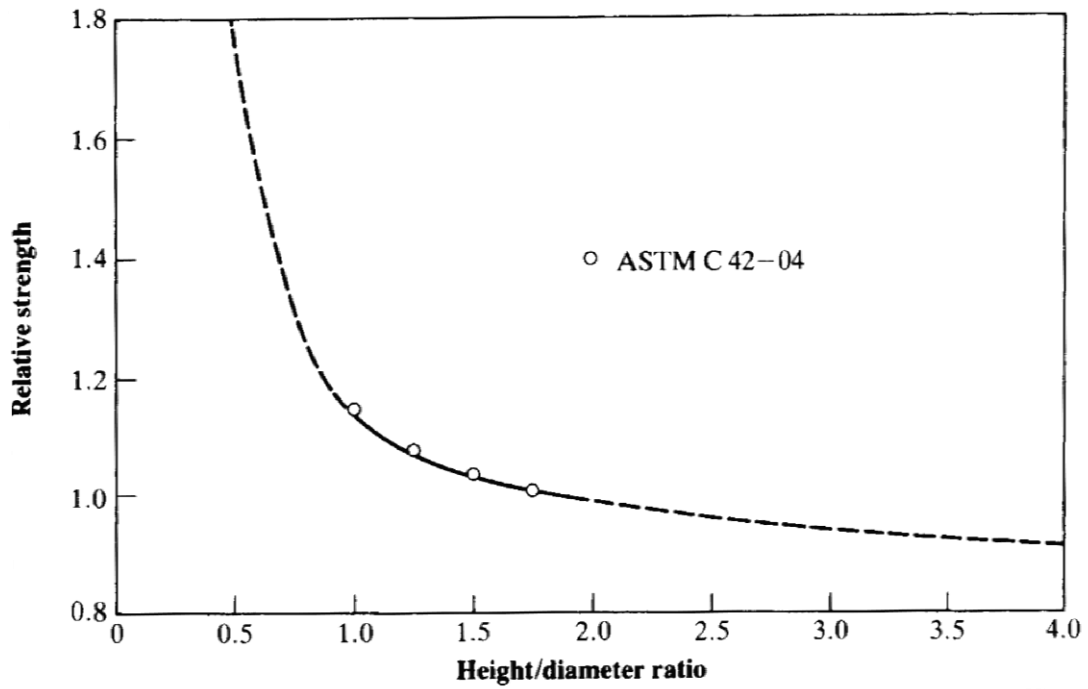
Οι εγκάρσιες αυτές δυνάμεις εξασθενούν καθώς απομακρυνόμαστε από τις πλάκες. Όταν το ύψος του δοκιμίου είναι μεγαλύτερο από δύο φορές το πλάτος του στο μέσο του δοκιμίου έχουμε συνθήκες μονοαξονικής θλίψης. Έτσι εξηγείται το ότι στα κυλινδρικά δοκίμια όπου ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη ($H/D \geq 2$) η αντοχή είναι μικρότερη απ' ότι στα κυβικά δοκίμια ($H/D=1$). Η αντοχή του κυλίνδρου είναι ανάλογη της αντοχής του κύβου και είναι περίπου το 80% αυτής. Η σχέση των δύο αντοχών εξαρτάται και από το μέγεθος της μέγιστης επιβαλλόμενης δύναμης αλλά και από τις συνθήκες υγρασίας. Στη συνέχεια φαίνεται η κατανομή των τάσεων καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου και η σχέση της αντοχής με την αναλογία ύψους-διαμέτρου (ASTM c 42-04).



Σχ.1.9 Παραμόρφωση του δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.



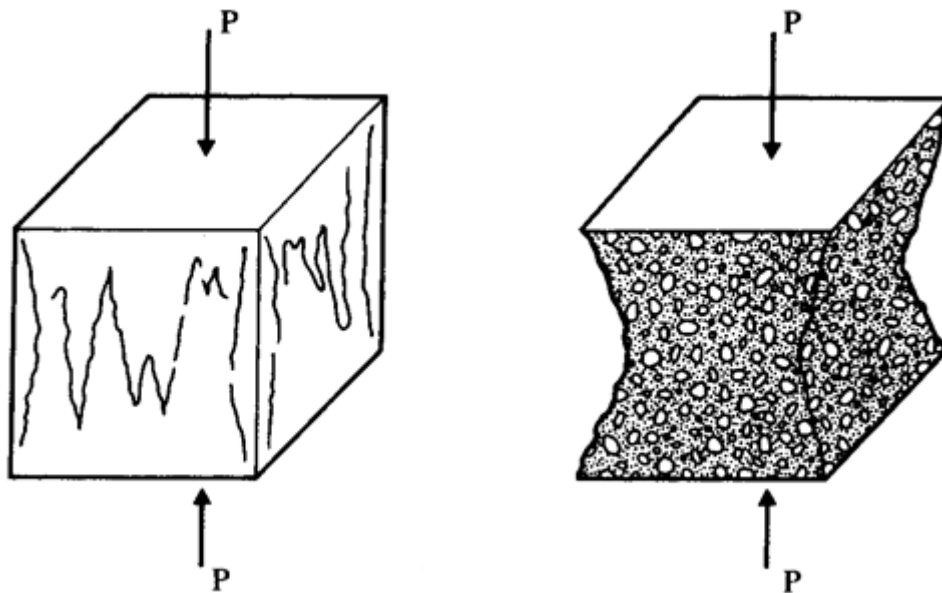
Σχ.1.10 Διάγραμμα παραμόρφωσης καθ' ύψος κυλινδρικού δοκιμίου κατά τη δοκιμή σε μονοαξονική θλίψη.^[1]



Σχ.1.11 Επιρροή του λόγου ύψος/διάμετρο στην αντοχή κυλίνδρου σε θλίψη.

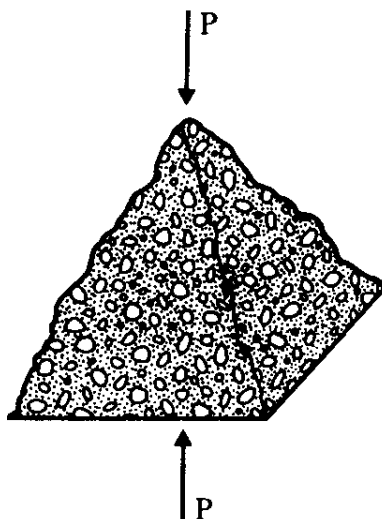
Η χρήση κυλινδρικών δοκιμίων υπερέρχει λόγω του ότι επιτυγχάνουμε πιο ομοιόμορφη κατανομή των τάσεων. Ωστόσο τα κυβικά δοκίμια είναι πιο εύρηστα κυρίως διότι δεν απαιτείται απίσωση (καπέλωμα).

Στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται η ακόλουθη μορφή αστοχίας.



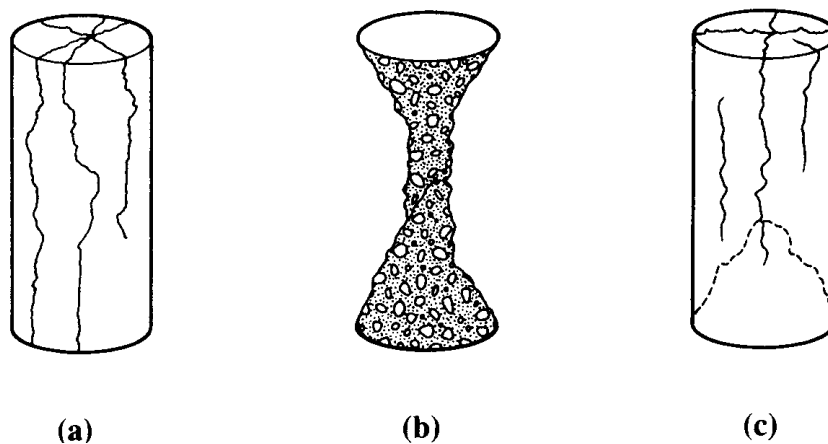
Σχ.1.12 Μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη.

Οι οριζόντιες τάσεις εξασθενούν καθώς κινούμαστε προς το μέσον του δοκιμίου. Οι πλευρές του δοκιμίου είτε εμφανίζουν κατακόρυφες ρωγμές, είτε διασπώνται τελείως και ο πυρήνας παραμένει πρακτικά άθικτος. Εάν η μηχανή στην οποία γίνεται η δοκιμή είναι δεν είναι αρκετά δύσκαμπτη υπάρχει η περίπτωση να εμφανισθεί αστοχία εκρηκτικού τύπου όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχ.1.13 Αστοχία εκρηκτικού τύπου.

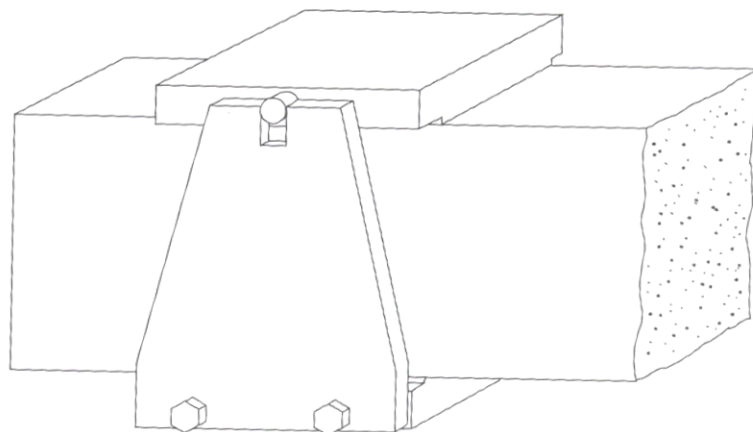
Στη συνέχεια εμφανίζονται οι συνηθέστερες μορφές αστοχίας κυλινδρικού δοκιμίου



Σχ.1.14 Μορφές αστοχίας κυλινδρικών δοκιμίων.

Μία ακόμα περίπτωση είναι η δοκιμή ισοδύναμου κύβου. Τα εναπομένοντα τμήματα της δοκού από τη δοκιμή κάμψης προσφέρονται για δοκιμή σε θλίψη λόγω της τετραγωνικής διατομής τους. Η αντοχή του ισοδύναμου κύβου είναι περίπου ίδια με την αντοχή κύβου ίδιων διαστάσεων. Έχει παρατηρηθεί ότι εξαιτίας των πλεοναζόντων τμημάτων του ισοδύναμου κύβου, τα οποία εμποδίζουν την οριζόντια παραμόρφωση του δοκιμίου, η αντοχή είναι περίπου 5% μεγαλύτερη.^[15]

Στο Σχ.1.15 απεικονίζεται ενδεικτικά μια απλή συσκευή με την οποία μπορούν να γίνουν γρήγορα και με ακρίβεια τοποθέτησης οι δοκιμές ισοδύναμου κύβου.



Σχ.1.15 Αρπάγη για δοκιμή ισοδύναμου κύβου.

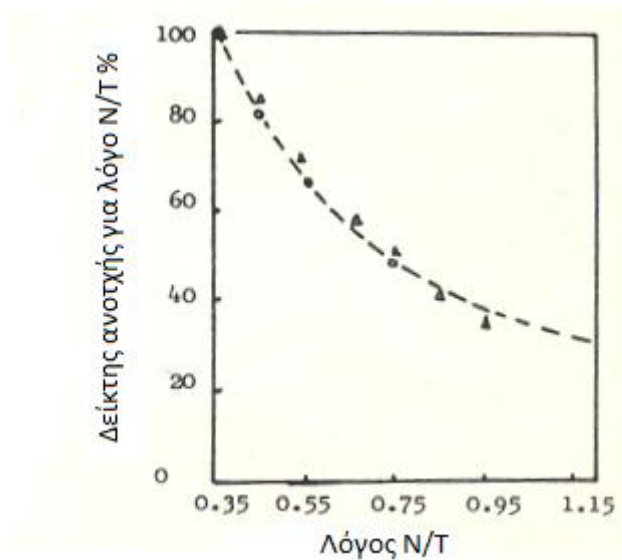
1.2.2 Εφελκυσμός

Η αντοχή σε εφελκυσμό είναι μείζονος σημασίας σε κατασκευές από άοπλο σκυρόδεμα καθώς και σε φράγματα που υποβάλλονται σε σεισμούς. Επίσης έχει καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό οδοστρωμάτων και δαπέδων αεροδρομίων ή λιμένων, όπου κύριο κριτήριο είναι η αντοχή σε κάμψη, και ακριβέστερα η αντοχή σε κόπωση από κάμψη, η οποία συνδέεται άμεσα με την αντοχή σε εφελκυσμό.

Η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Την αντοχή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού
- Την αντοχή των αδρανών
- Την συνάφεια του τσιμεντοπολτού με τα αδρανή (ΔΜΖ)

Πιο συγκεκριμένα η εφελκυστική αντοχή επηρεάζεται από το λόγο N/T , όπως συμβαίνει και στη θλίψη αλλά σε μικρότερη κλίμακα.^[14]

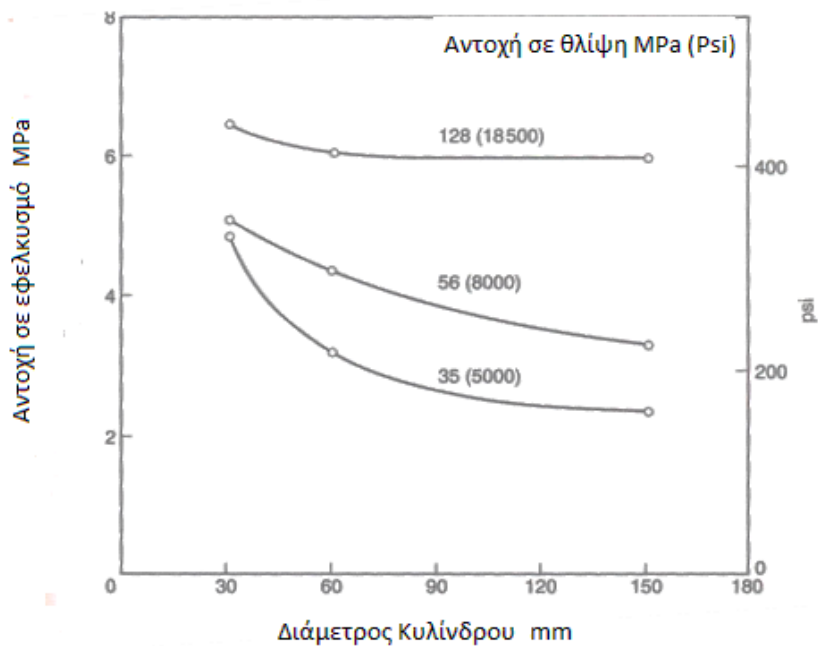


Σχ.1.16 Σχέση του λόγου N/T και της αντοχής σε εφελκυσμό.^[16]

Η διεύθυνση του δοκιμίου κατά τη σκυροδέτηση έχει ιδιαίτερη σημασία λόγω του φαινομένου της εξίδρωσης, η οποία δημιουργεί ασυνέχειες κατά το οριζόντιο επίπεδο και ευθύνεται για την ανισότροπη συμπεριφορά του σκυροδέματος. Εξαιτίας αυτού τα αποτελέσματα δοκιμών σε εφελκυσμό μπορεί να έχουν απόκλιση μέχρι και 100% εάν παρόμοια δοκίμια υποβληθούν δοκιμή σε διαφορετικές διευθύνσεις, γεγονός που καταδεικνύει την ανισοτροπία του σκυροδέματος η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη σε ορισμένες περιπτώσεις.

Ο τύπος των αδρανών αλλά και το μέγεθος τους παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στην τελική εφελκυστική αντοχή. Γενικά όταν το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αυξάνει η εφελκυστική αντοχή μειώνεται.^{[2][14]}

Το μέγεθος του δοκιμίου επίσης επηρεάζει την αντοχή.^[2]



Σχ.1.17 Σχέση μεταξύ της διαμέτρου κυλινδρικού δοκιμίου και της αντοχής του σε εφελκυσμό.^[17]

Παρατηρούμε ότι μετά από ένα σημείο η αύξηση του μεγέθους του δοκιμίου δεν επηρεάζει την αντοχή. Το μέγεθος του δοκιμίου συνδέεται άμεσα και με άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή, όπως τη διαφορά της υγρασίας της επιφάνειας του δοκιμίου με το εσωτερικό ή τη συγκέντρωση αδρανών σε συγκεκριμένα σημεία.

Η μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής είναι ιδιαίτερα δυσχερής και γι' αυτόν τον λόγο έχουν επικρατήσει έμμεσοι τρόποι εκτίμησης της, όπως η δοκιμή διάρρηξης και η δοκιμή σε κάμψη.

1.2.2.1 Δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Η δοκιμή αυτού του είδους έχει το πλεονέκτημα ότι μας δίνει αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος χωρίς να χρειαστεί να καταφύγουμε σε υποθέσεις για την ελαστική συμπεριφορά του δοκιμίου.

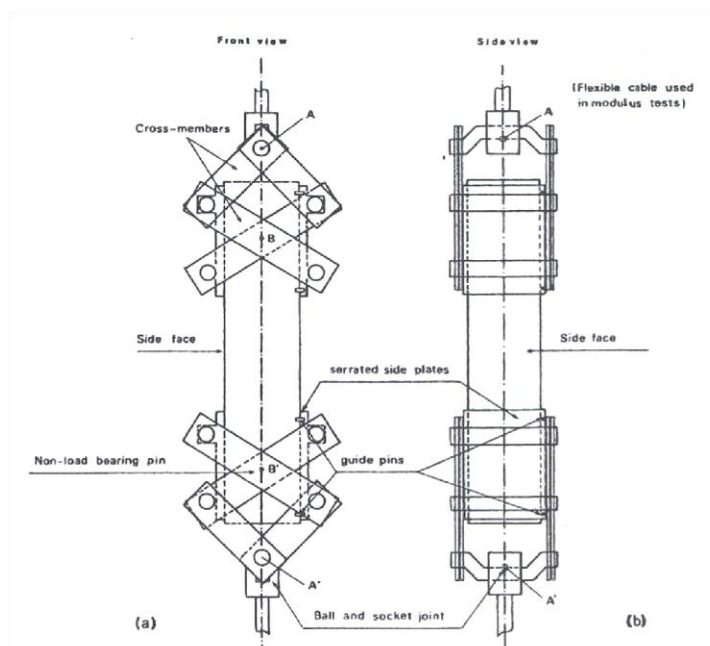
Υπάρχει πλήθος διαφορετικών δοκιμών για τη μέτρηση της αντοχής σε εφελκυσμό. Τα κυριότερα προβλήματα που προκύπτουν σε τέτοιου είδους δοκιμές είναι η εφαρμογή του φορτίου χωρίς να προκληθούν συγκεντρώσεις τάσεων αλλά και η αποφυγή της εκκεντρότητας.

Οι κυριότεροι τρόποι εφαρμογής του εφελκυστικού φορτίου είναι οι ακόλουθοι:

α) με αρπάγες

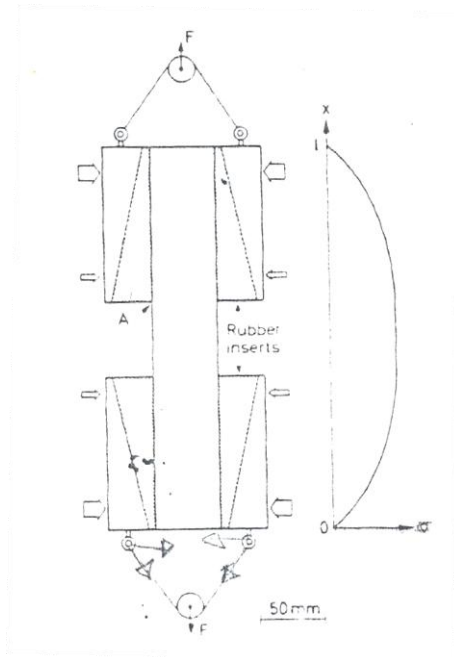
Υπάρχει πλήθος διαφορετικών συστημάτων που έχουν προταθεί για αυτή την μέθοδο, οι οποίες βασίζονται στην εφαρμογή του φορτίου στην τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των αρπαγών και του δοκιμίου.

Παρακάτω φαίνεται η μέθοδος που αναπτύχθηκε από τους Johnston και Sidwell, όπως εφαρμόστηκε στο Εργαστήριο Οδοποιίας του ΕΜΠ.^[18]



Σχ.1.18 Αρπάγες για δοκιμή σε εφελκυσμό από τους Johnston και Sidwell.

Στη συνέχεια φαίνεται η μέθοδος που προτείνεται από τον Petersson^[19] στην οποία χρησιμοποιούνται σφήνες από ελαστικό υλικό. Σε αυτή τη μέθοδο η κατανομή των τάσεων είναι σχεδόν ομοιόμορφη στο διάστημα μεταξύ των δύο αρπαγών, όπως φαίνεται στο Σχ. 1.19.

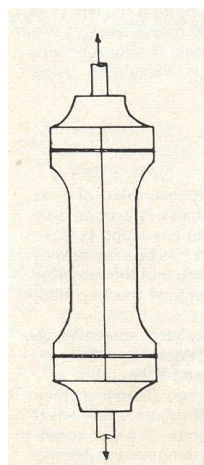


Σχ.1.19 Αρπάγες για δοκιμή σε εφελκυσμό από τον Petersson.

β) με συγκόλληση στα άκρα

Για να εφαρμοστεί αυτή η μέθοδος επιβάλλεται να κοπεί με αρμοκόφτη το δοκίμιο στις άκρες του που θα έλθουν σε επαφή με την εποξειδική ρητίνη για να γίνει συγκόλληση με υγιές τμήμα του σκυροδέματος (αδρανή) και να μη γίνει συγκόλληση με τμήματα του σκυροδέματος μικρής αντοχής όπως είναι η περιοχή των επιφανειών του δοκίμιου που είναι πλούσιες σε υδαρή τσιμεντοπολτό με πολύ μικρή αντοχή.

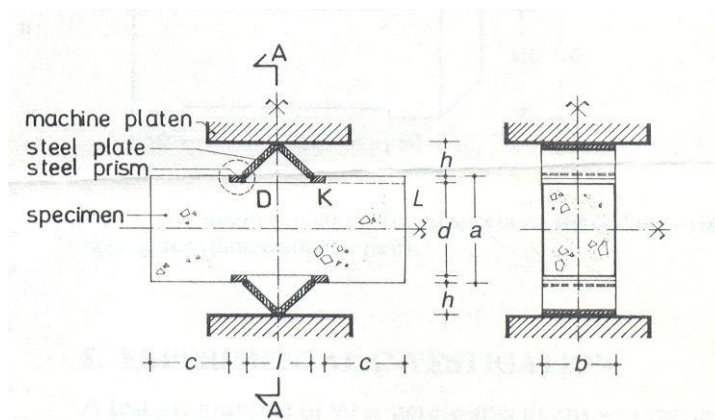
Θα πρέπει να τονισθεί ότι λόγω του διαφορετικού μέτρου ελαστικότητας του σκυροδέματος και της κόλλας, τα δύο υλικά παραμορφώνονται διαφορετικά στο κάθετο προς την διεύθυνση φόρτισης επίπεδο, με αποτέλεσμα να αναπτύσσεται τριαξονικό πεδίο τάσεων στο δοκίμιο. Επίσης αυτή η μέθοδος είναι δύσκολο να εφαρμοσθεί σε σχετικά υγρά δοκίμια.



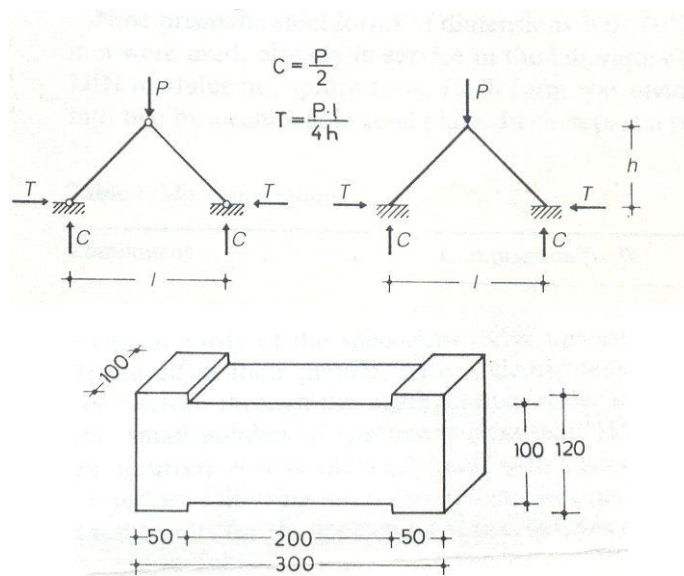
Σχ.1.20 Μέθοδος συγκόλλησης στα άκρα για δοκιμή σε εφελκυσμό.

γ) με τριγωνικά πλαίσια

Αυτού του είδους η δοκιμή απαιτεί διαφορετικά δοκίμια όπως φαίνεται παρακάτω. Η μηχανή της δοκιμής επιβάλλει θλιπτικό φορτίο στα τριγωνικά πλαίσια ενώ το δοκίμιο λόγω της μορφολογίας του υποβάλλεται σε εφελκυσμό.^[20]



Σχ.1.21 Μέθοδος δοκιμής σε εφελκυσμό με τη χρήση τριγωνικών πλαισίων.



Σχ.1.22 Ανάλυση των δυνάμεων που δέχονται τα τριγωνικά πλαίσια κατά τη δοκιμή.

1.2.2.2 Δοκιμή διάρρηξης

Η δοκιμή αυτή χρησιμοποιείται ευρέως για την εκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Τα δοκίμια συνήθως είναι κυλινδρικά, παρόμοια με αυτά που χρησιμοποιούμε στην δοκιμή σε θλίψη, πράγμα που μας διευκολύνει στην σύγκριση της εφελκυστικής με την θλιπτική αντοχή. Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στη δοκιμή σε κάμψη πρέπει να γίνει η υπόθεση ότι το σκυροδέμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση υπόθεση που δεν ισχύει και γι' αυτό η υπολογιζόμενη αντοχή είναι "θεωρητική".

