



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):  
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

## **ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΖΕΡΒΑΣ ΑΙΜΙΛΙΑΝΟΣ**

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργός

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

Γ. Φούρλαρης

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2011**



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):  
"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"

### **ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ ΣΕ ΧΑΛΥΒΕΣ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΖΕΡΒΑΣ ΑΙΜΙΛΙΑΝΟΣ**

Διπλωματούχος Μηχανικός Μεταλλείων Μεταλλουργός

#### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Χ. Παναγόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. Παντελής, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Γ. Φούρλαρης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2011**

<b>ABSTRACT</b>	7
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</b>	8
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	11
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1</b>	14
<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ</b>	14
1.1 ΔΟΚΙΜΗ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΥ – ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ	14
1.2 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΣΚΛΗΡΥΝΣΗΣ	19
1.3 ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΣ ΑΝΘΡΑΚΑΣ – ΣΥΓΚΟΛΛΗΣΙΜΟΤΗΤΑ – ΕΜΒΑΠΤΟΤΗΤΑ	23
1.4 ΈΛΑΣΗ	25
1.5 ΘΕΡΜΗ ΕΛΑΣΗ – ΧΑΛΥΒΕΣ ΘΕΡΜΗΣ ΕΛΑΣΗΣ	30
1.6 ΑΠΛΗ ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ	32
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2</b>	41
<b>ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ</b>	41
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΟΥ ΣΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	41
2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	43
2.3 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3</b>	46
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ</b>	46
3.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕ ΚΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	46
3.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΝΘΡΑΚΑ	52
3.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΝΘΡΑΚΑ	64
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4</b>	72
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΣΤΑΣΗ</b>	72
4.1 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕ ΚΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ	72
4.2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΡΑΥΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΝΘΡΑΚΑ	73
4.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΡΡΟΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΑΝΘΡΑΚΑ	75
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5</b>	77
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΜΕ ΤΑ ΚΡΑΜΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ</b>	77
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6</b>	80
<b>ΥΛΙΚΟ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ</b>	80
6.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΛΙΚΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΕ ΣΤΗ ΜΕΛΕΤΗ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ	80
6.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ	82
6.3 ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΣΥΣΚΕΥΕΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ – ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΓΙΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΟ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΟ	84
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7</b>	91
<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ</b>	91

7.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΩΝ	91
7.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ	94
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8</b>	<b>110</b>
<b>ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ</b>	<b>110</b>
8.1 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΜΩΝ	110
8.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΗΣ ΔΙΑΤΟΜΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	110
8.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	114
8.4 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ	121
8.5 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΓΚΡΙΣΗΣ ΜΕΤΑΞΥ ΟΡΙΟΥ ΘΡΑΥΣΗΣ – ΟΡΙΟΥ ΔΙΑΡΡΟΗΣ – ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗΣ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΓΙΣΤΟ ΦΟΡΤΙΟ	130
8.6 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΙΜΩΝ ΣΚΛΗΡΟΤΗΤΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΟΡΙΟ ΔΙΑΡΡΟΗΣ	133
8.7 ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ	135
8.8 ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΟΚΚΩΝ ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ	142
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9</b>	<b>146</b>
<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΝΔΟΤΡΑΧΥΝΣΗΣ</b>	<b>146</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1</b>	<b>147</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2</b>	<b>154</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3</b>	<b>156</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>159</b>

- Η επιστήμη πάντοτε κάνει λάθη. Δεν έλυσε ποτέ ένα πρόβλημα χωρίς να θέσει ένα άλλο.

*George Bernard Shaw*

- Έρευνα είναι αυτό που κάνω όταν δεν ξέρω τι κάνω.

*Wernher Von Braun*

- Ιδιοφυής δεν είναι εκείνος που δίνει σημαντικά ερωτήματα, αλλά εκείνος που θέτει σημαντικά ερωτήματα, στα οποία απάντηση θα δώσουν ο χρόνος και οι μέσοι άνθρωποι.

- Άρχεσθαι μαθών, αρχείν επιστήσει

*Σόλων*

- Μόρφωση είναι αυτό που μένει όταν ξεχάσουμε αυτά που διαβάζαμε λέει ένας παλιός ορισμός

- Όπου το τηλεσκόπιο σταματάει να μας βοηθάει, εκεί αρχίζει το μικροσκόπιο. Ποιο από τα δύο έχει μεγαλύτερη θέα;

*Βίκτωρ Ουγκώ*

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ Φούρλαρη Γεώργιο αναπληρωτή καθηγητής της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, για την ευκαιρία που μου έδωσε να εργαστώ στην εταιρεία ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον αναπληρωτή διευθυντή του τμήματος του ποιοτικού ελέγχου της ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗΣ Α.Ε. κ Νικολάου Ιωάννη για την καθοδήγηση, τη συμπαράσταση και τη βοήθεια του για την ολοκλήρωση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τις υποψήφιες διδάκτορες Παπαδοπούλου Ελίνα και Ζορμαλιά Σύλβια, για τη βοήθεια που μου παρείχαν κατά τη προετοιμασία και τη μελέτη των δοκιμών στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω το υπόλοιπο προσωπικό που δουλεύει στο τμήμα του ποιοτικού ελέγχου και ιδιαίτερος τους κυρίους Παναγιωτούλια Ιωάννη και Μαστροκούκο Ηλία.

## Abstract

In this study strain hardening effect and correlation between chemical composition and mechanical properties of low carbon steels has been investigated. At the first part the correlation between chemical composition and mechanical properties was studied, using statistical regression analysis on low carbon steel data. The results of the correlation shows that, the coefficient of determination was considered low in all cases, meaning that all the mathematical formulas that were formed were not sufficient enough to estimate the mechanical properties .At the second part, strain hardening effect on low carbon steel wires, has been studied by means of tension at different tension rates. During the second phase half of the samples were aged for 1h at 100 °C. At the final phase, for all the samples, tension tests were employed to evaluate the mechanical properties. The results show reduction on elongation and cross section and also an increase on yield and tensile stress. Age had little effect on all samples.

## Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε μελέτη ενδοτράχυνσης σε χάλυβες θερμής έλασης. Συγκεκριμένα έγινε συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων, με τη χημική σύσταση χαλύβων θερμής έλασης και μελέτη της μεταβολής των διαφόρων μεγεθών που μεταβάλλονται εξαιτίας ενδοτράχυνσης.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση, αλλά και οι χάλυβες θερμής έλασης που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη ενδοτράχυνσης, προήλθαν από την γραμμή παραγωγής της εταιρείας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. ,στο εργαστήριο της οποίας και έλαβε χώρα όλη η πειραματική διαδικασία. Εξάιρεση αποτελεί η μελέτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, το οποίο διαθέτει το εργαστήριο μεταλλογνωσίας της σχολής μηχανικών μεταλλείων μεταλλουργών.

Η χημική σύσταση των χαλύβων έχει άμεση επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων. Κατά αυτό τον τρόπο η μελέτη της συσχέτισης της σύστασης και των ιδιοτήτων καθίσταται ιδιαίτερος σημαντική. Άμεση επίδραση στις μηχανικές ιδιότητες έχει και η ενδοτράχυνση. Η γνώση των μεταβολών που προκαλείται από την ενδοτράχυνση, οδηγεί σε συμπεράσματα για την συμπεριφορά του υλικού όταν καταπονείται στις διάφορες εφαρμογές.

Το υλικό που εξετάζεται είναι χονδρόσυρμα που παράγεται με θερμή έλαση και αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή σύρματος (μικρότερης διαμέτρου) ή πλεγμάτων. Οι χάλυβες που εξετάστηκαν ταξινομούνται στις κατηγορίες SAE 1008 (ASTM A510M) ή S235JR (EN10025).

Η συσχέτιση της χημικής σύστασης με τις μηχανικές ιδιότητες περιελάμβανε, την άμεση συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τα κραματικά στοιχεία και την συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τιμές του ισοδύναμου άνθρακα.

Η πειραματική διαδικασία της μελέτης ενδοτράχυνσης περιελάμβανε την αρχική πλαστική παραμόρφωση δοκιμίων σε συγκεκριμένα ποσοστά, εν συνεχεία γήρανση ενός μέρους από το πλήθος των δοκιμίων και εν τέλει μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Οι μηχανικές ιδιότητες που μετρήθηκαν είναι η ομοιόμορφη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ), η παραμόρφωση στο σημείο



της θραύσης ( $A_5$ ), η μεταβολή της διαμέτρου και του βάρους, τα όρια θραύσης και διαρροής και τέλος η σκληρότητα των δοκιμίων.

Από τη συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση εξήχθησαν τα εξής κύρια συμπεράσματα:

- Ο συντελεστής προσδιορισμού δεν είναι ικανοποιητικός σε καμία από τις περιπτώσεις που εξετάστηκε
- Τα κραματικά στοιχεία δεν αρκούν για να προσδιορίσουμε επαρκώς τις μηχανικές ιδιότητες
- Η συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων απευθείας με τα κραματικά στοιχεία είναι προτιμότερη από τη συσχέτιση με οποιαδήποτε εκδοχή ισοδύναμου άνθρακα
- Η σχέση υπολογισμού του ισοδύναμου άνθρακα που προτείνεται από τον KTX 2008 δεν κρίνεται ικανοποιητική

Από τη μελέτη ενδοτράχυνσης εξήχθησαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η καταλληλότερη μέθοδος για τη μέτρηση της διατομής χονδροσύρματος το οποίο δεν έχει νευρώσεις, είναι η μέτρηση με χρήση παχυμέτρου.

### **Χυτήριο A**

- Η ολκιμότητα μειώθηκε έως και 50% όσον αφορά τη επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο, 40% όσον αφορά την επιμήκυνση στο σημείο της θραύσης και 5% όσον αφορά τη διάμετρο.
- Η αντοχή αυξήθηκε έως και 100% όσον αφορά το όριο διαρροής, 30% όσον αφορά το όριο θραύσης και 40% όσον αφορά τη σκληρότητα.

### **Χυτήριο B**

- Η ολκιμότητα μειώθηκε έως και 60% όσον αφορά τη επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο, 50% όσον αφορά την επιμήκυνση στο σημείο της θραύσης και 5% όσον αφορά τη διάμετρο.
  - Η αντοχή αυξήθηκε έως και 80% όσον αφορά το όριο διαρροής, 30% όσον αφορά το όριο θραύσης και 40% όσον αφορά τη σκληρότητα.
- 
- Το χυτήριο B επηρεάστηκε από τη γήρανση, σε αντίθεση με το χυτήριο A το οποίο δεν επηρεάστηκε καθόλου.



## Εισαγωγή

Η εποχή που ζούμε χαρακτηρίζεται από ταχεία άνοδο και εξέλιξη της τεχνολογίας. Ο ρυθμός εξέλιξης της τεχνολογίας επηρεάζει άμεσα και το ρυθμό της καθημερινότητας. Η καθημερινή ζωή αλλάζει και εξελίσσεται, καθώς νέα τεχνολογικές δημιουργίες εμφανίζονται, οι οποίες έχουν ως στόχο την ικανοποίηση διαφόρων αναγκών. Η βασική ανάγκη για συνεχή βελτίωση όλων των εκφάνσεων της ζωής του κάθε ανθρώπου όμως δεν σταματάει ποτέ, όσο και αν ικανοποιούνται οι διάφορες άλλες ανάγκες. Υπό αυτό το πρίσμα της συνεχούς βελτίωσης ξεκίνησε και ολοκληρώθηκε η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία.

Η επιστήμη και τεχνολογία των υλικών συνδέεται άμεσα με την προσπάθεια όλων των τεχνικών επιστημών, οι οποίες έχουν ως στόχο την επινόηση και ανάπτυξη τεχνολογικών επιτευγμάτων προς ικανοποίηση των διαφόρων αναγκών. Τα υλικά αποτελούν την στέρεα βάση πάνω στην οποία στηρίζονται όλες οι τεχνολογικές ανακαλύψεις. Ευχάριστο παράδειγμα θα μπορούσε να αποτελέσει το παραμύθι με τα τρία γουρουνάκια, όπου στην συγκεκριμένη ιστορία, η χρήση των σωστών υλικών για την κατασκευή των σπιτιών αποδείχθηκε ότι είχε καθοριστική σημασία.

Εκτός από τον σχεδιασμό και την κατασκευή νέων υλικών, σημαντικό μέρος της τεχνολογίας και επιστήμης των υλικών αποτελεί η μελέτη και βελτίωση των ήδη υπάρχοντων. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έγινε μια προσπάθεια ολοκληρωμένης μελέτης συγκεκριμένων χαλύβων, οι οποίοι ανήκουν στην ευρύτερη ομάδα των χαλύβων οπλισμού, ως προς τις μεταβολές που παρατηρούνται όταν αυτοί υπόκεινται σε πλαστική παραμόρφωση. Οι χάλυβες που μελετήθηκαν είναι χονδρόσυρμα το οποίο αποτελεί και την πρώτη ύλη για την παραγωγή σύρματος μικρότερης διαμέτρου ή πλέγματος.

Επειδή όπως αναφέρθηκε το υλικό αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή σύρματος ή πλέγματος, η μελέτη των μεταβολών που προκαλούνται από την πλαστική παραμόρφωση καθίσταται ιδιαίτερα σημαντική, καθώς θα μπορέσει ενδεχομένως να οδηγήσει σε βελτίωση διαφόρων παραμέτρων που αφορούν την παραγωγή του χονδροσύρματος.

Η διάθρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η εξής:

Κεφάλαιο πρώτο: Θεωρητικές έννοιες

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται θεωρητική αναφορά σε βασικές έννοιες που αφορούν τη δοκιμή εφελκυσμού, τις μεθόδους σκλήρυνσης των μετάλλων, την έλαση, καθώς και ορισμένες βασικές έννοιες που αφορούν την επιστήμη της στατιστικής. Στην παράγραφο που αφορά τις έννοιες της στατιστικής δίνεται έμφαση στη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης.

Κεφάλαιο δεύτερο: Υλικό και πειραματική διαδικασία συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με χημική σύσταση

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στη χημική σύσταση και τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού του οποίου τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τη συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση. Επίσης γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας.

Κεφάλαιο τρίτο: Αποτελέσματα μελέτης συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζονται λεπτομερώς τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που αφορούν τη συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση.

Κεφάλαιο τέταρτο: Ανάλυση αποτελεσμάτων της μελέτης συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των αποτελεσμάτων που αφορούν τη συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση.

Κεφάλαιο πέμπτο: Συμπεράσματα συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τα κραματικά στοιχεία

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την ανάλυση των δεδομένων του κεφαλαίου τέσσερα και αφορά τη συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση.

Κεφάλαιο έκτο: Υλικό και πειραματική διαδικασία μελέτης ενδοτράχυνσης

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή του υλικού που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία που αφορά τη μελέτη ενδοτράχυνσης. Επίσης γίνεται περιγραφή της πειραματικής διαδικασίας που αφορά τη μελέτη ενδοτράχυνσης.

Κεφάλαιο έβδομο: Αποτελέσματα μελέτης ενδοτράχυνσης

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας που αφορούν τη μελέτη ενδοτράχυνσης.

Κεφάλαιο όγδοο: Αποτελέσματα μελέτης ενδοτράχυνσης

Στο όγδοο κεφάλαιο γίνεται εκτενής ανάλυση των αποτελεσμάτων της μελέτης ενδοτράχυνσης.

Κεφάλαιο ένατο: Συμπεράσματα μελέτης ενδοτράχυνσης

Στο ένατο κεφάλαιο γίνεται παρουσίαση των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από την ανάλυση των δεδομένων του κεφαλαίου οχτώ και αφορά τη μελέτη ενδοτράχυνσης.

Παράρτημα 1: Στο παράρτημα 1 γίνεται παρουσίαση διαγραμμάτων που αφορούν τα κεφάλαια της συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση και τα οποία δεν παρουσιάστηκαν στο κυρίως μέρος της εργασίας για την αποφυγή του πλατειασμού.

Παράρτημα 2: Στο παράρτημα 2 γίνεται μια συνοπτική αναφορά στη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων.

Παράρτημα 3: Στο παράρτημα 3 παρατίθενται οι πλήρεις πίνακες που αφορούν τις τιμές που λήφθηκαν κατά τη διάρκεια της μέτρησης των διαστάσεων των κόκκων του χάλυβα που εξετάστηκε.

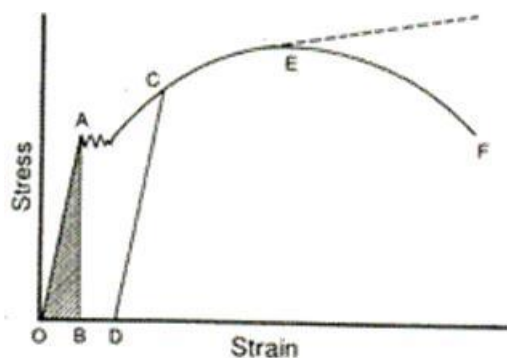
# Κεφάλαιο 1

## Θεωρητικές έννοιες

---

### 1.1 Δοκιμή εφελκυσμού – Χαρακτηριστικά μεγέθη

Η δοκιμή εφελκυσμού είναι η σπουδαιότερη δοκιμή για τη μέτρηση των μηχανικών ιδιοτήτων των μετάλλων. Η δοκιμή πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλης μηχανής, η οποία ασκεί εφελκυστική τάση σε δοκίμιο το οποίο έχει διαμορφωθεί κατάλληλα. Με το πέρας της δοκιμής εφελκυσμού λαμβάνονται τιμές δύναμης και επιμήκυνσης. Με επεξεργασία αυτών των τιμών σχεδιάζεται το διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης από το οποίο εξάγονται σημαντικά συμπεράσματα για την τις μηχανικές ιδιότητες του υλικού (Εικόνα1.1).



Εικόνα 1.1: Τυπικό διάγραμμα τάσης παραμόρφωσης χάλυβα

Τα βασικά μεγέθη που συνδέονται με την καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης είναι, το όριο αναλογίας, το όριο ελαστικότητας, το μέτρο ελαστικότητας, το σημείο διαρροής, το μέτρο ελαστικότητας, το όριο θραύσης και η ολκιμότητα.

Στο διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης διακρίνονται δυο βασικές περιοχές. Η ελαστική περιοχή, όπου με άρση της δύναμης το δοκίμιο επανέρχεται στο αρχικό του μήκος και τη πλαστική περιοχή, όπου οι παραμορφώσεις είναι μόνιμες [Γενική Μεταλλογνωσία 1, Παπαδημητρίου].

### Μέτρο ελαστικότητας – όριο αναλογίας

Για τα περισσότερα μέταλλα όταν υφίστανται εφελκυστικές τάσεις σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, η τάση και η παραμόρφωση είναι μεγέθη μεταξύ τους ανάλογα μέσω της σχέσης 1.1.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.1)$$

Αυτή η σχέση είναι γνωστή και ως νόμος του Hooke όπου E η σταθερά αναλογίας είναι το μέτρο ελαστικότητας ή μέτρο του Young. Ενδεικτικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας παρουσιάζονται στον πίνακα 1.1. *[Material Science and Engineering An Introduction, Callister]*

Πίνακας 1.1: Τιμές μέτρου ελαστικότητας για διάφορα υλικά

Υλικό	Μέτρο ελαστικότητας
	GPa
Αλουμίνιο	69
Ορείχαλκος	97
Χαλκός	110
Μαγνήσιο	45
Νικέλιο	207
Χάλυβας	207
Τιτάνιο	107
Βολφράμιο	407

Η κλίση του γραμμικού τμήματος της καμπύλης τάσης – παραμόρφωσης αντιστοιχεί στο μέτρο ελαστικότητας. Το μέτρο ελαστικότητας μπορεί να θεωρηθεί και ως η δυσκαμψία (stiffness) του υλικού, ή αντίσταση του στη ελαστική παραμόρφωση *[Material Science and Engineering An Introduction, Callister]*. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο αυτό τόσο πιο δύσκαμπτο θα είναι το υλικό, δηλαδή τόσο μικρότερη θα είναι η ελαστική παραμόρφωση *[Mechanical Metallurgy Dieter]*.

