



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών

Μεταπτυχιακή Εργασία

Σχέση Αντοχής σε Διάρρηξη προς Αντοχή σε Θλίψη για Σκυροδέματα με Ασβεστολιθικά Αδρανή Αττικής

Γεωργίου Μιχάλης
Ρούκα Δήμητρα

Επιβλέποντες:
Κόλιας Στυλιανός
Μπαδογιάννης Ευστράτιος

Αθήνα, Ιούνιος 2019



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών

Μεταπτυχιακή Εργασία

Σχέση Αντοχής σε Διάρρηξη προς Αντοχή σε Θλίψη

για Σκυροδέματα με Ασβεστολιθικά Αδρανή Αττικής

Γεωργίου Μιχάλης

Ρούκα Δήμητρα

Επιβλέποντες:

Κόλιας Στυλιανός

Μπαδογιάννης Ευστράτιος

Αθήνα, Ιούνιος 2019

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία με τίτλο: *“Σχέση Αντοχής σε Διάρρηξη προς Αντοχή σε Θλίψη για Σκυροδέματα με Ασβεστολιθικά Αδρανή Αττικής”*, εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών *“Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση Κατασκευών”* με συντονίζουσα σχολή το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου από τον Οκτώβριο του 2018 έως τον Ιούνιο του 2019.

Θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε από καρδιάς τον τέως Αναπληρωτή Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντά μας, κ. Κόλια Στυλιανό, για την αμέριστη βοήθεια και συνεισφορά του στη διαδικασία εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Η διαρκής παρουσία, το επιστημονικό υπόβαθρο, η έμπρακτη βοήθεια και η καθοδήγησή του καθ’ όλη τη διάρκεια εξέλιξης της εργασίας, συνέβαλε τα μέγιστα στην επιτυχή περάτωσή της και κατ’ επέκταση στην ολοκλήρωση των μεταπτυχιακών μας σπουδών.

Επιπρόσθετα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε θερμά τον Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ και επιβλέποντά μας, κ. Μπαδογιάννη Ευστράτιο, για τις πολύτιμες υποδείξεις κατά την διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας. Οι συνεχείς επιστημονικές συμβουλές του καθ’ όλη τη διάρκεια διεξαγωγής της παρούσας ερευνητικής εργασίας και η έμπρακτη στήριξη που μας προσέφερε, αποτέλεσαν καθοριστικό παράγοντα για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας.

Ειλικρινείς ευχαριστίες εκφράζονται στην κα. Σ. Καραμάνου της “Lafarge”, στην κα. Μ. Κατσάκου και στον κ. Κ. Ζόμπολα της “Interbeton”, καθώς και στους κ. Δ. Τσιφτσόγλου και κ. Ε. Κοτσώνη της “Χάλυψ”, η αρωγή των οποίων υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται και στις διευθύνσεις των πιο πάνω εταιρειών για τις αποφάσεις των, με τις οποίες κατέστη δυνατή η έρευνα αυτή.

Τέλος, δεν θα μπορούσαμε να παραβλέψουμε τη συνεισφορά του κου. Κ. Ρούκα, τον οποίο ευχαριστούμε πολύ, τόσο για την μεταφορά, όσο και για την τοποθέτηση κάποιων δειγμάτων στο εργαστήριο σκυροδέματος του ΕΜΠ, καθώς και τη συνεισφορά της φίλης μας, Κωνσταντίνας Πουλλή, την οποία ευχαριστούμε θερμά για την πολύτιμη βοήθειά της στην επιμέλεια αυτού του τεύχους.

ΣΧΕΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΠΡΟΣ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΑΣΒΕΣΤΟΛΙΘΙΚΑ ΑΔΡΑΝΗ ΑΤΤΙΚΗΣ

Περίληψη

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η συμβολή στον προσδιορισμό μίας αξιόπιστης σχέσης μεταξύ θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής για σκυροδέματα. Για αυτό το σκοπό, χρησιμοποιήθηκαν 336 δοκίμια, 168 κυβικά, ακμής 150 mm και 168 κυλινδρικά, ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm. Για την δειγματοληψία και παρασκευή των δοκιμών, η οποία πραγματοποιήθηκε κατά την περίοδο Ιανουαρίου-Ιουνίου, συνέβαλαν τρεις ανεξάρτητες μονάδες παραγωγής σκυροδέματος με το τεχνικό τους προσωπικό. Τα δοκίμια συντηρήθηκαν για ένα διάστημα (7-10 ημέρες) στο θάλαμο συντήρησης της μονάδας και εν συνεχεία μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο ΕΜΠ, όπου σε ηλικία 28 ημερών πραγματοποιήθηκε η θραύση τους σε θλίψη και σε διάρρηξη. Χρησιμοποιήθηκαν μόνο μίγματα με θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή, μίγματα τα οποία καλύπτουν την πλειονότητα των σκυροδεμάτων που παράγονται στον ελλαδικό χώρο.

Η εργασία χωρίζεται σε έξι κεφάλαια, το περιεχόμενο των οποίων παρουσιάζεται συνοπτικά στις επόμενες παραγράφους.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύονται γενικά οι βασικές αρχές – ιδιότητες που διέπουν το σκυροδέμα σαν υλικό, γίνεται μια περιγραφή της συμπεριφοράς του σκυροδέματος, παρουσιάζονται οι διάφορες δοκιμές προσδιορισμού της θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής και αναλύονται οι παράγοντες επιρροής της αντοχής του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μία ανασκόπηση της συσχέτισης μεταξύ θλιπτικής και εφελκυστικής αντοχής, μέσα από διάφορες δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν, μετά από βιβλιογραφική έρευνα. Δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στις εργασίες που αφορούν ορισμένες ιδιαιτερότητες και διαφορές της δοκιμής από την θεωρία της γραμμικής ελαστικότητας στην οποία βασίζεται ο υπολογισμός της αντοχής σε διάρρηξη καθώς και στις διάφορες έρευνες που έχουν ως αντικείμενο τη σχέση της αντοχής σε θλίψη με την αντοχή σε διάρρηξη.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την παρασκευή των δοκιμών στις μονάδες σκυροδέματος, την συντήρηση και την θραύση των δοκιμών σύμφωνα με τα αντίστοιχα πρότυπα για δοκιμή σε θλίψη και δοκιμή σε διάρρηξη.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας, πριν και μετά τους στατιστικούς ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν και την απόρριψη ορισμένων τιμών με βάση τις απαιτήσεις επαναληψιμότητας των EN-12390 και ASTM C196. Αναφέρονται οι μορφές εξισώσεων που διερευνήθηκαν, καθώς και τα κριτήρια που οδήγησαν στην τελική επιλογή της κατάλληλης σχέσης θλιπτικής – εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη ($f_c - f_{ct,sp}$). Στη συνέχεια γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων και ανάλυση για την επιλογή των καταλληλότερων εξισώσεων που προσεγγίζουν ορθότερα τη σχέση $f_c - f_{ct,sp}$. Γίνεται, επίσης, σύγκριση με τις σπουδαιότερες από τις σχέσεις που έχουν προταθεί από την ξένη βιβλιογραφία και αποδεικνύεται ότι οι προτεινόμενες σχέσεις

συμφωνούν ικανοποιητικά με αυτές, με την παρατήρηση ότι οι σχέσεις που προτείνονται από αυτή την εργασία, προβλέπουν, στις περισσότερες περιπτώσεις, για την ίδια αντοχή σε θλίψη, ελαφρώς μεγαλύτερες αντοχές σε διάρρηξη, γεγονός που είναι αναμενόμενο δεδομένης της χρήσης των θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών. Στις πολύ χαμηλές αντοχές, παρατηρείται μια τάση των προτεινόμενων εξισώσεων να καμπυλώνουν προς τα κάτω, με αποτέλεσμα για την ίδια αντοχή σε θλίψη, να προκύπτουν μικρότερες αντοχές σε διάρρηξη, συγκριτικά με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας. Αυτό, θα μπορούσε να αποδοθεί στο πολύ μικρό πλήθος χαμηλών αντοχών που συγκεντρώθηκαν στην παρούσα εργασία.

Στο πέμπτο κεφάλαιο εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα. Από τις εξετασθείσες εξισώσεις παλινδρόμησης, φαίνεται ότι η πολυωνυμική και η εκθετική παρουσιάζουν καλύτερη προσέγγιση στις ευρεθείσες τιμές, σε όλο σχεδόν το εύρος των αντοχών που εξετάστηκαν, με κριτήριο την μορφή της καμπύλης τόσο στις χαμηλές τιμές του f_c (διέλευση από το μηδέν), όσο και στις υψηλές τιμές του f_c . Επιπρόσθετα, και η λογαριθμική καμπύλη φαίνεται να προβλέπει αρκετά καλά την αντοχή σε διάρρηξη, για τιμές του f_c μεγαλύτερες από 20 MPa ($f_c \geq 20$ MPa).

- Πολυωνυμική Εξίσωση: $f_{ct,sp} = -0.0006 f_c^2 + 0.1098 f_c + 0.048$
- Εκθετική Εξίσωση: $f_{ct,sp} = 0.224 f_c^{0.7376}$
- Λογαριθμική Εξίσωση: $f_{ct,sp} = 2.2314 \ln(f_c) - 4.7174$ για $f_c \geq 20$ MPa

Τέλος, από την παρούσα εργασία, βρέθηκε ότι ο λόγος αντοχής σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών προς αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμών ($f_{ct,sp}/f_{c,cube}$) κυμαίνεται μεταξύ 4.8% και 12.2% ($4.8\% \leq f_{ct,sp}/f_{c,cube} \leq 12.2\%$).

RELATIONSHIP BETWEEN CUBE COMPRESSIVE STRENGTH AND CYLINDER SPLITTING TENSILE STRENGTH FOR CONCRETE WITH LIMESTONE AGGREGATES

Abstract

This research report aims at contributing in the development of a reliable relationship between cube compressive strength and cylinder splitting tensile strength for concrete. For this purpose 168 cubes (150 mm) and 168 cylinders (150 mm diameter, 300 mm height) were prepared from samples taken directly for the agitating lorry from three ready-mix plants during the period of January – June. The specimens were prepared by the technical staff of the ready –mix unit and were cured for about 10 days at the laboratory of the unit after which they were transferred to the NTUA Concrete Laboratory curing room and were tested at an age of 28 days using a Wycheham testing machine. Only crushed limestone aggregates were used for manufacturing of concrete, a fact that is in line with the majority of the concrete produced in Greece.

The report consists of six chapters, the contents of which are in brief presented in the following.

The first chapter is a brief state of the art of the main properties of the concrete and its constituents and on the mechanisms and factors that influence concrete behavior. The various tests for determining concrete strength (compressive, tensile, flexural, splitting) along with the various factors that influence their results and their reliability are presented and criticized accordingly.

In the second chapter, the relationships between compressive and tensile strength with particular reference to splitting strength are reviewed. More specifically, the various research reports dealing with some particular points concerning the initiation and propagation of the failure crack together with the type of failure in general and the differences of the linear elastic behavior assumed for the strength calculation are presented and discussed. The various reports concerning the relationship between compressive strength and splitting strength are also presented and discussed.

The third chapter describes analytically the procedures followed for the preparation of the specimens in the ready-mix plants, the curing and testing of the specimens and the testing standards followed.

In the fourth chapter, the testing results are presented together with an initial statistical analysis used to check their reliability, based on the repeatability requirements of EN-12390 and ASTM C196. The results in the form of mean values of three specimens or as individual values are subsequently used to carry out regression analysis based on linear, power, polynomial and logarithmic models. In general, the equations do not have great differences between them with the exception of the low and high values where the differences become greater.

The models are compared for goodness of fit:

- a) empirically by the observation of the form of the curve and its fitness in the range of low f_c values and
- b) using the Integral Absolute Error I.A.E as criterion computed from the following equation:

$$IAE = \sum \frac{[(Q_i - P_i)^2]^{1/2}}{\sum Q_i} \times 100$$

where:

Q_i is the observed value and P_i is the predicted value.

This index measures the deviations of data from the regression equation and equals 0 when all predicted values are equal to the observed values. The most reliable regression equation is that which has the smallest IAE value. Since in many cases the IAE values were very close together, the comparison of the equation was supplemented empirically by simple observation of the curves especially at the limits of the observed data.

It should also be noted that the correlation coefficient R^2 , although is given by the software "EXCEL", it is not used for comparing the goodness of fit, since R^2 for nonlinear regression is an invalid goodness-of-fit statistic.

The regression equations rank as following in terms of the smallest value of IAE (%):

- Logarithmic: $f_{ct,sp} = 2.2314 \ln(f_c) - 4.7174$ $IAE = 8.27\%$
- Polynomial: $f_{ct,sp} = -0.0006 f_c^2 + 0.1098 f_c + 0.048$ $IAE = 8,31\%$
- Power: $f_{ct,sp} = 0.224 f_c^{0.7376}$ $IAE = 8.83\%$
- Linear: $f_{ct,sp} = 0.056 f_c + 1.1341$ $IAE = 9.26\%$

The goodness of fit of each regression equation is supplemented by the observation of each curve concerning goodness of fit in the low range of values and also of its form and specifically whether the shape of the curve for very low values shows a trend of passing through the point 0,0 which theoretically is an extreme point of the relationship. According to this procedure the logarithmic equation and the linear equation have the disadvantage that they deviate very much at the low values from point (0, 0) and therefore, the polynomial and the power equations are considered as the most suitable regression equations. More specifically the polynomial equation allows mathematically the point (0, 0) to be taken into consideration in determining the parameters of the equation and in this case the IAE value is further reduced. However, the differences between the well established by numerous reports power equation and the polynomial equation are very small in order to clearly define the most suitable one.

The derived regression equations were compared with the most known equations from the bibliography and the results are shown in Fig 1. It can be seen that the equations of this research, in general, show higher splitting values for the same compressive strength. This is attributed to the well-known beneficial effect of the crushed limestone aggregates on the relationship compression-tension. Furthermore, it can be seen that at lower values the derived equations show lower splitting values for the same compressive strength. This could be attributed to the small number of low strength specimens that were collected for this research report.

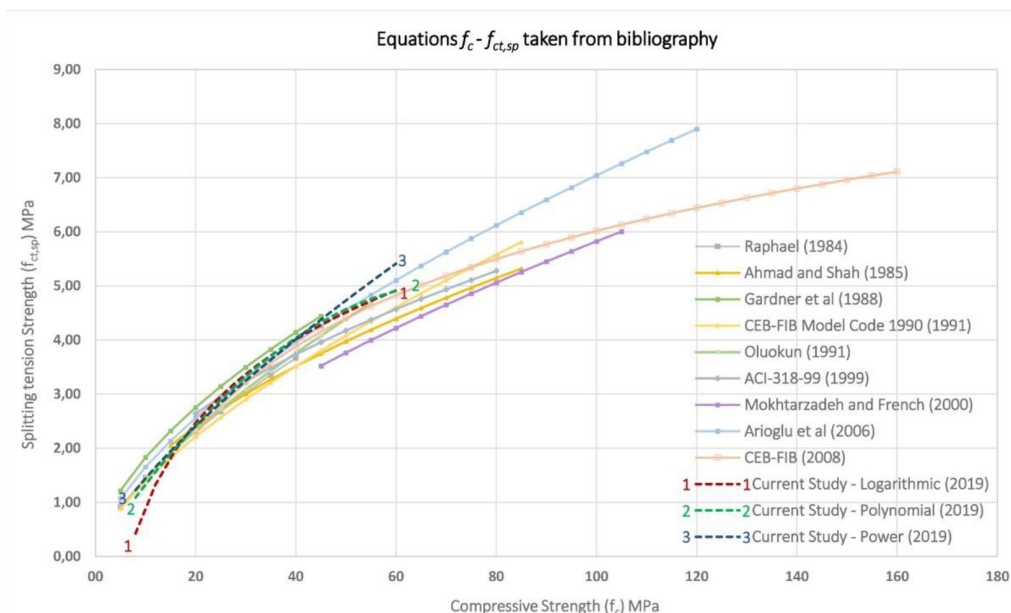


Figure 1 Equations f_c - $f_{ct,sp}$ taken from bibliography and comparison with the proposed equations of current study

In the fifth chapter, are presented the final conclusions. The following equations were found to fit well the data points of the current study:

- Polynomial:
$$f_{ct,sp} = -0.0006 f_c^2 + 0.1098 f_c + 0.048$$
- Power:
$$f_{ct,sp} = 0.224 f_c^{0.7376}$$
- Logarithmic:
$$f_{ct,sp} = 2.2314 \ln(f_c) - 4.7174 \quad \text{when } f_c \geq 20 \text{ MPa}$$

Also, it was found that the ratio between cylinder splitting tensile strength and cube compressive strength ($f_{ct,sp}/f_{c,cube}$) varies between 4.8% and 12.2% ($4.8\% \leq f_{ct,sp}/f_{c,cube} \leq 12.2\%$).

Finally, In the sixth chapter, some proposals for future study are mentioned.

Περιεχομενα

1 Εισαγωγή	1
1.1 Γενικά	1
1.2 Περιγραφή Συμπεριφοράς Σκυροδέματος.....	7
1.3 Τύποι δοκιμών	12
1.3.1 Δοκιμή σε θλίψη.....	12
1.3.1.1 Επιτεδότητα επιφανειών επαφής δοκιμίων και πλακών φόρτισης	12
1.3.1.2 Ορθή λειτουργία σφαιρικής άρθρωσης της άνω πλάκας φόρτισης.....	12
1.3.1.3 Επίδραση των συνθηκών επαφών δοκιμίου και πλακών μηχανής.....	13
1.3.2 Δοκιμή σε εφελκυσμό	15
1.3.2.1 Μονοαξονικός εφελκυσμός.....	15
1.3.2.2 Δοκιμή σε διάρρηξη.....	17
1.3.2.2.1 Γενικά	17
1.3.2.2.2 Περιγραφή – Ανάλυση Δοκιμής	18
1.3.2.2.3 Πλεονεκτήματα δοκιμής σε διάρρηξη	22
1.3.2.3 Δοκιμή σε κάμψη	23
1.4 Παράμετροι επιρροής της αντοχής του σκυροδέματος.....	27
1.4.1 Συνθήκες Συντήρησης κατά τη δοκιμή	27
1.4.1.1 Θλιπτική αντοχή.....	27
1.4.1.2 Εφελκυστική αντοχή	29
1.4.2 Μέγεθος και Σχήμα Δοκιμίων	30
1.4.3 Το υλικό της μήτρας	32
1.4.4 Αδρανή	32
1.4.4.1 Μέγεθος αδρανών	32
1.4.4.2 Ποσοστό αδρανών	34
1.4.4.3 Ορυκτολογική σύσταση των αδρανών	35
1.4.4.4 Συνάφεια- Μεταβατική ζώνη	36
2 Συσχέτιση αντοχών	41
2.1 Γενικά	41
2.2 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη.....	42
2.3 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής	48
2.4 Συσχέτιση εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη και μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής	49
2.5 Συσχέτιση μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής και εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη.....	50
2.6 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη	52
3 Πειραματική Διαδικασία	55
3.1 Διαδικασία Παρασκευής Δοκιμίων Σκυροδέματος.....	57
3.2 Συντήρηση Δοκιμίων Σκυροδέματος.....	59

3.3 Θραύση δοκιμίων	60
3.3.1 Δοκιμή σε θλίψη.....	61
3.3.2 Δοκιμή σε διάρρηξη	62
4 Αποτελέσματα	69
4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων	69
4.1.1 Στατιστική Αξιολόγηση	69
4.1.2 Διερεύνηση Εξίσωσης Συσχέτισης Αντοχών	73
4.1.2.1 Γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης	75
4.1.2.2 Εκθετική εξίσωση παλινδρόμησης	76
4.1.2.3 Πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης.....	78
4.1.2.4 Λογαριθμική εξίσωση παλινδρόμησης	81
4.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα	83
4.3 Σύγκριση με βιβλιογραφία	88
5 Συμπεράσματα	91
6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	95
7 Βιβλιογραφία	97
Παράρτημα Α	103
Παράρτημα Β	107
Παράρτημα Γ	113

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Το σκυρόδεμα αποτελεί το πλέον διαδεδομένο δομικό υλικό. Αρχικά, παρασκευαζόταν με την ανάμιξη μόνο τριών υλικών: τσιμέντο (συνήθως τσιμέντο Portland), αδρανή (φυσικά ή τεχνητά) και νερό. Αργότερα, για τη βελτίωση συγκεκριμένων ιδιοτήτων του σκυροδέματος, είτε σε ρευστή, είτε σε σκληρυμένη μορφή, κρίθηκε αναγκαία η χρήση χημικών προσθέτων - σε πολύ μικρές ποσότητες- στο μείγμα^[1].

Μερικές από τις εκτεταμένες εφαρμογές του σκυροδέματος, είναι η κατασκευή φραγμάτων, κτιρίων, γεφυρών, δεξαμενών, σηράγγων, τοίχων αντιστήριξης, οδοστρωμάτων κτλ. Πριν από την εμφάνισή του, οι περισσότερες κατασκευές ήταν ξύλινες, λιθόχτιστες, είτε από οπτόπλινθους. Ωστόσο, η «ανωτερότητα» των ιδιοτήτων του σκυροδέματος σε σχέση με αυτές του ξύλου, της πέτρας και του τούβλου, είχε ως αποτέλεσμα, εδώ και περισσότερο από ένα αιώνα, το σκυρόδεμα να μελετάται διεξοδικά και να εφαρμόζεται ως το κύριο υλικό κατασκευής στατικών φορέων.

Μία από τις κύριες ιδιότητες του σκυροδέματος, είναι η ικανότητά του - για όσο χρονικό διάστημα βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση (νωπό σκυρόδεμα)- να έχει τέτοια εργασιμότητα/συνεκτικότητα, ώστε να μπορεί να μορφώνεται σε καλούπια κάθε σχήματος, πριν στερεοποιηθεί (σκληρυμένο σκυρόδεμα) και αποκτήσει σταδιακά την τελική αντοχή του (με εύρος από 1 MPa μέχρι 200 MPa), την οποία έχει τη δυνατότητα να ρυθμίσει εκ των προτέρων ο κατασκευαστής^[2].

Επίσης, το σκυρόδεμα παρουσιάζει σχετικά καλή συμπεριφορά στο νερό και στην πυρκαγιά σε αντίθεση με άλλα υλικά, όπως το ξύλο, ο χάλυβας, το πλαστικό κτλ. Το σχετικά μικρό κόστος κατασκευής των έργων από σκυρόδεμα, καθώς και το γεγονός ότι η διαδικασία παρασκευής του είναι γενικά απλή εργασία, και τα υλικά που απαιτούνται είναι άμεσα διαθέσιμα στις περισσότερες περιοχές^[2], αποτελούν μερικά από τα πλεονεκτήματα του σκυροδέματος.

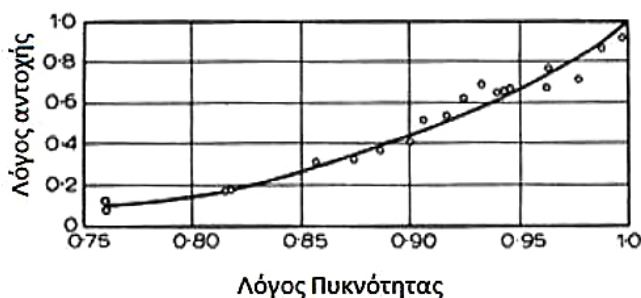
Η ιδιότητα, όμως, του σκυροδέματος που εξετάζεται περισσότερο, είναι η θλιπτική του αντοχή, καθώς αυτή επηρεάζει και άλλες ιδιότητες αυτού. Όντας σημείο αναφοράς για χιλιάδες έρευνες, είναι αυτή που χρησιμοποιείται κυρίως για τον σχεδιασμό του σκυροδέματος ως δομικό υλικό. Η ποιότητα του σκυροδέματος, εξάλλου, καθορίζεται από την αντοχή του σε θλίψη.

Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η ποιότητα των υλικών, οι αναλογίες των υλικών ανάμιξης, ο τρόπος μεταφοράς, τοποθέτησης και συμπίκνωσης του σκυροδέματος, η παρουσία κενών στον τσιμεντοπολτό, ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) κτλ.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα υλικά ανάμιξης για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι το τσιμέντο, το νερό και τα αδρανή υλικά, φυσικά ή τεχνητά, καθώς και μικρές ποσότητες χημικών προσθέτων. Το τσιμέντο είναι υδραυλική λεπτόκοκκη κονία

(όταν αναμιχθεί με το νερό πήζει και σκληραίνει) που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό για την παραγωγή σκυροδέματος. Ο τσιμεντοπολτός - δηλαδή το μείγμα τσιμέντου και νερού - πήζει και σκληραίνει μέσω της αντίδρασης της ενυδάτωσης, τόσο μέσα στο νερό, όσο και στον αέρα. Τα υλικά σκύρα, γαρμπίλι, χαλίκι και άμμος ονομάζονται αδρανή, διότι διατηρούν όλες τις φυσικές και χημικές τους ιδιότητες και μετά την πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος. Σ' αυτά οφείλεται και η πετρώδης δομή του σκυροδέματος καθώς αποτελούν κατά προσέγγιση, το 80% του συνολικού βάρους του και καταλαμβάνουν το 70-75% του όγκου του.

Η παρουσία κενών στον τσιμεντοπολτό αποτελεί μια από τις κύριες παραμέτρους διαμόρφωσης της αντοχής του σκυροδέματος. Τα κενά αυτά, είναι δυνατό να δημιουργηθούν είτε από παγιδευμένο αέρα στη μάζα του τσιμεντοπολτού (κυρίως κατά τη φάση της ανάμιξης), είτε με την σκόπιμη εισαγωγή αέρα, με κατάλληλες διαδικασίες στην μάζα του σκυροδέματος, ώστε να μειωθεί το ίδιο βάρος του και να προσδοθούν πρόσθετες ιδιότητες σε αυτό όπως, για παράδειγμα, αυξημένη θερμομονωτική ικανότητα (ελαφροσκυρόδεμα). Τέλος, στη μάζα του τσιμεντοπολτού, μπορεί να δημιουργηθούν κενά από πλεονάζον νερό, το οποίο δεν ήταν απαραίτητο για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου και δεν απομακρύνθηκε. Ο βαθμός συμπύκνωσης συνδέεται άμεσα με το λόγο πυκνότητας-δηλαδή το λόγο της πυκνότητας μιας συγκεκριμένης σύνθεσης σκυροδέματος ως προς την πυκνότητα της ίδιας σύνθεσης σκυροδέματος, όταν αυτό υφίσταται πλήρη συμπύκνωση - και κατά συνέπεια με την αντοχή του. Συγκεκριμένα, όσο καλύτερη συμπύκνωση γίνεται (μεγαλύτερος λόγος πυκνότητας και επομένως λιγότερα κενά), τόσο μεγαλύτερη αντοχή παρουσιάζει το σκυρόδεμα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-1.



Σχήμα 1-1 Σχέση μεταξύ Λόγου Αντοχής και Λόγου Πυκνότητας^[3]

Είναι γενικά αποδεκτό ότι ο λόγος N/T ή αλλιώς η συγκέντρωση (ποσότητα) του τσιμέντου στον τσιμεντοπολτό, διαμορφώνει σε μεγάλο βαθμό την αντοχή του σκυροδέματος, ακόμα και όταν η τσιμεντόπαστα αναμειγνύεται με αδρανή και η σχέση αντοχής και σύνθεσης περιπλέκεται. Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι, όσο αυξάνεται ο λόγος νερού προς τσιμέντο, τόσο ελαττώνεται η αντοχή του σκυροδέματος^[4]. Αρκετές είναι οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν περιγράφοντας την παραπάνω συμπεριφορά, ωστόσο οι πιο γνωστές είναι αυτές του Feret (1892)^[5], του Bolomey (1935)^[6] και του Abrams (1919).

Η βασική παράμετρος της εξίσωσης του Feret, είναι η συγκέντρωση του τσιμέντου στο νωπό

τιμμετοπολτό σαν άρρητος όρος. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εξίσωση αρχικά αναπτύχθηκε για κονιάματα με εύρος αντοχής από 10 μέχρι 20 MPa, αποκτώντας την εξής μορφή:

$$f_c = K \left(\frac{v_c}{v_c + v_w + v_a} \right)^2$$

όπου f_c είναι η αντοχή του σκυροδέματος, v_c , v_w , και v_a οι απόλυτες ογκομετρικές αναλογίες του τσιμέντου, του νερού και του αέρα αντίστοιχα, και K μια εμπειρική σταθερά.

Το 1935 προτάθηκε από τον Bolomey η γραμμική μορφή της εξίσωσης του Feret, ως εξής:

$$f_{c28} = K R_{c28} \left(\frac{C}{W+V} - 0.5 \right)$$

όπου C , W είναι η μάζα τσιμέντου και νερού αντίστοιχα ανά μονάδα όγκου σκυροδέματος, V είναι ο όγκος του αέρα, K ένας συντελεστής που εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των αδρανών και R_{c28} η θλιπτική αντοχή του τυποποιημένου κονιάματος μετά από 28 ημέρες.

Το 1919 καθιερώθηκε ο 'γενικευμένος νόμος' του Duff Abrams, ο οποίος είναι ευρέως γνωστός για τη συσχέτιση της αντοχής του σκυροδέματος με το λόγο N/T. Σύμφωνα με το νόμο αυτό, η αντοχή του σκυροδέματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου N/T^[5] και δίνεται από τη σχέση:

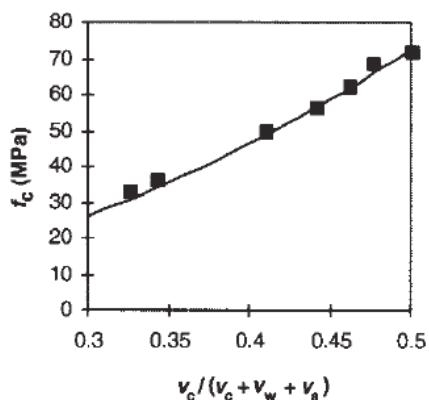
$$f_c = \frac{K_1}{K_2 \frac{w}{c}}$$

όπου K_1 , K_2 είναι εμπειρικές σταθερές, w είναι η μάζα του νερού (v) και c η μάζα του τσιμέντου (τ).

Η εξίσωση βρέθηκε να είναι αξιόπιστη για λόγους N/T με εύρος από 0.30 μέχρι 1.20^[7]. Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τον Yeh^[8], ο νόμος του Abrams μπορεί να εφαρμοσθεί για ηλικίες σκυροδέματος από 3 έως και 365 μέρες.

Ο Francois de Larrard προχώρησε στη σύγκριση αυτών των εξισώσεων^[4], όσον αφορά την αποδοτικότητά τους πάνω σε μια συγκεκριμένη βάση δεδομένων (Kim et al.^[9]), κατά την οποία χρησιμοποιήθηκαν επτά σκυροδέματα τσιμέντου Portland. Τα μείγματα παρουσίασαν την ίδια κάθιση, είχαν τις ίδιες αναλογίες και τον ίδιο τύπο αδρανών, καθώς και λόγους N/T εύρους από 0.31 μέχρι 0.60.

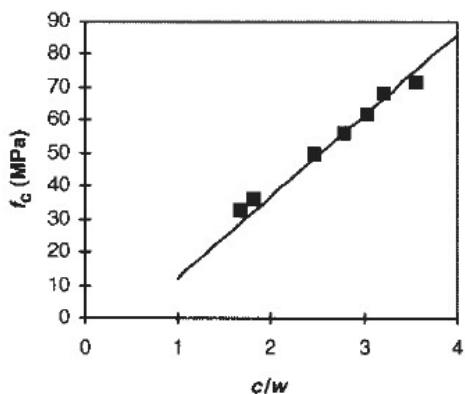
Όσον αφορά την εξίσωση του Feret, παρατηρήθηκε, ότι με μια απλή προσαρμογή της σταθεράς K , και συγκεκριμένα για $K=290$, η σχέση συμπίπτει με τα πειραματικά δεδομένα των Kim et al., με μέσο σφάλμα απόκλισης της τάξεως των 1.2 MPa^[4], όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 1-2 Επαλήθευση των δεδομένων^[9] με την εξίσωση του Feret ($K = 290$)

Συγκρίνοντας την εξίσωση του Bolomey με τα δεδομένα των Kim et al., η πιο κάτω μορφή της εξίσωσης παρατηρήθηκε να τα επαληθεύει (Σχήμα 1-3) με μέσο σφάλμα απόκλισης της τάξεως των 1.4 MPa:

$$f_c = 24.6 \left(\frac{C}{W} - 0.5 \right)$$



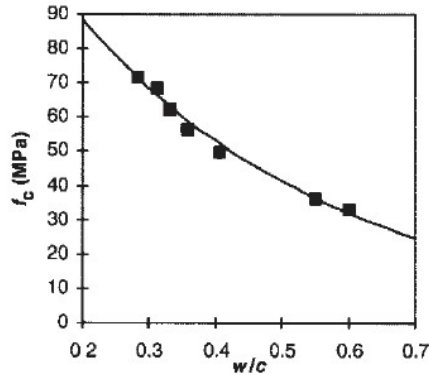
Σχήμα 1-3 Επαλήθευση των δεδομένων^[9] με την εξίσωση του Bolomey ($K_{Rc28}=24.6$)

Ωστόσο, στην συγκεκριμένη εξίσωση, ο περιεχόμενος αέρας δεν λαμβάνεται υπόψη, με αποτέλεσμα η σχέση να μην παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια στην περίπτωση που το σκυρόδεμα έχει υποβληθεί σε ξηρές συνθήκες (αύξηση πορώδους του σκυροδέματος) και στην περίπτωση που έχει προστεθεί σκόπιμα αέρας στη σύνθεση του σκυροδέματος (entrained air).

Τέλος, όσον αφορά την εκθετική εξίσωση του Abrams, παρατηρήθηκε ότι για $K_1=147$ και $K_2=1/0.0779$, δηλαδή:

$$f_c = 147 \times 0.0779 \frac{w}{c}$$

προκύπτει μία καλή προσέγγιση σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-4 (μέσο σφάλμα: 2.1MPa).

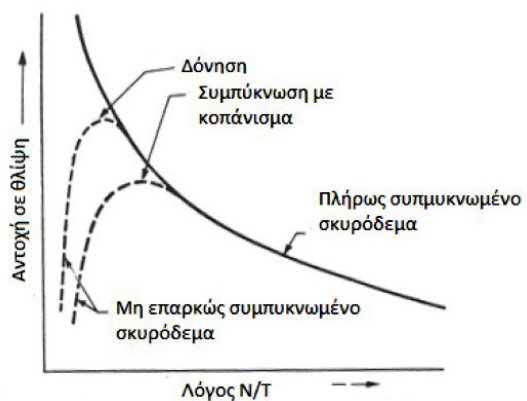


Σχήμα 1-4 Επαλήθευση των δεδομένων^[9] με την εξίσωση του Abrams ($K_1=147$, $K_2=1/0.0779$)^[4]

Συνοψίζοντας, όλες οι εξισώσεις που προτάθηκαν είναι αξιόπιστες και δίνουν παρόμοια αποτελέσματα. Παρ' όλα αυτά, σύμφωνα με τον Francois de Larrard^[4], η εξίσωση που προτείνει ο Feret συγκεντρώνει κάποια πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες:

- Βασική παράμετρος της εξίσωσης είναι η συγκέντρωση του τσιμέντου, η οποία αποτελεί φυσική παράμετρο.
- Λαμβάνει υπόψη τον περιεχόμενο αέρα.
- Είναι μαθηματική σχέση, η οποία μπορεί να επεξηγηθεί φυσικά.
- Δίνει εύλογα αποτελέσματα όταν είναι γνωστή η συγκέντρωση του τσιμέντου. Αυτό ισχύει και για την εξίσωση του Abrams, αλλά όχι και για την αντίστοιχη του Bolomey.

Αξίζει, όμως, να σημειωθεί ότι ο βαθμός συμύκνωσης του σκυροδέματος έχει αντίκτυπο στην επιρροή που έχει ο λόγος N/T στην αντοχή του. Πιο συγκεκριμένα, η αντοχή του σκυροδέματος είναι αντιστρόφως ανάλογη του λόγου N/T, μόνο όταν το σκυρόδεμα είναι πλήρως συμπακνωμένο^[1]. Για πολύ μικρούς λόγους N/T, όπου η καλή συμύκνωση είναι πρακτικά αδύνατη χωρίς περαιτέρω υποβοήθηση, ο παραπάνω κανόνας αποκλίνει. Έτσι, μετά από κάποια τιμή του N/T που αντιστοιχεί σε ορισμένη ποσότητα νερού, η συμύκνωση με απλό “κοπάνισμα” ή με δόνηση δεν επαρκεί, η σχέση αντοχής και λόγου N/T αποκλίνει της συνεχούς γραμμής και οι αντοχές ελαττώνονται με την μείωση του N/T (Σχήμα 1-5). Η επίτευξη μεγαλύτερων τιμών αντοχής γίνεται δυνατή με τη χρήση άλλων ισχυρότερων μεθόδων συμύκνωσης, 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 συμύκνωσής του.



Σχήμα 1-5 Αντοχή σκυροδέματος σε σχέση με το λόγο νερού προς τσιμέντο $(N/T)^{[1]}$

1.2 Περιγραφή Συμπεριφοράς Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, γενικά, χαρακτηρίζεται ως ανισότροπο υλικό. Η ανισοτροπία αυτή, αφορά την αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, το σκληρυμένο σκυρόδεμα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας κατά την οριζόντια διεύθυνση (δηλ. τη διεύθυνση που είναι κάθετη στη διεύθυνση διάστρωσης) από αυτή που παρουσιάζει κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Η συμπεριφορά αυτή συνδέεται άμεσα με το φαινόμενο της εξίδρωσης. Κατά το διάστημα που το σκυρόδεμα είναι νωπό και βρίσκεται συμπυκνωμένο και ακίνητο μέσα στα καλούπια, το νερό τείνει να ανέβει στην επιφάνεια και κατά την άνοδό του, μέρος αυτού εγκλωβίζεται κάτω από επιφάνειες μεγάλων συνήθως αδρανών που έχουν οριζόντιο περίπου προσανατολισμό. Έτσι, δημιουργούνται ασθενείς περιοχές με μικρό σχετικά πάχος και μεγαλύτερες διαστάσεις κατά το οριζόντιο επίπεδο, με αποτέλεσμα την ανισοτροπία του σκυροδέματος^[2].

Επιπρόσθετα, η εξίδρωση, η οποία δημιουργείται λόγω βαρύτητας, έχει ως συνέπεια το σκυρόδεμα να παρουσιάζει ανομοιομορφία καθ' ύψος, αφού στα μεγαλύτερα βάθη έχει αυξημένη αντοχή σε σχέση με την αντοχή του στα επιφανειακά τμήματα^[2]. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται κυρίως στην διαφοροποίηση της περιεκτικότητας σε νερό καθ' ύψος λόγω της εξίδρωσης (N/T μικρότερο στα κατώτερα στρώματα και μεγαλύτερο στα ανώτερα) και στην μεγαλύτερη συμπύκνωση του σκυροδέματος στα βαθύτερα στρώματα, λόγω μεγαλύτερης υδροστατικής πίεσης, με αποτέλεσμα η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας να διαφοροποιούνται κατά την έννοια του βάθους. Το φαινόμενο, προφανώς, είναι πιο έντονο σε σκυροδέματα που διαστρώνονται σε διατομές με σχετικώς μεγάλα βάθη (υποστυλώματα, τοιχία).

Το σκυρόδεμα, όμως, εκτός από ανισότροπο και ανομοιομορφο (καθ' ύψος) υλικό, λόγω της σύνθεσης του, είναι και άκρως ετερογενές. Αυτό οφείλεται στα διαφορετικά συστατικά του, τα οποία έχουν διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά, αλλά και στα διαφορετικά μεγέθη 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.

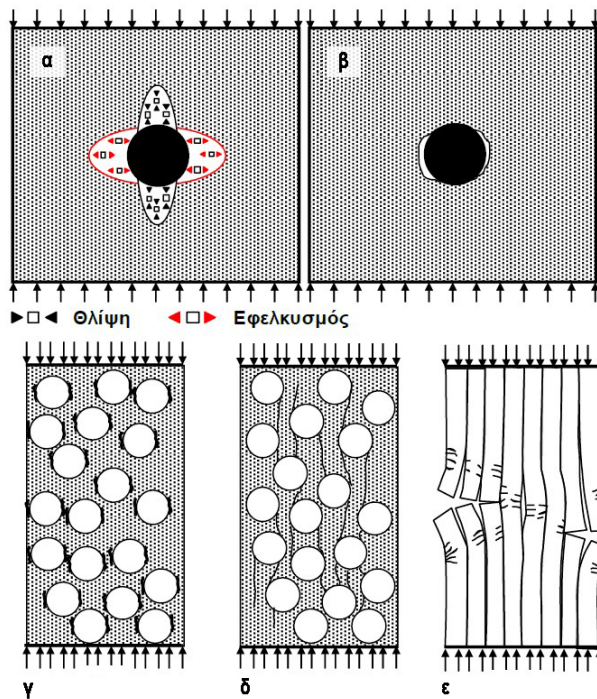
Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται τα κυριότερα μηχανικά χαρακτηριστικά των υλικών που συνθέτουν το συμβατικό σκυρόδεμα, καθώς και το ελαφροσκυρόδεμα που παρασκευάζεται με τη χρήση ελαφρών αδρανών. Παρατηρείται διαφοροποίηση των μηχανικών χαρακτηριστικών των αδρανών από τα χαρακτηριστικά του τσιμεντοπολτού. Πιο συγκεκριμένα, το μέτρο ελαστικότητας, η αντοχή σε θλίψη και η αντοχή σε εφελκυσμό των συνήθων αδρανών είναι πολύ μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, ενώ για τα ελαφρά αδρανή συμβαίνει το αντίθετο.

Πίνακας 1 Μηχανικά χαρακτηριστικά των συστατικών του σκυροδέματος^[2]

Ιδιότητα	Μη ενυδατωμένο τσιμέντο	Σκληρυμένος τσιμεντοπολτός	Συνήθη αδρανή	Ελαφρά αδρανή
Μέτρο ελαστικότητας [MPa]	45000 ~ 55000	7000 ~ 30000	34000 ~ 70000	3000 ~ 10000
Λόγος του Poisson	0.25	0.25	0,10 ~ 0,25	
Αντοχή σε θλίψη [MPa]	500	14 ~ 140	70 ~ 750	4 ~ 50
Αντοχή σε εφελκυσμό [MPa]	14	1,4 ~ 7,0	1,3 ~ 15	0,3 ~ 1,7
Ειδικό βάρος	3,1 ~ 3,2	1,7 ~ 2,2	2,5 ~ 2,7	0,5 ~ 1,5
Συστολή ξήρανσης [$\times 10^{-6}$]	-	2000 ~ 3000	ασήμαντη (εκτός από ορισμένα αδρανή)	-
Ειδικός ερπυσμός [$\times 10^{-6}$ /MPa]	-	100 ~ 450	ασήμαντος (εκτός από ορισμένα αδρανή)	-
Συντελεστής Θερμικής διαστολής [$\times 10^{-6}$]	6 ~ 12	12 ~ 20	6 ~ 12	-

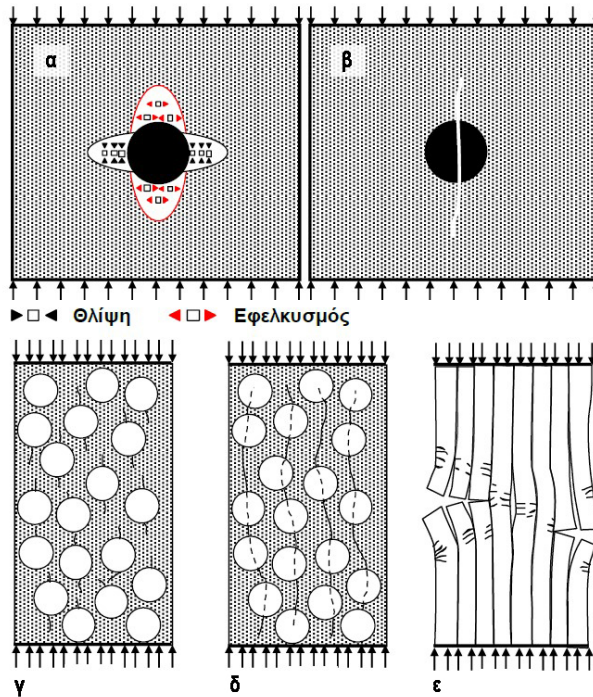
Έχει παρατηρηθεί ότι τα διαφορετικά μηχανικά χαρακτηριστικά του τσιμεντοπολτού σε σχέση με αυτά των αδρανών, έχουν καθοριστικό ρόλο στον μηχανισμό θραύσης που θα αναπτυχθεί μέχρι την τελική αστοχία^[10].

Στην περίπτωση που το σκυρόδεμα αποτελείται από συνήθη αδρανή (συμβατικό σκυρόδεμα), και επομένως το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας του τσιμεντοπολτού ($E_{αδρ} > E_{τσιμ}$), με την αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων θλιπτικών τάσεων θα δημιουργηθούν ρωγμές στο υλικό. Οι ρωγμές αυτές, όμως, δεν οφείλονται στις θλιπτικές τάσεις, αλλά στην έμμεση ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων, αφού όπως είναι γνωστό, η αντοχή του υλικού σε εφελκυσμό είναι μικρότερη από την θλιπτική του αντοχή. Έτσι, αφού δημιουργηθούν οι πρώτες ρωγμές στην διεπιφάνεια τσιμεντοπολτού και αδρανούς (αποκόλληση του τσιμεντοπολτού από την επιφάνεια του αδρανούς με αστοχία σε συνάφεια), στη συνέχεια οι ρωγμές θα επεκταθούν και θα συνενωθούν μεταξύ τους, δημιουργώντας κατακόρυφες στήλες, οι οποίες τελικά αποχωρίζονται η μια από την άλλη και καταρρέουν, με αποτέλεσμα την τελική αστοχία του υλικού (Σχήμα 1-6)^[2].