Η αντοχή του σκυροδέματος δίνεται από τον τύπο:

$$f_{t,sp} = \frac{2P}{\pi l D}$$

όπου:

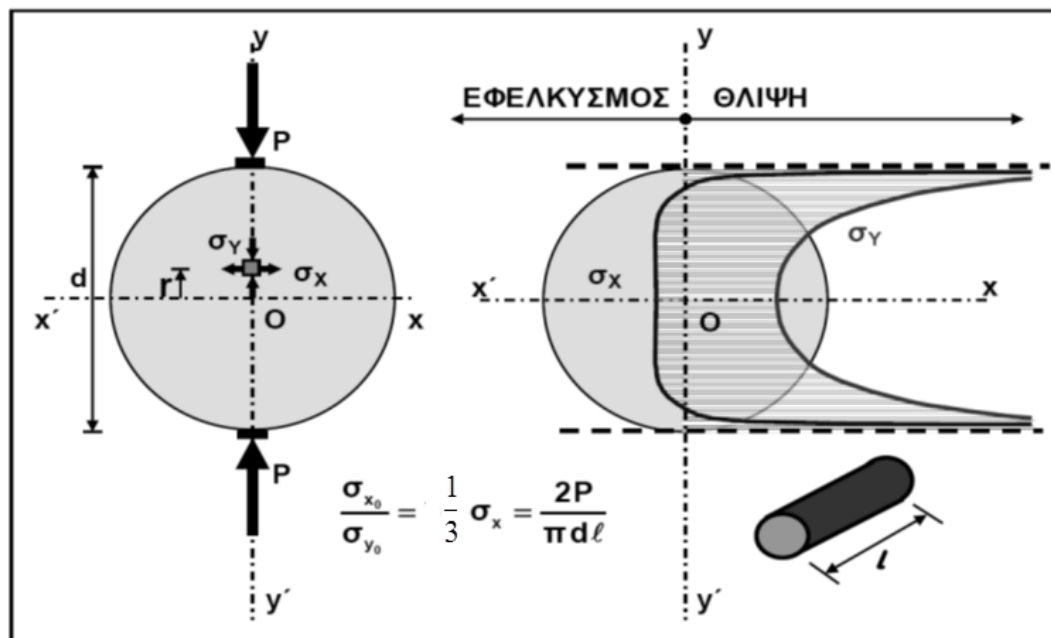
$f_{t,sp}$: η αντοχή σε διάρρηξη

P: η επιβαλλόμενη δύναμη

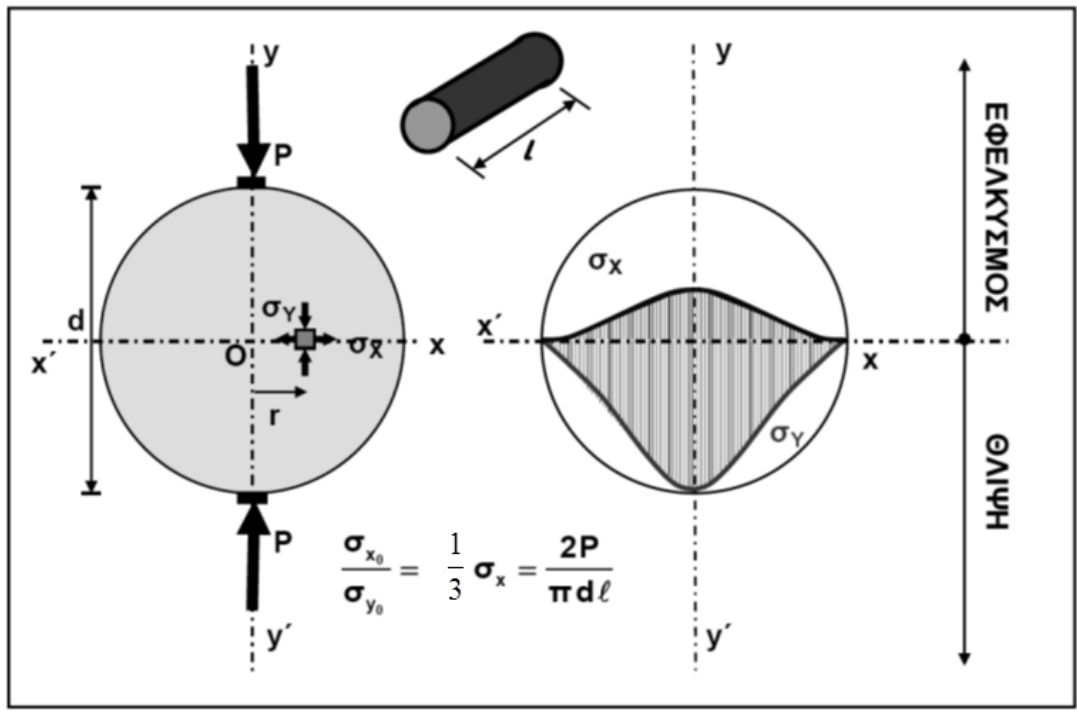
l: το μήκος του κυλίνδρου

D: η διάμετρος του κυλίνδρου

Στο Σχ.1.23 παρουσιάζεται η κατανομή των τάσεων κατά τη δοκιμή σε διάρρηξη με τις παραπάνω προϋποθέσεις.



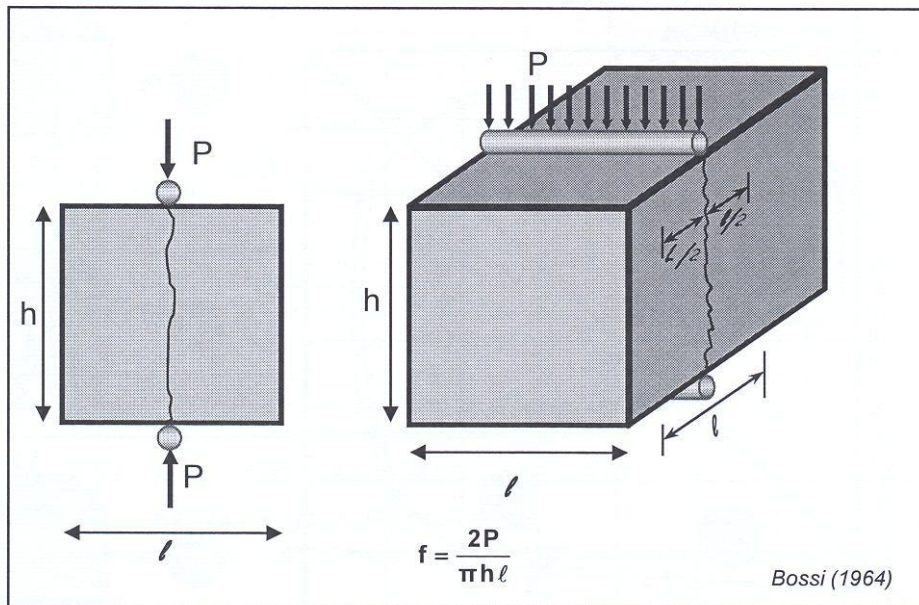
Σχ.1.23 Κατανομή τάσεων στον άξονα y-y' κατά τη δοκιμή σε διάρρηξη.^[1]



Σχ.1.24 Κατανομή τάσεων στον άξονα x-x' κατά τη δοκιμή σε διάρρηξη.^[1]

Παρατηρούμε ότι κοντά στα σημεία επιβολής της δύναμης αναπτύσσονται οριζόντιες θλιπτικές τάσεις. Ωστόσο επειδή σε αυτές τις περιοχές έχουμε επίσης κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις της ίδιας τάξης μεγέθους, δεν συμβαίνει αστοχία λόγω θλίψης. Η αστοχία λαμβάνει χώρα στο μεγαλύτερο τμήμα της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου όπου αναπτύσσεται εφελκυστική τάση σ_x με ομοιόμορφη τιμή σε μεγάλο μήκος της διαμέτρου. Πρέπει όμως να τονιστεί ότι στην περιοχή αυτή δεν αναπτύσσεται μόνο η εφελκυστική τάση σ_x αλλά και θλιπτική τάση σ_y και επομένως η θραύση/αστοχία του υλικού δεν προκαλείται από καθαρό εφελκυσμό αλλά από διαξονική εντατική κατάσταση "εφελκυσμός – θλίψη" με τη θλίψη να είναι $\geq 3\sigma_x$

Δοκιμή διάρρηξης είναι δυνατό να γίνει και σε κυβικά ή πρισματικά δοκίμια με την επιβολή του φορτίου στα μέσα δύο απέναντι πλευρών, όπως φαίνεται στο Σχ.1,25.



Σχ.1.25 Δοκιμή διάρρηξης σε κυβικό δοκίμιο.

Έχει παρατηρηθεί ότι το φορτίο παραλαμβάνεται από το κυκλικό τμήμα που είναι εγγεγραμμένο στον κύβο και τα αποτελέσματα είναι παρόμοια με αυτά της διάρρηξης σε κυλινδρικά δοκίμια.^[2]

Η δοκιμή σε διάρρηξη δίνει πιο μικρή απόκλιση στα αποτελέσματα σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές για τη εύρεση της εφελκυστικής αντοχής. Η αντοχή σε διάρρηξη είναι περίπου 5-12% μεγαλύτερη από την αντοχή σε εφελκυσμό.^[2]

Υπάρχουν ενδείξεις ότι η δοκιμή της διάρρηξης δίνει μικρότερες από τις πραγματικές τιμές για την εφελκυστική αντοχή ελαφροσκυροδεμάτων, ενώ υπερεκτιμά την εφελκυστική αντοχή ακόμη και έως 70% σε σκυροδέματα με μέγιστο κόκκο 38mm.[36]

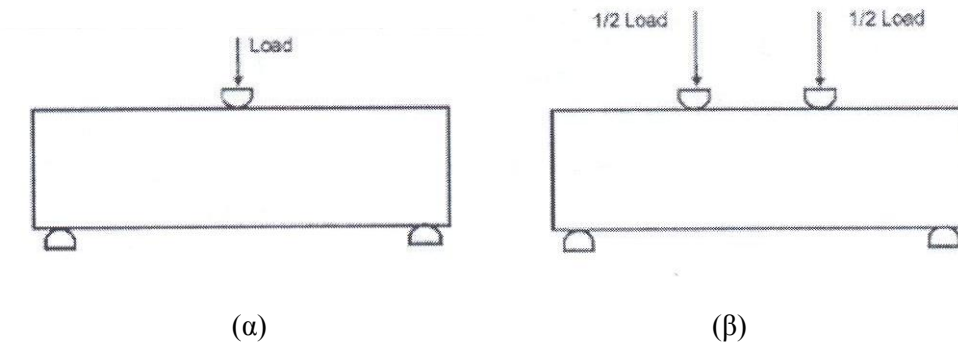
Το παραπάνω σημαίνει ότι σε περίπτωση που χρησιμοποιηθούν μίγματα με ίδια αντοχή σε διάρρηξη αλλά διαφορετικό μέγιστο κόκκο, οι αντοχές σε μονοαξονικό εφελκυσμό να είναι διαφορετικές.

Έχει παρατηρηθεί ότι εάν χρησιμοποιήσουμε δοκίμια στα οποία έχει γίνει τομή στο επίπεδο αστοχίας, η δοκιμή δίνει αντοχή ίση με περίπου το 50% της αρχικής αντοχής, γεγονός που υπονοεί ότι εν τέλει η δοκιμή δίνει διατμητική αντοχή και όχι μονοαξονική εφελκυστική αντοχή.^[26]

1.2.2.3 Δοκιμή σε κάμψη

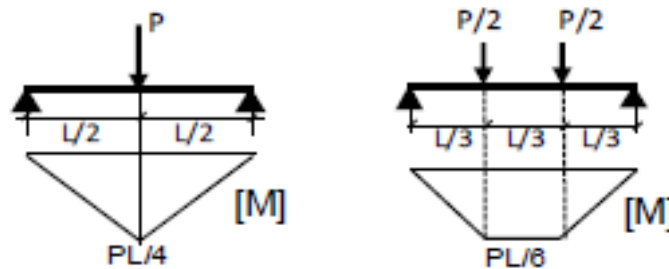
Η αντοχή του σκυροδέματος σε κάμψη είναι ιδιαίτερης σημασίας σε έργα όπως η οδοποιία ή οι αεροδιάδρομοι καθώς αυτός είναι ο τρόπος που καταπονείται το δάπεδο σε αυτές τις κατασκευές. Παρόλο που η εφελκυστική αντοχή είναι πιο <<θμελιώδης>> σε σχέση με την καμπτική η δεύτερη είναι ευκολότερο να μετρηθεί και αντιπροσωπεύει καλύτερα τις πραγματικές συνθήκες καταπόνησης.

Η δοκιμή σε κάμψη μπορεί να γίνει είτε με την επιβολή του φορτίου σε ένα σημείο στο μέσον του δοκιμίου είτε σε δύο σημεία που ισαπέχουν «στα τρίτα του ανοίγματος» όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχ.1.26 Δοκιμή κάμψης με φόρτιση στο μέσον (α) και στα τρίτα του ανοίγματος (β).

Ο όγκος του δοκιμίου που βρίσκεται υπό τη μέγιστη τιμή της ροπής κάμψεως είναι διαφορετικός στις δύο περιπτώσεις, όπως και η κατανομή των τεμνουσών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το ότι η δοκιμή με τα δύο σημεία επιβολής του φορτίου να δίνει χαμηλότερες τιμές αντοχής και καλύτερη σύγκλιση των αποτελεσμάτων.



Σχ.1.27 Ροπές που αναπτύσσονται κατά μήκος της δοκού στις δύο περιπτώσεις.

Η αντοχή σε κάμψη για τις δύο περιπτώσεις δίνεται από τους τύπους:

$$f_{t,\text{fl}} = \frac{3PL}{bd^2}$$

και

$$f_{t,\text{fl}} = \frac{PL}{bd^2}$$

αντίστοιχα

όπου:

$f_{t,n}$: η αντοχή σε κάμψη

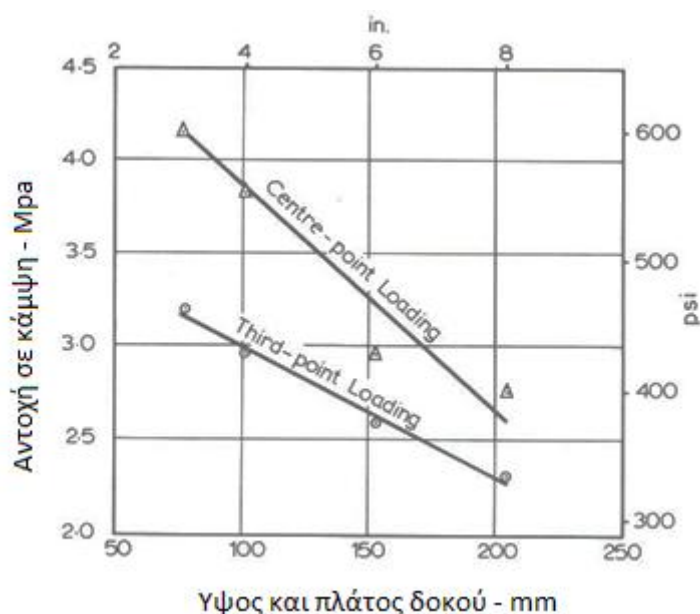
F: το επιβαλλόμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων

d: το ύψος του δοκιμίου

b: το πλάτος του δοκιμίου

Έχει παρατηρηθεί πως και άλλοι παράγοντες όπως το μέγεθος του δοκιμίου και συγκεκριμένα ο λόγος ύψος / μήκος επηρεάζουν τα αποτελέσματα και στις δύο περιπτώσεις.



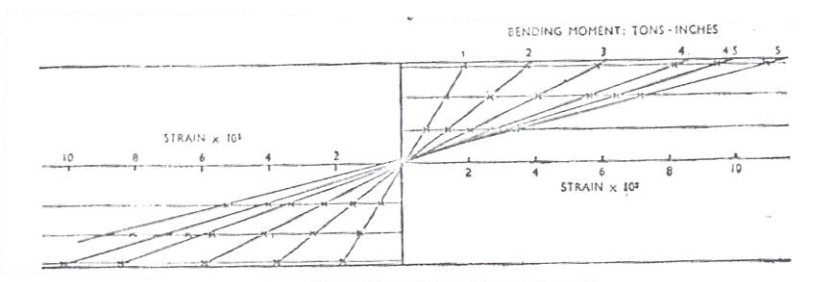
Σχ.1.28 Σχέση διαστάσεων του δοκιμίου με την αντοχή σε κάμψη για τις δύο περιπτώσεις.^[22]

Σύμφωνα με δοκιμές που έκανε ο P.J.Wright εξετάζοντας την επιρροή του ύψους και του λόγου μήκος / ύψος του δοκιμίου κατέληξε στο ότι η αύξηση του ύψους του δοκιμίου από τις 3in. σε 8in. και για σταθερό λόγο μήκος / ύψος ίσο με 3 είχε ως αποτέλεσμα την μείωση της αντοχής κατά 28% στην περίπτωση των δύο σημειακών φορτίσεων και 33% στην περίπτωση της φόρτισης στο μέσον. Επίσης η αύξηση του ύψους του δοκιμίου οδήγησε στην βελτίωση της επαναληψιμότητας των αποτελεσμάτων. Η αύξηση του λόγου μήκος / ύψος προκαλεί μικρή μείωση της αντοχής σε κάμψη και μικρή μείωση του συντελεστή μεταβλητότητας. Ωστόσο και στις δύο περιπτώσεις χρειάζεται η διενέργεια της δοκιμής σε περισσότερα δοκίμια για να θεωρηθούν τα αποτελέσματα έγκυρα.

Με βάση τα αποτελέσματα του P.J.Wright η δοκιμή με ένα σημείο επιβολής της φόρτισής έδωσε 20-25% μεγαλύτερη αντοχή σε σχέση με τη δοκιμή με δύο σημεία. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί επαρκώς με τη θεωρία του <<αδύναμου κρίκου>> (weakest link), καθώς όπως προαναφέραμε στην πρώτη περίπτωση μεγαλύτερο τμήμα του δοκιμίου βρίσκεται σε μέγιστη καταπόνηση και άρα είναι πιθανότερο να βρεθεί περιοχή με μικρότερη αντοχή ώστε να ξεκινήσει η θραύση. Επίσης ο συντελεστής μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων ήταν μικρότερος στην πρώτη περίπτωση, πράγμα που εξηγείται με την ίδια θεωρία.^[22]

Η δοκιμή κάμψης δίνει γενικά μεγαλύτερες φαινόμενες αντοχές σε σχέση με τις άλλες δοκιμές. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω του ότι ο συνολικός όγκος του δοκιμίου που υπόκειται στη μέγιστη ένταση είναι μικρότερος και άρα η πιθανότητα να βρίσκεται μια ατέλεια στην κρίσιμη περιοχή είναι μικρότερη.^[37] Επίσης η ένταση που υπολογίζεται μέσω της ελαστικής θεωρήσης είναι ανεπαρκής καθώς υπάρχει πλαστική παραμόρφωση καθώς πλησιάζουμε στην θραύση με αποτέλεσμα να υπερεκτιμάται η αντοχή όπως θα δούμε στη συνέχεια.^[38]

Έχει παρατηρηθεί ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης για μικρά φορτία ο ρυθμός της παραμόρφωσης είναι ίδιος για την άνω και την κάτω ίνα του δοκιμίου και συγκεκριμένα μεταβάλλεται γραμμικά καθ' ύψος όπως φαίνεται παρακάτω.



Σχ.1.29 Κατανομή των παραμορφώσεων στη διατομή της δοκού.^[23]

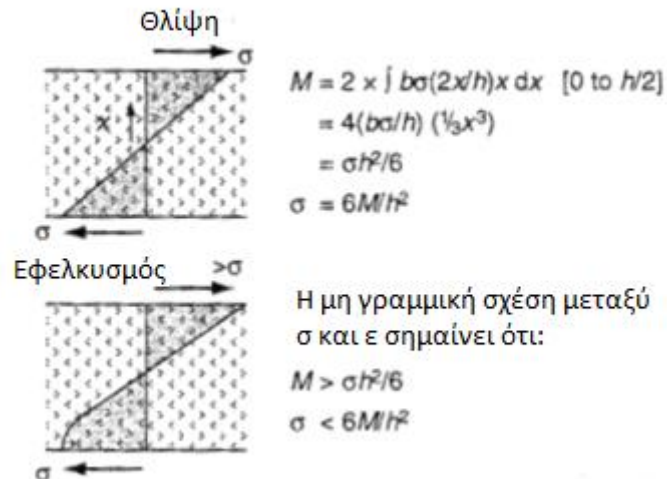
Με την αύξηση της ροπής η παραμόρφωση στην κάτω επιφάνεια αυξάνεται γρηγορότερα απ' ότι στην πάνω επιφάνεια, γεγονός που υποδεικνύει ότι ο ουδέτερος άξονας μετακινείται προς τα επάνω.

Κάνοντας την υπόθεση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται γραμμικά-ελαστικά μέχρι τη θραύση, το δοκίμιο κατά τη δοκιμή σε κάμψη θα αστοχούσε την στιγμή που αστοχεί η ακραία κάτω ίνα. Έτσι η αντοχή της δοκού σε κάμψη θα ταυτιζόταν με την αντοχή σε εφελκυσμό και θα ίσχυε η παρακάτω σχέση:

$$f_{cb} = M/W = 6M/bh^2$$

Στην πραγματικότητα όμως η ακραία κάτω ίνα εισέρχεται στην πλαστική περιοχή πριν επέλθει η αστοχία του δοκιμίου και το φορτίο αναλαμβάνεται από τα ανώτερα επίπεδα (περίπου στο 40% της αντοχής).^[1] Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η φαινόμενη αντοχή να είναι μεγαλύτερη από την πραγματική, λόγω της μη γραμμικής κατανομής των τάσεων στην εφελκυσμένη περιοχή του δοκιμίου. Το φαινόμενο αυτό είναι πιο έντονο σε σκυροδέματα με μικρότερη αντοχή, στα οποία η πλαστική συμπεριφορά και η μικρορηγμάτωση επέρχεται πιο γρήγορα, απ' ότι σε σκυροδέματα με υψηλή αντοχή, τα οποία συμπεριφέρονται σχεδόν ελαστικά μέχρι τη θραύση τους. Εάν το φορτίο κατά τη δοκιμή αυξανόταν με πολύ αργό ρυθμό το δοκίμιο θα αστοχούσε με μικρότερο φορτίο.^[4]

Στο Σχ.1.30 φαίνεται η κατανομή των τάσεων για τις δύο περιπτώσεις.



Σχ.1.30 Κατανομή τάσεων για τη γραμμική και τη μη γραμμική θεώρηση.

Η διαφορά μεταξύ των δύο αντοχών είναι περίπου 10-15%.^[24]

Παρατηρούμε επίσης ότι η αντοχή σε κάμψη εξαρτάται και από το ύψος του δοκιμίου.

Σύμφωνα με τον CEB η σχέση που συνδέει την αντοχή σε κάμψη με την αντοχή σε εφελκυσμό είναι:

$$f_{t,axl} = f_{t,fl} \frac{1.5(h_b / 0.1)^{0.7}}{1 + 1.5(h_b / 0.1)^{0.7}}$$

όπου:

$f_{t,axl}$: η αντοχή σε εφελκυσμό

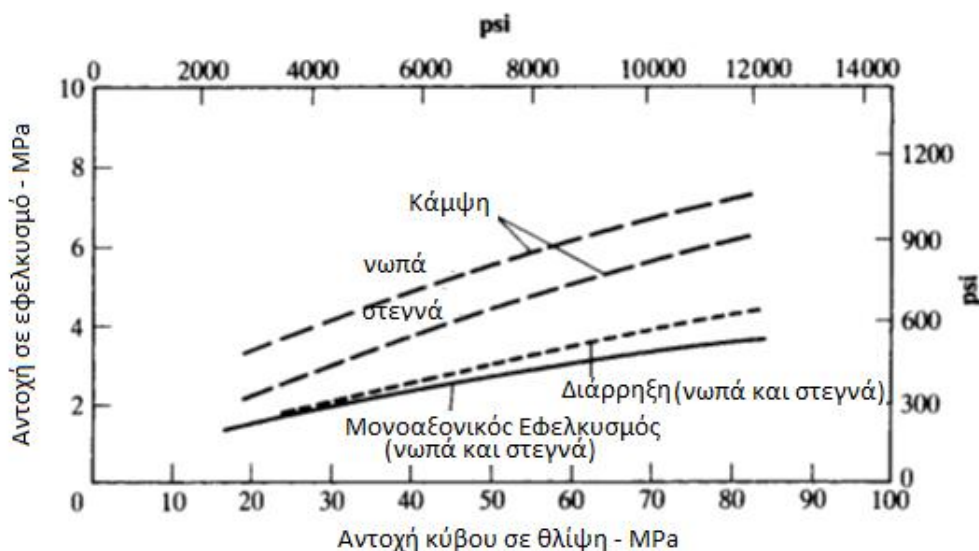
$f_{t,fl}$: η αντοχή σε κάμψη κατά την αστοχία

h_b : το πάχος του δοκιμίου

2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΟΙ ΑΝΤΟΧΩΝ

2.1 Γενικά

Έχει παρατηρηθεί ότι συνήθως η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος είναι περίπου 8 φορές μικρότερη από την αντοχή σε θλίψη. Ειδικότερα έχει παρατηρηθεί ότι ο λόγος της εφελκυστικής προς τη θλιπτική μειώνεται καθώς αυξάνει η θλιπτική αντοχή. Η μέθοδος μέτρησης της εφελκυστικής αντοχής ενδέχεται επίσης να επηρεάσει το αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα η δοκιμή κάμψης δίνει μεγαλύτερες αντοχές σε εφελκυσμό από τη δοκιμή της διάρρηξης, ενώ η δοκιμή άμεσου εφελκυσμού δίνει τη μικρότερη εφελκυστική αντοχή για την ίδια θλιπτική αντοχή, όπως φαίνεται παρακάτω. Αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί εν μέρει στην επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου που χρησιμοποιείται σε κάθε δοκιμή με βάση τη θεωρία του αδύναμου κρίκου. Επίσης στη δοκιμή διάρρηξης αλλά και στη δοκιμή κάμψης η ρωγή διαδίδεται σε προκαθορισμένη διαδρομή γεγονός που παρατείνει την θραύση του δοκιμίου.



Σχ.2.1 Σχέση αντοχής σε θλίψη και σε εφελκυσμό για τις διαφορές δοκιμές.^[3]


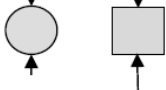
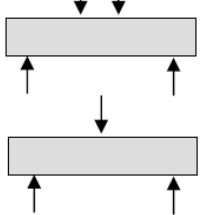
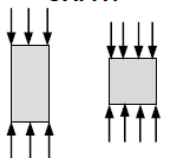
Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρούμε και την επιρροή της υγρασίας των δοκιμίων στις διάφορες δοκιμές. Τα δοκίμια αυτά είτε αφήθηκαν να στεγνώσουν πριν την θραύση είτε όχι. Παρατηρούμε ότι στον μονοαξονικό εφελκυσμό και στην διάρρηξη δεν υπάρχει διαφορά στις τιμές για υγρά η στεγνά δοκίμια. Στη δοκιμή σε κάμψη όμως η αντοχή των υγρών δοκιμίων είναι περίπου ένα MPa μεγαλύτερη. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στην συστολή ξήρανσης και στις ρωγμές που αυτή δημιουργεί. Στην θλίψη παρατηρείται το ακριβώς αντίθετο, δηλαδή η αντοχή των υγρών δοκιμίων είναι μικρότερη.

Άλλος παράγοντας που ενδέχεται να επηρεάσει την σχέση των δύο αντοχών είναι τα αδρανή.

Η αντοχή σε κάμψη είναι μεγαλύτερη όταν χρησιμοποιηθούν αδρανή με ακανόνιστες επιφάνειες (π.χ. θραυστά) απ' ότι όταν χρησιμοποιηθούν πιο στρογγυλά αδρανή (π.χ. ποταμίσια), επειδή η συνάφεια του υλικού είναι καλύτερη. Ωστόσο αυτού του τύπου η

σύνδεση δεν επηρεάζει την αντοχή σε διάρρηξη ή σε εφελκυσμό αφού εκεί αναπτύσσονται ορθές τάσεις. Το ίδιο ισχύει και για τη θλίψη.

Στο Σχ.2.2 παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η σχέση της αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό με την αντοχή σε άλλες δοκιμές.