Συνήθως το αρχικό κομμάτι του διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης είναι γραμμικό. Το σημείο που σταματάει η γραμμικότητα ονομάζεται όριο αναλογίας (Proportional Limit). Το όριο αναλογίας δεν πρέπει να συγχέετε με το όριο ελαστικότητας. Σε αρκετά υλικά (χυτοσίδηρος, σκυρόδεμα) όμως το ελαστικό τμήμα της καμπύλης δεν είναι γραμμικό *[Material Science and Engineering An Introduction, Callister]*

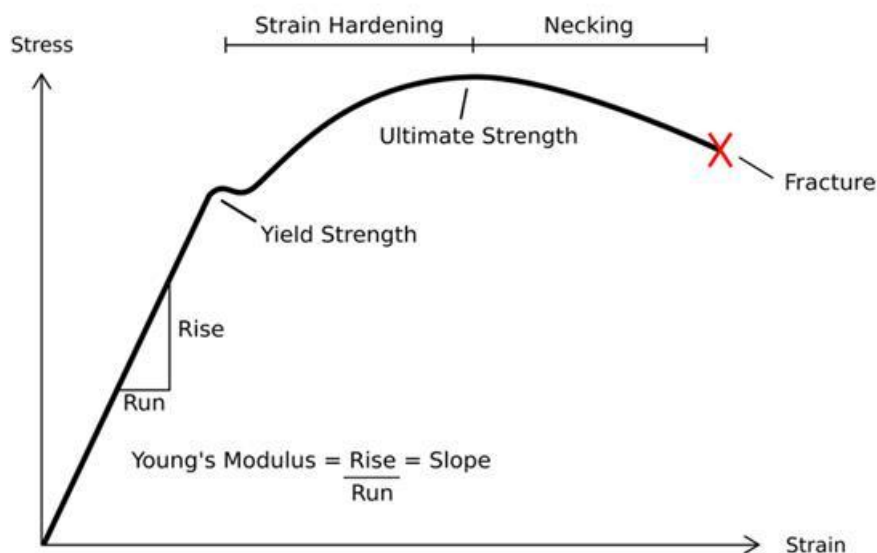
## Όριο ελαστικότητας

Η μέγιστη τάση στην οποία μπορεί να υποβληθεί ένα υλικό χωρίς να υποστεί μόνιμη παραμόρφωση αποτελεί το όριο ελαστικότητας (elastic limit). Το όριο ελαστικότητας υπάρχει ανεξαρτήτως από το όριο αναλογίας [Γενική Μεταλλογνωσία 1, Παπαδημητρίου].

## Σημείο διαρροής

Το σημείο διαρροής (Yield point) είναι η τάση για την οποία έχουμε σημαντική παραμόρφωση χωρίς μεγαλύτερη αύξηση της τάσης. Σε ορισμένα υλικά (π.χ. χάλυβες το φαινόμενο της διαρροής του υλικού φαίνεται αρκετά παράδοξο, διότι το δοκίμιο συνεχίζει να παραμορφώνεται χωρίς αύξηση του φορτίου. Μερικές φορές μάλιστα το φορτίο μειώνεται έως και 30%.

Σε ορισμένα υλικά όπως οι χάλυβες με 0,1% - 0,6% C, το σημείο διαρροής είναι πολύ χαρακτηριστικό πάνω στη καμπύλη τάσης – παραμόρφωσης, σε άλλες περιπτώσεις όμως που δεν είναι φανερό ορίζεται ένα συμβατικό σημείο διαρροής, σαν τη τάση στην οποία έχουμε 0,1 0,2 ή 0,5% παραμόρφωση [Γενική Μεταλλογνωσία 1, Παπαδημητρίου].



Εικόνα 1.2: Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης στο οποίο διακρίνουμε το σημείο διαρροής, το όριο θραύσης και το μέτρο ελαστικότητας

## Όριο θραύσης



Μετά την διαρροή η τάση που απαιτείται για να συνεχιστεί η πλαστική παραμόρφωση στα μέταλλα αυξάνει μέχρι ενός μεγίστου σημείου και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την εμφάνιση της θραύσης. Η εφελκυστική αντοχή αντιστοιχεί στη μέγιστη τάση που μπορεί να αντέξει μια κατασκευή σε εφελκυσμό. Εάν η τάση αυτή εφαρμοσθεί και διατηρηθεί επέρχεται θραύση. Σε αυτή τη μέγιστη τιμή της τάσης εμφανίζεται σε κάποιο σημείο του δοκιμίου μια στένωση ή λαιμός [*Material Science and Engineering An Introduction, Callister*]. Σε εκείνο το σημείο επέρχεται πλαστική αστάθεια και όλη η επακόλουθη παραμόρφωση σταματά να διανέμεται ομοιόμορφα στον όγκο του δοκιμίου και περιορίζεται μόνο στην περιοχή του λαιμού [*Γενική Μεταλλογνωσία 1*].

Η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να κυμαίνεται σε πολύ μεγάλο εύρος, από 50 MPa για ένα αλουμίνιο μέχρι και 3000 MPa για τους χάλυβες υψηλής αντοχής [*Material Science and Engineering An Introduction, Callister*].

### **Ολκιμότητα**

Η ολκιμότητα ενός μετάλλου είναι η ικανότητα του να παραμορφώνεται πλαστικά ανεξάρτητα από το μέγεθος των δυνάμεων που χρειάστηκαν για να προκληθεί η μόνιμη αυτή παραμόρφωση [*Γενική Μεταλλογνωσία 1, Παπαδημητρίου*].

Η ολκιμότητα μπορεί να εκφρασθεί ποσοτικά είτε ως το επί τοις εκατό ποσοστό επιμήκυνσης, είτε ως προς το επί τοις εκατό ποσοστό μείωσης επιφάνειας.

Το επί τοις εκατό ποσοστό επιμήκυνσης %EL είναι το ποσοστό της πλαστικής παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης και ορίζεται από τη σχέση 1.1

$$\%EL = \left( \frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100 \quad (1.1)$$

όπου  $l_f$  είναι το μήκος θραύσης και το  $l_0$  είναι το αρχικό ενεργό μήκος. Εφόσον ένα σημαντικό μέρος της πλαστικής παραμόρφωσης στη θραύση περιορίζεται στην περιοχή του λαιμού, το μέγεθος του %EL θα εξαρτάται από το ενεργό μήκος του δοκιμίου. Όσο μικρότερο είναι το  $l_0$ , τόσο μεγαλύτερο είναι το κλάσμα της συνολικής επιμήκυνσης που προέρχεται από την περιοχή του λαιμού και συνεπώς τόσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του %EL. Για αυτό το  $l_0$  πρέπει να αναφέρεται όταν παρατίθενται τιμές της επιμήκυνσης επί τοις εκατό [*Material Science and Engineering An Introduction, Callister*].

Το επί τοις εκατό ποσοστό μείωσης επιφάνειας %RA ορίζεται από τη σχέση 1.2.

$$\%RA = \left( \frac{A_0 - A_f}{A_f} \right) \times 100 \quad (1.2)$$

όπου  $A_0$  είναι το αρχικό εμβαδό διατομής και  $A_f$  είναι το εμβαδό διατομής στο σημείο της θραύσης. Οι τιμές του ποσοστού μείωσης της επιφάνειας είναι ανεξάρτητες των μεγεθών  $l_0$  και  $A_0$ .

## 1.2 Μηχανισμοί σκλήρυνσης

Υπάρχουν τέσσερις βασικές κατηγορίες σκλήρυνσης των μετάλλων. Η σκλήρυνση με ελάττωση του μεγέθους των κόκκων του υλικού, η σκλήρυνση στερεού διαλύματος, η σκλήρυνση από κατακρήμνιση και η σκλήρυνση εξαιτίας της ενδοτράχυνσης.

### Σκλήρυνση με ελάττωση του μεγέθους των κόκκων

Η αντοχή στα ανοπτημένα πολυκρυσταλλικά μέταλλα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος των κόκκων.

Η αύξηση της αντοχής με τη μείωση του μεγέθους του κόκκου εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από γεωμετρικούς λόγους, που συνδέονται με την δυναμικότητα πλαστικής παραμόρφωσης.

Το όριο διαρροής των πολυκρυσταλλικών σωμάτων αυξάνει όσο μειώνεται το μέγεθος του κόκκου. Τα όρια των κόκκων είναι πράγματι εμπόδια στην κίνηση των διαταραχών.

Η συναρτησιακή σχέση μεταξύ ορίου διαρροής και του μεγέθους του κόκκου είναι γνωστή η γνωστή σχέση των Hall – Petch:

$$\sigma_{\psi} = \sigma_0 + k \cdot d^{-1/2} \quad (1.3)$$

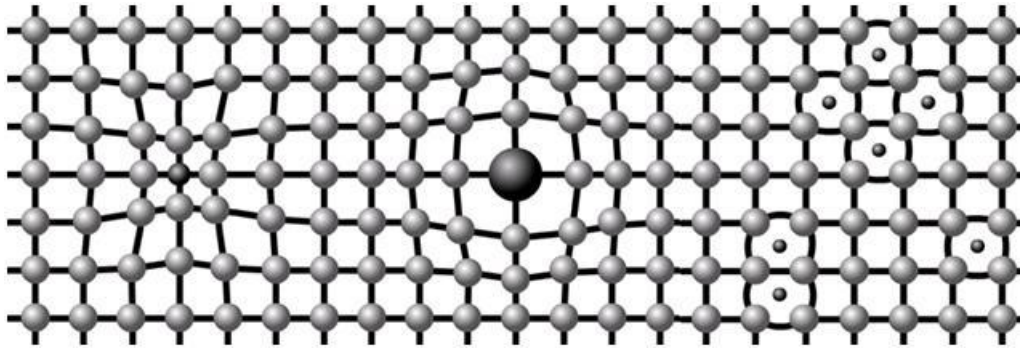
Όπου  $d$  είναι η μέση διάμετρος των κόκκων και  $\sigma_0$ ,  $k$  είναι σταθερές [Γενική Μεταλλογνωσία 1, Παπαδημητρίου].

### Σκλήρυνση στερεού διαλύματος

Η σκλήρωση που προκαλείται από τον σχηματισμό ενός στερεού διαλύματος (solid solution strengthening) οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ των ατόμων του διαλυμένου στοιχείου και των διαταραχών. Τα άτομα του διαλυμένου στοιχείου εμποδίζουν την κίνηση των διαταραχών και κατά αυτόν τον τρόπο αυξάνουν τη σκληρότητα του υλικού. Διακρίνονται δυο περιπτώσεις σκλήρυνσης στερεού διαλύματος, στερεό διάλυμα παρεμβολής και στερεό διάλυμα αντικατάστασης.

Τα άτομα που σχηματίζουν στερεό διάλυμα παρεμβολής (Εικόνα 1.3) έχουν μικρό μέγεθος και σχηματίζουν τα νέφη ή ατμόσφαιρες Cottrell στην διεσταλμένη περιοχή των διαταραχών. Συγκεντρώνονται δηλαδή στην εφελκυσμένη περιοχή

μιας διαταραχής ακμής και επειδή ο τύπος αυτός της αλληλεπιδράσεως συνοδεύεται από μείωση της ελευθέρως ενθαλπίας μέσα στον κρύσταλλο, οι διαταραχές δεν μπορούν εύκολα να εγκαταλείψουν, κατά την κίνηση τους τις ατμόσφαιρες αυτές. Οι διαταραχές τότε καρφώνονται (pinning of dislocations).



*Εικόνα 1.3: Παράδειγμα στερεού διαλύματος παρεμβολής και αντικατάστασης*

Στα στερεά διαλύματα αντικατάστασης η γραμμή διαταραχής μπορεί να θεωρηθεί σαν μια τεντωμένη χορδή, η οποία δονείται και ακτινοβολεί ελαστική ενέργεια, κάθε φορά που συναντά ένα άτομο αντικαταστάσεως. Η ενέργεια αυτή πρέπει να παρασχεθεί με πρόσθετη τάση. Κατά τον Cottrell η κίνηση των διαταραχών μπορεί να συμπαρασύρει άτομα αντικαταστάσεως, τα οποία κατά προτίμηση, καταλαμβάνουν θέσεις του πλέγματος κοντά στις διαταραχές, όταν η αλληλεπίδραση ατόμων αντικαταστάσεως – διαταραχής οδηγεί σε μείωση της ενέργειας (*Γενική Μεταλλογνωσία 1*).

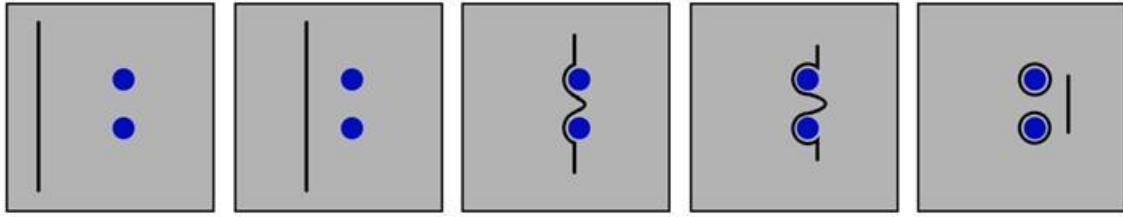
### **Σκλήρυνση από κατακρήμνιση**

Η σκλήρωση από κατακρήμνιση μιας δευτέρας φάσεως σε λεπτό διαμερισμό είναι από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους σκληρώσεως.

Αν και η κατακρήμνιση απομακρύνει από την μήτρα του κράματος ένα κραματικό στοιχείο, κι απαλείφει επομένως την σκλήρωση στερεού διαλύματος, η κατακρήμνιση υπερκαλύπτει αυτή τη μείωση της σκληρότητας.

Τα κατακρημνίσματα είναι πολύ αποτελεσματικά εμπόδια στην κίνηση διαταραχών, γιατί είναι σκληρά σωματίδια με δομή συνήθως πολύ διαφορετική από αυτή της μήτρας, ώστε οι διαταραχές δεν μπορούν να τα διασχίσουν. Δηλαδή δεν ακολουθούν την πλαστική παραμόρφωση της μαλακής μήτρας.

Εάν τα κατακρημνίσματα είναι ευμεγέθη, τότε οι διαταραχές καμπυλώνονται γύρω τους και τα παρακάμπτουν με ένα μηχανισμό που ομοιάζει με τις πηγές Frank – Read (Εικόνα 1.4)



Εικόνα 1.4: Κίνηση διαταραχής γύρω από ευμεγέθη κατακρημνίσματα

Όσο τα σωματίδια είναι λεπτότερα και πυκνότερα μέσα στη μήτρα, τόσο η σκλήρυνση είναι πιο αποτελεσματική. Εάν τα σωματίδια είναι πολύ λεπτά και συνεκτικά προς την μήτρα, τότε οι διαταραχές δεν μπορούν να καμφούν σε τόσο μικρές ακτίνες καμπυλότητας, της τάξης της ακτίνας του σωματιδίου (Γενική Μεταλλογνωσία 1).

### Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση

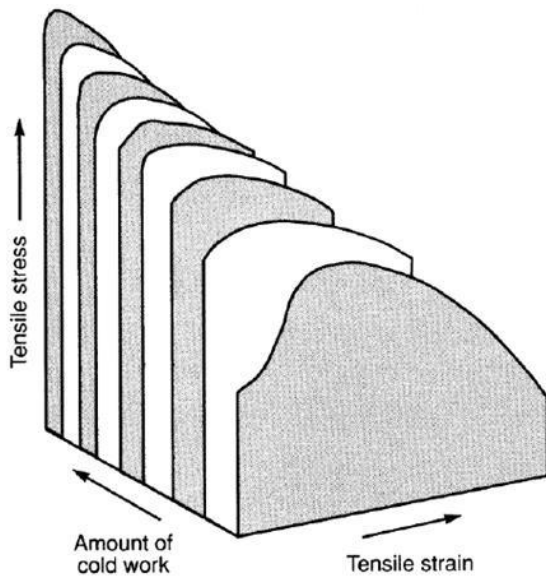
Σκλήρυνση με ενδοτράχυνση είναι το φαινόμενο όπου ένα όλκιμο μέταλλο γίνεται σκληρότερο και ισχυρότερο όταν παραμορφώνεται πλαστικά. Μερικές φορές καλείται και σκλήρυνση με κατεργασία, ή ψυχρηλασία επειδή η θερμοκρασία στην οποία η παραμόρφωση λαμβάνει χώρα είναι ψυχρή σε σχέση με την απόλυτη θερμοκρασία τήξης του μετάλλου. Τα περισσότερα μέταλλα επιδέχονται σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση σε θερμοκρασία δωματίου.

Μερικές φορές εξυπηρετεί να εκφράσουμε το βαθμό της πλαστικής παραμόρφωσης ως επί τοις εκατό % ψυχρηλασία παρά σαν παραμόρφωση. Η επί τοις εκατό % ψυχρηλασία ορίζεται από τη σχέση 1.4.

$$CW = \left( \frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100 \quad (1.4)$$

Όπου  $A_0$  είναι το αρχικό εμβαδό της ενεργού διατομής που δέχεται την πλαστική παραμόρφωση και  $A_d$  το εμβαδό μετά τη παραμόρφωση.

Το τίμημα της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση είναι η μείωση της ολκιμότητας (εικόνα 1.5).



Εικόνα 1.5: Επίδραση της ψυχρηλασίας στη συμπεριφορά τάσης – παραμόρφωσης (ASTM Metal Handbook Vol1)

Το φαινόμενο της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση εξηγείται βάσει των αλληλεπιδράσεων παραμόρφωσης μεταξύ διαταραχής – διαταραχή. Η πυκνότητα των διαταραχών σε ένα μέταλλο αυξάνει με την παραμόρφωση ή την ψυχρηλασία, εξ αιτίας του πολλαπλασιασμού ή του σχηματισμού νέων διαταραχών. Συνεπώς όσο η μέση απόσταση διαχωρισμού μεταξύ των διαταραχών μειώνεται τόσο οι διαταραχές τοποθετούνται πιο κοντά η μία στην άλλη. Κατά μέσο όρο, οι αλληλεπιδράσεις παραμόρφωσης μεταξύ των διαταραχών είναι απωθητικές. Το καθαρό αποτέλεσμα είναι ότι η κίνηση της διαταραχής εμποδίζεται από την παρουσία άλλων διαταραχών. Καθώς η πυκνότητα των διαταραχών αυξάνει, η αντίσταση στην κίνηση της διαταραχής από άλλες διαταραχές γίνεται πιο έντονη. Επομένως, η επιβαλλόμενη τάση που είναι απαραίτητη για να παραμορφώσει ένα μέταλλο αυξάνει με την αύξηση της ψυχρηλασίας.

Τα αποτελέσματα της σκλήρυνσης με ενδοτράχυνση μπορούν να εξαλειφθούν με θερμική επεξεργασία ανόπτησης.

### 1.3 Ισοδύναμος άνθρακας – Συγκολλησιμότητα – Εμβαπτότητα

Η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα ( $C_{eq}$ , Carbon Equivalent) ενός χάλυβα χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της συγκολλησιμότητας του. Η κραμάτωση των χαλύβων, δηλαδή η προσθήκη διάφορων κραματικών στοιχείων, έχει σαν σκοπό την επίτευξη των επιθυμητών ιδιοτήτων στους χάλυβες. Υψηλότερες συγκεντρώσεις στοιχείων, όπως άνθρακα, μαγγάνιο κλπ τείνουν να αυξήσουν την σκληρότητα των χαλύβων αυξάνοντας παράλληλα την αντοχής τους αλλά αντίθετα

μειώνοντας την συγκολλησιμότητα τους. Αυτό συμβαίνει διότι, αυξάνοντας την αντοχή του χάλυβα (με κραμάτωση) αυξάνεται αναπόφευκτα και η εμβαπτότητα του. Κάθε κραματικό στοιχείο έχει συγκεκριμένη και ξεχωριστή επίδραση τόσο στην σκλήρωση αλλά και στην συγκολλησιμότητα. Επίσης, υπάρχει τεράστιος αριθμός προϊόντων χάλυβα που προορίζονται για διαφορετικές εφαρμογές και χρήσεις και διαφέρουν μεταξύ τους τόσο στο είδος των κραματικών στοιχείων όσο και στην περιεκτικότητά τους. Προκειμένου να είναι εφικτή η σύγκριση μεταξύ χαλύβων με διαφορετική χημική σύσταση, χρησιμοποιείται η περιεκτικότητα σε ισοδύναμο άνθρακα αλλά υπάρχουν και άλλα πρότυπα σύγκρισης όπως η τιμή ισοδύναμου νικελίου ή χρωμίου που χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των ανοξείδωτων χαλύβων (Shaefler-Delong διαγράμματα).

Αύξηση της τιμής του ισοδύναμου άνθρακα, συνοδεύεται από μείωση της συγκολλησιμότητας των χαλύβων. Ο ισοδύναμος άνθρακας είναι ένα μέγεθος που φανερώνει την συνδυασμένη επίδραση των κραματικών στοιχείων ενός χάλυβα στη συγκολλησιμότητα του. Με βάση ισχύοντα πρότυπα (Κ.Τ.Χ. 2008 και ΕΛΟΤ 1421-3,

EN17660), η συγκολλησιμότητα των χαλύβων θεωρείται αυταπόδεικτη μόνο με βάση την χημική τους σύσταση ( $C_{eq} < 0,52\%$  στο τελικό προϊόν), όπου:

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (1.5)$$

Η εμβαπτότητα ενός χάλυβα συνδέεται με την ευκολία με την οποία δύναται να σκληρύνει δηλαδή να αυξηθεί η αντοχή του με θερμική κατεργασία. Η εμβαπτότητα, όπως και η συγκολλησιμότητα, μπορεί να εκτιμηθεί από την τιμή του ισοδύναμου άνθρακα ( $C_{eq}$ , Carbon Equivalent) ενός χάλυβα. Η εμβαπτότητα ενός χάλυβα περιγράφεται με κατάλληλα διαγράμματα ορισμένα από τα οποία είναι γνωστά ως Διαγράμματα Συνεχούς Απόψυξης (Continuous Cooling Transformation, CCT). Τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της μικρογραφικής δομής ανάλογα με τον ρυθμό ψύξης ενός αντικειμένου δεδομένης χημικής σύστασης και κατ' επέκταση για την πρόβλεψη των μηχανικών χαρακτηριστικών. Πρακτικά ο ίδιος χάλυβας μπορεί να παρουσιάζει διαφορετική μικρογραφική δομή και μηχανικά χαρακτηριστικά ανάλογα με τον ρυθμό απόψυξης

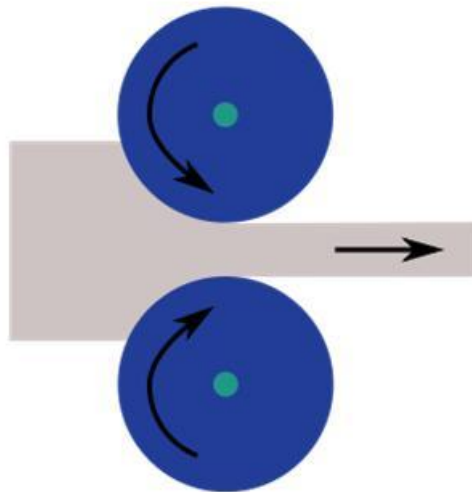


(°C/sec) που θα του επιβάλλουμε. Η αρχική θερμοκρασία που πρέπει να θερμανθεί ένας χάλυβας πριν την οποιαδήποτε ψύξη είναι συγκεκριμένη και κρίσιμη και καλείται θερμοκρασία ωστενιτοποίησης [Συγκολλησιμότητα Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος, Ι. Νικολάου].