Σχήμα 1-6 Μηχανισμός θραύσης σε μονοαξονική θλίψη συμβατικού σκυροδέματος ($E_{αδρ} > E_{τσιμ}$)^[2]

Στην περίπτωση που το σκυρόδεμα αποτελείται από ελαφρά αδρανή (ελαφροσκυρόδεμα), όπου τα αδρανή έχουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από αυτό του τσιμεντοπολτού ($E_{αδρ} < E_{τσιμ}$), αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις πάνω και κάτω από την περιοχή του αδρανούς. Έτσι, με την αύξηση των εξωτερικά επιβαλλόμενων θλιπτικών τάσεων, οι αναπτυσσόμενες εφελκυστικές τάσεις προκαλούν ρηγμάτωση στο σκυρόδεμα πάνω και κάτω από το αδρανές, μέχρι τελικά να διαπεράσουν το ίδιο το αδρανές, αφού τα ελαφρά αδρανή έχουν μικρότερη αντοχή από εκείνη του τσιμεντοπολτού. Στη συνέχεια, διακρίνεται η ίδια μορφή αστοχίας όπως και στην περίπτωση του συμβατικού σκυροδέματος, με τη διαφορά ότι οι κατακόρυφες στήλες που δημιουργούνται, διαπερνούν τα ίδια τα αδρανή μέχρι να συνενωθούν μεταξύ τους, να αποχωριστούν και τελικώς να καταρρεύσουν (Σχήμα 1-7).



Σχήμα 1-7 Μηχανισμός θραύσης σε μονοαξονική θλίψη ελαφροσκυροδέματος ($E_{αδρ} < E_{τσμ}$)^[2]

Συνεπώς, από τα πιο πάνω, είναι ξεκάθαρο πως το δοκίμιο που υποβάλλεται σε θλιπτικές τάσεις, δεν αστοχεί από την ίδια την θλίψη, αλλά από την έμμεση ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων. Με απλά λόγια, η "αντοχή σε θλίψη" σκυροδέματος, στην πραγματικότητα δεν είναι αντοχή σε θλίψη. Ωστόσο, λόγω της απλής σχετικής διαδικασίας της δοκιμής, καθώς και της μεγάλης πείρας που έχει δημιουργηθεί γύρω από τις δοκιμές σε θλίψη, φαίνεται ότι προς το παρόν η δοκιμή αυτή είναι βασική και αναντικατάστατη^[2].

Η εντατική και παραμορφωσιακή κατάσταση του υλικού γίνεται ακόμη πιο πολύπλοκη, λόγω της ύπαρξης της Διεπιφανειακής Μεταβατικής Ζώνης (ΔMZ). Η μεταβατική ζώνη είναι η ζώνη που δημιουργείται γύρω από τα αδρανή, με πάχος 30-60 μm και η οποία χαρακτηρίζεται από μειωμένη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας^[2]. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η περιοχή του τσιμεντοπολτού στη γειτονιά των αδρανών υφίσταται την επίδραση του φαινομένου παρειάς (wall effect), δηλαδή μία διατάραξη της ομοιογένειάς του και μία αδυναμία κανονικής συμμετρικής ανάπτυξης των προϊόντων ενυδάτωσης λόγω της ύπαρξης της παρειάς του αδρανούς (asymmetrical growth)^[1]. Η ύπαρξη της ΔMZ αποτελεί κύρια αιτία της μειωμένης αντοχής συνάφειας, η οποία με τη σειρά της οδηγεί στην εμφάνιση μικρορηγματώσεων που είναι η αιτία μεγαλύτερων παραμορφώσεων και καμπύλωσης του διαγράμματος 'σ-ε'. Όντως, εάν βελτιωθούν τα μηχανικά χαρακτηριστικά της ΔMZ (π.χ. με πυριτική παιπάλη, ποζολάνες), η αντοχή θα αυξηθεί και το διάγραμμα 'σ-ε' θα γίνει πιο ευθύγραμμο, δηλαδή η συμπεριφορά πιο ψαθυρή. Επίσης, αν χρησιμοποιηθούν αδρανή με μικρότερο μέτρο ελαστικότητας ή μικρότερου μεγέθους (π.χ. άμμος), οι τάσεις γύρω από τα αδρανή θα μειωθούν και κατά συνέπεια και οι μικρορηγματώσεις^[2] ^[11].

Γενικά, το διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του σκυροδέματος 'σ-ε' που εκφράζει την συμπεριφορά του σε φόρτιση, είναι καμπύλο, ενώ εκείνο των αδρανών είναι ευθύγραμμο και του τσιμεντοπολτού, σχεδόν ευθύγραμμο. Το αντίστοιχο διάγραμμα του σκυροδέματος παρουσιάζει καμπυλότητα με αντοχή μικρότερη από την αντοχή των αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην ρηγμάτωση του σκυροδέματος που παρατηρείται κατά την φόρτιση^[2].

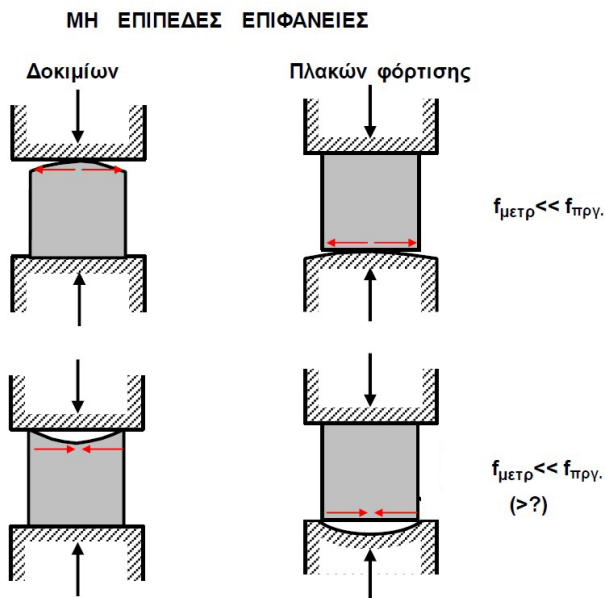
1.3 Τύποι δοκιμών

1.3.1 Δοκιμή σε θλίψη

Η δοκιμή σε θλίψη απαιτεί μεγάλη προσοχή, όσον αφορά την ίδια την συσκευή δοκιμής, αλλά και το ίδιο το δοκίμιο. Κάποιες από τις σημαντικότερες παραμέτρους^[2] που επηρεάζουν τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψη, καθώς και των παραμορφώσεων (μέτρο ελαστικότητας) είναι οι εξής:

1.3.1.1 Επιπεδότητα επιφανειών επαφής δοκιμών και πλακών φόρτισης

Οι επιφάνειες των χαλύβδινων πλακών φόρτισης και οι επιφάνειες του δοκιμίου που έρχονται σε επαφή πρέπει να είναι επίπεδες, έτσι ώστε να μην αναπτύσσονται ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις τάσεων, οι οποίες θα μειώσουν τελικά την αντοχή και θα αλλοιώσουν τις μετρήσεις των παραμορφώσεων (Σχήμα 1-8).

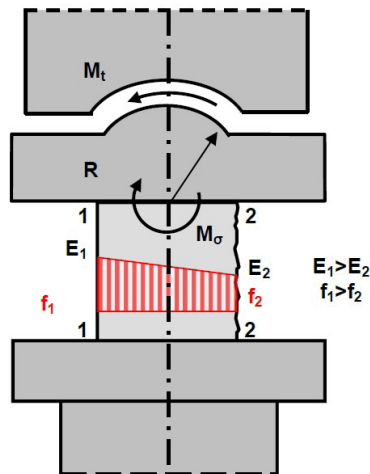


Σχήμα 1-8 Επίδραση μη επίπεδων επιφανειών δοκιμών και μηχανής στις επιβαλλόμενες τάσεις και στη μετρούμενη αντοχή $f_{\text{μετρ}}$ ^[2]

1.3.1.2 Ορθή λειτουργία σφαιρικής άρθρωσης της άνω πλάκας φόρτισης

Η σφαιρική άρθρωση πρέπει να επιτρέπει στροφή της άνω πλάκας φόρτισης για να επιτευχθεί πλήρης επαφή της πλάκας φόρτισης με την άνω επιφάνεια του δοκιμίου, σε περίπτωση που αυτή δεν είναι παράλληλη με τη βάση του δοκιμίου. Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, όμως, όταν πλέον έχει εφαρμοστεί ένα μικρό σχετικά μέρος του φορτίου ($\approx 10\% P_u$), θα πρέπει η αναπτυσσόμενη τριβή M_i στις δύο σφαιρικές επιφάνειες της σφαιρικής

άρθρωσης να αναπτύσσει τέτοιες τιμές, ώστε να μην επιτρέπει περαιτέρω στροφή της πλάκας. (Σχήμα 1-9). Επίσης, το κέντρο περιστροφής πρέπει να συμπίπτει με το κέντρο της επιφάνειας επαφής της άνω πλάκας.



Σχήμα 1-9 Αναπτυσσόμενη εντατική κατάσταση κατά τη δοκιμή^[2]

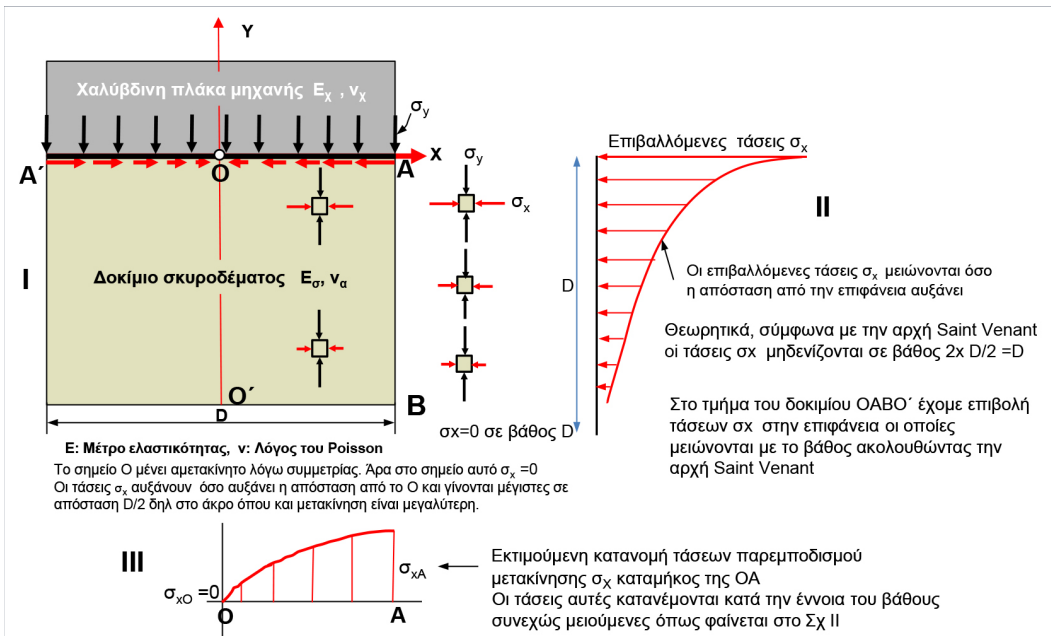
Πολύ συχνά, τα δοκίμια παρουσιάζουν ανομοιομορφίες, είτε λόγω της διάστρωσης και συμπύκνωσής τους ($f_1 > f_2$, $E_1 > E_2$) είτε από άλλους τυχαίους παράγοντες. Οι ανομοιομορφίες αυτές, είναι δυνατό να προκαλέσουν ανομοιόμορφη κατανομή τάσεων-παραμορφώσεων του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Σε αυτές τις περιπτώσεις, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-9, αναπτύσσεται ροπή M_σ που τείνει να περιστρέψει τη σφαιρική άρθρωση αν η ροπή λόγω τριβής M_t είναι μικρότερη από την M_σ ($M_t < M_\sigma$).

Συνεπώς, είναι αναγκαία η ορθή λειτουργία της σφαιρικής άρθρωσης, όπως αυτή περιγράφηκε πιο πάνω, ούτως ώστε να αποφεύγονται λανθασμένες ενδείξεις στην μετρούμενη αντοχή^[2]. Σε περίπτωση που η άρθρωση επιτρέπει την περιστροφή καθ' όλη τη διάρκεια της δοκιμής, τότε η ένδειξη της μηχανής ως αντοχή του δοκιμίου θα είναι η αντοχή της ασθενέστερης πλευράς του δοκιμίου, ενώ σε περίπτωση που η περιστροφή παρεμποδίζεται από κάποιο επίπεδο φορτίου και άνω, τότε η ένδειξη της μηχανής ως αντοχή δοκιμίου θα είναι η μέση τιμή της αντοχής της ασθενέστερης και της ισχυρότερης πλευράς του δοκιμίου.

1.3.1.3 Επίδραση των συνθηκών επαφών δοκιμίου και πλακών μηχανής

Στην πραγματικότητα, η επαφή που έχει το δοκίμιο με τις πλάκες φόρτισης της μηχανής, οδηγεί στην ανάπτυξη εγκάρσιων (διατμητικών) τάσεων και επομένως δεν υπάρχει πλέον μονοαξονικό θλιπτικό πεδίο, αλλά τριαξονικό. Αυτό συμβαίνει, διότι η εγκάρσια παραμόρφωση του σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από εκείνη των χαλύβδινων πλακών φόρτισης ($\nu_\sigma/E_\sigma > \nu_{χαλ}/E_{χαλ} \rightarrow \epsilon_\sigma > \epsilon_{χαλ}$). Έτσι, κατά τη διάρκεια της δοκιμής, οι χαλύβδινες πλάκες παρεμποδίζουν την εγκάρσια παραμόρφωση του σκυροδέματος, λόγω της τριβής/

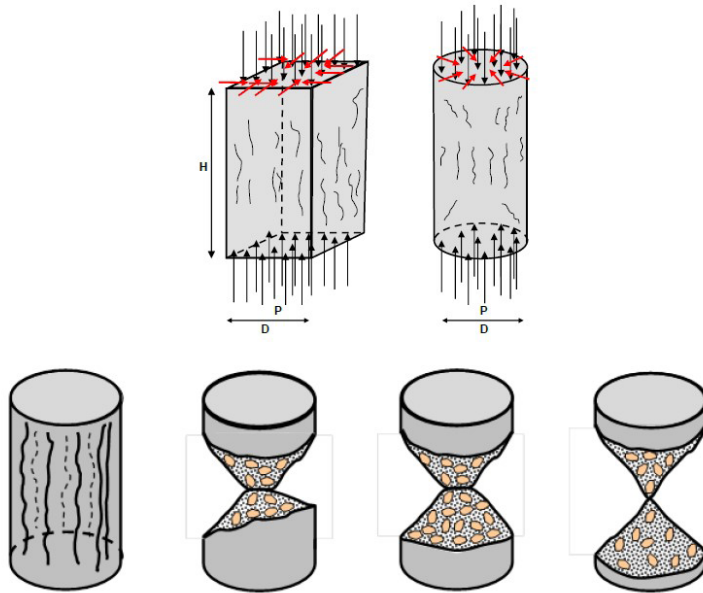
διάτμησης που αναπτύσσεται μεταξύ δοκιμίων και χαλύβδινων πλακών, με αποτέλεσμα την μετατροπή του πεδίου των τάσεων σε τριαξονικό θλιπτικό πεδίο (Σχήμα 1-10). Συνεπώς, τα δοκίμια που έχουν άμεση επαφή με τις πλάκες φόρτισης παρουσιάζουν αυξημένη αντοχή.



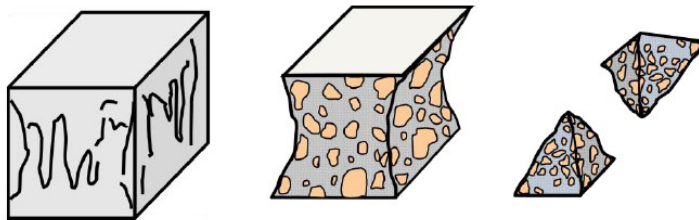
Σχήμα 1-10 Συνθήκες επαφής δοκιμίου και χαλύβδινων πλακών φόρτισης

Όσο μεγαλώνει η απόσταση από τις χαλύβδινες πλάκες, οι εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις μειώνονται και σε απόσταση ίση περίπου με το πλάτος D της διατομής του δοκιμίου του σκυροδέματος, θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι το πεδίο θλιπτικών τάσεων είναι μονοαξονικό. Έτσι εξηγείται και το γεγονός ότι τα κυλινδρικά ή πρισματικά δοκίμια με λόγο $H/D \geq 2$ θραύονται σε μονοαξονική θλίψη και παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή σε σχέση με τα κυβικά δοκίμια πλάτους D , στα οποία υπάρχει τριαξονικό θλιπτικό πεδίο που διατηρείται σε όλο το δοκίμιο^[2].

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τυπικές κανονικές μορφές αστοχίας κυλινδρικών και πρισματικών δοκιμίων σε θλίψη με λόγο ύψους προς διάμετρο $H/D \geq 2$ (Σχήμα 1-11), καθώς και οι τυπικές κανονικές μορφές αστοχίας κυβικών δοκιμίων (Σχήμα 1-12).



Σχήμα 1-11 Τυπικές θραύσεις κυλινδρικών και πρισματικών δοκιμών σκυροδέματος σε θλίψη με λόγο ύψους προς διάμετρο $H/D \geq 2$ ^[2]



Σχήμα 1-12 Τυπικές κανονικές θραύσεις κυβικών δοκιμών σκυροδέματος σε θλίψη ^[2]

1.3.2 Δοκιμή σε εφελκυσμό

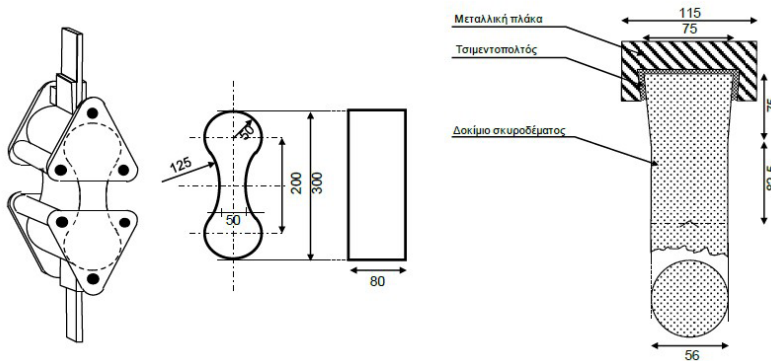
1.3.2.1 Μονοαξονικός εφελκυσμός

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με την δοκιμή σε θλίψη δεν είναι δυνατόν να προσδιορισθεί η "πραγματική αντοχή" του υλικού, δηλαδή ο λόγος της μέγιστης δύναμης P που αντέχει το δοκίμιο προς το εμβαδόν F της επιφάνειας θραύσεως, ανεξάρτητα από την ελαστική ή μη ελαστική συμπεριφορά του υλικού (Σχήμα 1-13).

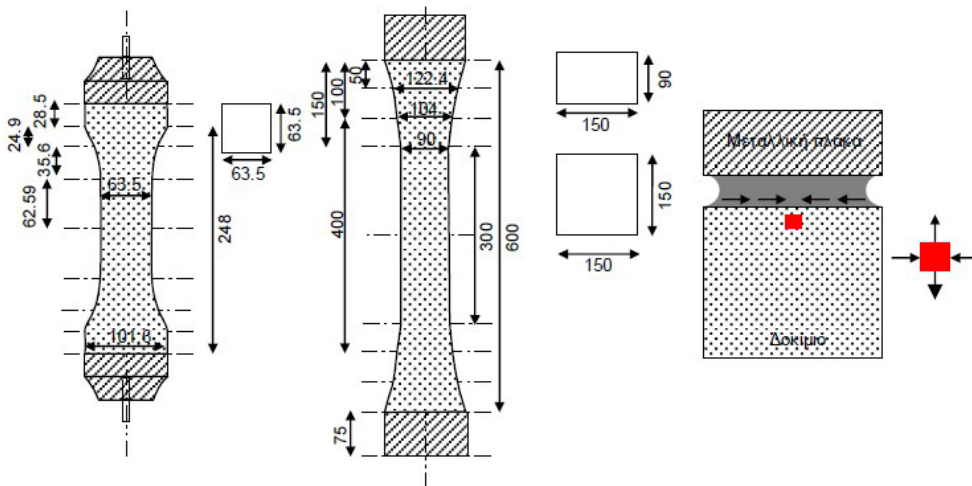
$$\sigma = P/F \quad P \leftarrow \boxed{F} \rightarrow P$$

Σχήμα 1-13 Δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό

Η μοναδική δοκιμή με την οποία θα μπορούσε να προσδιορισθεί/μετρηθεί η "πραγματική αντοχή" του υλικού, είναι η δοκιμή σε καθαρό μονοαξονικό εφελκυσμό. Ωστόσο, για το σκυρόδεμα, είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν κατάλληλες διατάξεις, όπου η εφαρμογή του φορτίου στο δοκίμιο δεν θα δημιουργήσει συγκεντρώσεις τάσεων ή επιβολή παρασιτικών ροπών λόγω εκκεντροτήτων^[2]. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται κάποιες διατάξεις για τον προσδιορισμό μονοαξονικού εφελκυσμού που έχουν χρησιμοποιηθεί (Σχήμα 1-14, Σχήμα 1-15).



Σχήμα 1-14 Δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό με «αρπαγές» που εφαρμόζονται σε δοκίμια διευρυμένης διατομής για αποφυγή θραύσεων στην περιοχή των αρπαγών λόγω ανάπτυξης συγκεντρώσεων τάσεων^[2]



Σχήμα 1-15 Δοκιμές σε μονοαξονικό εφελκυσμό με συγκόλληση με εποξειδικές ρητίνες κατάλληλων χαλύβδινων πλακών. Συνήθως χρησιμοποιούνται δοκίμια διευρυμένης διατομής^[2]

Εντούτοις, καμία απ' αυτές τις διατάξεις δεν έχει εκδοθεί ως πρότυπο δοκιμής σε εφελκυσμό, λόγω των πιο πάνω δυσκολιών. Συνεπώς, αντί για την δοκιμή καθαρού μονοαξονικού εφελκυσμού, σήμερα χρησιμοποιούνται εναλλακτικές δοκιμές έμμεσου προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής. Παρ' όλα αυτά, αξίζει να σημειωθεί πως οι δοκιμές αυτές,

έχουν το μειονέκτημα ότι η αντοχή που προσδιορίζεται δεν είναι η πραγματική, αλλά μια θεωρητική αντοχή, αφού έχει ως προϋπόθεση την ελαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος μέχρι τη θραύση, κάτι που δεν ισχύει στην πράξη.

1.3.2.2 Δοκιμή σε διάρρηξη

1.3.2.2.1 Γενικά

Η δοκιμή σε διάρρηξη (splitting tensile strength test), η οποία αναπτύχθηκε ανεξάρτητα στην Βραζιλία [Carneiro] και στην Ιαπωνία [Akazawa] και είναι γνωστή και ως '*Brazilian test*', αποτελεί έναν από τους έμμεσους τρόπους προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Πίσω από την προέλευση όμως αυτής της δοκιμασίας κρύβεται μία ενδιαφέρουσα ιστορία.

Κατά τη διάρκεια του 2ου Παγκοσμίου Πολέμου, η πόλη της Βραζιλίας Rio de Janeiro επεκτάθηκε και αναπτύχθηκε πολύ γρήγορα με αποτέλεσμα να πρέπει να γίνει ο ανασχεδιασμός κάποιου δικτύου λεωφόρων. Σ' αυτό το δίκτυο βρισκόταν και η εκκλησία του Sao Pedro, κτισμένη το 1740. Έτσι στην προσπάθεια να βρεθεί τρόπος μετακίνησής της και καθώς οι χαλύβδινοι κύλινδροι κύλισης ήταν δύσκολο να βρεθούν λόγω του πολέμου, κατασκευάστηκαν κύλινδροι από σκυρόδεμα (διαμέτρου 0.3m και μήκους 1.2m) καλυμμένοι με χαλύβδινα ελάσματα πάχους 9mm. Ο Lobo Carneiro, ο υπεύθυνος μηχανικός του έργου για τον έλεγχο αντοχής των δοκιμίων και τη μεταφορά των φορτίων, παρατήρησε ότι οι κύλινδροι (χωρίς τα χαλύβδινα ελάσματα) όταν φορτιζόνταν κατά την διεύθυνση μιας γενέτειρας με αντιδιαμετρικό θλιπτικό φορτίο παρουσίαζαν σχετικά ομοιόμορφα και σταθερά αποτελέσματα δοκιμών αντοχής σε διάρρηξη. Επίσης, παρατήρησε ότι οι εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονταν το επίπεδο φόρτισης ήταν ομοιόμορφες και έτσι κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη διάταξη θα ήταν κατάλληλη για την μέτρηση της έμμεσης εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Έτσι, στη βραχομηχανική, κυρίως, συναντάμε τον όρο '*Brazilian test*', ενώ στην τεχνολογία σκυροδέματος, ως δοκιμασία εφελκυσμού σε διάρρηξη^[11].

1.3.2.2 Περιγραφή – Ανάλυση Δοκιμής

Το κυλινδρικό, συνήθως, δοκίμιο τίθεται σε επαφή με την κάτω πλάκα φόρτισης της θλιπτικής μηχανής κατά μία γενέτειρά του και φέρεται σε επαφή με την άνω πλάκα της μηχανής κατά την αντιδιαμετρική γενέτειρά του (Σχήμα 1-16). Γι' αυτό το λόγο, η δοκιμή σε διάρρηξη ονομάζεται και αντιδιαμετρική θλίψη. Κατά την δοκιμή αυτή, η επιβολή του φορτίου γίνεται σε πολύ μικρή επιφάνεια (γραμμική φόρτιση) και γι' αυτό αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις εγκάρσια στη διεύθυνση επιβολής του φορτίου, και το δοκίμιο αστοχεί πολύ γρήγορα (για μικρή σχετικά τάση), με δημιουργία ρωγμής από εφελκυσμό^[2].

Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διάρρηξη βασίζεται στην θεωρία της ελαστικότητας και είναι η εξής:

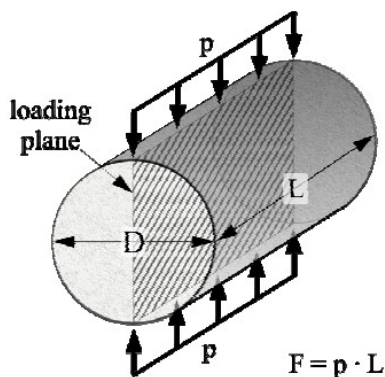
$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi L \cdot d}$$

όπου: $f_{ct,sp}$: η αντοχή σε διάρρηξη [MPa]

F : η μετρούμενη φόρτιση αστοχίας [N]

d : η διάμετρος του δοκιμίου [mm]

L : το μήκος του δοκιμίου [mm]



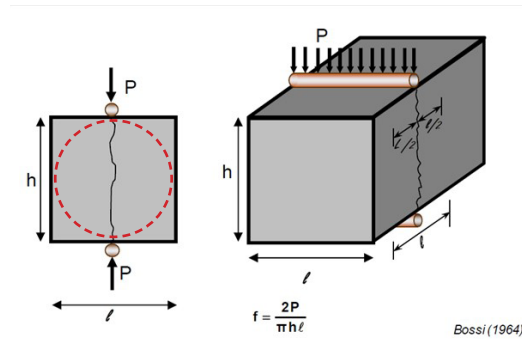
Σχήμα 1-16 Δοκιμή διάρρηξης σε κυλινδρικό δοκίμιο - Φόρτιση του δοκιμίου^[12]

Η δοκιμή σε διάρρηξη μπορεί να εφαρμοστεί και σε κυβικά ή πρισματικά δοκίμια (Σχήμα 1-17). Η σχέση που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντοχής σε διάρρηξη σε πρισματικό δοκίμιο είναι η εξής:

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi h l}$$

και στην περίπτωση κυβικού δοκιμίου, όπου οι διαστάσεις είναι ίδιες ($h=l=a$), η σχέση γίνεται:

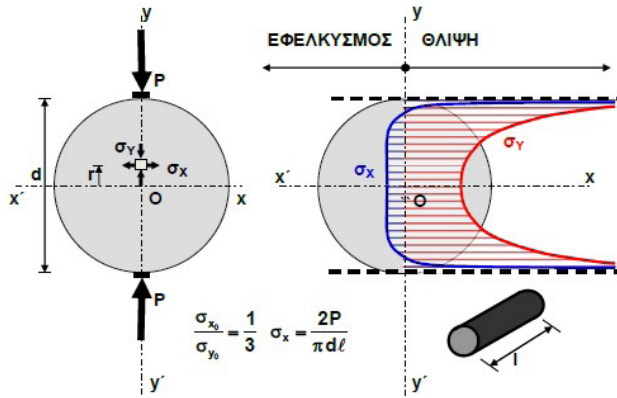
$$f_{ct,sp} = \frac{2 \cdot F}{\pi \alpha^2}$$



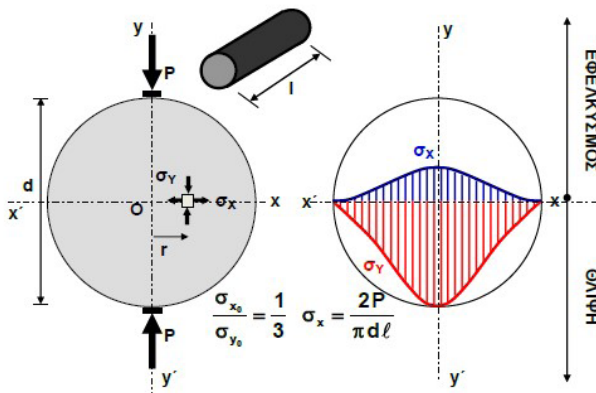
Σχήμα 1-17 Δοκιμή διάρρηξης σε πρισματικό δοκίμιο^[2]

Τα σημεία επαφής του δοκιμίου με τις πλάκες φόρτισης δέχονται μεγάλες συγκεντρώσεις τάσεων λόγω της θλιπτικής φόρτισης. Για την εξομάλυνση των τάσεων αυτών στις συγκεκριμένες περιοχές, παρεμβάλλονται τεμάχια κόντρα πλακέ πάχους 3 mm και πλάτους 25 mm σύμφωνα με το ASTM C 496-04^[13], ή χάρντμπορντ πάχους 4 ± 1 mm και πλάτους 10 ± 1 mm κατά ΕΛΟΤ EN 12362^[2], ή πάχους 4mm και πλάτους 15mm κατά British Standard BS EN 12390-6 : 2009^[14].

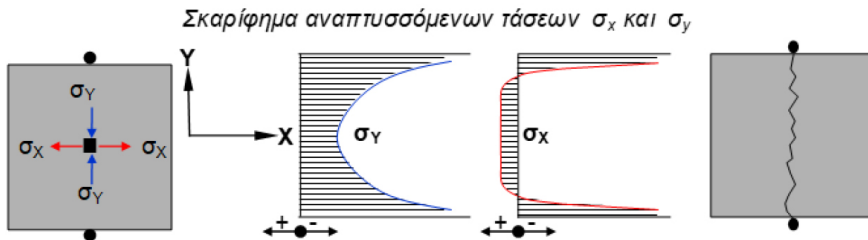
Με αυτή την διάταξη, η κατανομή της οριζόντιας τάσης σ_x και της κατακόρυφης τάσης σ_y καταμήκος της διαμέτρου γγ', διαμορφώνεται όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-18. Παρατηρείται ότι στα σημεία επαφής του δοκιμίου με τις πλάκες φόρτισης αναπτύσσεται μεγάλη οριζόντια θλιπτική τάση, εξαιτίας της τριβής του υλικού που παρεμβάλλεται μεταξύ δοκιμίου και πλακών φόρτισης. Ωστόσο, σε συνδυασμό με την κατακόρυφη θλιπτική τάση της ίδιας τάξης μεγέθους, δεν συμβαίνει αστοχία λόγω θλίψης (διαξονική θλιπτική καταπόνηση). Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι στο μεγαλύτερο τμήμα του άξονα γγ', η οριζόντια τάση σ_x είναι εφελκυστική με την ίδια, σχεδόν, τιμή. Συνεπώς, από την κατανομή των τάσεων, είναι φανερό ότι η δυσμενέστερη εντατική κατάσταση αναπτύσσεται στο επίπεδο γγ' και η θραύση του δοκιμίου γίνεται στο επίπεδο αυτό. Το δοκίμιο κατά τη θραύση του χωρίζεται σε δύο ημικυλίνδρους με κατακόρυφη ρωγμή.



Σχήμα 1-18 Κατανομή των τάσεων σ_x και σ_y (κυλινδρικό δοκίμιο) κατά μήκος της διαμέτρου $yy^{[2]}$



Σχήμα 1-19 Κατανομή των τάσεων σ_x και σ_y (κυλινδρικό δοκίμιο) κατά μήκος της διαμέτρου $xx^{[2]}$



+ : Εφελκυσμός
 - : Θλίψη

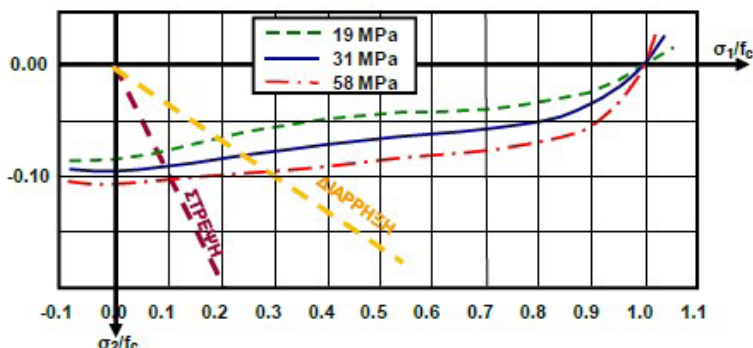
Σχήμα 1-20 Κατανομή των τάσεων σ_x και σ_y (πρισματικό δοκίμιο) κατά μήκος του άξονα $yy^{[2]}$

Η αντοχή που προκύπτει από πρισματικά δοκίμια είναι περίπου 10% μεγαλύτερη της αντοχής σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμίων^[2]. Σύμφωνα με το BS EN 12390-6:2009, η δοκιμή σε κυβικά δοκίμια δίνει παρόμοια αποτελέσματα αντοχής με τα κυλινδρικά, επειδή

το φορτίο παραλαμβάνεται από το κυκλικό τμήμα που είναι εγγεγραμμένο στον κύβο^[15]. Παρατηρήθηκε, επίσης, ότι όσο στενότερες είναι οι λωρίδες τύπου hardboard που εφαρμόζονται αντιδιαμετρικά στο δοκίμιο για την εξομάλυνση των τάσεων, τόσο μικρότερη είναι η επιρροή του σχήματος ή του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή που προκύπτει^[16]. Αξίζει να σημειωθεί ότι αν δεν τοποθετηθούν καθόλου τα εξομαλυντικά αυτά παρεμβλήματα, η αντοχή μπορεί να μειωθεί σε ποσοστό 8% περίπου^[2]. Επιπρόσθετα, εξαιτίας του γεγονότος ότι οι κρίσιμες τάσεις δρουν σε κάποια απόσταση από την επιφάνεια του σκυροδέματος, οι συνθήκες συντήρησης των δοκιμίων, φαίνεται να μην επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή σε διάρρηξη^[17].

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η δοκιμή σε διάρρηξη δίνει μια θεωρητική αντοχή και όχι την πραγματική. Συγκεκριμένα, η αντοχή που προκύπτει από τη δοκιμή σε διάρρηξη υπερεκτιμά την πραγματική αντοχή σε εφελκυσμό. Μερικές από τις αιτίες διαφοροποίησης μεταξύ των δύο αυτών αντοχών (δηλαδή της εφελκυστικής αντοχής που προκύπτει από την δοκιμή σε διάρρηξη σε σχέση με την πραγματική αντοχή του καθαρού μονοαξονικού εφελκυσμού) είναι οι εξής:

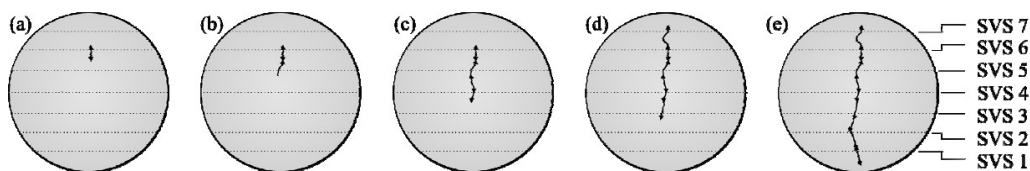
- Η δοκιμή σε διάρρηξη προϋποθέτει ελαστική συμπεριφορά σκυροδέματος μέχρι τη θράυση. Κάτι τέτοιο δεν είναι αληθές για τα φορτία που πλησιάζουν το φορτίο θράυσης. Επομένως, η αντοχή που υπολογίζεται είναι "θεωρητική" και όχι η πραγματική.
- Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-21, το εντατικό πεδίο που αναπτύσσεται κατά τη δοκιμή σε διάρρηξη δεν είναι μονοαξονικό, αλλά διαξονικό με εφελκυστική τάση σ_x ίση με το 1/3 της θλιπτικής τάσης σ_y ^[2].
- Επιπρόσθετα, ο όγκος του δοκιμίου ο οποίος υφίσταται κρίσιμες τάσεις (κρίσιμος όγκος) είναι μια σχετικώς λεπτή περιοχή περί τον κατακόρυφο άξονα yy' . Ο "κρίσιμος" αυτός όγκος, συγκρινόμενος με τον "κρίσιμο" όγκο των δοκιμίων καθαρού μονοαξονικού εφελκυσμού που περιλαμβάνει ολόκληρο σχεδόν το δοκίμιο είναι σημαντικά μικρότερος.



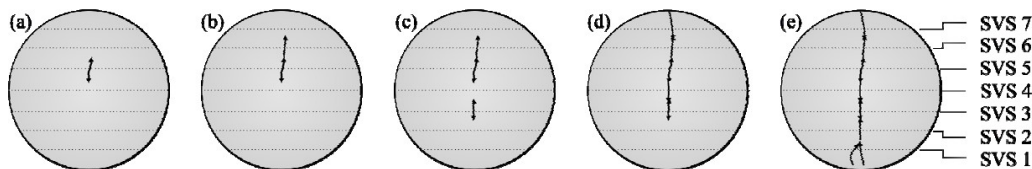
Σχήμα 1-21 Διαξονική επιτόνιση σκυροδέματος. Κλάδος θλίψης-εφελκυσμού^[2]

Μία από τις έρευνες που καταδεικνύουν το θέμα της μεγαλύτερης αντοχής που προκύπτει από τη δοκιμή σε διάρρηξη, σε σύγκριση με την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, είναι

αυτή που πραγματοποιήθηκε από τους V. Malárics & H.S. Müller^[12]. Σε όλες τις δοκιμές σε διάρρηξη που πραγματοποίησαν, οι πρώτες ρωγμές δεν εμφανίστηκαν σε κεντρικό σημείο της διατομής του δοκιμίου. Αντ' αυτού, σε δοκίμια με λόγο πλάτους προς ύψος $D/L = 150/300\text{mm}$, σε συμβατικό σκυρόδεμα η ρωγμή ξεκίνησε στο $\frac{1}{4}$ περίπου της διατομής του δοκιμίου (Σχήμα 1-22), ενώ σε σκυρόδεμα υψηλής αντοχής, η ρωγμή ξεκίνησε στο $\frac{1}{3}$ περίπου της διατομής του δοκιμίου (Σχήμα 1-23). Η παραπάνω συμπεριφορά οφείλεται στη διαξονική επιτόνηση που υφίσταται το δοκίμιο. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-18, πράγματι η ρωγμή, αναμένεται να ξεκινήσει σε κάποιο σημείο του άξονα yy' εκτός του κέντρου, όπου η σ_y είναι μεγαλύτερη, ενώ η σ_x γίνεται εφελκυστική με ομοιόμορφη τιμή σχεδόν σε όλο το μήκος του άξονα.



Σχήμα 1-22 Ακολουθία των ρωγμών σε κυλινδρικά δοκίμια συμβατικού σκυροδέματος με λόγο $D/L = 150/300\text{mm}$ ^[12]



Σχήμα 1-23 Ακολουθία των ρωγμών σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος υψηλής αντοχής με λόγο $D/L = 150/300\text{mm}$ ^[12]

Παρ' όλα τα παραπάνω, η δοκιμή σε διάρρηξη έχει διαδοθεί πολύ, λόγω των ακόλουθων πλεονεκτημάτων σε σχέση με τις υπόλοιπες δοκιμές εφελκυσμού:

- Τα απαιτούμενα δοκίμια είναι τα ίδια με εκείνα που χρησιμοποιούνται για θλίψη (κυβικά, κυλινδρικά ή πρισματικά) και επομένως δεν απαιτούνται δοκίμια ειδικής μορφής και σχήματος, τα οποία δημιουργούν, συνήθως, πρόσθετες δυσκολίες στην διεξαγωγή της δοκιμής, στην συντήρηση και στην μετακίνηση των δοκιμίων.
- Η συγκεκριμένη δοκιμή αποτελεί έναν απλό τρόπο δοκιμασίας σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Ο εξοπλισμός που απαιτείται για την πραγματοποίηση της δοκιμής, είναι η ίδια μηχανή που χρησιμοποιείται σε δοκιμή σε θλίψη. Επιπρόσθετα, ο ίδιος τύπος δοκιμίων (είτε πρίσμα, είτε κύλινδρος) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για δοκιμή σε θλίψη και σε διάρρηξη, γεγονός που διευκολύνει την σύγκριση της εφελκυστικής με την θλιπτική αντοχή^[1].
- Είναι απλή στην εφαρμογή της και δίνει πιο ομοιόμορφα αποτελέσματα σε σχέση

με τις υπόλοιπες δοκιμές εφελκυσμού. Οι διάφορες μελέτες της σχέσης αντοχής σε καθαρό εφελκυσμό και αντοχής σε διάρρηξη παρουσιάζουν αρκετές διαφορές μεταξύ τους, γεγονός που θα μπορούσε να αποδοθεί κατά κύριο λόγο στον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η δοκιμή σε εφελκυσμό.

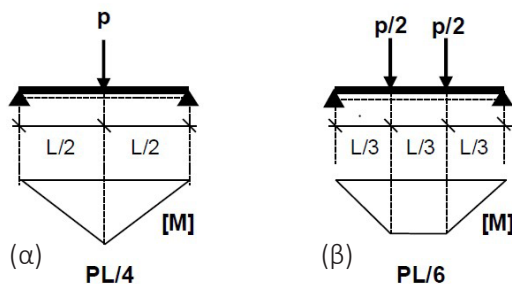
- Το γεγονός ότι η κρίσιμη (για αστοχία) περιοχή του δοκιμίου είναι μια σχετικώς λεπτή περιοχή περί τον κατακόρυφο άξονα γγ' που βρίσκεται μακριά από την περίμετρο του δοκιμίου που επηρεάζεται από τις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες, καθιστά την δοκιμή λιγότερο ευαίσθητη στις συνθήκες συντήρησης των δοκιμίων σε σύγκριση με εκείνη των δοκιμίων καθαρού/μονοαξονικού εφελκυσμού ή κάμψης.

1.3.2.3 Δοκιμή σε κάμψη

Η δοκιμή σε κάμψη (*flexural tension of strength test - modulus of rupture*), αποτελεί έναν ακόμη έμμεσο τρόπο προσδιορισμού της εφελκυστικής (πραγματικής) αντοχής του σκυροδέματος.

Πρόκειται για μια απλή σχετικά δοκιμή και πραγματοποιείται υπό δύο μορφές φόρτισης:

1. Με ένα φορτίο στο μέσο του ανοίγματος [Σχήμα 1-24 (α)]
2. Με δύο φορτία στα τρίτα του ανοίγματος [Σχήμα 1-24 (β)]



Σχήμα 1-24 Διάγραμμα ροπών για τις δύο διατάξεις δοκιμής σε κάμψη [2]

Η φόρτιση πραγματοποιείται μέσω χαλύβδινων διατάξεων κυλινδρικής επιφάνειας επαφής με το σκυρόδεμα. Συνήθως προτιμάται η δοκιμή με φόρτιση στα τρίτα του ανοίγματος, αφού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1-24(β), η συγκεκριμένη φόρτιση που ασκείται σε σημαντικά μεγαλύτερο τμήμα του δοκιμίου (όγκος) δίνει μικρότερη αντοχή και έχει μικρότερη μεταβλητότητα από την πραγματική αντοχή, σε σχέση με την δοκιμή φόρτισης στο μέσο του ανοίγματος^[2].

Η αντοχή σε κάμψη, για τη φόρτιση στα τρίτα του ανοίγματος, δίνεται από τη σχέση:

$$f_{ct,fl} = \frac{F L}{b h^2}$$

όπου: L : το άνοιγμα της δοκού

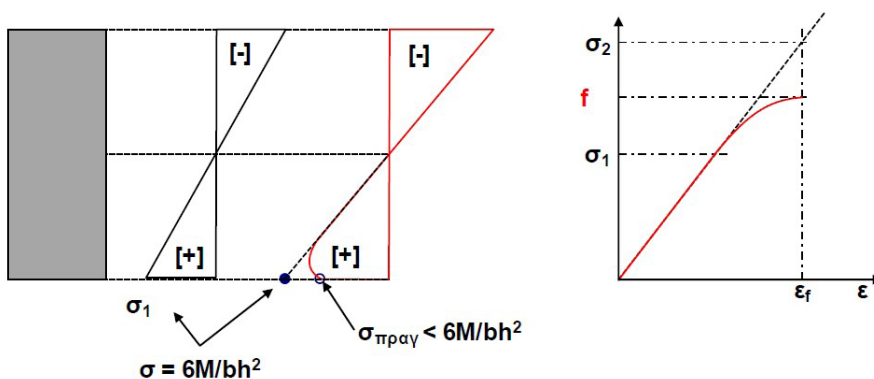
F : το μέγιστο φορτίο της δοκιμής

b : το πλάτος της διατομής

h : το ύψος της διατομής

Στην περίπτωση της δοκιμής σε κάμψη, η "θεωρητική" αντοχή που προκύπτει υπερεκτιμά την πραγματική αντοχή σε εφελκυσμό, και συγκεκριμένα είναι περίπου 50% μεγαλύτερη από την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό^[2]. Η διαφοροποίηση αυτή, προκύπτει από τα εξής:

- Όπως και στην περίπτωση της διάρρηξης, η δοκιμή σε κάμψη, βασίζεται στην προϋπόθεση ότι το υλικό συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση (τριγωνική κατανομή τάσεων, $\sigma = M/W = 6M/bh^2$). Στην πραγματικότητα, όμως, το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ανελαστικά για φορτία μεγαλύτερα από το 40% περίπου του φορτίου θραύσης. Συνεπώς, η πραγματική τάση κατά τη θραύση θα είναι μικρότερη από την τάση που υπολογίζεται από τη σχέση $6M/bh^2$ (Σχήμα 1-25).