ΔΟΚΙΜΗ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ	$\frac{f_t}{f_c}$	ΣΧΟΛΙΑ
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ 	$f_t = \frac{P}{b*d}$	1	Η μόνη άμεση πραγματική αντοχή που δεν στηρίζεται στη θεώρηση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση του. Η δοκιμή όμως είναι πολύ δύσκολη και δεν υπάρχει ακόμη πρότυπο
ΔΙΑΡΡΗΞΗ (Αντιδιαμετρική Θλίψη) 	$f_s = \frac{2P}{2\pi dl}$	0,95 έως 2,4	Έμμεση αντοχή διαξονικής φύσεως που στηρίζεται στη θεώρηση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση. Πρακτικά πολύ εύκολη και δεν απαιτεί πρόσθετο ακριβό εξοπλισμό. Θεωρητική αντοχή –όχι πραγματική.
ΚΑΜΨΗ 	$f_b = \frac{Pl}{bd^2}$ $f_b = \frac{3Pl}{2bd^2}$	1,3 έως 2,7	Παραδοσιακή έμμεση δοκιμή που προσομοιάζει την έντατική κατάσταση καμπτόμενων φορέων. Στηρίζεται όμως στη θεώρηση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση. Θεωρητική αντοχή –όχι πραγματική σε κάμψη
ΘΛΙΨΗ 	$f_c = \frac{P}{b*d}$	10 έως 13	Παραδοσιακή δοκιμή που προσομοιάζει την εντατική κατάσταση θλιβόμενων φορέων. Η αστοχία όμως του σκυροδέματος γίνεται σε έμμεσο εγκάρσιο εφελκυσμό και όχι σε θλίψη. Θεωρητική αντοχή- όχι πραγματική αντοχή σε θλίψη

Σχ.2.2 Σύγκριση δοκιμών σε εφελκυσμό, σε διάρρηξη, κάμψη και θλίψη (Hannant 1999 με συμπληρώσεις.^[1]

Η γενική σχέση που συνδέει την εφελκυστική (f_t) με την θλιπτική (f_c) αντοχή, έχει γίνει κοινώς αποδεκτό, για τους λόγους που αναπτύξαμε παραπάνω, ότι είναι της μορφής:

$$f_t = kf_c^n$$

Στο Σχ.2.3 απεικονίζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των δοκιμών διάφορων μελετητών για τη σχέση εφελκυστικής με τη θλιπτική αντοχή.^[41]

	Ερευνητής	Προτεινόμενη σχέση μεταξύ f_t και f_c	Έτος Δημοσίευσης	Σχόλια
1	Akazawa	$f_t = 0.209(f_c)^{0.73}$	1953	-
2	Carneiro and Barcellor	$f_t = 0.185(f_c)^{0.735}$	1953	-
3	Vanayaka	$f_t = 0.88(f_c)^{0.716}$	1959	-
4	Sen and Desayi	$f_t = 0.628(f_c)^{0.73}$	1962	Μετασηματισμένη με τη σχέση $f_{c,cylinder}=0.848 f_{c,cube}$
5	Carino and Lew	$f_t = 0.272(f_c)^{0.71}$	1982	-
6	Raphael	$f_t = 0.313(f_c)^{0.667}$	1984	-
7	ACI Building code 318-89	$f_t = 0.556(f_c)^{0.5}$	1989	Μετασηματισμένη με τη σχέση $f_{c,cylinder}=0.81 f_{c,cube}$
8	N.Gardner	$f_t = 0.313(f_c)^{0.667}$	1990	-
9	Oluokun	$f_t = 0.206(f_c)^{0.79}$	1991	Μετασηματισμένη με τη σχέση $f_{c,cylinder}=0.8 f_{c,cube}$

Σχ.2.3 Σχέση εφελκυσμού-θλίψης σύμφωνα με διάφορους μελετητές (f_c αντοχή κυλίνδρου σε θλίψη).

2.2 Διάρρηξη – Εφελκυσμός

Σύμφωνα με τον CEB η αντοχή σε διάρρηξη συνδέεται με την αντοχή σε εφελκυσμό με την παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$f_{t,sp}=0.9f_{t,axl} \quad [10][25]$$

2.3 Διάρρηξη – Θλίψη

Η σχέση αντοχής σε διάρρηξη και αντοχής σε θλίψη έχει αποδειχθεί ότι εξαρτάται από τον μέγιστο κόκκο, τον τύπο των αδρανών καθώς και από την συγκέντρωσή τους. [35]

Με βάση το ACI η αντοχή του σκυροδέματος σε διάρρηξη συνδέεται με την αντοχή κυλινδρικού δοκιμίου σε θλίψη με τη σχέση:

$$f_{c,t} = 1.75(f_c')^{0.5} \quad (\text{ACI Building Code 318-89 σε MPa})$$

Δύο από τους πρωτοπόρους της δοκιμής της διάρρηξης οι Akazawa και Barcelos έχουν προτείνει τις ακόλουθες σχέσεις αντίστοιχα:

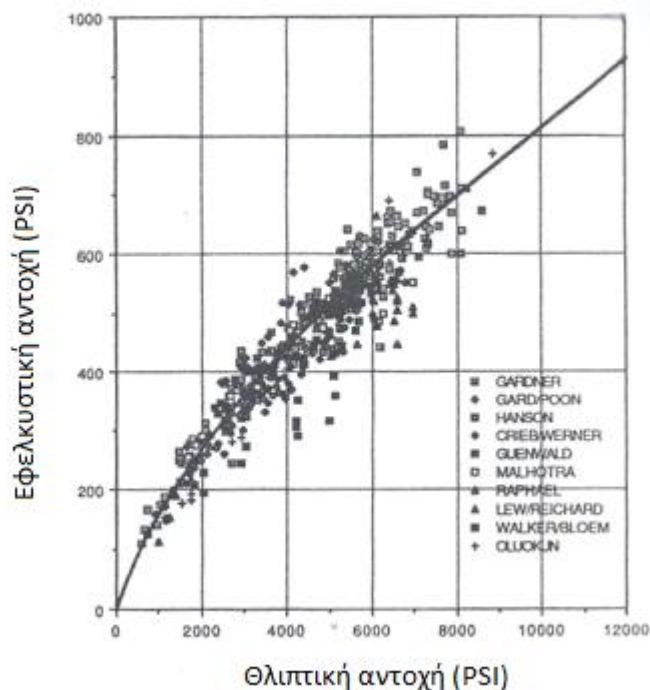
$$f_{c,t} = 0.209(f_c')^{0.73} \quad [27]$$

$$f_{c,t} = 0.185(f_c')^{0.735} \quad [28]$$

Σύμφωνα με το CEB η σχέση είναι $f_{c,t} = 0.273(f_c')^{0.667}$ [29]

Σύμφωνα με τον Oluokun, ύστερα από μελέτη των αποτελεσμάτων άλλων ερευνητών για διάφορες συνθήκες, αλλά και δικού του πειράματος η αντοχή σε διάρρηξη συνδέεται με τη δοκιμή σε θλίψη κυλινδρικού δοκιμίου με βάση τον τύπο:

$$f_{t,sp}=0.214f_{c,cyl}^{0.69} \text{ [30]}$$



Σχ.2.4 Σχέση θλιπτικής– εφελκυστικής αντοχής από τα αποτελέσματα πολλών μελετητών. Οι τιμές των θλιπτικών αντοχών προήλθαν από θλίψη κυλίνδρων και των εφελκυστικών από δοκιμή σε διάρρηξη. 1PSI=6.9kPa.

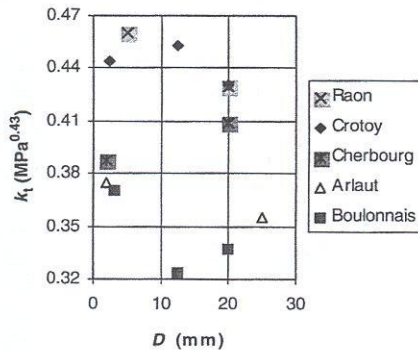
Επίσης σύμφωνα με τον Oluokun, ύστερα από στατιστική ανάλυση, η ηλικία του σκυροδέματος δεν παίζει ρόλο στην σχέση των δύο αντοχών.^[31]

Τα αποτελέσματα της έρευνας του de Larrard έδειξαν ότι η σχέση αντοχής σε διάρρηξη και θλίψη είναι ανεξάρτητη από παράγοντες όπως η παρουσία ή μη ιπτάμενης τέφρας ή πυριτικής παιπάλης αλλά και η παρουσία ή μη εγκλωβισμένου στον τσιμεντοπολτό αέρα (σε ποσοστό από 1 έως 7%) και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$f_t = 0.413f_c^{0.57} \text{ [32]}$$

Σύμφωνα με τον ίδιο ο εκθέτης 0.69 οδηγεί σε υπερεκτίμηση της εφελκυστικής αντοχής και προτείνεται η χρήση της δύναμης 0.57 που βρίσκεται ανάμεσα στη σχέση που προτείνει το ACI (0.5) και ο Oluokun (0.69).

Με βάση την έρευνα των de Larrard και Belloc, οι οποίοι εξέτασαν την επιρροή πέντε διαφορετικών τύπων αδρανών, ο συντελεστής k εξαρτάται κυρίως από τον τύπο των αδρανών και όχι από το μέγεθος ή την κατανομή τους.^[33]



Quarry	Type	k_i
Crotoy	Marine flint	0.442
Boulonnais	Hard limestone	0.344
Arlaut	Semi-hard limestone	0.365
Raon l'Etape	Basalt	0.445
Cherbourg	Quartzite	0.398

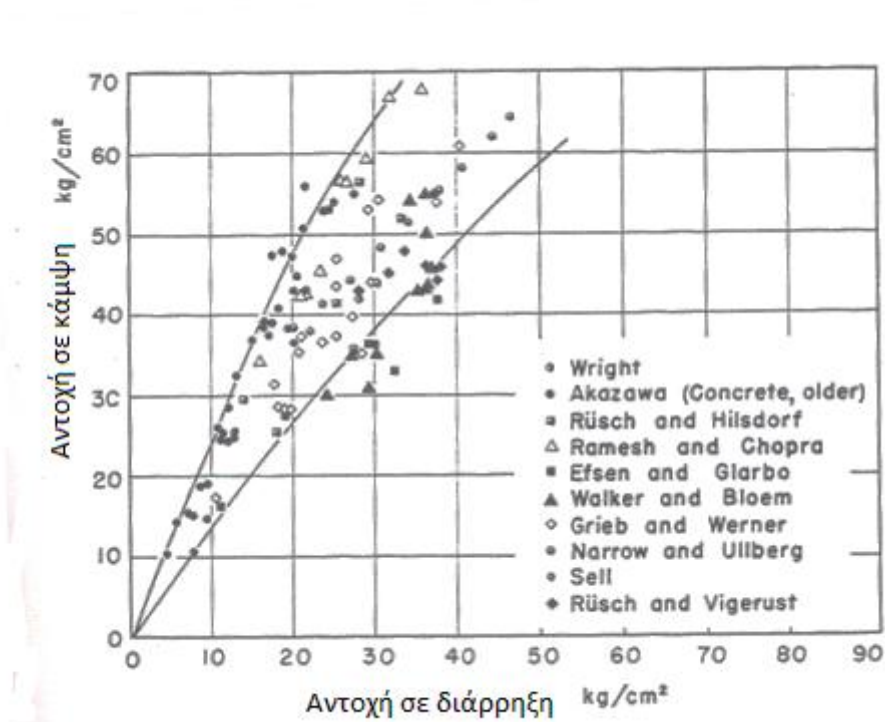
Σχ.2.5 Τιμές του Συντελεστή k για διάφορους τύπους αδρανών.

Όπως φαίνεται παραπάνω τα πυριτικά αδρανή δίνουν υψηλότερες τιμές για τον συντελεστή k από τα ασβεστολιθικά.

Θεωρητικά για την ίδια θλιπτική αντοχή η δοκιμή της διάρρηξης θα έπρεπε να δίνει πιο συντηρητικά αποτελέσματα για την εφελκυστική αντοχή απ' ότι ο μονοαξονικός εφελκυσμός. Στην πράξη όμως αυτό δεν συμβαίνει κυρίως λόγω του σύνθετου πεδίου τάσεων στα σημεία επαφής του δοκιμίου, ιδίως στις περιπτώσεις που έχουμε μεγαλύτερου μεγέθους αδρανή όπου η φαινόμενη αντοχή αυξάνεται.^[14]

2.4 Διάρρηξη – Κάμψη

Παρακάτω απεικονίζονται τα αποτελέσματα διαφόρων μελετητών για τη σχέση των δύο αντοχών.



Σχ.2.6 Σχέση αντοχής σε διάρρηξη και αντοχής σε εφελκυσμό.^[39]

Όπως παρατηρούμε ο λόγος αντοχής διάρρηξης ως προς την κάμψη αυξάνεται όσο αυξάνεται η αντοχή.

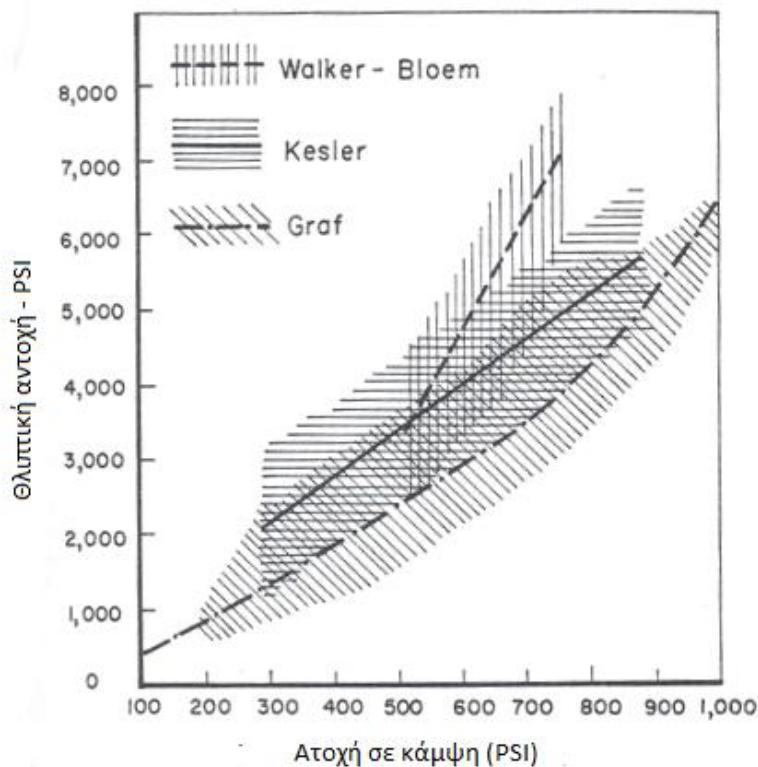
2.5 Κάμψη - Εφελκυσμός

Όπως έχουμε αναφέρει στο προηγούμενο κεφάλαιο η αντοχή σε κάμψη και η αντοχή σε εφελκυσμό συνδέονται με την παρακάτω σχέση σύμφωνα με το CEB

$$f_{t,axl} = f_{t,fl} \frac{1.5(h_b / 0.1)^{0.7}}{1 + 1.5(h_b / 0.1)^{0.7}}$$

2.6 Κάμψη – Θλίψη

Η συσχέτιση αντοχών κάμψης και θλίψης έχει παρατηρηθεί ότι έχει μεγαλύτερη διασπορά σε σχέση με τις άλλες συσχετίσεις αντοχών, όπως φαίνεται και στο Σχ2.7.



Σχ.2.7 Σχέση μεταξύ αντοχής κάμψης και θλίψης.^[39]

Με βάση τα παραπάνω φαίνεται ότι η αντοχή σε κάμψη είναι περίπου το 10% της αντοχής σε θλίψη, ενώ καθώς μειώνεται η θλιπτική αντοχή μπορεί να φθάσει και το 30%.

Πειράματα των K.E. Hassan, J.W.E. Chadler και H.M. Harding έδειξαν ότι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

Αντοχή ισοδύναμου κύβου = 0,97 x αντοχή κύβου

Αντοχή κυλίνδρου = 0,89 x αντοχή κύβου^[34]

Σύμφωνα με τον Waltz η καμπτική αντοχή ελαφροσκυροδέματος είναι ίση με 70-90% της καμπτικής αντοχής του συμβατικού σκυροδέματος.^[40] Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από τον διαφορετικό τρόπο θραύσης του δοκιμίου στις δύο περιπτώσεις. Στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος η αστοχία επέρχεται λόγω θραύσης των αδρανών, ενώ στην περίπτωση του συμβατικού η αστοχία παρατηρείται στην διεπιφάνεια αδρανούς-τσιμεντοπολτού.

ΜΕΡΟΣ Β

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗΣ-ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ

Σκοπός της πειραματικής διαδικασίας είναι ο προσδιορισμός μίας όσο το δυνατόν πιο αξιόπιστης σχέσης μεταξύ της αντοχής σε κάμψη και της αντοχής σε θλίψη. Για τον σκοπό αυτό παρακλήθηκαν τρεις διαφορετικές και ανεξάρτητες μεταξύ τους εταιρείες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος να μας βοηθήσουν στην παρασκευή πρισματικών (δοκοί) και κυβικών δοκιμίων από σκυροδέματα της τρέχουσας παραγωγής τους.

Συγκεκριμένα η έρευνα συμπεριελάμβανε σκυροδέματα με ονομαστική αντοχή από C 12/15 έως και C 45/50. Η σύνθεση του σκυροδέματος γινόταν σε 3 ξεχωριστές μονάδες παραγωγής σκυροδέματος. Η λήψη του δείγματος γινόταν από βαρέλες που προορίζονταν για τη μεταφορά του προϊόντος σε διάφορα έργα. Πέρα από το συμβατικό σκυροδέμα λήφθηκαν και δείγματα από γαρμπιλομετόν.

Σε κάθε δειγματοληψία λήφθηκαν, από το ίδιο μίγμα, τρία ορθογωνικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x50 (cm) και τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων 15x15 (cm). Συνολικά μελετήθηκαν 74 ομάδες δοκιμίων (222 ορθογωνικά και 222 κυβικά).

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν σε υγρό θάλαμο με θερμοκρασία 20 ± 5 βαθμών Κελσίου και ποσοστό υγρασίας $\geq 95\%$ μέχρι την θραύση τους.

Για την Παρασκευή των κυβικών δοκιμίων ακολουθήθηκε η διαδικασία που προτείνεται από το EN 12390. Συγκεκριμένα το σκυροδέμα εκχυνόταν στη μήτρα σε δύο «στρώσεις» χωρίς κάποια από αυτές να υπερβαίνει τα 100mm. Η συμπίκνωση για την εταιρεία Α γινόταν με 25 ραβδισμούς σε κάθε στρώση με ράβδο διαμέτρου 16mm. Οι εταιρείες Β και Γ χρησιμοποιούσαν δονητική τράπεζα. Μετά την συμπίκνωση επιβάλλονταν χτυπήματα με κατάλληλο σφυρί με λάστιχα στα πλευρά του δοκιμίου για την αποβολή τυχόν εγκλωβισμένου αέρα. Ύστερα γινόταν επιπέδωση της επιφάνειας του δοκιμίου με μυστρί. Τα δοκίμια απομακρύνονταν από τις μήτρες μετά από τουλάχιστον 24 ώρες και φυλάσσονταν σε κατάλληλο υγρό θάλαμο της μονάδας παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος.

Για την παρασκευή των πρισματικών δοκιμίων (δοκών) για την εταιρεία Α χρησιμοποιήθηκε η ίδια ράβδος με την οποία ραβδίζονται τα κυβικά δοκίμια. Η συμπίκνωση γινόταν με 45 ραβδισμούς ομοιόμορφα κατανεμημένους σε όλη την επιφάνεια. Οι εταιρείες Β και Γ χρησιμοποίησαν δονητική τράπεζα και σε αυτή την περίπτωση. Μετά την συμπίκνωση επιβάλλονταν χτυπήματα με κατάλληλο σφυρί με λάστιχα στα πλευρά του δοκιμίου για την αποβολή τυχόν εγκλωβισμένου αέρα. Ύστερα γινόταν επιπέδωση της επιφάνειας του δοκιμίου με μυστρί όπως και στα κυβικά δοκίμια. Τα δοκίμια απομακρύνονταν από τις μήτρες ύστερα από το λιγότερο 24 ώρες και φυλάσσονταν σε κατάλληλο υγρό θάλαμο.

Όλα τα δοκίμια προορίζονταν για θραύση στις 28 ημέρες, ωστόσο όταν αυτό δεν κατέστη δυνατόν η θραύση έγινε στις 29, 30,27,31 ή 32 ημέρες με αυτή τη σειρά προτεραιότητας. Όπως έχουμε προαναφέρει έχει παρατηρηθεί ότι η ηλικία του δοκιμίου δεν επηρεάζει τη σχέση των δύο υπό εξέταση αντοχών, οπότε εκτιμάται ότι δεν θίγεται η αξιοπιστία της διαδικασίας.

Όλες οι θραύσεις έγιναν σε πρέσα τύπου ELE ADR – Auto 3000BS.

Τα δοκίμια ζυγίζονταν πριν την θραύση τους ώστε να έχουμε εκτίμηση του φαινομένου βάρους.

Στα επόμενα κεφάλαια ακολουθούν οι δοκιμές που έγιναν.

3.1 Δοκιμή κάμψης

Επιλέχθηκε η δοκιμή κάμψης με φόρτιση “στα τρίτα του ανοίγματος” καθώς τα αποτελέσματα αναμένεται να έχουν μικρότερη μεταβλητότητα, αλλά και να είναι πιο αντιπροσωπευτικά, για λόγους που έχουμε αναλύσει σε προηγούμενα κεφάλαια.

Η δοκιμή έγινε με βάση το πρότυπο ASTM C78-02 και η μηχανή θραύσης λειτουργούσε σύμφωνα με αυτό. Η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων ήταν 30cm ενώ τα δύο σημεία επιβολής της φόρτισης απέιχαν 5cm από το μέσον του δοκιμίου και 10cm μεταξύ τους.

Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου υπολογίστηκε σύμφωνα με τη σχέση:

$$R = \frac{s \cdot d_1 \cdot d_2^2}{l}$$

όπου:

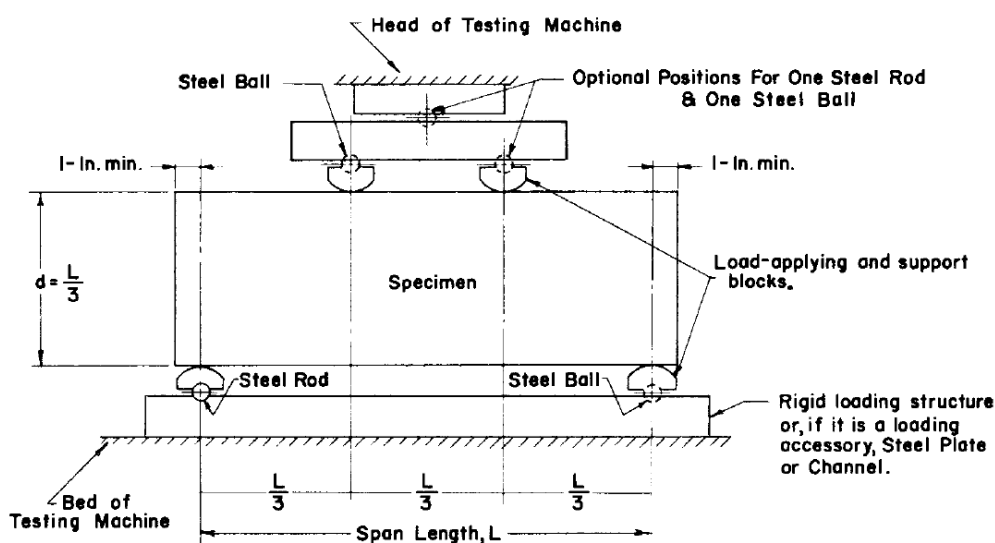
R: ο ρυθμός επιβολής του φορτίου σε Newton/Second

d_1, d_2 : οι διαστάσεις της διατομής του δοκιμίου σε mm

l: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων σε mm

s: ο επιθυμητός ρυθμός έντασης σε MPa/Sec και παίρνει τιμές $0,06 \pm 0,04$

Έτσι ο ρυθμός επιβολής του φορτίου που επιλέξαμε ήταν 170N/S



Σχ.3.1 Απεικόνιση της διάταξης της μηχανής θραύσης και των απαιτήσεων ελευθερίας μετακίνησης ή στροφής των επιμέρους διατάξεων φόρτισης.^[44]

Η αντοχή σε κάμψη δίνεται από τον τύπο:

$$f_{t,fl} = \frac{PL}{bd^2}$$

όπου:

$f_{t,fl}$: η αντοχή σε κάμψη

F: το επιβαλλόμενο φορτίο

L: η απόσταση μεταξύ των δύο στηριγμάτων

d: το ύψος του δοκιμίου

b: το πλάτος του δοκιμίου

Τα αποτελέσματα (σε MPa) έχουν ακρίβεια ενός δεκαδικού ψηφίου.

Το αποδεκτό σημείο θραύσης βρίσκεται μεταξύ των δύο σημείων επιβολής του φορτίου, καθώς εκεί αναμένεται να αναπτυχτεί η μέγιστη ένταση.

Ωστόσο σε περίπτωση που η θραύση γίνει έξω από το μεσαίο τρίτο του ανοίγματος, αλλά όχι περισσότερο μακριά από το 5% αυτού, η αντοχή σε κάμψη υπολογίζεται από τον τύπο:

$$f_{t,fl} = \frac{3Pa}{bd^2}$$

όπου:

a: η μέση απόσταση της ρωγμής από το κοντινότερο σημείο στήριξης στην επιφάνεια με την μέγιστη εφελκυστική τάση.

Εάν η ρωγμή προκύψει μακρύτερα από το 5% του ανοίγματος η μέτρηση παραλείπεται.

Επίσης τα δοκίμια δεν αφέθηκαν να στεγνώσουν πριν την θραύση τους γεγονός που θα είχε σαν αποτέλεσμα να εμφανίζαν μικρότερες αντοχές στην δοκιμή σε κάμψη.

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη δοκιμή.



Εικόνα 1. Η μηχανή δοκιμής σε κάμψη.



Εικόνα 2. Δοκίμιο τοποθετημένο στη μηχανή.



Εικόνα 3. Δοκίμιο τοποθετημένο στη μηχανή.

Λόγω της ψαθυρής θραύσης του δοκιμίου τα δύο εναπομένοντα τμήματα αυτού προσέκρουαν στην βάση της μηχανής με μεγάλη φαινομενικά ορμή. Έτσι κρίθηκε σκόπιμο να τοποθετηθεί ένα προστατευτικό από αφρολέξ στο σημείο της πρόσκρουσης προκειμένου να αποφευχθεί το ενδεχόμενο να δημιουργηθούν ρωγμές στα επιμέρους τμήματα και επομένως αλλοίωση της αντοχής ισοδύναμου κύβου.



Εικόνα 4. Προστατευτικό για την κρούση του δοκιμίου.



Εικόνα 5. Δοκίμιο αμέσως μετά την θραύση



Εικόνα 6. Το χειριστήριο του μηχανήματος για δοκιμή σε κάμψη.



Εικόνα 7. Τα δύο τμήματα αμέσως μετά την θραύση.

Παρατηρήθηκε ότι στις περισσότερες περιπτώσεις μεγάλης αντοχής σκυροδέματος η ρωγμή διαπερνούσε τα μεγαλύτερα αδρανή, ενώ στα μικρότερα διαδιδόταν στην διεπιφάνεια αδρανούς-τσιμεντοπολτού.



Εικόνα 8. Χαρακτηριστική περίπτωση πολύ μεγάλου αδρανούς.

3.2 Δοκιμή θλίψης

Η δοκιμή θλίψης έγινε σύμφωνα με τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN12390-3 και ASTM C39

Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου πρέπει να είναι μεταξύ 0,2 MPa/s και 1,0 MPa/s

Επιλέξαμε ρυθμό μεταβολής 0,8MPa/s

Η αντοχή σε θλίψη δίνεται από τον τύπο:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

όπου:

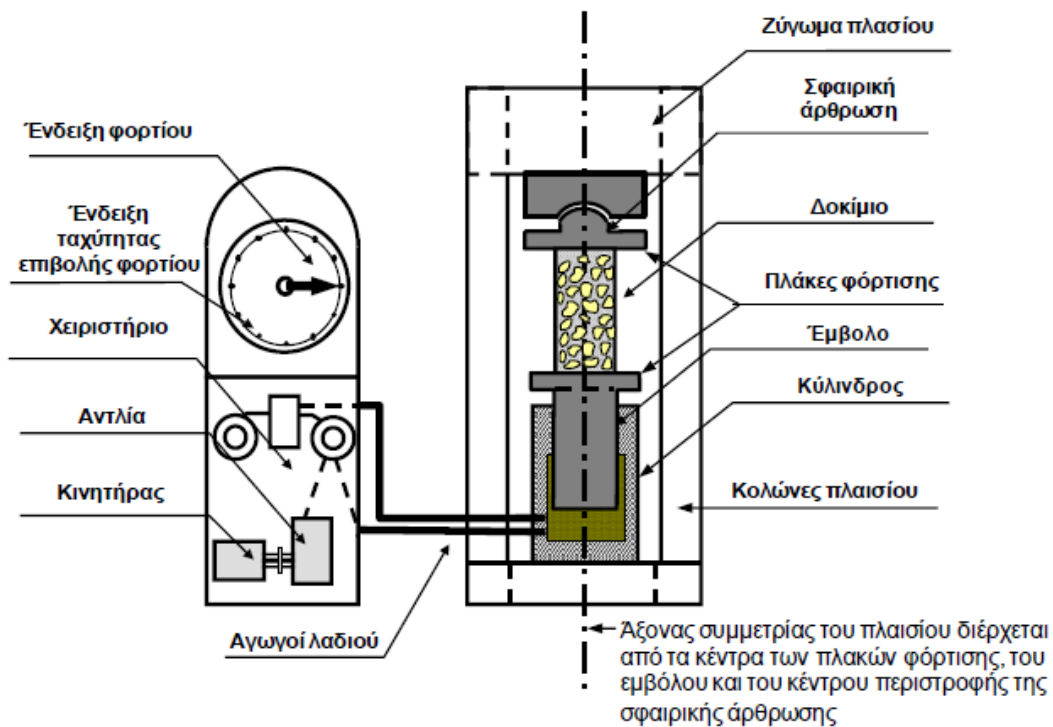
f_c : η θλιπτική αντοχή σε MPa

F: το μέγιστο φορτίο σε N

A_c : το εμβαδόν του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης.