## 1.4 Έλαση

### Ορισμός της έλασης

Η έλαση είναι μέθοδος διαμόρφωσης των μετάλλων με πλαστική παραμόρφωση ανάμεσα από δυο σκληρούς κυλίνδρους, που περιστρέφονται με αντίθετη φορά γύρω από σταθερούς άξονες και παρασύρουν το υλικό με τη βοήθεια της τριβής που αναπτύσσεται κατά τη κίνηση [(εικόνα 1.6) [Μεταλλοτεχνία, Γ.Δ. Παπαδημητρίου].



Εικόνα 1.6: Έλαση αντικειμένου – μεταβολή διαστάσεων μετά την έλαση

Το αντικείμενο που υπόκειται σε έλαση, κατά κανόνα μειώνει τη διάσταση του κατά τον άξονα που επιβάλλονται οι τάσεις και τις αυξάνει προς υπόλοιπες δυο, καθώς ο όγκος διατηρείται σε όλη τη διάρκεια της κατεργασίας.

Το υλικό, σε επαφή με τους περιστρεφόμενους κυλίνδρους, δημιουργεί τάσεις που μεταφέρονται με τη μεσολάβηση των εδράνων σε ολόκληρο το πλαίσιο του ελάστρου και στον μηχανισμό που ρυθμίζει το άνοιγμα μεταξύ των κυλίνδρων. Οι τάσεις εξισορροπούνται από τις προκαλούμενες ελαστικές παραμορφώσεις. Οι ίδιοι οι κύλινδροι παραμορφώνονται ελαστικά, ιδιαίτερα προς το μέσο της απόστασης μεταξύ των εδράνων, ώστε οι γενέτειρες παύουν να είναι ευθύγραμμες και μπορούν να προκαλέσουν ανομοιόμορφο πάχος στο προϊόν.

Το πέρασμα του υλικού ανάμεσα στους κυλίνδρους δημιουργεί, επίσης μια στρεπτική ροπή που ασκείται στα έδρανα και εξισορροπείται από τους κινητήρες του ελάστρου. Οι κινητήρες πρέπει να είναι ισχυροί, για να παρέχουν την ενέργεια που χρειάζεται η πλαστική παραμόρφωση του υλικού [*Mechanical Metallurgy Dieter*].

### Τυποποίηση προϊόντων έλασης

Η έλαση εκτελείται σε διάφορες φάσεις (πάσα). Το πρωτογενές υλικός είναι πλίνθωμα (ingot), προϊόν χύτευσης, ενώ τα προϊόντα των επόμενων φάσεων διακρίνονται σε επιμήκη (ράβδοι, μπιγέτες, μορφοδοκοί) και σε πλατιά προϊόντα (πλάκες, ελάσματα, ταινίες).

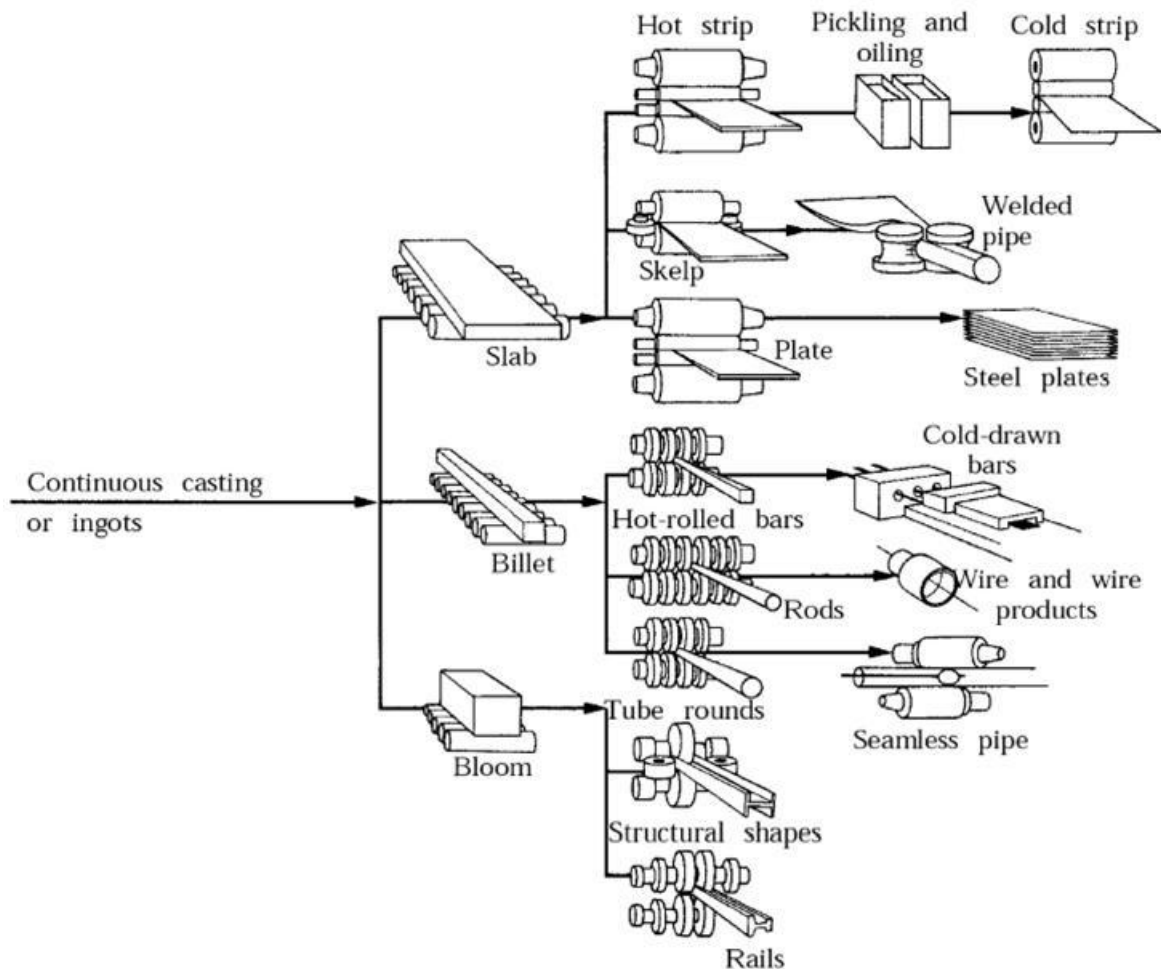
Ανάλογα με τη φάση της έλασης και τη μορφή του προϊόντος, ακολουθείται η εξής τυποποίηση:

- a) Ημι - κατεργασμένα προϊόντα (semi finished products) [*Mechanical Metallurgy Dieter*].
- Μπιγέτα πρώτης έλασης (bloom) – τετραγωνικής διατομής με εμβαδόν  $A \geq 15 \times 15 \text{ cm}^2$ .
  - Περαιτέρω μείωση του πάχους μπορεί να οδηγήσει σε:
    1. Μπιγέτα (billet) τετραγωνικής διατομής με μικρότερο εμβαδόν ( $A \geq 4 \times 4 \text{ cm}^2$ ) ή σε
    2. Πλάκα (slab) ορθογωνικής διατομής με εμβαδόν  $A \geq 100 \text{ cm}^2$  και πλάτος τουλάχιστον διπλάσιο του πάχους της.
- b) Τελικά προϊόντα (finishes products)

Περαιτέρω διαμόρφωση των ημι – κατεργασμένων προϊόντων οδηγεί σε:

- Επιμήκη προϊόντα μορφής που προέρχονται από την έλαση μπιγетών (μορφοδοκοί, ήλοι με σπείρωμα, δακτύλιοι κλπ.) με ειδικές μεθόδους έλασης.
- Πλατιά προϊόντα που προέρχονται από την έλαση πλακών και διακρίνονται ανάλογα με το πάχος και το πλάτος τους σε [*Mechanical Metallurgy Dieter*]:
  1. Ελάσματα (plates) με πάχος  $\geq 6 \text{ mm}$
  2. Λεπτά ελάσματα (sheets) με πάχος  $< 6 \text{ mm}$  και πλάτος  $\geq 6 \text{ mm}$
  3. Λεπτές λωρίδες (strips) με πάχος  $< 6 \text{ mm}$  και πλάτος  $< 6 \text{ mm}$ .

Η εικόνα 1.7 παρουσιάζει συνοπτικά διάφορες φάσεις της έλασης και τα προϊόντα όπως περιγράφηκαν.



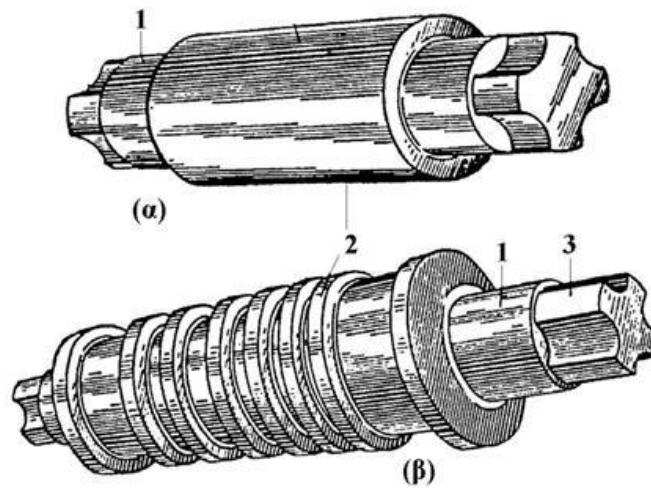
Εικόνα 1.7: Φάσεις και προϊόντα έλασης

### Γενικά χαρακτηριστικά των ελάστρων

Η εργαλειομηχανή της έλασης ονομάζεται έλαστρο (mill). Αποτελείται από τα ράουλα (rolls), οι άξονες των οποίων στρέφονται μέσα σε κουζινέτα (bearings), ενώ όλα μαζί είναι εγκατεστημένα σε ειδικό κέλυφος (housing).

Τα άκρα των αξόνων είναι κατάλληλα διαμορφωμένα ώστε να συνδέονται μέσω σταυροειδών συνδέσμων με το αξονικό σύστημα της εγκατάστασης, το οποίο με τη σειρά του μεταδίδει κίνηση στα ράουλα (ανεξάρτητη για κάθε ράουλο) παραλαμβάνοντας ισχύ από σύστημα ηλεκτροκινητήρα/μειωτήρα.

Τα ράουλα είναι χαλύβδινα κυλινδρικά τύμπανα με ομοιόμορφη διατομή ή έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα (ράουλα μορφής), ώστε να αποδίδουν το αντίστοιχο γεωμετρικό σχήμα στο τελικό προϊόν προϊόντος (εικόνα 1.8).



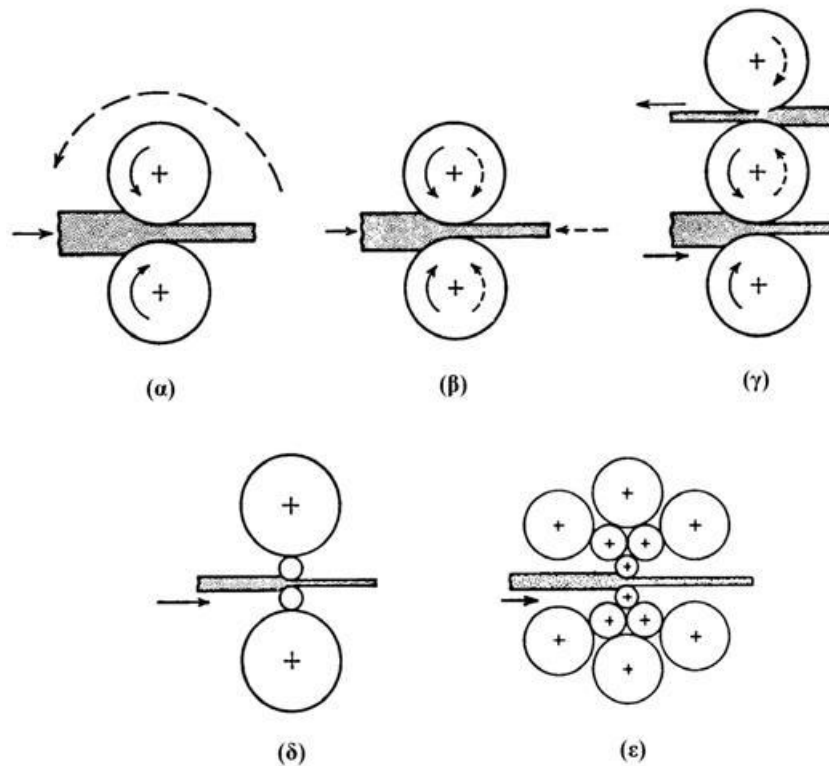
Εικόνα 1.8: Τύποι ραούλων: (α) Κοινό ράουλο, (β) ράουλο μορφής  
1: Άξονας έδρασης, 2: Κύριο σώμα ραούλου, 3: Άκρο σύνδεσης

Τα ράουλα που επιτελούν την πλαστική παραμόρφωση τοποθετούνται με οριζόντιους άξονες το ένα πάνω στο άλλο, ενώ κατακόρυφα ράουλα χρησιμοποιούνται βοηθητικά για τον έλεγχο του πλάτους του τελικού [Mechanical Metallurgy Dieter].

### Τύποι ελάστρων

Τα έλαστρα ανάλογα με τον αριθμό, τη διάταξη και τη φορά περιστροφής των κυλίνδρων διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες (εικόνα 1.9).

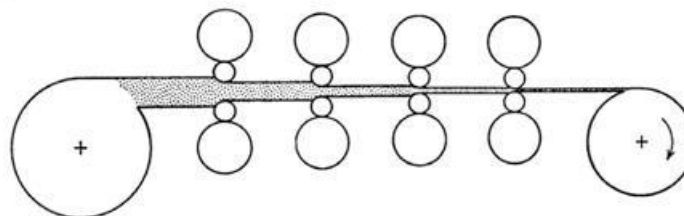
- Έλαστρα με δυο κυλίνδρους (two – high mills)
- Έλαστρα με τρεις κυλίνδρους (three – high mills)
- Έλαστρα με τέσσερις κυλίνδρους (four – high mills)
- Τα γενικά έλαστρα (universal mills)
- Τα έλαστρα με πολλούς κυλίνδρους (cluster mills)
- Τα πλανητικά έλαστρα



Εικόνα 1.9: Τύποι ράουλων

Στα συνηθισμένα έλαστρα η μείωση του πάχους σε ένα πάσο δεν ξεπερνά το 50%, δηλαδή μια σχέση αρχικού προς τελικό πάχος 2:1.

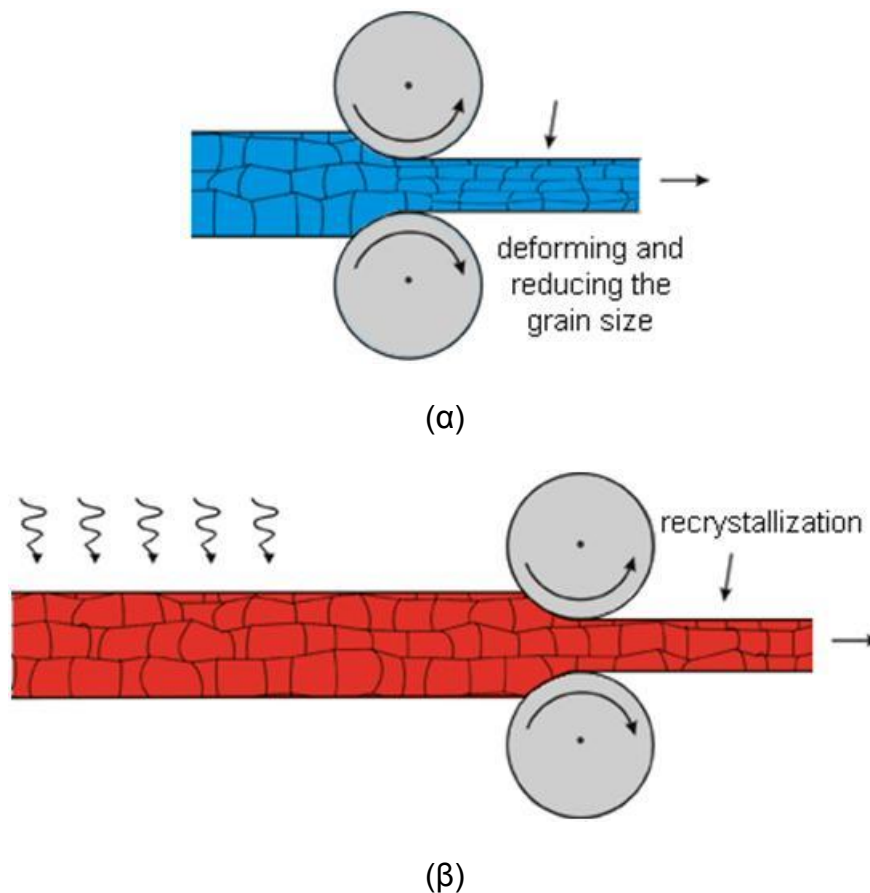
Για μεγαλύτερες μειώσεις του πάχους πρέπει το υλικό να ελαθεί σε περισσότερα πάσα. Για το σκοπό αυτό δημιουργούνται συστοιχίες ελάστρων, οι οποίες δεν μεταβάλουν μόνο τις διαστάσεις του υλικού αλλά και ενδεχομένως και το σχήμα μέχρι τη τελική μορφή (Εικόνα 1.10) [Μεταλλοτεχνία, Γ.Δ. Παπαδημητρίου].



Εικόνα 1.10: Συστοιχία ελάστρων

## 1.5 Θερμή έλαση – Χάλυβες θερμής έλασης

Η θερμή έλαση αποτελεί μια μεταλλουργική διεργασία κατά την οποία το υλικό ελάσσεται όταν βρίσκεται σε θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης. Κατά τη διάρκεια της έλασης οι κόκκοι του υλικού παραμορφώνονται εξαιτίας των τάσεων που τους ασκούνται. Στη περίπτωση όμως της θερμής έλασης δεν εισάγεται ενδοτράχυνση στο υλικό καθώς οι κόκκοι ανακρυσταλλώνονται και οι η παραμόρφωση τους από την έλαση αναιρείται (Εικόνα 1.11). Το γεγονός αυτό δίνει τη δυνατότητα μεταβολής των διαστάσεων του υλικού σε μεγάλο βαθμό.



Εικόνα 1.11: Παραμόρφωση των κόκκων του υλικού στην περίπτωση της ψυχρής έλασης (α) και στην περίπτωση της θερμής έλασης (β)

### Γενικά χαρακτηριστικά - Κατηγορίες

Οι χάλυβες της θερμής έλασης είναι κυρίως κοινοί χάλυβες χωρίς κραμάτωση, οι οποίοι βρίσκουν εφαρμογή χωρίς περαιτέρω θερμική κατεργασία. Το γεγονός αυτό δικαιολογεί το ότι δεν είναι κραματωμένοι, καθώς για να επηρεάσουν τα διάφορα κραματικά στοιχεία τις ιδιότητες του υλικού θα πρέπει να προηγηθεί θερμική

κατεργασία. Μοναδική εξαίρεση αποτελούν οι ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες υψηλού ορίου ελαστικότητας.

Ο βαθμός αποξειδωσης των χαλύβων θερμής έλασης παίζει σπουδαίο ρόλο στις ιδιότητες και είναι καθοριστικός για τις χρήσεις. Επηρεάζει την ποιότητας από πλευράς ελαττωμάτων, χημικής ομοιογένειας, θερμοκρασίας μετάπτωσης από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση και επιφανειακή κατάσταση [*Φυσική μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα, Γ.Δ. Παπαδημητρίου*].

Οι χάλυβες θερμής έλασης χαρακτηρίζονται από το βαθμό αποξειδωσης σε καθησυχασμένους και μη καθησυχασμένους. Επίσης υπάρχει και μια ενδιάμεση κατηγορία, οι ημικαθησυχασμένοι.

Στον μη καθησυχασμένο χάλυβα δεν έχει απομακρυνθεί το οξυγόνο που ήταν διαλυμένο στο τήγμα κατά το στάδιο της παραγωγής, με συνέπεια ένα μεγάλο μέρος του να αντιδρά με μέρος του άνθρακα και να σχηματίσει μονοξειδίο και διοξειδίο του άνθρακα, τα οποία εν μέρει παγιδεύονται κατά τη στερεοποίηση μέσα στο μέταλλο υπό μορφή λεπτών φουσαλίδων (blow holes).