Σχήμα 1-25 Αναπτυσσόμενες τάσεις σε καμπτόμενη δοκό και διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων "σ-ε" σε εφελκυσμό σκυροδέματος

Οι μικρότερες τάσεις που αναπτύσσονται καθ' ύψος της διατομής στην κάμψη παρεμποδίζουν την προώθηση της ρωγμής, κι έτσι η ρωγμή διαδίδεται με πολύ πιο αργό ρυθμό σε σχέση με τη διάδοση αντίστοιχης ρωγμής σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Πειραματικές μετρήσεις (Sturman, Shah, Winter) με σάρωση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο (SEM) έδειξαν ότι ο αριθμός των μικρορηγματώσεων μικραίνει και η τελική ανηγμένη παραμόρφωση αυξάνει όταν το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε ανομοιόμορφη παραμόρφωση, όπως στην περίπτωση της κάμψης.


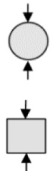
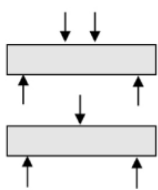
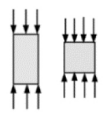
- Στην κάμψη, ο κρίσιμος όγκος περιορίζεται σε μια λεπτή περιοχή κοντά στην ακραία κάτω ίνα, ενώ στον μονοαξονικό εφελκυσμό, ο "κρίσιμος" όγκος των δοκιμίων περιλαμβάνει ολόκληρο σχεδόν το δοκίμιο.

Παρά τα πιο πάνω, η δοκιμή σε κάμψη χρησιμοποιείται ευρέως και είναι πολύ σημαντική, καθώς προσομοιάζει την επιτόνηση του σκυροδέματος σε κάμψη και χρησιμοποιείται για

την μελέτη δοκών ή πλακών επί εδάφους, οδοστρωμάτων κτλ.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι κυριότερες δοκιμές σκυροδέματος, καθώς και ο λόγος θεωρητικής/πραγματικής αντοχής που προκύπτει από κάθε δοκιμή (f_i/f_t).

Πίνακας 2 Οι κυριότερες δοκιμές σκυροδέματος

ΔΟΚΙΜΗ	ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ	$\frac{f_i^*}{f_{ct}}$	ΣΧΟΛΙΑ
ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ 	$f_{ct} = \frac{F}{b d}$	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 	$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi d L}$ $f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi h L}$	0.80 ~ 2.16	Έμμεση αντοχή διαξονικής φύσεως που στηρίζεται στη θεώρηση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση του. Πολύ εύκολη πρακτικά και δεν απαιτεί ακριβό εξοπλισμό. (θεωρητική αντοχή, όχι πραγματική)
ΚΑΜΨΗ 	$f_{ct,fl} = \frac{F L}{b h^2}$ $f_{ct,fl} = \frac{3 F L}{2 b h^2}$	1 ~ 1.67	Παραδοσιακή έμμεση δοκιμή που προσομοιάζει την εντατική κατάσταση καμπτόμενων φορέων. Στηρίζεται στη θεώρηση ότι το σκυρόδεμα συμπεριφέρεται ελαστικά μέχρι τη θραύση του. (θεωρητική αντοχή, όχι πραγματική)
ΘΛΙΨΗ 	$f_c = \frac{F}{b d}$	10 ~ 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)

*Οι τιμές f_i/f_c εκτιμήθηκαν με βάση την υπάρχουσα βιβλιογραφία. Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό τους παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

1.4 Παράμετροι επιρροής της αντοχής του σκυροδέματος

Σαν μια πρώτη προσέγγιση, η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος είναι ανάλογη της αντοχής της ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας. Επομένως, η αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται κυρίως από το λόγο N/T , το βαθμό της ενυδάτωσης, την ηλικία του σκυροδέματος και τις συνθήκες συντήρησης, όπως επίσης από τον τύπο και την κατηγορία αντοχής του τσιμέντου.

Εκτός από τα κανονικής αντοχής σκυροδέματα, ξεκίνησε η αυξανόμενη χρήση των σκυροδεμάτων υψηλής επιτελεστικότητας (*High Performance Concrete - HPC*), που συνδυάζουν εκτός από την υψηλή αντοχή και υψηλή ανθεκτικότητα, με σκοπό την κατασκευή αξιόπιστων κτιριακών έργων ικανοποιώντας έναν από τους βασικούς παράγοντες, την ευστάθεια των κατασκευών^[18].

Τα υψηλής επιτελεστικότητας σκυροδέματα (*HPC*), καθώς και τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα (*High Strength Concrete - HSC*) αποτελούνται από τα ίδια υλικά όπως τα σκυροδέματα κανονικής αντοχής, κανονικού βάρους (*Normal Strength Concrete - NSC*). Αυτό σημαίνει ότι οι μέθοδοι και οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την αύξηση της αντοχής είναι οι ίδιες με αυτών των *NSC* και κατά συνέπεια η επίδραση στις άλλες ιδιότητες του υλικού ακολουθεί το ίδιο πρότυπο όπως είναι γνωστό για τα σκυροδέματα κανονικής αντοχής. Η διαφορά είναι ότι τα *HPC/HSC* περιέχουν περισσότερο τσιμέντο και λιγότερο νερό σε σύγκριση με τα *NSC*, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν μεγαλύτερη πυκνότητα που μπορεί να φτάσει τα 150 kg / m^3 ^[19]. Πιο συγκεκριμένα, τα *HPC/HSC*, έχοντας μικρότερο λόγο N/T , παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή και κανονικά μικρότερη διαπερατότητα ήτοι μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.

Ωστόσο, οι παράγοντες που επηρεάζουν τη θλιπτική αντοχή, όσο και την εφελκυστική σε σκυροδέματα κανονικής, αλλά και σε σκυροδέματα υψηλής αντοχής είναι κοινοί και παρουσιάζονται παρακάτω.

1.4.1 Συνθήκες Συντήρησης κατά τη δοκιμή

Κατά το Βρετανικό πρότυπο (*BS Standards*), όπως και κατά το αμερικανικό (*ASTM Standards*), όλα τα δοκίμια πρέπει να είναι συντηρημένα στο νερό κατά τη δοκιμή. Παρ' όλη αυτά, υπάρχουν περιπτώσεις όπου το δοκίμιο μπορεί να μη βρίσκεται σε υγρή κατάσταση κατά τη δοκιμή. Αυτές οι περιπτώσεις αποκλίνουν από τον γενικότερο "κανόνα", επιφέροντας διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία είναι ιδιαίτερα σημαντικό να εξεταστούν. Η συγκεκριμένη παράμετρος αφορά μόνο τις συνθήκες συντήρησης που επικρατούν αμέσως πριν τη δοκιμή, εφόσον έχει προηγηθεί η συνθήκης συντήρησης του δοκιμίου^[1].

1.4.1.1 Θλιπτική αντοχή

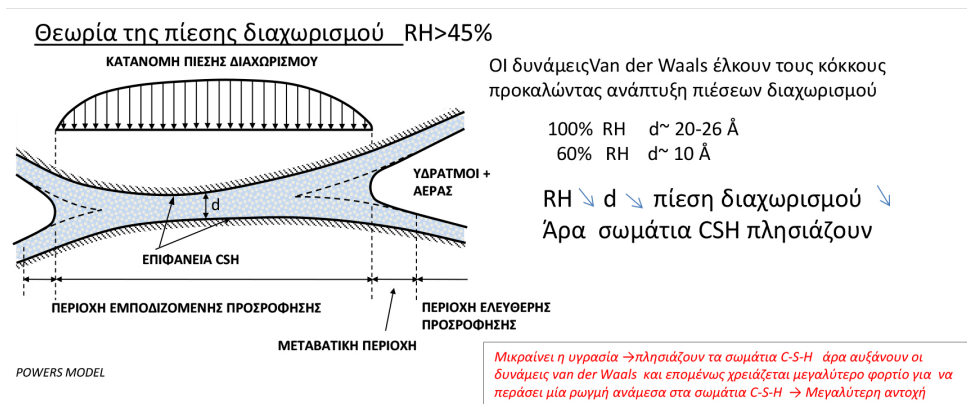
Όσον αφορά τη θλιπτική αντοχή, δοκίμια που βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση κατά τη δοκιμή και δεν έχουν υποστεί ρηγμάτωση κατά τη διάρκεια της ξήρανσης, παρουσιάζουν υψηλότερη αντοχή σε σχέση με αυτά που είναι συντηρημένα στο νερό. Αυτό συμβαίνει, λόγω της συστολής ξήρανσης (*dry shrinkage*) που υφίσταται το σκυρόδεμα. Η συστολή

ξήρανσης είναι αποτέλεσμα της απώλειας υγρασίας και κατά συνέπεια της εξάτμισης του νερού από τους τριχοειδείς πόρους του σκυροδέματος. Μέσα στο νερό αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις, ενώ στην στερεά μάζα εφαρμόζονται θλιπτικές τάσεις. Καθώς, όμως, το νερό εξατμίζεται από τους μεγαλύτερους προς τους μικρότερους πόρους, οι θλιπτικές τάσεις- που δρουν καθ' όλες τις διευθύνσεις του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού- γίνονται εντονότερες, υποβάλλοντας το υλικό σε τριαξονική θλίψη, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος (υπό την προϋπόθεση ότι δεν έχουν υποστεί ρηγματώση κατά τη διάρκεια της ξήρανσης)^{[1],[2]}.

Επιπρόσθετα, δοκιμές έδειξαν ότι πρισματικά και κυβικά δοκίμια, τα οποία είχαν συντηρηθεί πολύ καλά και ύστερα αφέθηκαν να ξηραθούν τελείως υπό ήπιες συνθήκες χωρίς να προκληθούν ρηγματώσεις, παρουσίασαν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή σε σχέση με αυτά υποβλήθηκαν σε δοκιμή όσο ήταν ακόμη υγρά^{[20],[21]}.

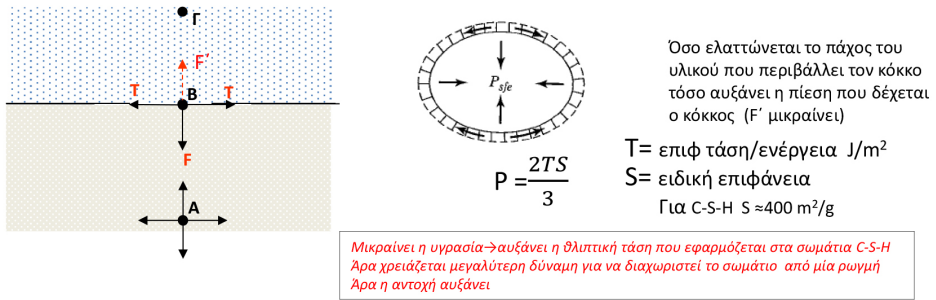
Η θεωρία της πίεσης διαχωρισμού θα μπορούσε να εξηγήσει την συμπεριφορά των δοκιμών αυτών. Κατά τη μείωση της υγρασίας, η αύξηση της αντοχής επέρχεται λόγω ισχυρών ελκτικών δυνάμεων *Van der Waals* που παρεμποδίζουν την διάδοση της ρωγμής ανάμεσα στα σωματίδια του πηγματος C-S-H, και όχι λόγω της συστολής ξήρανσης. Η συμπεριφορά των παραπάνω δοκιμών, μπορεί να εξηγηθεί και με την θεωρία των επιφανειακών τάσεων. Όταν πρόκειται για δοκίμια κορεσμένα σε νερό, η αντοχή μειώνεται εξαιτίας της προσρόφησης του πηγματος, καθώς οι επιφανειακές τάσεις στην διεπιφάνεια (υγρού - στερεού) ελαττώνονται. Αντίθετα, σε ξηρές συνθήκες, οι επιφανειακές τάσεις αυξάνονται και κατά συνέπεια αυξάνεται και η αντοχή^[2].

Τα δύο αυτά φαινόμενα, τα οποία έχουν περιγραφεί πιο πάνω, φαίνονται διεξοδικά στα πιο κάτω σχήματα.



Σχήμα 1-26 Περιοχές εμποδιζόμενης προσρόφησης και δημιουργίας πιέσεων διαχωρισμού (σύμφωνα με το πρότυπο Powers)^[2]

Θεωρία των επιφανειακών τάσεων RH<45% αλλά κυρίως <20% περίπου



Σχήμα 1-27 Σχηματική παράσταση επιφανειακών τάσεων. (α) Οι επιφανειακές τάσεις στη διαχωριστική επιφάνεια (διεπιφάνεια) είναι μέγιστες σε περίπτωση κενού και (β) ελαττώνονται σε περίπτωση ρόφησης κάποιου υλικού^[2]

Σύμφωνα με την έρευνα του Technical Research Centre of Finland (VTT), η θλιπτική αντοχή για ξηρή κατάσταση δοκιμών είναι 30% μεγαλύτερη σε σχέση με τα δοκίμια που βρίσκονται σε υγρή κατάσταση για λόγο N/T =0.50. Σε σκυροδέματα με λόγο N/T =0.75, η διαφορά θλιπτικής αντοχής μεταξύ των δύο διαφορετικών συνθηκών συντήρησης είναι 60% αντίστοιχα^[22].

1.4.1.2 Εφελκυστική αντοχή

Όταν τα δοκίμια βρίσκονται σε ξηρή κατάσταση πριν τη δοκιμή, το υλικό τείνει να συρρικνωθεί. Λόγω της συρρίκνωσης αυτής, αναπτύσσονται εσωτερικές εφελκυστικές πιέσεις ως αποτέλεσμα της παρεμπόδισης της συστολής των επιφανειακών στρώσεων του σκυροδέματος που υφίστανται ξήρανση και επομένως συρρίκνωση από τις βαθύτερα ευρισκόμενες στρώσεις σκυροδέματος οι οποίες δεν ξηραίνονται και επομένως δεν υφίστανται συρρίκνωση. Η παρεμπόδιση αυτή συχνά οδηγεί σε μικρορωγμές πριν την επιβολή κάποιου φορτίου. Αυτό έχει αντίκτυπο την μείωση της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος. Ο βαθμός της μείωσης της, βέβαια, εξαρτάται από την δοκιμή εφελκυσμού που πραγματοποιείται κάθε φορά^[19] και κυρίως από την διεύθυνση επιβολής της δύναμης εφελκυσμού σε σχέση με την διεύθυνση των ρηγματώσεων.

Για δοκιμή σε κάμψη, η παραπάνω συμπεριφορά είναι πιο έντονη ανάλογα και με τον ρυθμό εξάτμισης του νερού από την επιφάνεια του δοκιμίου, διότι ο κρίσιμος όγκος της δοκού βρίσκεται στο κάτω μέρος (εφελκυστικές τάσεις). Συνεπώς, η αστοχία θα επέλθει πρώτα στην κάτω περιοχή και σε συνδυασμό με τις προϋπάρχουσες μικρορηγματώσεις λόγω συστολής ξήρανσης, η αστοχία θα συμβεί νωρίτερα, με μικρότερη μετρούμενη αντοχή σε σχέση με την αντοχή δοκιμίου αν είχε συντηρηθεί σε νερό^{[1],[23]}.

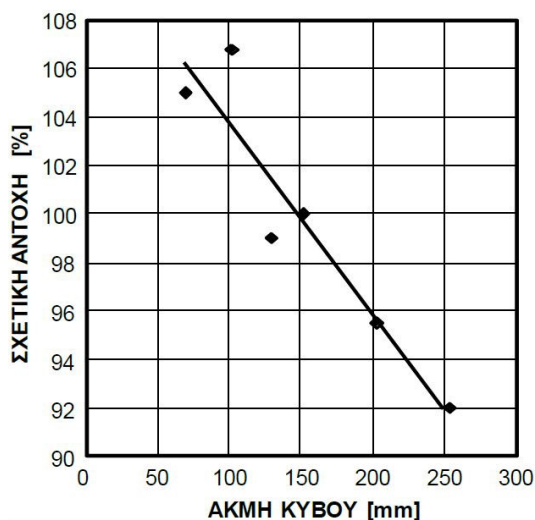
Όσον αφορά τη δοκιμή σε διάρρηξη, η κρίσιμη (για αστοχία) περιοχή του δοκιμίου είναι μια σχετικώς λεπτή περιοχή περί τον κατακόρυφο άξονα γγ' που βρίσκεται μακριά από την περίμετρο του δοκιμίου. Συνεπώς, η μετρούμενη αντοχή από δοκιμή σε διάρρηξη είναι λιγότερο ευαίσθητη στις διάφορες συνθήκες περιβάλλοντος και τις συνθήκες συντήρησης^[1].

Για τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα η μείωση της εφελκυστικής αντοχής παρουσιάζεται πιο έντονη σε σχέση με τα σκυροδέματα κανονικής αντοχής^[24]. Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι σε σκυροδέματα με χαμηλό λόγο N/T , δημιουργούνται επιπρόσθετες εσωτερικές πιέσεις, λόγω της αυτογενούς συστολής, με αποτέλεσμα την εμφάνιση μικρορηγματώσεων που μειώνουν περαιτέρω την εφελκυστική αντοχή^[19].

1.4.2 Μέγεθος και Σχήμα Δοκιμίων

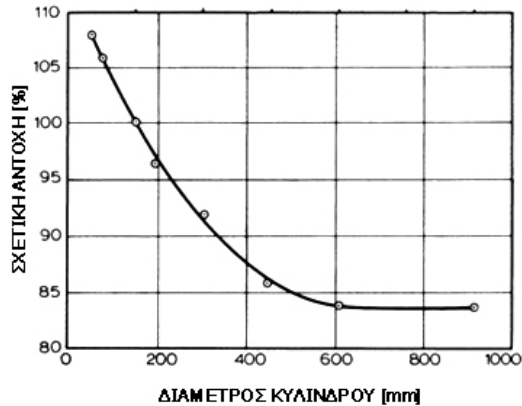
Το σκυρόδεμα είναι ανομοιόμορφο υλικό και επομένως στα μεγάλα δοκίμια, η πιθανότητα να βρεθούν ασθενείς περιοχές, από όπου θα ενεργοποιηθεί η έναρξη της θραύσης, είναι μεγαλύτερη από εκείνη των δοκιμίων μικρότερου όγκου. Επομένως, η αντοχή πρέπει να ελαττώνεται όσο το δοκίμιο αυξάνεται σε όγκο. Για τον ίδιο λόγο (ανομοιομορφία), όσο το δοκίμιο γίνεται μικρότερο, τόσο η πιθανότητα να βρεθούν σχετικά μεγάλες ή σχετικά μικρές τιμές αντοχής αυξάνεται και επομένως και η μεταβλητότητα των αντοχών των μικρών δοκιμίων θα είναι αυξημένη. Το θέμα της επίδρασης του μεγέθους των δοκιμίων αλλά και γενικά του μεγέθους του δομικού στοιχείου, εξετάζεται διεξοδικά και θεωρητικά στη Μηχανική της Θραύσης^[2].

Στο Σχήμα 1-28 φαίνεται η επίδραση του μεγέθους στην θλιπτική αντοχή. Όσο αυξάνεται ο όγκος του κυβικού δοκιμίου τόσο μειώνεται η σχετική αντοχή^[1].



Σχήμα 1-28 Επίδραση του μήκους της ακμής κυβικών δοκιμίων στην αντοχή^[1]

Αντίστοιχα, στο Σχήμα 1-29 φαίνεται η επίδραση του όγκου του κυλινδρικού δοκιμίου (για σταθερό λόγο $H/D = 2$) στη σχετική αντοχή. Όσο αυξάνεται ο όγκος του δοκιμίου, τόσο μειώνεται η σχετική αντοχή, με την επίδραση αυτή να μικραίνει όσο αυξάνεται το μέγεθος του δοκιμίου. Κατά το US Bureau of Reclamation, μετά από ένα μέγεθος περίπου 400-500mm η αντοχή δεν φαίνεται να επηρεάζεται^[2].



Σχήμα 1-29 Επίδραση του όγκου των κυλινδρικών δοκιμών (για σταθερό λόγο $H/D=2$) στην αντοχή^[1]

Γενικά, το φαινόμενο της επιρροής του μεγέθους του δοκιμίου στη σχετική αντοχή του σκυροδέματος είναι πολυπαραμετρικό, δηλαδή επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως:

- Το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αδρανούς (D_{max})

Τα αδρανή επηρεάζουν σημαντικά την κατανομή των τάσεων μέσα στο δοκίμιο σε σχέση με τις διαστάσεις του δοκιμίου (συγκέντρωση τάσεων στα μεγαλύτερα αδρανή), επομένως το φαινόμενο πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό και με το μέγεθος του μέγιστου κόκκου αδρανούς.

- Το φαινόμενο "παρειάς"

Η διαταραχή που υφίσταται το μίγμα από την παρουσία των τοιχωμάτων των καλουπιών είναι αναλογικά μεγαλύτερη στα μικρού μεγέθους καλούπια από εκείνη των μεγάλων καλουπιών. Στην επιρροή αυτή πρέπει να προστεθεί και η επίδραση που έχει το μέγεθος των αδρανών στο φαινόμενο παρειάς.

Για τους πιο πάνω λόγους, τα Πρότυπα επιβάλλουν η ελάχιστη διάσταση του δοκιμίου να είναι 3.5 [EN 12390-1] και 3 [ASTM C192] φορές μεγαλύτερη από τη μέγιστη διάσταση κόκκου των αδρανών^[2].

Γενικά, όσο καλύτερη ομοιογένεια έχει το σκυρόδεμα, τόσο μικρότερη είναι η επιρροή του μεγέθους του δοκιμίου στην θλιπτική αντοχή. Ωστόσο, όσο αφορά τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα, συναντάμε δύο αντισυγκρουόμενα φαινόμενα. Ενώ τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής παρουσιάζουν μεγαλύτερο βαθμό ομοιογένειας και άρα θα έπρεπε η επιρροή του μεγέθους να είναι μικρότερη, υπάρχουν ενδείξεις ότι η επίδραση του μεγέθους των δοκιμών είναι εντονότερη, λόγω της ψαθυρότητας που παρουσιάζουν^[19].

1.4.3 Το υλικό της μήτρας

Το υλικό των καλουπιών επηρεάζει τις συνθήκες συντήρησης (κατανομή θερμοκρασίας και υγρασίας στη μάζα του σκυροδέματος) αλλά και την επιτεδότητα των επιφανειών, επομένως επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος. Γενικώς, όταν χρησιμοποιούνται πλαστικές μήτρες, παρατηρείται μείωση της θλιπτικής αντοχής. Ειδικότερα, όσον αφορά τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα, αν αντί για χυτοσίδηρες μήτρες χρησιμοποιηθούν πλαστικές, τότε στα κυβικά δοκίμια παρατηρείται μία μείωση 10% της θλιπτικής αντοχής^[25] και αντίστοιχα για τα κυλινδρικά, μία μείωση σε ποσοστό 3%^[26].

1.4.4 Αδρανή

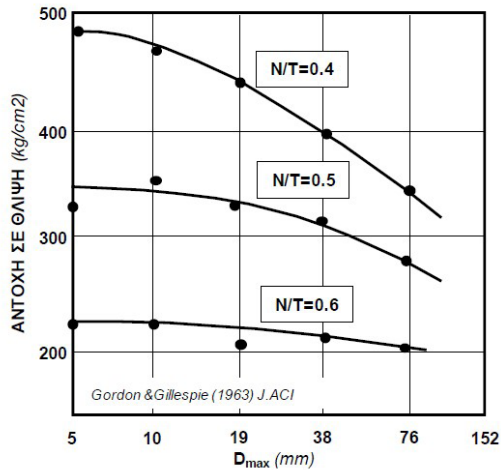
Όσο αυξάνεται η αντοχή του τσιμεντοκονιάματος, τόσο πιο έντονη είναι η επιρροή των χονδρόκοκκων αδρανών στην εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, ενώ η θλιπτική αντοχή επηρεάζεται πολύ λιγότερο^[27].

1.4.4.1 Μέγεθος αδρανών

Έχουν διεξαχθεί διάφορες έρευνες που καταδεικνύουν ότι το μέγεθος των αδρανών μπορεί να επηρεάσει τόσο τη θλιπτική, όσο και την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Πιο συγκεκριμένα, κυριαρχεί η άποψη ότι όσο αυξάνεται η διάμετρος των αδρανών, η αντοχή του σκυροδέματος μειώνεται. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα αδρανή παρουσιάζουν διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας από αυτό του τσιμεντοπολτού. Συνεπώς, όσο αυξάνεται το μέγεθός τους, αυξάνονται οι ανηγμένες παραμορφώσεις αλλά και οι τάσεις στην διεπιφάνεια των αδρανών-τσιμεντοπολτού, με αποτέλεσμα η αστοχία του υλικού να επέρχεται για μικρότερο συνολικό φορτίο [μετρήσεις *Dantu*]^[2].

Επιπρόσθετα, εκτός από το σχήμα, το είδος της επιφάνειας, την ορυκτολογική σύσταση· το μέγεθος των αδρανών παίζει σημαντικό ρόλο στην διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη^[28], δηλαδή στην ζώνη μέσω της οποίας έρχονται σε γεινίαση/επαφή τα αδρανή με το τσιμεντοπολτό. Όσο μεγαλύτερη είναι η μέγιστη διάσταση κόκκου των αδρανών (D_{max}), τόσο μεγαλώνει η διαφορά μεγέθους κόκκου μεταξύ τσιμέντου και αδρανών καταλήγοντας σε μία ασθενέστερη διεπιφανειακή μεταβατική ζώνη με μικρότερη συνάφεια και άρα μικρότερη αντοχή.

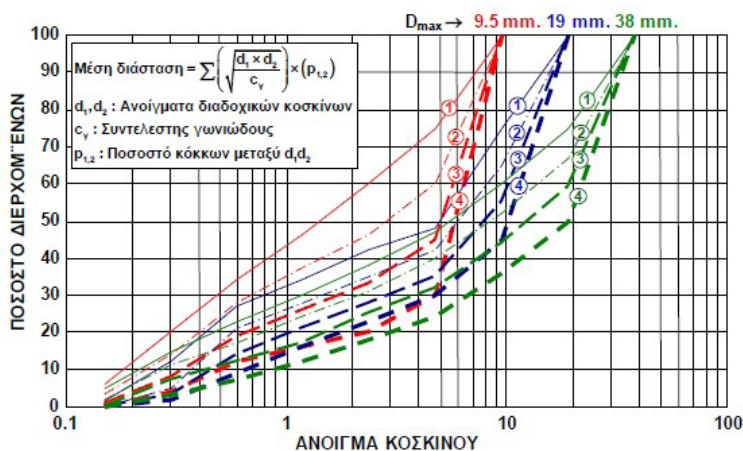
Στο *Σχήμα 1-30* φαίνεται ότι για τον ίδιο λόγο N/T , δηλαδή για την ίδια αντοχή τσιμεντοπολτού η αντοχή μειώνεται όσο το D_{max} αυξάνεται. Η διαφορά είναι εντονότερη για μικρούς λόγους N/T , ενώ γίνεται μικρότερη – μέχρι και ασήμαντη – για μεγαλύτερες τιμές N/T . Πρακτικά, χρησιμοποιούνται τιμές N/T πλησίον του 0.6, και γι' αυτό το λόγο, το παραπάνω φαινόμενο δεν είναι τόσο εμφανές^[2].



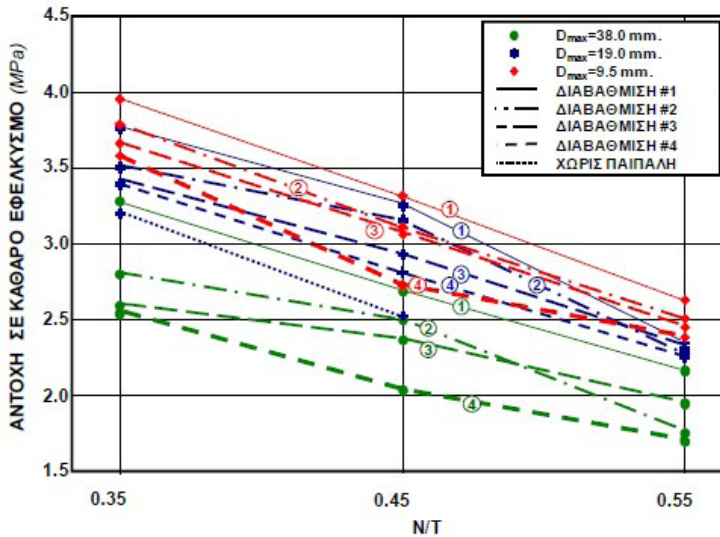
Σχήμα 1-30 Μεταβολή της αντοχής με την μεταβολή του D_{max} για σταθερές τιμές του N/T ^[2]

Οι Johnston και Sidwell ερεύνησαν το θέμα του μεγέθους των κόκκων των αδρανών πραγματοποιώντας και μετρήσεις καθαρού (μονοαξονικού) εφελκυσμού. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τρεις σειρές διαβαθμίσεων με D_{max} : 9.5 mm, 19 mm και 38 mm. Κάθε σειρά περιλάμβανε 4 επιμέρους διαβαθμίσεις με το ίδιο D_{max} που σημειώνονται με αρίθμηση 1, 2, 3 και 4 όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-31. Με τα αδρανή των διαβαθμίσεων αυτών παρασκευάστηκαν μίγματα σκυροδέματος με τρεις λόγους N/T : 0.35, 0.45 και 0.55, τα οποία εξετάστηκαν σε θλίψη (κύβις ακμής 150 mm) και σε καθαρό εφελκυσμό (πρίσματα 150 mm x 150 mm x 150 mm)^[2].

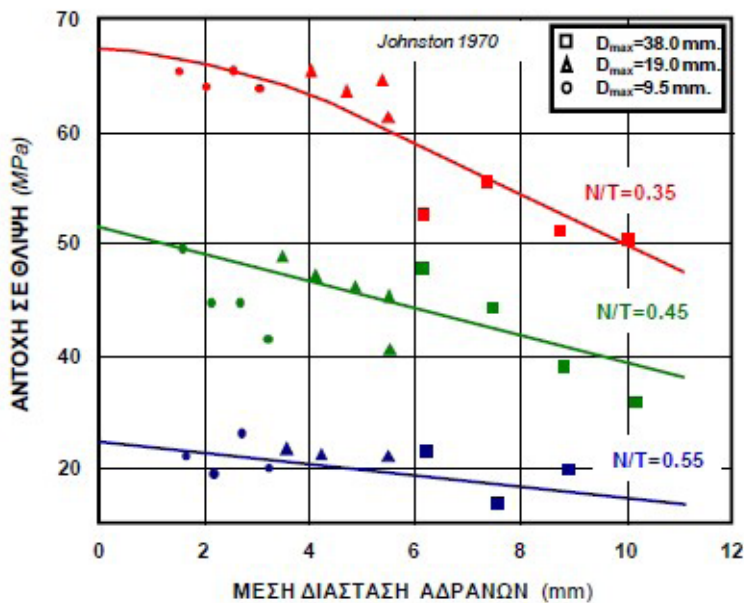
Στα παρακάτω σχήματα είναι φανερή η επίδραση του D_{max} στη θλιπτική και την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος για διάφορες τιμές του λόγου N/T .



Σχήμα 1-31 Κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αδρανών σκυροδεμάτων που εξετάστηκαν^[2]



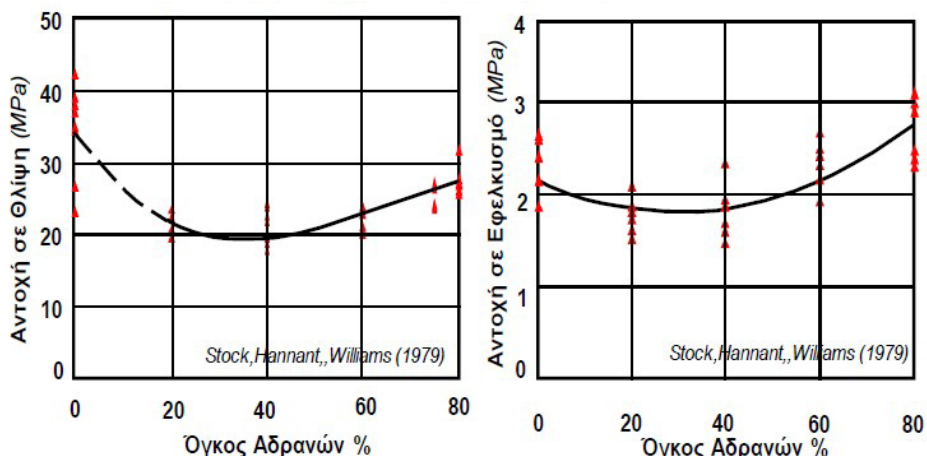
Σχήμα 1-32 Αντοχή σε εφελκυσμό ως συνάρτηση του λόγου N/T , της διαβάθμισης και του μεγέθους D_{max} ^[2]



Σχήμα 1-33 Μεταβολή της αντοχής σε θλίψη σε σχέση με τη μέση γεωμετρική διάσταση κόκκου κάθε διαβάθμισης αδρανών^[2]

1.4.4.2 Ποσοστό αδρανών

Παρά την πολυπλοκότητα του θέματος, έρευνα που διεξήχθη από τους Stock, Hannant και Williams, έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα ως προς την επιρροή του όγκου των αδρανών στη θλιπτική αντοχή αλλά και στην αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, όπως παρουσιάζονται στο Σχήμα 1-34 ^[2].



Σχήμα 1-34 Μεταβολή της αντοχής ως συνάρτηση του ποσοστού των αδρανών κατ' όγκον^[2]

Παρατηρείται ότι τόσο η θλιπτική, όσο και η εφελκυστική αντοχή παρουσιάζουν ελάχιστη τιμή για κατ' όγκο ποσοστό αδρανών μεταξύ 30% και 40%. Η τιμή αυξάνεται για ποσοστά μικρότερα ή μεγαλύτερα, παρουσιάζοντας μέγιστη τιμή αντοχής για ποσοστό αδρανών 80%^[2]. Επίσης, παρατηρείται ότι όταν ο όγκος των αδρανών μηδενισθεί, η θλιπτική αντοχή είναι μεγαλύτερη από κάθε αναλογία μίγματος με αδρανή. Στην περίπτωση του καθαρού εφελκυσμού αυτό δεν είναι εμφανές, διότι κατά πάσα πιθανότητα οι δοκιμές σε καθαρό εφελκυσμό δεν κατέστη δυνατόν να εκτελεστούν χωρίς την παρουσία ισχυρών συγκεντρώσεων τάσεων στα άκρα των αρπαγών και έτσι παρουσιάστηκαν μειωμένες. Γενικά, η αντοχή του σκυροδέματος (τσιμεντοπολτός και αδρανή) είναι πάντοτε μικρότερη της μεμονωμένης αντοχής των αδρανών και της αντοχής του τσιμεντοπολτού.

1.4.4.3 Ορυκτολογική σύσταση των αδρανών

Από έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί, φαίνεται ότι η ορυκτολογική σύσταση των αδρανών επηρεάζει την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος. Αυτό είναι φανερό και από την σχέση:

$$f_{ct} = k_t f_c^{0.57}$$

όπου ο συντελεστής k_t εξαρτάται κυρίως από τη φύση των αδρανών. Φαίνεται ότι τα πυριτικά αδρανή δίνουν μεγαλύτερο συντελεστή k_t σε σχέση με τα ασβεστολιθικά. Η παραπάνω σχέση βρέθηκε να είναι αξιόπιστη για τον υπολογισμό της αντοχής σε διάρρηξη για κάθε ηλικία σκυροδέματος^[4].

Αντίστοιχα, η σχέση που συνδέει τη θλιπτική αντοχή με τον τύπο των αδρανών^[4], είναι η εξής:

$$f_c = \frac{p f_{cm}}{q f_{cm} + 1}$$

όπου: f_c : η θλιπτική αντοχή σκυροδέματος

f_{cm} : η θλιπτική αντοχή του κονιάματος

p, q : εμπειρικές σταθερές που συνδέονται με τον τύπο των αδρανών

Ενδεικτικές τιμές των σταθερών p και q παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Τιμές των παραμέτρων για διαφορετικούς τύπους αδρανών^[4]

	p	q (MPa ⁻¹)	p/q (MPa)	% of debonded aggregate	f_c (MPa)	E_g (GPa)
Crotoy	0.583	0	∞	13.0	285	77
Boulonnais	1.111	0.0033	337	0	160	78
Arlaut	0.960	0.0040	241	0	111	62
Raon	0.651	0	∞	13.6	250	90
Cherbourg	1.145	0.0047	244	0	–	86

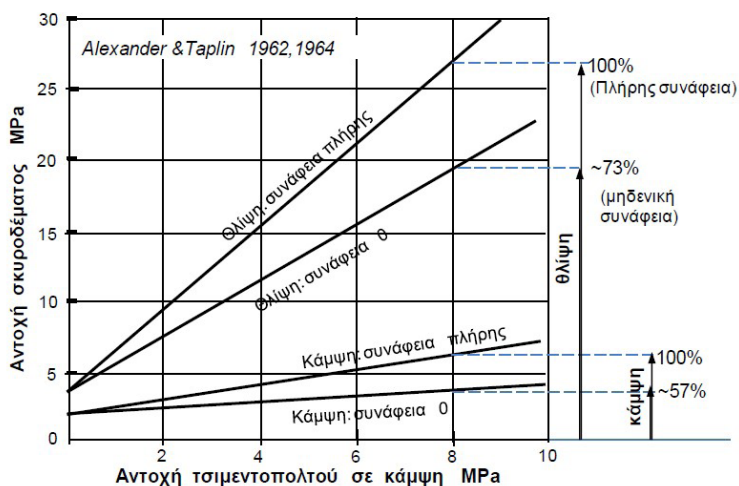
Για χαμηλής αντοχής κονιάματα, η εξίσωση γίνεται:

$$f_c \approx p f_{cm}$$

Επίσης, η αντοχή αυξάνει όταν η επιφάνεια των αδρανών είναι θραυσσιγενής και υπάρχουν σοβαρές πειραματικές ενδείξεις αύξησης αντοχής για συγκεκριμένους τύπους αδρανών, όπως είναι τα ασβεστολιθικά.

1.4.4.4 Συνάφεια - Μεταβατική ζώνη

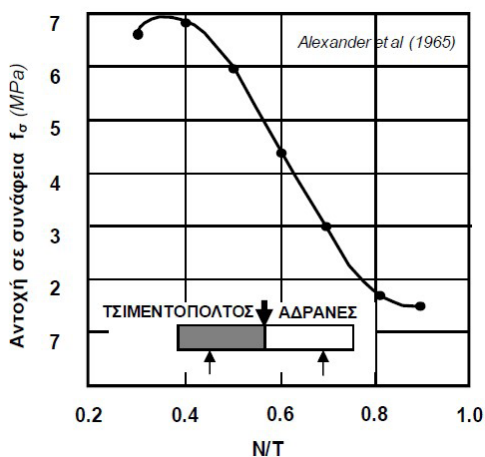
Η συμβολή της συνάφειας στην αντοχή του σκυροδέματος παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η συμβολή της στην αντοχή σε θλίψη και σε κάμψη.



Σχήμα 1-35 Επίδραση της συνάφειας στην αντοχή του σκυροδέματος^[2]

Στο Σχήμα 1-35 φαίνεται ότι η συμβολή της συνάφειας στην αντοχή σε θλίψη δεν είναι τόσο σημαντική, καθώς η αντοχή για μηδενική συνάφεια μειώνεται στο 70% περίπου της αντοχής για πλήρη συνάφεια. Αντίθετα, στην αντοχή σε κάμψη, η μείωση της αντοχής για μηδενική συνάφεια είναι σημαντικότερη γιατί μειώνεται στο 50%-60% της αντοχής με πλήρη συνάφεια.

Η συγκεκριμένη διαφορά αντοχών μεταξύ θλίψης και κάμψης, μπορεί να αποδοθεί στο ότι πρόκειται για δύο διαφορετικές δοκιμές με διαφορετική μορφή αστοχίας. Η αστοχία στη θλίψη προκαλείται από τη δημιουργία ενός περίπλοκου δικτύου ρωγμών, τόσο από αστοχία σε συνάφεια όσο και από αστοχία σε έμμεσο εφελκυσμό, όπου η εμπλοκή των αδρανών παίζει σημαντικό ρόλο, ενώ στην περίπτωση της κάμψης το δίκτυο ρωγμών είναι μικρότερο και προκαλούμενο άμεσα από εφελκυσμό με πολύ μικρότερη συμβολή της εμπλοκής των αδρανών^[2].



Σχήμα 1-36 Επίδραση του λόγου N/T στην ανάπτυξη αντοχής σε συνάφεια^[2]

Ωστόσο, υπάρχουν τρόποι να βελτιωθεί η συνάφεια και να επιτευχθεί αύξηση αντοχής. Ένας από αυτούς είναι η μείωση του λόγου N/T (Σχήμα 1-36) και ειδικά η χρήση ποζολανών (και ιδίως πυριτικής παιπάλης - silica fume), που οδηγεί στο σχηματισμό μιας σημαντικά πυκνότερης και δυνατότερης μεταβατικής ζώνης, με αποτέλεσμα τη βελτίωση της συνάφειας μεταξύ αδρανών και σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και κατά συνέπεια την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής^[29].

2 Συσχέτιση αντοχών

2.1 Γενικά

Είναι ευρέως γνωστό ότι το σκυρόδεμα σαν υλικό έχει μικρή εφελκυστική αντοχή σε σχέση με την θλιπτική του αντοχή. Λόγω της αδυναμίας του αυτής εκ φύσεως σε εφελκυσμό, χρησιμοποιείται ως θλιβόμενο στοιχείο στις περισσότερες κατασκευές από σκυρόδεμα. Ωστόσο, ακόμα και αν αποφεύγονται τα στατικά φορτία λόγω εφελκυσμού πάνω στα στοιχεία αυτά, είναι αδύνατο να απομονωθούν από τα δυναμικά εφελκυστικά φορτία. Η διάδοση λοιπόν αυτής της εφελκυστικής έντασης λόγω των δυναμικών φορτίων, μπορεί να προέρχεται είτε από εκρήξεις, είτε από πρόσκρουση βλημάτων, είτε από σεισμούς κτλ. Έτσι, μία κατασκευή υποβαλλόμενη σε δυναμικά φορτία, μπορεί να οδηγήσει σε δύο μορφών κατάσταση αστοχίας, την τοπική ή την ολική.

Υπάρχουν, επίσης, περιπτώσεις όπου το στοιχείο επιπονεύεται σε εφελκυσμό- συνήθως από κάμψη - όπως σε περιπτώσεις οδοστρωμάτων ή δαπέδων (αεροδρομίων, λιμένων κτλ), καθώς και περιπτώσεις επιβαλλόμενων παραμορφώσεων από συστολή, όπου η αντοχή σε εφελκυσμό αποτελεί την κύρια παράμετρο υπολογισμού.

Σήμερα, με τα μέσα και τη γνώση που διατίθεται, καθώς και με την εξέλιξη της μοντελοποίησης των κατασκευών σε διάφορα προγράμματα, μπορούν να υπολογιστούν οι δυνάμεις και οι πιέσεις που ασκούνται σε μία κατασκευή ακόμα και υπό πολύπλοκες δυναμικές συνθήκες φόρτισης. Σε αντίθεση, μοντέλα για τις δυναμικές ιδιότητες των υλικών βρίσκονται ακόμα σε πρώιμο στάδιο. Κατά συνέπεια, τα μοντέλα των υλικών αποτελούν τον αδύναμο κρίκο στους προηγμένους υπολογισμούς των πεπερασμένων στοιχείων με αποτέλεσμα την ύπαρξη μόνο ελάχιστων αξιόπιστων δεδομένων για τη μοντελοποίησή τους.

Όσον αφορά τη θλιπτική συμπεριφορά των υλικών από τσιμέντο, υποβαλλόμενων σε διάφορες καταπονήσεις, έχουν γίνει διεξοδικές μελέτες - δοκιμές. Τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, επιβεβαιώνουν ότι η θλιπτική αντοχή αυξάνεται όσο υποβάλλεται το σκυρόδεμα σε δυναμική φόρτιση. Το γενικό αυτό συμπέρασμα έχει επιβεβαιωθεί από πολλούς ερευνητές κατά τη διάρκεια πολλών δεκαετιών. Αντίθετα, όσον αφορά την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, η οποία αποτελεί πολύ σημαντική παράμετρο για τον σχεδιασμό κατασκευών, δεν υπάρχουν εκτεταμένες μελέτες στην βιβλιογραφία, παρά μόνο κάποια ελάχιστα δεδομένα στην περίπτωση υψηλών τιμών φορτίων καταπόνησης. Για το λόγο αυτό, προκειμένου να προσδιοριστεί η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος και για στατικά και για δυναμικά φορτία μιας υπάρχουσας κατασκευής, είναι απαραίτητες οι πειραματικές δοκιμές^[30].

2.2 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη

Έχουν πραγματοποιηθεί πολλές έρευνες, οι οποίες αποσκοπούσαν στον προσδιορισμό της συσχέτισης μεταξύ της αντοχής σε διάρρηξη ($f_{ct,sp}$) και της αντοχής σε θλίψη (f_c) δοκιμών σκυροδέματος. Ως εκ τούτου, στην μεχρι τώρα βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές προτεινόμενες σχέσεις μεταξύ $f_{ct,sp}$ και f_c . Οι σχέσεις αυτές αναφέρονται σε διάφορους τύπους τσιμέντου (συμβατικό τσιμέντο Portland, ταχείας σκλήρυνσης τσιμέντο Portland), διάφορα υλικά τσιμέντου (ιπτάμενη τέφρα, bottom ash, silica fume), ποικίλους λόγους Ν/Τ με εύρος από 0.24 μέχρι 0.55, ηλικίες σκυροδέματος με εύρος από 1 μέχρι 365 ημέρες, θερμοκρασίες συντήρησης από 0°C μέχρι 30°C, ποικίλες συνθήκες συντήρησης κτλ. Ωστόσο, οι περισσότερες από αυτές βασίζονται κυρίως σε δεδομένα που λήφθηκαν από σκυροδέματα με θλιπτική αντοχή μικρότερη από 83 MPa^[31].

Συνήθως, οι εξισώσεις $f_{ct,sp}-f_c$ που προτείνονται μέχρι και σήμερα από διάφορους ερευνητές έχουν την εκθετική μορφή:

$$f_{ct,sp} = a f_c^b$$

όπου: f_c : η θλιπτική αντοχή

$f_{ct,sp}$: η αντοχή σε διάρρηξη

a, b : αδιάστατες παράμετροι

Γενικώς, παλαιότερα και για αρκετά χρόνια, είχε εδραιωθεί από την επιστημονική κοινότητα - τόσο από διάφορους ερευνητές, όσο και από το Αμερικάνικο Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI 318-89^[32]) - η εκθετική τιμή $b=0.5$ στην παραπάνω εξίσωση, με σκοπό την πρόβλεψη της εφελκυστικής αντοχής σε σχέση με την θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμών.