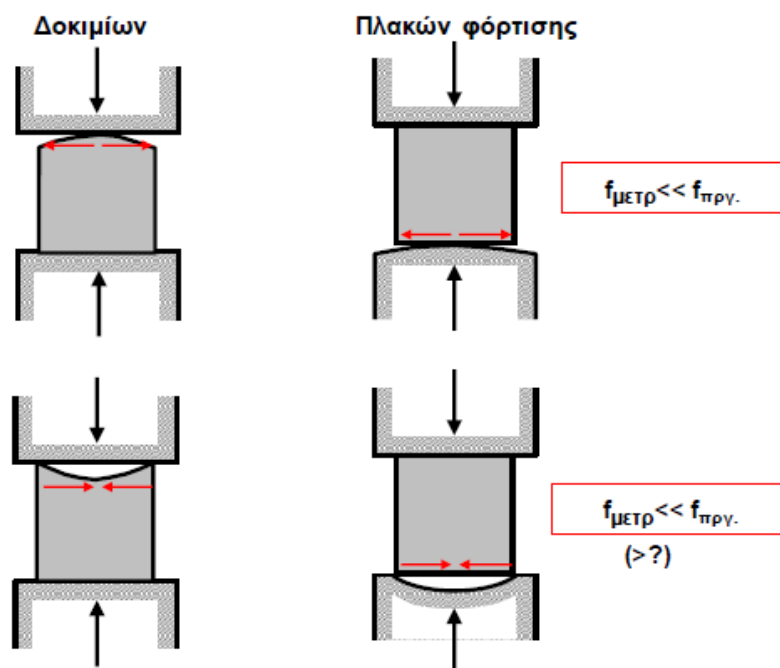
Τα αποτελέσματα της δοκιμής πρέπει να έχουν ακρίβεια τουλάχιστον της τάξης του 0,5 MPa.

Στη συνέχεια απεικονίζεται ενδεικτικά η διάταξη της μηχανής θραύσης



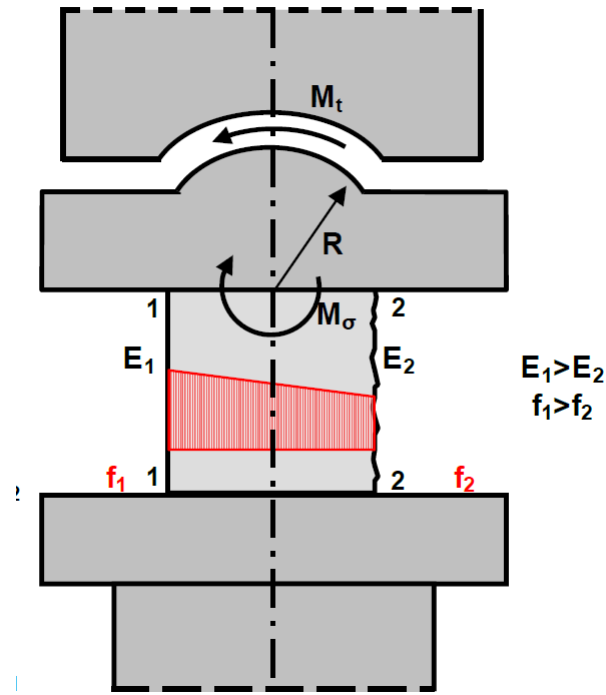
Σχ.3.2 Ενδεικτική διάταξη της μηχανής για δοκιμή σε θλίψη.

Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι χαλύβδινες πλάκες φόρτισης και οι επιφάνειες του δοκιμίου που έρχονται σε επαφή πρέπει να είναι επίπεδες ώστε να αποφεύγονται συγκεντρώσεις τάσεων με αποτέλεσμα την φαινομενική μείωση των αντοχών.



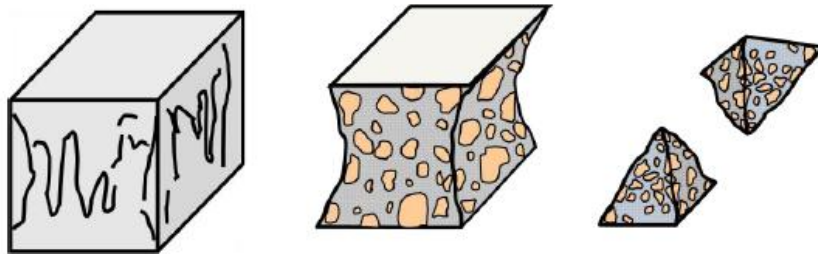
Σχ.3.3 Πιθανές ατέλειες που εμποδίζουν την πλήρη επαφή του δοκιμίου με τις πλάκες της μηχανής.

Ακόμη μεγάλη σημασία έχει η λειτουργία της σφαιρικής άρθρωσης στην πάνω πλάκα της μηχανής. Κατά την έναρξη της δοκιμής θα πρέπει να μπορεί να κινείται ελεύθερα ώστε να εξασφαλίζεται η πλήρης επαφή των επιφανειών του δοκιμίου με την άνω πλάκα (δεδομένου ότι αυτές είναι επίπεδες). Στη συνέχεια όμως θα πρέπει να «κλειδώνει» ώστε να το πεδίο των τάσεων να παραμένει ομοιόμορφο στην περίπτωση που η μία πλευρά του δοκιμίου είναι ασθενέστερη της άλλης και να μην αναπτυχθεί ροπή στο επάνω μέρος, όπως φαίνεται παρακάτω.

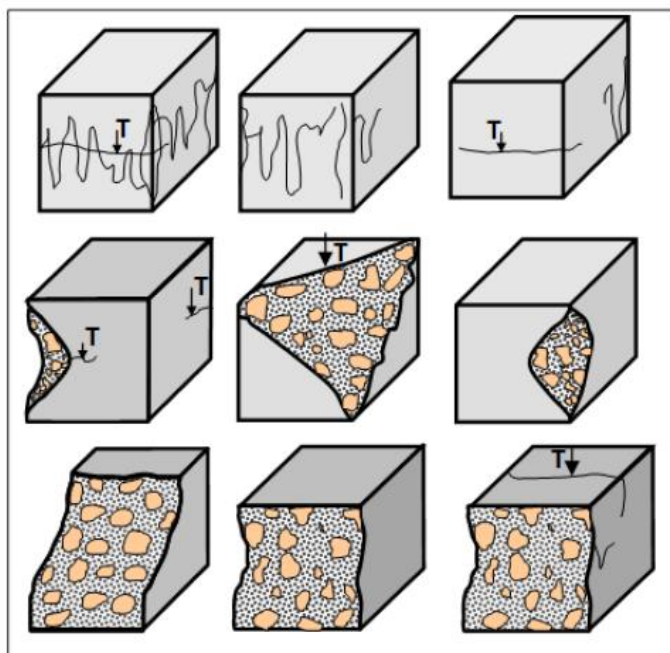


Σχ.3.4 Εισαγωγή ροπών στη δοκιμή λόγω της ελεύθερης περιστρέφεις της σφαιρικής άρθρωσης.

Παρακάτω απεικονίζονται οι αποδεκτές και οι μη αποδεκτές μορφές θραύσεως δοκιμίων



Σχ.3.5 Αποδεκτές μορφές αστοχίας δοκιμίου που υπόκειται σε θλίψη.



Σχ.3.6 Μη αποδεκτές μορφές αστοχίας δοκιμίου που υπόκειται σε θλίψη.

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη δοκιμή.



Εικόνα 9. Η μηχανή της δοκιμής σε θλίψη.



Εικόνα 10. Δοκίμιο τοποθετημένο στη μηχανή.



Εικόνα 11. Δοκίμιο με αποδεκτή μορφή θραύσης.



Εικόνα 12. Δοκίμιο με αποδεκτή μορφή θραύσης.

3.3 Δοκιμή ισοδύναμου κύβου

Ύστερα από την δοκιμή της κάμψης τα πρισματικά δοκίμια διασπώνται σε δύο μέρη. Το σημείο τομής αναμένεται, όπως έχουμε προαναφέρει, να βρίσκεται μεταξύ των δύο σημείων επιβολής της φόρτισης. Έτσι τα δύο τμήματα θα έχουν μήκος 20-30 cm. Τοποθετώντας μεταλλικές πλάκες πλάτους 10x10 cm σε δύο αντιδιαμετρικές πλευρές μπορούμε να δοκιμάσουμε τα τμήματα αυτά σε μονοαξονική θλίψη ισοδύναμου κύβου 10x10x10.

Ο ρυθμός επιβολής του φορτίου επιλέχθηκε ίδιος με τον ρυθμό στη δοκιμή σε θλίψη για τα κυβικά δοκίμια διαστάσεων 15x15x15 δηλαδή 0,8MPa/s.

Σε αυτή τη δοκιμή τα τμήματα που «περισεύουν» εκατέρωθεν των πλακών δεν συμμετέχουν ενεργά στη θλίψη. Όπως έχει επισημανθεί όμως ενδέχεται να παρεμποδίσουν την οριζόντια παραμόρφωση του δοκιμίου γεγονός που μπορεί να επιφέρει αύξηση της αντοχής.

Κατά τη διεξαγωγή της δοκιμής παρατηρήθηκε ότι πολλές φορές τα τμήματα έξω από τον νοητό κύβο αποκόπτονταν όταν το δοκίμιο προσέγγιζε την μέγιστη θλιπτική καταπόνηση.

Οι επιθυμητές μορφές θραύσης είναι παρόμοιες με αυτές της απλής αντοχής σε θλίψη.

Κρίθηκε σκόπιμο να εξετασθεί η θλιπτική αντοχή και των δύο τμημάτων προκειμένου να έχουμε πιο αντιπροσωπευτικά αποτελέσματα.

Ακολουθούν φωτογραφίες από τη δοκιμή.

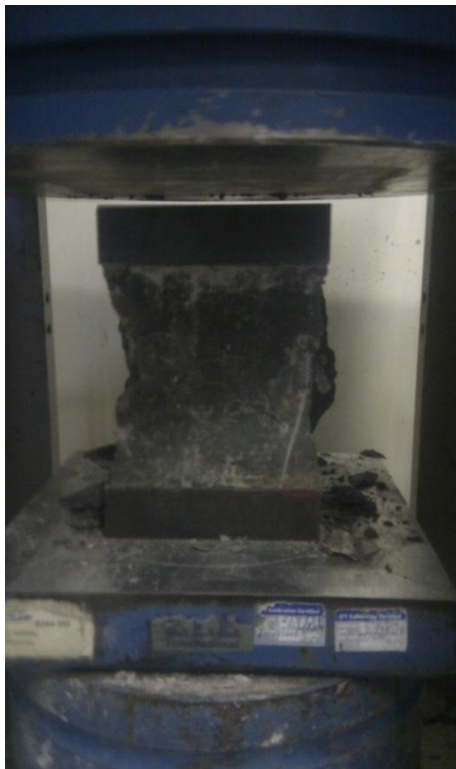


Εικόνα 13. Τμήμα τοποθετημένο στην μηχανή με τις δύο μεταλλικές πλάκες διαστάσεων 10x10 cm για την δοκιμή σε θλίψη ισοδύναμου κύβου.



Εικόνα 14. Το τμήμα μετά την θραύση.

Συνήθως όταν το δοκίμιο φορτιζόταν με δύναμη κοντά στην μέγιστη αντοχή το ένα ή και τα δύο πλαϊνά τμήματα που περίσσευαν από τις πλάκες αποκόπτονταν, ενώ το κεντρικό τμήμα συνέχιζε να αναλαμβάνει το φορτίο.



Εικόνα 15. Κεντρικό τμήμα μετά την θραύση με μορφή σύμφωνα με τις ενδεικνυόμενες για τα κυβικά δοκίμια.



Εικόνα 16. Δοκίμιο μετά την θραύση με το ένα τμήμα ακόμα (ασθενώς) συνδεδεμένο με το κεντρικό.

4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Πριν επιχειρηθεί οποιαδήποτε ανάλυση αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων κρίνεται σκόπιμο να εξεταστούν τα αποτελέσματα από απόψεως μεταβλητότητας και αξιοπιστίας είτε με βάση υπάρχουσες άλλες ερευνητικές εργασίες είτε με βάση τιμές μεταβλητότητας (επαναληψιμότητας) που παρέχονται από τα Πρότυπα EN και ASTM.

Λόγω της φύσης της πειραματικής διαδικασίας κατά την επισκόπηση των αποτελεσμάτων είναι λογικό να παρατηρούνται διάφορες ακραίες τιμές, οι οποίες ωστόσο δεν αντικατοπτρίζουν την συμπεριφορά του υλικού αλλά ενδέχεται να οφείλονται σε εξωγενείς παράγοντες.

Προκειμένου να μην συμπεριληφθούν στο τελικό μοντέλο αυτές οι τιμές τα αποτελέσματα ελέγχθηκαν με βάση τις αρχές επαναληψιμότητας του Πρότυπου ASTM C78 - 02 για την κάμψη και του Προτύπου EN 12390 - 3 για την θλίψη.

Στην κάμψη για δοκίμια από το ίδιο μίγμα δεν θα έπρεπε ο συντελεστής μεταβλητότητας να υπερβαίνει το 16%.

Ο συντελεστής μεταβλητότητας ορίζεται ως ο λόγος της τυπικής απόκλισης προς τη μέση τιμή.

$$V = \frac{\sigma}{\chi}$$

Επειδή η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης από 3 μόνο αποτελέσματα δεν αποτελεί αξιόπιστη εκτίμηση θεωρήθηκε σκόπιμο η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης να γίνει με βάση το εύρος της τριάδος και με χρήση των συντελεστών d.

Αριθμός Μετρήσεων n	Συντελεστής d	Αριθμός Μετρήσεων n	Συντελεστής d
2	0,8862	14	0,2935
3	0,5908	15	0,2880
4	0,4857	16	0,2831
5	0,4299	17	0,2787
6	0,3945	18	0,2747
7	0,3698	19	0,2711
8	0,3512	20	0,2677
9	0,3367	24	0,2567
10	0,3249	50	0,2223
11	0,3132	100	0,1994
12	0,3069	1000	0,1543
13	0,2998		

Σχ.4.1 Τιμές του συντελεστή d^[42]

Στην περίπτωση μας για n = 3 προκύπτει d = 0.5908

Όπως φαίνεται στο παράρτημα οι τιμές της τυπικής απόκλισης και επομένως και του συντελεστή μεταβλητότητας που προέκυψαν με αυτήν τη διαδικασία είναι ελαφρώς μεγαλύτερες από εκείνες που προκύπτουν από τον άμεσο υπολογισμό των τριών αποτελεσμάτων .

Στις περιπτώσεις που δεν ικανοποιούταν το κριτήριο η ακραία τιμή δεν λαμβάνεται υπόψη.

Όσον αφορά στην θλίψη, σύμφωνα με το EN 12390, η επαναληψιμότητα πρέπει να είναι μικρότερη από το 9% τόσο για τα δοκίμια διαστάσεων 15x15x15cm όσο και για τους ισοδύναμους κύβους που θεωρούνται επί το δυσμενέστερον κυβικά δοκίμια διαστάσεων 10x10x10cm.

Η επαναληψιμότητα δίνεται από τον τύπο:

$$r = \frac{|x_i - x_j|}{\left(\frac{(x_i + x_j)}{2}\right)} \leq 9\%$$

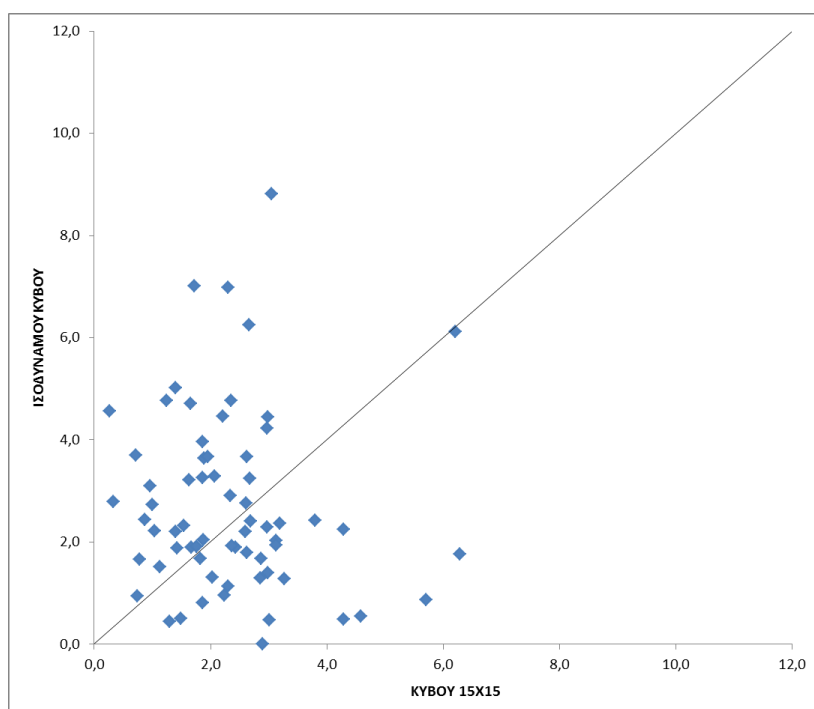
Στην περίπτωση των ισοδύναμων κύβων επειδή γινόταν θραύση και των δύο τμημάτων έγινε και έλεγχος μεταξύ τους. Όπου το κριτήριο δεν ικανοποιούταν η ακραία τιμή δεν λαμβανόταν υπόψη.

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

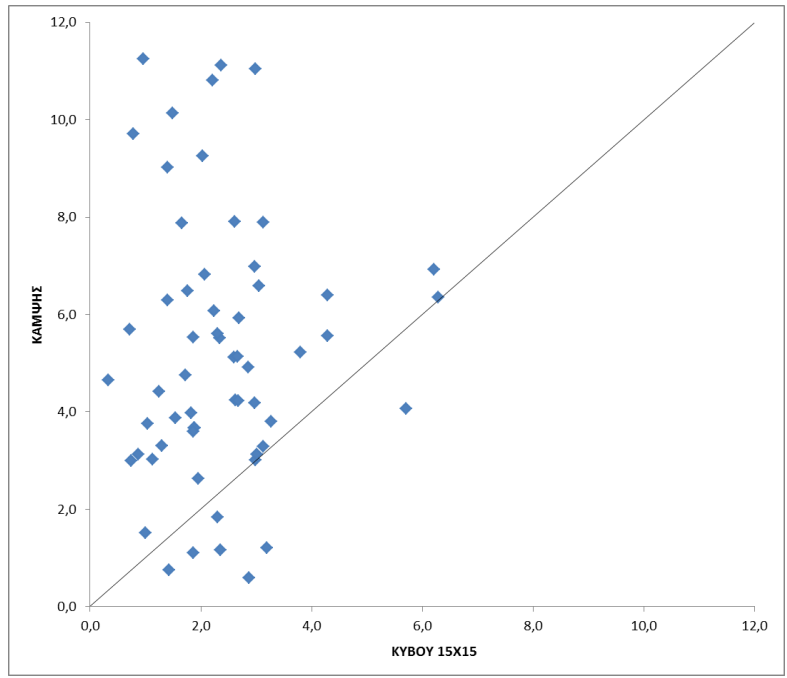
5.1 Μεταβλητότητα – αξιοπιστία αποτελεσμάτων

Η μεταβλητότητα των ισοδύναμων κύβων σε θλίψη ήταν ελαφρώς μεγαλύτερη από τους κύβους (Σχ. 5.1) πράγμα που αποδίδεται κυρίως στο μικρότερο μέγεθος των δοκιμίων, αλλά και στο γεγονός ότι υπήρχε η απαίτηση οι πλάκες της δοκιμής να ήταν πολύ καλά τοποθετημένες (οι ακμές τις πάνω και της κάτω πλάκας πρέπει να βρίσκονται στην ίδια κάθετη προς τις φορτιζόμενες επιφάνειες γραμμή).

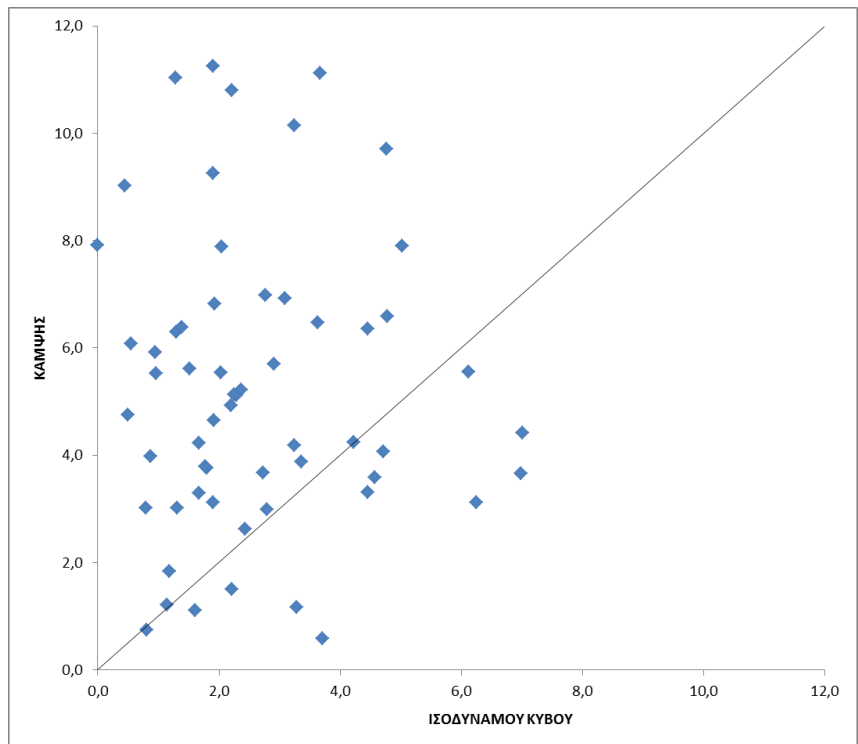
Γενικά παρατηρήθηκε, όπως αναμένονταν από την ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, ότι η μεταβλητότητα της δοκιμής σε κάμψη ήταν μεγαλύτερη από αυτή της θλίψης, γεγονός που αποδίδεται και στη φύση της δοκιμής (Σχ. 5.2, Σχ.5.3).



Σχ.5.1 Μεταβλητότητα των κύβων ως προς τη μεταβλητότητα των ισοδύναμων κύβων.

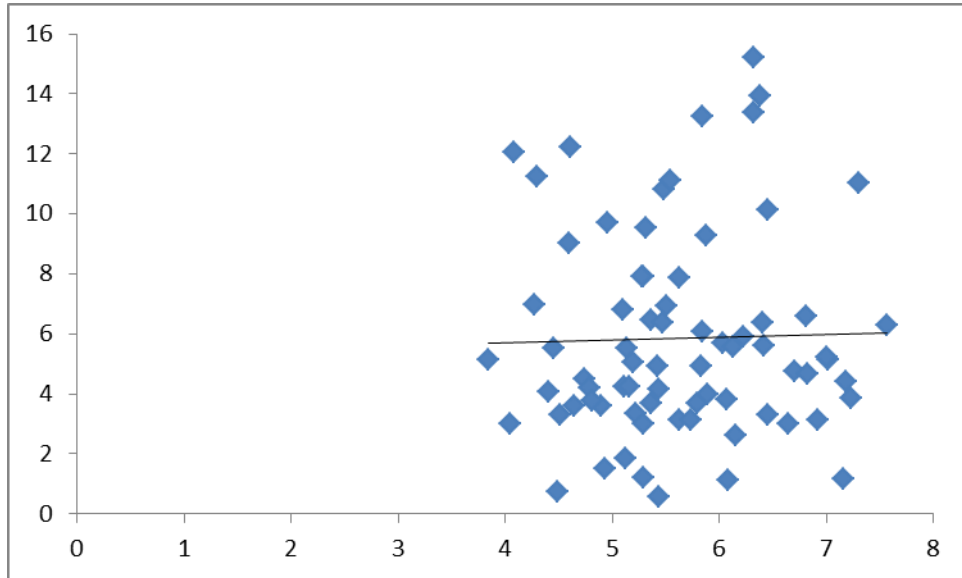


Σχ.5.2 Μεταβλητότητα της κάμψης ως προς τη μεταβλητότητα της θλίψης των κύβων.

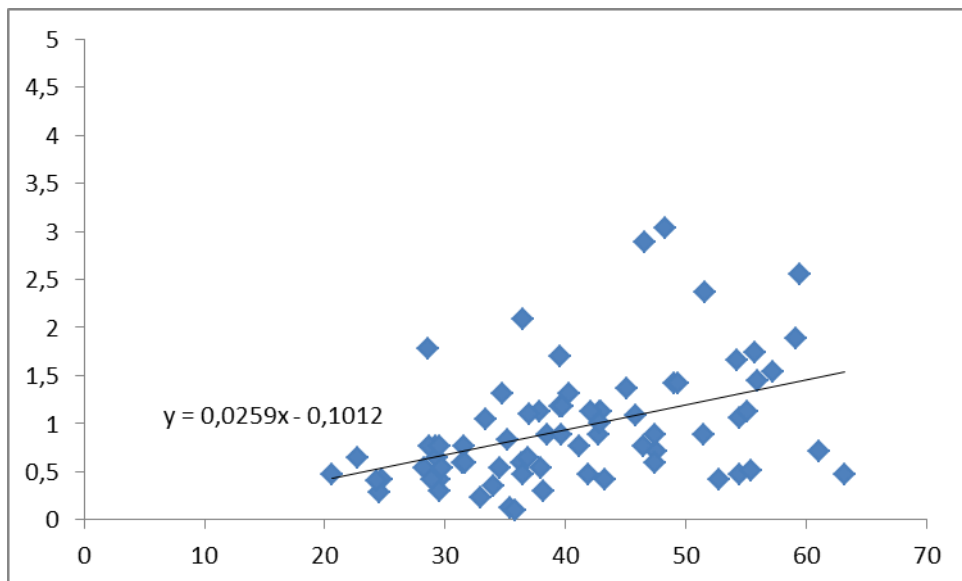


Σχ.5.3 Μεταβλητότητα της κάμψης προς τη μεταβλητότητα της θλίψης ισοδύναμων κύβων.

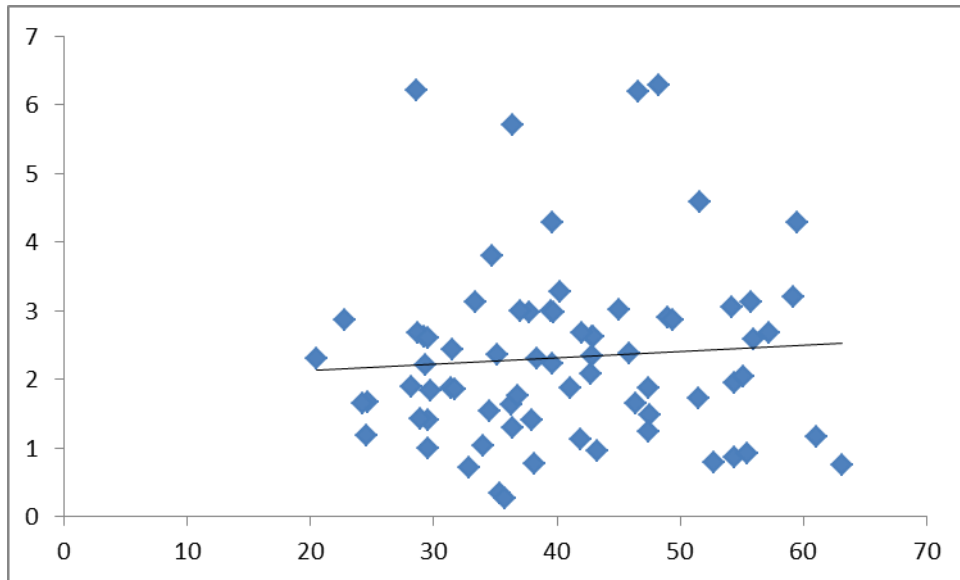
Στα Σχ. 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.8, και 5.9 παρουσιάζεται η διακύμανση του συντελεστή μεταβλητότητας και της τυπικής απόκλισης σε σχέση με την αντοχή.