Ο καθησυχασμένος χάλυβας έχει υποστεί ισχυρή αποξειδωση, με χρήση αποξειδωτικών (Si, Al, Mn, Ca) τα οποία δεσμεύουν το οξυγόνο υπό μορφή οξειδίων. Χάλυβες θερμής έλασης αυτής της κατηγορίας είναι εξαιρετικής ποιότητας, με ελάχιστη ανομοιογένεια στη χημική σύνθεση και με ομοιόμορφες μηχανικές ιδιότητες.

Οι ημι – καθησυχασμένοι χάλυβες αποτελούν μια ενδιάμεση κατάσταση των δυο βασικών κατηγοριών που αναφέρθηκαν.

Ο χάλυβας θερμής έλασης κυκλοφορεί στο εμπόριο σε μορφή επιμηκών προϊόντων και πλατεών. Στα πρώτα υπάγονται ράβδοι διαφόρων διατομών δομικά προφίλ, σιδηροτροχιές, χονδρόσυρμα, σίδηρος οπλισμού σκυροδέματος κλπ. Στα δεύτερα υπάγονται τα ελάσματα, φύλλα και ταινίες [*Φυσική μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα, Γ.Δ. Παπαδημητρίου*].

### **Μηχανικά χαρακτηριστικά**

Για τη σχεδίαση το όριο ελαστικότητας είναι το κυριότερο, ενώ το όριο θραύσης χρησιμεύει κυρίως ως δείκτης της αντοχής σε κόπωση. Η όλκιμότητα, είτε ως επιμήκυνση κατά τη θραύση είτε ως μείωση της διατομής, δεν αποτελεί κριτήριο

σχεδίασης, αλλά χρησιμεύει ως δείκτης της δυσθραυστότητας και αποτελεί εγγύηση ασφαλείας για τις κατασκευές, διότι μια εκτεταμένη παραμόρφωση ειδοποιεί για μια επικείμενη θραύση.

Στους χάλυβες που έχει αφαιρεθεί η επιφάνεια με μηχανουργική κατεργασία η αντοχή σε κόπωση είναι περίπου το 40% της αντοχής σε εφελκυσμό. Όταν όμως διατηρείται η αρχική οξειδωμένη επιφάνεια, τότε η αντοχή στην κόπωση μειώνεται σημαντικά, διότι επηρεάζεται από τα επιφανειακά οξείδια και άλλα ελαττώματα, από τη μεγάλη τραχύτητα και από την εξανθράκωση σε κάποιο βαθμό [Φυσική μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα, Γ.Δ. Παπαδημητρίου].

## 1.6 Απλή γραμμική παλινδρόμηση

### Βασικοί ορισμοί στην στατιστική

Στατιστική είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που ασχολείται με τη συλλογή, τη συνοπτική παρουσίαση και ανάλυση - ερμηνεία παρατηρήσεων που υπόκεινται σε τυχαίες μεταβολές με τελικό στόχο την εξαγωγή βάσιμων συμπερασμάτων και τη λήψη βέλτιστων αποφάσεων σε συνθήκες αβεβαιότητας [Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική, Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης].

Πληθυσμός (Population - Sample Space): είναι ένα σύνολο, τα στοιχεία του οποίου εξετάζονται ως προς ένα ή περισσότερα χαρακτηριστικά τους.

Μεταβλητή (Variable): ενός πληθυσμού είναι το χαρακτηριστικό ως προς το οποίο εξετάζεται ο πληθυσμός. Μεταβλητές είναι δύο ειδών, ποιοτικές ή ποσοτικές. Οι ποσοτικές μεταβλητές διακρίνονται σε διακριτές και συνεχείς.

Συχνότητα (Frequency): μιάς τιμής  $x_i$  της μεταβλητής  $X$  μεγέθους  $n \times N$  είναι ο φυσικός αριθμός  $v_i \times N$ ,  $v_i \leq n$ , που δείχνει το πλήθος εμφάνισης της τιμής  $x_i$ .

Ισχύει προφανώς:  $v_1 + v_2 + \dots + v_\mu = n$

Σχετική συχνότητα: μιας τιμής  $x_i$  της μεταβλητής  $X$  είναι ο αριθμός  $f_i = \frac{v_i}{n}$  (1) και

$i = 1, 2, \dots, \mu$  όπου  $\mu \leq n$

Ισχύει προφανώς

$$f_1 + f_2 + \dots + f_\mu = 1 \quad (1.6)$$

Η σχετικής συχνότητα εκφράζεται και επί τοις εκατό, οπότε



$$f_i\% = 100 \cdot f_i \quad (1.7)$$

Αθροιστική συχνότητα  $N_i$ : είναι το πλήθος των παρατηρήσεων που είναι μικρότερες ή ίσες της τιμής  $x_i$ .

Ομοίως και σχετική αθροιστική συχνότητα  $F_i$ .

Ο συμβολισμός  $\sum_{i=1}^v x_i$ :

$$\sum_{i=1}^v x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_v \quad (1.8)$$

Ιδιότητες:

$$1. \sum_{i=1}^v (\lambda \cdot x_i) = \lambda \cdot x_1 + \lambda \cdot x_2 + \dots + \lambda \cdot x_v = \lambda \cdot \sum_{i=1}^v x_i \quad (1.9)$$

$$2. \sum_{i=1}^v (x_i + y_i) = (x_1 + y_1) + (x_2 + y_2) + \dots + (x_v + y_v) = \sum_{i=1}^v x_i + \sum_{i=1}^v y_i \quad (1.10)$$

$$\text{είναι φανερό ότι ισχύει εν γένει} \quad \sum_{i=1}^n x_i^2 \neq \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2 \quad (1.11)$$

Αριθμητικός μέσος ή μέση τιμή (First moment or Mean or Average):

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_v}{v} = \frac{1}{v} \cdot \sum_{i=1}^v x_i \quad (1.12)$$

εάν οι τιμές  $x_i$  έχουν συχνότητες  $v_i, i=1, 2, \dots, \mu$  τότε η μέση τιμή δίνεται από τον τύπο:

$$\bar{x} = \frac{v_1 \cdot x_1 + v_2 \cdot x_2 + \dots + v_\mu \cdot x_\mu}{v} = \frac{1}{v} \cdot \sum_{i=1}^{\mu} v_i \cdot x_i = \sum_{i=1}^{\mu} x_i \cdot f_i \quad (1.13)$$

δοθέντος ότι  $f_i = \frac{v_i}{v}$

Εύκολα αποδεικνύεται ότι εάν στις τιμές της μεταβλητής  $X$  προσθέσουμε έναν αριθμό  $a$   $X \pm R$  τότε και η μέση τιμή μεταβάλλεται κατά  $a$ .

$$\text{Δηλαδή} \quad \overline{X + a} = \bar{X} + a \quad \text{με} \quad a \in X \pm R. \quad (1.14)$$

Επίσης εάν οι τιμές της  $X$  πολλαπλασιασθούν επί  $k$   $X \pm R$  τότε και η μέση τιμή πολλαπλασιάζεται επί  $k$ .

$$\text{Δηλαδή} \quad \overline{k \cdot X} = k \cdot \bar{X} \quad \text{με} \quad k \in X \pm R. \quad (1.15)$$

**Διάμεσος  $\delta$  (Median):** ενός δείγματος παρατηρήσεων, οι οποίες έχουν διαταχθεί κατά αύξουσα τάξη, είναι η μεσαία παρατήρηση εάν το πλήθος των παρατηρήσεων είναι περιττό ή ο μέσος όρος των δύο μεσαίων παρατηρήσεων εάν το πλήθος είναι άρτιο.

Στην περίπτωση ομαδοποιημένων μεταβλητών η διάμεσος βρίσκεται από το ιστόγραμμα των αθροιστικών συχνοτήτων. Αλγεβρικά η διάμεσος δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = l_i + \frac{\frac{v}{2} - N_{i-1}}{v_i} \cdot c_i \quad (1.16)$$

όπου  $l_i$  το κατώτερο όριο της κλάσης που περιέχει την διάμεσο,  $v_i$  η συχνότητα και  $c_i$  το πλάτος της κλάσης αντίστοιχα,  $N_{i-1}$  η αθροιστική συχνότητα της προηγούμενης κλάσης και  $v$  το μέγεθος του δείγματος. Δηλαδή η διάμεσος είναι το σημείο τομής του ευθυγράμμου τμήματος, που ενώνει το άνω δεξί άκρο της κλάσης που περιέχει τη διάμεσο με το άνω δεξί άκρο της προηγούμενης κλάσης, και της ευθείας  $y=v/2$  [Εισαγωγή στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστική, Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης].

### **Εξαρτημένη εναντίον ανεξάρτητων μεταβλητών**

Οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι αυτές που χειριζόμαστε ενώ οι εξαρτώμενες μεταβλητές μόνο μετρούνται ή καταχωρούνται. Αυτή η διάκριση εμφανίζεται ορολογικά μπερδεμένη, διότι όπως μερικοί σπουδαστές λένε, “όλες οι μεταβλητές εξαρτώνται από κάτι”. Εντούτοις, μόλις συνηθίσουμε αυτήν τη διάκριση, τότε γίνεται αναπόφευκτη. Οι όροι εξαρτώμενη και ανεξάρτητη μεταβλητή ισχύουν συνήθως στην πειραματική έρευνα όπου κάποιες μεταβλητές τις χειριζόμαστε και υπό αυτή την έννοια είναι “ανεξάρτητες” από τα αρχικά σχέδια, χαρακτηριστικά γνωρίσματα, προθέσεις κ.λπ. των θεμάτων. Παραδείγματος χάριν, εάν σε ένα πείραμα, τα αρσενικά συγκρίνονται με τα θηλυκά σε σχέση με τη λευκή αρίθμηση των κυττάρων τους (White Cell Count, WCC), το γένος θα μπορούσε να κληθεί ανεξάρτητη μεταβλητή και το WCC εξαρτώμενη μεταβλητή [Στατιστική, Α. Λεοντίσης].

### **Δύο βασικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα κάθε σχέσης μεταξύ των μεταβλητών**

Οι δύο πιο στοιχειώδεις ιδιότητες κάθε σχέσης μεταξύ των μεταβλητών είναι (α) το μέγεθος της σχέσης (magnitude) (ποσοτικό) και (β) η αξιοπιστία (reliability).

**Μέγεθος.** Το μέγεθος μπορεί πιο εύκολα να κατανοηθεί και να μετρηθεί από την αξιοπιστία. Παραδείγματος χάριν, εάν έχει βρεθεί στο δείγμα μας κάθε αρσενικό να έχει υψηλότερο WCC από οποιοδήποτε θηλυκό, θα μπορούσαμε να πούμε ότι το μέγεθος της σχέσης μεταξύ των δύο μεταβλητών (Gender και WCC) είναι πολύ υψηλό στο δείγμα μας. Με άλλα λόγια, θα μπορούσαμε να προβλέψουμε την μία μεταβλητή βασιζόμενη στην άλλη (τουλάχιστον μεταξύ των μελών του δείγματός μας) [Στατιστική, Α. Λεοντίσης].

**Αξιοπιστία.** Η αξιοπιστία μιας σχέσης είναι μια πολύ λιγότερο διαισθητική έννοια, αλλά

εξαιρετικά σημαντική. Αναφέρεται στην “αντιπροσωπευτικότητα” του αποτελέσματος από το

συγκεκριμένο δείγμα μας για ολόκληρο πληθυσμό. Με άλλα λόγια, λέει πόσο πιθανό είναι να βρεθεί μια παρόμοια σχέση εάν το πείραμα ξαναγίνει με άλλα δείγματα από τον ίδιο

πληθυσμό. Πρέπει να θυμόμαστε ότι δεν ενδιαφερόμαστε σχεδόν ποτέ, μόνο γι’ αυτό που

συμβαίνει στο δείγμα μας. Ενδιαφερόμαστε για το δείγμα στην έκταση την οποία μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τον πληθυσμό. Εάν η μελέτη μας ικανοποιεί μερικά ειδικά κριτήρια, τότε η αξιοπιστία μιας σχέσης μεταξύ των μεταβλητών που παρατηρούνται στο δείγμα μας μπορεί να υπολογιστεί ποσοτικά και να αντιπροσωπευθεί χρησιμοποιώντας ένα τυποποιημένο μέτρο (το τεχνικά αποκαλούμενο p-value ή στατιστικό επίπεδο σημαντικότητας) [Στατιστική, Α. Λεοντίσης].

### **Απλή γραμμική παλινδρόμηση**

Στην *παλινδρόμηση* σχεδιάζουμε την εξάρτηση μιας τ.μ.  $Y$ , που την ονομάζουμε εξαρτημένη μεταβλητή (dependent variable), από κάποια άλλη μεταβλητή  $X$  που την ονομάζουμε ανεξάρτητη μεταβλητή (independent variable). Η ανεξάρτητη μεταβλητή δε θεωρείται τυχαία αλλά παίρνει καθορισμένες τιμές που διαλέγουμε εμείς ή δίνονται από το πρόβλημα που μελετάμε. Ενώ λοιπόν η συσχέτιση είναι

συμμετρική ως προς τα  $X$  και  $Y$ , στην παλινδρόμηση η εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  'καθοδηγείται' από την ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$ . Γι αυτό και στην ανάλυση που κάνουμε παίζει ρόλο ποιόν από τους δύο παράγοντες που μετράμε ορίζουμε σαν ανεξάρτητη μεταβλητή και ποιόν σαν εξαρτημένη, όταν αυτές δεν ορίζονται ξεκάθαρα από το πρόβλημα. Για παράδειγμα, όταν μετράμε τη διατμητική αντοχή του αργίλου σε διάφορα βάθη, θέλουμε να μελετήσουμε την (γραμμική) εξάρτηση της διατμητικής αντοχής του αργίλου από το βάθος τους εδάφους και γι αυτό η διατμητική αντοχή του αργίλου είναι η εξαρτημένη μεταβλητή  $Y$  και το βάθος του εδάφους η ανεξάρτητη μεταβλητή  $X$ . [Το Κλασσικό Πολλαπλό Γραμμικό Μοντέλο Παλινδρόμησης – Στατιστικά Συμπεράσματα και Εκτιμήσεις, Κιουφεντζή].

Η εξαρτημένη τ.μ.  $Y$  ακολουθεί κάποια κατανομή με αθροιστική συνάρτηση κατανομής

$F_Y(y|X = x)$ , δεσμευμένη για κάθε τιμή  $x$  της μεταβλητής  $X$ . Περιορίζουμε τη μελέτη του

προβλήματος στη μέση τιμή και υποθέτουμε εδώ ότι η εξάρτηση εκφράζεται από μια γραμμική σχέση

$$E(Y | X = x) = \alpha + \beta x \quad (1.17)$$

και η σχέση αυτή λέγεται γραμμική παλινδρόμηση της  $Y$  στη  $X$  (linear regression) [οι τιμές της  $Y$  για κάθε τιμή  $X = x$  παλινδρομούνται γύρω από το σημείο  $y = E(Y | X = x)$  της ευθείας  $y = \alpha + \beta x$ , δηλαδή οι τιμές της  $Y$  για κάθε τιμή της  $X$  βρίσκονται πάνω και κάτω από αυτήν την ευθεία]. Το πρόβλημα της παλινδρόμησης είναι η εύρεση των παραμέτρων  $\alpha$  και  $\beta$  που εκφράζουν καλύτερα τη γραμμική εξάρτηση της  $Y$  από τη  $X$ . Κάθε ζεύγος τιμών  $(\alpha, \beta)$  καθορίζει μια διαφορετική γραμμική σχέση που εκφράζεται γεωμετρικά από ευθεία γραμμή και οι δύο παράμετροι ορίζονται ως :

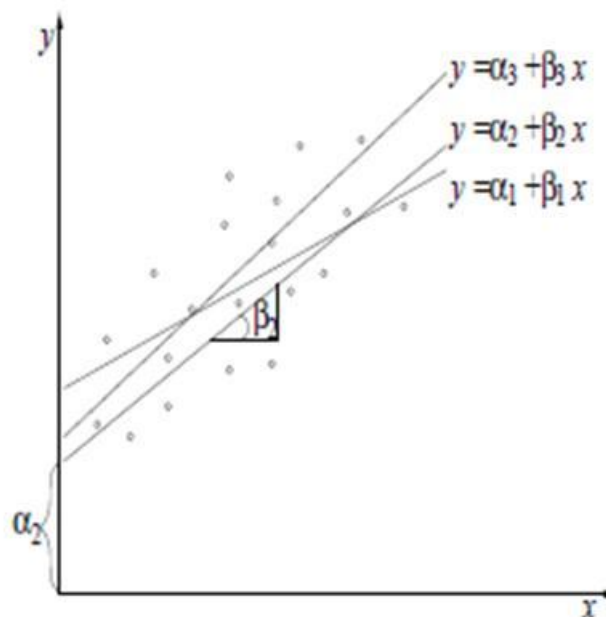
- Ο σταθερός όρος  $\alpha$  είναι η τιμή του  $y$  για  $x = 0$  (intercept).
- Ο συντελεστής  $\beta$  του  $x$  είναι η κλίση (slope) της ευθείας ή αλλιώς ο συντελεστής παλινδρόμησης (regression coefficient).

Αν θεωρήσουμε τις παρατηρήσεις  $(x_1, y_1), \dots, (x_n, y_n)$  και το διάγραμμα διασποράς που τις απεικονίζει σαν σημεία, μπορούμε να σχηματίσουμε πολλές

τέτοιες ευθείες που προσεγγίζουν την υποτιθέμενη γραμμική εξάρτηση της  $E(Y | X = x)$  ως προς  $X$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.12. Για κάποια τιμή  $x_i$  της  $X$  αντιστοιχούν διαφορετικές τιμές  $y_i$  της  $Y$ , σύμφωνα με κάποια κατανομή πιθανότητας  $F_Y(y_i | X = x_i)$ , δηλαδή μπορούμε να θεωρήσουμε την  $y_i$  σαν τ.μ. [θα ήταν σωστότερο να χρησιμοποιούσαμε το συμβολισμό  $Y_i$  αντί  $y_i$ , όπου ο δείκτης  $i$  ορίζει την εξάρτηση από το  $X = x_i$ , αλλά θα χρησιμοποιήσουμε εδώ τον ίδιο συμβολισμό  $y_i$  για την τ.μ. και την παρατήρηση]. Η τ.μ.  $y_i$  για κάποια τιμή  $x_i$  της  $X$  θα δίνεται κάτω από την υπόθεση της γραμμικής παλινδρόμησης ως

$$y_i = \alpha + \beta x_i + \epsilon_i \quad (1.18)$$

όπου  $\epsilon_i$  είναι κι αυτή τ.μ., λέγεται σφάλμα παλινδρόμησης (regression error) κι ορίζεται ως η διαφορά της  $y_i$  από τη δεσμευμένη μέση τιμή  $E(Y | X = x_i)$  (**σχέση 1.18**).



Εικόνα 1.12: Ευθείες γραμμικής παλινδρόμησης

Για την ανάλυση της γραμμικής παλινδρόμησης κάνουμε τις παρακάτω υποθέσεις :

- Η μεταβλητή  $X$  είναι *ελεγχόμενη* για το πρόβλημα που μελετάμε, δηλαδή γνωρίζουμε τις τιμές της χωρίς καμιά αμφιβολία.
- Η σχέση (1.17) ισχύει, δηλαδή η εξάρτηση της  $Y$  από τη  $X$  είναι γραμμική.

- $E(\epsilon_i) = 0$  και  $\text{Var}(\epsilon_i) = \sigma^2$   $\epsilon$  για κάθε τιμή  $x_i$  της  $X$ , δηλαδή το σφάλμα παλινδρόμησης έχει μέση τιμή μηδέν για κάθε τιμή της  $X$  και η διασπορά του είναι σταθερή και δεν εξαρτάται από τη  $X$ .

Η τελευταία συνθήκη είναι ισοδύναμη με τη συνθήκη  $\text{Var}(Y | X = x) = \sigma^2$   $Y | X$ , δηλαδή ότι η διασπορά της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y$  είναι η ίδια για κάθε τιμή της  $X$  και μάλιστα είναι  $\sigma^2$   $Y | X = \sigma^2$   $\epsilon \equiv \sigma^2$ , όπως προκύπτει από τη σχέση (1.18), αφού οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  είναι σταθερές και το  $x_i$  γνωστό. Η ιδιότητα αυτή λέγεται *ομοσκεδαστικότητα* και αντίθετα έχουμε *ετεροσκεδαστικότητα* όταν η διασπορά της  $Y$  (ή του σφάλματος  $\epsilon$ ) μεταβάλλεται με τη  $X$ .