Αργότερα, ωστόσο, όταν η μέθοδος του προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής (δοκιμή σε διάρρηξη) υιοθετήθηκε κι από άλλους ερευνητές, προτάθηκαν διάφορες σχέσεις οι οποίες δεν ήταν σύμφωνες με την εκθετική τιμή $b=0.5$, καθιστώντας την μη αντιπροσωπευτική ως προς τις δύο αντοχές. Αντ' αυτής της σχέσης, οι περισσότερες έρευνες κατέληξαν σε εξισώσεις με εκθετική τιμή που κυμαίνεται από 0.6 μέχρι 0.8 ($b=0.6\sim 0.8$)^[33].

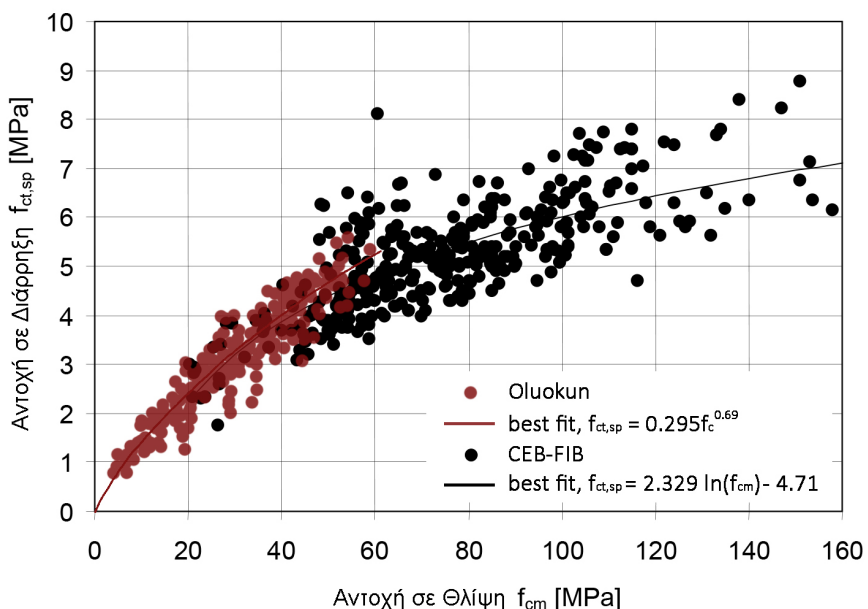
Η ασυμφωνία των καινούριων εξισώσεων με την μέχρι τότε διαδεδομένη σχέση, οδήγησε τον Ολυοκν σε μια μεγάλη έρευνα το 1991^[33], με σκοπό την αναθεώρηση της εξίσωσης $f_{ct,sp}-f_c$. Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν πειραματικά δεδομένα από διάφορες πηγές (566 σημεία) και με βάση αυτά, προτάθηκε μια καινούρια εξίσωση με $b=0.69$:

$$f_{ct,sp} = 0.295 f_c^{0.69}$$

Η εξίσωση αυτή, σύμφωνα με στατιστική ανάλυση που πραγματοποιήθηκε από τον Ολυοκν, βρέθηκε να προβλέπει με αρκετή ακρίβεια την εφελκυστική αντοχή σκυροδέματος για δεδομένη θλιπτική αντοχή που δεν ξεπερνά τα 56 MPa. Επίσης, κατέληξε στο γεγονός

ότι η εκθετική τιμή 0.5 του ACI για την εκτίμηση της εφελκυστικής από τη θλιπτική αντοχή δεν προσέγγιζε καλά τα πειραματικά δεδομένα. Συγκεκριμένα, με κριτήριο το συνολικό απόλυτο σφάλμα (IAE, %), η σχέση του ACI σε χαμηλής αντοχής σκυροδέματα ($f_c < 21\text{MPa}$) παρατηρήθηκε να υπερεκτιμά την αντοχή σε διάρρηξη του σκυροδέματος, ενώ σε μεγαλύτερης αντοχής σκυροδέματα ($f_c > 27\text{MPa}$ περίπου), η αντοχή σε διάρρηξη παρουσιαζόταν μικρότερη από την πραγματική τιμή^[33].

Στο Σχήμα 2-1, με μαύρο χρώμα παρουσιάζονται διάφορα πειραματικά αποτελέσματα από τις δοκιμές σε διάρρηξη σε σχέση με την θλιπτική αντοχή, καθώς και η συνάρτηση η οποία προσομοιάζει καλύτερα τα συνολικά δεδομένα σύμφωνα με το CEB^[19] για εύρος αντοχών από 20 μέχρι και 160 MPa. Παρατηρείται ότι η εξίσωση που προκύπτει είναι λογαριθμικής μορφής και όχι εκθετικής. Με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τον Oluokun το 1991^[33] και η εκθετική σχέση που προκύπτει για σκυροδέματα αντοχής μέχρι και 56 MPa. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι η σχέση μεταξύ αντοχής σε διάρρηξη και θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος είναι παρόμοια με τη σχέση μεταξύ αντοχής σε καθαρό εφελκυσμό και θλιπτικής αντοχής^[19].



Σχήμα 2-1 Σχέση μεταξύ θλιπτικής αντοχής και αντοχής σε διάρρηξη σκυροδέματος, όπως προκύπτει από τον συνδυασμό των ερευνών^{[33],[19]}

Μια σημαντική έρευνα πραγματοποιήθηκε από τους Arioglu et al. το 2006^[31]. Οι παραπάνω, εκτός του ότι συγκέντρωσαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία ένα μεγάλο πλήθος εξισώσεων, οι οποίες συσχετίζουν την αντοχή σκυροδέματος σε διάρρηξη ($f_{ct,sp}$) και σε θλίψη (f_c) κυλινδρικών δοκιμών, αξιολόγησαν την αξιοπιστία αυτών των εξισώσεων σε εύρος θλιπτικής αντοχής από 0 MPa μέχρι 120 MPa. Επιπρόσθετα, πρότειναν μια άλλη σχέση μεταξύ $f_{ct,sp}$ και f_c , η οποία μπορεί να εφαρμοστεί αξιόπιστα σε πολύ μεγάλο εύρος

θλιπτικών αντοχών, δηλαδή σε σκυροδέματα πολύ μικρής αντοχής (ηλικίας τουλάχιστον 12 ωρών) μέχρι και σε σκυροδέματα πολύ υψηλής αντοχής (μέχρι 120 MPa), ανεξαρτήτως της σύνθεσης του σκυροδέματος, της φύσης των υλικών τσιμέντου, του χρόνου και της θερμοκρασίας συντήρησης. Η αξιοπιστία όλων των εξισώσεων βασίστηκε στο Συνολικό Απόλυτο Σφάλμα (Integral Absolute Error, IAE, %).

$$IAE = \sum \frac{[(Q_i - P_i)^2]^{1/2}}{\sum Q_i} \times 100$$

όπου Q_i η μετρούμενη τιμή και P_i η προβλεπόμενη τιμή της εκάστοτε εξίσωσης παλινδρόμησης.

Επιπλέον, βρέθηκε ότι ο λόγος $f_{ct,sp}/f_c$ επηρεάζεται από το βαθμό της θλιπτικής αντοχής. Πιο συγκεκριμένα, σε χαμηλής αντοχής σκυροδέματα, η αντοχή σε διάρρηξη προκύπτει περίπου ίση με το 10% της θλιπτικής αντοχής του κυλίνδρου, ενώ σε σκυροδέματα πολύ υψηλής αντοχής, ο λόγος μειώνεται στο 5% περίπου.

Στις πραγματικές κατασκευές από σκυροδέμα, η θερμοκρασία μετά την σκυροδέτηση παρουσιάζει πολλές εναλλαγές με το χρόνο, πριν και μετά την αφαίρεση του ξυλότυπου. Επομένως, για την ορθή ανάλυση θερμικής καταπόνησης του σκυροδέματος, είναι απαραίτητο οι εξισώσεις για την εκτίμηση της αντοχής σε διάρρηξη καθώς και του μέτρου ελαστικότητας σε σκυροδέματα νεαρής ηλικίας, να λαμβάνουν υπόψη διάφορες παραμέτρους, όπως διαφορετικές θερμοκρασίες και διαφορετικές συνθήκες συντήρησης και τύπους τσιμέντου. Σύμφωνα με τους Soty Ros και Hiroshi Shima^[34], οι εξισώσεις που τηρούν τις πιο πάνω προϋποθέσεις δίνονται από το JCI^[35]. Έχει, όμως, παρατηρηθεί ότι αυτές οι εξισώσεις προέκυψαν χωρίς να ληφθούν υπόψη όλες οι δυνατές συνθήκες συντήρησης του σκυροδέματος (πραγματοποιήθηκαν μόνο σε δοκίμια που συντηρήθηκαν μέσα στο νερό), ούτε την επιρροή που μπορεί να έχει το μέγεθος του κυλινδρικού δοκιμίου.

Σύμφωνα, λοιπόν, με τους Soty Ros και Hiroshi Shima^[34], η σχέση μεταξύ $f_{ct,sp}$ και f_c σε σκυροδέματα νεαρής ηλικίας ($t \leq 7$ ημέρες), βρέθηκε να είναι ανεξάρτητη από τον τύπο του τσιμέντου και τη θερμοκρασία συντήρησης του σκυροδέματος. Το πιο πάνω συμπέρασμα προέκυψε, αφού η προτεινόμενη εξίσωση που εξήλθε από την έρευνά τους, φάνηκε να ταιριάζει με τις αντίστοιχες εξισώσεις στη βιβλιογραφία (οι οποίες αναφέρονται σε σκυροδέματα νεαρής ηλικίας), χωρίς τις παραμέτρους της διαφορετικής συντήρησης και του μεγέθους των κυλινδρικών δοκιμίων.

Στην εργασία αυτή, συγκεντρώθηκαν πολλές από τις ήδη υπάρχουσες εξισώσεις που συσχετίζουν την αντοχή σε διάρρηξη και την αντοχή σε θλίψη και παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Επιπρόσθετα, στον ίδιο πίνακα φαίνεται η αξιοπιστία των εξισώσεων αυτών σε εύρος αντοχών από 0 MPa μέχρι 120 MPa, με βάση το συνολικό απόλυτο σφάλμα (IAE, %), όπως προέκυψε από τους Arioglu et al.^[31], καθώς και κάποιες άλλες σχέσεις μεταξύ $f_{ct,sp}$ και f_c που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία.

Πίνακας 4 Διάφορες εξισώσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορούν τη συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε διάρρηξη ($f_{t,sp}$) και αντοχής σε θλίψη (f_c). Σε ορισμένες περιπτώσεις αξιολογείται η αξιοπιστία των εξισώσεων σε εύρος αντοχών από 0 MPa μέχρι 120 MPa, με βάση το Συνολικό Απόλυτο Σφάλμα (IAE, %)

Πηγή	Σχέση	IAE (%)							Εύρος Αντοχών (MPa)	Σχόλια
		Θλιπτική Αντοχή (MPa)								
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	100 - 120	0 - 120		
ACI 363R-92 [36]	$f_{t,sp} = 0.59f_c^{0.5}$	14.4	5.8	9.7	12.4	18.9	12.4	8.1	$21 \leq f_c \leq 83$	–
ACI 318-99 [37]	$f_{t,sp} = 0.56f_c^{0.5}$	10.9	8.6	14.0	16.8	23.0	16.7	–	–	–
CEB-FIB Model Code 1990 [38]	$f_{t,sp} = 0.3f_c^{0.667}$	8.9	6.0	5.6	2.5	7.9	8.2	5.9	$f_c < 83$	–
CEB-FIB [19]	$f_{t,sp} = 2.329 \ln(f_{cm}) - 4.71$	–	–	–	–	–	–	–	$20 \leq f_c \leq 160$	–
Mokhtarzadeh and French [39]	$f_{t,sp} = 0.56f_c^{0.5}$	10.8	8.6	14.0	16.8	23.0	16.7	18.4	$48 \leq f_c \leq 103$	Για διάφορα πειραματικά δεδομένα και συντήρηση σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και υγρασίας
	$f_{t,sp} = 0.32f_c^{0.63}$	15.4	17.4	18.9	18.0	20.8	12.7	18.9		
Carino and Lew [40]	$f_{t,sp} = 0.272f_c^{0.71}$	12.4	8.3	7.1	3.0	7.8	8.9	–	–	–
Raphael [41]	$f_{t,sp} = 0.313f_c^{0.667}$	10.7	8.9	9.1	6.5	9.9	6.2	9.1	$f_c \leq 40$	Συμβατικό σκυρόδεμα
Ahmad and Shah [42]	$f_{t,sp} = 0.462f_c^{0.55}$	9.3	10.0	14.0	15.4	20.4	13.2	13.8	$15 \leq f_c \leq 84$	–
Gardner et al. [43]	$f_{t,sp} = 0.47f_c^{0.59}$	13.8	7.3	4.4	3.0	7.7	7.8	7.0	$3 \leq f_c \leq 46$	Σκυροδέματα με τσιμέντο τύπου I (r = 0.865)
	$f_{t,sp} = 0.46f_c^{0.60}$	14.1	8.1	5.1	4.2	7.6	9.7	6.8	$13 \leq f_c \leq 72$	Σκυροδέματα με τσιμέντο τύπου III (r = 0.989)

Πηγή	Σχέση	IAE (%)							Εύρος Αντοχών (MPa)	Σχόλια
		Θλιπτική Αντοχή (MPa)								
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	100 - 120	0 - 120		
Gardner [44]	$f_{ct,sp} = 0.34f_c^{0.66}$	8.8	5.8	5.4	2.4	7.9	8.1	9.7	Σχέση που ταυριάζει καλύτερα σε σκυροδέματα με τσιμέντο τύπου I, III και υπτάμνη τέφρα (r = 0.98, IAE = 5.8%)	
	$f_{ct,sp} = 0.33f_c^{0.667}$	8.9	6.0	5.6	2.5	7.9	8.2	6.0		Προτεινόμενη σχέση για σκυροδέματα με τσιμέντο τύπου I, III / υπτάμνη τέφρα (IAE = 6%)
Oluokun et al. [45]	$f_{ct,sp} = 0.206f_c^{0.79}$	–	–	–	–	–	–	–	$f_c < 63$	–
Oluokun [33]	$f_{ct,sp} = 0.295f_c^{0.69}$	–	–	–	–	–	–	–	$f_c < 56$	Συλλογή δεδομένων (566 σημεία) από διάφορες πηγές
Arioglu [46]	$f_{ct,sp} = 0.321f_c^{0.661}$	10.0	8.5	8.8	6.3	10.0	6.1	8.5	$15 \leq f_c \leq 120$	Σκυροδέματα με τσιμέντο και τσιμέντο/silica fume (r = 0.950)
Arioglu et al. [31]	$f_{ct,sp} = 0.387f_c^{0.63}$	9.0	5.6	4.8	2.3	8.0	7.4	5.9	$4 \leq f_c \leq 120$	Προτεινόμενη σχέση για (0 – 30 °C) θερμοκρασιακά συντηρημένα σκυροδέματα με τσιμέντο τύπου I, III/ υπτάμνη τέφρα, τσιμέντο/..., τσιμέντο/silica fume

Πηγή	Σχέση	IAE (%)							Εύρος Αντοχών (MPa)	Σχόλια
		Θλιπτική Αντοχή (MPa)								
		0 - 20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	100 - 120	0 - 120		
Gajendran et al. [47]	$f_{ct,sp} = 0.689f_c^{0.401}$	-	-	-	-	-	-	-	-	Για Σκυροδέματα Υψηλής Επιτελεστικότητας (28 ημέρες)
	$f_{ct,sp} = 1.049f_c^{0.314}$	-	-	-	-	-	-	-	-	Για Σκυροδέματα Υψηλής Επιτελεστικότητας (56 ημέρες)
JCI [35]	$f_{ct,sp} = 0.13f_c^{0.85}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JSCE [48]	$f_{ct,sp} = 0.44f_c^{0.5}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
JSCE [49]	$f_{ct,sp} = 0.23f_c^{0.667}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
AIJ [50]	$f_{ct,sp} = 0.18f_c^{0.75}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soty Ros and Hiroshi Shima [34]	$f_{ct,sp} = 0.2f_c^{0.8}$	-	-	-	-	-	-	-	-	Προτεινόμενη σχέση για σκυροδέματα νεαρής ηλικίας ($t \leq 7$ ημέρες) Η σχέση είναι ανεξάρτητη του τύπου του τσιμέντου και της θερμοκρασιακής συντήρησης του σκυροδέματος

2.3 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής

Στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται σχέσεις μεταξύ αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό (f_{ct}) και αντοχής σε θλίψη (f_c), τις οποίες έχουν προτείνει διάφοροι ερευνητές.

Πίνακας 5 Διάφορες εξισώσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορούν τη συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε καθαρό (μονοαξονικό) εφελκυσμό (f_t) και θλιπτικής αντοχής (f_c)

Πηγή	Σχέση	Σχόλια
British Code of Practice [51]	$f_{ct} = 0.12 f_c^{0.7}$	Θλιπτική αντοχή προκύπτουσα από κυβικά δοκίμια [MPa]
CEB-FIB Constitutive modelling of high strength [19]	$f_{ct} = 0.44 f_c^{0.56}$	Δοκίμια που δεν έχουν υποστεί προρηγμάτωση (unnotched specimens)
Eurocode 2 [52] & MODEL CODE 2010 [53]	$f_{ct} = 0.3 f_c^{0.667}$	Για $\leq C50/60$ [MPa]
	$f_{ct} = 2.12 \ln(1+0.1 f_{cm})$	Για $> C50/60$ [MPa] * $f_{cm} = f_c + \Delta_f$, $\Delta_f = 8\text{MPa}$

2.4 Συσχέτιση εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη και μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής

Μία άλλη έμμεση δοκιμή εφελκυσμού, όπως προαναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, είναι η δοκιμή σε κάμψη (*flexural strength test*). Η αντοχή που δίνει η δοκιμή σε κάμψη υπερεκτιμά την πραγματική αντοχή που προκύπτει από τον μονοαξονικό εφελκυσμό. Η σχέση μεταξύ της αντοχής σε κάμψη και της αντοχής σε καθαρό (μονοαξονικό) εφελκυσμό εξαρτάται από το μέγεθος και κυρίως από το ύψος της δοκού. Όσο μεγαλύτερο είναι το ύψος της δοκού, τόσο η αντοχή σε κάμψη προσεγγίζει την αντοχή σε καθαρό εφελκυσμό.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό μέσω της αντοχής σε κάμψη, παρουσιάζονται οι παρακάτω προτεινόμενες σχέσεις (Πίνακας 6).

Πίνακας 6 Διάφορες εξισώσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορούν τη συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε καθαρό (μονοαξονικό) εφελκυσμό (f_t) και αντοχής σε κάμψη ($f_{ct,fl}$)

Πηγή	Σχέση	Σχόλια
CEB-FIP MC 1990 [38]	$f_{ct,fl} = \frac{1 + 1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}}{1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}} f_{ctm}$	h_b : ύψος δοκού
Eurocode 2 2004 [52]	$f_{ct,fl} = \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right) f_{ctm}; f_{ctm}\right]$	–
MODEL CODE 2010 [53]	$f_{ct,fl} = \frac{1 + 0.06 h_b^{0.7}}{0.06 h_b^{0.7}} f_{ctm}$	–

2.5 Συσχέτιση μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής και εφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη

Από τη στιγμή που η δοκιμή σε διάρρηξη υποκαθιστά συνήθως την δοκιμή σε μονοαξονικό εφελκυσμό, μία συσχέτιση μεταξύ τους είναι απαραίτητο να εκτιμηθεί. Έτσι, στον παρακάτω πίνακα συγκεντρώνονται κάποιες προτεινόμενες σχέσεις, οι περισσότερες από τις οποίες προβλέπουν τη γραμμική συσχέτιση της μέσης αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό και της αντοχής σε διάρρηξη, ακολουθώντας την εξής γενική μορφή:

$$f_{ctm} = A f_{ct,sp}$$

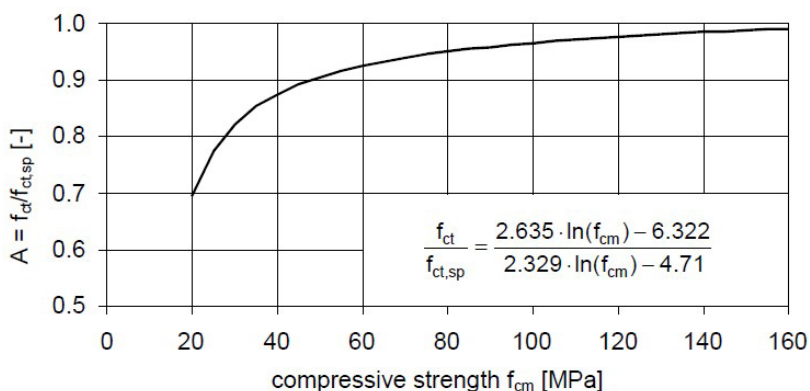
Ωστόσο, από έρευνα που διεξήχθη από τους Malárics & Müller, προτάθηκαν άλλες τρεις σχέσεις εκ των οποίων οι δύο ακολουθούν μη γραμμική σχέση^[12].

Οι εξισώσεις που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία, οι οποίες συσχετίζουν την αντοχή μονοαξονικού εφελκυσμού και την αντοχή σε διάρρηξη παρουσιάζονται στον πιο κάτω πίνακα.

Πίνακας 7 Διάφορες εξισώσεις από την υπάρχουσα βιβλιογραφία που αφορούν τη συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε καθαρό (μονοαξονικό) εφελκυσμό (f_{ct}) και αντοχής σε διάρρηξη ($f_{ct,sp}$)

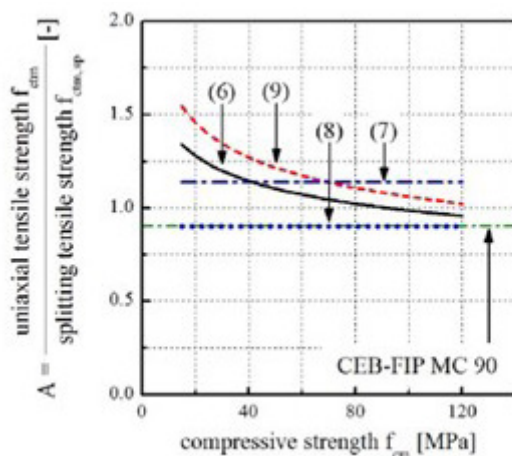
Πηγή	Σχέση	Σχόλια
NS 3473 1989 [54]	$f_{ctm} = 0.667 f_{ct,sp}$	-
CEB-FIP MC 1990-93 [38]	$f_{ctm} = 0.9 f_{ct,sp}$	Για πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 75/150 mm και μη θραυστά αδρανή
Remmel 1994 [55]	$f_{ctm} = 0.95 f_{ct,sp}$	-
Jaccoud et al. 1995 [56]	$f_{ctm} = 0.81 f_{ct,sp}$	-
Malárics, V. & Müller, H.S. [12]	$f_{ctm} = 1.14 f_{ct,sp}$	Για πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 150/300 mm και μη θραυστά αδρανή
	$f_{ctm} = 1.46 f_{ct,sp}^{0.77}$	Για κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 150/300 mm και μη θραυστά αδρανή
	$f_{ctm} = 1.71 f_{ct,sp}^{0.73}$	Για κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων 150/300 mm και θραυστά αδρανή

Από τις παραπάνω σχέσεις παρατηρούμε ότι οι τιμές του λόγου $A = f_{ctm} / f_{ct,sp}$ λαμβάνουν διάφορες τιμές. Στο Σχήμα 2-2, με βάση κάποιες πειραματικές δοκιμές που έγιναν, φαίνεται ότι όσο αυξάνεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, τόσο η αντοχή σε διάρρηξη προσεγγίζει την πραγματική αντοχή, δηλαδή την αντοχή μονοαξονικού εφελκυσμού, και άρα ο λόγος A τείνει στη μονάδα^[19].



Σχήμα 2-2 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής με το λόγο αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό προς αντοχή σε διάρρηξη ($A=f_{ct}/f_{ct,sp}$)^[19].

Με βάση την έρευνα των Malárics, V. & Müller, H.S. 2007, οι τιμές του A εκτός από την κατηγορία αντοχής του σκυροδέματος, εξαρτώνται από τη γεωμετρία αλλά και από τα αδρανή των δοκιμών. Έτσι, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2-3, οι τιμές που μπορεί να λάβει ο λόγος A αυξάνουν και μπορεί να κυμανθούν εντός του εύρους των 1 έως 1.5 αν τα αδρανή είναι θραυστά και αν αυξηθούν οι διαστάσεις του δοκιμίου από 75/150 mm σε 150/300 mm^[12].



specimen property	D/L [mm/mm]	concrete aggregate	conversion formula	Eq. No.
cylinder	150/300	gravel	$A = 2.08 \cdot f_{cm}^{-0.16}$	(6)
core	150/300	gravel	$A = 1.14 \cdot f_{cm}$	(7)
core	75/150	gravel	$A = 0.90 \cdot f_{cm}$	(8)
cylinder	150/300	crushed	$A = 2.64 \cdot f_{cm}^{-0.20}$	(9)

Σχήμα 2-3 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής κυλινδρικού δοκιμίου με το λόγο αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό προς αντοχή σε διάρρηξη ($A=f_t/f_{t,sp}$)^[12]

2.6 Συσχέτιση θλιπτικής αντοχής και εφελκυστικής αντοχής σε κάμψη

Με βάση τον αμερικάνικο κανονισμό ACI Building Code 318-02^[57], η αντοχή σε κάμψη $f_{ct,fl}$ αποτελεί το 10%- 15% της αντοχής σε θλίψη f_c (Πίνακας 8).

Πίνακας 8 Συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε κάμψη ($f_{ct,fl}$) και θλιπτικής αντοχής (f_c)

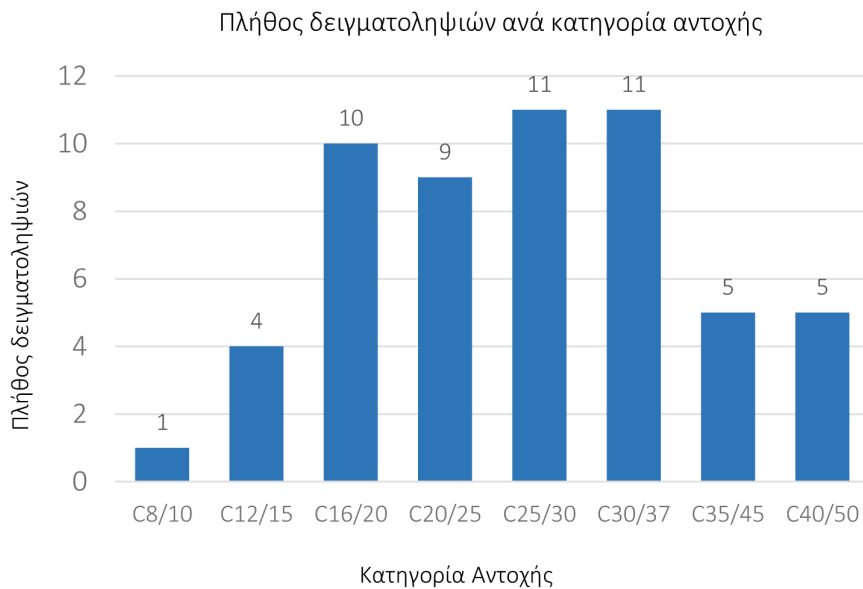
Πηγή	Σχέση	Σχόλια
ACI Building Code 318-02 [57]	$f_{ct,fl} = (10\% - 15\%) f_c$	–

3 Πειραματική Διαδικασία

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, επιδίωξη ήταν η συλλογή επαρκούς πλήθους δειγμάτων, έτσι ώστε να προσεγγιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα και αξιόπιστα η σχέση μεταξύ αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε διάρρηξη. Για την πρακτική σημασία της σχέσης μεταξύ των δύο αυτών αντοχών, χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σκυροδέματος από μονάδες παραγωγής Εργοστασιακού Σκυροδέματος, και όχι δοκίμια που παρασκευάστηκαν σε εργαστήριο. Για το σκοπό αυτό, συνέβαλαν τρεις ξεχωριστές μονάδες παραγωγής σκυροδέματος, ώστε να παρασκευαστούν συνολικά 56 δειγματοληψίες των 6 δοκιμίων (336 δοκίμια). Επιπρόσθετα, αξίζει να σημειωθεί ότι για να επιτευχθεί η μεγαλύτερη δυνατή αντιπροσωπευτικότητα της δειγματοληψίας ως προς το σκυρόδεμα που κυκλοφορεί, η δειγματοληψία και παρασκευή των δοκιμίων έγινε από το προσωπικό που διέθετε η μονάδα παραγωγής σκυροδέματος και όχι από τους συντάξαντες την εργασία αυτή. Η κάθε δειγματοληψία αποτελείται από τρία κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και τρία κυλινδρικά δοκίμια διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm της ίδιας σύνθεσης (*Φωτογραφία 1* και *Φωτογραφία 2*). Επιλέχθηκαν μίγματα επτά διαφορετικών κατηγοριών αντοχής, με εύρος από C12/15 μέχρι C40/50, ανεξαρτήτως μεγέθους μέγιστου κόκκου (D_{max}), κάθισης, χημικών προσθέτων ή εργασιμότητας. Επιδίωξη ήταν να συγκεντρωθεί - κατά το δυνατόν - ίσο πλήθος δειγματοληψιών (τουλάχιστον τρεις) για κάθε κατηγορία αντοχής, έτσι ώστε να επιτευχθεί ισοκατανομή ανάμεσα στο σύνολο των δειγμάτων. Ωστόσο, παρατηρείται ότι στα πολύ χαμηλής αντοχής, αλλά και στα υψηλής αντοχής σκυροδέματα, το πλήθος των δειγματοληψιών που συγκεντρώθηκε, είναι αρκετά μικρότερο σε σχέση με τα σκυροδέματα κατηγοριών C16/20 έως και C30/37, κάτι το οποίο είναι λογικό για τον Ελλαδικό χώρο, καθώς οι συνήθεις κατηγορίες αντοχής που παράγονται είναι αυτές. Επίσης, κατά το διάστημα που πραγματοποιήθηκαν οι δειγματοληψίες (Ιανουάριος - Μάιος), η ζήτηση του σκυροδέματος περιοριζόταν στις ως άνω κατηγορίες με μικρότερη ζήτηση στις υψηλές ή πολύ υψηλές αντοχές.

Στο *Σχήμα 3-1* φαίνεται το πλήθος των δειγματοληψιών που παρασκευάστηκαν για κάθε κατηγορία αντοχής.

Η ζήτηση σκυροδέματος μικρής αντοχής (C8/10, C12/15) είναι συνήθως μικρή και για να αυξηθεί ο αριθμός των αντοχών στην περιοχή αυτή αποφασίστηκε ορισμένες δειγματοληψίες σκυροδεμάτων C16/20 ή C20/25 να θραύονται σε μικρότερη ηλικία. Αυτό βέβαια έγινε με την επιφύλαξη ότι ενδεχομένως να εισάγεται μία νέα παράμετρος μεταβλητότητας, δεδομένου ότι τα σκυροδέματα με υψηλότερη αντοχή έχουν N/T μικρότερο και επομένως μεγαλύτερη ταχύτητα ενυδάτωσης^[1], γεγονός που μπορεί να αλλοιώσει τη σχέση αντοχής σε θλίψη με αντοχή σε εφελκυσμό. Η αλλοίωση αυτή, πάντως, πιστεύεται ότι είναι πολύ μικρή ή και ασήμαντη.



Σχήμα 3-1 Πλήθος δειγματοληψιών για κάθε κατηγορία αντοχής



Φωτογραφία 1 Κυβικό δοκίμιο ακμής 150 mm για τη δοκιμή σε θλίψη



Φωτογραφία 2 Κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 150 mm και ύψους 300 mm για τη δοκιμή σε διάρρηξη

Επιπρόσθετα, για την επίτευξη ομοιομορφίας ανάμεσα στα δείγματα, η διαδικασία παρασκευής τόσο των κυβικών, όσο και των κυλινδρικών δοκιμών ήταν όμοια για κάθε εταιρεία ξεχωριστά. Η διαδικασία αυτή αναλύεται εις βάθος στη συνέχεια.

3.1 Διαδικασία Παρασκευής Δοκιμών Σκυροδέματος

Αρχικά, λαμβάνεται η απαραίτητη ποσότητα σκυροδέματος από τη βαρέλα παραγωγής. Η βαρέλα εκχύνει το σκυρόδεμα σε καρότσι, μέχρι τα 2/3 του ύψους του (όχι λιγότερο, για να είναι αντιπροσωπευτικό).

Έπειτα, λαμβάνει χώρα η μέτρηση της κάθισης ή της εξάπλωσης, αφού πρώτα έχει μετρηθεί η θερμοκρασία του σκυροδέματος.

Η δοκιμή της κάθισης γίνεται σε τρεις στρώσεις, οι οποίες έχουν περίπου το ίδιο ύψος (1/3 του κώνου). Η κάθε στρώση συμπυκνώνεται με 25 ραβδισμούς, ομοιόμορφα κατανεμημένους σ' όλη την επιφάνεια του σκυροδέματος και οι οποίοι ξεκινούν από τα τοιχώματα του κώνου και καταλήγουν με κυκλική κίνηση στο κέντρο του. Κατά την συμπύκνωση της κατώτερης (πρώτης) στρώσης, η ράβδος βυθίζεται σε όλο το βάθος του σκυροδέματος. Στη δεύτερη και τρίτη στρώση, η έμπηξη της ράβδου γίνεται σε όλη τη στρώση, εισερχόμενη λίγο (περίπου 1- 2cm) και στην αμέσως προηγούμενή της. Έπειτα, αφού ολοκληρωθεί η συμπύκνωση, η επιφάνεια επιπεδώνεται με μυστρί, ο κώνος ανασύρεται αργά και με σταθερό ρυθμό, με τη βοήθεια των πλευρικών χειρολαβών, και έτσι ελευθερώνεται το σκυρόδεμα. Ο χρόνος που πρέπει να γίνει αυτό κυμαίνεται στα 3-5 δευτερόλεπτα. Τέλος, ο κώνος τοποθετείται παράπλευρα στον σωρό του σκυροδέματος ανάποδα και η μεταλλική ράβδος συμπύκνωσης τοποθετείται πάνω στον κώνο. Με ένα μέτρο προσδιορίζεται η διαφορά ανάμεσα στη ράβδο και στο υψηλότερο σημείο του σκυροδέματος που έχει ελευθερωθεί μετά την ανασυρση του κώνου. Η ένδειξη αυτή (cm), αποτελεί την κάθιση της δοκιμής.

Η δοκιμή της εξάπλωσης με ακόλουθη τροποποίηση (*slump flow*), γίνεται σε πιο ρευστά σκυροδέματα. Ο κώνος συμπληρώνεται με σκυρόδεμα σε μία στρώση και χωρίς ραβδισμούς. Καθώς, ανασύρεται ο κώνος και ελευθερώνεται το σκυρόδεμα, αυτό απλώνεται σχηματίζοντας ένα μεγάλο κύκλο. Μετρώντας τις δύο διαμέτρους του κύκλου (κάθετες μεταξύ τους) και παίρνοντας τον μέσο όρο τους, προκύπτει η εξάπλωση του σκυροδέματος.

Αφού πραγματοποιηθούν οι παραπάνω μετρήσεις, σειρά έχει η συμπύκνωση, η οποία γίνεται σε δονητική τράπεζα. Οι στρώσεις που εκχύνεται το σκυρόδεμα στις μήτρες, τόσο για τα κυβικά όσο και για τα κυλινδρικά δοκίμια, είναι δύο. Ο χρόνος συμπύκνωσης είναι ανάλογος με το πόσο ρευστό είναι το σκυρόδεμα. Όσο πιο ρευστό είναι το σκυρόδεμα, τόσο λιγότερος είναι και ο χρόνος δόνησης. Επίσης, ο χρόνος συμπύκνωσης που απαιτείται, είναι τόσοσ, μέχρι να πάψουν να εμφανίζονται φυσαλίδες αέρα στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η συμπύκνωση των κυβικών και των κυλινδρικών δοκιμών γίνεται ξεχωριστά και η διαδικασία συμπύκνωσης ολοκληρώνεται με την επιπέδωση της επιφάνειας του σκυροδέματος με μυστρί.

Απομένει ο προσδιορισμός του φαινομένου βάρους του σκυροδέματος. Για τον προσδιορισμό αυτό, απαιτούνται τρεις μήτρες, οι οποίες ζυγίζονται δύο φορές. Μία φορά ενώ είναι κενές, και μία δεύτερη φορά ενώ είναι γεμάτες με το σκυρόδεμα, και εφόσον έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία της συμπύκνωσης. Η διαφορά του βάρους τους, αποτελεί

το βάρος του νωπού σκυροδέματος (gr). Με τη διαίρεση του νωπού βάρους με τον όγκο του κυβικού/κυλινδρικού δοκιμίου, προκύπτει το φαινόμενο βάρος του σκυροδέματος για το αντίστοιχο δοκίμιο. Για μεγαλύτερη αξιοπιστία, λαμβάνεται ο Μ.Ο. από τις τρεις μήτρες.

Μετά το πέρας 24 ωρών από τη σκυροδέτηση, τα δοκίμια εξάγονται από τις μήτρες (ξεκαλούπωμα). Στη συνέχεια, οι μήτρες προετοιμάζονται για την επόμενη σκυροδέτηση, δηλαδή καθαρίζονται καλά και λαδώνονται.

3.2 Συντήρηση Δοκιμών Σκυροδέματος

Η συντήρηση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο νερό για 28 ημέρες συνολικά. Η αρχική συντήρηση (7-10 ημέρες) έλαβε χώρα στις μονάδες παραγωγής σκυροδέματος, όπου έγινε και η παρασκευή τους. Έπειτα, τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για να συνεχιστεί η συντήρησή τους σε ειδικές δεξαμενές, μέχρι τη συμπλήρωση 28 ημερών από την ημερομηνία παρασκευής τους (Φωτογραφία 3). Μετά το πέρας των 28 ημερών, τα δοκίμια εξάγονταν από τη δεξαμενή νερού και προετοιμάζονταν για τη θραύση τους. Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η συσκευή διατήρησης της θερμοκρασίας του νερού στο ΕΜΠ δεν λειτουργούσε και γι' αυτό το λόγο, η θερμοκρασία συντήρησης, πιθανό να παρουσίασε διακυμάνσεις μεγαλύτερες από τις επιτρεπόμενες ± 2 °C. Εντούτοις, δεδομένου ότι η θερμοκρασία επηρέασε τόσο τα κυλινδρικά δοκίμια όσο και τα κυβικά και η έκθεση σε διαφορετική θερμοκρασία έγινε σε σχετικώς μεγάλη ηλικία (10 ημέρες), πιστεύεται ότι δεν αλλοίωσε τη σχέση $f_{ct,sp} - f_c^{[34]}$.



Φωτογραφία 3 Δεξαμενές για τη συντήρηση των κυβικών και κυλινδρικών δοκιμών στο εργαστήριο σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

3.3 Θραύση δοκιμών

Οι εργαστηριακές δοκιμές για τη θραύση των δοκιμών πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Σκυροδέματος του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Συγκεκριμένα διεξήχθησαν οι εξής δοκιμές: δοκιμή σε θλίψη και δοκιμή σε διάρρηξη. Η δοκιμή σε θλίψη αφορά τα κυβικά δοκίμια και η δοκιμή σε διάρρηξη τα κυλινδρικά. Και οι δύο έγιναν με τη χρήση της ίδιας μηχανής φόρτισης, κάτι το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα, καθώς με αυτό τον τρόπο απλουστεύεται η όλη διαδικασία και η συσχέτιση των αντοχών προκύπτει πιο αξιόπιστη. Όσον αφορά τα χαρακτηριστικά της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε, πρόκειται για υδραυλική μηχανή θράυσης “Wykeham Farrance/55662 Ho3” με μέγιστη τιμή επιβολής φορτίου 2 MN (Φωτογραφία 4).

Λόγω της πολυπλοκότερης διαδικασίας που απαιτείται για τη δοκιμή σε διάρρηξη (υποκεφάλαιο 3.3.2)- σε σχέση με τη δοκιμή σε θλίψη (υποκεφάλαιο 3.3.1) – ο χρόνος που μεσολαβεί από τη στιγμή που θα βγει το κυλινδρικό δοκίμιο από τη δεξαμενή νερού, μέχρι τη στιγμή που θα υποστεί θραύση, είναι περισσότερος, γεγονός που πιθανόν να εισάγει μία πηγή μεταβλητότητας μεταξύ των δύο τύπων δοκιμών. Για το λόγο αυτό, επιδιώχθηκε ο χρόνος αυτός να είναι κατά το δυνατόν ίσος τόσο για τα κυβικά δοκίμια, όσο και για τα κυλινδρικά της ίδιας δειγματοληψίας. Με αυτό τον τρόπο, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αξιοπιστία στη σχέση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε διάρρηξη.



Φωτογραφία 4 Μηχανή θράυσης “Wykeham Farrance/55662 Ho3” για την πραγματοποίηση των δοκιμών σε θλίψη και σε διάρρηξη

3.3.1 Δοκιμή σε θλίψη

Στη δοκιμή σε θλίψη, το κυβικό δοκίμιο υποβάλλεται σε τριαξονικό θλιπτικό φορτίο, όπως αναλύεται διεξοδικά στο υποκεφάλαιο 1.2.1. Συγκεκριμένα, για τη δοκιμή σε θλίψη χρησιμοποιήθηκαν χαλύβδινες πλάκες ανάμεσα στις κεφαλές επιβολής φορτίου της μηχανής. Το δοκίμιο τοποθετήθηκε στο κέντρο των πλακών, σύμφωνα με οδηγούς χαραγμένους πάνω σε αυτές, έτσι ώστε το φορτίο να κατανέμεται ομοιόμορφα στις επιφάνειές του. Επίσης, ιδιαίτερη προσοχή δινόταν, ώστε το δοκίμιο να τοποθετείται με τέτοιο τρόπο, όπου η επιβολή του φορτίου να γίνεται σε επιφάνειες του δοκιμίου που είχαν κατακόρυφο προσανατολισμό κατά την συμπίκνωση (παράπλευρες επιφάνειες) και όχι στην ελεύθερη επιφάνεια χύτευσης κατά τη σκυροδέτηση, αποφεύγοντας έτσι την ανομοιόμορφη συγκέντρωση τάσεων.



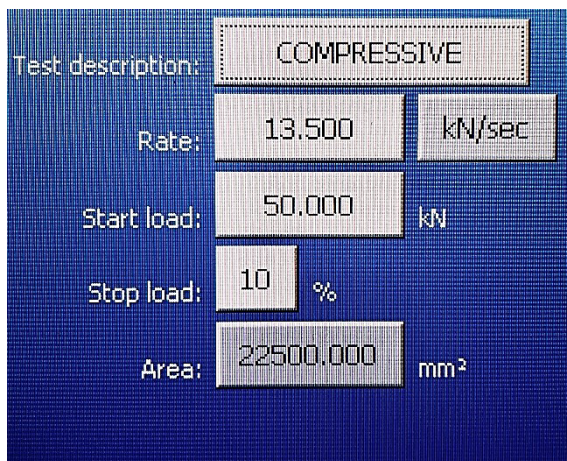
Φωτογραφία 5 Κυβικό δοκίμιο τοποθετημένο στη μηχανή θραύσης για τη δοκιμή σε θλίψη

Πριν τοποθετηθεί το κάθε κυβικό δοκίμιο στη μηχανή φόρτισης, λίγο πριν από τη θραύση, σκουπίζεται πολύ καλά ώστε οι επιφάνειές του να είναι καθαρές, χωρίς υπερβολική ποσότητα νερού και έπειτα ζυγίζεται για να προσδιοριστεί το φαινόμενο βάρος του.

Το ευρωπαϊκό πρότυπο EN 12390-3:2009^[58], για τη δοκιμή σε θλίψη, προτείνει σταθερό ρυθμό τάσης ίσο με 0.6 ± 0.2 MPa/s. Συνεπώς, επιλέγοντας ρυθμό τάσης 0.6 MPa/s, ο απαιτούμενος ρυθμός φόρτισης για τα κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm προκύπτει 13.50 kN/s.

Όσον αφορά το αρχικό φορτίο (*initial load*), το πρότυπο συνιστά αυτό να μην υπερβαίνει το 30% του φορτίου αστοχίας (F). Επομένως, στις ρυθμίσεις της μηχανής για τη δοκιμή σε διάρρηξη επιλέχθηκε για αρχικό φορτίο η τιμή 50 kN.

Οι παραπάνω ρυθμίσεις που ορίστηκαν στη μηχανή φόρτισης για τη δοκιμή σε θλίψη φαίνονται στη Φωτογραφία 6.



Φωτογραφία 6 Ρυθμίσεις μηχανής φόρτισης για τη δοκιμή σε θλίψη

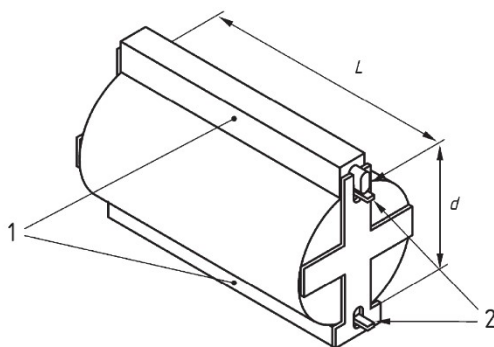
Πιο κάτω παρουσιάζονται μερικά από τα δείγματα κυβικών δοκιμών αμέσως μετά τη θραύση τους (Φωτογραφία 7).



Φωτογραφία 7 Θραύση κυβικού δοκιμίου

3.3.2 Δοκιμή σε διάρρηξη

Στη δοκιμή σε διάρρηξη, το κυλινδρικό δοκίμιο υποβάλλεται σε θλιπτική φόρτιση αντιδιαμετρικά και κατά μήκος του δοκιμίου, όπως αναλύεται εκτενέστερα στο υποκεφάλαιο 1.2.2.2. Για τη δοκιμή σε διάρρηξη, εκτός από τις χαλύβδινες πλάκες, για την διευκόλυνση της διαδικασίας, χρησιμοποιήθηκε μια βοηθητική χαλύβδινη διάταξη κυλινδρικού δοκιμίου, για την σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου και των τεμαχίων κόντρα πλακέ, σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 12390-6:2009 ^[14] (Σχήμα 3-2 και Φωτογραφία 8).