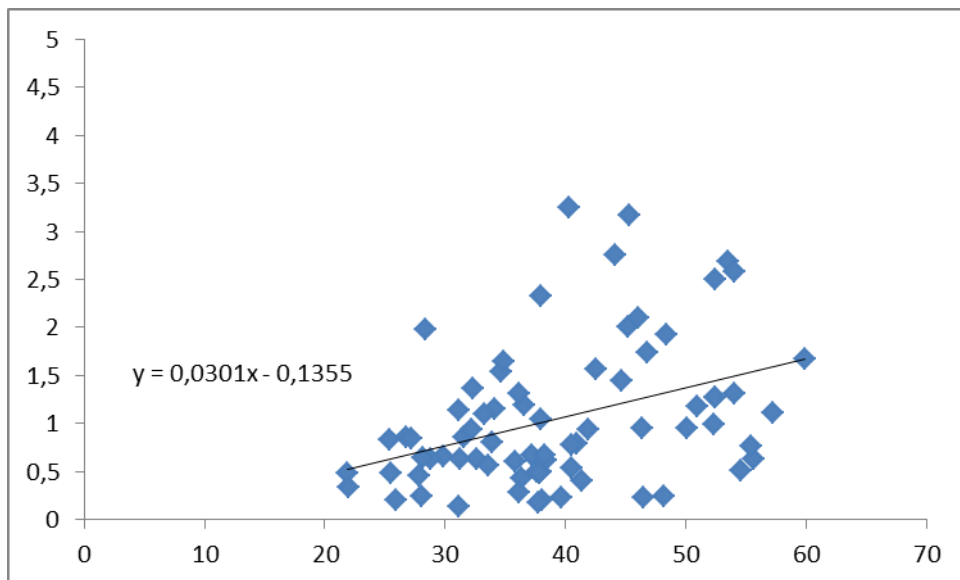
Σχ.5.4 Συντελεστής μεταβλητότητας ως προς την αντοχή σε θλίψη των κύβων.



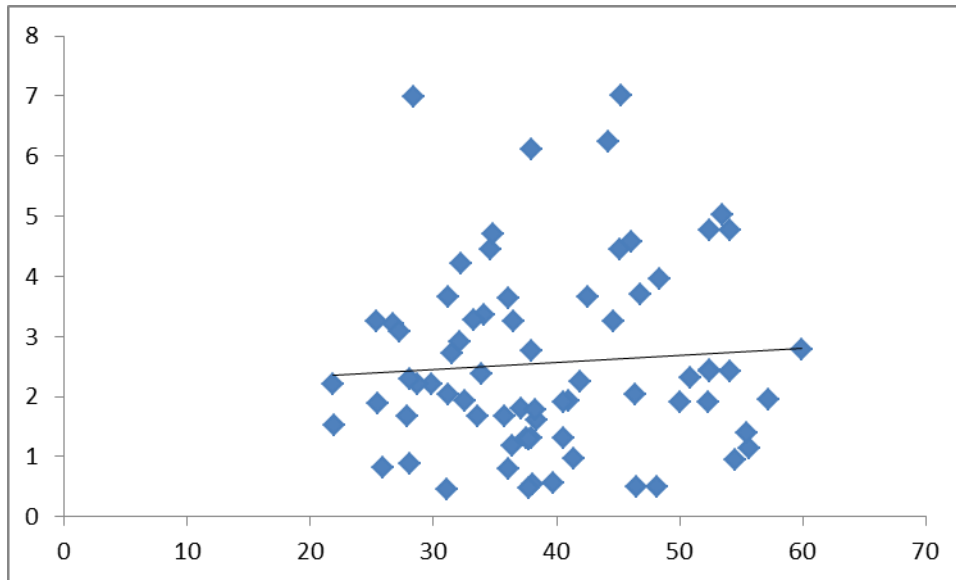
Σχ.5.5 Τυπική απόκλιση ως προς την αντοχή σε θλίψη των κύβων.



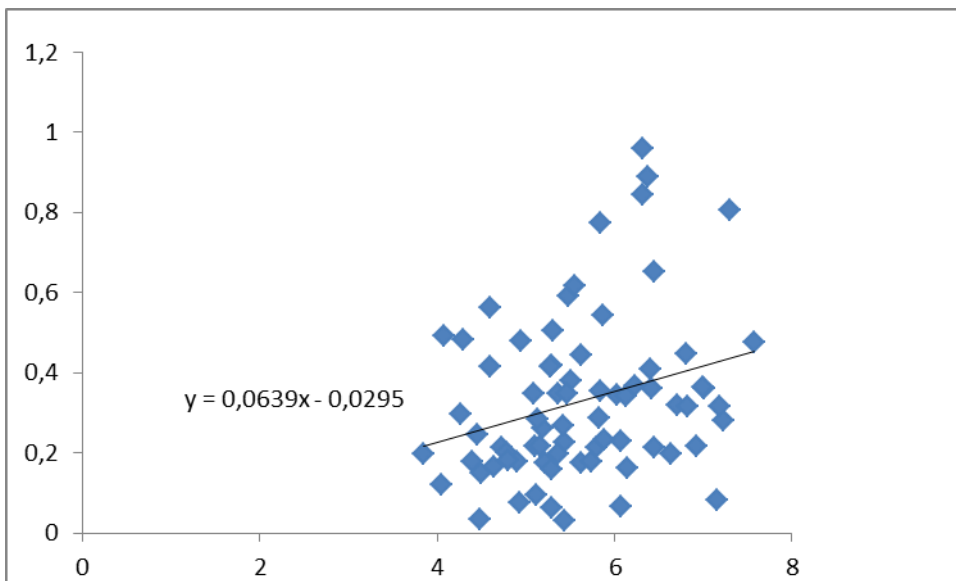
Σχ.5.6 Συντελεστής μεταβλητότητας ως προς την αντοχή σε θλίψη των ισοδύναμων κύβων.



Σχ.5.7 Τυπική απόκλιση ως προς την αντοχή σε θλίψη των ισοδύναμων κύβων



Σχ.5.8 Συντελεστής μεταβλητότητας ως προς την αντοχή σε κάμψη.



Σχ.5.9 Τυπική απόκλιση ως προς την αντοχή σε κάμψη.

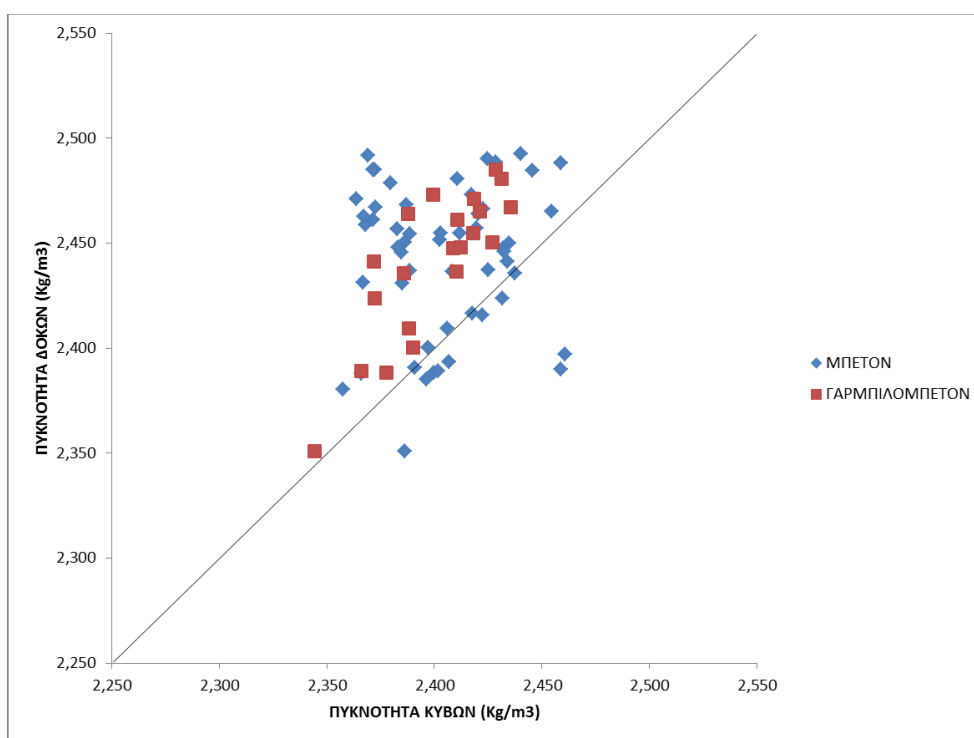
Παρατηρούμε ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας δεν μεταβάλλεται όσο αυξάνει η αντοχή και στις τρεις περιπτώσεις (αντοχή κύβου, αντοχή ισοδύναμου κύβου, και αντοχή σε κάμψη) γεγονός που επιβεβαιώνεται από την μικρή αύξηση της τυπικής απόκλισης που παρατηρείται στις αντίστοιχες περιπτώσεις (Σχ.5.5, Σχ.5.7 και Σχ.5.9.) Η αύξηση της τυπικής απόκλισης, έστω και μικρή, δεν συμφωνεί με την εμπειρία σε παγκόσμια κλίμακα στο θέμα αυτό και αυτό ίσως να πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.

Οι μέσοι όροι του συντελεστή μεταβλητότητας ύστερα από τους ελέγχους προέκυψαν 2,32 για την θλίψη των κύβων, 2,64 για την θλίψη των ισοδύναμων κύβων και 5,72 για την κάμψη. Το πρότυπο ASTM C78 – 02 προβλέπει για την κάμψη μεταβλητότητα 5,7 για έναν χειριστή.

Σε πειράματα του ο P.J.F.Wright είχε συντελεστή μεταβλητότητας 6 στην κάμψη και 3,5 στην θλίψη,^[21] ενώ Ο Mitsuru Saito, για δοκιμή κυλίνδρων σε θλίψη, 7.1 και 7.0 ανάμεσα σε 11 και 10 δοκίμια αντίστοιχα.^[46] Στην περίπτωση μας όμως πρέπει να αναφέρουμε ότι το σκυρόδεμα δεν παρασκευάστηκε με συνθήκες επαναληψιμότητας (δηλ ίδια υλικά, ίδιος χειριστής, ίδια μηχανήματα ανάμιξης και ελέγχου), αλλά σε μεγάλες μονάδες παραγωγής σε 3 μεγάλους αναμεικτήρες από τους οποίους το δείγμα αποτελούσε ένα μικρό μέρος του συνολικού μείγματος και από διαφορετικούς χειριστές αναμεικτήρα. Η θραύση των δοκιμίων έγινε σε ένα εργαστήριο από ένα χειριστή εκτός από κυβικά δοκίμια του παραγωγού Α τα οποία δοκιμάστηκαν στο εργαστήριό του από διαφορετικό χειριστή. Οι διαφορές αυτές συνιστούν μείζονα απόκλιση από τις απαιτήσεις για συνθήκες επαναληψιμότητας και το γεγονός ότι η σύγκριση αποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές διαφορές στον συντελεστή μεταβλητότητας και την τυπική απόκλιση, είναι ενδεικτική της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.

5.2 Συσχετισμός θλίψης - κάμψης

Στο Σχ.5.10 συγκρίνεται σε διάγραμμα η φαινόμενη πυκνότητα των κυβικών δοκιμίων με τη φαινόμενη πυκνότητα των πρισματικών δοκιμίων, όπως αυτή προέκυψε από τη διαίρεση του βάρους τους με τον «ονομαστικό» όγκο τους.

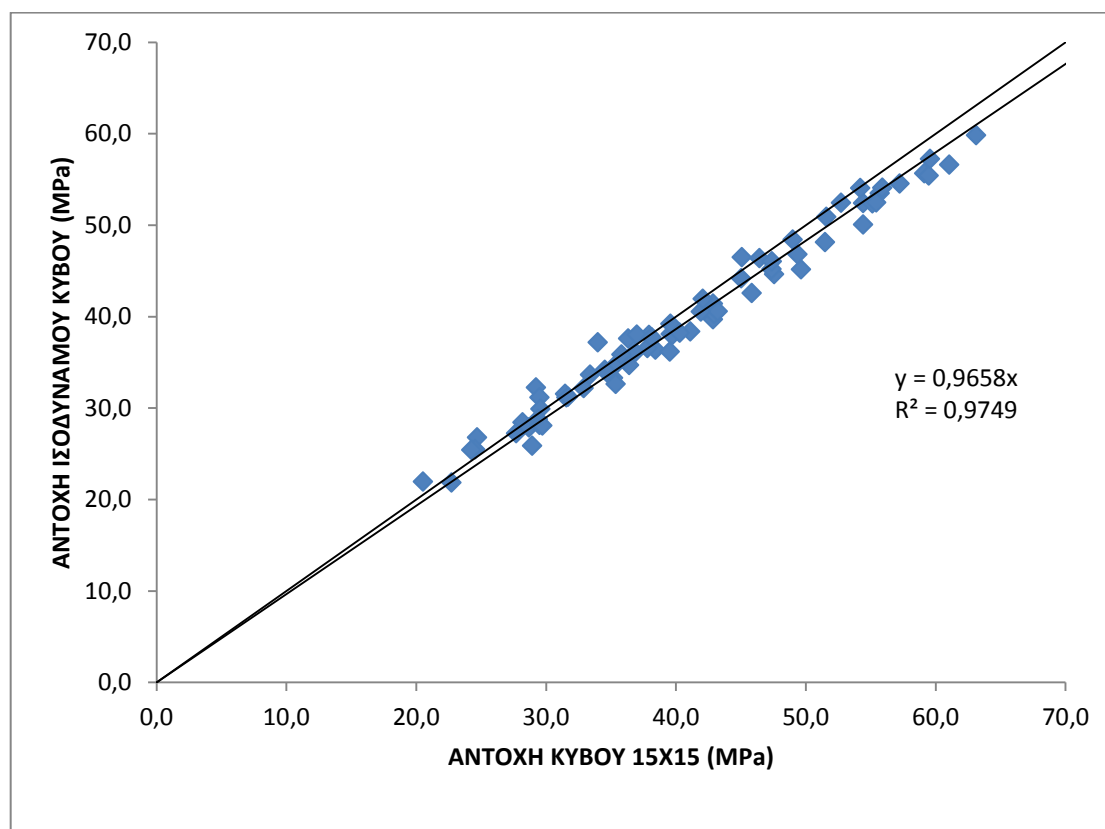


Σχ.5.10 Σύγκριση φαινόμενης πυκνότητας κυβικών και πρισματικών δοκιμίων.

Παρατηρούμε ότι η φαινόμενη πυκνότητα των δοκών είναι μεγαλύτερη. Ωστόσο αυτή η σύγκριση είναι ενδεικτική καθώς έγινε η παραδοχή ότι τα κυβικά δοκίμια ήταν διαστάσεων

15x15x15cm και τα πρισματικά 10x10x50cm. Στην πράξη αυτό δεν ισχύει καθώς ο βαθμός πλήρωσης των μητρών διαφέρει σε κάθε δείγμα με αποτέλεσμα ο τελικός όγκος να ποικίλει. Το γεγονός ότι η ελεύθερη επιφάνεια των δοκών είναι 500cm² ενώ των κύβων 225cm² σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι μήτρες πιο συχνά υπερχειλίζουν, αιτιολογεί το μεγαλύτερο φαινόμενο βάρος των πρισματικών δοκιμίων. Πρέπει να επισημάνουμε ότι αφού τα δοκίμια ήταν από το ίδιο μίγμα το φαινόμενο βάρος δεν θα έπρεπε να διαφέρει σημαντικά και η όποια διαφορά θα μπορούσε να αποδοθεί στην καλύτερη ή μη συμπίκνωση. Για πιο ορθά αποτελέσματα ο όγκος των δοκιμίων θα μπορούσε να προσδιοριστεί ως διαφορά βάρους των δοκιμίων από ζύγισμα έξω και μέσα στο νερό.

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια η αντοχή σε θλίψη των ισοδύναμων κύβων θα πρέπει να προκύψει μεγαλύτερη από την αντοχή των κύβων, λόγω της μικρότερης διάστασης τους σε συνδυασμό με το τριαξονικό πεδίο τάσεων που αναπτύσσεται, αλλά και λόγω των τμημάτων που «περισσεύουν». Ο μέσος όρος κάθε τριάδος δοκιμίων ονομάζεται στην εργασία αυτή "αποτέλεσμα"

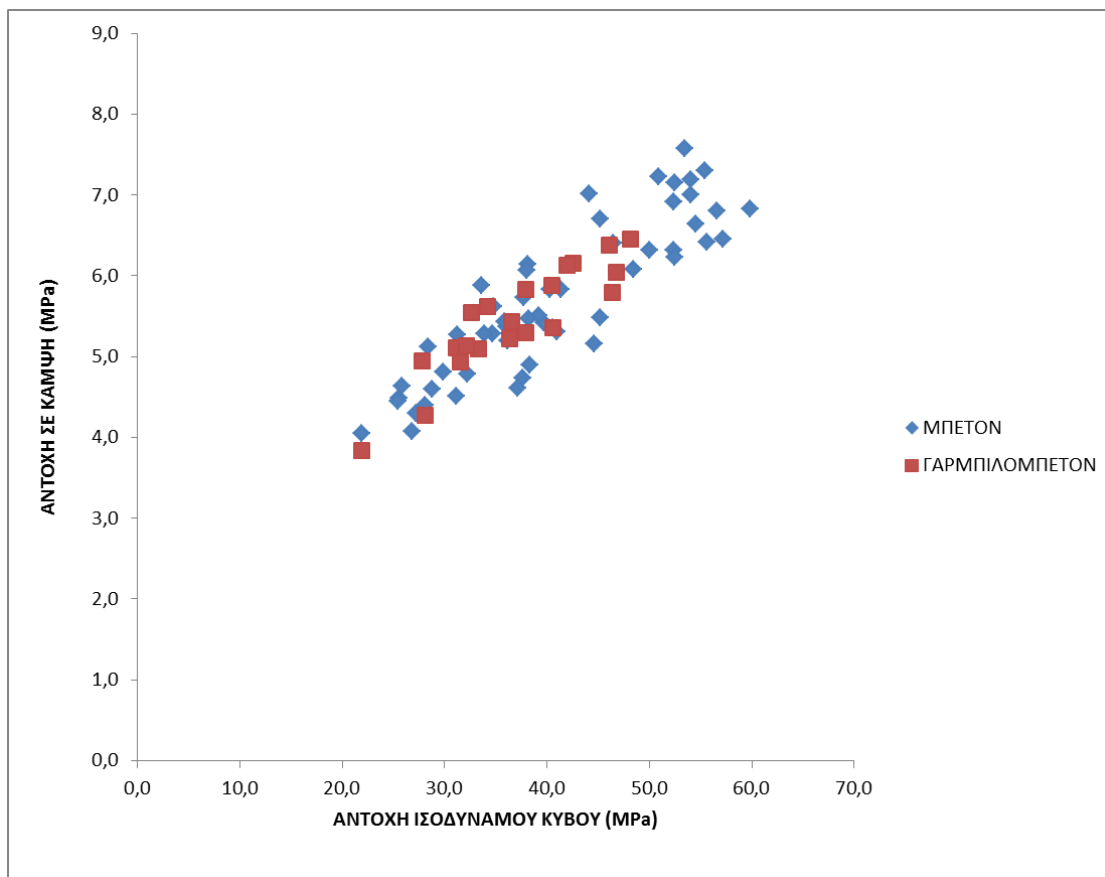


Σχ.5.11 Σχέση αντοχής σε θλίψη κύβων 15x15 και ισοδύναμων κύβων.

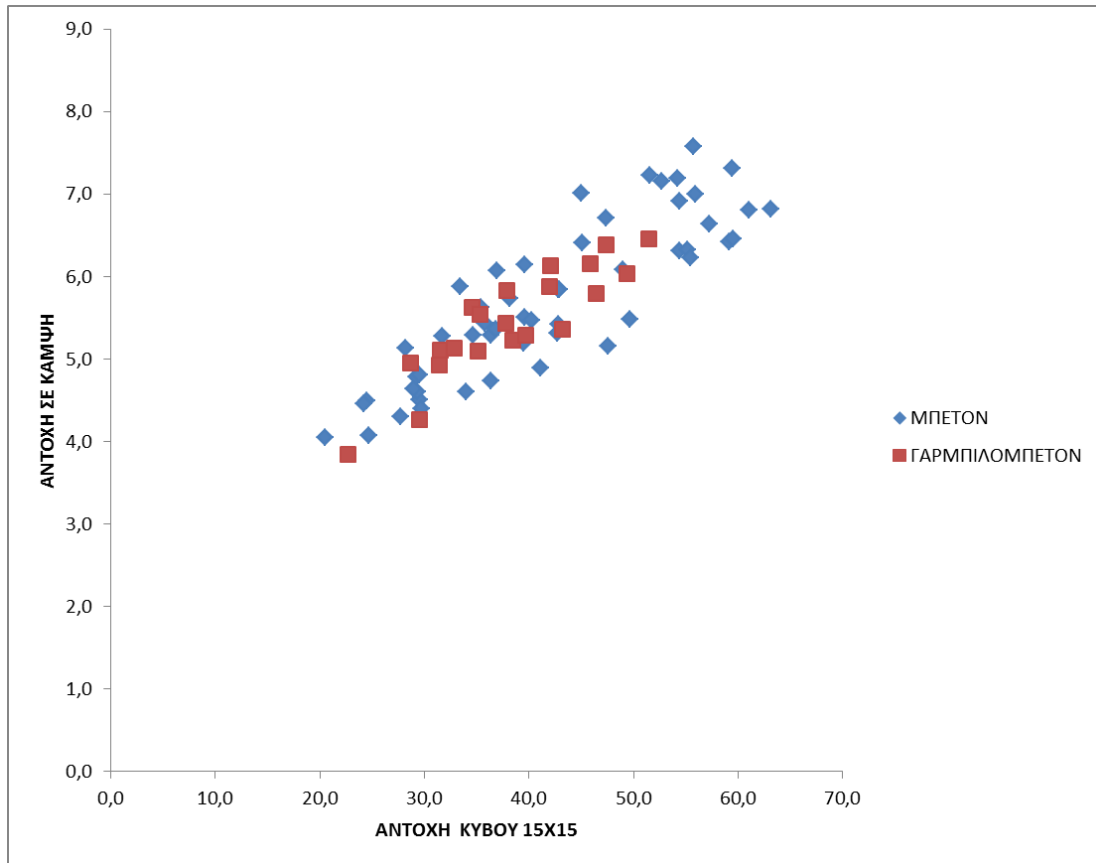
Όπως φαίνεται παραπάνω η αντοχή των κύβων προέκυψε ελαφρώς μεγαλύτερη. Αυτό ενδέχεται να οφείλεται στο ότι η δοκιμή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων είναι ιδιαίτερα ευαίσθητη όσον αφορά στην τοποθέτηση των πλακών. Εάν οι πλάκες δεν είναι τελείως κατακόρυφες τότε το τμήμα του δοκιμίου που αναλαμβάνει φορτίο μειώνεται με αποτέλεσμα

η τιμή του φορτίου θραύσης να προκύπτει μικρότερη από την ιδανική. Εντούτοις η εκδοχή αυτή δεν φαίνεται να ευσταθεί δεδομένου ότι στην περίπτωση της ευαισθησίας θα έπρεπε και η μεταβλητότητα να ήταν ιδιαίτερα μεγάλη γεγονός που δεν παρατηρήθηκε

Στα Σχ.5.12 και Σχ. 5.13 απεικονίζονται οι μέσοι όροι κάθε τριάδας δοκιμίων για τη αντοχή σε κάμψη σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη των ισοδύναμων κύβων και των συμβατικών κύβων, ξεχωριστά για τα δοκίμια από συμβατικό μπετόν και από γαρμπιλομπετόν.



Σχ.5.12 Αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη.



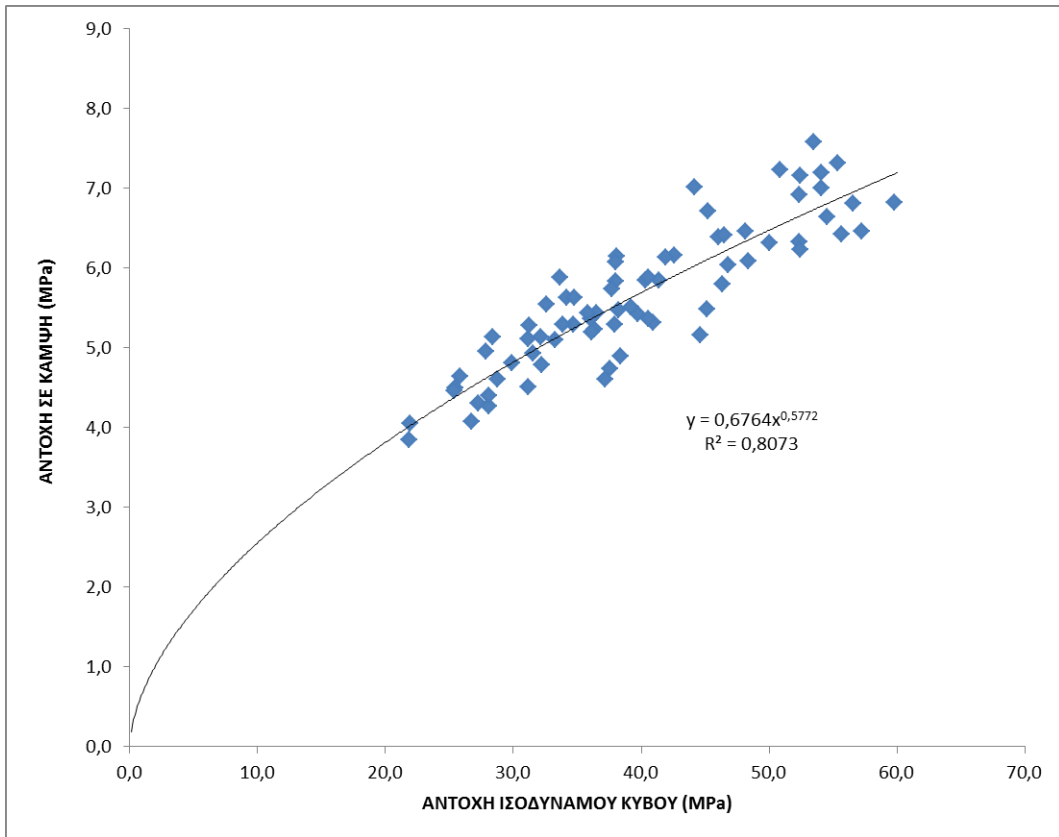
Σχ.5.13 Αντοχή σε θλίψη κύβων 15x15 σε σχέση με την αντοχή σε κάμψη.

Και στις δύο περιπτώσεις παρατηρούμε ότι η διασπορά των δοκιμών από γαρμπιλομετόν είναι μικρότερη γεγονός που μπορεί να αποδοθεί στον μικρότερο μέγιστο κόκκο του μίγματος. Επίσης παρατηρείται ότι δεν υπάρχει διαφοροποίηση ως προς τη σχέση αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε εφελκυσμό μεταξύ των δοκιμών σκυροδέματος και των δοκιμών από γαρμπιλομετόν.