Γενικά για να εκτιμήσουμε τις παραμέτρους της γραμμικής παλινδρόμησης με τη μέθοδο

των ελαχίστων τετραγώνων, δεν είναι απαραίτητο να υποθέσουμε κάποια συγκεκριμένη δεσμευμένη κατανομή  $F_Y(y_i | X = x_i)$  της  $Y$  ως προς τη  $X$ . Αν θέλουμε όμως να υπολογίσουμε διαστήματα εμπιστοσύνης για τις παραμέτρους θα χρειαστούμε να υποθέσουμε κανονική δεσμευμένη κατανομή για τη  $Y$ . Επίσης οι παραπάνω υποθέσεις για γραμμική σχέση και σταθερή διασπορά αποτελούν χαρακτηριστικά πληθυσμών με κανονική κατανομή. Συνήθως λοιπόν σε προβλήματα γραμμικής παλινδρόμησης υποθέτουμε ότι η δεσμευμένη κατανομή της  $Y$  είναι κανονική.

$$Y | X = x \sim N(\alpha + \beta x, \sigma^2) \quad (1.19)$$

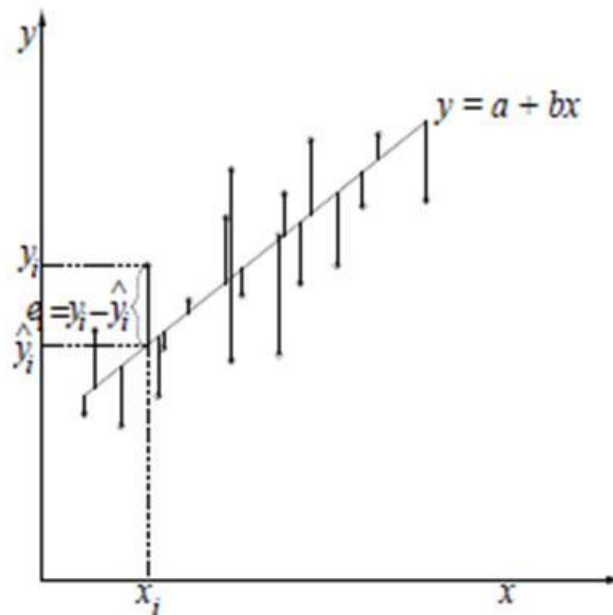
Λύση στο πρόβλημα της γραμμικής παλινδρόμησης με τις υποθέσεις που ορίστηκαν παραπάνω αποτελεί ο προσδιορισμός της σταθερού όρου της παλινδρόμησης  $\alpha$  και του συντελεστή της παλινδρόμησης  $\beta$  για να γνωρίζουμε την ευθεία της παλινδρόμησης αλλά και της διασποράς  $\sigma^2$  για να γνωρίζουμε το βαθμό μεταβλητότητας γύρω από την ευθεία [Το Κλασικό Πολλαπλό Γραμμικό Μοντέλο Παλινδρόμησης – Στατιστικά Συμπεράσματα και Εκτιμήσεις, Κιουφεντζή].

Η εκτίμηση των παραμέτρων  $\alpha$  και  $\beta$  γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (Παράρτημα 2 Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων).

### Εκτίμηση της διασποράς των σφαλμάτων παλινδρόμησης

Για κάθε δοθείσα τιμή  $x_i$  με τη βοήθεια της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων εκτιμούμε την τιμή  $y_i$  που γενικά είναι διαφορετική από την πραγματική τιμή  $y_i$ . Η

διαφορά  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  είναι η κατακόρυφη απόσταση της πραγματικής τιμής από την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων και λέγεται σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων ή απλά υπόλοιπο (residual). Στην εικόνα 1.13 απεικονίζονται τα υπόλοιπα της παλινδρόμησης. Το υπόλοιπο  $e_i$  είναι η εκτίμηση του σφάλματος παλινδρόμησης εἰ αντικαθιστώντας απλά τις παραμέτρους παλινδρόμησης  $a$  και  $b$  με τις εκτιμήσεις ελαχίστων τετραγώνων  $a$  και  $b$  στον ορισμό του σφαλμάτος  $e_i = y_i - a - \beta x_i$ .



Εικόνα 1.13: Ευθεία ελαχίστων τετραγώνων και υπόλοιπα

Άρα η εκτίμηση της διασποράς  $\sigma^2$  του σφάλματος (που είναι κι η δεσμευμένη διασπορά της  $Y$  ως προς  $X$ ) δίνεται από τη δειγματική διασπορά  $s^2$  των υπολοίπων  $e_i$

$$s^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1.20)$$

### Συντελεστής προσδιορισμού

Με τον συντελεστή προσδιορισμού μπορούμε να ελέγξουμε την αξία του απλού γραμμικού μοντέλου, το οποίο προσαρμόζουμε στα δεδομένα. Ο συντελεστής προσδιορισμού εκφράζει το ποσοστό της μεταβλητότητας της μεταβλητής  $Y$  που εξηγείται από την μεταβλητή  $X$ . Όσο πιο κοντά βρίσκεται η τιμή του  $R^2$  στην μονάδα, τόσο πιο ισχυρή γίνεται η γραμμική σχέση εξάρτησης των μεταβλητών  $Y$  και  $X$  (σχέση 1.21).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (1.,21)$$

Αποδεικνύεται ότι στο απλό γραμμικό μοντέλο, η παραπάνω ποσότητα ισούται με το τετράγωνο του δειγματικού συντελεστή συσχέτισης  $r$ . Γενικά όσο μεγαλύτερες τιμές παίρνει ο συντελεστής προσδιορισμού τόσο καλύτερη προσαρμογή της ευθείας έχουμε.



## Κεφάλαιο 2

### Υλικό και πειραματική διαδικασία συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με χημική σύσταση

#### **2.1 Περιγραφή υλικού στη συσχέτιση μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση**

Το υλικό που εξετάζεται είναι χονδρόσυρμα που παράγεται με θερμή έλαση. Το χονδρόσυρμα έχει πρακτικά κυλινδρική μορφή και λεία επιφάνεια και αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή σύρματος (μικρότερης διαμέτρου) ή πλεγμάτων. Τα υλικά που εξετάζονται έχουν παραχθεί από την ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. και ταξινομούνται στις κατηγορίες SAE 1008 (ASTM A5210M) ή S235JR (EN10025). Η χημική σύσταση, η διάμετρος καθώς και τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του υλικού παρουσιάζονται στους πίνακες 2.1 και 2.2.

Πίνακας 2.1: Χημική σύσταση και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού για διάμετρο 5,5mm και 6mm.

Όνομαστική διάμετρος (mm)	5,5				6			
Χημικής σύσταση (% κ.β.)	Min	Max	Average	StDev	Min	Max	Average	StDev
Άνθρακας, <b>C</b>	0,07	0,11	0,09	0,010	0,07	0,15	0,09	0,010
Μαγγάνιο, <b>Mn</b>	0,37	0,50	0,43	0,020	0,39	0,48	0,43	0,020
Θείο, <b>S</b>	0,02	0,04	0,03	0,005	0,02	0,05	0,03	0,010
Φώσφορος, <b>P</b>	0,06	0,03	0,01	0,004	0,01	0,03	0,01	0,004
Πυρίτιο, <b>Si</b>	0,07	0,16	0,10	0,020	0,06	0,01	0,10	0,010
Νικέλιο, <b>Ni</b>	0,08	0,19	0,11	0,010	0,06	0,23	0,11	0,020
Χρώμιο, <b>Cr</b>	0,03	0,13	0,07	0,020	0,04	0,12	0,08	0,020
Χαλκός, <b>Cu</b>	0,26	0,51	0,40	0,060	0,23	0,66	0,42	0,060
Μολυβδαίνιο, <b>Mo</b>	0,01	0,05	0,02	0,005	0,01	0,07	0,02	0,007
Άζωτο, <b>N</b>	0,01	0,01	0,01	0,002	0,00	0,01	0,01	0,001
Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, <b>Ceq</b>	0,19	0,25	0,22	0,010	0,19	0,28	0,22	0,010
<b>Μηχανικά χαρακτηριστικά</b>								
Όριο διαρροής, <b>R<sub>eH</sub></b> (MPa)	378	304	335	14	365	231	335	16
Εφελκυστική αντοχή, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa)	518	428	466	15	510	302	465	20
Ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση, <b>Agt</b> (%)	20,2	16,1	18,2	0,9	20,9	11,7	17,9	1,2
Πλήθος παρατηρήσεων	172				124			

Πίνακας 2.2: Χημική σύσταση και μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού για διάμετρο 7mm και 8mm.

Όνομαστική διάμετρος (mm)	7				8			
Χημικής σύσταση (% κ.β.)	Min	Max	Average	StDev	Min	Max	Average	StDev
Άνθρακας, <b>C</b>	0,08	0,10	0,09	0,010	0,08	0,11	0,09	0,010
Μαγγάνιο, <b>Mn</b>	0,46	0,46	0,46	0,000	0,40	0,49	0,45	0,020
Θείο, <b>S</b>	0,02	0,03	0,03	0,002	0,03	0,04	0,04	0,004
Φώσφορος, <b>P</b>	0,01	0,01	0,01	0,002	0,01	0,01	0,01	0,002
Πυρίτιο, <b>Si</b>	0,10	0,12	0,11	0,010	0,08	0,13	0,10	0,010
Νικέλιο, <b>Ni</b>	0,12	0,12	0,12	0,000	0,10	0,18	0,12	0,020
Χρώμιο, <b>Cr</b>	0,05	0,05	0,05	0,000	0,07	0,10	0,08	0,010
Χαλκός, <b>Cu</b>	0,40	0,43	0,42	0,020	0,34	0,56	0,41	0,060
Μολυβδαίνιο, <b>Mo</b>	0,02	0,03	0,03	0,002	0,01	0,04	0,02	0,008
Άζωτο, <b>N</b>	0,01	0,01	0,01	0,000	0,01	0,01	0,01	0,001
Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, <b>Ceq</b>	0,21	0,24	0,22	0,020	0,21	0,25	0,22	0,010
<b>Μηχανικά χαρακτηριστικά</b>								
Όριο διαρροής, <b>R<sub>eH</sub></b> (MPa)	324	301	312	17	334	302	317	10
Εφελκυστική αντοχή, <b>R<sub>m</sub></b> (MPa)	452	421	437	22	457	424	438	9
Ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση, <b>Agt</b> (%)	17,5	16,8	17,2	0,5	21,5	17,2	18,8	1,4
Πλήθος παρατηρήσεων	2				11			

Η περιγραφή του υλικού στους παραπάνω πίνακες πραγματοποιείται με αναφορά της ελάχιστης, μέγιστης και μέσης τιμής καθώς και με την τυπική απόκλιση του κάθε αναφερόμενου μεγέθους.

Παρατηρούμε ότι πρόκειται για χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (προϊόν θερμής έλασης) . Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία μετά τον άνθρακα είναι, το μαγγάνιο, το πυρίτιο, το νικέλιο και ο χαλκός. Τη χαμηλότερη συγκέντρωση εμφανίζουν το μολυβδαίνιο και το άζωτο.

Ως προς τα μηχανικά χαρακτηριστικά παρατηρούμε ότι το όριο διαρροής κυμαίνεται γύρω από τη τιμή των 330 MPa και τη τιμή του ορίου θραύσης γύρω από τη τιμή των 460 MPa.

Το πλήθος των παρατηρήσεων ήταν μεγαλύτερο για τις διαμέτρους των 5,5 και 6 mm, από εκείνο των 7 και 8 mm.

## **2.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας κατά τη μελέτη συσχέτισης των μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση**

Τα κραματικά στοιχεία προσδίδουν στους χάλυβες ορισμένες μηχανικές ιδιότητες. Κατά αυτό τον τρόπο η μελέτη της επίδρασης ή της συσχέτισης που μπορεί να έχει η χημική σύσταση ενός χάλυβα, με τις μηχανικές του ιδιότητες καθίσταται ιδιαίτερως σημαντική.

Η μελέτη της συσχέτισης της χημικής σύστασης με τις μηχανικές ιδιότητες σε χάλυβα SAE 1008 επιχειρήθηκε μέσω δύο προσεγγίσεων. Η πρώτη προσέγγιση αφορούσε τη συσχέτιση της αντοχής σε θραύση με τα διάφορα κραματικά στοιχεία, ενώ η δεύτερη αφορούσε τη συσχέτιση της αντοχής σε θραύση και του ορίου διαρροής ως προς τον ισοδύναμο άνθρακα.

Η μαθηματική μέθοδος της στατιστικής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε και στις δυο προσεγγίσεις.

Κατά τη πρώτη προσέγγιση, έγινε μελέτη της συναρτησιακής εξάρτησης της αντοχής σε θραύση ( $R_m$ ) του χάλυβα ως προς τα κραματικά στοιχεία και τη διάμετρο. Η μελέτη πραγματοποιήθηκε με στατιστικές παλινδρομήσεις της αντοχής σε θραύση ως προς τα κραματικά στοιχεία και τη διάμετρο. Κατά τις διάφορες στατιστικές παλινδρομήσεις διαδοχικά γινόταν προσθήκη ενός κραματικού

στοιχείου. Συνολικά με αυτόν τον τρόπο παρήχθησαν οχτώ σχέσεις. Επίσης έγινε υπολογισμός της αντοχής σε θραύση με χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου από τη βιβλιογραφία [Διαδικασία θερμικής κατεργασίας χαλύβων για οπλισμένο σκυρόδεμα, Π. Σισμάνης], ο οποίος δεν περιείχε ισοδύναμο άνθρακα (πίνακας 3.3 αρ. τύπου 10). Το σύνολο των σχέσεων οι οποίες παρήχθησαν με αυτή τη μέθοδο κατά τη πρώτη προσέγγιση παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 αρ. τύπου 10 έως 15.

Κατά τη δεύτερη προσέγγιση έγινε συσχέτιση της αντοχής σε θραύση ως προς τον ισοδύναμο άνθρακα και μετά ως προς τον ισοδύναμο άνθρακα μαζί με τη διάμετρο.

Από τη βιβλιογραφία επιλέχθηκαν ορισμένα μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού ισοδύναμου άνθρακα. Τα μοντέλα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 2.3 [assessment of carbon equivalent formulas in predicting the properties of steel weld metals, Sukru Talas, 2009] και αποτελούν τις εξισώσεις 1,2,4,6,8,9,14,15 και 18 του πίνακα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η σχέση 1 προτείνεται από τον κανονισμό χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος για τον υπολογισμό ισοδύναμου άνθρακα για χάλυβες SAE 1008. Με χρήση αυτών των μοντέλων υπολογίστηκαν τιμές ισοδύναμου άνθρακα, οι οποίες με τον σχεδιασμό καταλλήλων διαγραμμάτων, μελετήθηκε η συσχέτιση τους με το όριο θραύσης. Παράλληλα έλαβε χώρα στατιστική παλινδρόμηση των πειραματικών τιμών του ορίου θραύσης ως προς τις τιμές του ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τα διάφορα μαθηματικά μοντέλα. Με την παλινδρόμηση δημιουργήθηκαν σχέσεις υπολογισμού του ορίου θραύσης που ήταν συναρτήσεως του ισοδύναμου άνθρακα. Από τις σχέσεις αυτές υπολογίστηκαν νέες τιμές της αντοχής σε θραύση οι οποίες συγκρίθηκαν διαγραμματικά με τις πειραματικές. Η στατιστική παλινδρόμηση έγινε είτε με χρήση μόνο του ισοδύναμου άνθρακα, είτε με χρήση του ισοδύναμου άνθρακα σε συνδυασμό με τη διάμετρο. Συνολικά όλες οι σχέσεις που δημιουργήθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3 αρ. τύπου 16 έως 33.

Κατά τη μελέτη της συσχέτισης του ορίου διαρροής ως προς τον ισοδύναμο άνθρακα, χρησιμοποιήθηκαν οι ίδιες σχέσεις υπολογισμού του ισοδύναμου άνθρακα με τη περίπτωση του ορίου θραύσης. Επίσης η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι η ίδια με τη διαφορά ότι στην περίπτωση του ορίου διαρροής

δεν έλαβε χώρα στατιστική παλινδρόμηση των τιμών του ισοδύναμου άνθρακα με τις τιμές του ορίου διαρροής.

*Πίνακας 2.3: Διάφορα μαθηματικά μοντέλα υπολογισμού ισοδύναμου άνθρακα. Το βελάκι υποδεικνύει τις σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν στην διπλωματική εργασία.*

CE title	Formula	Eqs.
$CE_{TW}^A$	$C + (Mn/6) + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	Eq (1)
AWS D1.1 <sup>A</sup>	$C + (Mn + Si)/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$	Eq (2)
$CE_{WEST38}^A$	$C + (Mn/6) + (Si/24) + (Mo/29) + (V/14)$	Eq (3)
Pcm (Ito-Bessyo) <sup>B</sup>	$C + (Si/30) + (Mn + Cu + Cr)/20 + (Ni/60) + (Mo/15) + (V/10) + 5B$	Eq (4)
Graville <sup>A</sup>	$C + (Mn/16) + (Ni/50) + (Cr/23) + (Mo/7) + (Nb/5) + (V/9)$	Eq (5)
Yurioka <sup>D</sup>	$C + f(C)[Si/24 + Mn/6 + Cu/15 + Ni/20 + (Cr + Mo + Nb + V)/5 + 5B]$ $f(C) = 0.75 + 0.25 \tanh [20(C-0.12)]$	Eq (6)
( $CE_{WES}$ ) Kihara <sup>A</sup>	$C + (Mn/6) + (Si/24) + (Ni/40) + (Cr/5) + (Mo/4) + (V/14)$	Eq (7)
Stout and Doty <sup>A</sup>	$C + (Mn/6) + (Ni/20) + (Cr + Mo)/10 + (Cu/40)$	Eq (8)
Dearden-O'Neill <sup>A</sup>	$C + (Mn/6) + (Mo/4) + (Ni/15) + (Cr/5)$	Eq (9)
Koch-Bersch <sup>C</sup>	$C + (Mn + Mo + Ni + Cr + V + Cu + Si)/20$	Eq (10)
Duren ( $CE_{PL5}$ ) <sup>F</sup>	$C + (Mn + Cu)/16 + (Si/25) + (Cr/20) + (Ni/60) + (Mo/40) + (V/15)$	Eq (11)
Winterton <sup>A</sup>	$C + (Mn/6) + (Cu/40) + (Ni/20) + (Cr-V)/10 - (Mo/50)$	Eq (12)
Breadstreet <sup>A</sup>	$C + (Mn/20) + (Ni/15) + (Cr + Mo + V)/10$	Eq (13)
Cottrell <sup>A</sup>	$C + (Mn/6) + (Cr + Mo)/5 + (V/3) + (Nb/4C) + (0.0001/S)$	Eq (14)
$CE^B$	$C + (Mn + Mo)/10 + (Cu + Cr)/20 + (Ni/40)$	Eq (15)
AWS <sup>A</sup>	$C + (Mn/4) + (Ni/20) + (Cr + V)/10 + (Cu/40) + (Mo/50)$	Eq (16)
$CE_{HSLA}^C$	$C + (Mn/16) + (Cr/23) + (Mo/7) + (Nb/5) + (V/9) - (Ni/50)$	Eq (17)
$CE_{WM}^A$	$C + (Mn + Cr + V + Si)/6 + (Mo/4) + (Nb/9) + (Ti/3) + (Cu/20) + (Ni/25) + 5B$	Eq (18)

## 2.3 Λογισμικό επεξεργασίας δεδομένων κατά τη μελέτη συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση

### Minitab

Για την πραγματοποίηση των στατιστικών παλινδρομήσεων, χρησιμοποιήθηκε το στατιστικό πρόγραμμα για ηλεκτρονικούς υπολογιστές MINITAB 14.1, της εταιρείας MINITAB INC.

### Excel

Για την δημιουργία και επεξεργασία των διαγραμμάτων χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Office Excel 2007 της εταιρείας Microsoft.

## Κεφάλαιο **3**

# **Αποτελέσματα μελέτης συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση**

---

### **3.1 Συσχέτιση αντοχής σε θραύσης με κραματικά στοιχεία**

Η συσχέτιση της αντοχής σε θραύσης με τα κραματικά στοιχεία έγινε με τη στατιστική παλινδρόμηση των τιμών των κραματικών στοιχείων του και της διαμέτρου του χάλυβα με τις πειραματικές τιμές της αντοχής σε θραύση του υλικού μας όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 4.3. Κατόπιν από τις σχέσεις που δημιουργήθηκαν από την παλινδρόμηση υπολογίστηκαν νέες τιμές της αντοχής σε θραύση οι οποίες συγκρίθηκαν με τις πειραματικές τιμές.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ή αναπτύχθηκαν για τη συσχέτιση της αντοχής σε θραύση με τα κραματικά στοιχεία παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3(αρ. τύπου 10 έως 15). Ο τύπος 10 αποτελεί σχέση που λάβαμε από τη βιβλιογραφία ενώ οι τύποι 11 έως 15 υπολογίστηκαν μέσω στατιστικής παλινδρόμησης με τη διαδοχική προσθήκη ενός βαθμού ελευθερίας δηλαδή ενός ακόμα κραματικού στοιχείου.

Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης για κάθε τύπο παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1 (αρ. τύπου 10 έως 15). Η βέλτιστη τιμή που θα μπορούσε να έχει ο συντελεστής προσδιορισμού είναι η τιμή 100, δηλαδή 100% συσχέτιση.

Πίνακας 3.1: Συντελεστής προσδιορισμού για κάθε σχέση που χρησιμοποιήθηκε ή υπολογίστηκε με στατιστική παλινδρόμηση ως προς την αντοχή σε θραύση.