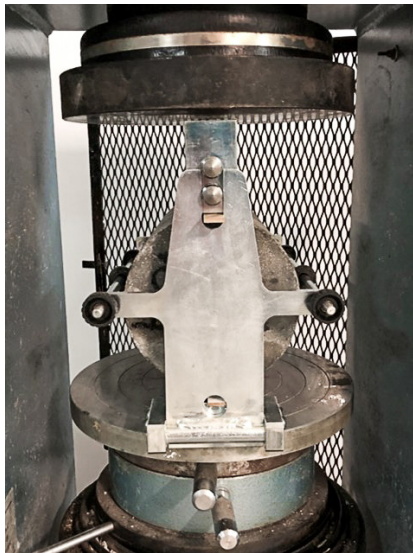
Σχήμα 3-2 Βοηθητική διάταξη κυλινδρικού δοκιμίου για τη δοκιμή σε διάρρηξη (1: χαλύβδινο μέρος φόρτισης, 2: λωρίδες τύπου hardboard, L: μήκος δοκιμίου, d: διάμετρος δοκιμίου)



Φωτογραφία 8 Βοηθητική διάταξη κυλινδρικού δοκιμίου για τη δοκιμή σε διάρρηξη

Συγκεκριμένα, η διάταξη τοποθετείται και ευθυγραμμίζεται με βάση οδηγούς, χαραγμένους στην κάτω χαλύβδινη πλάκα, ώστε το κέντρο της διάταξης να συμπίπτει με το κέντρο της πλάκας. Στη συνέχεια, με βάση το πρότυπο, εντός της διάταξης τοποθετείται, μέσω ειδικών εσοχών, ένα τεμάχιο κόντρα πλακέ πάχους 4mm, πλάτους 15mm και μήκους 460mm (δηλαδή μεγαλύτερο από το μήκος του κυλινδρικού δοκιμίου, που κατά μέσο όρο είναι 300mm). Καθώς τοποθετείται το δοκίμιο πάνω στη λωρίδα κόντρα πλακέ, αντιδιαμετρικά τοποθετείται άλλη μία όμοια λωρίδα. Η πάνω λωρίδα κόντρα πλακέ, έρχεται σε επαφή με το τελευταίο κομμάτι της διάταξης, ένα χαλύβδινο πρισματικό τεμάχιο που εφάπτεται κατά μήκος της, και πάνω στο οποίο η κεφαλή επιβολής φορτίου της μηχανής ασκεί το θλιπτικό φορτίο (Φωτογραφία 9).

Πριν τοποθετηθεί το κάθε κυλινδρικό δοκίμιο στη διάταξη, λίγο πριν από τη θραύση, σκουπίζεται πολύ καλά ώστε οι επιφάνειές του να είναι καθαρές, χωρίς υπερβολική ποσότητα νερού. Έπειτα, μετρούνται οι διαστάσεις του και τέλος ζυγίζεται, έτσι ώστε να προσδιοριστεί το φαινόμενο βάρος του.



Φωτογραφία 9 Βοηθητική διάταξη με κυλινδρικό δοκίμιο, τοποθετημένα στη μηχανή θραύσης για τη δοκιμή σε διάρρηξη

Με βάση το πρότυπο BS EN 12390-6:2009^[14], ο απαιτούμενος ρυθμός φόρτισης R για δοκιμή σε διάρρηξη, δίνεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$R = \frac{s \times \pi \times L \times d}{2}$$

όπου: R : ο απαιτούμενος ρυθμός φόρτισης [N/s]

s : ο σταθερός ρυθμός τάσης [MPa/s]

προτείνεται εύρος από 0.04MPa/s μέχρι 0.06MPa/s^[14]

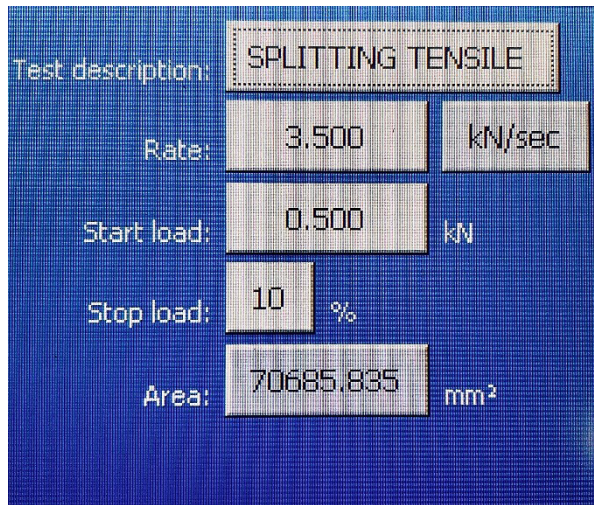
L : το μήκος του κυλινδρικού δοκιμίου [mm]

d : η διάμετρος του κυλινδρικού δοκιμίου [mm]

Συνεπώς, για $s=0.05$ MPa/s, $L=300$ mm και $d=150$ mm προκύπτει ο απαιτούμενος ρυθμός φόρτισης ($R=3.50$ KN/s).

Όσον αφορά το αρχικό φορτίο (*initial load*), το πρότυπο συνιστά αυτό να μην υπερβαίνει το 20% του φορτίου αστοχίας (F). Επομένως, στις ρυθμίσεις της μηχανής για τη δοκιμή σε διάρρηξη επιλέχθηκε για αρχικό φορτίο η τιμή 0.50 kN.

Οι παραπάνω τιμές ορίστηκαν στη μηχανή φόρτισης για τη δοκιμή σε διάρρηξη και φαίνονται στη *Φωτογραφία 10*.



Φωτογραφία 10 Ρυθμίσεις μηχανής φόρτισης για τη δοκιμή σε διάρρηξη

Πιο κάτω παρουσιάζονται μερικά από τα δείγματα κυλινδρικών δοκιμών αμέσως μετά τη θραύση τους (Φωτογραφία 11 και Φωτογραφία 12).



Φωτογραφία 11 Θραύση κυλινδρικού δοκιμίου



Φωτογραφία 12 Θραύση κυλινδρικού δοκιμίου (με σφήνα)

4 Αποτελέσματα

4.1 Παρουσίαση Αποτελεσμάτων

4.1.1 Στατιστική Αξιολόγηση

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Πριν γίνει ανάλυση για την εύρεση της σχέσης μεταξύ αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε διάρρηξη, τα αποτελέσματα αυτά υφίστανται έναν έλεγχο αξιοπιστίας με την βοήθεια των κανόνων επαναληψιμότητας.

Για να διαπιστωθεί αν όλες οι αντοχές πληρούν τις απαιτήσεις επαναληψιμότητας ή θα πρέπει να αποκλεισθούν ορισμένες τιμές, πραγματοποιήθηκε έλεγχος επαναληψιμότητας, τόσο για τη δοκιμή σε θλίψη, όσο και για τη δοκιμή σε διάρρηξη σύμφωνα με τα πρότυπα EN-12390:3^[58] και ASTM C496^[13] αντίστοιχα.

Σύμφωνα με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN-12390:3^[58], η διαφορά της αντοχής σε θλίψη δύο κύβων που παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν υπό συνθήκες ελέγχου-προσδιορισμού επαναληψιμότητας (ίδιο μίγμα, ίδιος παρασκευαστής, ίδια συντήρηση, ίδια μηχανή δοκιμής ίδιες συνθήκες δοκιμής) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 9% του μέσου όρου των δύο τιμών. Με βάση αυτή την απαίτηση, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των τιμών των αντοχών σε θλίψη ανά ζεύγος δοκιμών, σύμφωνα με τον τύπο:

$$\frac{|f_i - f_j|}{(f_i + f_j)/2} \leq 9\%$$

όπου f_i, f_j οι αντοχές των δοκιμών i, j .

Αντίστοιχα, για τη δοκιμή σε διάρρηξη, σύμφωνα με το Αμερικανικό πρότυπο ASTM C496^[13], η διαφορά της αντοχής σε διάρρηξη δύο κυλίνδρων που παρασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν υπό συνθήκες ελέγχου-προσδιορισμού επαναληψιμότητας (ίδιο μίγμα, ίδιος παρασκευαστής, ίδια συντήρηση, ίδια μηχανή δοκιμής ίδιες συνθήκες δοκιμής) δεν πρέπει να είναι μεγαλύτερη από το 14% του μέσου όρου των δύο τιμών. Με βάση αυτή την απαίτηση, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των τιμών των αντοχών σε διάρρηξη ανά ζεύγος δοκιμών, σύμφωνα με τον τύπο:

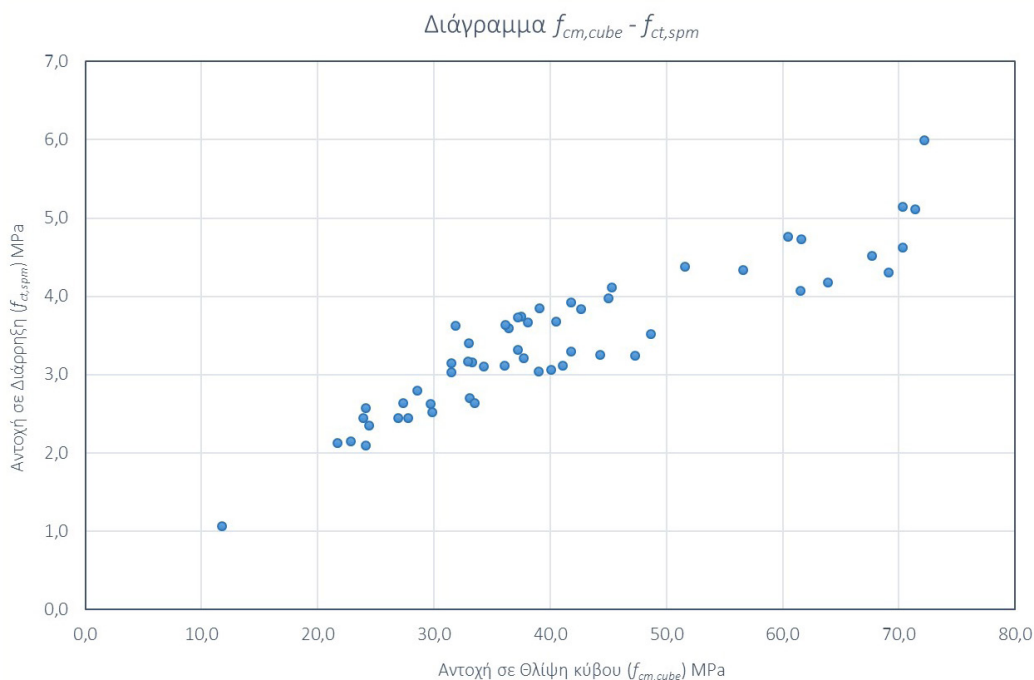
$$\frac{|f_i - f_j|}{(f_i + f_j)/2} \leq 14\%$$

όπου f_i, f_j οι αντοχές των δοκιμών i, j .

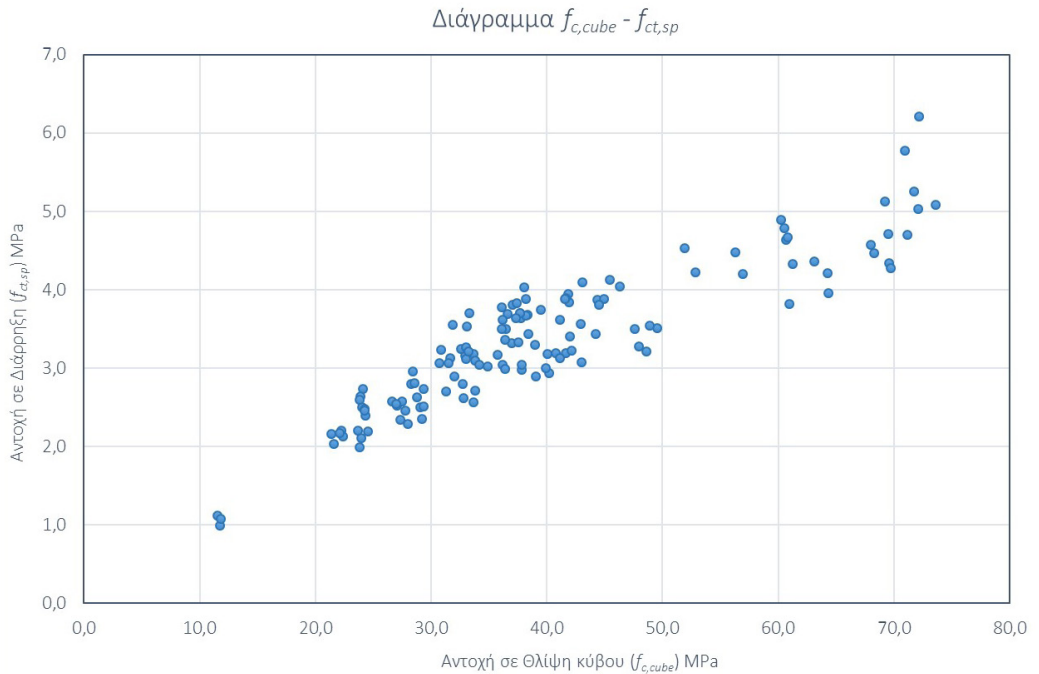
Με τον έλεγχο αυτό, πραγματοποιήθηκε η απόρριψη ορισμένων τιμών και οι οποίες φαίνονται στον πίνακα με κόκκινο χρώμα.

*Τα αποτελέσματα αυτά δίνονται με την επιφύλαξη του γεγονότος ότι οι αντοχές προήλθαν από δοκίμια υψηλότερης αντοχής, αλλά μικρότερης ηλικίας. Συγκεκριμένα, οι δειγματοληψίες B-22, B-23 και B-24 είχαν υποστεί θραύση στις δέκα, τρεις και δύο ημέρες αντίστοιχα. Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο 3, τα μίγματα υψηλότερης αντοχής έχουν συνήθως μικρότερο λόγο N/T, γεγονός που επαυξάνει την ταχύτητα ενυδάτωσης του τσιμέντου ^[1], και επομένως, τα αποτελέσματα μπορεί να διαφέρουν από τα αποτελέσματα που θα προέκυπταν εάν τα μίγματα ήτανε εξ' αρχής στην κανονική τους κατηγορία αντοχής (μικρής κατηγορίας) και η θραύση τους πραγματοποιείτο στις 28 ημέρες. Πάντως, πιστεύεται ότι η αλλοίωση της σχέσης αντοχής σε θλίψη με αντοχή σε εφελκυσμό είναι πολύ μικρή ή και ασήμαντη.

Πιο κάτω φαίνονται τα πειραματικά αποτελέσματα των μέσων τιμών των αντοχών θλίψης-διάρρηξης (Σχήμα 4-1) και των αξιόπιστων τιμών των αντοχών θλίψης-διάρρηξης (Σχήμα 4-2), μετά τον έλεγχο επαναληψιμότητας που πραγματοποιήθηκε και την απόρριψη ορισμένων τιμών.



Σχήμα 4-1 Πειραματικά αποτελέσματα μέσω των τιμών αντοχών $f_{cm,cube}-f_{ct,spm}$



Σχήμα 4-2 Πειραματικά αποτελέσματα αξιόπιστων τιμών αντοχών $f_{c,cube}-f_{ct,sp}$

4.1.2 Διερεύνηση Εξίσωσης Συσχέτισης Αντοχών

Για τον προσδιορισμό της σχέσης που προβλέπει καλύτερα την αντοχή σε διάρρηξη από την θλιπτική αντοχή, διερευνήθηκαν 4 διαφορετικές μορφές εξισώσεων:

- Γραμμική Μορφή (Linear Form)

$$f_{ct,sp} = a f_c + b$$

- Εκθετική Μορφή (Power Form)

$$f_{ct,sp} = a f_c^b$$

- Πολυωνυμική Μορφή (Polynomial Form)

$$f_{ct,sp} = a f_c^2 + b f_c + c$$

- Λογαριθμική Μορφή (Logarithmic Form)

$$f_{ct,sp} = a \ln(f_c) + b$$

όπου $f_{ct,sp}$: η αντοχή σε διάρρηξη

f_c : η αντοχή σε θλίψη

a, b, c : συντελεστές παλινδρόμησης αντίστοιχα

Η επιλογή της εξίσωσης που προσεγγίζει καλύτερα τα πειραματικά δεδομένα, πραγματοποιήθηκε με βάση τα εξής κριτήρια:

- Τον συντελεστή προσδιορισμού R^2 (%) (*coefficient of determination*):

Δίνει το ποσοστό της μεταβλητότητας των τιμών της $f_{ct,sp}$ που υπολογίζεται από την τιμή f_c και αποτελεί ένα χρήσιμο κριτήριο που δείχνει πόσο καλά η γραμμή παλινδρόμησης προσαρμόζει (εξηγεί) τα δεδομένα. Συνεπώς, αποτελεί τρόπο σύνοψης για τη συσχέτιση των δύο τυχαίων μεταβλητών f_c και $f_{ct,sp}$. Ο συντελεστής R^2 ορίζεται ως ο λόγος του αθροίσματος των τετραγώνων εξαιτίας της παλινδρόμησης προς το συνολικό άθροισμα των τετραγώνων και δίνεται απ' τον τύπο:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \frac{\hat{\beta}_1^2 \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} = \hat{\beta}_1^2 \cdot \frac{s_x^2}{s_y^2}$$

Επίσης το R^2 κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0 (0%) έως 1 (100%). Όσο πιο κοντά στη μονάδα πλησιάζει ο συντελεστής προσδιορισμού, το μοντέλο της παλινδρόμησης έχει μεγάλη δυνατότητα ερμηνείας της εξαρτημένης μεταβλητής και τα σφάλματα είναι μικρά. Αντίθετα, όταν οι τιμές του R^2 είναι κοντά στο μηδέν, δείχνουν ότι δεν είναι επιτυχές το μοντέλο της παλινδρόμησης για την ερμηνεία της εξαρτημένης μεταβλητής.

Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 , πολλές φορές δεν δίνει ορθά αποτελέσματα σε περίπτωση που το μοντέλο είναι μη γραμμικό^[59], καθώς σε αντίθεση με τα γραμμικά μοντέλα, στα μη γραμμικά δεν ισχύει η εξίσωση $SS \text{ Regression} + SS \text{ Error} = SS \text{ Total}$.

Ο συντελεστής R^2 παρουσιάζεται όπως δίνεται από το λογισμικό Excel για λόγους πληρότητας, αλλά με την παραπάνω επιφύλαξη και δεν λήφθηκε υπόψη στην επιλογή της καταλληλότερης σχέσης $f_c - f_{ct,sp}$.

- Το συνολικό απόλυτο σφάλμα **IAE** (%) (*Integral Absolut Error*):

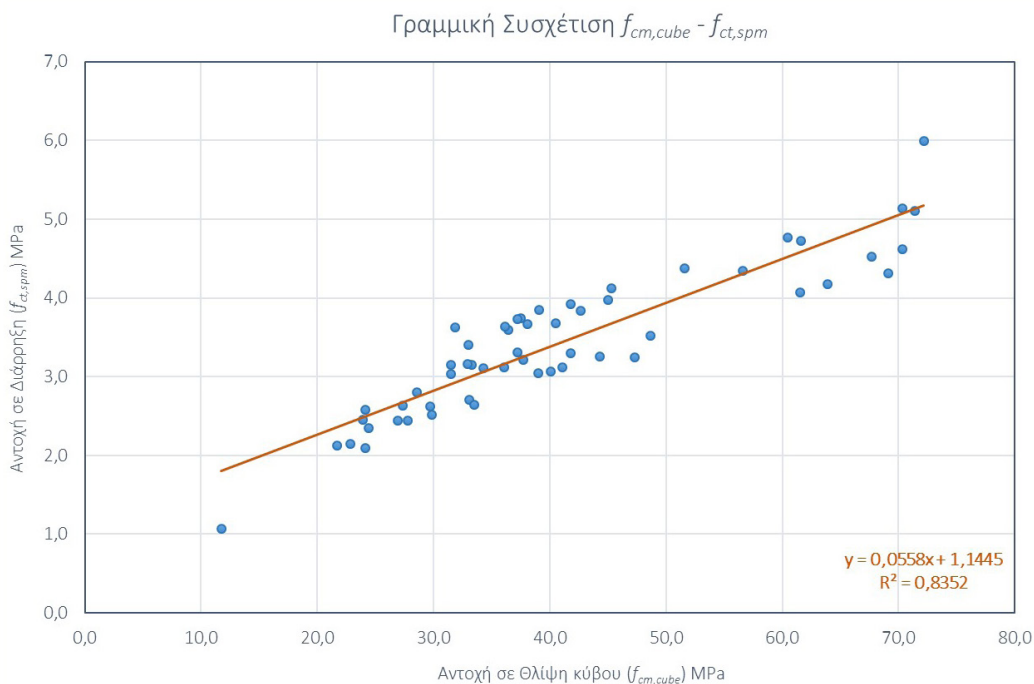
$$IAE = \sum \frac{[(Q_i - P_i)^2]^{1/2}}{\sum Q_i} \times 100$$

όπου Q_i η μετρούμενη τιμή και P_i η προβλεπόμενη τιμή της εκάστοτε εξίσωσης παλινδρόμησης. Ο προσδιορισμός του σφάλματος IAE (%) για κάθε εξίσωση παλινδρόμησης παρουσιάζεται στο Παράρτημα Γ.

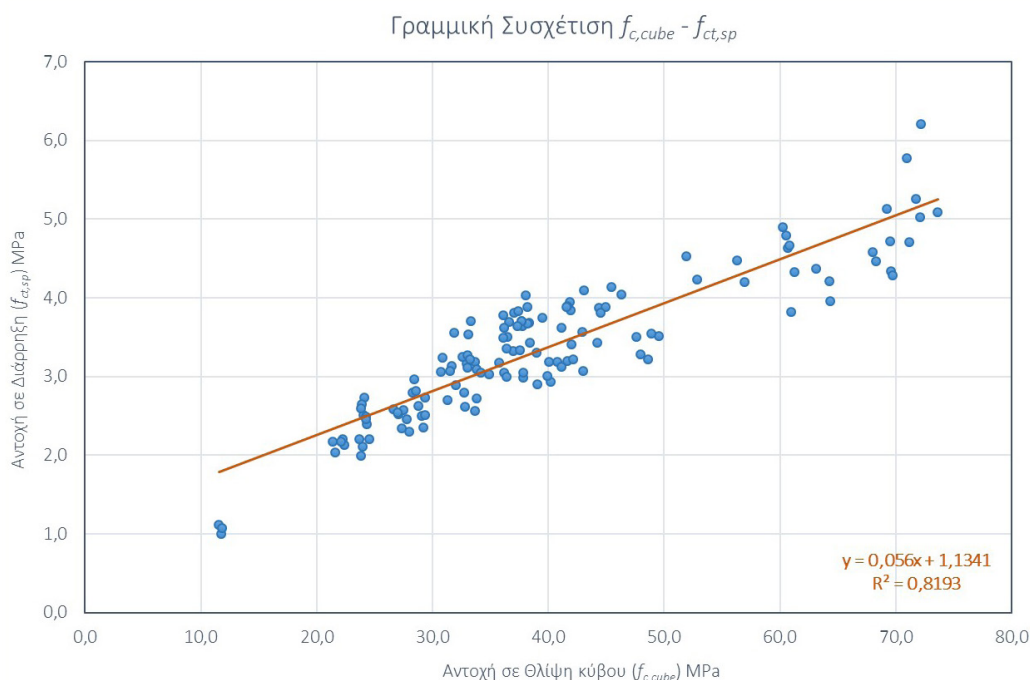
- Εμπειρικά από την μορφή της καμπύλης παλινδρόμησης.

4.1.2.1 Γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης

Στα Σχήμα 4-3 και Σχήμα 4-4 φαίνεται η γραμμική συσχέτιση των πειραματικών αντοχών, τόσο για τις μέσες τιμές, όσο και για το σύνολο των αξιόπιστων δειγμάτων αντίστοιχα.



Σχήμα 4-3 Γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm}-f_{ct,spm}$ (Μέσες τιμές αντοχών)

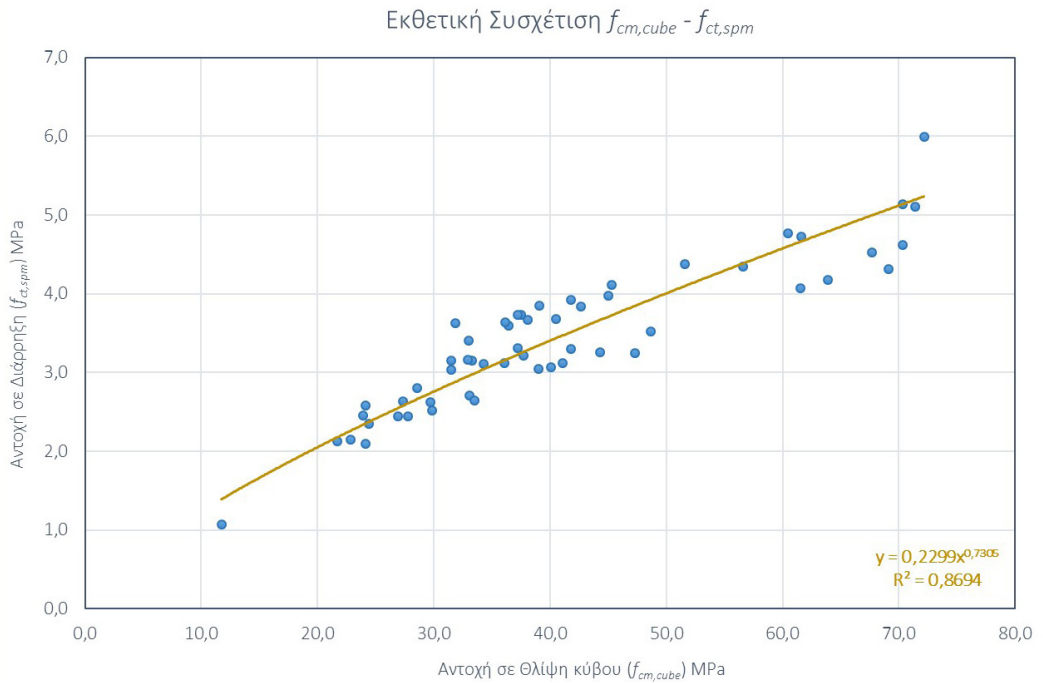


Σχήμα 4-4 Γραμμική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm,cube} - f_{ct,spm}$ (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

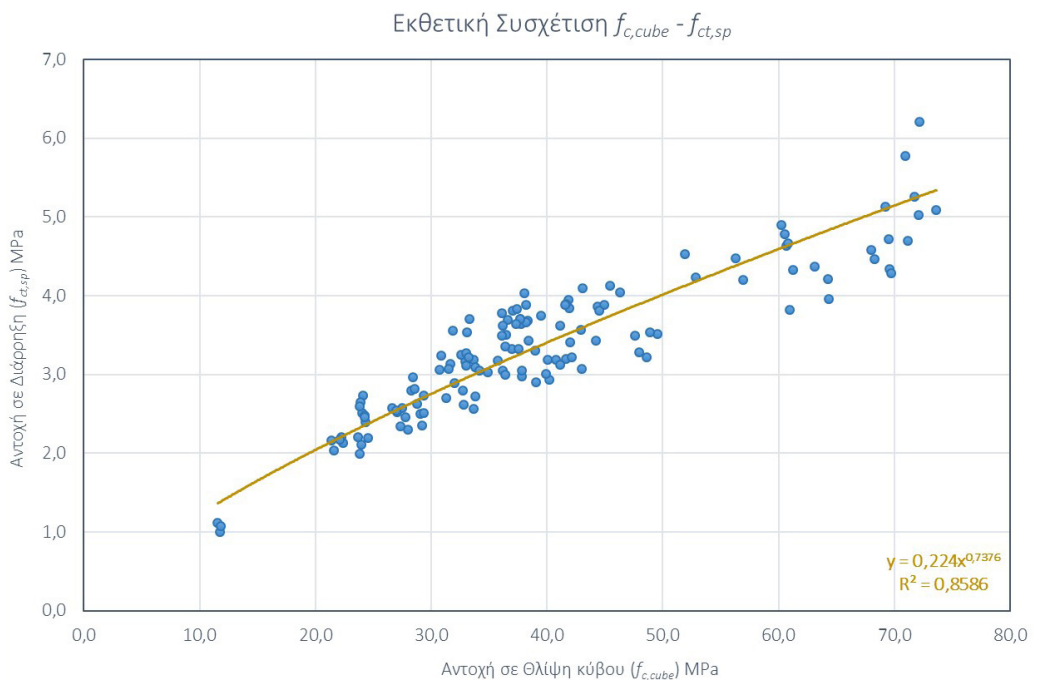
Είναι φανερό ότι η γραμμική μορφή της εξίσωσης δεν προσεγγίζει σωστά τα πειραματικά δεδομένα, καθώς παρατηρείται μία απόκλιση από αυτά σε ορισμένα εύρη αντοχών. Συγκεκριμένα, στις χαμηλότερες αντοχές ($f_c < 30$ MPa περίπου), η γραμμική εξίσωση υπερεκτιμά την αντοχή σε διάρρηξη για δεδομένη θλιπτική αντοχή. Επίσης, απόκλιση από τα πειραματικά δεδομένα, παρατηρείται και στις υψηλότερες αντοχές ($f_c > 50$ MPa περίπου), αλλά, δυστυχώς, δεν κατέστη δυνατό κατά τη διάρκεια της εξάμηνης συλλογής στοιχείων αντοχών να έχουμε περισσότερες τιμές στην περιοχή $f_c > 50$ MPa. Συνεπώς, παρόλο που η τιμή του σφάλματος IAE θεωρείται ικανοποιητική από στατιστικής απόψεως ($IAE = 9,26\%$), κρίνεται απαραίτητο να διερευνηθούν και οι υπόλοιπες μορφές εξισώσεων.

4.1.2.2 Εκθετική εξίσωση παλινδρόμησης

Στα Σχήμα 4-5 και Σχήμα 4-6 φαίνεται η εκθετική συσχέτιση των πειραματικών αντοχών, τόσο για τις μέσες τιμές, όσο και για το σύνολο των αξιόπιστων δειγμάτων αντίστοιχα.



Σχήμα 4-5 Εκθετική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm,cube}-f_{ct,spm}$ (Μέσες τιμές αντοχών)



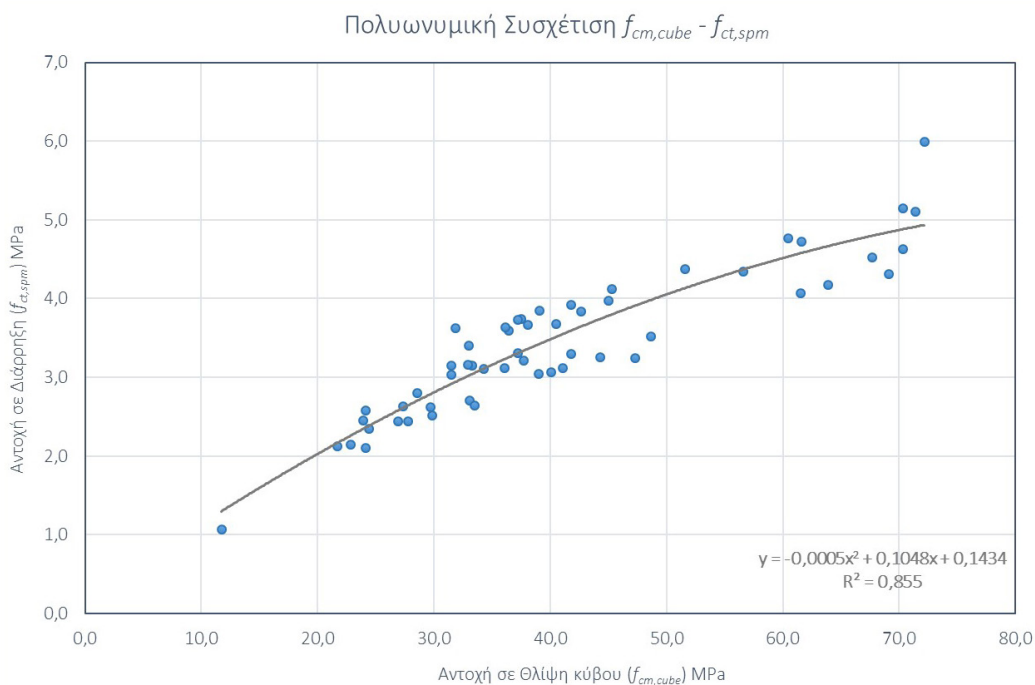
Σχήμα 4-6 Εκθετική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm,cube}-f_{ct,spm}$ (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

Στην περίπτωση της εκθετικής μορφής, η οποία είναι ευρέως αποδεκτή στη ξένη βιβλιογραφία, τα πειραματικά δεδομένα φαίνεται να προσεγγίζονται καλύτερα σε σχέση με την γραμμική συσχέτιση. Παρατηρείται ότι το σφάλμα ΙΑΕ (%) είναι μικρότερο σε σύγκριση με το αντίστοιχο σφάλμα που προκύπτει από τη γραμμική εξίσωση (ΙΑΕ = 8,83% έναντι ΙΑΕ = 9,26%). Αν και σε μικρότερο βαθμό, και σε αυτή την περίπτωση παρατηρείται μία απόκλιση τόσο στις χαμηλότερες αντοχές ($f_c < 20$ MPa περίπου) (η αντοχή σε διάρρηξη υπερεκτιμάται), όσο και στις υψηλότερες αντοχές ($f_c > 50$ MPa), όπου η διασπορά των αντοχών είναι σημαντική.

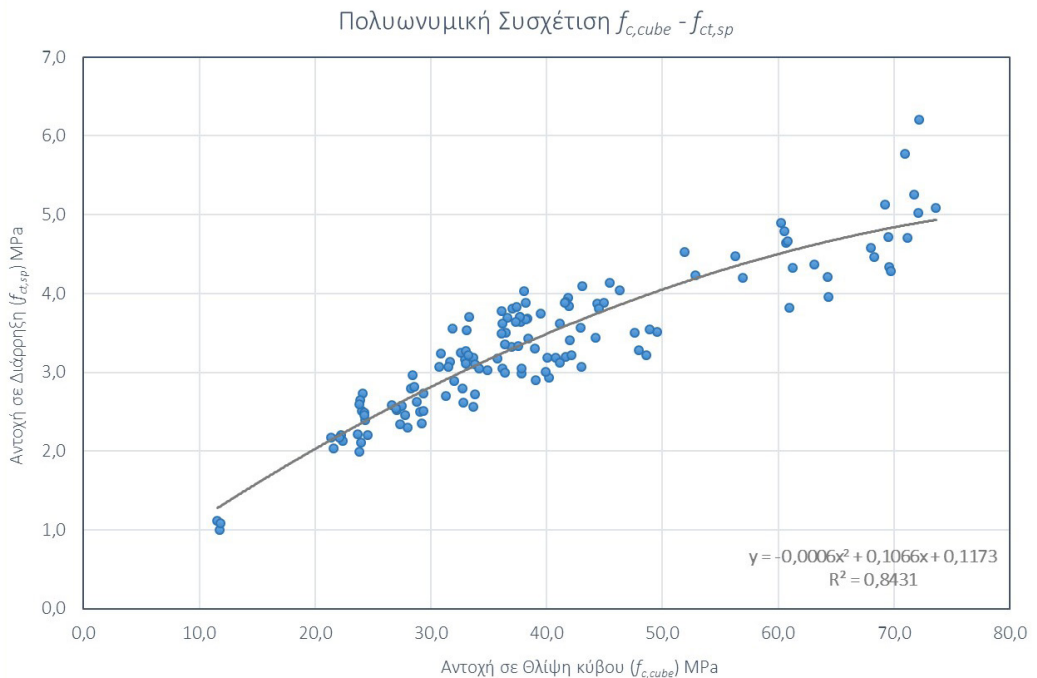
Ωστόσο, η εκθετική εξίσωση παρουσιάζει μία καλή μορφή, η οποία δείχνει να περνάει από το μηδέν, αν και αυτό δεν μπορεί να εξεταστεί μαθηματικά.

4.1.2.3 Πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης

Στα Σχήμα 4-7 και Σχήμα 4-8 φαίνεται η πολυωνυμική συσχέτιση των πειραματικών αντοχών, τόσο για τις μέσες τιμές, όσο και για το σύνολο των αξιόπιστων δειγμάτων αντίστοιχα.



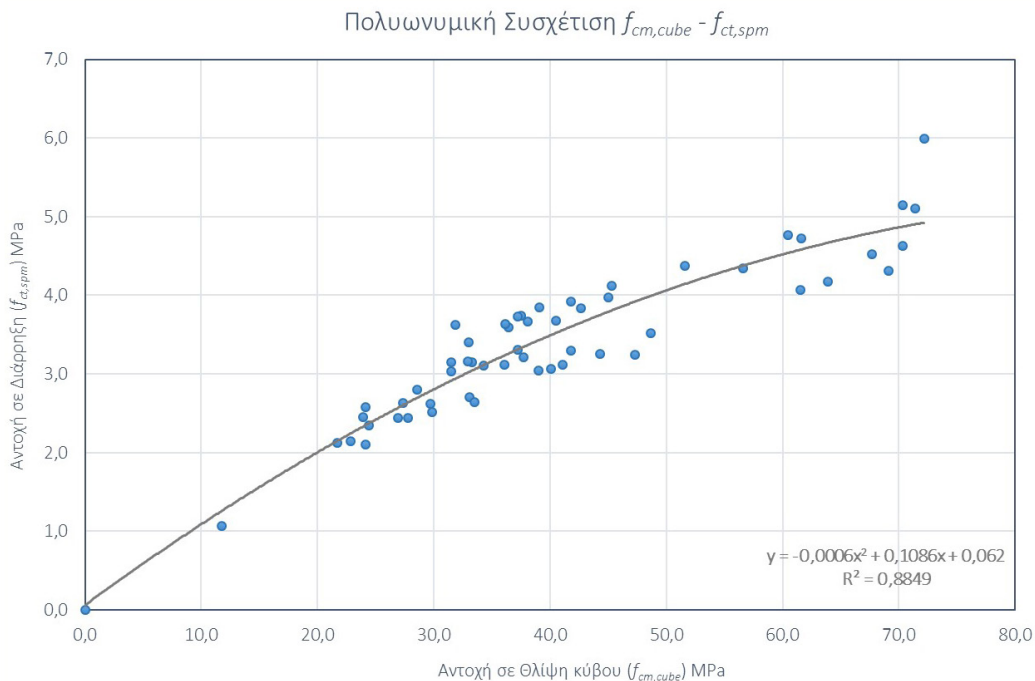
Σχήμα 4-7 Πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm}-f_{ct,spm}$ (Μέσες τιμές αντοχών)



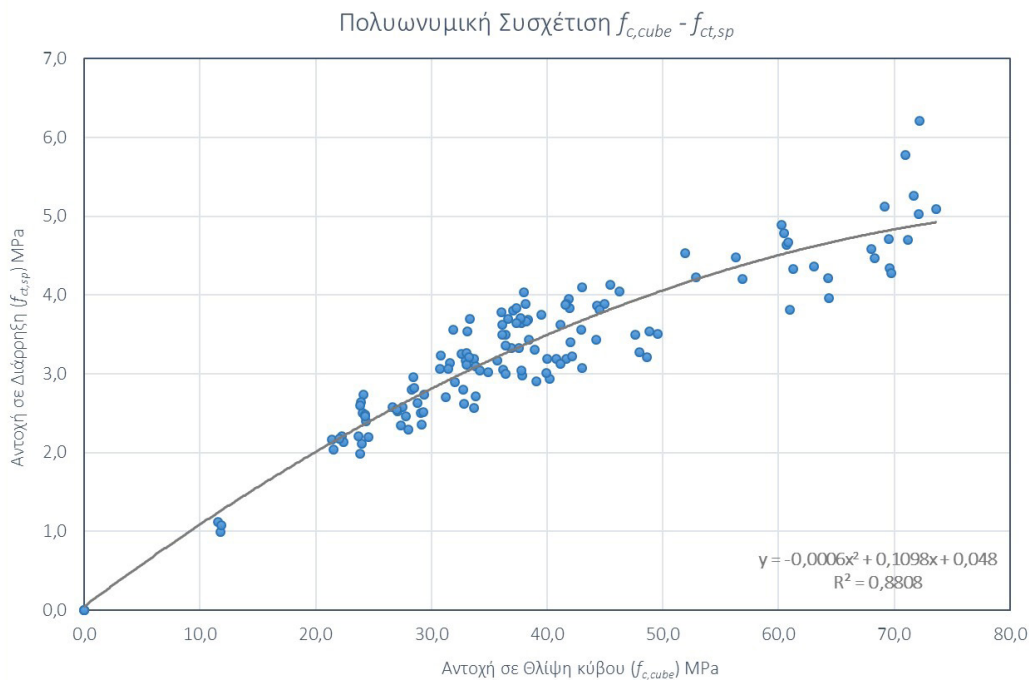
Σχήμα 4-8 Πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_c - f_{ct,sp}$ (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

Η πολυωνυμική εξίσωση, φαίνεται να προβλέπει αρκετά καλά την αντοχή σε διάρρηξη για δεδομένη θλιπτική αντοχή. Η διαφορά του συνολικού σφάλματος IAE (%) μεταξύ της πολυωνυμικής εξίσωσης και της εκθετικής θεωρείται αμελητέα, και επομένως δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα με βάση αυτό το κριτήριο. Ωστόσο, από τα διαγράμματα, παρατηρείται ότι η πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης οδηγεί σε καλύτερη προσέγγιση στις χαμηλές αντοχές με μία κλίση της καμπύλης η οποία δείχνει ότι διέρχεται από το μηδέν. Εν τούτοις, όμως, η διασπορά των αντοχών για υψηλές αντοχές ($f_c > 50$ MPa) εξακολουθεί να μειώνει την εμπιστοσύνη της προσέγγισης σε αυτή την περιοχή.

Για την περίπτωση της πολυωνυμικής εξίσωσης μας δίνεται και μαθηματικά η δυνατότητα να προσθέσουμε ένα επιπλέον σημείο στην παλινδρόμηση, το οποίο είναι το μηδέν (0, 0) (Σχήμα 4-9, Σχήμα 4-10) και κατά αυτό τον τρόπο να αυξήσουμε ελαφρώς την αξιοπιστία της εξίσωσης πρόβλεψης (IAE = 8.31% έναντι IAE = 8.49%).



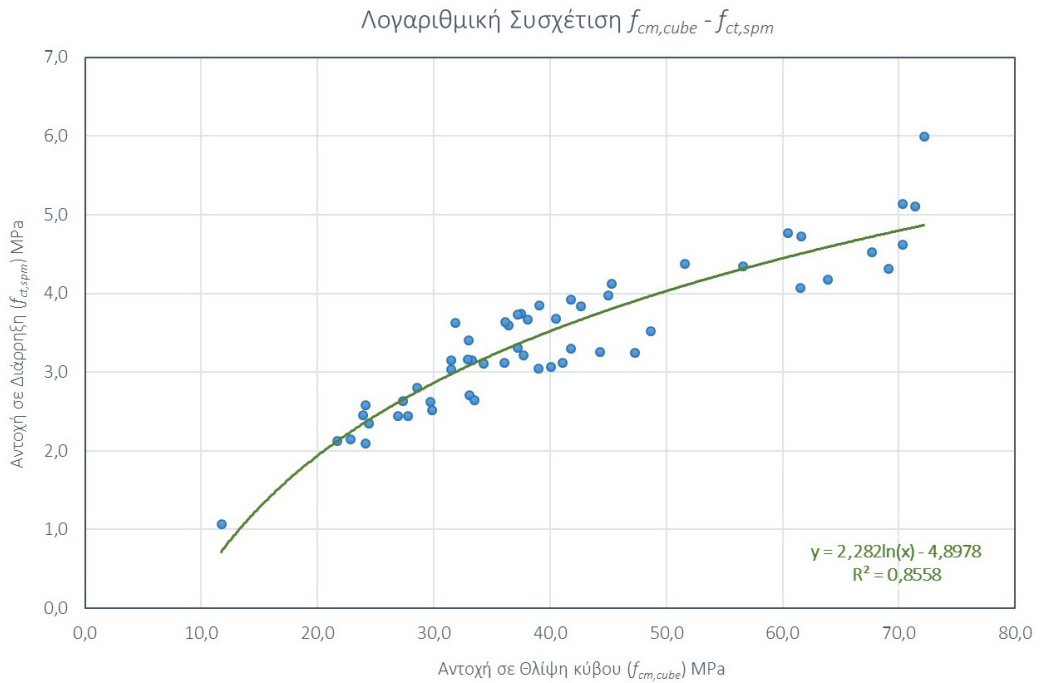
Σχήμα 4-9 Πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης με διέλευση από το σημείο (0, 0) για τη συσχέτιση $f_{cm,cube} - f_{ct,spm}$ (Μέσες τιμές αντοχών)



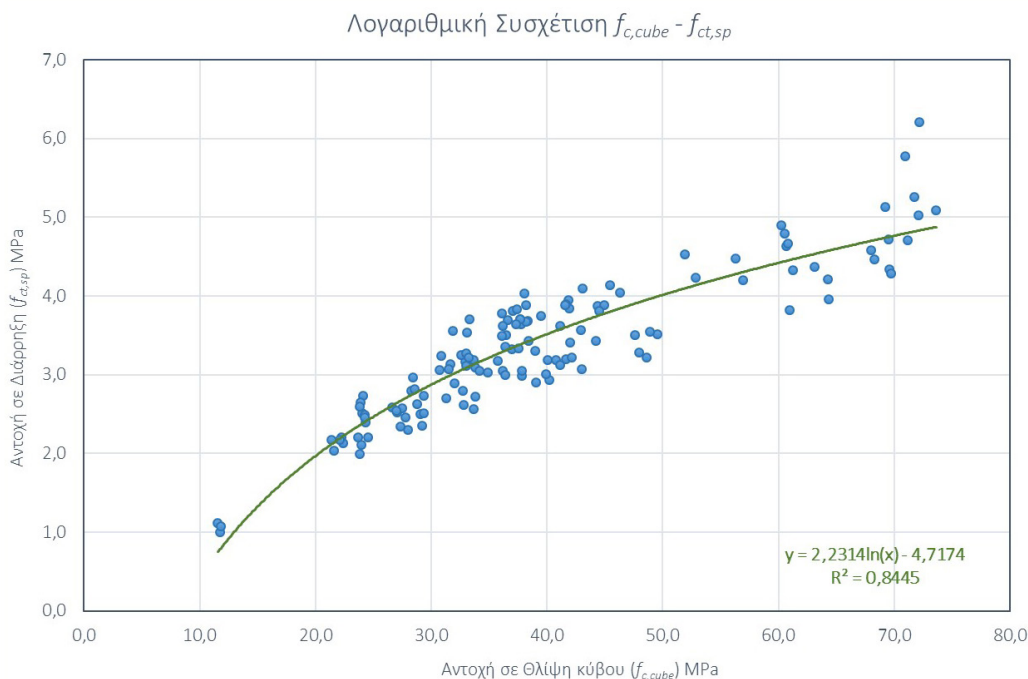
Σχήμα 4-10 Πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης με διέλευση από το σημείο (0, 0) για τη συσχέτιση $f_{c,cube} - f_{ct,sp}$ (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

4.1.2.4 Λογαριθμική εξίσωση παλινδρόμησης

Στα Σχήμα 4-11 και Σχήμα 4-12 φαίνεται η λογαριθμική συσχέτιση των πειραματικών αντοχών, τόσο για τις μέσες τιμές, όσο και για το σύνολο των αξιόπιστων δειγμάτων αντίστοιχα.