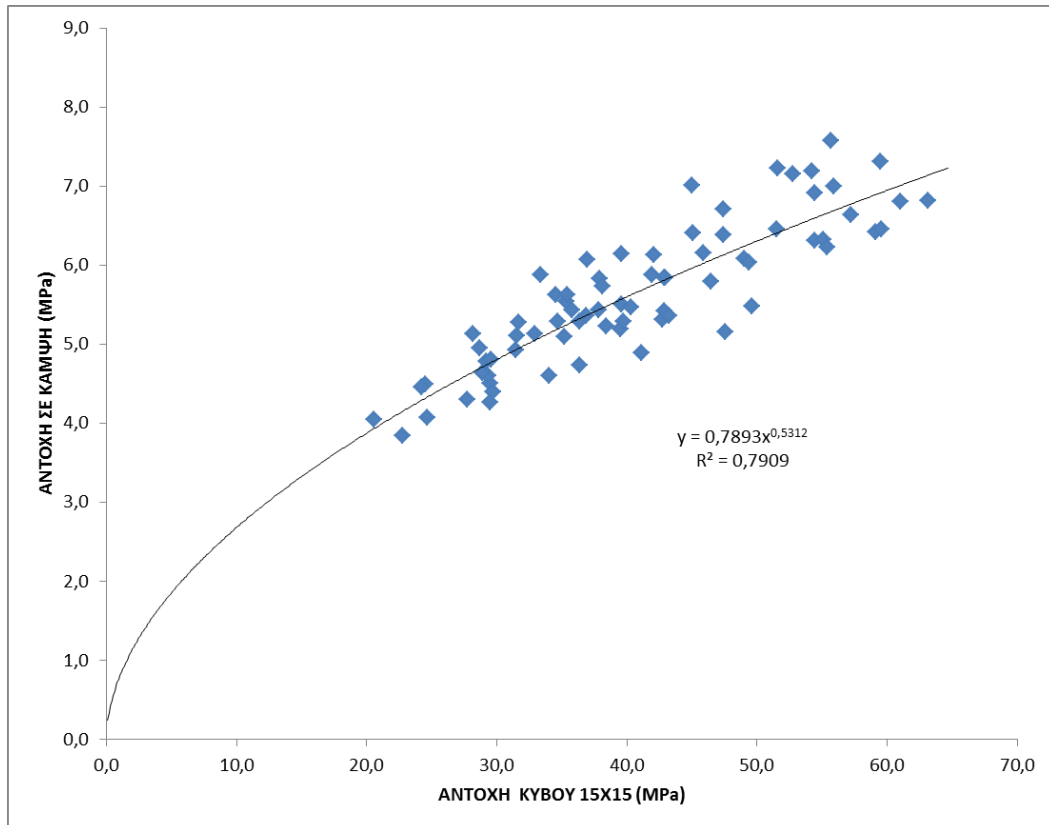
Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο η σχέση των δύο αντοχών περιγράφεται από την σχέση:

$$f_t = k f_c^n$$

Στα Σχ.5.14 και Σχ.5.15 απεικονίζεται η παραπάνω καμπύλη για τις δύο περιπτώσεις.

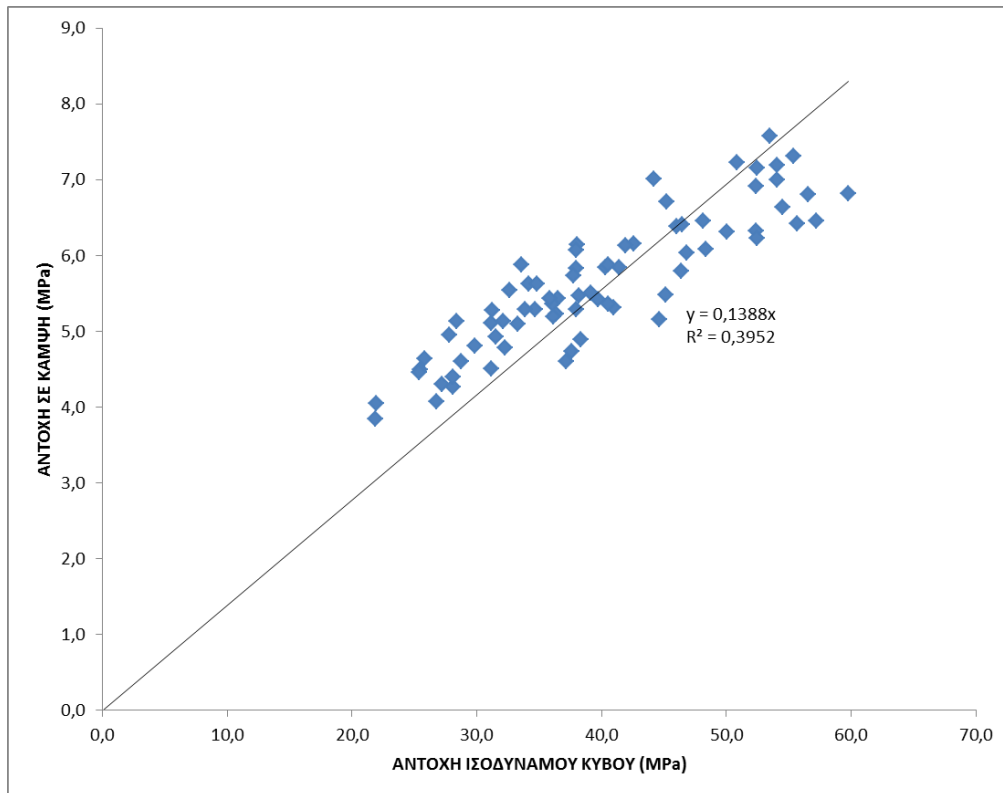


Σχ.5.14 Καμπύλη συσχετισμού των δύο αντοχών για ισοδύναμους κύβους.

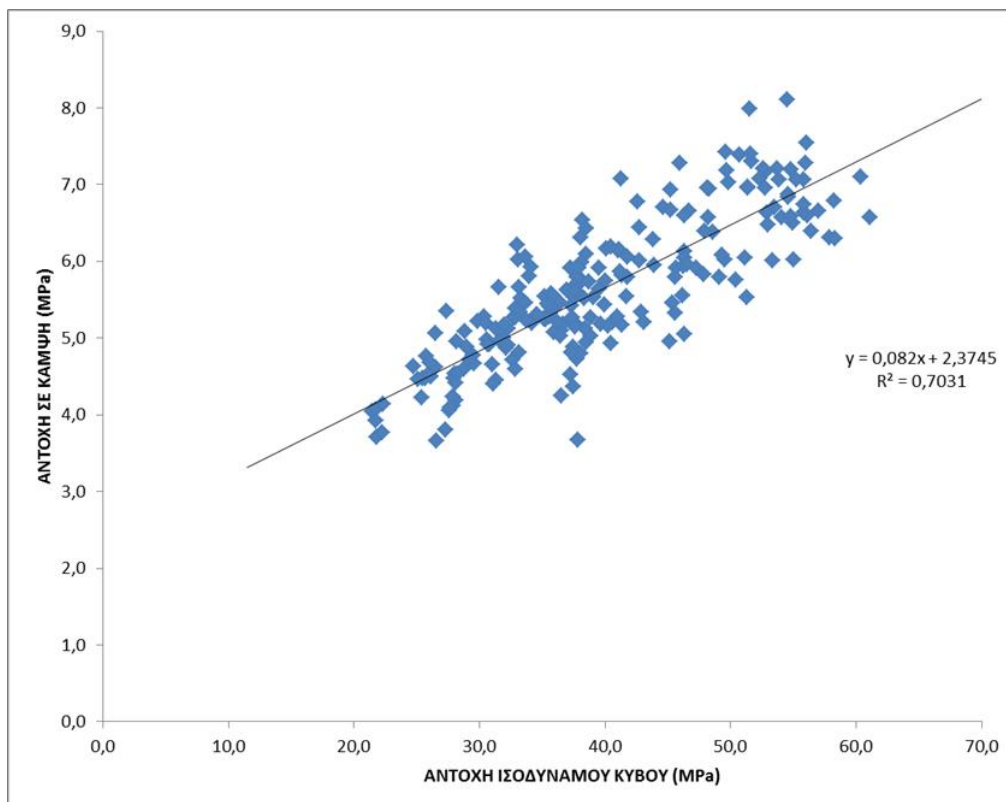


Σχ.5.15 Καμπύλη συσχετισμού των δύο αντοχών για κύβους.

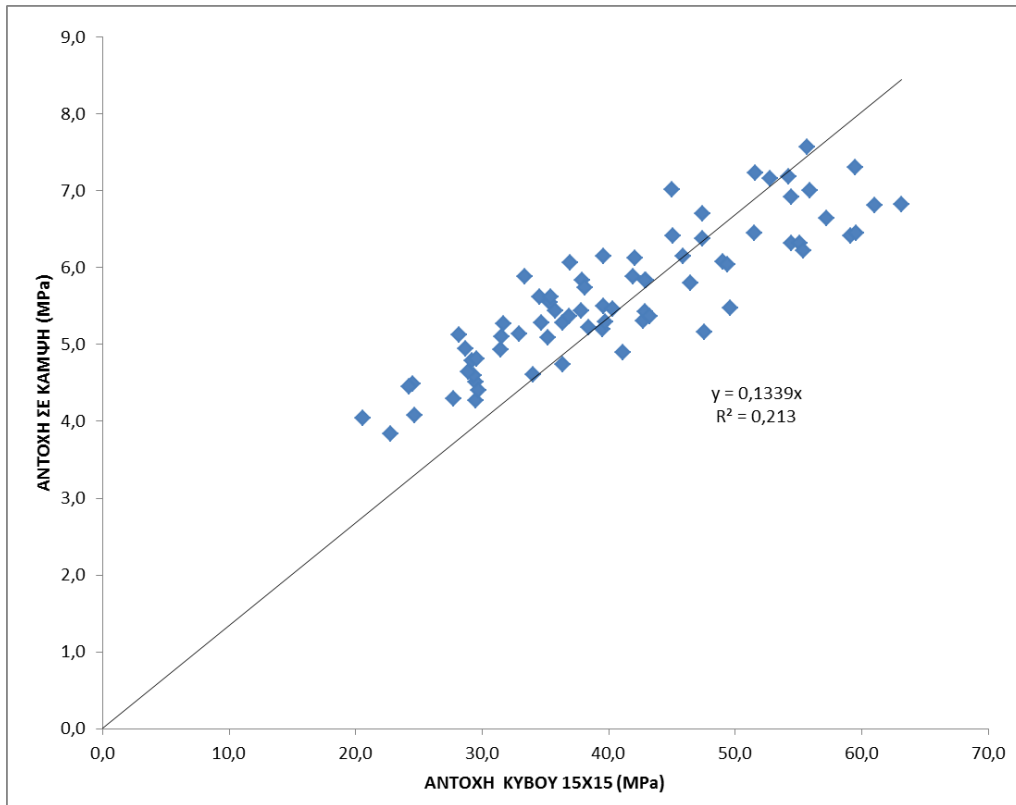
Εάν είχε θεωρηθεί ευθύγραμμο μοντέλο για τον συσχετισμό των δύο αντοχών τότε τα αντίστοιχα διαγράμματα θα ήταν τα ακόλουθα:



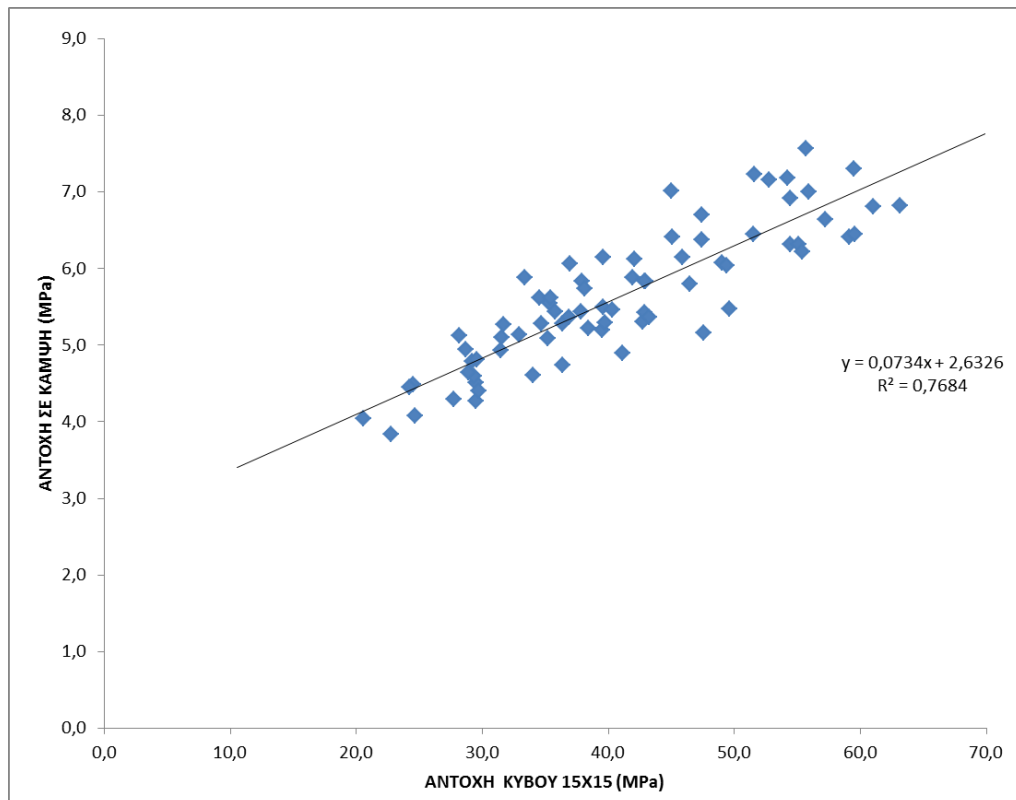
Σχ.5.16 Ευθύγραμμη συσχέτιση αντοχών.



Σχ.5.17 Ευθύγραμμη συσχέτιση αντοχών χωρίς το σημείο 0,0.



Σχ.5.18 Ευθύγραμμη συσχέτιση αντοχών.

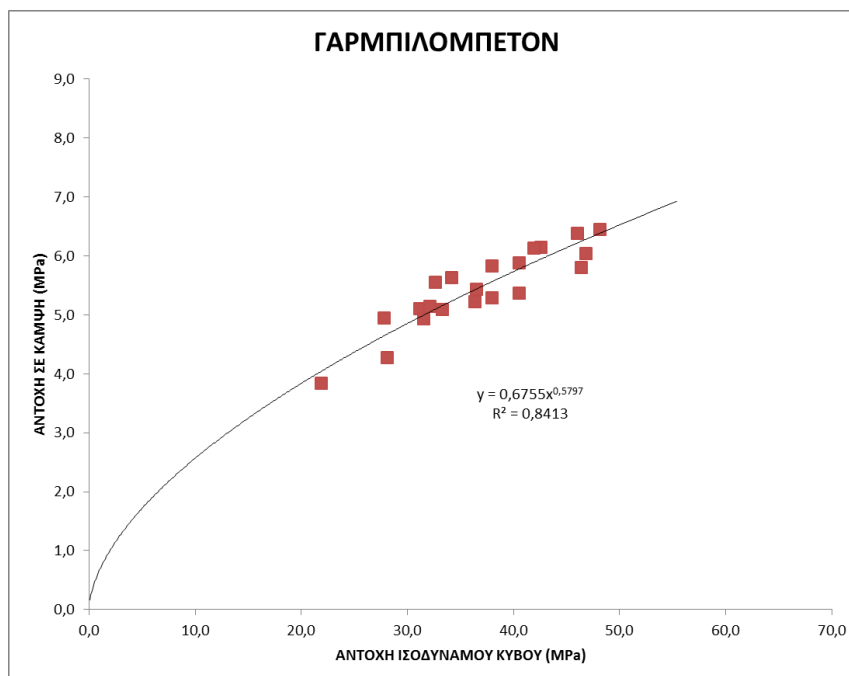
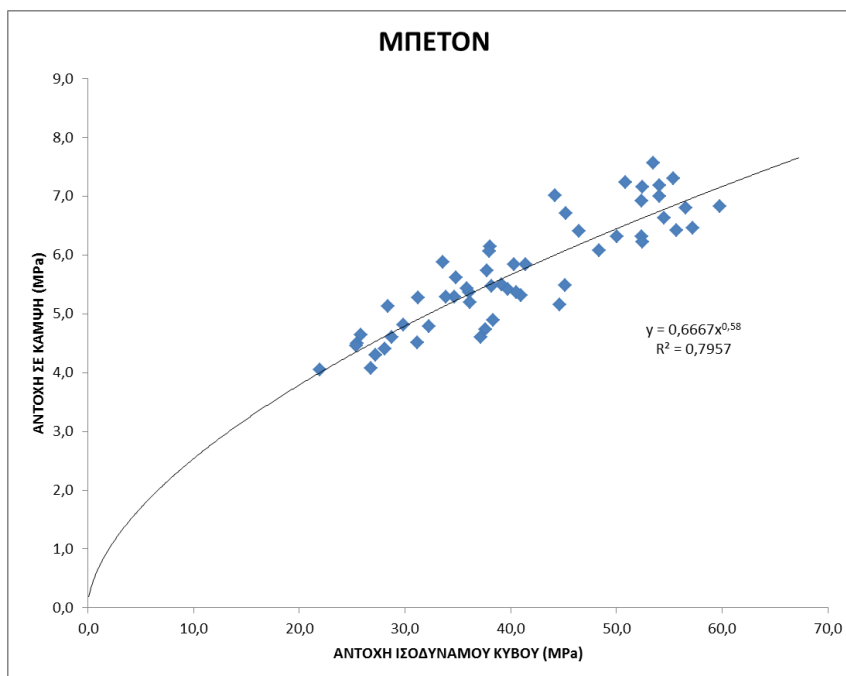


Σχ.5.19 Ευθύγραμμη συσχέτιση αντοχών χωρίς το σημείο 0,0.

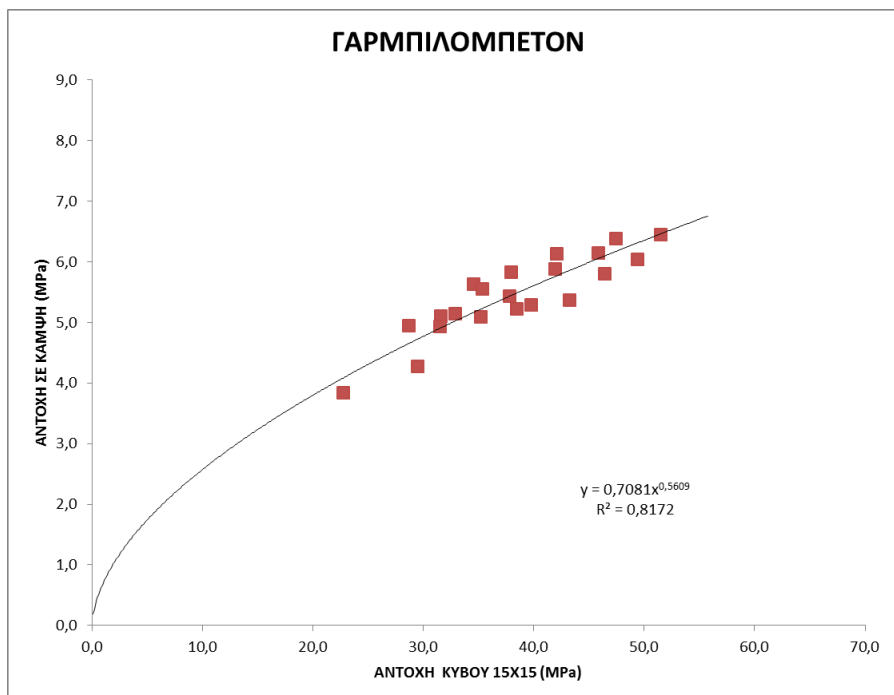
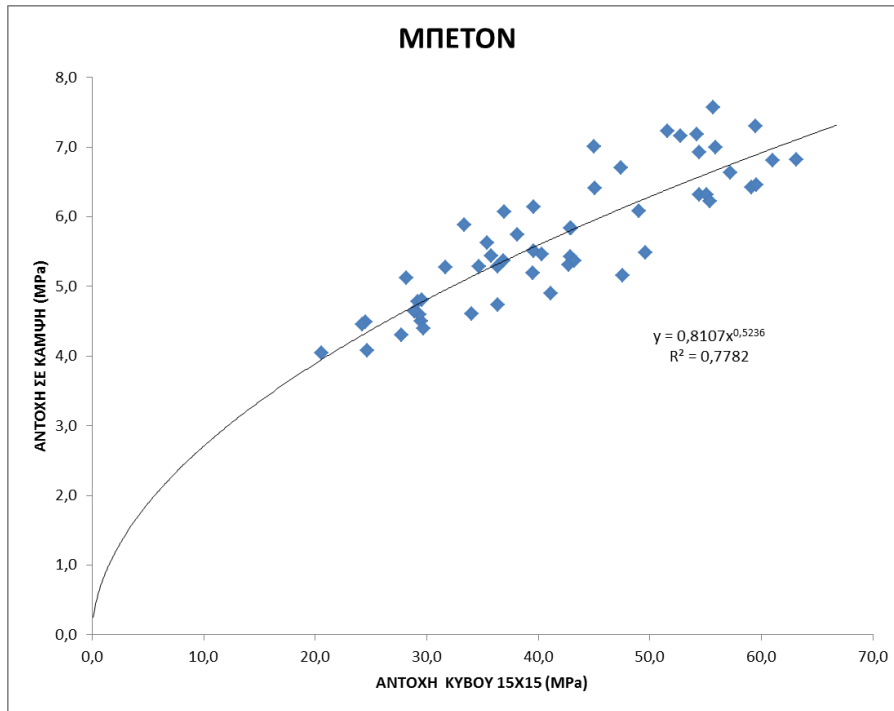
Το ευθύγραμμο μοντέλο δεν περιγράφει επαρκώς το φαινόμενο και αυτό φαίνεται και από την πολύ μικρή τιμή του R^2 είτε γίνει ή παραδοχή ότι η γραμμή πρέπει να περνάει από την

αρχή των αξόνων είτε όχι. Σημειώνεται ότι θεωρητικά η ευθεία θα πρέπει να διέρχεται από την αρχή των αξόνων αφού για μηδενική θλιπτική αντοχή η εφελκυστική αντοχή θα πρέπει να είναι επίσης μηδενική.

Στη συνέχεια φαίνονται τα παραπάνω διαγράμματα ξεχωριστά για την περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος και του γαρμπιλομετόν.



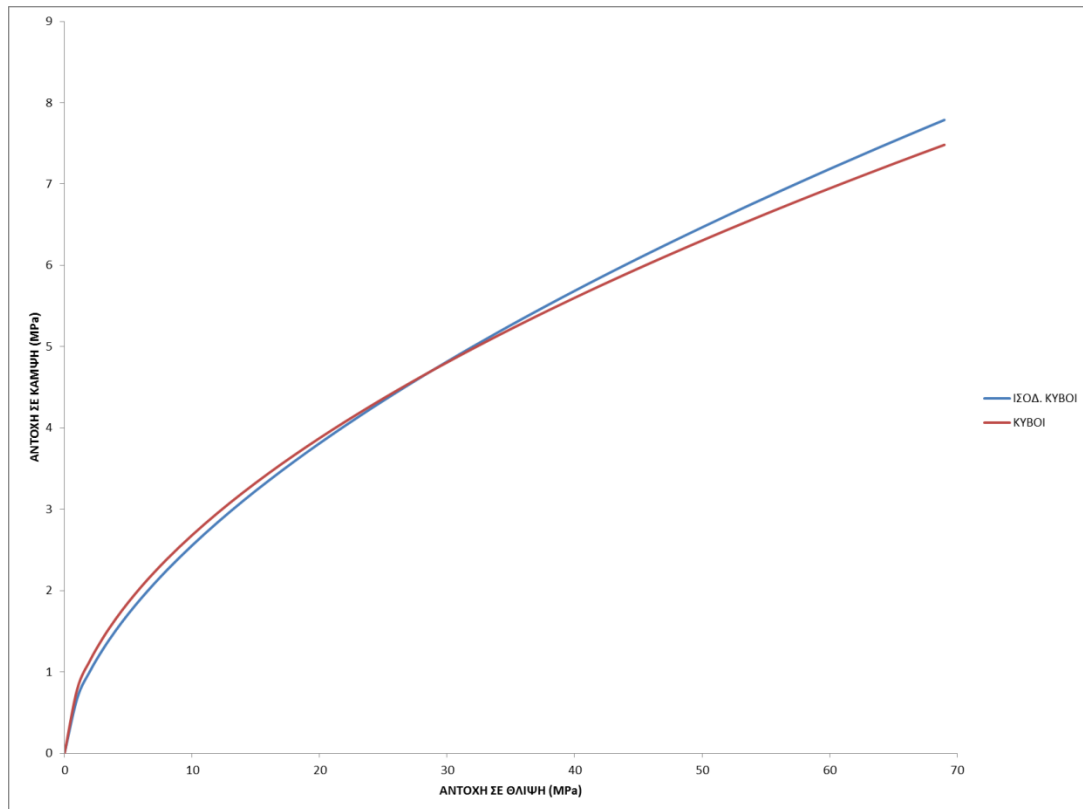
Σχ.5.20 Καμπύλες για μπετόν και γαρμπιλομετόν για την περίπτωση των ισοδύναμων κύβων.



Σχ.5.21 Καμπύλες για μετόν και γαρμπιλομετόν για την περίπτωση των κύβων.

Όπως παρατηρούμε δεν υπάρχει εμφανής διαφορά στις δύο περιπτώσεις γεγονός που υποδεικνύει ότι ο μέγιστος κόκκος του μείγματος δεν επηρεάζει την συσχέτιση των αντοχών, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από άλλους ερευνητές όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενα κεφάλαια.^[33]

Όπως φαίνεται στο Σχ.5.22, αλλά και όπως ήταν αναμενόμενο, η καμπύλη της συνάρτησης της αντοχής σε κάμψη με την αντοχή σε θλίψη ισοδύναμων κύβων και η καμπύλη της συνάρτησης της αντοχής σε κάμψη με την αντοχή των κύβων δεν διαφέρουν σημαντικά.

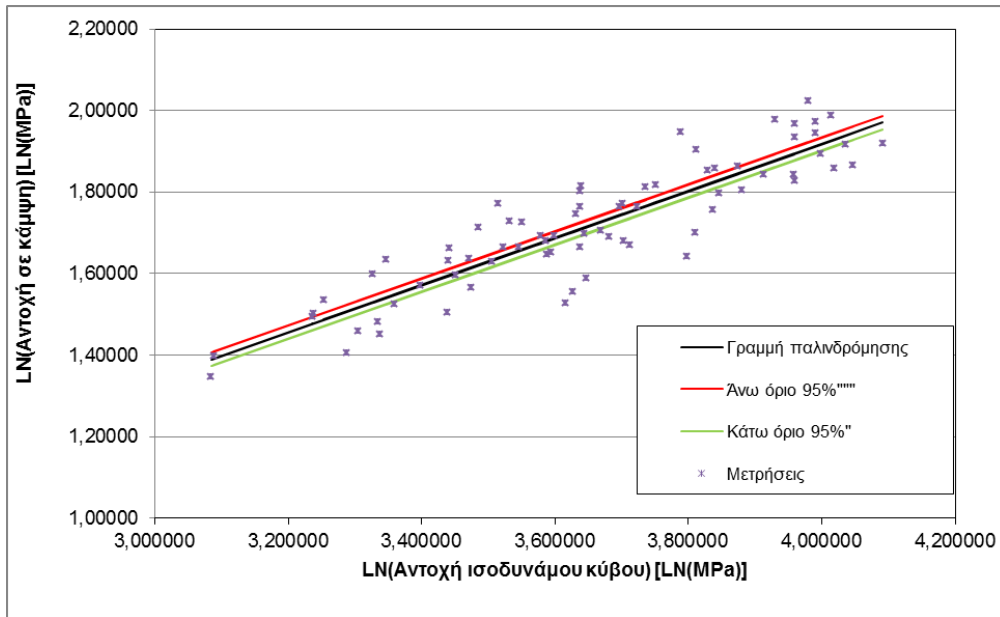


Σχ.5.22 Καμπύλες συσχέτισης αντοχών για τις δύο περιπτώσεις.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα όρια εμπιστοσύνης 5% και 95% της μέσης τιμής. Για την δημιουργία των καμπύλων έπρεπε να γίνει ο μαθηματικός μετασχηματισμός :

$$Y = \ln[y] = \ln[f(x)] = \ln[ax^b] = \ln[a] + b \cdot \ln[x]$$

Η διαδικασία υπολογισμού παρατίθεται αναλυτικά στο παράρτημα.