Τίτλος	R <sup>2</sup> (%)	Αρ. Τύπου
Rm Calc 1 (Σισμάνη)	22,50	10
Rm Calc 2	27,30	11
Rm Calc 3	27,30	12
Rm Calc 4	27,80	13
Rm Calc 5	27,90	14
Rm Calc 6	28,00	15
Rm calc Ceq	8,20	16
Rm calc Ceq+d	21,20	17
Rm calc AWS D1.1	12,70	18
Rm calc AWS D1.1+d	26,20	19
Rm calc Pcm (Ito - Bessyo)	11,80	20
Rm calc Pcm (Ito - Bessyo)+d	23,50	21
Rm calc Yurioka	6,10	22
Rm calc Yurioka+d	16,30	23
Rm calc Stout and Doty	8,60	24
Rm calc Stout and Doty+d	21,20	25
Rm calc Dearden - O'Neill	8,50	26
Rm calc Dearden - O'Neill+d	21,20	27
Rm calc Cottrell	8,10	28
Rm calc Cottrell+d	20,20	29
Rm calc CET	10,70	30
Rm calc CET+d	22,80	31
Rm calc CE <sub>WM</sub>	12,20	32
Rm calc CE <sub>WM</sub> +d	25,20	33

Πίνακας 3.2: Μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό του ισοδύναμου άνθρακα

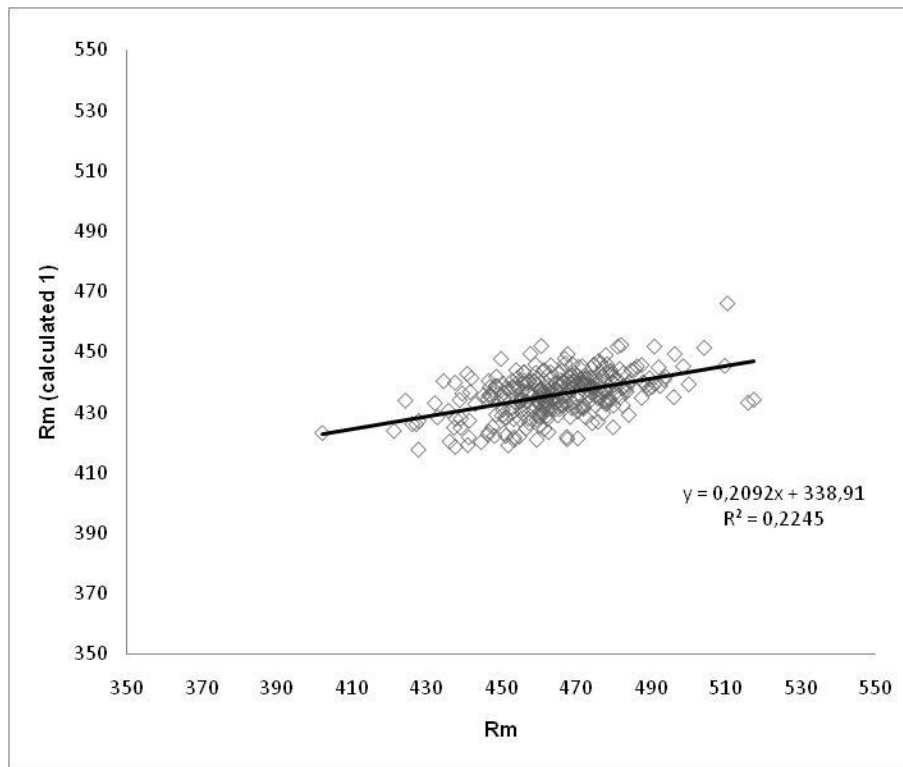
Κατηγορία	Τίτλος	Μοντέλο	Αρ. τύπου
Ceq	Ceq	$C+Mn/6+(Cr+Mo+V)/5+(Ni+Cu)/15$	1
	AWS D1.1	$C+(Mn+Si)/6+(Cr+Mo)/5+(Ni+Cu)/15$	2
	Pcm (Ito - Bessyo)	$C+Si/30+(Mn+Cu+Cr)/20+Ni/60+Mo/15$	3
	Yurioka	$0,75+0,25tahn[20(C-0,12)]$	4
	Stout and Doty	$C+Mn/6+Ni/20+(Cr+Mo)/10+Cu/40$	5
	Dearden - O'Neill	$C+Mn/6+Mo/4+Ni/15+Cr/5$	6
	Cottrell	$C+Mn/6+(Cr+Mo)/5+0,0001/S$	7
	CET	$C+(Mn+Mo)/10+(Cu+Cr)/20+Ni/40$	8
	CE <sub>WM</sub>	$C+(Mn+Cr+Si)/6+Mo/4+Ni/25$	9

Πίνακας 3.3: Μαθηματικές σχέσεις που αναπτύχθηκαν με τη μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης.

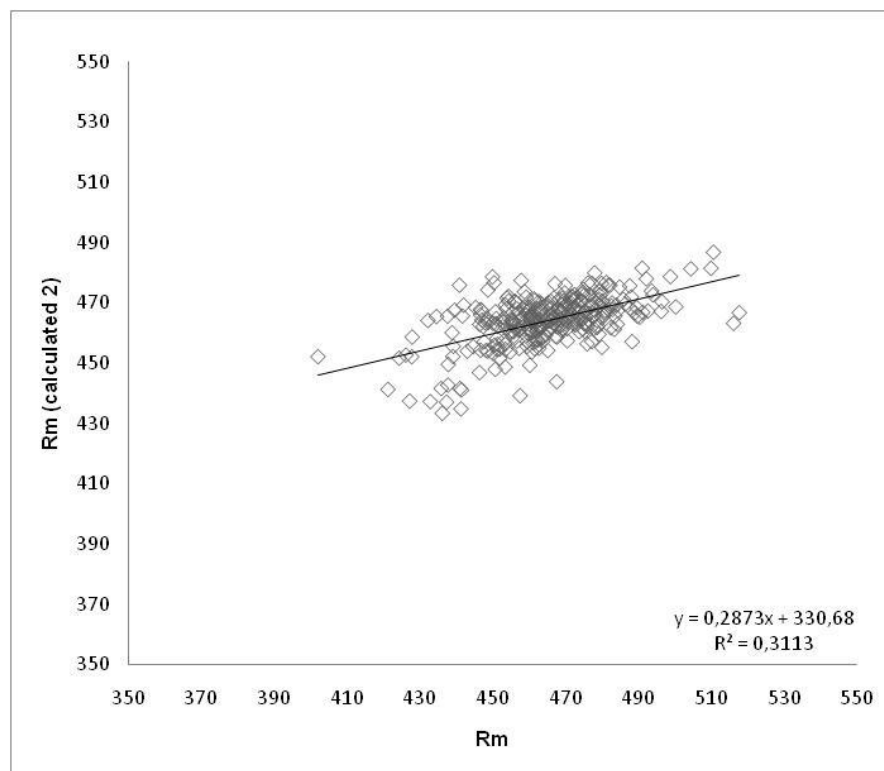
Κατηγορία	Τίτλος	Μοντέλο	Αρ. τύπου
Rm	Rm Calc 1 (Σισμάνη)	321-6,02d+6,16C+1,21Si+1,35Mn+0,62Cr+0,44Cu	10
	Rm Calc 2	435-11,5d+444 C+5,8Mn+133Si+166Cr+64,5Cu	11
	Rm Calc 3	435-11,5d+444C+5,9Mn+133Si+166Cr+64,5Cu-15N	12
	Rm Calc 4	432-11,1d+437C+10,0Mn+136Si+133Cr+62,7Cu-88N+302P	13
	Rm Calc 5	428-11,0d+433C+14,1Mn+135Si+124Cr+61,3Cu-31N+321P+91Mo	14
	Rm Calc 6	425-11,3d+440C+18,1Mn+139Si+117Cr+59,1Cu-31N+282P+95Mo+124S	15
	Rm calc Ceq	382+377Ceq	16
	Rm calc Ceq+d	433-11,5d+451Ceq	17
	Rm calc AWS D1.1	350+491AWS D.1.1	18
	Rm calc AWS D1.1+d	401-11,7d+563AWS D.1.1	19
	Rm calc Pcm (Ito - Bessyo)	374+629Pcm (Ito..)	20
	Rm calc Pcm (Ito - Bessyo)+d	429-10,8d+678Pcm (Ito..)	21
	Rm calc Yurioka	448+33,4Yurioka	22
	Rm calc Yurioka+d	506-10,1 d+34,3Yurioka	23
	Rm calc Stout and Doty	370+500Stout and Doty	24
	Rm calc Stout and Doty+d	421-11,3d+579Stout and Doty	25
	Rm calc Dearden - O'Neill	376+464Dearden - O'Neill	26
	Rm calc Dearden - O'Neill+d	427-11,4d+543Dearden - O'Neill	27
	Rm calc Cottrell	377+470Cottrell	28
	Rm calc Cottrell+d	429-11,0d+535Cottrell	29
	Rm calc CET	370+580CET	30
	Rm calc CET+d	423-11,0d+642CET	31
	Rm calc CE <sub>WM</sub>	351+512CE <sub>wm</sub>	32
	Rm calc CE <sub>WM</sub> +d	402-11,5d+579CE <sub>wm</sub>	33

Η σύγκριση των πειραματικών τιμών της αντοχής σε θραύση με τις υπολογισμένες τιμές παρουσιάζεται στα διαγράμματα των εικόνων 3.1 έως 3.6.

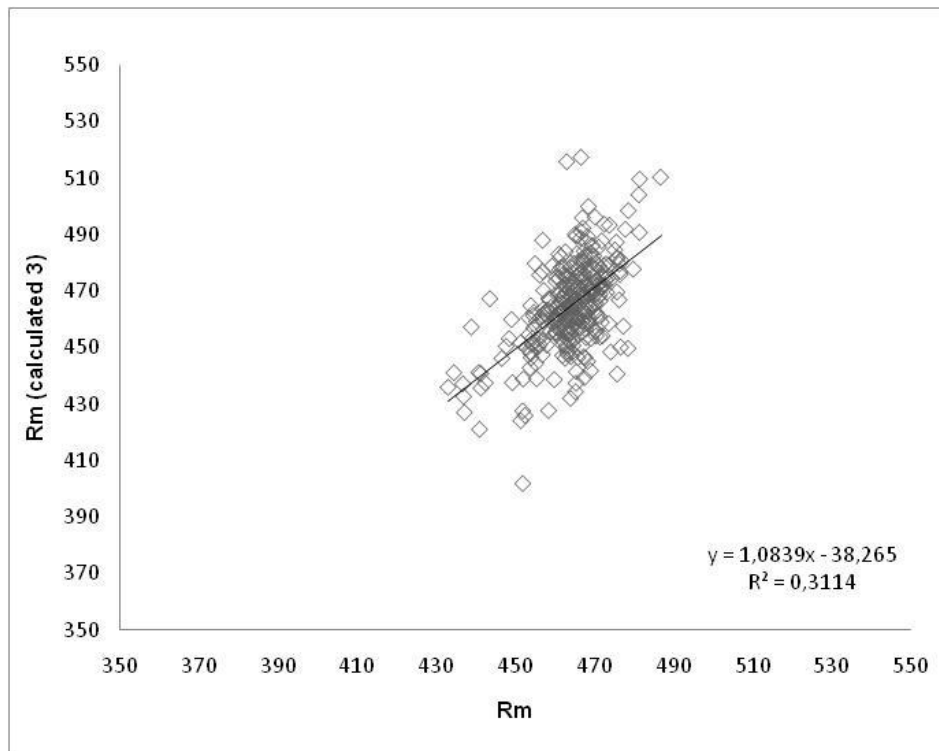




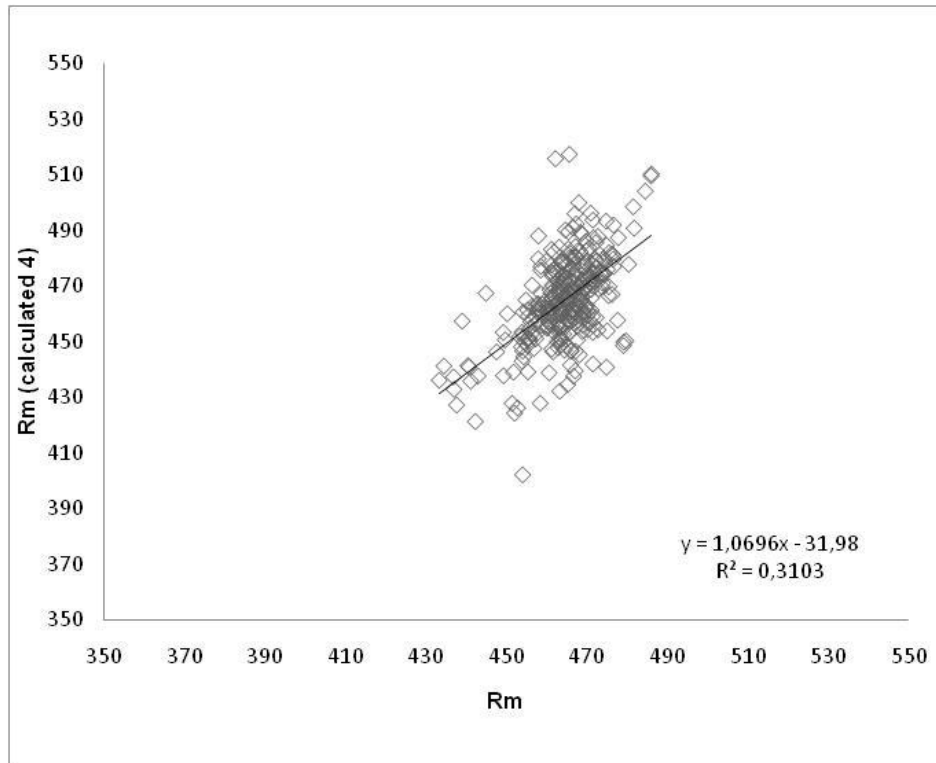
Εικόνα 3.1: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  υπολογισμένο από τύπο 10 με  $R_m$  πειραματικό



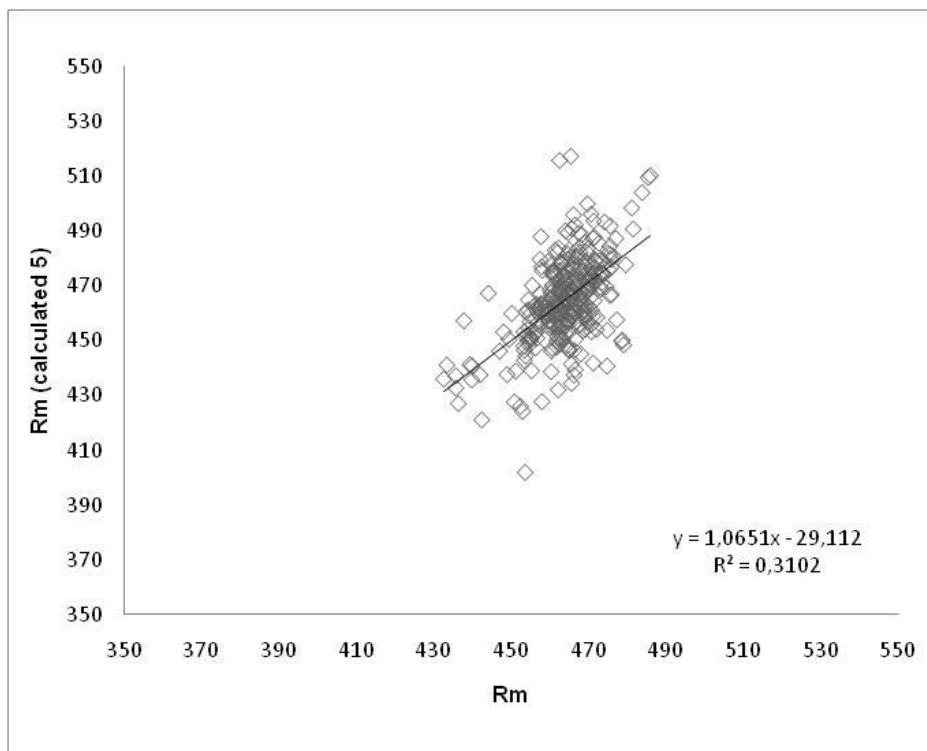
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  υπολογισμένο από τύπο 11 με  $R_m$  πειραματικό



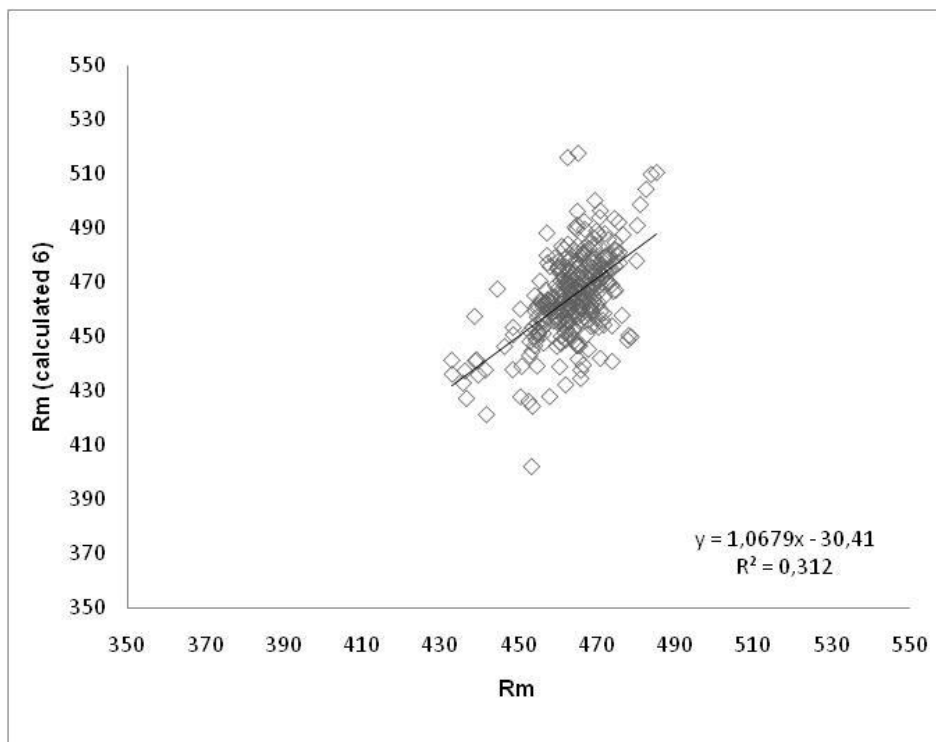
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  υπολογισμένο από τύπο 12 με  $R_m$  πειραματικό



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  υπολογισμένο από τύπο 13 με  $R_m$  πειραματικό



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  υπολογισμένο από τύπο 14 με  $R_m$  πειραματικό



Εικόνα 3.5: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  υπολογισμένο από τύπο 15 με  $R_m$  πειραματικό

### 3.2 Συσχέτιση αντοχής σε θραύση με τον ισοδύναμο άνθρακα

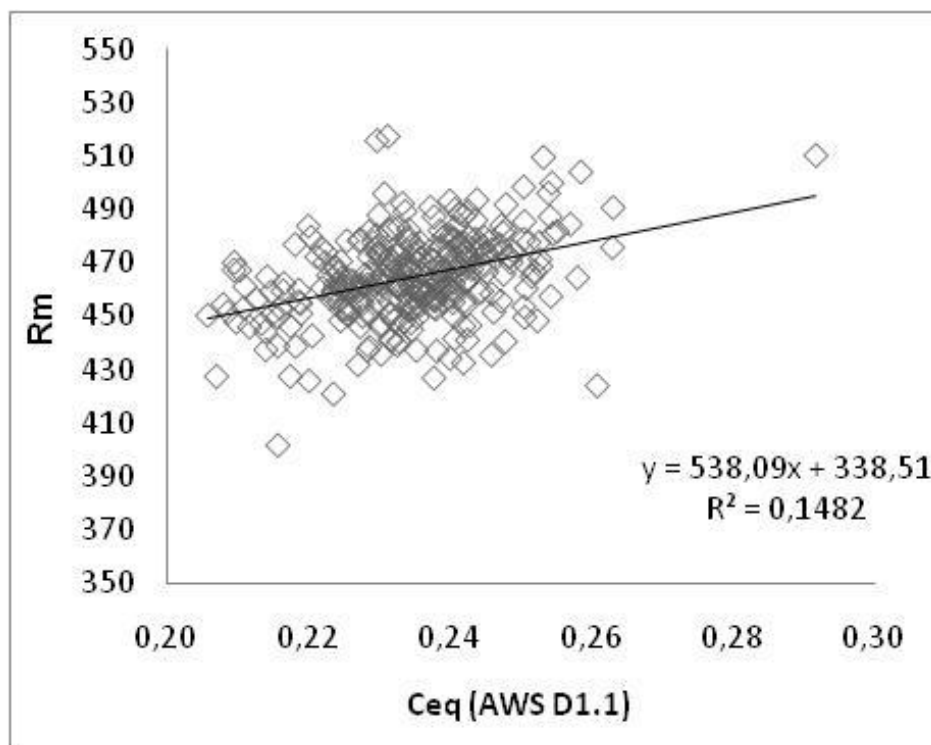
Η συσχέτιση της αντοχής σε θραύση με τον ισοδύναμο άνθρακα, έγινε με τη στατιστική παλινδρόμηση των τιμών του ισοδύναμου άνθρακα και των αντίστοιχων διαμέτρων με τις πειραματικές τιμές της αντοχής σε θραύση. Κατόπιν από τις σχέσεις που δημιουργήθηκαν από την παλινδρόμηση υπολογίστηκαν νέες τιμές της αντοχής σε θραύση οι οποίες συγκρίθηκαν με τις πειραματικές τιμές.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν ή αναπτύχθηκαν για τη συσχέτιση της αντοχής σε θραύση με τον ισοδύναμο άνθρακα παρουσιάζονται στον πίνακα 3.2(αρ. τύπου 1 έως 9) και πίνακα 3.3 αρ. τύπου 16 έως 33). Οι τύποι 1 έως 9 αποτελούν διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού του ισοδύναμου άνθρακα. Η σχέση 1 είναι εκείνη που προτείνεται για τον υπολογισμό του ισοδύναμου άνθρακα από τον κανονισμό χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος. Οι τύποι 16 έως 33 αποτελούν τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν με τη μέθοδο της στατιστικής παλινδρόμησης.