Σχήμα 4-11 Λογαριθμική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm,cube}-f_{ct,spm}$ (Μέσες τιμές αντοχών)



Σχήμα 4-12 Λογαριθμική εξίσωση παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{c,cube} - f_{ct,sp}$ (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

Η λογαριθμική εξίσωση φαίνεται να προβλέπει αρκετά καλά την αντοχή σε διάρρηξη για δεδομένη θλιπτική αντοχή, ειδικά στο εύρος αντοχών 20 – 65 MPa. Η διαφορά του σφάλματος ΙΑΕ (%) μεταξύ της λογαριθμικής, της πολυωνυμικής και της εκθετικής εξίσωσης είναι αρκετά μικρή, και επομένως δεν μπορούν να αποτελέσουν αποκλειστικό κριτήριο για την επιλογή μίας εξ' αυτών.

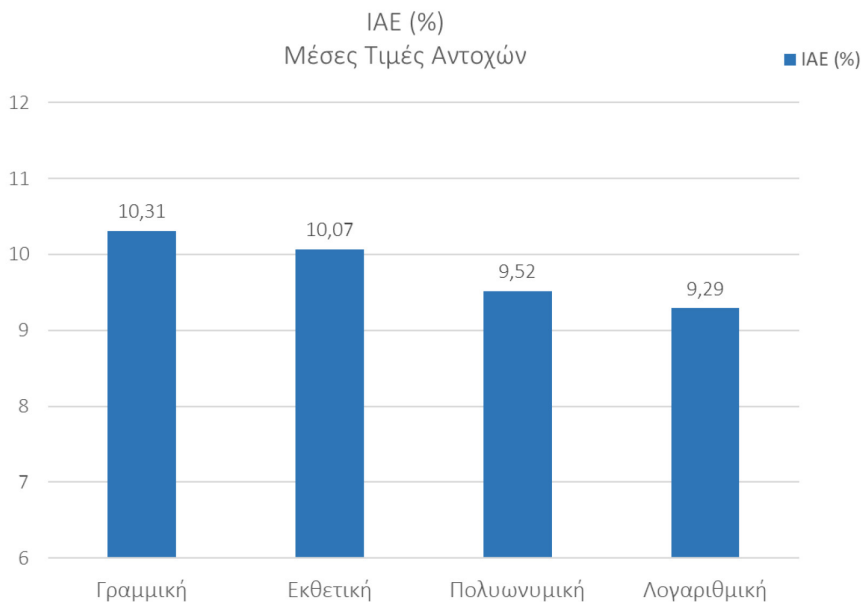
Στην περιοχή των πολύ χαμηλών αντοχών, στην περίπτωση της λογαριθμικής παλινδρόμησης παρατηρείται μία καμπύλωση της κλίσης της καμπύλης, η οποία οδηγεί στην απόκλιση της από το μηδέν και γι' αυτό η περιοχή αυτή (των πολύ χαμηλών αντοχών) της παλινδρόμησης κρίνεται ως μη αξιόπιστη. Το γεγονός αυτό, ίσως οφείλεται στο μικρό πλήθος δειγματοληψιών στην περιοχή των πολύ χαμηλών αντοχών (10-12 MPa).

Όσον αφορά την περιοχή των υψηλών αντοχών ($f_c > 50$ MPa), η διασπορά των αντοχών εξακολουθεί να μειώνει την εμπιστοσύνη της προσέγγισης σε αυτή την περιοχή.

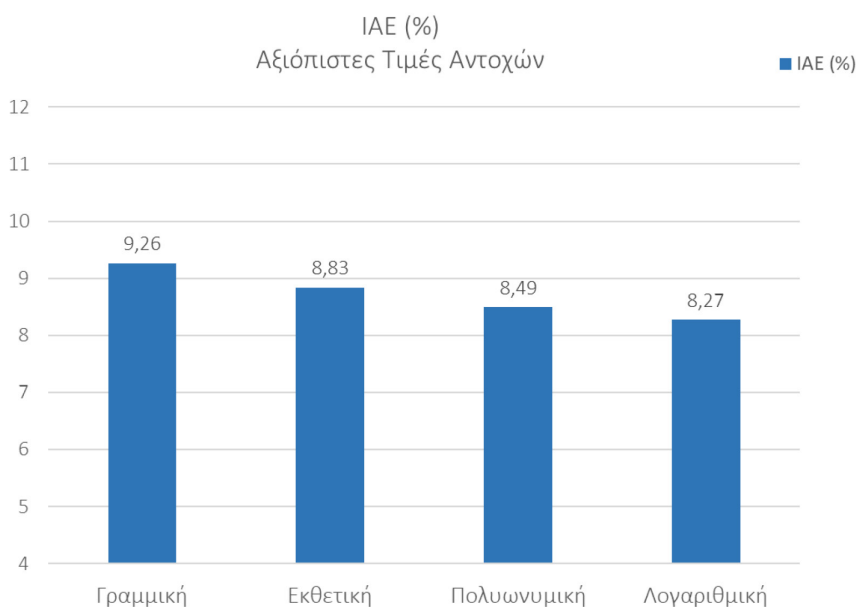
Επιπρόσθετα, μια άλλη διαφορά που μπορεί να παρατηρηθεί μεταξύ των δύο μορφών, είναι η ανοδική τάση που συνεχίζει να έχει η λογαριθμική καμπύλη στις υψηλότερες αντοχές. Αντίθετα, η πολυωνυμική καμπύλη τείνει να οριζοντιωθεί στις υψηλότερες αντοχές.

4.2 Σχολιασμός Αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

Από στατιστικής απόψεως, η εκθετική, πολυωνυμική και λογαριθμική εξίσωση παλινδρόμησης κρίνονται ικανοποιητικές, με μικρές σχετικά διαφορές ανάμεσα στο συνολικό σφάλμα IAE (%) (Σχήμα 4-13, Σχήμα 4-14).

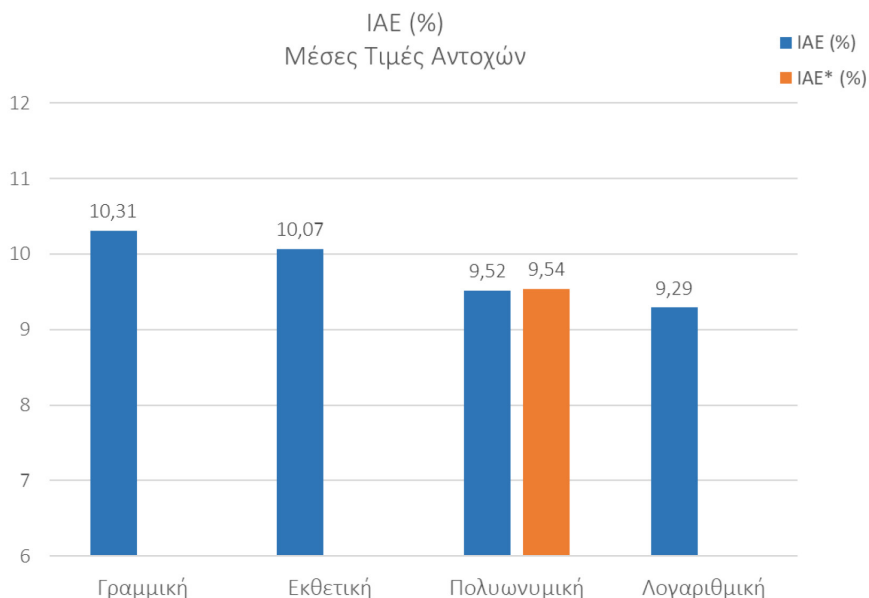


Σχήμα 4-13 Συνολικό απόλυτο σφάλμα IAE (%) για κάθε εξίσωση παλινδρόμησης (Μέσες τιμές αντοχών)

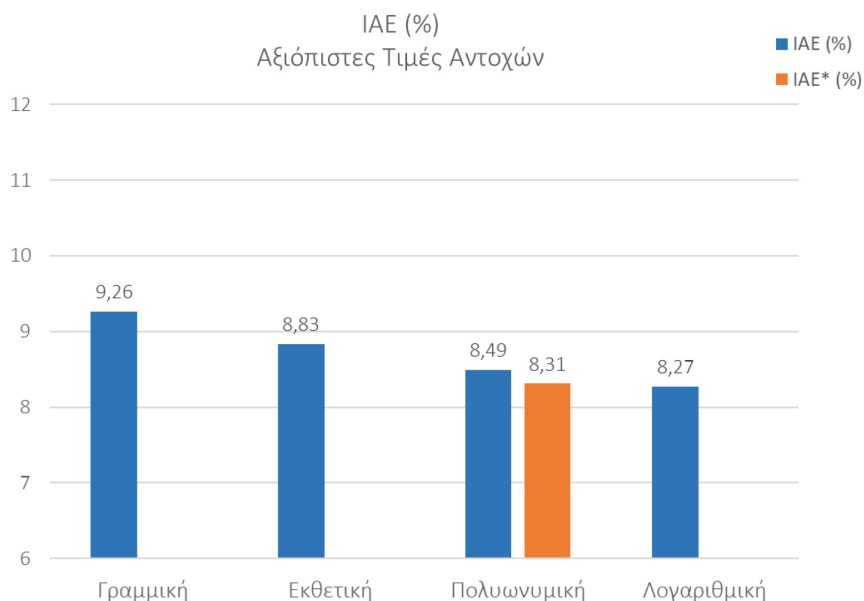


Σχήμα 4-14 Συνολικό απόλυτο σφάλμα IAE (%) για κάθε εξίσωση παλινδρόμησης (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

Οι διαφορές στο IAE (%) δεν αλλάζουν δραματικά στην περίπτωση όπου η πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης διέρχεται από το σημείο μηδέν (0, 0) (Σχήμα 4-15, Σχήμα 4-16, IAE*, %). Ωστόσο, παρατηρείται μία μικρή μείωση του IAE (%) στην περίπτωση των αξιόπιστων τιμών των αντοχών, όπως είναι λογικό, καθώς με την αύξηση των δεδομένων-παρατηρήσεων, βελτιώνεται η αξιοπιστία.



Σχήμα 4-15 Συνολικό απόλυτο σφάλμα IAE (%) για κάθε εξίσωση παλινδρόμησης (η πολυωνυμική εξίσωση διέρχεται από το (0, 0) (Μέσες τιμές αντοχών)



Σχήμα 4-16 Συνολικό απόλυτο σφάλμα IAE (%) για κάθε εξίσωση παλινδρόμησης (η πολυωνυμική εξίσωση διέρχεται από το (0, 0) (Μέσες τιμές αντοχών)

Η τελική επιλογή στηρίχθηκε περισσότερο στη μορφή της καμπύλης για μικρές τιμές f_c (συμπεριλαμβανομένου και του μηδενός) και μεγάλες τιμές f_c .

Γενικά, η διασπορά της αντοχής σε διάρρηξη είναι της τάξης του 1 MPa εκτός από τις περιοχές των μεγάλων αντοχών, όπου η διασπορά είναι πολύ μεγαλύτερη.

Η κλίση της καμπύλης, τόσο στην εκθετική, όσο και στην πολυωνυμική εξίσωση, έχει την τάση να περνάει από το μηδέν, γεγονός που τις καθιστά πιο αξιόπιστες σε σύγκριση με τη γραμμική και τη λογαριθμική εξίσωση, όπου η απόκλιση από τη διέλευση από το μηδέν φαίνεται να είναι σημαντική.

Η παρουσία μικρής αντοχής μιγμάτων, στην μεν περίπτωση της πολυωνυμικής εξίσωσης παλινδρόμησης επιβεβαιώνει την τάση της καμπύλης παλινδρόμησης, δηλαδή ότι περνάει από το μηδέν. Αντίθετα, στην περίπτωση της λογαριθμικής παλινδρόμησης παρατηρείται μία καμπύλωση της καμπύλης, με αποτέλεσμα να αποκλίνει πολύ από το μηδέν και γι' αυτό η περιοχή αυτή (των πολύ χαμηλών αντοχών) της παλινδρόμησης δεν είναι αξιόπιστη.

Για την περίπτωση της πολυωνυμικής εξίσωσης μας δίνεται και μαθηματικά η δυνατότητα να προσθέσουμε ένα επιπλέον σημείο στην παλινδρόμηση, το οποίο είναι το μηδέν (0, 0) και κατά αυτό τον τρόπο να αυξήσουμε την αξιοπιστία της εξίσωσης πρόβλεψης.

Ωστόσο, ενώ η εκθετική εξίσωση παρουσιάζει μία εξίσου καλή μορφή, η οποία δείχνει να περνάει από το μηδέν, μαθηματικά δεν μπορεί να εξεταστεί κάτι τέτοιο.

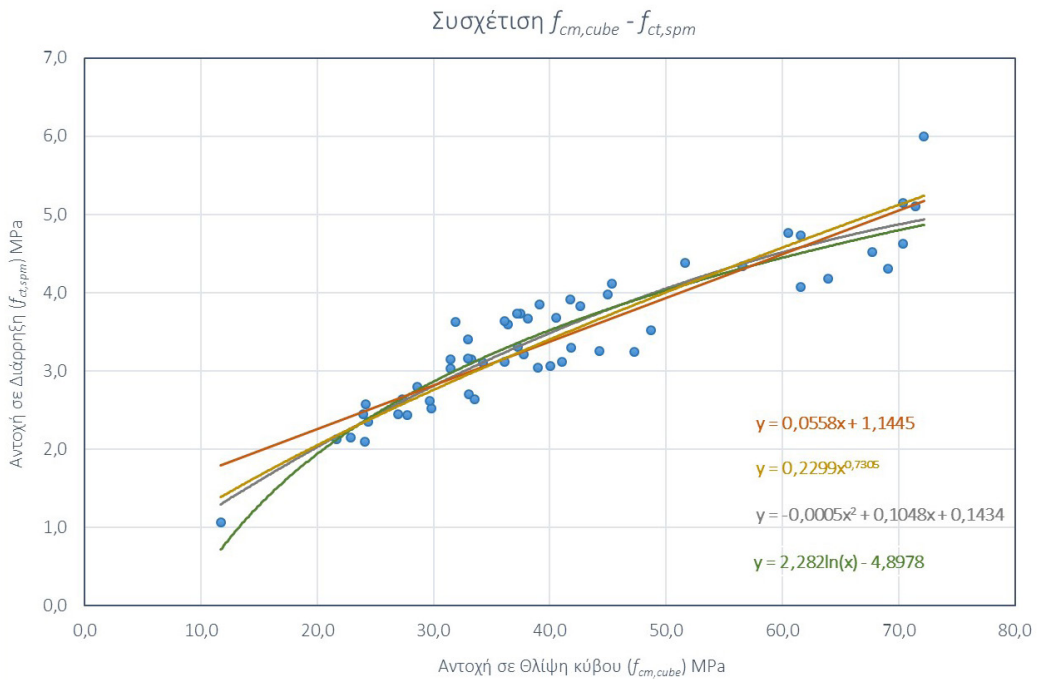
Λόγω της έλλειψης αντοχών στις μικρότερες κατηγορίες αντοχής, η προσέγγιση είναι πιο αξιόπιστη για την περιοχή αντοχών 20-65 MPa, εύρος το οποίο καλύπτει την πλειονότητα των αντοχών στην πράξη.

Γενικά, στις μικρές αντοχές δεν επιζητείται η εύρεση της αντοχής σε εφελκυσμό εκτός εάν πρόκειται για ειδικά μίγματα οδοποιίας (κατεργασμένα θραυστά αμμοχάλικα/τσιμεντόδετα αμμοχάλικα, ΚΘΑ, ή σταθεροποιημένα φυσικά αμμοχάλικα/τσιμεντόδετα φυσικά αμμοχάλικα). Τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται για στρώσεις οδοποιίας και διαφέρουν από τα κοινά σκυροδέματα κατά το ότι το νερό καθορίζεται από την απαίτηση για συμπύκνωση του υλικού (τροποποιημένη δοκιμή Proctor) και το τσιμέντο κυμαίνεται περίπου μεταξύ 3-5% κατά βάρος της σταθεροποιημένης στρώσης. Τα υλικά αυτά συμπυκνώνονται με δονητικό οδοστρωτήρα, ο οποίος επιβάλλει πίεση ταυτόχρονα με δόνηση στο υλικό. Τόσο η σύνθεση, όσο και ο τρόπος συμπύκνωσης, ενδεχομένως να επιφέρουν διαφοροποίηση του λόγου αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε διάρρηξη.

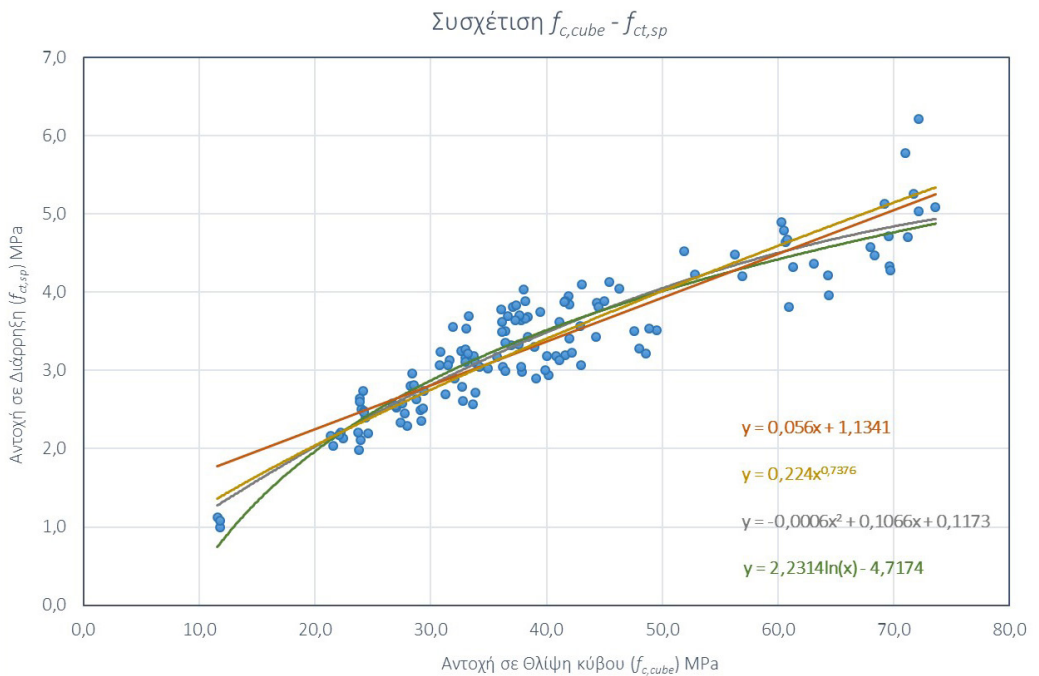
Για σκυροδέματα κοινών κατασκευών με εσωτερική δόνηση, η περιοχή αντοχών 0-20 MPa δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως προς την αντοχή σε εφελκυσμό και δεδομένων των δυσκολιών εξεύρεσης των κατάλληλων δειγμάτων που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, δεν κατεβλήθη ιδιαίτερη προσπάθεια επέκτασης της έρευνας στην περιοχή αυτή.

Συμπερασματικά, από τις εξετασθείσες εξισώσεις παλινδρόμησης, φαίνεται ότι η πολυωνυμική και η εκθετική παρουσιάζουν καλύτερη προσέγγιση στις ευρεθείσες τιμές, σε όλο σχεδόν το εύρος των αντοχών που εξετάστηκαν, με κριτήριο την μορφή της καμπύλης τόσο στις χαμηλές τιμές του f_c (διέλευση από το μηδέν), όσο και στις υψηλές τιμές του f_c .

Επιπρόσθετα, και η λογαριθμική καμπύλη φαίνεται να προβλέπει αρκετά καλά την αντοχή σε διάρρηξη, για τιμές του f_c μεγαλύτερες από 20 MPa ($f_c > 20$ MPa), καθώς για $f_c < 20$ MPa, προκαλείται έντονη κλίση της καμπύλης, με αποτέλεσμα να αποκλίνει αρκετά από το μηδέν και τα αποτελέσματα να προκύπτουν αναξιόπιστα.



Σχήμα 4-17 Εξισώσεις παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_{cm}-f_{ct,spm}$ (Μέσες τιμές αντοχών)



Σχήμα 4-18 Εξισώσεις παλινδρόμησης για τη συσχέτιση $f_c-f_{ct,sp}$ (Αξιόπιστες τιμές αντοχών)

4.3 Σύγκριση με βιβλιογραφία

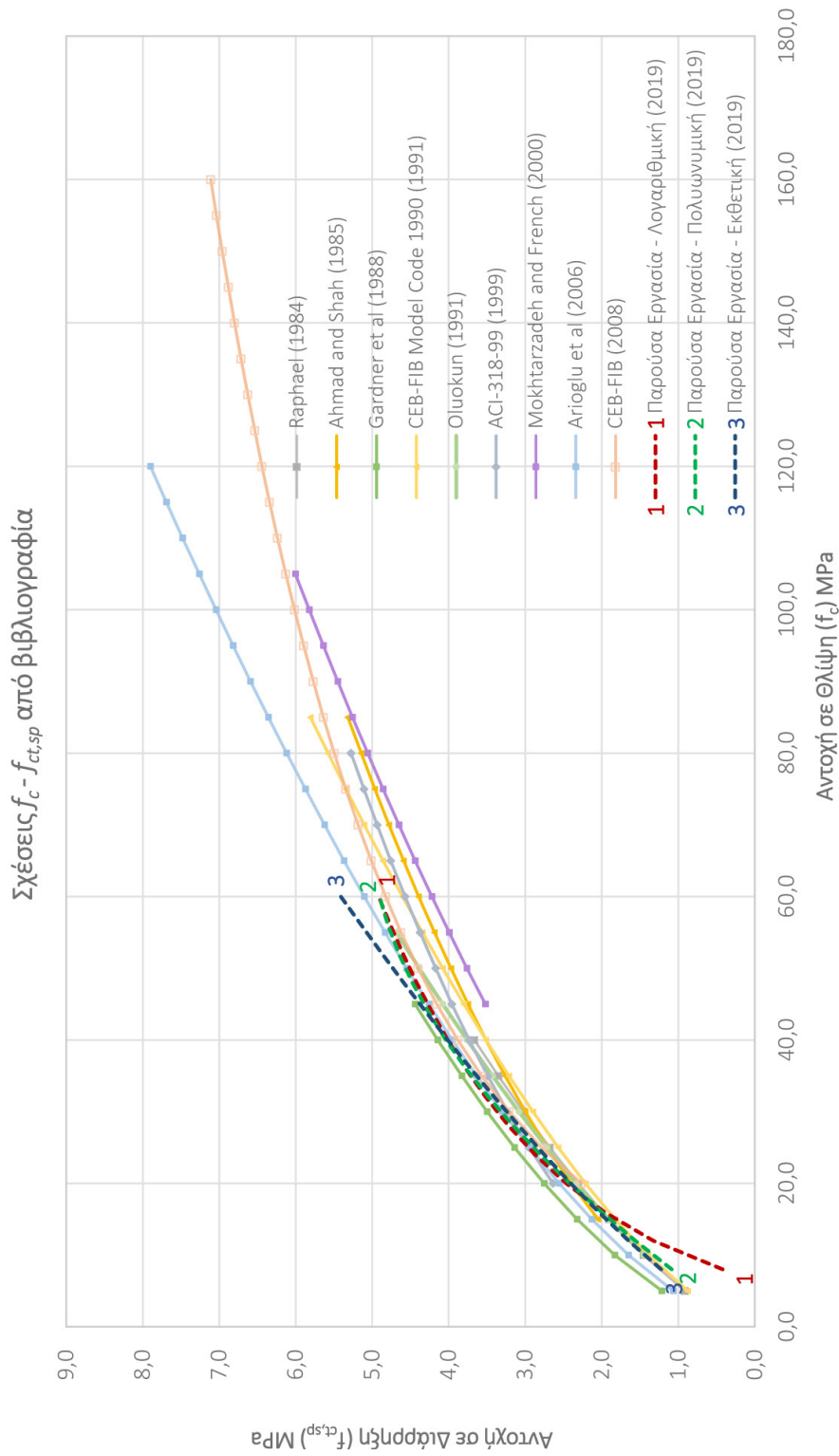
Στο Σχήμα 4-19 παρουσιάζονται οι καμπύλες των εξισώσεων $f_{ct,sp}-f_c$ που εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία, καθώς και η καμπύλη της εξίσωσης που προσεγγίζει ορθότερα τα πειραματικά δεδομένα της παρούσας εργασίας.

Οι διαφοροποιήσεις των πειραματικών δεδομένων αυτής της εργασίας για την συσχέτιση $f_c - f_{ct,sp}$, συγκριτικά με τις υπόλοιπες εξισώσεις της βιβλιογραφίας είναι οι εξής:

- Για τη δοκιμή σε θλίψη, χρησιμοποιήθηκαν κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm (συνήθης τύπος δοκιμών στον ελλαδικό χώρο για τη δοκιμή σε θλίψη) και για τη δοκιμή σε διάρρηξη, κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm. Στη ξένη βιβλιογραφία, και για τις δύο δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια. Για το λόγο αυτό, έγινε μία μετατροπή των αντοχών των κυβικών δοκιμών σε αντοχές κυλινδρικών δοκιμών ($f_c = 0.8 f_{c,cube}$), ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση με τις εξισώσεις της ξένης βιβλιογραφίας.
- Σε αντίθεση με την ξένη βιβλιογραφία, σε όλες τις δειγματοληψίες αυτής της εργασίας, η σύνθεση του σκυροδέματος συμπεριλάμβανε ασβεστολιθικά αδρανή Αττικής.
- Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια σκυροδέματος από μονάδες παραγωγής Εργοστασιακού Σκυροδέματος, και όχι δοκίμια που παρασκευάστηκαν σε εργαστήριο, όπως συμβαίνει στην πλειονότητα των σχέσεων της ξένης βιβλιογραφίας.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-19, αποδεικνύεται ότι οι προτεινόμενες σχέσεις αυτής της εργασίας συμφωνούν ικανοποιητικά με τις σπουδαιότερες από τις σχέσεις που έχουν προταθεί από την ξένη βιβλιογραφία, με τις εξής παρατηρήσεις:

- Οι εξισώσεις που προτείνονται από την παρούσα εργασία, προβλέπουν, στις περισσότερες περιπτώσεις, για την ίδια αντοχή σε θλίψη, ελαφρώς μεγαλύτερες αντοχές σε διάρρηξη, γεγονός που αποδίδεται στη χρήση των θραυστών ασβεστολιθικών αδρανών.
- Στις πολύ χαμηλές αντοχές, για $f_c < 20$ MPa, παρατηρείται μια τάση των προτεινόμενων εξισώσεων να καμπυλώνουν προς τα κάτω, με αποτέλεσμα για την ίδια αντοχή σε θλίψη, να προκύπτουν μικρότερες αντοχές σε διάρρηξη, συγκριτικά με τις σχέσεις της βιβλιογραφίας. Αυτό, θα μπορούσε να αποδοθεί στο πολύ μικρό πλήθος χαμηλών αντοχών που συγκεντρώθηκαν στην παρούσα εργασία, γεγονός που μειώνει την στατιστική αξιοπιστία των προτεινόμενων σχέσεων στην περιοχή των πολύ χαμηλών αντοχών.



Σχήμα 4-19 Σχέσεις $f_c - f_{ct,sp}$ από βιβλιογραφία και σύγκριση με τις προτεινόμενες σχέσεις της παρούσας εργασίας

5 Συμπεράσματα

Η παρούσα εργασία αφορά ασβεστολιθικά αδρανή, κυβικά δοκίμια ακμής 150 mm και κυλινδρικά δοκίμια ύψους 300 mm και διαμέτρου 150 mm, τα οποία παρασκευάστηκαν στην μονάδα παραγωγής του σκυροδέματος από τους τεχνικούς της μονάδας, συντηρήθηκαν για ένα διάστημα (7-10 ημέρες) στο θάλαμο συντήρησης της μονάδας και εν συνεχεία μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο ΕΜΠ, όπου σε ηλικία 28 ημερών πραγματοποιήθηκε η θραύση τους σε θλίψη και σε διάρρηξη.

Από τα αποτελέσματα μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

1. Η σχέση μεταξύ αντοχής σε διάρρηξη και αντοχής σε θλίψη ($f_{ct,sp} - f_c$) είναι πολυωνυμική (με διέλευση από το μηδέν (0, 0) και είναι η εξής:

$$f_{ct,sp} = -0.0006 f_c^2 + 0.1098 f_c + 0.048$$

όπου f_c : η θλιπτική αντοχή κύβου σε MPa

$f_{ct,sp}$: η αντοχή σε διάρρηξη κυλίνδρου σε MPa

με IAE = 8,31%. Στο θέμα αυτό, υπάρχει μια διαφορά με τις δημοσιευμένες έρευνες, οι οποίες παρουσιάζουν εκθετική σχέση. Πάντως, οι διαφορές είναι μικρές ως προς το συνολικό σφάλμα IAE (%). Η εκτίμηση ότι η πολυωνυμική εξίσωση παλινδρόμησης εκφράζει καλύτερα τη σχέση $f_c - f_{ct,sp}$ στηρίχθηκε περισσότερο στη μορφή της καμπύλης για μικρές τιμές f_c (συμπεριλαμβανομένου και του μηδενός) και για μεγάλες τιμές f_c .

2. Η σχέση μεταξύ αντοχής σε διάρρηξη και αντοχής σε θλίψη ($f_{ct,sp} - f_c$) είναι εκθετική και είναι η εξής:

$$f_{ct,sp} = 0.224 f_c^{0.7376}$$

όπου f_c : η θλιπτική αντοχή κύβου σε MPa

$f_{ct,sp}$: η αντοχή σε διάρρηξη κυλίνδρου σε MPa

με IAE = 8.83%. Όπως και στην περίπτωση της πολυωνυμικής εξίσωσης, η εκτίμηση ότι η εκθετική εξίσωση παλινδρόμησης αποτελεί μια καλή προσέγγιση της αντοχής σε διάρρηξη για δεδομένη θλιπτική αντοχή, στηρίχθηκε κυρίως στη μορφή της καμπύλης για μικρές τιμές f_c (συμπεριλαμβανομένου και του μηδενός) και για μεγάλες τιμές f_c .

3. Η σχέση μεταξύ αντοχής σε διάρρηξη και αντοχής σε θλίψη ($f_{ct,sp} - f_c$) είναι λογαριθμική, για αντοχές μεγαλύτερες από 20 MPa ($f_c > 20$ MPa) και είναι η εξής:

$$f_{ct,sp} = 2.2314 \ln(f_c) - 4.7174$$

όπου f_c : η θλιπτική αντοχή κύβου σε MPa

$f_{ct,tp}$: η αντοχή σε διάρρηξη κυλίνδρου σε MPa

με IAE = 8.27%. Η πιο πάνω λογαριθμική εξίσωση δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα για αντοχές μεγαλύτερες από 20 MPa. Δεν ισχύει το ίδιο και για τις χαμηλότερες αντοχές, καθώς στην περιοχή όπου $f_c < 20$ MPa, προκαλείται έντονη κλίση της καμπύλης, με αποτέλεσμα να αποκλίνει αρκετά από το μηδέν και τα αποτελέσματα να προκύπτουν αναξιόπιστα. Συνεπώς με επιφύλαξη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση $f_{ct,sp}/f_c$ της λογαριθμικής εξίσωσης.

Όπως και στην περίπτωση της πολυωνυμικής εξίσωσης, και στην λογαριθμική εξίσωση υπάρχει μια διαφορά με τις δημοσιευμένες έρευνες, οι οποίες στην πλειονότητά τους, παρουσιάζουν εκθετική σχέση, εκτός από τη λογαριθμική εξίσωση που προτείνεται από το CEB^[19] σε εύρος αντοχών $20 < f_c < 160$ MPa.

4. Ο λόγος αντοχής σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμών προς αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμών ($f_{ct,sp}/f_{c,cube}$) βρέθηκε να κυμαίνεται μεταξύ 4.8% και 12.2%.

$$4.8\% \leq f_{ct,sp}/f_{c,cube} \leq 12.2\%$$

6 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για μελλοντική έρευνα πιστεύεται ότι πρέπει:

- Να αυξηθεί ο αριθμός των δειγματοληψιών, ιδίως των μικρών και των μεγάλων αντοχών f_c .
- Να διερευνηθεί η επίδραση του μέγιστου κόκκου του αδρανούς (D_{max}) στη σχέση αυτή.
- Παρόλο που οι βιβλιογραφικές αναφορές παρουσιάζουν ότι η θερμοκρασία συντήρησης δεν επηρεάζει τη σχέση $f_c - f_{ct,sp}$, πιστεύεται ότι θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω η πιο πάνω παράμετρος.

7 Βιβλιογραφία

- [1] A. M. Neville, Properties of Concrete: 5th edition, United Kingdom, Pearson Prentice Hall, 2011.
- [2] Σ. Κόλιας, Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος, Σημειώσεις, Αθήνα, 2017.
- [3] W. H. Glanville, C. A. R. and D. D. Matthews, "The grading of aggregates and workability of concrete," Road Research Tech. Paper, no. 5, 1947.
- [4] "Francois De Larrard, Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach," pp. 140-148, 2011.
- [5] R. Féret, Sur la compacité des mortiers hydrauliques. Annales des Ponts et Chaussées, Série 7, 4, 1892, pp. 5-164.
- [6] J. Bolomey, Granulation et prévision de la resistance probable des bétons. Travaux, 19(30), 1935, pp. 228-232.
- [7] L. K. A. Sear, D. J., K. B., F. Harris and T. J.F., Abrams law, air and high water-to-cement ratios, Vols. 10, No. 3, Construction and Building Materials, 1996, pp. 221-226.
- [8] I. Yeh, Generalization of strength versus water-cementitious ratio relationship to age, vol. 36.10, Cem. Concr. Res., 2006, pp. 1865-1873.
- [9] J. Kim, Y. Park, K. Sung and S. Lee, "The production of high-strength fly ash concrete in Korea," in Proceedings of the 4th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Istanbul, 1992.
- [10] M. Lusche, "Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal-und Leichtbeton mit geschlossenem Gefuge," Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 39, 1972.
- [11] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, Σκυρόδεμα, 3η ed., Κ. Α. Π. Θ. Ιωάννα Παπαγιάννη, Ed., Κλειδάριθμος, 2009, p. 100.
- [12] V. Malárics and H. Müller, "Evaluation of the splitting tension test for concrete from a fracture mechanical point of view," in Proceedings of Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 2010.
- [13] "ASTM C 496/C 496M-04: Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens," United States, 2004.
- [14] "BS EN 12390-6: 2009, Testing hardened concrete - Part 6: Tensile splitting strength of test specimens," European Standard (English Version), 2009.
- [15] "The tensile strength of concrete determined by splitting tests on cubes," RILEM Bull, no. 11, pp. 63-7, June 1961.

- [16] C. Rocco, G. V. Guinea, J. Planas and M. Elices, "Size effect and boundary conditions in the brazilian test: Theoretical Analysis," *Materials and Structures*, vol. 32, pp. 437-444, 1999.
- [17] H. K. Hilsdorf, "Concrete Structures Euro-Design Handbook. Ernst & Sohn Verlag," in *Concrete*. In, Berlin, 1995.
- [18] M. Kepniak and P. Woyciechowski, "The Statistical Analysis of Relation Between Compressive and Tensile/Flexural Strength of High Performance Concrete," *Archives of Civil Engineering*, vol. LXII, no. 4, Part 2, 2016.
- [19] "CEB-FIB, Constitutive modelling of high strength / high performance concrete," State of art report, no. 42, January 2008.
- [20] T. Okajima, T. Tshikawa and K. Ichise, "Moisture effect on the mechanical properties of cement mortar," vol. 2, pp. 125-132, 1980.
- [21] F. M. Bartlett and J. G. Macgregor, "Effect of moisture condition on concrete core strengths," *ACI Materials Journal*, vol. 91, no. 3, pp. 227-236, 1994.
- [22] S. Pihlajavaara, "A REVIEW OF SOME OF THE MAIN RESULTS OF A RESEARCH ON THE AGEING PHENOMENA OF CONCRETE: EFFECT OF MOISTURE CONDITIONS ON STRENGTH, SHRINKAGE AND CREEP OF MATURE CONCRETE," 10 June 1974.
- [23] J. W. Galloway, H. M. Harding and K. D. Raithby, "Effects of Moisture Changes on Flexural and Fatigue Strength of Concrete," *Transport and Road Research Laboratory*, p. 18, 1979.
- [24] R. L. Carrasquillo, A. H. Nilson and F. O. Slate, "Properties of high strength concrete subjected to short-term loads," *ACI Journal*, pp. 171-178, May-June 1981.
- [25] M. Immam, L. Vandewalle and F. Mortelmans, "Are current concrete strength tests suitable for high strength concrete?," *Materials and Structures*, vol. 28, pp. 384-391, 1995.
- [26] P. M. Carrasquillo and R. L. Carrasquillo, "Evaluation of the use of current concrete practice in the production of high strength concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 78, no. 14, pp. 171-178, 1981.
- [27] G. Giaccio, C. Rocco and R. Zerbinò, "The fracture energy (GF) of high-strength concretes.," *Materials and Structures*, vol. 26, pp. 381-386, 1993.
- [28] E. A. Hansen, M. Leive, J. Rodriguez and R. Cather, "Mechanical Properties of High Strength Concrete - Influence of test Conditions, Specimens and Constituents," in *Proceedings of Fourth International Symposium on the Utilization of High Strength / High Performance Concrete*, I. Holand and E.J. Sellevold (eds.), Paris, France, 1996.
- [29] J. P. Skalny, "Materials science of concrete. The American Ceramic Society," 1989.

- [30] F. Min, Z. Yao and T. Jiang, "Experimental and Numerical Study on Tensile Strength of Concrete under Different Strain Rates," *The Scientific World Journal*, April 16 2014.
- [31] N. Arioglu, Z. C. Girgin and E. and Arioglu, "Evaluation of Ratio between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength for Concrete up to 120 MPa and its Application in Strength Criterion," *ACI Materials Journal*, vol. 103, no. 1, pp. 18-24, January-February 2006.
- [32] "ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-89/318R-89)," Detroit, American Concrete Institute, 1989, p. 353.
- [33] F. A. Oluokun, "Prediction of concrete tensile strength from its compressive strength: Evaluation of existing relationship for normal weight concrete," *ACI Materials Journal*, vol. 88, no. 3, pp. 302-309, May-June 1991.
- [34] S. Ros and H. Shima, "Relationship Between Splitting Tensile Strength and Compressive Strength of Concrete at Early Age with Different Types of Cement and Curing Temperature Histories," *Conference Paper: 13th Annual Convention of Japan Concrete Institute*, vol. 35, no. 1, pp. 427-432, July 2013.
- [35] "JCI 2008, Guidelines for Control of Cracking of Mass Concrete 2008," *Japan Concrete Institute, JCI*, August 2011.
- [36] "ACI Committee 363, State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete (ACI 363R-92)," Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, 1992, p. 55.
- [37] "ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (318R-99)," Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, 1999, p. 391.
- [38] "CEB-FIB Model Code 1990 for Concrete Structures, Evaluation of the Time Dependent Behaviour of Concrete," *CEB-FIB Model Code for Concrete Structures*, no. 199, p. 201, 1991.
- [39] A. Mokhtarzadeh and C. French, "Mechanical Properties of High-Strength Concrete with Consideration for Precast Applications," *ACI Materials Journal*, vol. 97, no. 2, pp. 136-147, March- April 2000.
- [40] N. J. Carino and H. S. Lew, "Re-Examination of the Relation Between Splitting Tensile and Compressive Strength of Normal Weight Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, vol. 79, no. 3, pp. 214-219, May-June 1982.
- [41] J. M. Raphael, "Tensile Strength of Concrete," *ACI Journal, Proceedings*, vol. 81, no. 2, pp. 158-165, March-April 1984.
- [42] S. H. Ahmad and S. P. Shah, "Structural Properties of High Strength Concrete and its Implications for Precast Prestressed Concrete," *PCI Journal*, vol. 30, no. 6, pp. 92-119,

November-December 1985.

- [43] N. J. Gardner, P. L. Sau and M. S. Cheung, "Strength Development and Durability of Concretes Cast and Cured at 0 C," *ACI Materials Journal*, vol. 85, no. 6, pp. 529-536, November-December 1988.
- [44] N. J. Gardner, "Effect of Temperature on the Early-Age Properties of Type I, Type III, and Type I/Fly Ash Concretes," *ACI Materials Journal*, vol. 87, no. 1, pp. 68-78, January-February 1990.
- [45] F. A. Oluokun, E. G. Burdette and J. H. Deatherage, "Splitting Tensile Strength and Compressive Strength Relationships at Early Ages," *ACI Materials Journal*, vol. 88, no. 2, pp. 115-121, March-April 1991.
- [46] E. Arıoglu, "Discussion of "Relationship Between Splitting Tensile Strength and the Compressive Strength" by V. Yerlici and U. Ersoy," *IMO Technical Journal*, no. 4, pp. 1059-1062, Oct. 1995.
- [47] K. A. Gajendran, R. Anuradha and G. S. Venkatasubramani, "Studies on Relationship between Compressive and Splitting Tensile Strength of High Performance Concrete," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences (ISSN 1819-6608)*, August 2015.
- [48] "JSCE 2002, Standard specifications for concrete structures," *Materials and Construction*, Japan Society of Civil Engineers, JSCE, no. 6.
- [49] "JSCE 2007, Standard specifications for concrete structures," *Materials and Construction*, Japan Society of Civil Engineers, JSCE, no. 7.
- [50] "AIJ 2008, Recommendations for Practice of Thermal Cracking Control of Massive Concrete in Building," *Architectural Institute of Japan, AIJ*, p. 69, 2008.
- [51] "BS EN 1992-3: 2006 (British Code of Practice), Eurocode 2".
- [52] "EN 1992-1-1:2004, Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings, European Committee for Standardization," 2004.
- [53] "Model Code 2010- Final draft, Bulletin 66," 2012.
- [54] "Norwegian Standard NS 3473: Concrete Structures," *Design Rules*, 1989.
- [55] G. Rimmel, "On the Tensile and Shear Behaviour of High Strength Concrete Members (in German). *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*," no. 444, 1994.
- [56] J. P. Jaccoud, B. Farra and A. Leclercq, "Tensile Strength- Modulus of Elasticity- Bond - Tension Stiffening - Limit State of Cracking. Report to the Joint CEB/FIP Working Group on HSC/HPC. IBAP," March 1995.
- [57] "ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary".

- [58] "EN 12390-3: 2009, Testing hardened concrete- Part 3: Compressive Strength of test specimens," European Standard (English version), 2009.
- [59] Agnes Ogee, "blog.minitab.com," 6th March 2014. [Online].

Παράρτημα Α

Παρουσιάζεται ο προσδιορισμός του εύρους του λόγου f_i/f_t για κάθε δοκιμή. Για τον προσδιορισμό αυτό, χρησιμοποιούνται οι σχέσεις μεταξύ των αντοχών, οι οποίες βρέθηκαν στην υπάρχουσα βιβλιογραφία.

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ [f_{ct}] - ΘΛΙΨΗ [f_c]										
Σχέσεις			f_{ct} (MPa)							
$f_{ct} = k f_c^n$	k	n	f_c (MPa)							
			20	30	40	50	60	80	100	120
$f_{ct} = 0.12 f_c^{0.7}$	0,12	0,70	0,98	1,30	1,59	1,86	2,11	2,58	3,01	3,42
$f_{ct} = 0.44 f_c^{0.56}$	0,44	0,56	2,36	2,96	3,47	3,93	4,36	5,12	5,80	6,42
$f_{ct} = 0.3 f_c^{0.667}$	0,30	0,667	2,21	2,90	3,51	4,08	–	–	–	–
$f_{ct} = 2.12 \ln(1+0.1 f_{cm})$	–	–	–	–	–	–	–	4,13	4,66	5,08

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ [f_{ct}] - ΘΛΙΨΗ [f_c]										
Σχέσεις			f_c/f_{ct}							
$f_{ct} = k f_c^n$	k	n	f_c (MPa)							
			20	30	40	50	60	80	100	120
$f_{ct} = 0.12 f_c^{0.7}$	0,12	0,70	20,47	23,12	25,20	26,95	28,46	31,03	33,18	35,04
$f_{ct} = 0.44 f_c^{0.56}$	0,44	0,56	8,49	10,15	11,52	12,71	13,77	15,63	17,24	18,68
$f_{ct} = 0.3 f_c^{0.667}$	0,30	0,667	9,04	10,35	11,39	12,26	–	–	–	–
$f_{ct} = 2.12 \ln(1+0.1 f_{cm})$	–	–	–	–	–	–	–	14,54	17,17	19,67

f_c/f_{ct}	
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ
8,49	35,04

Το εύρος του λόγου f_c/f_{ct} και συγκεκριμένα ο μέγιστος λόγος (35.04) που προκύπτει από τις σχέσεις της βιβλιογραφίας κρίθηκε σημαντικά υψηλός, και επομένως δεν συμπεριλήφθηκε σ' αυτή την εργασία. Συνήθως ο λόγος f_c/f_{ct} εκτιμάται γύρω στο $10 \sim 13^{[2]}$.