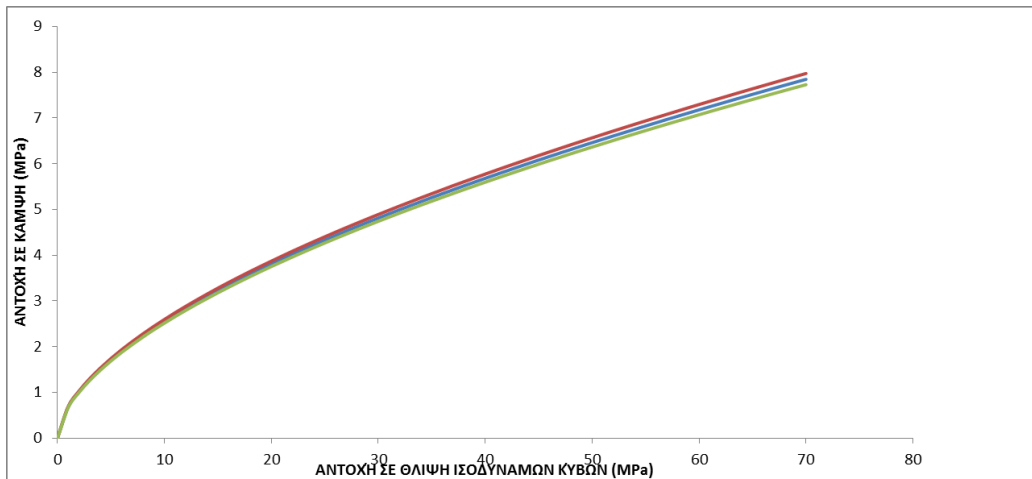
Σχ.5.23 Όρια 5% και 95% για την συσχέτιση αντοχής σε θλίψη ισοδύναμων κύβων και αντοχής σε κάμψη.

Οι αντίστοιχες εκθετικές καμπύλες είναι:

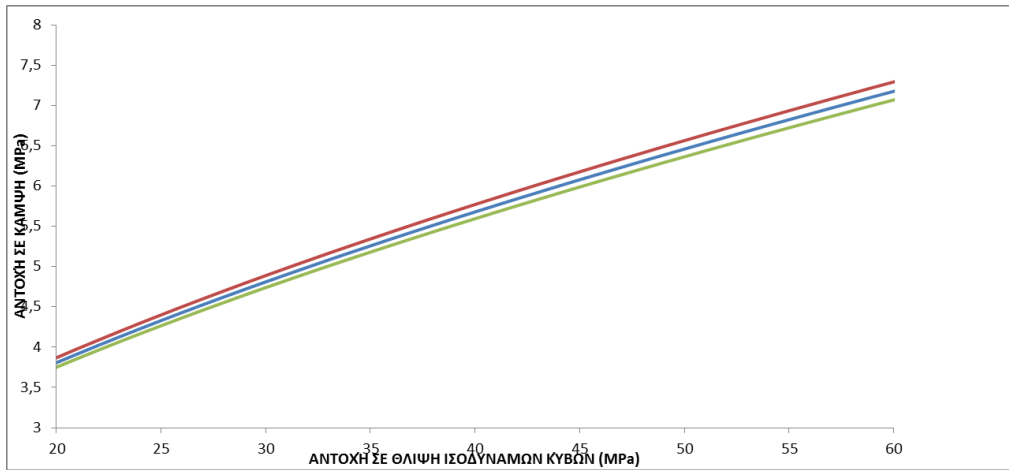
$$y=0,676 \cdot x^{0,577}$$

$$y=0,687 \cdot x^{0,577}$$

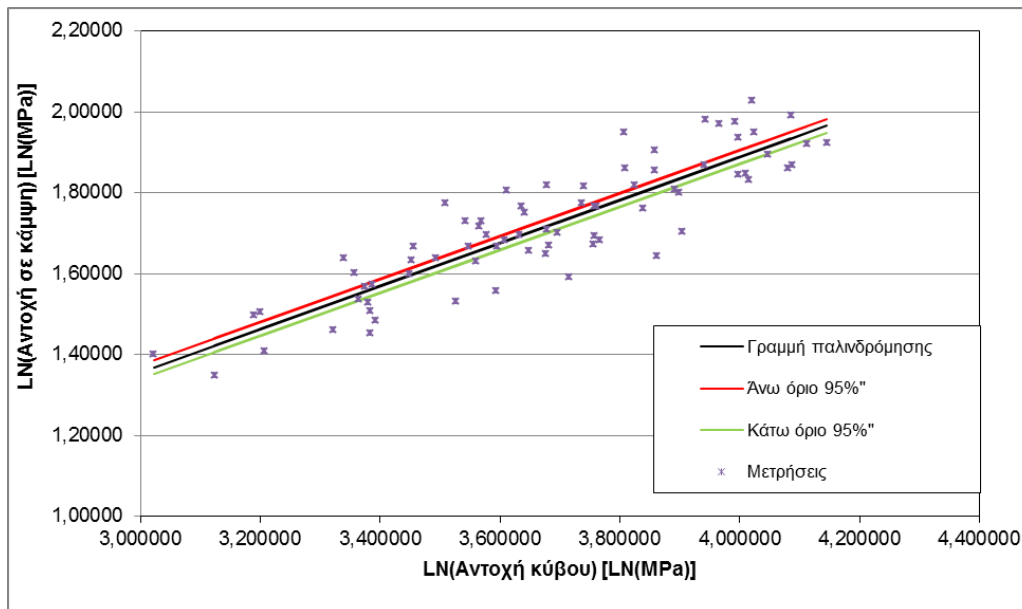
$$y=0,666 \cdot x^{0,577}$$



Σχ.5.24 Όρια 5% και 95%.



Σχ.5.25 Όρια 5% και 95% στην περιοχή των αντοχών που εξετάσαμε.



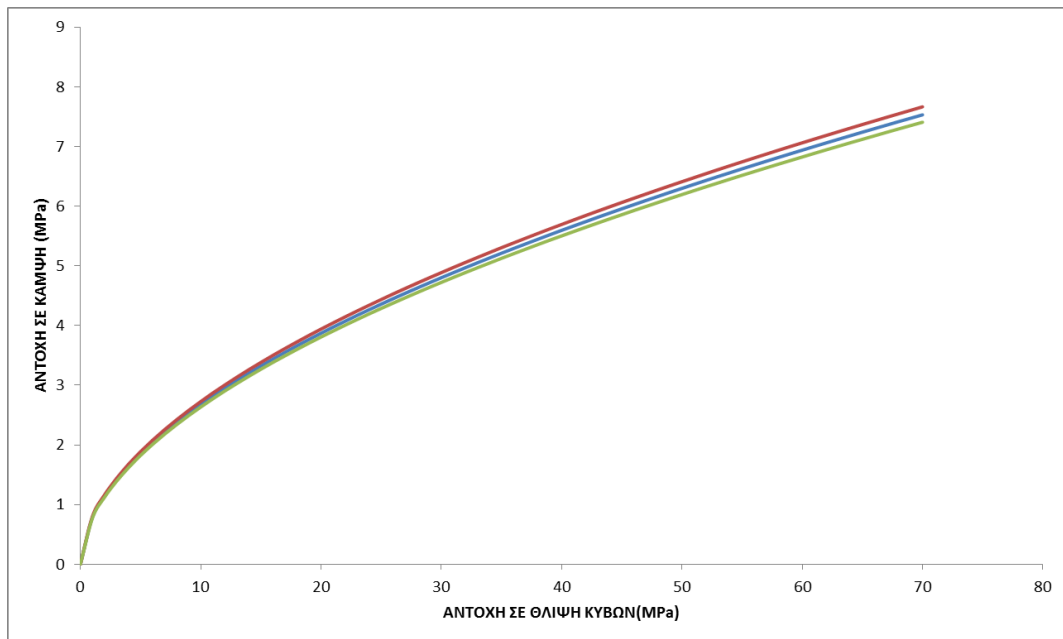
Σχ.5.26 Όρια 5% και 95% για την συσχέτιση αντοχής σε θλίψη κύβων και αντοχής σε κάμψη.

Οι αντίστοιχες εκθετικές καμπύλες είναι:

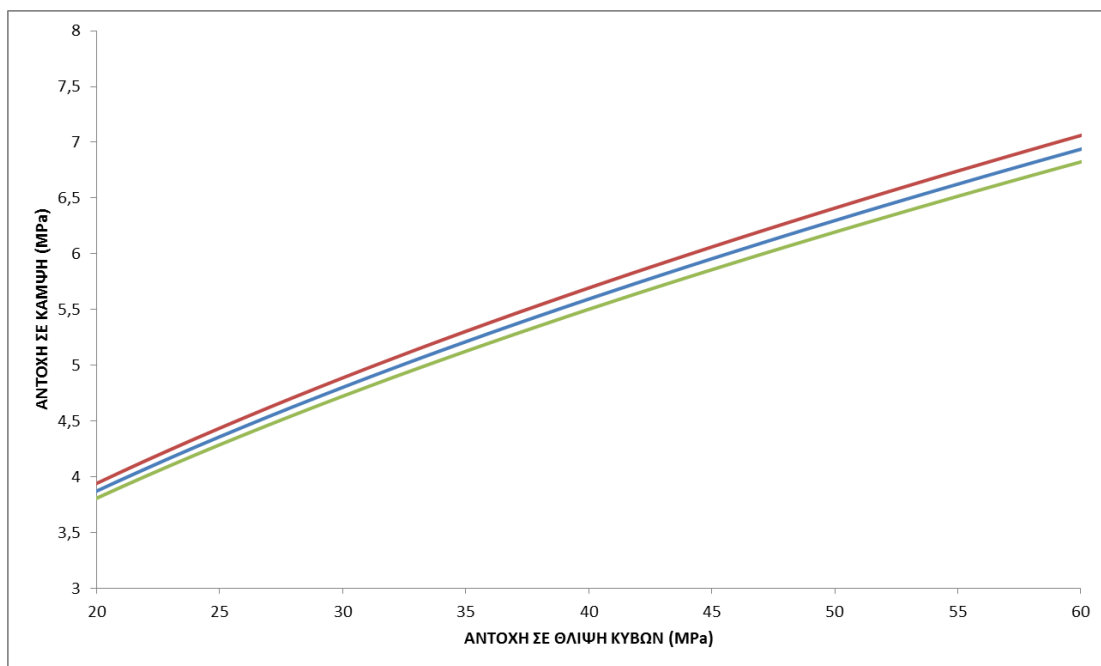
$$y=0,789 \cdot x^{0,531}$$

$$y=0,803 \cdot x^{0,531}$$

$$y=0,776 \cdot x^{0,531}$$

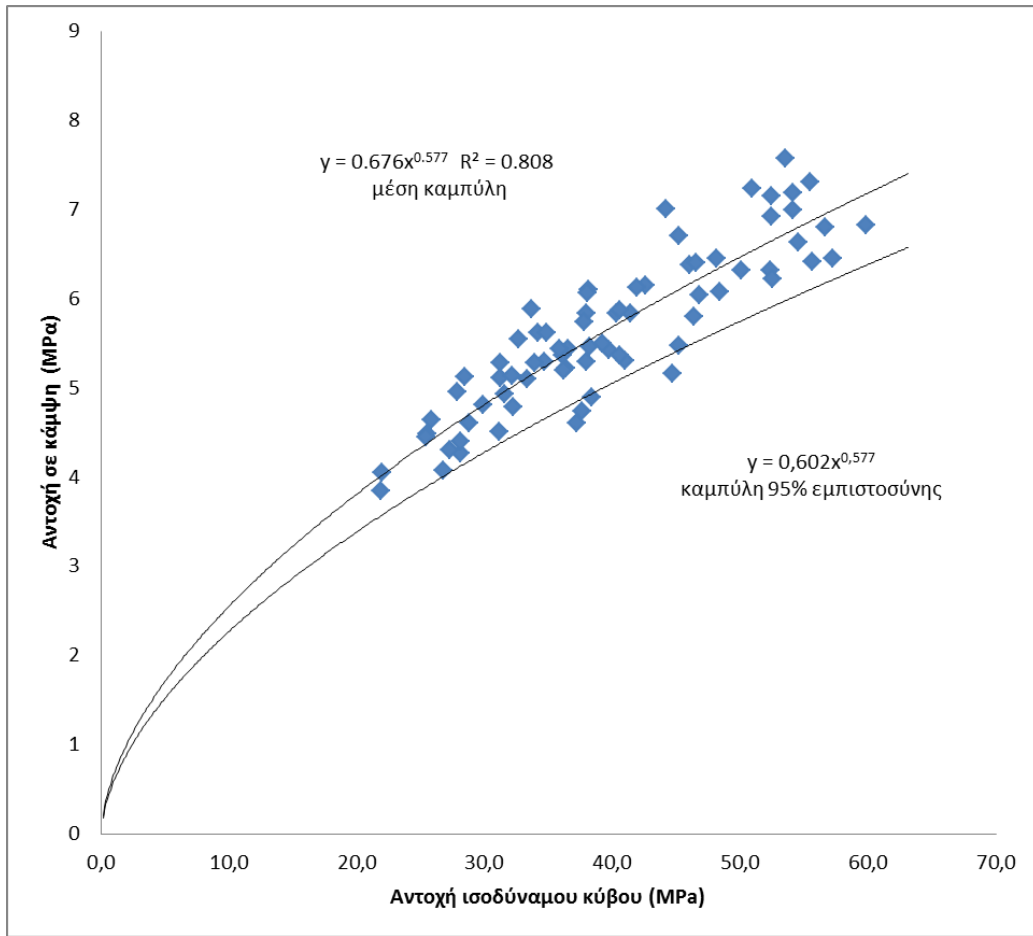


Σχ.5.27 Όρια 5% και 95%.

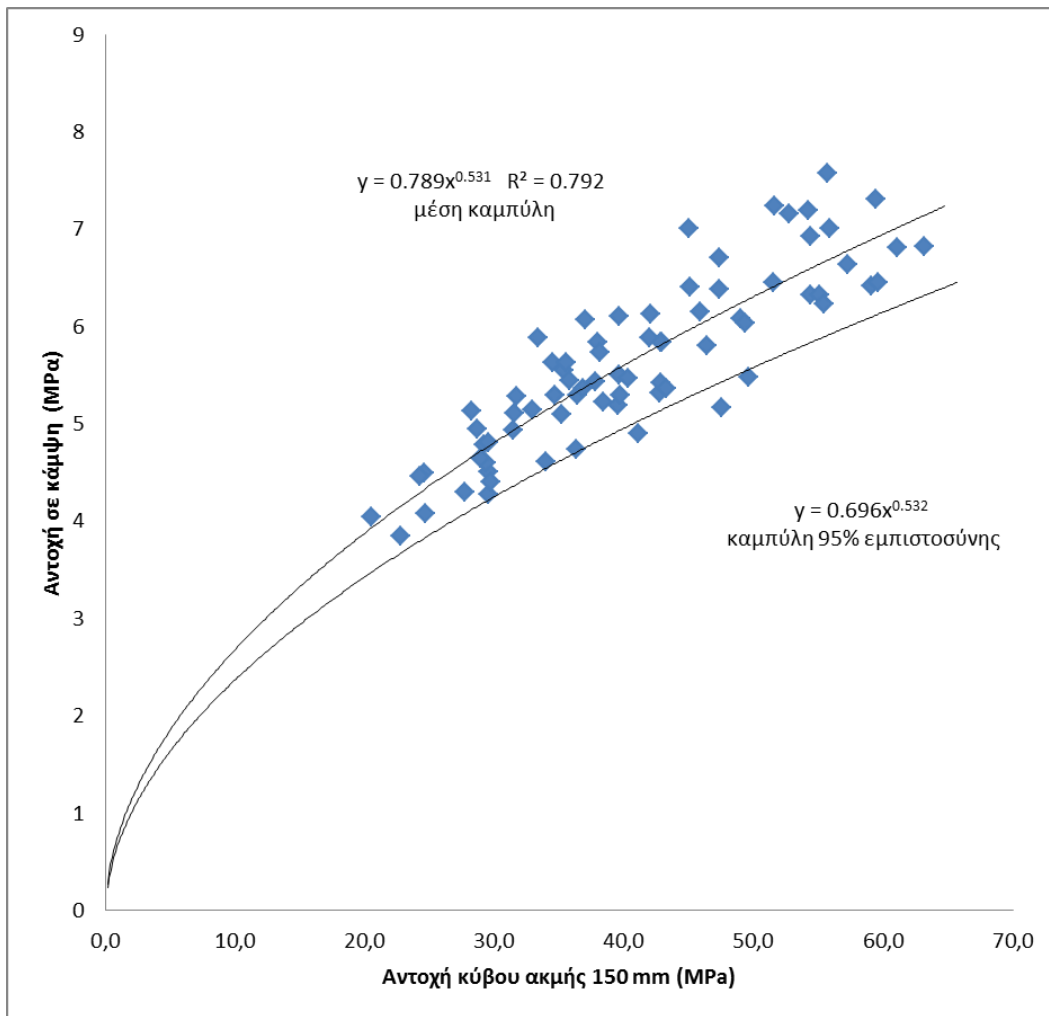


Σχ.5.28 Όρια 5% και 95% στην περιοχή των αντοχών που εξετάσαμε.

Στα Σχ. 5.26 και 5.27 απεικονίζονται οι καμπύλες εμπιστοσύνης 95% για τις δύο περιπτώσεις. Οι καμπύλες αυτές αποτελούν το όριο πάνω από το οποίο η αντοχή ενός δοκιμίου σε κάμψη έχει πιθανότητα 95% να υπερβαίνει την εικονιζόμενη αντοχή, για κάποια δεδομένη αντοχή σε θλίψη. Στα σχήματα απεικονίζονται οι μεμονωμένες τιμές των μετρήσεων (ως μεμονωμένη τιμή δεχόμαστε το μέσο όρο μίας τριάδας δοκιμίων).



5.29 Καμπύλη εμπιστοσύνης 95% για την συσχέτιση με ισοδύναμους κύβους.



5.30 Καμπύλη εμπιστοσύνης 95% για την συσχέτιση με κύβους ακμής 150mm.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

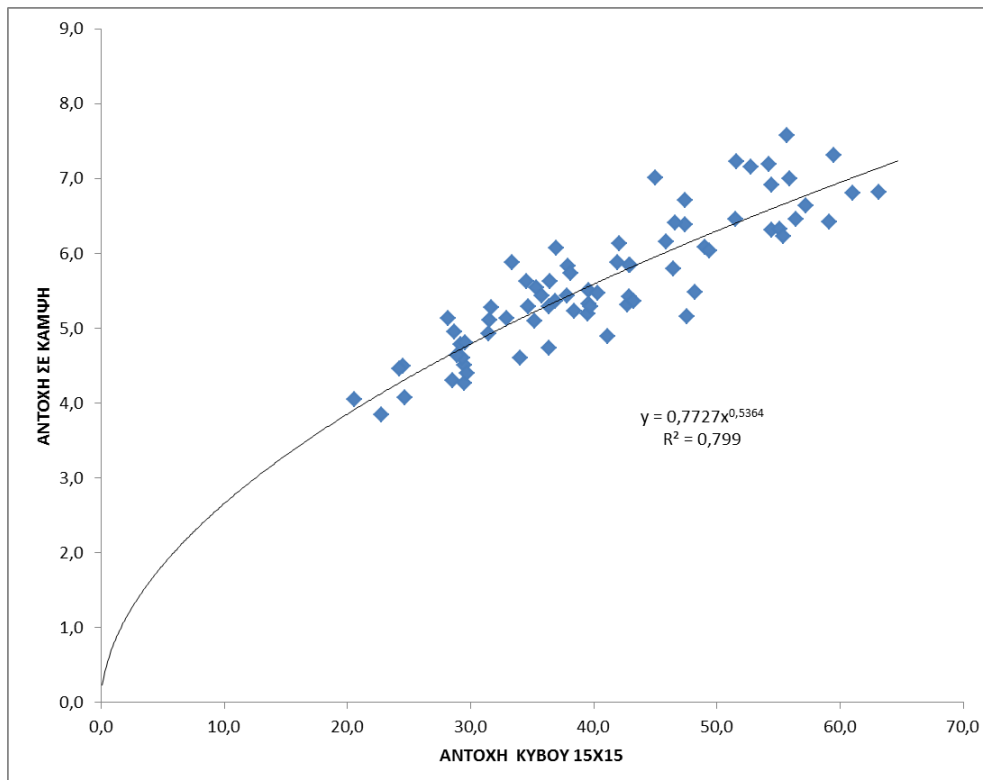
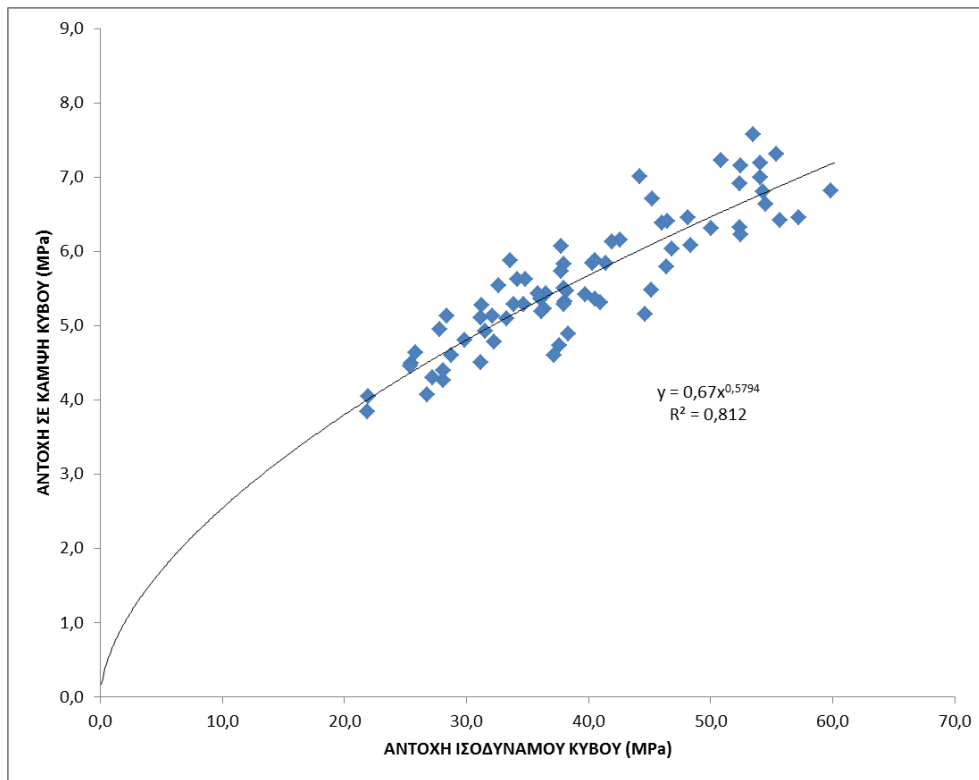
- [1] Στ. Κόλιας: Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος, 2011.
- [2] A.M. Neville: Properties of Concrete, Pearson Education Limited, Fourth Edition, 1995.
- [3] A.M. Neville, J.J. Brooks: Concrete Technology, Prentice Hall, Second Edition, 2010.
- [4] Ken W. Day: Concrete Mix Design, Quality Control and Specification, E&FN SPON Second Edition, 1999.
- [5] A.Hummel, Das Beton – ABC (W. Ernst, Berlin, 1959).
- [6] T.C. Powers, The non-evaporable water content of hardened portland cement paste: its significance for concrete research and its method of determination, ASTM Bull. No.158, pp. 68-76 (May 1949).
- [7] T.C. Powers, Structure and physical properties of hardened portland cement paste, J. Amer. Ceramic Soc., 41, pp.1-6 (Jan.1958).
- [8] T.C. Powers, The physical structure and engineering properties of concrete, Portl. Cem. Assoc. Res. Dept. Bull.90 (Chicago, July 1958).
- [9] A. Delibes Liniers, Microcracking of concrete under compression and its influence on tensile strength, Materials and structures, 1987, 20, 111-116.
- [10] G. Griffiths, N. Thom: Concrete Pavement Design Guidance Notes, Taylor&Francis, 2007.
- [11] C. Avram, I. Facaoaru, I. Filimon, O. Mirsu, I. Terteia: Concrete Strength and Strains, Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.
- [12] Surendra P. Shah, G. Winter, Inelastic Behavior and Fracture of Concrete, Cornell University, 1965.
- [13] T.W. Bremner, T.A. Holm: Elastic Compatibility and the Behavior of Concrete, ACI Journal, March-April 1986.
- [14] D.J. Hannant: The tensile strength of concrete: a review paper, The Structural Engineer, No7 vol.50 July 1972.
- [15] A.M. Neville, The failure of concrete compression test specimens, Civil Engineering, 52, No.613, pp.773-4 (London, July 1957).
- [16] Johnston, C.D., 'Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression, Magazine of Concrete Research, Vol.22, No.70, March1970.
- [17] P. Rossi et al., Effet d'échelle sur le comportement du beton en traction, Bulletin Liaison Laboratoires des Ponts et Chaussees, 182, pp.11-20 (Nov.-Dec. 1992).
- [18] St. Koliaς, R.I.T. Williams: Uniaxial Tension Tests on Cement-Stabilized Granual Materials, American Society for Testing and Materials 1979.
- [19] P.E. Peterson: Direct Tensile Tests on Prismatic Concrete Specimens, Cement and Concrete Research Vol. 11,pp.51-56, 1981.
- [20] E.S. Katsaragakis: A new tensile test for concrete, Materials and Structures,1987, 20, 463-466.
- [21] P.J.F. Wright: Comments on an indirect tensile test on concrete cylinders, Magazine of Concrete Research: July 1955.
- [22] P.J.F. Wright: The effect of test on the flexural strength of concrete, Magazine of Concrete Research: October 1952.
- [23] J. D. Todd: "The Determination of Tensile Stress/Strain Curves for Concrete", ICE Proceedings, Vol 4, Issue 2, 01 March 1955, pages 201-211.

- [24] N.Thom: Principles of Pavement Engineering, Thomas Telford.
- [25] Comite Euro-International du Beton, CEB FIP Model Code 90, Thomas Telford.
- [26] Clayton, N., BRE Digest 451 Tension Tests for Concrete, ISBN 86081 4387.
- [27] Akawaza, Tsuneo, "Tension Test Method for Concretes", Rilem Bulletin (Paris), No.16, pp.11-23.
- [28] Carneiro, Frenando Luiz Lobo B. and Barcellos, Aguinaldo, "Tensile Strength of Concretes", RILEM Bulletin (Paris), No.13, Mar.1953, pp.97-123.
- [29] CEB-FIP Model Code for Concrete structures, Third Edition, Comite Euro-International du Beton, Paris, 1978, 348pp.
- [30] Francis.A. Oluokun, Prediction of Concrete Tensile Strenght from Its Compressive Strenght: Evaluation of Existing Relations for Normal Weight Concrete, ACI Materials Journal, May-June 1991.
- [31] Francis.A. Oluokun, Edwin.G. Burdette and J. Harold Deatherage, Spliting Tensile Strength and Compressive Strength Relationship at Early Ages, ACI Materials Journal, March-April 1991.
- [32] Francois de Larrard, Concrete Mixture Proportioning, E&FN SPON.
- [33] de Larrard, F. and Belloc, A. (1997) The influence of aggregate on the compressive strength of normal and high-strength concrete. ACI Materials Journal, 94(5),417-426.
- [34] Investigation of Flexural to Compressive Strength Relationships, K.E. Hassan, J.W.E. Chandler, H.M Harding, 28 Feb 2003.
- [35] Johnston, C.D. and Sidwell, E.H., 'Testing concrete in tension and compression', Magazine of Concrete Materials Research and Standards, MTRSA, Vol.9, No 5, p.16-20.
- [36] Ward, M.A., Written discussion on reference 13. p.193.
- [37] Garwood, F., Appendix to reference 3.
- [38] Welch, G.B., 'Tensile strains in unreinforced concrete beams', Magazine of Concrete research, Vol. 18, No. 54, March 1966, p.9-18.
- [39] S. Popovic, Relations Between Various Strengths of Concrete, Record 210, 1967.
- [40] Waltz, K. and Wischers, G. Konstruktions-Leichtbeton hoher Festigkeit (Structural Lightweight Concrete of High Compressive Strength). Betontechnische Berichte 1964, Beton-Verlag GmbH, Duesseldorf, pp.127-186, 1965.
- [41] T.Seshadri Sekhar and P.Srinivasa Rao, Relationship between Compressive, Split Tensile, Flexural Strength of Self Compacted Concrete, International Journal of Mechanics and Solids Vol.3 No.2 (2008) pp.157-158.
- [42] L.H.C. Tippett, "On the Extreme Individuals and the Range of Samples Taken from a Normal Population", Biometrika, Vol.17 (1923).
- [43] ASTM C39/C39M-3, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Speciments.
- [44] ASTM C78-02 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading).
- [45] BS EN 12920 Testing Hardened Concrete.
- [46] Mitsuru Saito, Characteristics of Microcracking in Concrete Under Static and Repeated Tensile Loading.