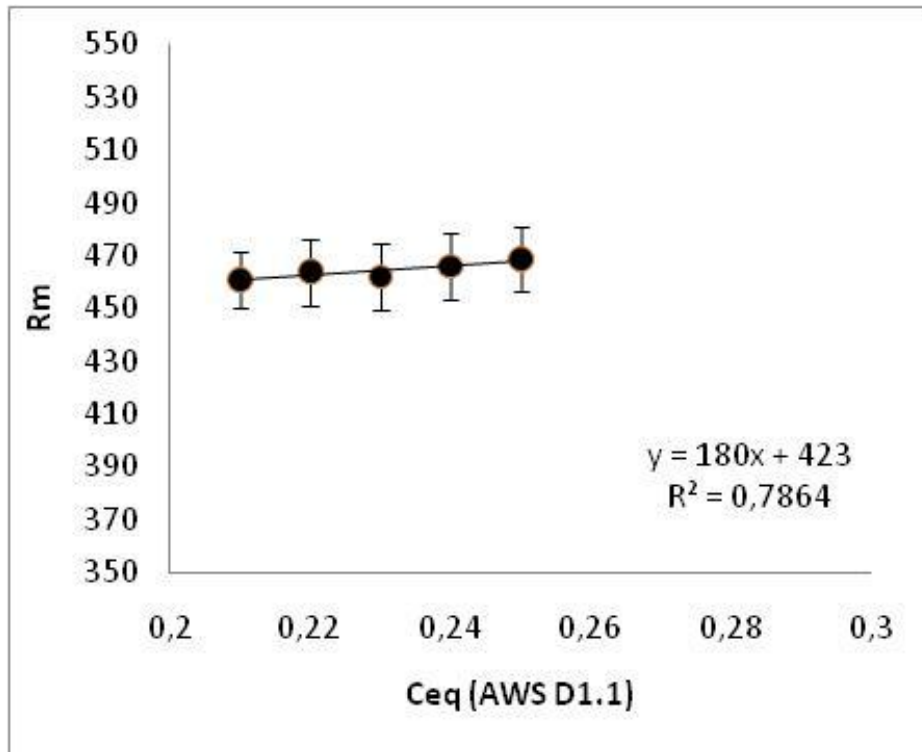
Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης για κάθε τύπο παρουσιάζεται στον πίνακα 3.1 (αρ. τύπου 16 έως 33). Η βέλτιστη τιμή που θα μπορούσε να έχει ο συντελεστής προσδιορισμού είναι η τιμή 100, δηλαδή 100% συσχέτιση.

Στις εικόνες 3.6 έως 3.10 παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν τις πέντε σχέσεις ισοδύναμου άνθρακα με τους μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης, όπως αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 3.1(αρ. τύπου 16 έως 33).

Τα διαγράμματα που σχεδιάστηκαν χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 22 έως 29 του πίνακα 3.3 και τα οποία δεν συμπεριλήφθησαν στο παρόν κεφάλαιο των αποτελεσμάτων παρουσιάζονται στο παράρτημα 1.

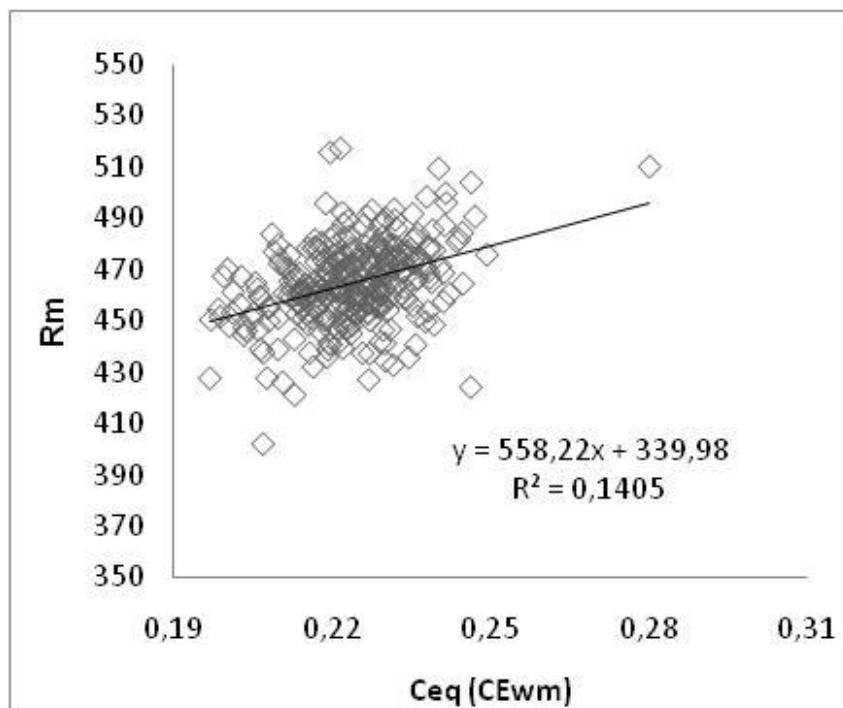


(α)

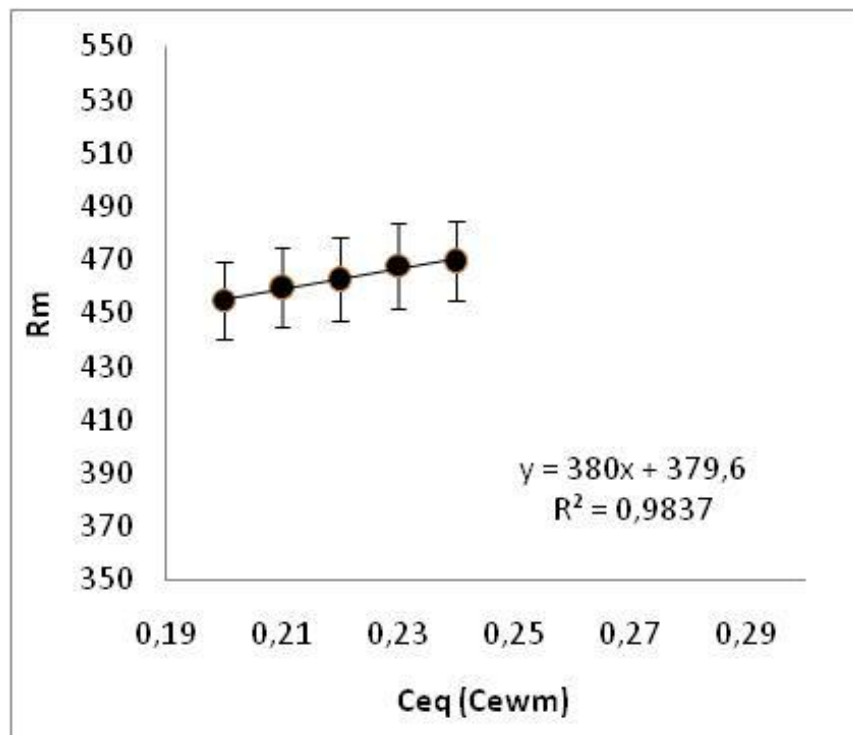


(β)

Εικόνα 3.6: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 2. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.

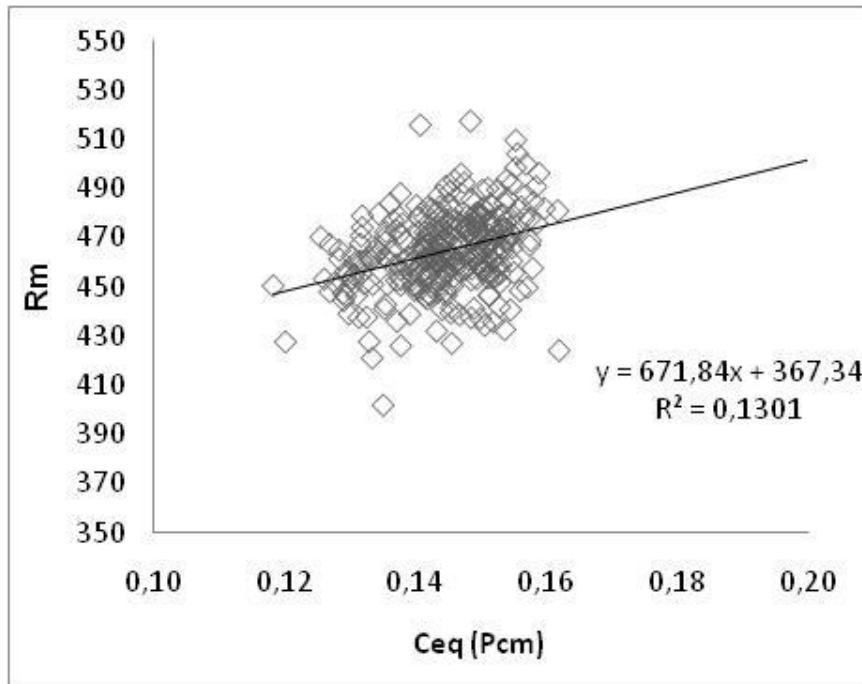


(α)

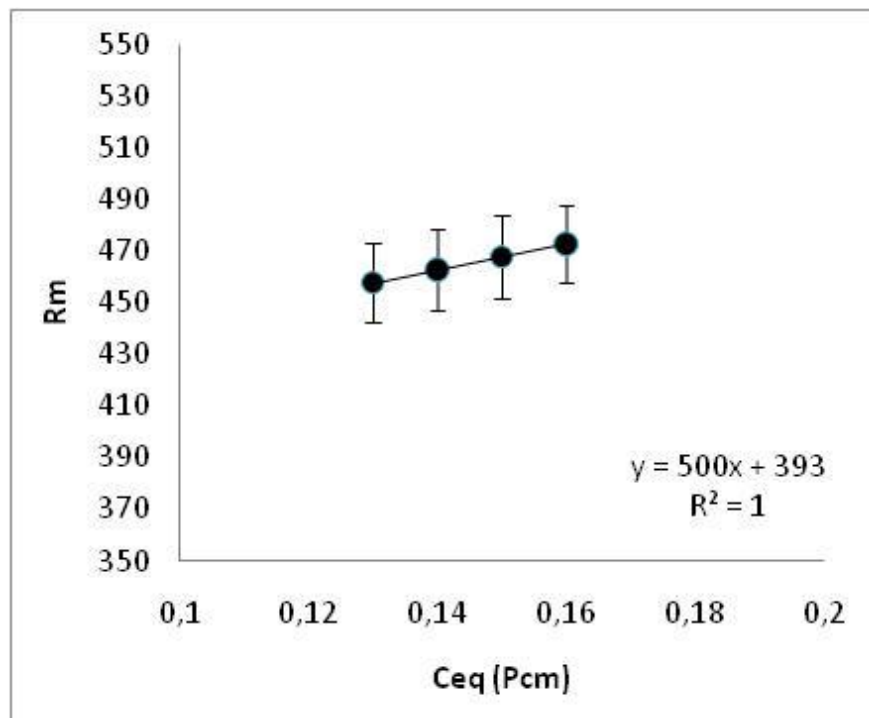


(β)

Εικόνα 3.7: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 9. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.



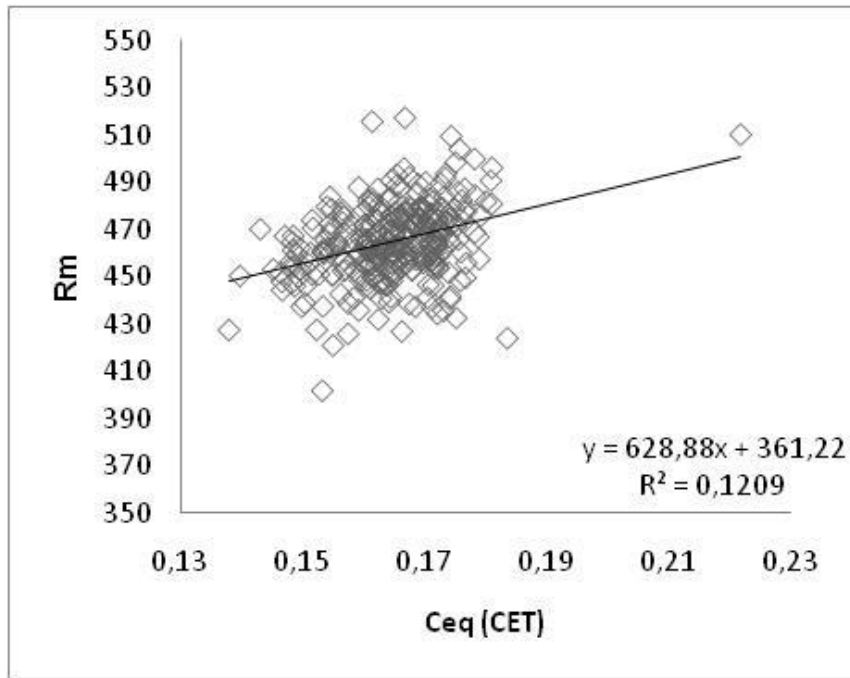
(α)



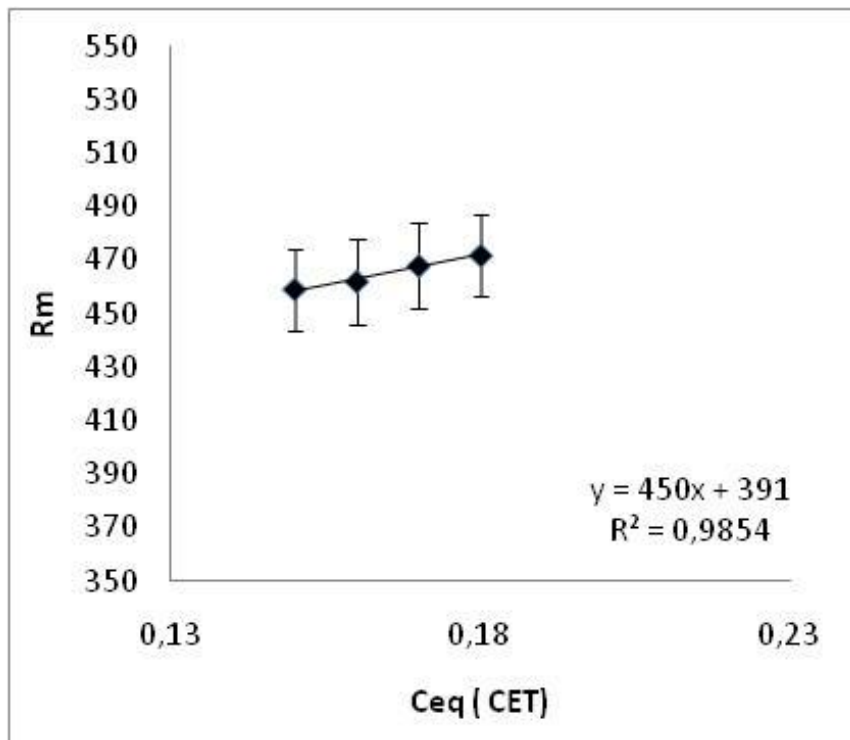
(β)

Εικόνα 3.8: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 3. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.



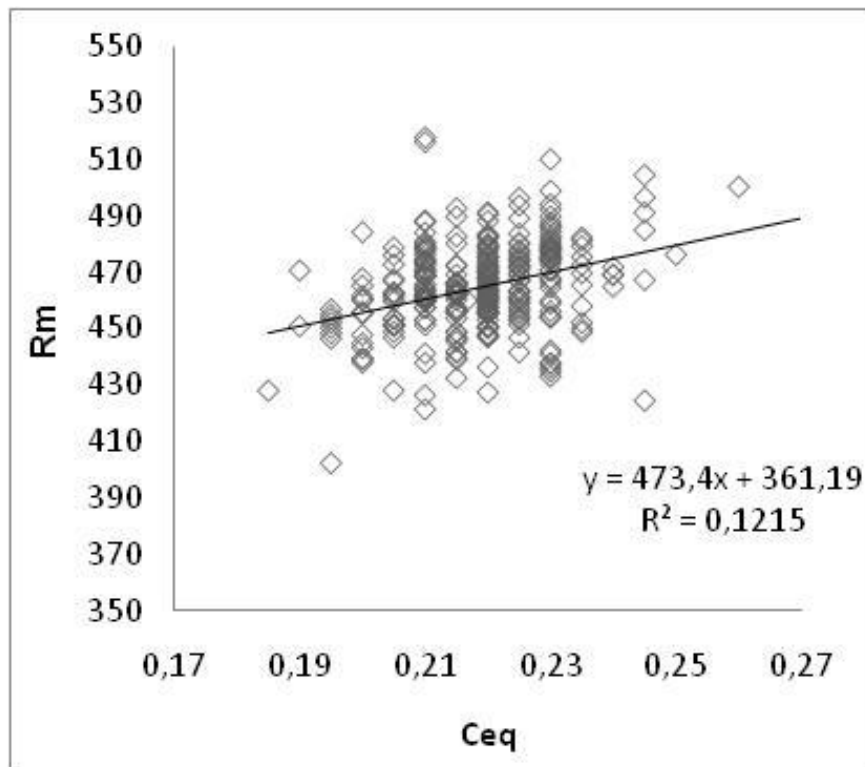


(α)

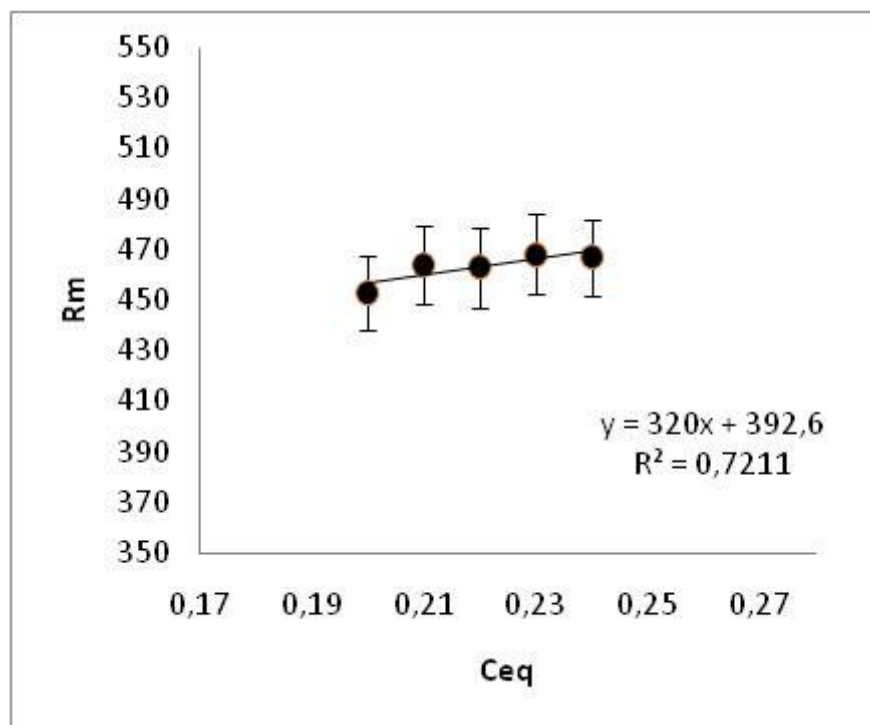


(β)

Εικόνα 3.9: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 8. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.