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ [f_{ct}] - ΔΙΑΡΡΗΞΗ [$f_{ct,sp}$]										
Σχέσεις			f_{ctm} (MPa)							
$f_{ctm} = A f_{ct,sp}$	A		$f_{ct,sp}$ (MPa)							
			2	4	6	8	10	12	14	16
$f_{ctm} = 0.667 f_{ct,sp}$	0,667		1,33	2,67	4,00	5,34	6,67	8,00	9,34	10,67
$f_{ctm} = 0.9 f_{ct,sp}$	0,90		1,20	2,40	3,60	4,80	6,00	7,20	8,40	9,60
$f_{ctm} = 0.95 f_{ct,sp}$	0,95		1,14	2,28	3,42	4,56	5,70	6,84	7,98	9,12
$f_{ctm} = 0.81 f_{ct,sp}$	0,81		0,92	1,85	2,77	3,70	4,62	5,54	6,47	7,39
$f_{ctm} = 1.14 f_{ct,sp}$	1,14		1,05	2,11	3,16	4,21	5,27	6,32	7,37	8,43
			$f_{ct,sp}$ (MPa)							
$f_{ctm} = k f_{ct,sp}^n$	k	n	2	4	6	8	10	12	14	16
$f_{ctm} = 1.46 f_{ct,sp}^{0.77}$	1,46	0,77	2,49	4,25	5,80	7,24	8,60	9,89	11,14	12,35
$f_{ctm} = 1.71 f_{ct,sp}^{0.73}$	1,71	0,73	2,11	3,50	4,71	5,81	6,83	7,81	8,74	9,63

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ [f_{ct}] - ΔΙΑΡΡΗΞΗ [$f_{ct,sp}$]										
Σχέσεις			$f_{ct,sp}/f_{ct}$							
$f_{ct} = A f_{ct,sp}$	A		$f_{ct,sp}$ (MPa)							
			2	4	6	8	10	12	14	16
$f_{ctm} = 0.667 f_{ct,sp}$	0,667		1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,50
$f_{ctm} = 0.9 f_{ct,sp}$	0,90		1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
$f_{ctm} = 0.95 f_{ct,sp}$	0,95		1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	1,75
$f_{ctm} = 0.81 f_{ct,sp}$	0,81		2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
$f_{ctm} = 1.14 f_{ct,sp}$	1,14		1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90	1,90
			$f_{ct,sp}$ (MPa)							
$f_{ct} = k f_{ct,sp}^n$	k	n	2	4	6	8	10	12	14	16
$f_{ctm} = 1.46 f_{ct,sp}^{0.77}$	1,46	0,77	0,80	0,94	1,03	1,10	1,16	1,21	1,26	1,30
$f_{ctm} = 1.71 f_{ct,sp}^{0.73}$	1,71	0,73	0,95	1,14	1,27	1,38	1,46	1,54	1,60	1,66

$f_{ct,sp}/f_{ct}$	
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ
0,80	2,16

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ [f_{ct}] - ΚΑΜΨΗ [$f_{ct,fl}$]									
Σχέσεις	h_b [mm]	f_{ct} (MPa)							
		2	4	6	8	10	12	14	16
$f_{ct,fl} = \frac{1+1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}}{1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}} f_{ctm}$	100	3,33	6,67	10,00	13,33	16,67	20,00	23,33	26,67
$f_{ct,fl} = \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right)f_{ctm}; f_{ctm}\right]$		2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00
$f_{ct,fl} = \frac{1 + 0.06 h_b^{0.7}}{0.06 h_b^{0.7}} f_{ctm}$		3,33	6,65	9,98	13,31	16,64	19,96	23,29	26,62
$f_{ct,fl} = \frac{1+1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}}{1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}} f_{ctm}$	200	2,82	5,64	8,46	11,28	14,10	16,92	19,75	22,57
$f_{ct,fl} = \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right)f_{ctm}; f_{ctm}\right]$		2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00
$f_{ct,fl} = \frac{1 + 0.06 h_b^{0.7}}{0.06 h_b^{0.7}} f_{ctm}$		2,82	5,63	8,45	11,27	14,08	16,90	19,72	22,54

ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ [f_{ct}] - ΚΑΜΨΗ [$f_{ct,fl}$]									
Σχέσεις	h_b [mm]	$f_{ct,fl}/f_{ct}$							
		f_{ct} (MPa)							
		2	4	6	8	10	12	14	16
$f_{ct,fl} = \frac{1+1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}}{1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}} f_{ctm}$	100	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
$f_{ct,fl} = \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right)f_{ctm}; f_{ctm}\right]$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$f_{ct,fl} = \frac{1 + 0.06 h_b^{0.7}}{0.06 h_b^{0.7}} f_{ctm}$		1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
$f_{ct,fl} = \frac{1+1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}}{1.5 \left(\frac{h_b}{100}\right)^{0.7}} f_{ctm}$	200	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41
$f_{ct,fl} = \max\left[\left(1.6 - \frac{h}{1000}\right)f_{ctm}; f_{ctm}\right]$		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$f_{ct,fl} = \frac{1 + 0.06 h_b^{0.7}}{0.06 h_b^{0.7}} f_{ctm}$		1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41	1,41

$f_{ct,fl}/f_{ct}$	
ΕΛΑΧΙΣΤΟ	ΜΕΓΙΣΤΟ
1,00	1,67

Παράρτημα Β

Παρουσιάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τα χαρακτηριστικά των δοκιμών.

Αριθμός Δοκιμών	Μονάδα Παρασκευής Σκυροδέματος	Κωδικός Δοκιμίου	Σχήμα Δοκιμίου	Διαστάσεις δοκιμίου (mm)		Βάρος δοκιμίου (kg)	Φαινόμενο Βάρος δοκιμίου (kg/m ³)	Ημερομηνία Δειγματοληψίας	Ημερομηνία Θραύσης	Κατηγορία Σκυροδέματος (Mpa)	Κατηγορία Έκθεσης	Κατηγορία Συνεκτικότητας	Κάθιση Εξέλιξη (cm)	Θερμοκρασία Περιβάλλοντος (C)	Θερμοκρασία Σκυροδέματος (C)	Μέγιστος Κόκκος (mm)
				D	L											
1	A	A-1α/C	Κύβος	-	-	-	-	10-12-2018	08-01-2019	C40/50	XM2	S3	16	9.6	18.2	31.5
2		A-1β/C	Κύβος	-	-	-	-									
3		A-1γ/C	Κύβος	-	-	-	-									
4		A-1α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
5		A-1β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
6		A-1γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
7	A	A-2α/C	Κύβος	-	-	-	-	11-12-2018	08-01-2019	C30/37	XC3	S3	18	9.2	20.8	31.5
8		A-2β/C	Κύβος	-	-	-	-									
9		A-2γ/C	Κύβος	-	-	-	-									
10		A-2α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
11		A-2β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
12		A-2γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
13	A	A-3α/C	Κύβος	-	-	-	-	12-12-2018	09-01-2019	C40/50	XM2	S3	12	9.6	19.8	31.5
14		A-3β/C	Κύβος	-	-	-	-									
15		A-3γ/C	Κύβος	-	-	-	-									
16		A-3α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
17		A-3β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
18		A-3γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
19	A	A-4α/C	Κύβος	-	-	-	-	13-12-2018	10-01-2019	C16/20	X0	S3	16	7.1	18.2	31.5
20		A-4β/C	Κύβος	-	-	-	-									
21		A-4γ/C	Κύβος	-	-	-	-									
22		A-4α/S	Κύλινδρος	151.00	301.00	-	-									
23		A-4β/S	Κύλινδρος	150.00	301.00	-	-									
24		A-4γ/S	Κύλινδρος	153.00	305.00	-	-									
25	A	A-5α/C	Κύβος	-	-	-	-	12-12-2018	09-01-2019	C25/30	XC1	S2	15	9.6	18.8	31.5
26		A-5β/C	Κύβος	-	-	-	-									
27		A-5γ/C	Κύβος	-	-	-	-									
28		A-5α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
29		A-5β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
30		A-5γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-									
31	A	A-6α/C	Κύβος	-	-	-	-	14-12-2018	11-01-2019	C25/30	XC3	S3	20	11.3	18.6	31.5
32		A-6β/C	Κύβος	-	-	-	-									
33		A-6γ/C	Κύβος	-	-	-	-									
34		A-6α/S	Κύλινδρος	150.30	299.00	-	-									
35		A-6β/S	Κύλινδρος	150.50	301.00	-	-									
36		A-6γ/S	Κύλινδρος	151.20	300.30	-	-									
37	A	A-7α/C	Κύβος	-	-	8.209	2,432.30	17-12-2018	14-01-2019	C20/25	XC1	S2	17	12.7	20.3	31.5
38		A-7β/C	Κύβος	-	-	8.153	2,415.70									
39		A-7γ/C	Κύβος	-	-	8.106	2,401.78									
40		A-7α/S	Κύλινδρος	150.00	300.00	12.688	2,393.31									
41		A-7β/S	Κύλινδρος	150.20	298.50	12.605	2,383.25									
42		A-7γ/S	Κύλινδρος	150.60	300.25	12.709	2,376.23									
43	A	A-8α/C	Κύβος	-	-	8.132	2,409.48	18-12-2018	15-01-2019	C20/25	XC1	S2	12	11.3	22.3	31.5
44		A-8β/C	Κύβος	-	-	8.146	2,413.63									
45		A-8γ/C	Κύβος	-	-	8.166	2,419.56									
46		A-8α/S	Κύλινδρος	150.25	302.00	12.907	2,410.46									
47		A-8β/S	Κύλινδρος	150.25	299.63	12.668	2,384.54									
48		A-8γ/S	Κύλινδρος	150.15	300.50	12.797	2,405.04									
49	A	A-9α/C	Κύβος	-	-	8.085	2,395.56	19-12-2018	16-01-2019	C16/20	X0	S3	14	9.7	18.2	31.5
50		A-9β/C	Κύβος	-	-	8.198	2,429.04									
51		A-9γ/C	Κύβος	-	-	8.162	2,418.37									
52		A-9α/S	Κύλινδρος	150.40	301.25	12.751	2,382.49									
53		A-9β/S	Κύλινδρος	150.30	300.13	12.715	2,387.85									
54		A-9γ/S	Κύλινδρος	149.75	298.25	12.608	2,400.17									
55	A	A-10α/C	Κύβος	-	-	8.157	2,416.89	20-12-2018	17-01-2019	C20/25	XC1	S2	15	10.9	18.9	31.5
56		A-10β/C	Κύβος	-	-	8.209	2,432.30									
57		A-10γ/C	Κύβος	-	-	8.107	2,402.07									
58		A-10α/S	Κύλινδρος	150.20	301.00	12.881	2,415.20									
59		A-10β/S	Κύλινδρος	150.15	300.88	12.793	2,401.30									
60		A-10γ/S	Κύλινδρος	149.75	299.25	12.741	2,417.38									
61	A	A-11α/C	Κύβος	-	-	8.172	2,421.33	21-12-2018	18-01-2019	C30/37	XC3	S3	20	8.5	19.2	31.5
62		A-11β/C	Κύβος	-	-	8.207	2,431.70									
63		A-11γ/C	Κύβος	-	-	8.108	2,402.37									
64		A-11α/S	Κύλινδρος	149.95	299.00	12.757	2,415.99									
65		A-11β/S	Κύλινδρος	150.35	297.50	12.572	2,380.24									
66		A-11γ/S	Κύλινδρος	150.40	299.88	12.698	2,383.47									

67		A-12α/C	Κύβος	-	-	8.152	2.415.41										
68		A-12β/C	Κύβος	-	-	8.173	2.421.63										
69		A-12γ/C	Κύβος	-	-	8.165	2.419.26										
70		A-12α/S	Κύλινδρος	150.25	301.00	12.686	2.377.06										
71		A-12β/S	Κύλινδρος	150.60	302.00	12.808	2.380.86										
72		A-12γ/S	Κύλινδρος	150.00	299.13	12.566	2.377.23										
73		A-13α/C	Κύβος	-	-	8.106	2.401.78										
74		A-13β/C	Κύβος	-	-	8.201	2.429.93										
75		A-13γ/C	Κύβος	-	-	8.093	2.397.93										
76		A-13α/S	Κύλινδρος	150.15	300.50	12.648	2.377.04										
77		A-13β/S	Κύλινδρος	150.70	301.00	12.725	2.370.14										
78		A-13γ/S	Κύλινδρος	150.30	298.88	12.536	2.364.08										
79		A-14α/C	Κύβος	-	-	8.244	2.442.67										
80		A-14β/C	Κύβος	-	-	8.266	2.449.19										
81		A-14γ/C	Κύβος	-	-	8.255	2.445.93										
82		A-14α/S	Κύλινδρος	150.80	302.75	12.893	2.384.39										
83		A-14β/S	Κύλινδρος	150.35	302.50	12.819	2.386.89										
84		A-14γ/S	Κύλινδρος	150.05	300.75	12.711	2.390.08										
85		A-15α/C	Κύβος	-	-	8.203	2.430.52										
86		A-15β/C	Κύβος	-	-	8.211	2.432.89										
87		A-15γ/C	Κύβος	-	-	8.193	2.427.56										
88		A-15α/S	Κύλινδρος	150.50	302.00	12.889	2.399.11										
89		A-15β/S	Κύλινδρος	149.55	299.13	12.732	2.423.16										
90		A-15γ/S	Κύλινδρος	149.85	301.63	12.866	2.418.65										
91		A-16α/C	Κύβος	-	-	8.241	2.441.78										
92		A-16β/C	Κύβος	-	-	8.22	2.435.56										
93		A-16γ/C	Κύβος	-	-	8.281	2.453.63										
94		A-16α/S	Κύλινδρος	150.55	302.00	12.774	2.376.12										
95		A-16β/S	Κύλινδρος	150.40	302.00	12.778	2.381.61										
96		A-16γ/S	Κύλινδρος	150.10	300.00	12.634	2.379.95										
97		A-17α/C	Κύβος	-	-	8.286	2.455.11										
98		A-17β/C	Κύβος	-	-	8.292	2.456.89										
99		A-17γ/C	Κύβος	-	-	8.283	2.454.22										
100		A-17α/S	Κύλινδρος	150.40	302.63	12.86	2.391.90										
101		A-17β/S	Κύλινδρος	150.10	300.75	12.689	2.384.35										
102		A-17γ/S	Κύλινδρος	150.50	301.25	12.792	2.386.98										
103		A-18α/C	Κύβος	-	-	8.249	2.444.15										
104		A-18β/C	Κύβος	-	-	8.321	2.465.48										
105		A-18γ/C	Κύβος	-	-	8.258	2.446.81										
106		A-18α/S	Κύλινδρος	150.75	301.75	12.777	2.372.34										
107		A-18β/S	Κύλινδρος	150.20	299.00	12.641	2.386.06										
108		A-18γ/S	Κύλινδρος	150.60	301.50	12.802	2.383.69										
109		B-1α/C	Κύβος	-	-	-	-										
110		B-1β/C	Κύβος	-	-	-	-										
111		B-1γ/C	Κύβος	-	-	-	-										
112		B-1α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
113		B-1β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
114		B-1γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
115		B-2α/C	Κύβος	-	-	-	-										
116		B-2β/C	Κύβος	-	-	-	-										
117		B-2γ/C	Κύβος	-	-	-	-										
118		B-2α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
119		B-2β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
120		B-2γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
121		B-3α/C	Κύβος	-	-	-	-										
122		B-3β/C	Κύβος	-	-	-	-										
123		B-3γ/C	Κύβος	-	-	-	-										
124		B-3α/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
125		B-3β/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
126		B-3γ/S	Κύλινδρος	-	-	-	-										
127		B-4α/C	Κύβος	-	-	-	-										
128		B-4β/C	Κύβος	-	-	-	-										
129		B-4γ/C	Κύβος	-	-	-	-										
130		B-4α/S	Κύλινδρος	149.00	298.00	-	-										
131		B-4β/S	Κύλινδρος	150.10	298.00	-	-										
132		B-4γ/S	Κύλινδρος	150.05	300.00	-	-										
133		B-5α/C	Κύβος	-	-	8.092	2.397.63										
134		B-5β/C	Κύβος	-	-	8.095	2.398.52										
135		B-5γ/C	Κύβος	-	-	8.089	2.396.74										
136		B-5α/S	Κύλινδρος	150.05	298.00	12.650	2.400.56										
137		B-5β/S	Κύλινδρος	149.85	298.67	12.573	2.386.95										
138		B-5γ/S	Κύλινδρος	150.00	299.17	12.588	2.381.04										
139		B-6α/C	Κύβος	-	-	8.089	2.396.74										
140		B-6β/C	Κύβος	-	-	8.069	2.390.81										
141		B-6γ/C	Κύβος	-	-	8.108	2.402.37										
142		B-6α/S	Κύλινδρος	149.88	297.63	12.621	2.403.68										
143		B-6β/S	Κύλινδρος	150.05	298.88	12.661	2.395.61										
144		B-6γ/S	Κύλινδρος	150.05	297.88	12.615	2.394.92										
145		B-7α/C	Κύβος	-	-	8.027	2.378.37										
146		B-7β/C	Κύβος	-	-	8.061	2.388.44										
147		B-7γ/C	Κύβος	-	-	8.072	2.391.70										
148		B-7α/S	Κύλινδρος	149.85	300.00	12.740	2.407.94										
149		B-7β/S	Κύλινδρος	149.68	299.50	12.688	2.407.73										
150		B-7γ/S	Κύλινδρος	149.75	299.25	12.716	2.412.64										

319		Γ-12α/C	Κύβος	-	-	7.982	2,365.04									
320		Γ-12β/C	Κύβος	-	-	8.038	2,381.63									
321	Γ	Γ-12γ/C	Κύβος	-	-	7.916	2,345.48	22-04-2019	20-05-2019	C30/37	XS2	S3	150	14	19	31.5
322		Γ-12α/S	Κύλινδρος	150.05	300.50	12.787	2,406.37									
323		Γ-12β/S	Κύλινδρος	150.05	300.00	12.756	2,404.54									
324		Γ-12γ/S	Κύλινδρος	151.40	300.25	12.681	3,757.33									
325		Γ-13α/C	Κύβος	-	-	8.14	2,411.85									
326	Γ	Γ-13β/C	Κύβος	-	-	8.149	2,414.52	23-04-2019	21-05-2019	C35/45	XS3	S4	220	15	19	31.5
327		Γ-13γ/C	Κύβος	-	-	8.229	2,438.22									
328		Γ-13α/S	Κύλινδρος	150.65	301.75	12.959	2,409.33									
329		Γ-13β/S	Κύλινδρος	150.70	301.50	12.67	2,355.99									
330		Γ-13γ/S	Κύλινδρος	150.20	301.50	12.952	3,837.63									
331	Γ	Γ-14α/C	Κύβος	-	-	8.136	2,410.67	06-05-2019	03-06-2019	C35/45	XS3	S4	170	19	23	31.5
332		Γ-14β/C	Κύβος	-	-	8.162	2,418.37									
333		Γ-14γ/C	Κύβος	-	-	8.187	2,425.78									
334		Γ-14α/S	Κύλινδρος	149.80	301.50	12.885	2,424.84									
335		Γ-14β/S	Κύλινδρος	150.60	300.00	12.795	2,394.30									
336		Γ-14γ/S	Κύλινδρος	149.90	300.50	12.806	3,794.37									

Παράρτημα Γ

Παρουσιάζεται η διαδικασία προσδιορισμού του συνολικού σφάλματος ΙΑΕ (%) για κάθε εξίσωση παλινδρόμησης, τόσο για τις μέσες τιμές, όσο και για τις αξιόπιστες τιμές αντοχών.

Μέσες τιμές								
Γραμμική Εξίσωση								
$O_i = f_{ct,sp}$	f_c	$P_i = f'_{ct,sp}$	$O_i - P_i$	$(O_i - P_i)^2$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2}$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \sum O_i$	a	b
5.14	70.34	5.07	0.07	0.00	0.071	0.0004	0.0558	1.1445
3.83	42.64	3.52	0.31	0.09	0.306	0.0016		
4.12	45.32	3.67	0.45	0.20	0.447	0.0024		
3.66	38.10	3.27	0.39	0.15	0.390	0.0021		
2.58	24.13	2.49	0.09	0.01	0.089	0.0005		
3.74	37.48	3.24	0.50	0.25	0.504	0.0027		
2.15	22.87	2.42	-0.27	0.07	0.271	0.0014		
3.11	34.29	3.06	0.05	0.00	0.052	0.0003		
3.60	36.43	3.18	0.42	0.18	0.423	0.0022		
2.63	27.33	2.67	-0.04	0.00	0.040	0.0002		
4.34	56.60	4.30	0.04	0.00	0.037	0.0002		
3.03	31.47	2.90	0.13	0.02	0.129	0.0007		
3.15	33.26	3.00	0.15	0.02	0.150	0.0008		
2.10	24.09	2.49	-0.39	0.15	0.389	0.0021		
3.73	37.20	3.22	0.51	0.26	0.510	0.0027		
4.31	69.11	5.00	-0.69	0.48	0.691	0.0036		
3.92	41.76	3.47	0.45	0.20	0.445	0.0024		
3.40	33.00	2.99	0.41	0.17	0.414	0.0022		
3.97	44.98	3.65	0.32	0.10	0.316	0.0017		
3.11	36.09	3.16	-0.05	0.00	0.048	0.0003		
4.77	60.48	4.52	0.25	0.06	0.251	0.0013		
3.63	31.86	2.92	0.71	0.50	0.708	0.0037		
5.11	71.41	5.13	-0.02	0.00	0.019	0.0001		
3.15	31.50	2.90	0.25	0.06	0.248	0.0013		
3.85	39.10	3.33	0.52	0.27	0.524	0.0028		
3.68	40.52	3.41	0.27	0.08	0.274	0.0014		
4.38	51.63	4.03	0.35	0.13	0.355	0.0019		
4.62	70.36	5.07	-0.45	0.20	0.451	0.0024		
3.16	32.95	2.98	0.18	0.03	0.177	0.0009		
4.52	67.71	4.92	-0.40	0.16	0.403	0.0021		
3.63	36.12	3.16	0.47	0.22	0.470	0.0025		
5.99	72.17	5.17	0.82	0.67	0.818	0.0043		
3.21	37.75	3.25	-0.04	0.00	0.041	0.0002		
2.52	29.84	2.81	-0.29	0.08	0.290	0.0015		
3.31	37.23	3.22	0.09	0.01	0.088	0.0005		
4.18	63.92	4.71	-0.53	0.28	0.531	0.0028		
1.99	40.06	3.38	-1.39	1.93	1.390	0.0073		
3.64	48.67	3.86	-0.22	0.05	0.220	0.0012		
3.83	27.75	2.69	1.14	1.29	1.137	0.0060		
4.34	41.81	3.48	0.86	0.74	0.863	0.0046		
4.28	61.58	4.58	-0.30	0.09	0.301	0.0016		

3.12	41.07	3.44	-0.32	0.10	0.316	0.0017		
2.35	24.39	2.51	-0.16	0.02	0.155	0.0008		
2.70	33.04	2.99	-0.28	0.08	0.284	0.0015		
2.45	23.93	2.48	-0.03	0.00	0.031	0.0002		
3.04	38.97	3.32	-0.28	0.08	0.276	0.0015		
2.64	33.53	3.02	-0.38	0.14	0.375	0.0020		
2.44	26.94	2.65	-0.21	0.04	0.206	0.0011		
2.80	28.58	2.74	0.06	0.00	0.061	0.0003		
2.13	21.67	2.35	-0.23	0.05	0.227	0.0012		
1.06	11.72	1.80	-0.73	0.54	0.734	0.0039		
3.25	44.27	3.61	-0.36	0.13	0.362	0.0019		
4.07	61.56	4.58	-0.51	0.26	0.509	0.0027		
2.62	29.68	2.80	-0.18	0.03	0.179	0.0009		
3.25	47.28	3.78	-0.53	0.28	0.533	0.0028		
Σ Oi						Σ [(Oi - Pi)²]/ Σ Oi		
189.34						0.1031		
						IAE %		
						10.31		

Μέσες τιμές								
Εκθετική Εξίσωση								
$O_i = f_{ct,sp}$	f_c	$P_i = f'_{ct,sp}$	$O_i - P_i$	$(O_i - P_i)^2$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2}$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \Sigma O_i$	a	b
5.14	70.34	5.14	0.00	0.00	0.001	0.0000	0.2299	0.7305
3.83	42.64	3.57	0.26	0.07	0.265	0.0014		
4.12	45.32	3.73	0.39	0.15	0.392	0.0021		
3.66	38.10	3.28	0.38	0.14	0.376	0.0020		
2.58	24.13	2.35	0.23	0.05	0.228	0.0012		
3.74	37.48	3.24	0.50	0.25	0.495	0.0026		
2.15	22.87	2.26	-0.11	0.01	0.112	0.0006		
3.11	34.29	3.04	0.07	0.00	0.069	0.0004		
3.60	36.43	3.18	0.42	0.18	0.422	0.0022		
2.63	27.33	2.58	0.05	0.00	0.054	0.0003		
4.34	56.60	4.39	-0.05	0.00	0.045	0.0002		
3.03	31.47	2.86	0.17	0.03	0.174	0.0009		
3.15	33.26	2.97	0.18	0.03	0.176	0.0009		
2.10	24.09	2.35	-0.25	0.06	0.249	0.0013		
3.73	37.20	3.23	0.50	0.25	0.503	0.0027		
4.31	69.11	5.07	-0.76	0.58	0.764	0.0040		
3.92	41.76	3.51	0.41	0.17	0.408	0.0022		
3.40	33.00	2.96	0.44	0.20	0.443	0.0023		
3.97	44.98	3.71	0.26	0.07	0.263	0.0014		
3.11	36.09	3.16	-0.05	0.00	0.047	0.0002		
4.77	60.48	4.60	0.17	0.03	0.167	0.0009		
3.63	31.86	2.88	0.75	0.56	0.748	0.0040		
5.11	71.41	5.20	-0.09	0.01	0.086	0.0005		
3.15	31.50	2.86	0.29	0.09	0.292	0.0015		
3.85	39.10	3.35	0.50	0.25	0.503	0.0027		

3.68	40.52	3.44	0.24	0.06	0.245	0.0013		
4.38	51.63	4.10	0.28	0.08	0.280	0.0015		
4.62	70.36	5.14	-0.52	0.27	0.521	0.0027		
3.16	32.95	2.95	0.21	0.04	0.207	0.0011		
4.52	67.71	5.00	-0.48	0.23	0.478	0.0025		
3.63	36.12	3.16	0.47	0.22	0.472	0.0025		
5.99	72.17	5.24	0.75	0.57	0.753	0.0040		
3.21	37.75	3.26	-0.05	0.00	0.052	0.0003		
2.52	29.84	2.75	-0.23	0.05	0.227	0.0012		
3.31	37.23	3.23	0.08	0.01	0.081	0.0004		
4.18	63.92	4.79	-0.61	0.38	0.612	0.0032		
1.99	40.06	3.41	-1.42	2.01	1.417	0.0075		
3.64	48.67	3.93	-0.29	0.08	0.287	0.0015		
3.83	27.75	2.61	1.22	1.50	1.225	0.0065		
4.34	41.81	3.51	0.83	0.68	0.825	0.0044		
4.28	61.58	4.66	-0.38	0.15	0.384	0.0020		
3.12	41.07	3.47	-0.35	0.12	0.349	0.0018		
2.35	24.39	2.37	-0.02	0.00	0.021	0.0001		
2.70	33.04	2.96	-0.26	0.07	0.255	0.0013		
2.45	23.93	2.34	0.11	0.01	0.111	0.0006		
3.04	38.97	3.34	-0.30	0.09	0.296	0.0016		
2.64	33.53	2.99	-0.35	0.12	0.351	0.0019		
2.44	26.94	2.55	-0.11	0.01	0.108	0.0006		
2.80	28.58	2.66	0.14	0.02	0.139	0.0007		
2.13	21.67	2.17	-0.05	0.00	0.048	0.0003		
1.06	11.72	1.39	-0.32	0.10	0.324	0.0017		
3.25	44.27	3.66	-0.41	0.17	0.412	0.0022		
4.07	61.56	4.66	-0.59	0.35	0.592	0.0031		
2.62	29.68	2.74	-0.11	0.01	0.115	0.0006		
3.25	47.28	3.84	-0.59	0.35	0.595	0.0031		
ΣO_i						$\Sigma [(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \Sigma O_i$		
189.34						0.1007		
						IAE %		
						10.07		

Μέσες τιμές									
Πολυωνυμική Εξίσωση									
$O_i = f_{ct,sp}$	f_c	$P_i = f'_{ct,sp}$	$O_i - P_i$	$(O_i - P_i)^2$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2}$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \Sigma O_i$	a	b	c
5.14	70.34	5.04	0.10	0.01	0.099	0.0005	-0.0005	0.1048	0.1434
3.83	42.64	3.70	0.13	0.02	0.127	0.0007			
4.12	45.32	3.87	0.25	0.06	0.254	0.0013			
3.66	38.10	3.41	0.25	0.06	0.250	0.0013			
2.58	24.13	2.38	0.20	0.04	0.199	0.0011			
3.74	37.48	3.37	0.37	0.14	0.371	0.0020			
2.15	22.87	2.28	-0.13	0.02	0.129	0.0007			
3.11	34.29	3.15	-0.04	0.00	0.039	0.0002			
3.60	36.43	3.30	0.30	0.09	0.302	0.0016			
2.63	27.33	2.63	0.00	0.00	0.004	0.0000			
4.34	56.60	4.47	-0.13	0.02	0.133	0.0007			
3.03	31.47	2.95	0.08	0.01	0.084	0.0004			
3.15	33.26	3.08	0.07	0.01	0.074	0.0004			
2.10	24.09	2.38	-0.28	0.08	0.278	0.0015			
3.73	37.20	3.35	0.38	0.14	0.380	0.0020			
4.31	69.11	5.00	-0.69	0.47	0.688	0.0036			
3.92	41.76	3.65	0.27	0.07	0.272	0.0014			
3.40	33.00	3.06	0.34	0.12	0.343	0.0018			
3.97	44.98	3.85	0.12	0.02	0.124	0.0007			
3.11	36.09	3.27	-0.16	0.03	0.164	0.0009			
4.77	60.48	4.65	0.12	0.01	0.117	0.0006			
3.63	31.86	2.97	0.66	0.43	0.655	0.0035			
5.11	71.41	5.08	0.03	0.00	0.033	0.0002			
3.15	31.50	2.95	0.20	0.04	0.202	0.0011			
3.85	39.10	3.48	0.37	0.14	0.373	0.0020			
3.68	40.52	3.57	0.11	0.01	0.111	0.0006			
4.38	51.63	4.22	0.16	0.03	0.159	0.0008			
4.62	70.36	5.04	-0.42	0.18	0.422	0.0022			
3.16	32.95	3.05	0.11	0.01	0.106	0.0006			
4.52	67.71	4.95	-0.43	0.18	0.427	0.0023			
3.63	36.12	3.28	0.35	0.12	0.354	0.0019			
5.99	72.17	5.10	0.89	0.79	0.887	0.0047			
3.21	37.75	3.39	-0.18	0.03	0.177	0.0009			
2.52	29.84	2.83	-0.31	0.09	0.305	0.0016			
3.31	37.23	3.35	-0.04	0.00	0.042	0.0002			
4.18	63.92	4.80	-0.62	0.38	0.619	0.0033			
1.99	40.06	3.54	-1.55	2.40	1.549	0.0082			
3.64	48.67	4.06	-0.42	0.18	0.420	0.0022			
3.83	27.75	2.67	1.16	1.35	1.163	0.0061			
4.34	41.81	3.65	0.69	0.47	0.689	0.0036			
4.28	61.58	4.70	-0.42	0.18	0.421	0.0022			
3.12	41.07	3.60	-0.48	0.23	0.484	0.0026			
2.35	24.39	2.40	-0.05	0.00	0.052	0.0003			
2.70	33.04	3.06	-0.36	0.13	0.356	0.0019			
2.45	23.93	2.37	0.08	0.01	0.084	0.0004			
3.04	38.97	3.47	-0.43	0.18	0.425	0.0022			
2.64	33.53	3.10	-0.46	0.21	0.455	0.0024			
2.44	26.94	2.60	-0.16	0.03	0.162	0.0009			
2.80	28.58	2.73	0.07	0.00	0.071	0.0004			
2.13	21.67	2.18	-0.05	0.00	0.053	0.0003			
1.06	11.72	1.30	-0.24	0.06	0.239	0.0013			
3.25	44.27	3.80	-0.55	0.30	0.550	0.0029			
4.07	61.56	4.70	-0.63	0.40	0.630	0.0033			

2.62	29.68	2.81	-0.19	0.04	0.192	0.0010			
3.25	47.28	3.98	-0.73	0.53	0.731	0.0039			
Σ Oi						Σ [(Oi - Pi)²]/ Σ Oi			
189.34						0.0952			
						IAE %			
						9.52			

Μέσες τιμές									
Πολυωνυμική Εξίσωση (διέλευση από το μηδέν)									
Oi = fct,sp	fc	Pi = f'ct,sp	Oi - Pi	(Oi - Pi) ²	[(Oi - Pi) ²] ^½	[(Oi - Pi) ²] ^½ / Σ Oi	a	b	c
5.14	70.34	4.73	0.41	0.17	0.408	0.0022	-0.0006	0.1086	0.062
3.83	42.64	3.60	0.23	0.05	0.228	0.0012			
4.12	45.32	3.75	0.37	0.14	0.369	0.0019			
3.66	38.10	3.33	0.33	0.11	0.331	0.0017			
2.58	24.13	2.33	0.25	0.06	0.247	0.0013			
3.74	37.48	3.29	0.45	0.20	0.451	0.0024			
2.15	22.87	2.23	-0.08	0.01	0.082	0.0004			
3.11	34.29	3.08	0.03	0.00	0.030	0.0002			
3.60	36.43	3.22	0.38	0.14	0.378	0.0020			
2.63	27.33	2.58	0.05	0.00	0.048	0.0003			
4.34	56.60	4.29	0.05	0.00	0.053	0.0003			
3.03	31.47	2.89	0.14	0.02	0.145	0.0008			
3.15	33.26	3.01	0.14	0.02	0.140	0.0007			
2.10	24.09	2.33	-0.23	0.05	0.230	0.0012			
3.73	37.20	3.27	0.46	0.21	0.458	0.0024			
4.31	69.11	4.70	-0.39	0.15	0.392	0.0021			
3.92	41.76	3.55	0.37	0.14	0.369	0.0019			
3.40	33.00	2.99	0.41	0.17	0.408	0.0022			
3.97	44.98	3.73	0.24	0.06	0.237	0.0013			
3.11	36.09	3.20	-0.09	0.01	0.090	0.0005			
4.77	60.48	4.44	0.33	0.11	0.335	0.0018			
3.63	31.86	2.91	0.72	0.51	0.717	0.0038			
5.11	71.41	4.76	0.35	0.12	0.353	0.0019			
3.15	31.50	2.89	0.26	0.07	0.262	0.0014			
3.85	39.10	3.39	0.46	0.21	0.459	0.0024			
3.68	40.52	3.48	0.20	0.04	0.203	0.0011			
4.38	51.63	4.07	0.31	0.10	0.310	0.0016			
4.62	70.36	4.73	-0.11	0.01	0.113	0.0006			
3.16	32.95	2.99	0.17	0.03	0.171	0.0009			
4.52	67.71	4.66	-0.14	0.02	0.145	0.0008			
3.63	36.12	3.20	0.43	0.18	0.428	0.0023			
5.99	72.17	4.77	1.22	1.48	1.215	0.0064			
3.21	37.75	3.31	-0.10	0.01	0.097	0.0005			
2.52	29.84	2.77	-0.25	0.06	0.248	0.0013			
3.31	37.23	3.27	0.04	0.00	0.036	0.0002			
4.18	63.92	4.55	-0.37	0.14	0.372	0.0020			
1.99	40.06	3.45	-1.46	2.13	1.460	0.0077			
3.64	48.67	3.93	-0.29	0.08	0.286	0.0015			
3.83	27.75	2.61	1.22	1.48	1.216	0.0064			
4.34	41.81	3.55	0.79	0.62	0.786	0.0042			
4.28	61.58	4.47	-0.19	0.04	0.194	0.0010			
3.12	41.07	3.51	-0.39	0.15	0.390	0.0021			

2.35	24.39	2.35	0.00	0.00	0.004	0.0000			
2.70	33.04	3.00	-0.29	0.08	0.291	0.0015			
2.45	23.93	2.32	0.13	0.02	0.131	0.0007			
3.04	38.97	3.38	-0.34	0.12	0.340	0.0018			
2.64	33.53	3.03	-0.39	0.15	0.389	0.0021			
2.44	26.94	2.55	-0.11	0.01	0.110	0.0006			
2.80	28.58	2.68	0.12	0.02	0.125	0.0007			
2.13	21.67	2.13	-0.01	0.00	0.007	0.0000			
1.06	11.72	1.25	-0.19	0.04	0.188	0.0010			
3.25	44.27	3.69	-0.44	0.19	0.441	0.0023			
4.07	61.56	4.47	-0.40	0.16	0.403	0.0021			
2.62	29.68	2.76	-0.13	0.02	0.135	0.0007			
3.25	47.28	3.86	-0.61	0.37	0.605	0.0032			
ΣO_i						$\Sigma [(O_i - P_i)^2] / \Sigma O_i$			
189.34						0.0954			
						IAE %			
						9.54			

Μέσες τιμές								
Λογαριθμική Εξίσωση								
O _i = fct,sp	fc	P _i = f'ct,sp	O _i - P _i	(O _i - P _i) ²	[(O _i - P _i) ²]/%	[(O _i - P _i) ²]/Σ O _i	a	b
5.14	70.34	4.81	0.33	0.11	0.332	0.0018	2.282	-4.8978
3.83	42.64	3.67	0.16	0.03	0.164	0.0009		
4.12	45.32	3.81	0.31	0.10	0.315	0.0017		
3.66	38.10	3.41	0.25	0.06	0.251	0.0013		
2.58	24.13	2.37	0.21	0.05	0.213	0.0011		
3.74	37.48	3.37	0.37	0.14	0.368	0.0019		
2.15	22.87	2.24	-0.09	0.01	0.094	0.0005		
3.11	34.29	3.17	-0.06	0.00	0.059	0.0003		
3.60	36.43	3.31	0.29	0.09	0.293	0.0015		
2.63	27.33	2.65	-0.02	0.00	0.021	0.0001		
4.34	56.60	4.31	0.03	0.00	0.028	0.0001		
3.03	31.47	2.97	0.06	0.00	0.057	0.0003		
3.15	33.26	3.10	0.05	0.00	0.051	0.0003		
2.10	24.09	2.36	-0.26	0.07	0.263	0.0014		
3.73	37.20	3.35	0.38	0.14	0.375	0.0020		
4.31	69.11	4.77	-0.46	0.21	0.458	0.0024		
3.92	41.76	3.62	0.30	0.09	0.302	0.0016		
3.40	33.00	3.08	0.32	0.10	0.319	0.0017		
3.97	44.98	3.79	0.18	0.03	0.182	0.0010		
3.11	36.09	3.29	-0.18	0.03	0.175	0.0009		
4.77	60.48	4.46	0.31	0.09	0.306	0.0016		
3.63	31.86	3.00	0.63	0.40	0.629	0.0033		
5.11	71.41	4.84	0.27	0.07	0.267	0.0014		
3.15	31.50	2.98	0.17	0.03	0.175	0.0009		
3.85	39.10	3.47	0.38	0.15	0.382	0.0020		
3.68	40.52	3.55	0.13	0.02	0.130	0.0007		
4.38	51.63	4.10	0.28	0.08	0.277	0.0015		
4.62	70.36	4.81	-0.19	0.04	0.189	0.0010		
3.16	32.95	3.08	0.08	0.01	0.082	0.0004		
4.52	67.71	4.72	-0.20	0.04	0.201	0.0011		
3.63	36.12	3.29	0.34	0.12	0.343	0.0018		
5.99	72.17	4.87	1.12	1.26	1.123	0.0059		
3.21	37.75	3.39	-0.18	0.03	0.178	0.0009		
2.52	29.84	2.85	-0.33	0.11	0.332	0.0018		
3.31	37.23	3.36	-0.05	0.00	0.046	0.0002		
4.18	63.92	4.59	-0.41	0.17	0.410	0.0022		
1.99	40.06	3.52	-1.53	2.35	1.534	0.0081		
3.64	48.67	3.97	-0.33	0.11	0.328	0.0017		
3.83	27.75	2.69	1.14	1.31	1.144	0.0060		
4.34	41.81	3.62	0.72	0.52	0.719	0.0038		
4.28	61.58	4.50	-0.22	0.05	0.225	0.0012		
3.12	41.07	3.58	-0.46	0.21	0.460	0.0024		
2.35	24.39	2.39	-0.04	0.00	0.041	0.0002		
2.70	33.04	3.08	-0.38	0.14	0.380	0.0020		
2.45	23.93	2.35	0.10	0.01	0.101	0.0005		
3.04	38.97	3.46	-0.42	0.17	0.418	0.0022		
2.64	33.53	3.12	-0.48	0.23	0.477	0.0025		
2.44	26.94	2.62	-0.18	0.03	0.176	0.0009		
2.80	28.58	2.75	0.05	0.00	0.048	0.0003		
2.13	21.67	2.12	0.01	0.00	0.005	0.0000		

1.06	11.72	0.72	0.35	0.12	0.345	0.0018		
3.25	44.27	3.75	-0.50	0.25	0.499	0.0026		
4.07	61.56	4.50	-0.43	0.19	0.434	0.0023		
2.62	29.68	2.84	-0.22	0.05	0.217	0.0011		
3.25	47.28	3.90	-0.65	0.42	0.652	0.0034		
Σ Oi						Σ [(Oi - Pi)²]^{1/2} / Σ Oi		
189.34						0.0929		
						IAE %		
						9.29		

Αξιόπιστα Δείγματα									
Γραμμική Εξίσωση									
O _i = fct,sp	fc	P _i = f'ct,sp	O _i - P _i	(O _i - P _i) ²	[(O _i - P _i) ²] ^½	[(O _i - P _i) ²] ^½ / Σ O _i	a	b	
5.03	72.12	5.17	-0.14	0.02	0.145	0.0003	0.056	1.1341	
5.26	71.72	5.15	0.10	0.01	0.105	0.0002			
3.84	41.96	3.48	0.35	0.13	0.354	0.0008			
4.10	43.05	3.55	0.55	0.30	0.552	0.0012			
3.56	42.92	3.54	0.03	0.00	0.025	0.0001			
3.87	44.34	3.62	0.25	0.06	0.250	0.0005			
4.04	46.29	3.73	0.31	0.10	0.314	0.0007			
3.68	38.34	3.28	0.40	0.16	0.401	0.0009			
3.64	37.77	3.25	0.39	0.15	0.394	0.0009			
3.67	38.18	3.27	0.39	0.16	0.395	0.0009			
2.51	24.04	2.48	0.03	0.00	0.027	0.0001			
2.48	24.24	2.49	-0.01	0.00	0.008	0.0000			
2.73	24.12	2.48	0.25	0.06	0.249	0.0005			
3.81	37.07	3.21	0.60	0.36	0.596	0.0013			
3.70	37.69	3.24	0.45	0.21	0.454	0.0010			
3.71	37.69	3.24	0.46	0.21	0.461	0.0010			
2.21	22.24	2.38	-0.17	0.03	0.174	0.0004			
2.13	22.39	2.39	-0.26	0.07	0.259	0.0006			
2.11	23.96	2.48	-0.37	0.14	0.369	0.0008			
3.18	33.68	3.02	0.16	0.03	0.164	0.0004			
3.10	33.83	3.03	0.07	0.00	0.067	0.0001			
3.69	36.64	3.19	0.51	0.26	0.507	0.0011			
3.50	36.44	3.17	0.33	0.11	0.325	0.0007			
3.05	36.21	3.16	-0.11	0.01	0.115	0.0003			
2.58	26.65	2.63	-0.05	0.00	0.048	0.0001			
2.80	28.27	2.72	0.08	0.01	0.082	0.0002			
2.52	27.06	2.65	-0.12	0.02	0.125	0.0003			
4.20	56.92	4.32	-0.12	0.01	0.118	0.0003			
4.48	56.28	4.29	0.19	0.04	0.191	0.0004			
3.06	30.76	2.86	0.21	0.04	0.208	0.0005			
2.89	32.04	2.93	-0.03	0.00	0.035	0.0001			
3.13	31.62	2.91	0.23	0.05	0.228	0.0005			
3.16	32.96	2.98	0.18	0.03	0.184	0.0004			
3.25	32.61	2.96	0.29	0.08	0.288	0.0006			
3.04	34.20	3.05	0.00	0.00	0.005	0.0000			
2.21	23.70	2.46	-0.25	0.06	0.253	0.0006			
1.99	23.81	2.47	-0.48	0.23	0.479	0.0010			
3.64	37.32	3.22	0.42	0.17	0.417	0.0009			
3.83	37.38	3.23	0.60	0.36	0.601	0.0013			
4.34	69.62	5.03	-0.70	0.48	0.696	0.0015			
4.28	69.73	5.04	-0.76	0.57	0.757	0.0017			
3.94	41.88	3.48	0.46	0.22	0.465	0.0010			
3.89	41.64	3.47	0.42	0.18	0.424	0.0009			
3.27	33.02	2.98	0.28	0.08	0.284	0.0006			
3.53	33.09	2.99	0.55	0.30	0.547	0.0012			
3.88	44.97	3.65	0.23	0.05	0.229	0.0005			
3.81	44.52	3.63	0.19	0.03	0.186	0.0004			