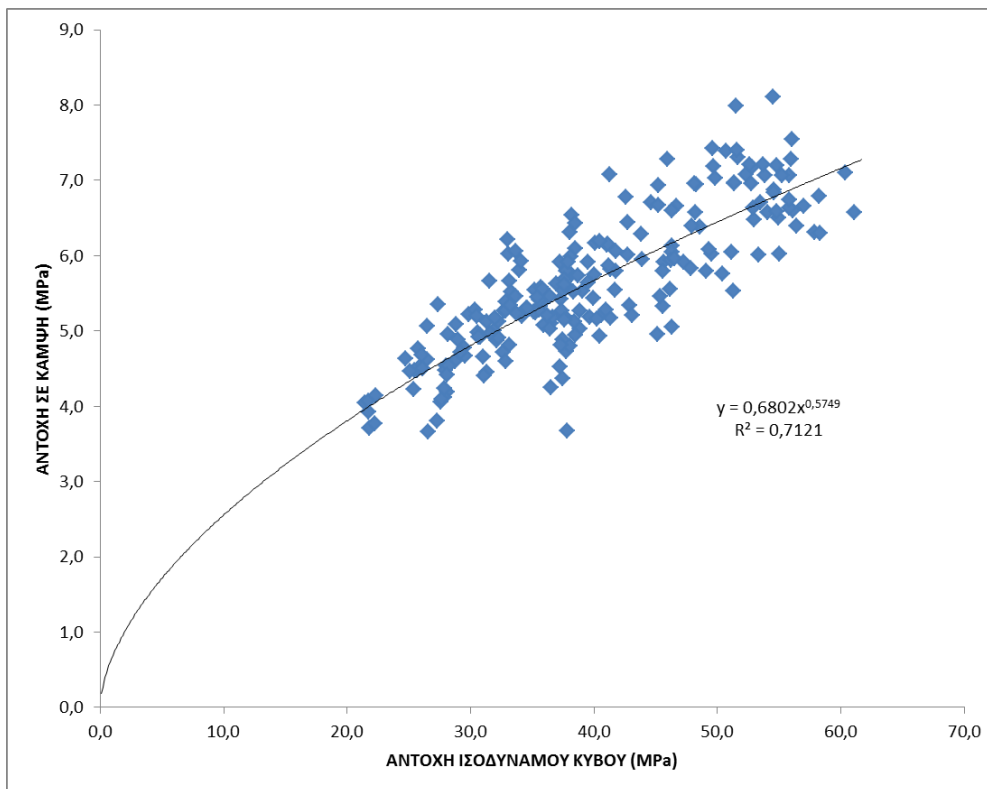
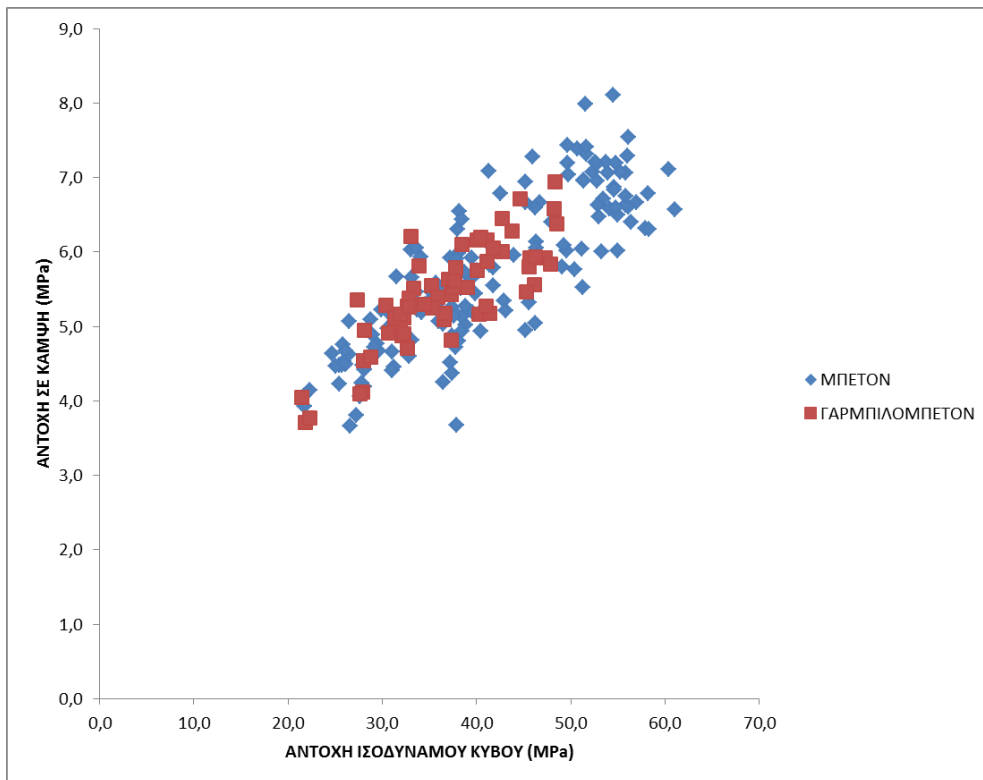
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

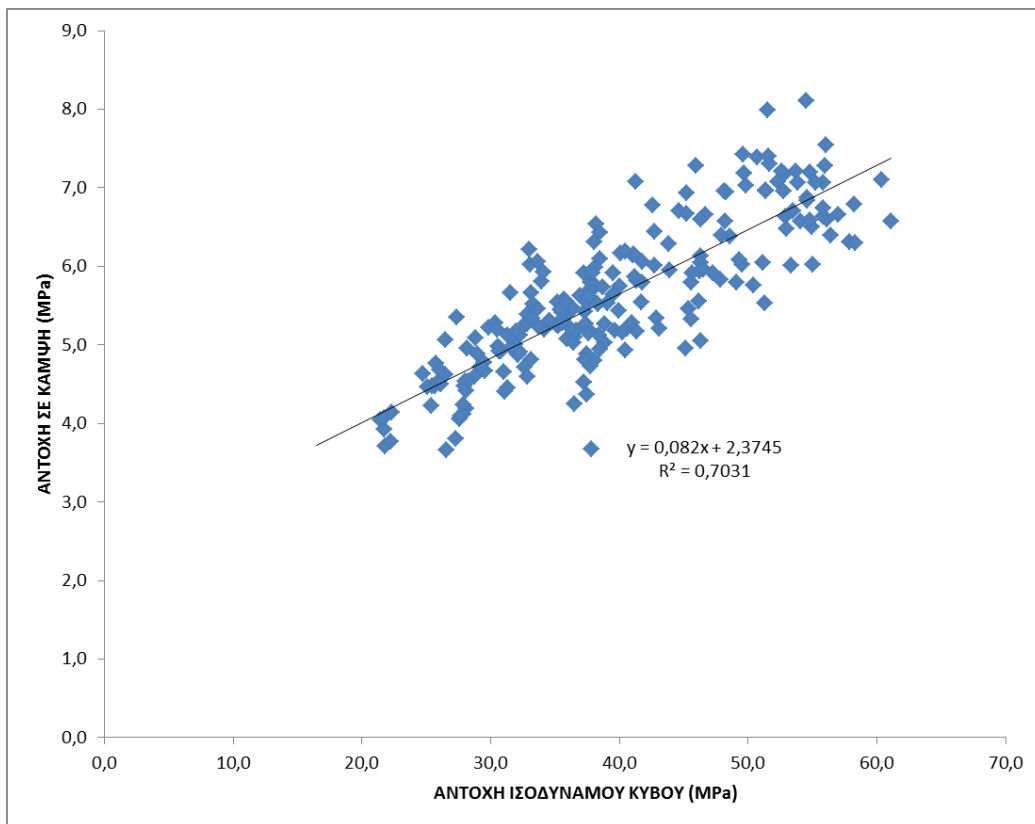
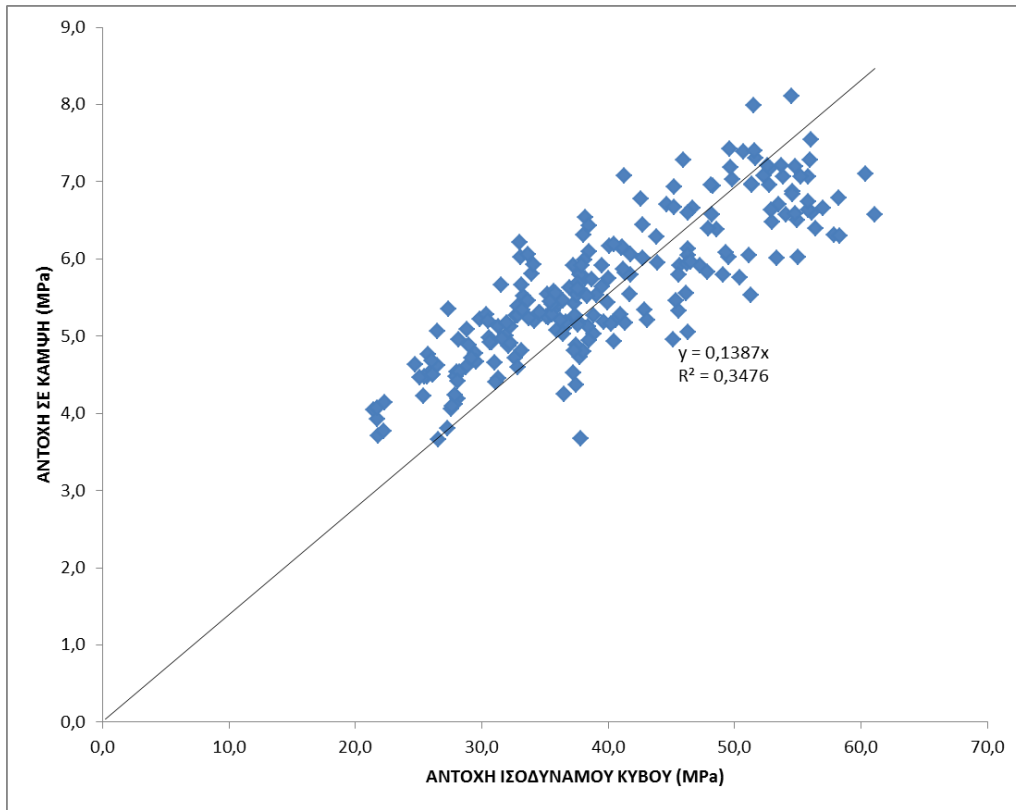
Table with 35 columns and 70 rows of data. Columns include row numbers, codes, and various numerical values. The table contains detailed data for each row, including values in columns 2 through 35.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΤΟΥ ΕΛΕΓΧΟΥΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΓΙΑ ΜΕΜΟΝΩΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ





ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΩΝ 5%-95%

	ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ			ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΜΕΝΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ		
	X1	X2	Y			
a/a	Μ.Ο. ΑΝΤΟΧΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΩΝ ΚΥΒΩΝ	Μ.Ο. ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΥΒΩΝ	Μ.Ο. ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	ln[X1]	ln[X2]	ln[Y]
1	34,2	34,5	5,6	3,530958	3,541925	1,727043
2	38,4	41,1	4,9	3,647059	3,716008	1,588419
3	36,4	38,4	5,2	3,593607	3,648925	1,653072
4	36,1	39,5	5,2	3,587400	3,677144	1,647119
5	41,0	42,7	5,3	3,712393	3,754979	1,669403
6	37,6	36,3	4,7	3,626649	3,592736	1,554982
7	36,5	37,8	5,4	3,598316	3,632309	1,692491
8	39,7	42,9	5,4	3,681351	3,758095	1,690465
9	50,9	51,6	7,2	3,929535	3,943522	1,978516
10	48,4	49,0	6,1	3,879500	3,891820	1,805005
11	28,4	28,2	5,1	3,346507	3,339322	1,634326
12	34,7	36,4	5,3	3,546451	3,594569	1,665251
13	33,3	35,2	5,1	3,505407	3,560099	1,628063
14	26,8	24,7	4,1	3,287157	3,206803	1,404625
15	32,3	29,2	4,8	3,473518	3,375310	1,565277
16	37,2	34,0	4,6	3,615592	3,526361	1,527143
17	38,1	39,6	6,1	3,639602	3,678829	1,815232
18	40,3	43,0	5,8	3,696351	3,760425	1,764046
19	36,1	36,9	5,4	3,585923	3,607308	1,680083
20	31,1	29,5	4,5	3,438600	3,384390	1,505188
21	52,4	52,7	7,2	3,959447	3,965248	1,967672
22	50,1	54,4	6,3	3,913355	3,996977	1,843244
23	31,2	31,6	5,1	3,439296	3,452102	1,630416
24	29,9	29,6	4,8	3,397245	3,386648	1,570073
25	41,4	42,9	5,8	3,722999	3,758095	1,764046
26	38,0	39,7	5,3	3,636752	3,682190	1,665818
27	40,5	43,2	5,4	3,702454	3,766612	1,679524
28	28,8	29,4	4,6	3,358696	3,379860	1,525839
29	27,8	28,7	4,9	3,326594	3,356897	1,599186
30	52,4	54,4	6,9	3,958875	3,996977	1,934271
31	52,4	55,1	6,3	3,958079	4,009754	1,843719
32	31,5	31,5	4,9	3,451257	3,448929	1,595745
33	32,2	32,9	5,1	3,470775	3,493473	1,636275
34	28,1	29,5	4,3	3,336600	3,384390	1,451145
35	27,2	27,7	4,3	3,304381	3,321432	1,458615
36	45,2	49,6	5,5	3,810138	3,904797	1,700923
37	44,6	47,6	5,2	3,798444	3,861992	1,641130
38	42,6	45,8	6,1	3,750993	3,825230	1,816289
39	40,5	41,9	5,9	3,702042	3,736002	1,771046
40	46,4	46,4	5,8	3,836617	3,838018	1,757513

41	46,8	49,4	6,0	3,845776	3,899275	1,797742
42	21,9	22,7	3,8	3,084277	3,123832	1,345733
43	39,2	39,6	5,5	3,668294	3,678408	1,705293
44	38,2	40,3	5,5	3,643577	3,696434	1,698364
45	48,1	51,5	6,5	3,874113	3,941582	1,864390
46	32,6	35,4	5,5	3,484363	3,565770	1,713077
47	21,9	20,5	4,0	3,088084	3,022050	1,397729
48	34,8	35,5	5,6	3,549905	3,568123	1,726510
49	35,8	35,8	5,4	3,578599	3,578134	1,693227
50	38,0	37,9	5,8	3,636884	3,635830	1,763531
51	41,9	42,1	6,1	3,735604	3,739256	1,812379
52	38,0	37,0	6,1	3,637586	3,610467	1,803194
53	45,2	47,4	6,7	3,811097	3,858271	1,903152
54	59,8	63,1	6,8	4,091229	4,145249	1,920153
55	55,6	59,1	6,4	4,019022	4,079795	1,858951
56	28,1	29,7	4,4	3,334820	3,391820	1,481605
57	46,0	47,4	6,4	3,829438	3,858622	1,852855
58	53,5	55,7	7,6	3,979339	4,020040	2,024325
59	44,2	45,0	7,0	3,787933	3,807403	1,947195
60	55,4	59,5	7,3	4,014580	4,085640	1,988559
61	54,1	54,2	7,2	3,990033	3,992681	1,972274
62	54,5	57,2	6,6	3,998843	4,047136	1,892660
63	33,9	34,7	5,3	3,522333	3,547028	1,665062
64	33,6	33,4	5,9	3,515022	3,508456	1,772067
65	25,9	28,9	4,6	3,252826	3,364994	1,534499
66	31,2	31,7	5,3	3,441486	3,456317	1,662979
67	37,7	38,1	5,7	3,630588	3,641089	1,746762
68	46,5	45,1	6,4	3,839345	3,808439	1,857547
69	56,6	61,1	6,8	4,035611	4,111802	1,917658
70	52,5	55,4	6,2	3,960051	4,015061	1,828734
71	54,1	55,9	7,0	3,990280	4,023743	1,945767
72	57,2	59,6	6,5	4,047107	4,087320	1,864545
73	25,5	24,5	4,5	3,238286	3,200576	1,501853
74	25,4	24,3	4,5	3,235405	3,188829	1,493353

m	0,577203	-0,39093	b		t	1,993464
sem	0,03323	0,121585	se _b		Δm	0,066243
r2	0,807338	0,070002	se _y		Δb	0,242374
F	301,712	72	df		ΔY	0,016222
ssereg	1,47849	0,352824	sse _{resid}			

m	0,531183	-0,23662	b		t	1,993464
sem	0,03219	0,118647	se _b		Δm	0,064169
r2	0,790881	0,072931	se _y		Δb	0,236519
F	272,3018	72	df		ΔY	0,016901
ssereg	1,448352	0,382962	sse _{resid}			

Y _{1/pre}	Y _{1/pre/-95%}	Y _{1/pre/+95%}		Y _{2/pre}	Y _{2/pre/-95%}	Y _{2/pre/+95%}
1,64715	1,66337	1,63093		1,64479	1,66170	1,62789
1,71417	1,73039	1,69794		1,73726	1,75417	1,72036
1,68331	1,69953	1,66709		1,70163	1,71853	1,68473
1,67973	1,69595	1,66351		1,71662	1,73352	1,69972
1,75188	1,76810	1,73565		1,75797	1,77487	1,74106
1,70239	1,71861	1,68616		1,67178	1,68869	1,65488
1,68603	1,70225	1,66981		1,69281	1,70971	1,67590
1,73396	1,75018	1,71774		1,75962	1,77652	1,74272
1,87721	1,89343	1,86099		1,85812	1,87502	1,84122
1,84833	1,86455	1,83211		1,83065	1,84755	1,81375
1,54069	1,55691	1,52446		1,53718	1,55408	1,52027
1,65609	1,67232	1,63987		1,67276	1,68966	1,65586
1,63240	1,64863	1,61618		1,65445	1,67135	1,63755
1,50643	1,52265	1,49021		1,46678	1,48368	1,44988
1,61400	1,63022	1,59778		1,55629	1,57319	1,53939
1,69600	1,71222	1,67978		1,63653	1,65343	1,61963
1,70986	1,72608	1,69364		1,71752	1,73442	1,70062
1,74262	1,75884	1,72640		1,76086	1,77776	1,74396
1,67888	1,69510	1,66266		1,67953	1,69643	1,66262
1,59384	1,61006	1,57762		1,56111	1,57802	1,54421
1,89448	1,91070	1,87826		1,86966	1,88656	1,85276
1,86787	1,88409	1,85165		1,88651	1,90341	1,86961
1,59424	1,61047	1,57802		1,59708	1,61398	1,58018
1,56997	1,58619	1,55375		1,56231	1,57921	1,54541
1,75800	1,77422	1,74178		1,75962	1,77652	1,74272
1,70822	1,72444	1,69199		1,71930	1,73620	1,70240
1,74614	1,76236	1,72992		1,76414	1,78105	1,74724
1,54772	1,56394	1,53150		1,55871	1,57561	1,54181
1,52919	1,54541	1,51297		1,54651	1,56341	1,52961
1,89415	1,91037	1,87792		1,88651	1,90341	1,86961
1,89369	1,90991	1,87747		1,89330	1,91020	1,87640
1,60115	1,61737	1,58493		1,59540	1,61230	1,57850
1,61241	1,62864	1,59619		1,61906	1,63596	1,60216
1,53497	1,55119	1,51875		1,56111	1,57802	1,54421
1,51637	1,53259	1,50015		1,52767	1,54457	1,51077
1,80830	1,82452	1,79207		1,83755	1,85445	1,82065
1,80155	1,81777	1,78532		1,81481	1,83171	1,79791

1,77416	1,79038	1,75793		1,79528	1,81218	1,77838
1,74590	1,76212	1,72968		1,74789	1,76479	1,73098
1,82358	1,83980	1,80736		1,80207	1,81897	1,78517
1,82887	1,84509	1,81264		1,83461	1,85151	1,81771
1,38933	1,40555	1,37310		1,42271	1,43961	1,40581
1,72642	1,74264	1,71020		1,71729	1,73419	1,70039
1,71216	1,72838	1,69593		1,72687	1,74377	1,70997
1,84522	1,86144	1,82900		1,85709	1,87399	1,84019
1,62026	1,63648	1,60404		1,65746	1,67436	1,64056
1,39152	1,40775	1,37530		1,36865	1,38555	1,35174
1,65809	1,67431	1,64187		1,65871	1,67561	1,64181
1,67465	1,69087	1,65843		1,66403	1,68093	1,64713
1,70829	1,72451	1,69207		1,69468	1,71158	1,67778
1,76527	1,78150	1,74905		1,74961	1,76651	1,73271
1,70870	1,72492	1,69248		1,68120	1,69810	1,66430
1,80885	1,82507	1,79263		1,81283	1,82973	1,79593
1,97054	1,98676	1,95432		1,96527	1,98217	1,94837
1,92886	1,94509	1,91264		1,93050	1,94740	1,91360
1,53394	1,55016	1,51772		1,56506	1,58196	1,54816
1,81944	1,83566	1,80321		1,81302	1,82992	1,79612
1,90596	1,92218	1,88974		1,89876	1,91566	1,88186
1,79548	1,81170	1,77926		1,78581	1,80271	1,76891
1,92630	1,94252	1,91008		1,93361	1,95051	1,91671
1,91213	1,92835	1,89591		1,88423	1,90113	1,86733
1,91722	1,93344	1,90099		1,91315	1,93006	1,89625
1,64217	1,65840	1,62595		1,64751	1,66441	1,63060
1,63795	1,65418	1,62173		1,62702	1,64392	1,61012
1,48661	1,50284	1,47039		1,55081	1,56771	1,53391
1,59551	1,61173	1,57929		1,59932	1,61622	1,58242
1,70466	1,72088	1,68844		1,69747	1,71437	1,68057
1,82515	1,84138	1,80893		1,78636	1,80326	1,76946
1,93844	1,95466	1,92222		1,94750	1,96440	1,93060
1,89483	1,91105	1,87860		1,89612	1,91302	1,87922
1,91227	1,92850	1,89605		1,90073	1,91763	1,88383
1,94507	1,96130	1,92885		1,93450	1,95140	1,91760
1,47822	1,49444	1,46200		1,46348	1,48038	1,44658
1,47656	1,49278	1,46034		1,45724	1,47414	1,44034

	[1]	[2]	[3]		[4]	[5]	[6]
Slope (b)	0,577	0,577	0,577		0,531	0,565	0,565
Intercept (ln(a))	-0,391	-0,375	-0,407		-0,237	-0,220	-0,254
a	0,676	0,687	0,666		0,789	0,803	0,776
ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ							
	[1]	$y=0,676*x^{0,577}$					
	[2]	$y=0,687*x^{0,577}$					
	[3]	$y=0,666*x^{0,577}$					
	[4]	$y=0,789*x^{0,531}$					
	[5]	$y=0,803*x^{0,531}$					
	[6]	$y=0,776*x^{0,531}$					

LN	fr
1,5298034	4,6172691
1,5968724	4,9375654
1,5660380	4,7876418
1,5624529	4,7705083
1,6344600	5,1266887
1,5851078	4,8798173
1,5687577	4,8006807
1,6166152	5,0360157
1,7585942	5,8042722
1,7300972	5,6412023
1,4225311	4,1476051
1,5387741	4,6588753
1,5149963	4,5494044
1,3878297	4,0061460
1,4964921	4,4659953
1,5787292	4,8487902
1,5925752	4,9163931
1,6252416	5,0796460
1,5615996	4,7664397
1,4762002	4,3762851
1,7755999	5,9038215
1,7493861	5,7510710
1,4766047	4,3780556
1,4521268	4,2721909
1,6405516	5,1580139
1,5909329	4,9083257
1,6287491	5,0974942
1,4296470	4,1772245
1,4108980	4,0996350
1,7752747	5,9019019
1,7748227	5,8992349
1,4835589	4,4086075
1,4948993	4,4588876
1,4167447	4,1236749
1,3979092	4,0467304
1,6904879	5,4221253
1,6837976	5,3859712
1,6566155	5,2415406
1,6285128	5,0962899
1,7056232	5,5048153
1,7108547	5,5336890
1,2685435	3,5556701
1,6091016	4,9983186
1,5948661	4,9276694
1,7270257	5,6239018
1,5027883	4,4942026
1,2707908	3,5636695
1,5407726	4,6681955
1,5573674	4,7463098
1,5910088	4,9086983
1,6477872	5,1954706
1,5914134	4,9106850
1,6910364	5,4251006
1,8502570	6,3614542
1,8094034	6,1068028
1,4157051	4,1193902
1,7015217	5,4822835
1,7868965	5,9708928
1,6777814	5,3536651
1,8068856	6,0914468
1,7929655	6,0072407
1,7979632	6,0373379
1,5248070	4,5942566
1,5205703	4,5748333
1,3677158	3,9263718
1,4778784	4,3836354
1,5873790	4,8909130
1,7071815	5,5134002
1,8188006	6,1644606
1,7759429	5,9058472
1,7931055	6,0080814
1,8253088	6,2047107
1,3591882	3,8930315
1,3574978	3,8864564

	ΣX	270,1486516	ΣX^2	990,6579	\bar{X}	3,65065745
	ΣY	126,9950155	ΣY^2	219,7723	\bar{Y}	
	Σx^2	0,060790799	s_x	0,246558		
	Σy^2	0,02506831	s_y	0,15833		
	Σxy	466,176848		LN	α	ρ
	$b = \frac{(n \cdot \Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y) / (n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2) =$	0,577220576	$\alpha = (\Sigma Y - b \cdot \Sigma X) / n =$	-0,39109	0,67632216	
	$R^2 = \frac{(n \cdot \Sigma xy - \Sigma x \cdot \Sigma y)^2 / (n \cdot \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2) \cdot (n \cdot \Sigma y^2 - (\Sigma y)^2)}{}$?	$R = b \cdot s_x / s_y$	0,898873	R^2	0,807972
	$s_{y/x}^2 = (n-1) \cdot (s_y^2 - b^2 \cdot s_x^2) / (n-2)$	0,004880672	$s_{y/x}$	0,069862		
	$a = 10\%$	1,666294				
	1- α γραμμή εμπιστοσύνης $\bar{y} \pm t_{\alpha/2, n-2} \cdot s_{y/x} \cdot (1/n + (X-\bar{X})^2 / (n-1)S_x^2)^{0,5}$	0,577220576 * X - 0,39109	$\pm 1,666294 \cdot 0,069862 \cdot (1/174 + (X-3,65065745)^2 / (73 \cdot 0,060790799))^{0,5}$			
1- α γραμμή εμπιστοσύνης για μεμονωμένα	$\bar{y} \pm t_{\alpha/2, n-2} \cdot s_{y/x} \cdot (1 + 1/n + (X-\bar{X})^2 / (n-1)S_x^2)^{0,5}$					
μόντιπλεση	$\bar{y} \pm t_{\alpha, n-2} \cdot s_{y/x} \cdot (1 + 1/n + (X-\bar{X})^2 / (n-1)S_x^2)^{0,5}$					
	95% μόντιπλεσο όριο εμπιστοσύνης για μεμονωμένες τιμές	$t =$	1,665996224			
	$0,577220576 \cdot X - 0,39109 \pm 1,665996224 \cdot 0,069862 \cdot (1/174 + (X-3,65065745)^2 / (73 \cdot 0,060790799))^{0,5}$					
	$0,577220576 \cdot X - 0,39109$	0,11638983 * (1,013513514 + (X-3,6065745)^2 / 4,437728)^{0,5}				