4.13	45.44	3.68	0.45	0.20	0.453	0.0010		
3.32	36.94	3.20	0.12	0.01	0.121	0.0003		
2.99	36.43	3.17	-0.18	0.03	0.180	0.0004		
3.02	34.91	3.09	-0.07	0.00	0.066	0.0001		
4.64	60.68	4.53	0.11	0.01	0.105	0.0002		
4.89	60.28	4.51	0.38	0.15	0.385	0.0008		
3.70	33.31	3.00	0.70	0.49	0.700	0.0015		
3.55	31.88	2.92	0.63	0.40	0.634	0.0014		
5.12	69.20	5.01	0.12	0.01	0.115	0.0003		
5.09	73.61	5.26	-0.17	0.03	0.168	0.0004		
3.23	30.84	2.86	0.37	0.14	0.373	0.0008		
3.07	31.49	2.90	0.17	0.03	0.169	0.0004		
3.88	38.16	3.27	0.61	0.38	0.613	0.0013		
3.62	41.12	3.44	0.19	0.03	0.185	0.0004		
4.03	38.02	3.26	0.77	0.59	0.771	0.0017		
3.74	39.48	3.34	0.40	0.16	0.400	0.0009		
3.88	41.57	3.46	0.42	0.17	0.417	0.0009		
4.53	51.91	4.04	0.49	0.24	0.486	0.0011		
4.23	52.85	4.09	0.13	0.02	0.134	0.0003		
4.71	69.55	5.03	-0.31	0.10	0.314	0.0007		
4.70	71.18	5.12	-0.42	0.18	0.419	0.0009		
3.11	33.02	2.98	0.13	0.02	0.130	0.0003		
3.21	33.24	3.00	0.22	0.05	0.217	0.0005		
4.58	67.99	4.94	-0.36	0.13	0.364	0.0008		
4.47	68.32	4.96	-0.50	0.25	0.495	0.0011		
3.50	36.13	3.16	0.34	0.11	0.338	0.0007		
3.78	36.08	3.15	0.62	0.39	0.624	0.0014		
3.62	36.15	3.16	0.46	0.21	0.463	0.0010		
5.78	70.98	5.11	0.67	0.45	0.668	0.0015		
6.21	72.16	5.17	1.03	1.07	1.032	0.0023		
3.30	38.96	3.32	-0.02	0.00	0.016	0.0000		
3.36	36.41	3.17	0.19	0.03	0.185	0.0004		
2.98	37.87	3.25	-0.27	0.08	0.275	0.0006		
2.35	29.18	2.77	-0.42	0.17	0.416	0.0009		
2.70	31.27	2.89	-0.18	0.03	0.185	0.0004		
2.50	29.08	2.76	-0.27	0.07	0.265	0.0006		
3.43	38.41	3.28	0.15	0.02	0.148	0.0003		
3.17	35.73	3.13	0.04	0.00	0.038	0.0001		
3.33	37.57	3.24	0.09	0.01	0.091	0.0002		
4.37	63.09	4.67	-0.30	0.09	0.301	0.0007		
3.95	64.38	4.74	-0.78	0.62	0.785	0.0017		
4.21	64.28	4.73	-0.52	0.27	0.522	0.0011		
3.19	39.2	3.33	-0.14	0.02	0.138	0.0003		
3.63	40.8	3.42	0.21	0.04	0.211	0.0005		
2.93	40.2	3.39	-0.46	0.21	0.455	0.0010		
3.50	47.60	3.80	-0.30	0.09	0.302	0.0007		
3.51	49.53	3.91	-0.40	0.16	0.398	0.0009		
3.54	48.87	3.87	-0.33	0.11	0.331	0.0007		
2.57	27.49	2.67	-0.10	0.01	0.100	0.0002		
2.29	27.99	2.70	-0.41	0.17	0.407	0.0009		

2.46	27.77	2.69	-0.23	0.05	0.234	0.0005		
3.40	41.99	3.49	-0.08	0.01	0.082	0.0002		
3.19	41.63	3.47	-0.27	0.07	0.274	0.0006		
4.79	60.51	4.52	0.26	0.07	0.264	0.0006		
4.67	60.81	4.54	0.13	0.02	0.128	0.0003		
3.22	42.17	3.50	-0.27	0.08	0.274	0.0006		
3.01	39.92	3.37	-0.36	0.13	0.364	0.0008		
3.13	41.13	3.44	-0.31	0.10	0.311	0.0007		
2.20	24.58	2.51	-0.31	0.10	0.312	0.0007		
2.39	24.35	2.50	-0.10	0.01	0.104	0.0002		
2.46	24.25	2.49	-0.03	0.00	0.035	0.0001		
2.61	32.79	2.97	-0.36	0.13	0.357	0.0008		
2.79	32.73	2.97	-0.17	0.03	0.172	0.0004		
2.64	23.88	2.47	0.17	0.03	0.173	0.0004		
2.60	23.86	2.47	0.13	0.02	0.128	0.0003		
2.90	39.07	3.32	-0.42	0.18	0.423	0.0009		
3.04	37.80	3.25	-0.21	0.04	0.207	0.0005		
3.19	40.04	3.38	-0.19	0.04	0.190	0.0004		
2.72	33.82	3.03	-0.31	0.10	0.311	0.0007		
2.56	33.67	3.02	-0.46	0.21	0.456	0.0010		
2.55	26.97	2.64	-0.10	0.01	0.099	0.0002		
2.34	27.36	2.67	-0.33	0.11	0.328	0.0007		
2.81	28.54	2.73	0.08	0.01	0.082	0.0002		
2.96	28.40	2.72	0.24	0.06	0.236	0.0005		
2.63	28.78	2.75	-0.12	0.01	0.120	0.0003		
2.17	21.36	2.33	-0.16	0.03	0.164	0.0004		
2.17	22.06	2.37	-0.19	0.04	0.195	0.0004		
2.04	21.57	2.34	-0.30	0.09	0.305	0.0007		
1.00	11.76	1.79	-0.80	0.63	0.796	0.0017		
1.12	11.57	1.78	-0.66	0.44	0.664	0.0015		
1.08	11.83	1.80	-0.72	0.52	0.718	0.0016		
3.43	44.24	3.61	-0.18	0.03	0.178	0.0004		
3.07	42.99	3.54	-0.47	0.22	0.469	0.0010		
4.32	61.26	4.56	-0.24	0.06	0.240	0.0005		
3.82	60.97	4.55	-0.73	0.54	0.732	0.0016		
2.73	29.38	2.78	-0.05	0.00	0.047	0.0001		
2.51	29.32	2.78	-0.27	0.07	0.266	0.0006		
3.28	47.98	3.82	-0.54	0.29	0.543	0.0012		
3.21	48.61	3.86	-0.64	0.41	0.643	0.0014		
ΣO_i						$\Sigma [(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \Sigma O_i$		
456.69						0.0926		
						IAE %		
						9.26		

Αξιόπιστα Δείγματα								
Εκθετική Εξίσωση								
$O_i = fct, sp$	fc	$P_i = f'ct, sp$	$O_i - P_i$	$(O_i - P_i)^2$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2}$	$[(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \sum O_i$	a	b
5.03	72.12	5.26	-0.23	0.05	0.229	0.0005	0.224	0.7376
5.26	71.72	5.24	0.02	0.00	0.020	0.0000		
3.84	41.96	3.53	0.31	0.10	0.312	0.0007		
4.10	43.05	3.59	0.50	0.25	0.504	0.0011		
3.56	42.92	3.59	-0.02	0.00	0.022	0.0000		
3.87	44.34	3.67	0.19	0.04	0.195	0.0004		
4.04	46.29	3.79	0.25	0.06	0.249	0.0005		
3.68	38.34	3.30	0.38	0.15	0.383	0.0008		
3.64	37.77	3.26	0.38	0.14	0.380	0.0008		
3.67	38.18	3.29	0.38	0.14	0.378	0.0008		
2.51	24.04	2.34	0.17	0.03	0.169	0.0004		
2.48	24.24	2.35	0.13	0.02	0.132	0.0003		
2.73	24.12	2.34	0.39	0.15	0.391	0.0009		
3.81	37.07	3.22	0.59	0.35	0.588	0.0013		
3.70	37.69	3.26	0.44	0.19	0.441	0.0010		
3.71	37.69	3.26	0.45	0.20	0.449	0.0010		
2.21	22.24	2.21	0.00	0.00	0.002	0.0000		
2.13	22.39	2.22	-0.09	0.01	0.090	0.0002		
2.11	23.96	2.33	-0.23	0.05	0.226	0.0005		
3.18	33.68	3.00	0.19	0.03	0.187	0.0004		
3.10	33.83	3.01	0.09	0.01	0.088	0.0002		
3.69	36.64	3.19	0.50	0.25	0.503	0.0011		
3.50	36.44	3.18	0.32	0.10	0.322	0.0007		
3.05	36.21	3.16	-0.12	0.01	0.115	0.0003		
2.58	26.65	2.52	0.06	0.00	0.056	0.0001		
2.80	28.27	2.63	0.16	0.03	0.164	0.0004		
2.52	27.06	2.55	-0.03	0.00	0.026	0.0001		
4.20	56.92	4.41	-0.21	0.04	0.212	0.0005		
4.48	56.28	4.38	0.10	0.01	0.099	0.0002		
3.06	30.76	2.80	0.26	0.07	0.260	0.0006		
2.89	32.04	2.89	0.00	0.00	0.004	0.0000		
3.13	31.62	2.86	0.27	0.07	0.271	0.0006		
3.16	32.96	2.95	0.21	0.05	0.213	0.0005		
3.25	32.61	2.93	0.32	0.10	0.321	0.0007		
3.04	34.20	3.03	0.01	0.00	0.013	0.0000		
2.21	23.70	2.31	-0.11	0.01	0.105	0.0002		
1.99	23.81	2.32	-0.33	0.11	0.333	0.0007		
3.64	37.32	3.23	0.41	0.17	0.407	0.0009		
3.83	37.38	3.24	0.59	0.35	0.591	0.0013		
4.34	69.62	5.12	-0.79	0.62	0.785	0.0017		
4.28	69.73	5.13	-0.85	0.72	0.847	0.0019		
3.94	41.88	3.52	0.42	0.18	0.424	0.0009		
3.89	41.64	3.51	0.38	0.15	0.384	0.0008		
3.27	33.02	2.95	0.31	0.10	0.312	0.0007		
3.53	33.09	2.96	0.58	0.33	0.575	0.0013		
3.88	44.97	3.71	0.17	0.03	0.171	0.0004		
3.81	44.52	3.68	0.13	0.02	0.130	0.0003		

4.13	45.44	3.74	0.39	0.15	0.392	0.0009		
3.32	36.94	3.21	0.11	0.01	0.114	0.0002		
2.99	36.43	3.18	-0.18	0.03	0.183	0.0004		
3.02	34.91	3.08	-0.06	0.00	0.055	0.0001		
4.64	60.68	4.63	0.01	0.00	0.009	0.0000		
4.89	60.28	4.61	0.29	0.08	0.289	0.0006		
3.70	33.31	2.97	0.73	0.53	0.725	0.0016		
3.55	31.88	2.88	0.67	0.45	0.674	0.0015		
5.12	69.20	5.10	0.03	0.00	0.025	0.0001		
5.09	73.61	5.34	-0.25	0.06	0.249	0.0005		
3.23	30.84	2.81	0.42	0.18	0.425	0.0009		
3.07	31.49	2.85	0.21	0.05	0.213	0.0005		
3.88	38.16	3.29	0.60	0.36	0.596	0.0013		
3.62	41.12	3.47	0.15	0.02	0.148	0.0003		
4.03	38.02	3.28	0.76	0.57	0.756	0.0017		
3.74	39.48	3.37	0.37	0.14	0.374	0.0008		
3.88	41.57	3.50	0.38	0.14	0.377	0.0008		
4.53	51.91	4.13	0.40	0.16	0.402	0.0009		
4.23	52.85	4.18	0.05	0.00	0.048	0.0001		
4.71	69.55	5.12	-0.40	0.16	0.404	0.0009		
4.70	71.18	5.21	-0.51	0.26	0.505	0.0011		
3.11	33.02	2.95	0.16	0.03	0.158	0.0003		
3.21	33.24	2.97	0.24	0.06	0.244	0.0005		
4.58	67.99	5.03	-0.46	0.21	0.456	0.0010		
4.47	68.32	5.05	-0.59	0.34	0.586	0.0013		
3.50	36.13	3.16	0.34	0.11	0.338	0.0007		
3.78	36.08	3.15	0.62	0.39	0.624	0.0014		
3.62	36.15	3.16	0.46	0.21	0.463	0.0010		
5.78	70.98	5.20	0.58	0.34	0.581	0.0013		
6.21	72.16	5.26	0.95	0.90	0.948	0.0021		
3.30	38.96	3.34	-0.04	0.00	0.038	0.0001		
3.36	36.41	3.18	0.18	0.03	0.183	0.0004		
2.98	37.87	3.27	-0.29	0.08	0.289	0.0006		
2.35	29.18	2.70	-0.35	0.12	0.345	0.0008		
2.70	31.27	2.84	-0.14	0.02	0.138	0.0003		
2.50	29.08	2.69	-0.19	0.04	0.193	0.0004		
3.43	38.41	3.30	0.13	0.02	0.130	0.0003		
3.17	35.73	3.13	0.04	0.00	0.041	0.0001		
3.33	37.57	3.25	0.08	0.01	0.079	0.0002		
4.37	63.09	4.76	-0.40	0.16	0.398	0.0009		
3.95	64.38	4.83	-0.88	0.77	0.880	0.0019		
4.21	64.28	4.83	-0.62	0.38	0.618	0.0014		
3.19	39.2	3.35	-0.16	0.03	0.162	0.0004		
3.63	40.8	3.45	0.18	0.03	0.176	0.0004		
2.93	40.2	3.42	-0.49	0.24	0.486	0.0011		
3.50	47.60	3.87	-0.37	0.14	0.372	0.0008		
3.51	49.53	3.98	-0.47	0.23	0.474	0.0010		
3.54	48.87	3.95	-0.41	0.16	0.406	0.0009		
2.57	27.49	2.58	-0.01	0.00	0.008	0.0000		
2.29	27.99	2.62	-0.32	0.10	0.321	0.0007		

2.46	27.77	2.60	-0.14	0.02	0.145	0.0003		
3.40	41.99	3.53	-0.12	0.02	0.124	0.0003		
3.19	41.63	3.51	-0.31	0.10	0.313	0.0007		
4.79	60.51	4.62	0.17	0.03	0.168	0.0004		
4.67	60.81	4.64	0.03	0.00	0.032	0.0001		
3.22	42.17	3.54	-0.32	0.10	0.318	0.0007		
3.01	39.92	3.40	-0.39	0.15	0.393	0.0009		
3.13	41.13	3.47	-0.35	0.12	0.348	0.0008		
2.20	24.58	2.38	-0.18	0.03	0.178	0.0004		
2.39	24.35	2.36	0.03	0.00	0.034	0.0001		
2.46	24.25	2.35	0.10	0.01	0.105	0.0002		
2.61	32.79	2.94	-0.33	0.11	0.326	0.0007		
2.79	32.73	2.94	-0.14	0.02	0.141	0.0003		
2.64	23.88	2.33	0.32	0.10	0.318	0.0007		
2.60	23.86	2.32	0.27	0.07	0.273	0.0006		
2.90	39.07	3.34	-0.45	0.20	0.446	0.0010		
3.04	37.80	3.26	-0.22	0.05	0.221	0.0005		
3.19	40.04	3.41	-0.22	0.05	0.220	0.0005		
2.72	33.82	3.01	-0.29	0.08	0.290	0.0006		
2.56	33.67	3.00	-0.43	0.19	0.434	0.0009		
2.55	26.97	2.54	0.00	0.00	0.000	0.0000		
2.34	27.36	2.57	-0.23	0.05	0.233	0.0005		
2.81	28.54	2.65	0.16	0.03	0.161	0.0004		
2.96	28.40	2.64	0.32	0.10	0.316	0.0007		
2.63	28.78	2.67	-0.04	0.00	0.044	0.0001		
2.17	21.36	2.14	0.02	0.00	0.023	0.0001		
2.17	22.06	2.19	-0.02	0.00	0.020	0.0000		
2.04	21.57	2.16	-0.12	0.01	0.121	0.0003		
1.00	11.76	1.38	-0.38	0.15	0.384	0.0008		
1.12	11.57	1.36	-0.25	0.06	0.245	0.0005		
1.08	11.83	1.39	-0.31	0.09	0.307	0.0007		
3.43	44.24	3.67	-0.23	0.05	0.233	0.0005		
3.07	42.99	3.59	-0.52	0.27	0.517	0.0011		
4.32	61.26	4.66	-0.34	0.11	0.337	0.0007		
3.82	60.97	4.64	-0.83	0.69	0.829	0.0018		
2.73	29.38	2.71	0.02	0.00	0.022	0.0000		
2.51	29.32	2.71	-0.20	0.04	0.197	0.0004		
3.28	47.98	3.89	-0.61	0.38	0.614	0.0013		
3.21	48.61	3.93	-0.72	0.51	0.717	0.0016		
$\sum O_i$						$\sum [(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \sum O_i$		
456.69						0.0883		
						IAE %		
						8.83		

Αξιόπιστα Δείγματα									
Πολυωνυμική Εξίσωση									
O _i = fct,sp	fc	P _i = f'ct,sp	O _i - P _i	(O _i - P _i) ²	[(O _i - P _i) ²]/%	[(O _i - P _i) ²]/Σ O _i	a	b	c
5.03	72.12	4.68	0.34	0.12	0.344	0.0008	-0.0006	0.1066	0.1173
5.26	71.72	4.68	0.58	0.33	0.579	0.0013			
3.84	41.96	3.53	0.30	0.09	0.304	0.0007			
4.10	43.05	3.59	0.50	0.25	0.502	0.0011			
3.56	42.92	3.59	-0.02	0.00	0.024	0.0001			
3.87	44.34	3.66	0.20	0.04	0.203	0.0004			
4.04	46.29	3.77	0.27	0.07	0.274	0.0006			
3.68	38.34	3.32	0.36	0.13	0.359	0.0008			
3.64	37.77	3.29	0.36	0.13	0.355	0.0008			
3.67	38.18	3.31	0.35	0.13	0.354	0.0008			
2.51	24.04	2.33	0.17	0.03	0.174	0.0004			
2.48	24.24	2.35	0.14	0.02	0.135	0.0003			
2.73	24.12	2.34	0.39	0.16	0.395	0.0009			
3.81	37.07	3.24	0.56	0.32	0.562	0.0012			
3.70	37.69	3.28	0.42	0.17	0.416	0.0009			
3.71	37.69	3.28	0.42	0.18	0.423	0.0009			
2.21	22.24	2.19	0.01	0.00	0.014	0.0000			
2.13	22.39	2.20	-0.07	0.01	0.075	0.0002			
2.11	23.96	2.33	-0.22	0.05	0.220	0.0005			
3.18	33.68	3.03	0.16	0.02	0.158	0.0003			
3.10	33.83	3.04	0.06	0.00	0.059	0.0001			
3.69	36.64	3.22	0.48	0.23	0.475	0.0010			
3.50	36.44	3.20	0.29	0.09	0.295	0.0006			
3.05	36.21	3.19	-0.14	0.02	0.143	0.0003			
2.58	26.65	2.53	0.05	0.00	0.047	0.0001			
2.80	28.27	2.65	0.15	0.02	0.148	0.0003			
2.52	27.06	2.56	-0.04	0.00	0.038	0.0001			
4.20	56.92	4.24	-0.04	0.00	0.038	0.0001			
4.48	56.28	4.22	0.26	0.07	0.261	0.0006			
3.06	30.76	2.83	0.24	0.06	0.236	0.0005			
2.89	32.04	2.92	-0.02	0.00	0.023	0.0001			
3.13	31.62	2.89	0.24	0.06	0.245	0.0005			
3.16	32.96	2.98	0.18	0.03	0.185	0.0004			
3.25	32.61	2.96	0.29	0.09	0.293	0.0006			
3.04	34.20	3.06	-0.02	0.00	0.017	0.0000			
2.21	23.70	2.31	-0.10	0.01	0.099	0.0002			
1.99	23.81	2.32	-0.33	0.11	0.327	0.0007			
3.64	37.32	3.26	0.38	0.15	0.381	0.0008			
3.83	37.38	3.26	0.57	0.32	0.565	0.0012			
4.34	69.62	4.63	-0.29	0.09	0.294	0.0006			
4.28	69.73	4.63	-0.35	0.12	0.352	0.0008			
3.94	41.88	3.53	0.41	0.17	0.415	0.0009			
3.89	41.64	3.52	0.37	0.14	0.374	0.0008			
3.27	33.02	2.98	0.28	0.08	0.284	0.0006			
3.53	33.09	2.99	0.55	0.30	0.547	0.0012			
3.88	44.97	3.70	0.18	0.03	0.184	0.0004			
3.81	44.52	3.67	0.14	0.02	0.139	0.0003			
4.13	45.44	3.72	0.41	0.17	0.409	0.0009			
3.32	36.94	3.24	0.09	0.01	0.087	0.0002			
2.99	36.43	3.20	-0.21	0.04	0.210	0.0005			
3.02	34.91	3.11	-0.08	0.01	0.084	0.0002			
4.64	60.68	4.38	0.26	0.07	0.261	0.0006			

4.89	60.28	4.36	0.53	0.28	0.531	0.0012			
3.70	33.31	3.00	0.70	0.49	0.697	0.0015			
3.55	31.88	2.91	0.65	0.42	0.647	0.0014			
5.12	69.20	4.62	0.50	0.25	0.504	0.0011			
5.09	73.61	4.71	0.38	0.14	0.375	0.0008			
3.23	30.84	2.83	0.40	0.16	0.400	0.0009			
3.07	31.49	2.88	0.19	0.03	0.187	0.0004			
3.88	38.16	3.31	0.57	0.33	0.572	0.0013			
3.62	41.12	3.49	0.14	0.02	0.136	0.0003			
4.03	38.02	3.30	0.73	0.53	0.731	0.0016			
3.74	39.48	3.39	0.35	0.13	0.354	0.0008			
3.88	41.57	3.51	0.37	0.13	0.367	0.0008			
4.53	51.91	4.03	0.49	0.24	0.493	0.0011			
4.23	52.85	4.08	0.15	0.02	0.152	0.0003			
4.71	69.55	4.63	0.09	0.01	0.086	0.0002			
4.70	71.18	4.67	0.04	0.00	0.036	0.0001			
3.11	33.02	2.98	0.13	0.02	0.130	0.0003			
3.21	33.24	3.00	0.22	0.05	0.215	0.0005			
4.58	67.99	4.59	-0.01	0.00	0.014	0.0000			
4.47	68.32	4.60	-0.13	0.02	0.135	0.0003			
3.50	36.13	3.19	0.31	0.10	0.310	0.0007			
3.78	36.08	3.18	0.60	0.36	0.596	0.0013			
3.62	36.15	3.19	0.43	0.19	0.434	0.0010			
5.78	70.98	4.66	1.12	1.25	1.116	0.0024			
6.21	72.16	4.69	1.52	2.32	1.522	0.0033			
3.30	38.96	3.36	-0.06	0.00	0.060	0.0001			
3.36	36.41	3.20	0.16	0.02	0.155	0.0003			
2.98	37.87	3.29	-0.31	0.10	0.314	0.0007			
2.35	29.18	2.72	-0.37	0.13	0.365	0.0008			
2.70	31.27	2.86	-0.16	0.03	0.164	0.0004			
2.50	29.08	2.71	-0.21	0.05	0.213	0.0005			
3.43	38.41	3.33	0.11	0.01	0.106	0.0002			
3.17	35.73	3.16	0.01	0.00	0.013	0.0000			
3.33	37.57	3.28	0.05	0.00	0.053	0.0001			
4.37	63.09	4.45	-0.09	0.01	0.089	0.0002			
3.95	64.38	4.49	-0.54	0.29	0.539	0.0012			
4.21	64.28	4.49	-0.28	0.08	0.279	0.0006			
3.19	39.2	3.37	-0.18	0.03	0.183	0.0004			
3.63	40.8	3.47	0.16	0.03	0.162	0.0004			
2.93	40.2	3.43	-0.50	0.25	0.503	0.0011			
3.50	47.60	3.83	-0.33	0.11	0.334	0.0007			
3.51	49.53	3.93	-0.42	0.17	0.415	0.0009			
3.54	48.87	3.89	-0.35	0.13	0.354	0.0008			
2.57	27.49	2.59	-0.02	0.00	0.021	0.0000			
2.29	27.99	2.63	-0.34	0.11	0.337	0.0007			
2.46	27.77	2.61	-0.16	0.03	0.160	0.0003			
3.40	41.99	3.54	-0.13	0.02	0.132	0.0003			
3.19	41.63	3.52	-0.32	0.10	0.323	0.0007			
4.79	60.51	4.37	0.42	0.17	0.416	0.0009			
4.67	60.81	4.38	0.29	0.08	0.286	0.0006			
3.22	42.17	3.55	-0.32	0.11	0.324	0.0007			
3.01	39.92	3.42	-0.41	0.17	0.411	0.0009			
3.13	41.13	3.49	-0.36	0.13	0.360	0.0008			
2.20	24.58	2.37	-0.18	0.03	0.177	0.0004			
2.39	24.35	2.36	0.04	0.00	0.037	0.0001			

2.46	24.25	2.35	0.11	0.01	0.108	0.0002			
2.61	32.79	2.97	-0.35	0.13	0.354	0.0008			
2.79	32.73	2.96	-0.17	0.03	0.169	0.0004			
2.64	23.88	2.32	0.32	0.10	0.323	0.0007			
2.60	23.86	2.32	0.28	0.08	0.279	0.0006			
2.90	39.07	3.37	-0.47	0.22	0.467	0.0010			
3.04	37.80	3.29	-0.25	0.06	0.246	0.0005			
3.19	40.04	3.42	-0.24	0.06	0.237	0.0005			
2.72	33.82	3.04	-0.32	0.10	0.319	0.0007			
2.56	33.67	3.03	-0.46	0.21	0.462	0.0010			
2.55	26.97	2.56	-0.01	0.00	0.011	0.0000			
2.34	27.36	2.58	-0.25	0.06	0.246	0.0005			
2.81	28.54	2.67	0.14	0.02	0.143	0.0003			
2.96	28.40	2.66	0.30	0.09	0.299	0.0007			
2.63	28.78	2.69	-0.06	0.00	0.062	0.0001			
2.17	21.36	2.12	0.05	0.00	0.046	0.0001			
2.17	22.06	2.18	0.00	0.00	0.002	0.0000			
2.04	21.57	2.14	-0.10	0.01	0.100	0.0002			
1.00	11.76	1.29	-0.29	0.09	0.292	0.0006			
1.12	11.57	1.27	-0.15	0.02	0.152	0.0003			
1.08	11.83	1.29	-0.22	0.05	0.216	0.0005			
3.43	44.24	3.66	-0.23	0.05	0.226	0.0005			
3.07	42.99	3.59	-0.52	0.27	0.519	0.0011			
4.32	61.26	4.40	-0.07	0.01	0.072	0.0002			
3.82	60.97	4.39	-0.57	0.33	0.570	0.0012			
2.73	29.38	2.73	0.00	0.00	0.001	0.0000			
2.51	29.32	2.73	-0.22	0.05	0.217	0.0005			
3.28	47.98	3.85	-0.57	0.33	0.573	0.0013			
3.21	48.61	3.88	-0.67	0.45	0.668	0.0015			
$\sum O_i$						$\sum [(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \sum O_i$			
456.69						0.0849			
						IAE %			
						8.49			

Αξιόπιστα Δείγματα									
Πολυωνυμική Εξίσωση (διέλευση από το μηδέν)									
$O_i = fct, sp$	fc	$P_i = f'ct, sp$	$O_i - P_i$	$(O_i - P_i)^2$	$[(O_i - P_i)^2] \%$	$[(O_i - P_i)^2] \% / \sum O_i$	a	b	c
5.03	72.12	4.85	0.18	0.03	0.182	0.0004	-0.0006	0.1098	0.048
5.26	71.72	4.84	0.42	0.18	0.418	0.0009			
3.84	41.96	3.60	0.24	0.06	0.239	0.0005			
4.10	43.05	3.66	0.43	0.19	0.434	0.0010			
3.56	42.92	3.66	-0.09	0.01	0.092	0.0002			
3.87	44.34	3.74	0.13	0.02	0.130	0.0003			
4.04	46.29	3.84	0.20	0.04	0.195	0.0004			
3.68	38.34	3.38	0.31	0.09	0.306	0.0007			
3.64	37.77	3.34	0.30	0.09	0.304	0.0007			
3.67	38.18	3.37	0.30	0.09	0.301	0.0007			
2.51	24.04	2.34	0.17	0.03	0.166	0.0004			
2.48	24.24	2.36	0.13	0.02	0.127	0.0003			
2.73	24.12	2.35	0.39	0.15	0.387	0.0008			
3.81	37.07	3.29	0.51	0.26	0.512	0.0011			
3.70	37.69	3.33	0.36	0.13	0.365	0.0008			
3.71	37.69	3.33	0.37	0.14	0.372	0.0008			
2.21	22.24	2.19	0.01	0.00	0.012	0.0000			
2.13	22.39	2.21	-0.08	0.01	0.077	0.0002			
2.11	23.96	2.33	-0.23	0.05	0.228	0.0005			
3.18	33.68	3.07	0.12	0.01	0.119	0.0003			
3.10	33.83	3.08	0.02	0.00	0.020	0.0000			
3.69	36.64	3.27	0.43	0.18	0.427	0.0009			
3.50	36.44	3.25	0.25	0.06	0.247	0.0005			
3.05	36.21	3.24	-0.19	0.04	0.190	0.0004			
2.58	26.65	2.55	0.03	0.00	0.031	0.0001			
2.80	28.27	2.67	0.13	0.02	0.127	0.0003			
2.52	27.06	2.58	-0.05	0.00	0.055	0.0001			
4.20	56.92	4.35	-0.15	0.02	0.151	0.0003			
4.48	56.28	4.33	0.15	0.02	0.150	0.0003			
3.06	30.76	2.86	0.21	0.04	0.207	0.0005			
2.89	32.04	2.95	-0.06	0.00	0.056	0.0001			
3.13	31.62	2.92	0.21	0.05	0.213	0.0005			
3.16	32.96	3.02	0.15	0.02	0.148	0.0003			
3.25	32.61	2.99	0.26	0.07	0.258	0.0006			
3.04	34.20	3.10	-0.06	0.00	0.057	0.0001			
2.21	23.70	2.31	-0.11	0.01	0.105	0.0002			
1.99	23.81	2.32	-0.33	0.11	0.334	0.0007			
3.64	37.32	3.31	0.33	0.11	0.331	0.0007			
3.83	37.38	3.31	0.51	0.27	0.515	0.0011			
4.34	69.62	4.78	-0.45	0.20	0.448	0.0010			
4.28	69.73	4.79	-0.51	0.26	0.506	0.0011			
3.94	41.88	3.59	0.35	0.12	0.350	0.0008			
3.89	41.64	3.58	0.31	0.10	0.310	0.0007			
3.27	33.02	3.02	0.25	0.06	0.247	0.0005			
3.53	33.09	3.02	0.51	0.26	0.510	0.0011			
3.88	44.97	3.77	0.11	0.01	0.109	0.0002			
3.81	44.52	3.75	0.07	0.00	0.066	0.0001			
4.13	45.44	3.80	0.33	0.11	0.333	0.0007			
3.32	36.94	3.29	0.04	0.00	0.038	0.0001			
2.99	36.43	3.25	-0.26	0.07	0.258	0.0006			
3.02	34.91	3.15	-0.13	0.02	0.127	0.0003			

4.64	60.68	4.50	0.14	0.02	0.136	0.0003			
4.89	60.28	4.49	0.41	0.17	0.408	0.0009			
3.70	33.31	3.04	0.66	0.43	0.659	0.0014			
3.55	31.88	2.94	0.61	0.38	0.615	0.0013			
5.12	69.20	4.77	0.35	0.12	0.352	0.0008			
5.09	73.61	4.88	0.21	0.04	0.209	0.0005			
3.23	30.84	2.86	0.37	0.14	0.370	0.0008			
3.07	31.49	2.91	0.16	0.02	0.156	0.0003			
3.88	38.16	3.36	0.52	0.27	0.519	0.0011			
3.62	41.12	3.55	0.07	0.01	0.073	0.0002			
4.03	38.02	3.36	0.68	0.46	0.679	0.0015			
3.74	39.48	3.45	0.30	0.09	0.297	0.0007			
3.88	41.57	3.58	0.30	0.09	0.303	0.0007			
4.53	51.91	4.13	0.40	0.16	0.396	0.0009			
4.23	52.85	4.18	0.05	0.00	0.053	0.0001			
4.71	69.55	4.78	-0.07	0.00	0.068	0.0001			
4.70	71.18	4.82	-0.12	0.01	0.122	0.0003			
3.11	33.02	3.02	0.09	0.01	0.093	0.0002			
3.21	33.24	3.03	0.18	0.03	0.178	0.0004			
4.58	67.99	4.74	-0.16	0.03	0.162	0.0004			
4.47	68.32	4.75	-0.28	0.08	0.284	0.0006			
3.50	36.13	3.23	0.26	0.07	0.263	0.0006			
3.78	36.08	3.23	0.55	0.30	0.550	0.0012			
3.62	36.15	3.23	0.39	0.15	0.388	0.0008			
5.78	70.98	4.82	0.96	0.92	0.959	0.0021			
6.21	72.16	4.85	1.36	1.85	1.360	0.0030			
3.30	38.96	3.42	-0.11	0.01	0.115	0.0003			
3.36	36.41	3.25	0.11	0.01	0.108	0.0002			
2.98	37.87	3.35	-0.37	0.13	0.366	0.0008			
2.35	29.18	2.74	-0.39	0.15	0.389	0.0009			
2.70	31.27	2.89	-0.19	0.04	0.194	0.0004			
2.50	29.08	2.73	-0.24	0.06	0.236	0.0005			
3.43	38.41	3.38	0.05	0.00	0.053	0.0001			
3.17	35.73	3.20	-0.03	0.00	0.032	0.0001			
3.33	37.57	3.33	0.00	0.00	0.002	0.0000			
4.37	63.09	4.59	-0.22	0.05	0.221	0.0005			
3.95	64.38	4.63	-0.68	0.46	0.675	0.0015			
4.21	64.28	4.63	-0.42	0.17	0.415	0.0009			
3.19	39.2	3.43	-0.24	0.06	0.239	0.0005			
3.63	40.8	3.53	0.10	0.01	0.101	0.0002			
2.93	40.2	3.49	-0.56	0.32	0.562	0.0012			
3.50	47.60	3.91	-0.42	0.17	0.418	0.0009			
3.51	49.53	4.01	-0.50	0.25	0.504	0.0011			
3.54	48.87	3.98	-0.44	0.19	0.441	0.0010			
2.57	27.49	2.61	-0.04	0.00	0.040	0.0001			
2.29	27.99	2.65	-0.36	0.13	0.357	0.0008			
2.46	27.77	2.63	-0.18	0.03	0.179	0.0004			
3.40	41.99	3.60	-0.20	0.04	0.197	0.0004			
3.19	41.63	3.58	-0.39	0.15	0.387	0.0008			
4.79	60.51	4.49	0.29	0.08	0.292	0.0006			
4.67	60.81	4.51	0.16	0.03	0.161	0.0004			
3.22	42.17	3.61	-0.39	0.15	0.390	0.0009			
3.01	39.92	3.47	-0.47	0.22	0.470	0.0010			
3.13	41.13	3.55	-0.42	0.18	0.422	0.0009			
2.20	24.58	2.38	-0.19	0.03	0.186	0.0004			

2.39	24.35	2.37	0.03	0.00	0.028	0.0001			
2.46	24.25	2.36	0.10	0.01	0.100	0.0002			
2.61	32.79	3.00	-0.39	0.15	0.390	0.0009			
2.79	32.73	3.00	-0.20	0.04	0.204	0.0004			
2.64	23.88	2.33	0.32	0.10	0.316	0.0007			
2.60	23.86	2.33	0.27	0.07	0.272	0.0006			
2.90	39.07	3.42	-0.52	0.27	0.523	0.0011			
3.04	37.80	3.34	-0.30	0.09	0.298	0.0007			
3.19	40.04	3.48	-0.30	0.09	0.296	0.0006			
2.72	33.82	3.07	-0.36	0.13	0.358	0.0008			
2.56	33.67	3.06	-0.50	0.25	0.501	0.0011			
2.55	26.97	2.57	-0.03	0.00	0.028	0.0001			
2.34	27.36	2.60	-0.26	0.07	0.264	0.0006			
2.81	28.54	2.69	0.12	0.01	0.121	0.0003			
2.96	28.40	2.68	0.28	0.08	0.278	0.0006			
2.63	28.78	2.71	-0.08	0.01	0.085	0.0002			
2.17	21.36	2.12	0.05	0.00	0.047	0.0001			
2.17	22.06	2.18	0.00	0.00	0.004	0.0000			
2.04	21.57	2.14	-0.10	0.01	0.100	0.0002			
1.00	11.76	1.26	-0.26	0.07	0.260	0.0006			
1.12	11.57	1.24	-0.12	0.01	0.120	0.0003			
1.08	11.83	1.26	-0.18	0.03	0.184	0.0004			
3.43	44.24	3.73	-0.30	0.09	0.298	0.0007			
3.07	42.99	3.66	-0.59	0.35	0.587	0.0013			
4.32	61.26	4.52	-0.20	0.04	0.198	0.0004			
3.82	60.97	4.51	-0.70	0.48	0.696	0.0015			
2.73	29.38	2.76	-0.02	0.00	0.023	0.0001			
2.51	29.32	2.75	-0.24	0.06	0.242	0.0005			
3.28	47.98	3.94	-0.66	0.43	0.657	0.0014			
3.21	48.61	3.97	-0.75	0.57	0.754	0.0017			
$\sum O_i$						$\sum [(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \sum O_i$			
456.69						0.0831			
						IAE %			
						8.31			

Αξιόπιστα Δείγματα								
Λογαριθμική Εξίσωση								
O _i = fct,sp	fc	P _i = f'ct,sp	O _i - P _i	(O _i - P _i) ²	[(O _i - P _i) ²] ^½	[(O _i - P _i) ²] ^½ / Σ O _i	a	b
5.03	72.12	4.83	0.20	0.04	0.199	0.0004	2.2314	-4.7174
5.26	71.72	4.82	0.44	0.19	0.438	0.0010		
3.84	41.96	3.62	0.22	0.05	0.217	0.0005		
4.10	43.05	3.68	0.42	0.18	0.419	0.0009		
3.56	42.92	3.67	-0.11	0.01	0.108	0.0002		
3.87	44.34	3.74	0.12	0.02	0.123	0.0003		
4.04	46.29	3.84	0.20	0.04	0.200	0.0004		
3.68	38.34	3.42	0.26	0.07	0.262	0.0006		
3.64	37.77	3.39	0.26	0.07	0.257	0.0006		
3.67	38.18	3.41	0.26	0.07	0.257	0.0006		
2.51	24.04	2.38	0.13	0.02	0.129	0.0003		
2.48	24.24	2.40	0.09	0.01	0.088	0.0002		
2.73	24.12	2.39	0.35	0.12	0.349	0.0008		
3.81	37.07	3.34	0.46	0.21	0.462	0.0010		
3.70	37.69	3.38	0.32	0.10	0.318	0.0007		
3.71	37.69	3.38	0.32	0.11	0.325	0.0007		
2.21	22.24	2.20	0.00	0.00	0.001	0.0000		
2.13	22.39	2.22	-0.09	0.01	0.091	0.0002		
2.11	23.96	2.37	-0.26	0.07	0.264	0.0006		
3.18	33.68	3.13	0.05	0.00	0.054	0.0001		
3.10	33.83	3.14	-0.04	0.00	0.045	0.0001		
3.69	36.64	3.32	0.37	0.14	0.375	0.0008		
3.50	36.44	3.31	0.19	0.04	0.194	0.0004		
3.05	36.21	3.29	-0.24	0.06	0.245	0.0005		
2.58	26.65	2.61	-0.03	0.00	0.029	0.0001		
2.80	28.27	2.74	0.06	0.00	0.060	0.0001		
2.52	27.06	2.64	-0.12	0.01	0.117	0.0003		
4.20	56.92	4.30	-0.10	0.01	0.098	0.0002		
4.48	56.28	4.28	0.20	0.04	0.201	0.0004		
3.06	30.76	2.93	0.14	0.02	0.136	0.0003		
2.89	32.04	3.02	-0.13	0.02	0.125	0.0003		
3.13	31.62	2.99	0.14	0.02	0.144	0.0003		
3.16	32.96	3.08	0.08	0.01	0.082	0.0002		
3.25	32.61	3.06	0.19	0.04	0.190	0.0004		
3.04	34.20	3.16	-0.12	0.01	0.120	0.0003		
2.21	23.70	2.35	-0.14	0.02	0.138	0.0003		
1.99	23.81	2.36	-0.37	0.14	0.368	0.0008		
3.64	37.32	3.36	0.28	0.08	0.282	0.0006		
3.83	37.38	3.36	0.47	0.22	0.466	0.0010		
4.34	69.62	4.75	-0.41	0.17	0.414	0.0009		
4.28	69.73	4.75	-0.47	0.22	0.473	0.0010		
3.94	41.88	3.62	0.33	0.11	0.328	0.0007		
3.89	41.64	3.60	0.29	0.08	0.287	0.0006		
3.27	33.02	3.09	0.18	0.03	0.181	0.0004		
3.53	33.09	3.09	0.44	0.20	0.444	0.0010		
3.88	44.97	3.78	0.11	0.01	0.106	0.0002		
3.81	44.52	3.75	0.06	0.00	0.060	0.0001		
4.13	45.44	3.80	0.33	0.11	0.333	0.0007		

3.32	36.94	3.34	-0.01	0.00	0.013	0.0000		
2.99	36.43	3.31	-0.31	0.10	0.311	0.0007		
3.02	34.91	3.21	-0.19	0.03	0.187	0.0004		
4.64	60.68	4.44	0.19	0.04	0.194	0.0004		
4.89	60.28	4.43	0.47	0.22	0.465	0.0010		
3.70	33.31	3.11	0.59	0.35	0.594	0.0013		
3.55	31.88	3.01	0.55	0.30	0.546	0.0012		
5.12	69.20	4.74	0.39	0.15	0.388	0.0008		
5.09	73.61	4.88	0.21	0.05	0.213	0.0005		
3.23	30.84	2.93	0.30	0.09	0.300	0.0007		
3.07	31.49	2.98	0.09	0.01	0.086	0.0002		
3.88	38.16	3.41	0.47	0.23	0.475	0.0010		
3.62	41.12	3.58	0.05	0.00	0.046	0.0001		
4.03	38.02	3.40	0.63	0.40	0.633	0.0014		
3.74	39.48	3.48	0.26	0.07	0.260	0.0006		
3.88	41.57	3.60	0.28	0.08	0.279	0.0006		
4.53	51.91	4.10	0.43	0.19	0.431	0.0009		
4.23	52.85	4.14	0.09	0.01	0.092	0.0002		
4.71	69.55	4.75	-0.03	0.00	0.034	0.0001		
4.70	71.18	4.80	-0.10	0.01	0.099	0.0002		
3.11	33.02	3.09	0.03	0.00	0.027	0.0001		
3.21	33.24	3.10	0.11	0.01	0.112	0.0002		
4.58	67.99	4.70	-0.12	0.01	0.120	0.0003		
4.47	68.32	4.71	-0.24	0.06	0.243	0.0005		
3.50	36.13	3.29	0.21	0.04	0.208	0.0005		
3.78	36.08	3.28	0.49	0.24	0.495	0.0011		
3.62	36.15	3.29	0.33	0.11	0.333	0.0007		
5.78	70.98	4.79	0.98	0.97	0.983	0.0022		
6.21	72.16	4.83	1.38	1.90	1.377	0.0030		
3.30	38.96	3.46	-0.16	0.02	0.155	0.0003		
3.36	36.41	3.30	0.05	0.00	0.054	0.0001		
2.98	37.87	3.39	-0.41	0.17	0.412	0.0009		
2.35	29.18	2.81	-0.46	0.21	0.459	0.0010		
2.70	31.27	2.96	-0.26	0.07	0.264	0.0006		
2.50	29.08	2.80	-0.31	0.09	0.305	0.0007		
3.43	38.41	3.42	0.01	0.00	0.009	0.0000		
3.17	35.73	3.26	-0.09	0.01	0.089	0.0002		
3.33	37.57	3.37	-0.05	0.00	0.045	0.0001		
4.37	63.09	4.53	-0.17	0.03	0.165	0.0004		
3.95	64.38	4.58	-0.62	0.39	0.621	0.0014		
4.21	64.28	4.57	-0.36	0.13	0.361	0.0008		
3.19	39.2	3.47	-0.28	0.08	0.278	0.0006		
3.63	40.8	3.56	0.07	0.01	0.072	0.0002		
2.93	40.2	3.53	-0.60	0.35	0.595	0.0013		
3.50	47.60	3.90	-0.40	0.16	0.405	0.0009		
3.51	49.53	3.99	-0.48	0.23	0.481	0.0011		
3.54	48.87	3.96	-0.42	0.18	0.421	0.0009		
2.57	27.49	2.68	-0.10	0.01	0.104	0.0002		
2.29	27.99	2.72	-0.42	0.18	0.423	0.0009		
2.46	27.77	2.70	-0.24	0.06	0.244	0.0005		
3.40	41.99	3.62	-0.22	0.05	0.219	0.0005		

3.19	41.63	3.60	-0.41	0.17	0.411	0.0009		
4.79	60.51	4.44	0.35	0.12	0.349	0.0008		
4.67	60.81	4.45	0.22	0.05	0.219	0.0005		
3.22	42.17	3.63	-0.41	0.17	0.411	0.0009		
3.01	39.92	3.51	-0.50	0.25	0.504	0.0011		
3.13	41.13	3.58	-0.45	0.20	0.450	0.0010		
2.20	24.58	2.43	-0.23	0.05	0.229	0.0005		
2.39	24.35	2.41	-0.01	0.00	0.012	0.0000		
2.46	24.25	2.40	0.06	0.00	0.060	0.0001		
2.61	32.79	3.07	-0.46	0.21	0.457	0.0010		
2.79	32.73	3.07	-0.27	0.07	0.272	0.0006		
2.64	23.88	2.36	0.28	0.08	0.281	0.0006		
2.60	23.86	2.36	0.24	0.06	0.237	0.0005		
2.90	39.07	3.46	-0.56	0.32	0.562	0.0012		
3.04	37.80	3.39	-0.34	0.12	0.344	0.0008		
3.19	40.04	3.52	-0.33	0.11	0.330	0.0007		
2.72	33.82	3.14	-0.42	0.18	0.422	0.0009		
2.56	33.67	3.13	-0.57	0.32	0.566	0.0012		
2.55	26.97	2.63	-0.09	0.01	0.089	0.0002		
2.34	27.36	2.67	-0.33	0.11	0.328	0.0007		
2.81	28.54	2.76	0.05	0.00	0.053	0.0001		
2.96	28.40	2.75	0.21	0.04	0.210	0.0005		
2.63	28.78	2.78	-0.15	0.02	0.153	0.0003		
2.17	21.36	2.11	0.05	0.00	0.052	0.0001		
2.17	22.06	2.19	-0.01	0.00	0.012	0.0000		
2.04	21.57	2.14	-0.10	0.01	0.099	0.0002		
1.00	11.76	0.78	0.21	0.05	0.213	0.0005		
1.12	11.57	0.75	0.37	0.14	0.372	0.0008		
1.08	11.83	0.79	0.28	0.08	0.284	0.0006		
3.43	44.24	3.74	-0.31	0.09	0.305	0.0007		
3.07	42.99	3.67	-0.60	0.36	0.603	0.0013		
4.32	61.26	4.47	-0.14	0.02	0.141	0.0003		
3.82	60.97	4.45	-0.64	0.41	0.639	0.0014		
2.73	29.38	2.83	-0.09	0.01	0.093	0.0002		
2.51	29.32	2.82	-0.31	0.10	0.311	0.0007		
3.28	47.98	3.92	-0.64	0.41	0.642	0.0014		
3.21	48.61	3.95	-0.74	0.54	0.736	0.0016		
ΣO_i						$\Sigma [(O_i - P_i)^2]^{1/2} / \Sigma O_i$		
456.69						0.0827		
						IAE %		
						8.27		