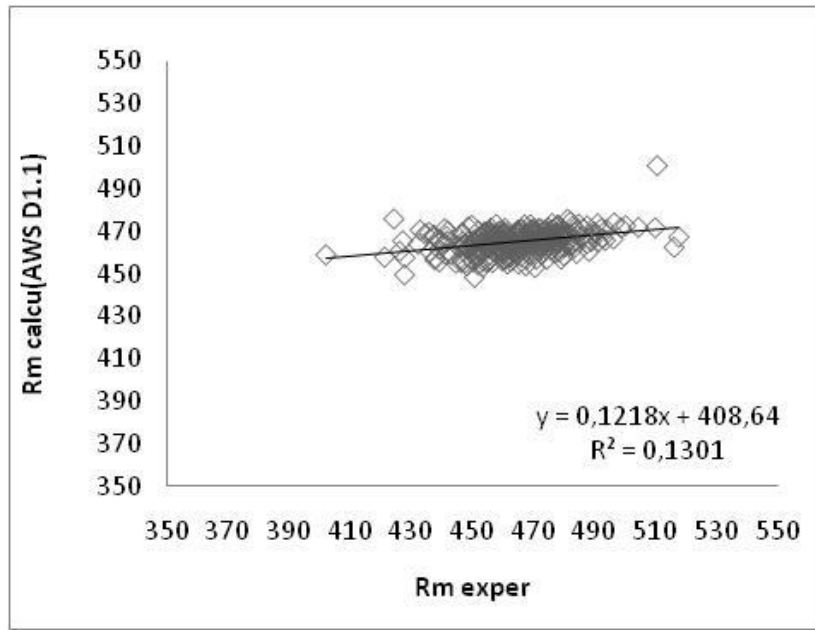
(α)



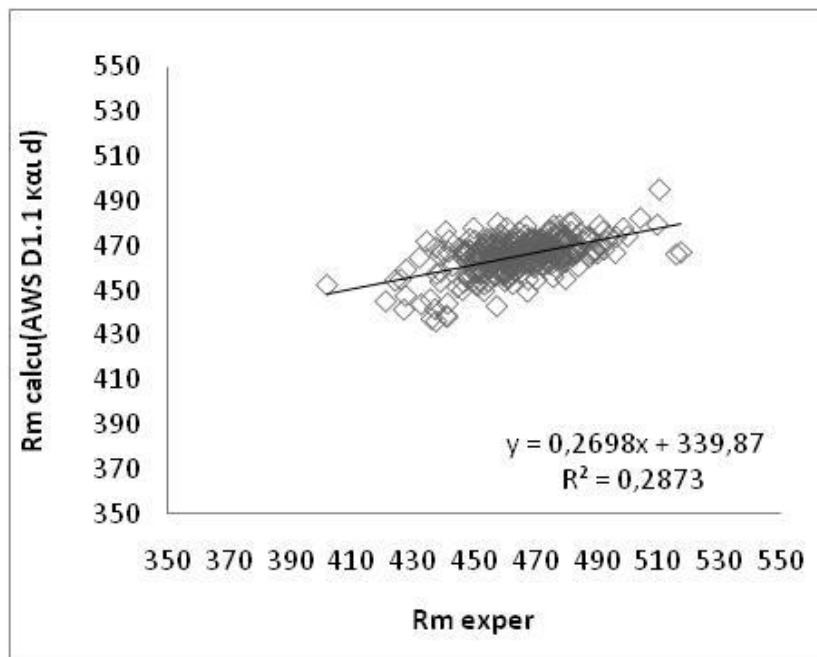
(β)

Εικόνα 3.10: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 1. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.

Στις εικόνες 3.11 έως 3.15 παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν τη συσχέτιση των υπολογισμένων τιμών αντοχής σε θραύση, (χρησιμοποιώντας τις σχέσεις από την στατιστική παλινδρόμηση των διαφόρων τύπων υπολογισμού ισοδύναμου άνθρακα) ως προς τις πειραματικές τιμές της αντοχής σε θραύση.

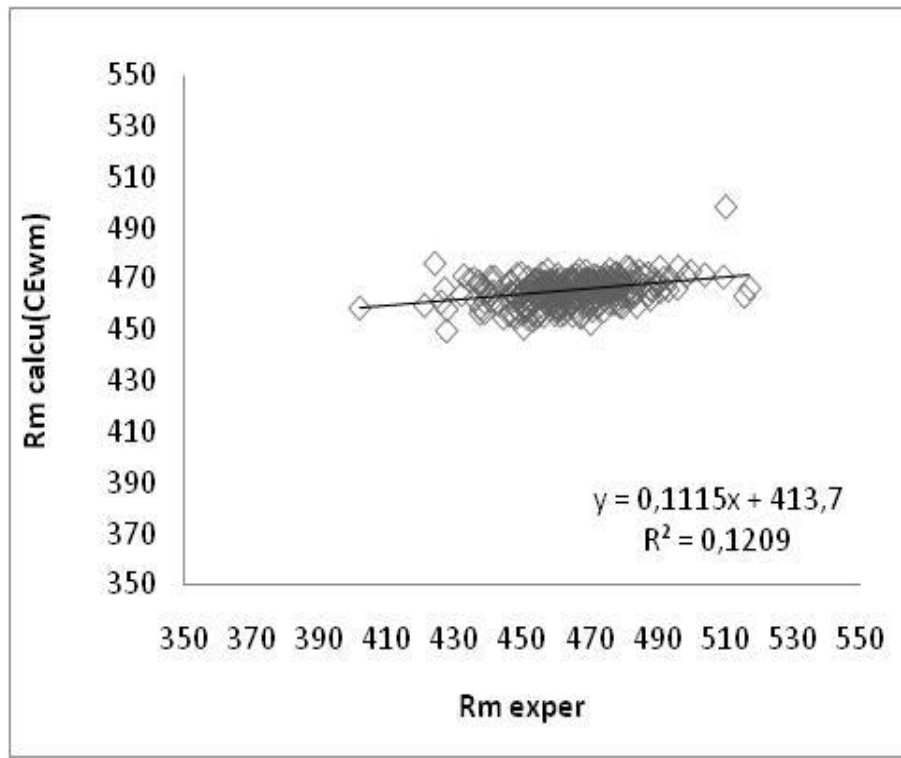


(α)

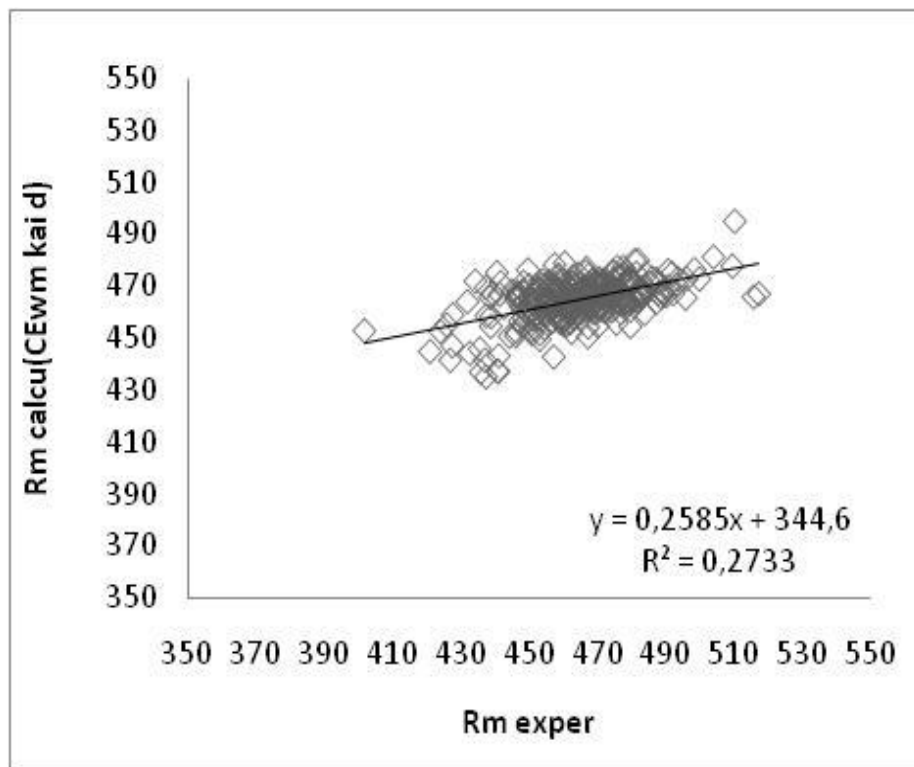


(β)

Εικόνα 3.11: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 18. Κάτω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 19.

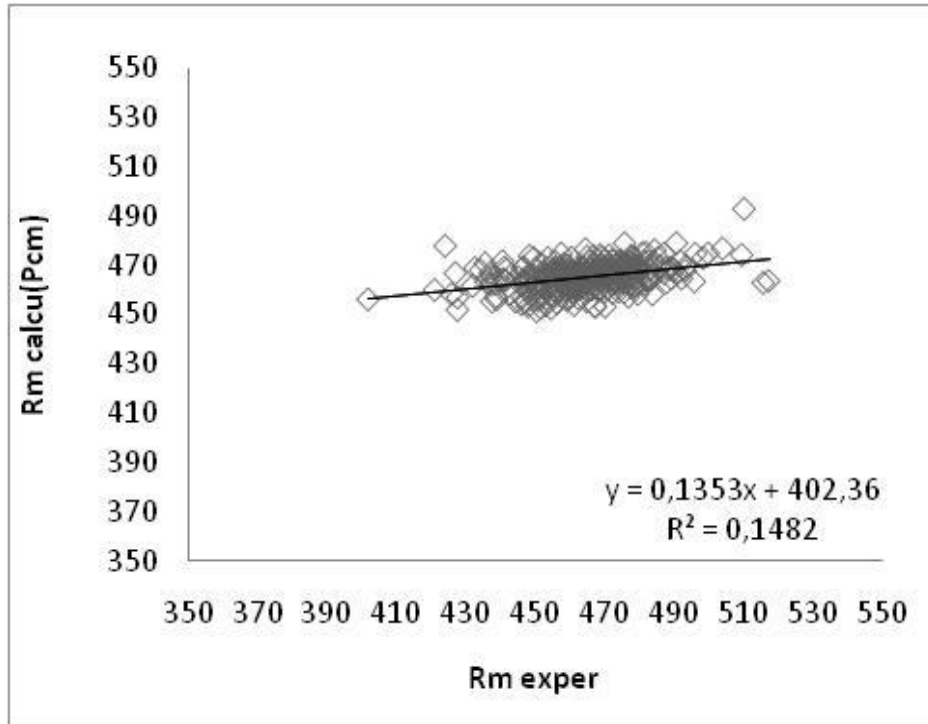


(α)

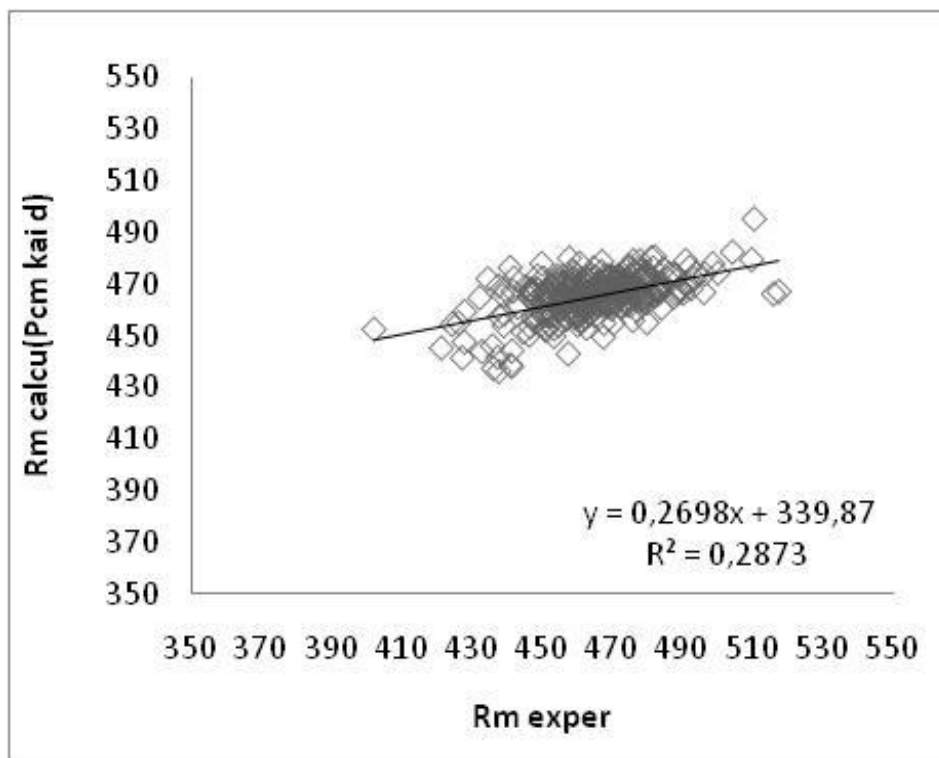


(β)

Εικόνα 3.12: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 32. Κάτω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 33.

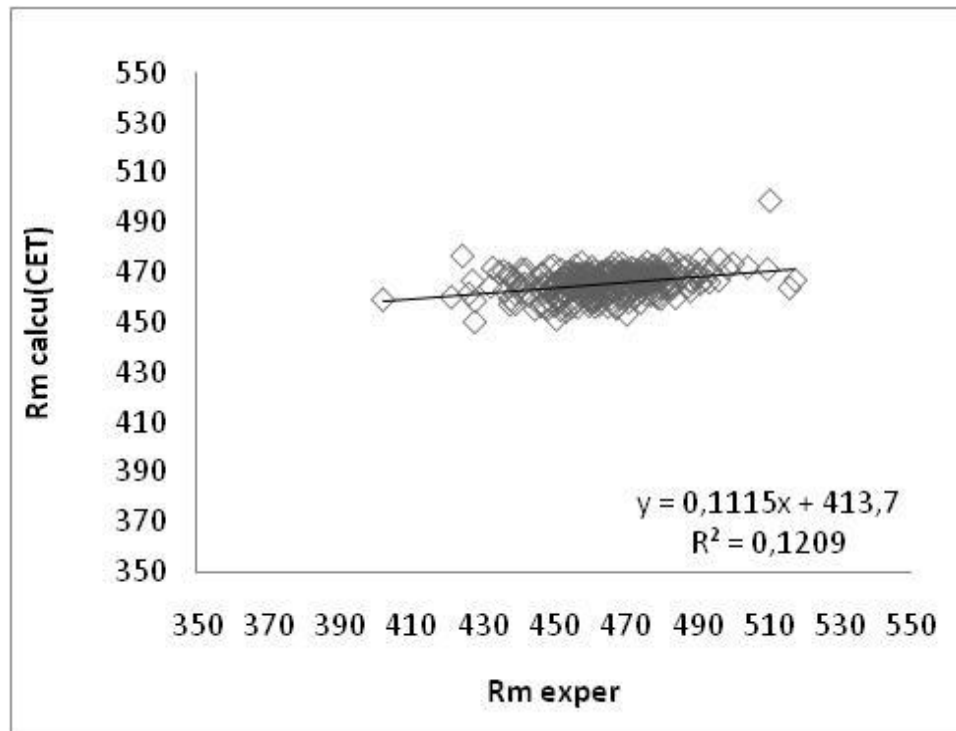


(α)

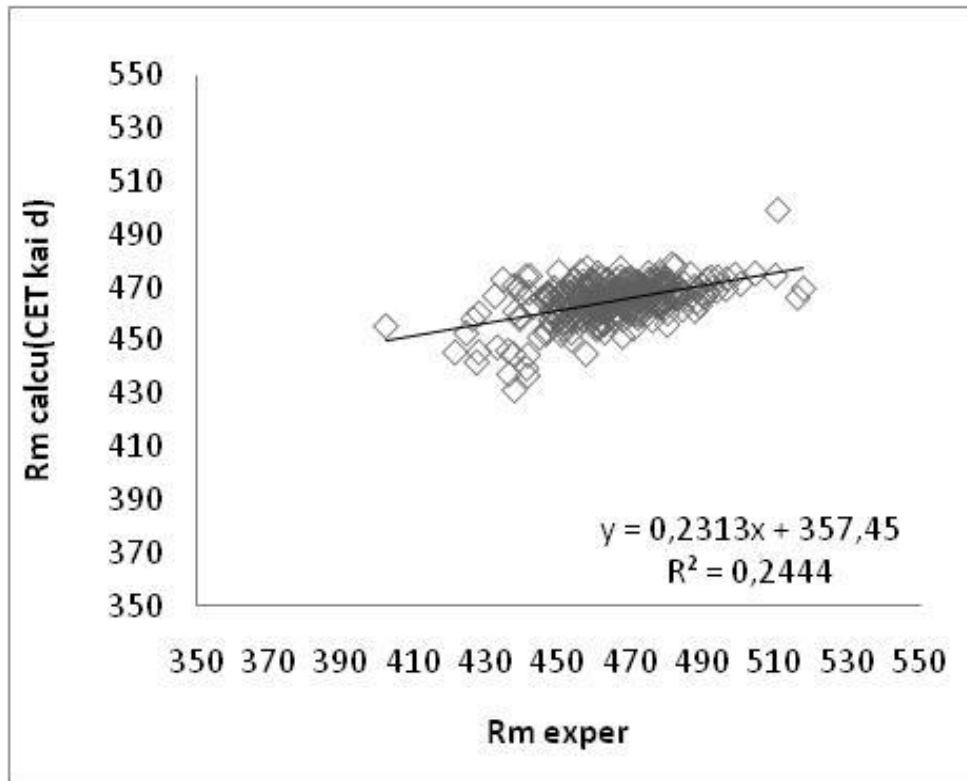


(β)

Εικόνα 3.13: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 20. Κάτω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 21.

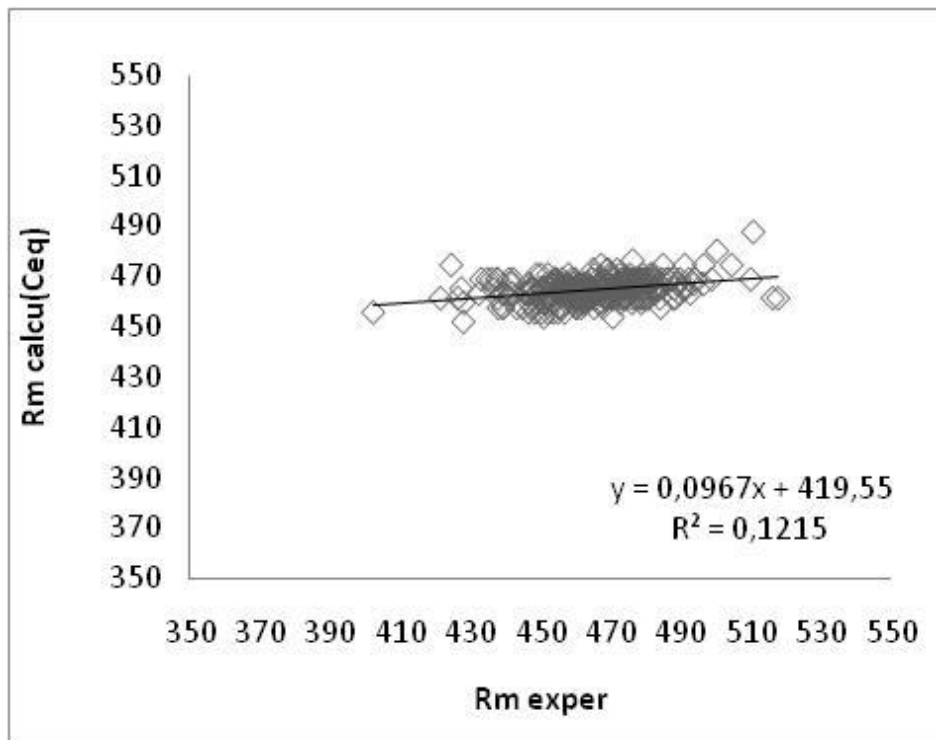


(α)

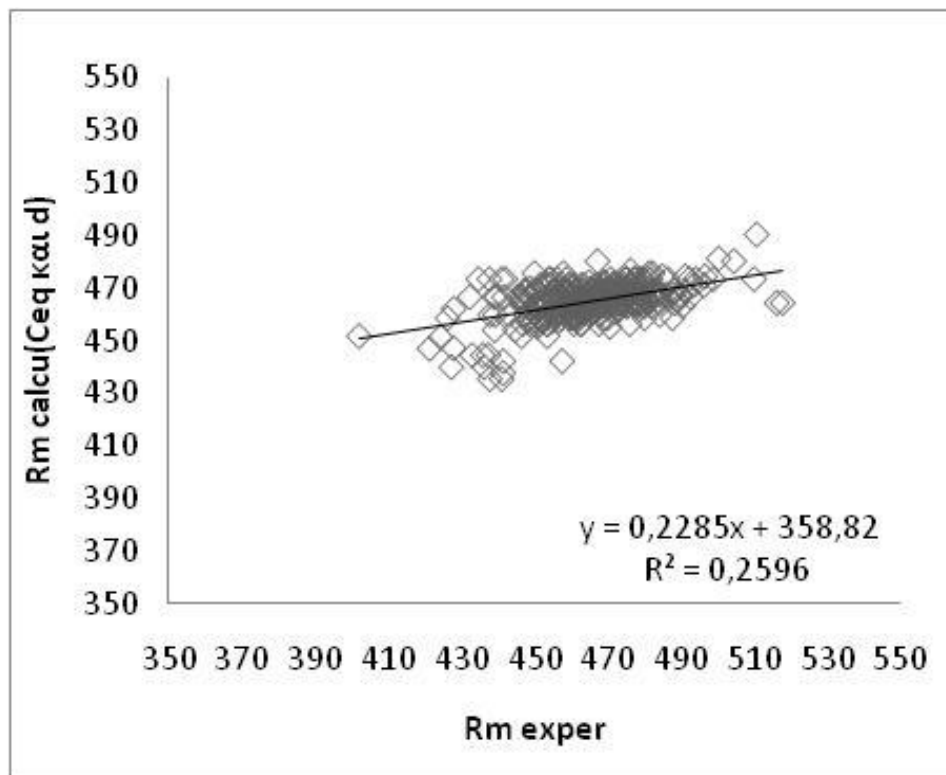


(β)

Εικόνα 3.14: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 30. Κάτω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο31.



(α)



(β)

Εικόνα 3.15: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 16. Κάτω διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 17.

### 3.3 Συσχέτιση ορίου διαρροής με τον ισοδύναμο άνθρακα

Η συσχέτιση των πειραματικών τιμών του ορίου διαρροής με τον ισοδύναμο άνθρακα έγινε με τη δημιουργία διαγραμμάτων.

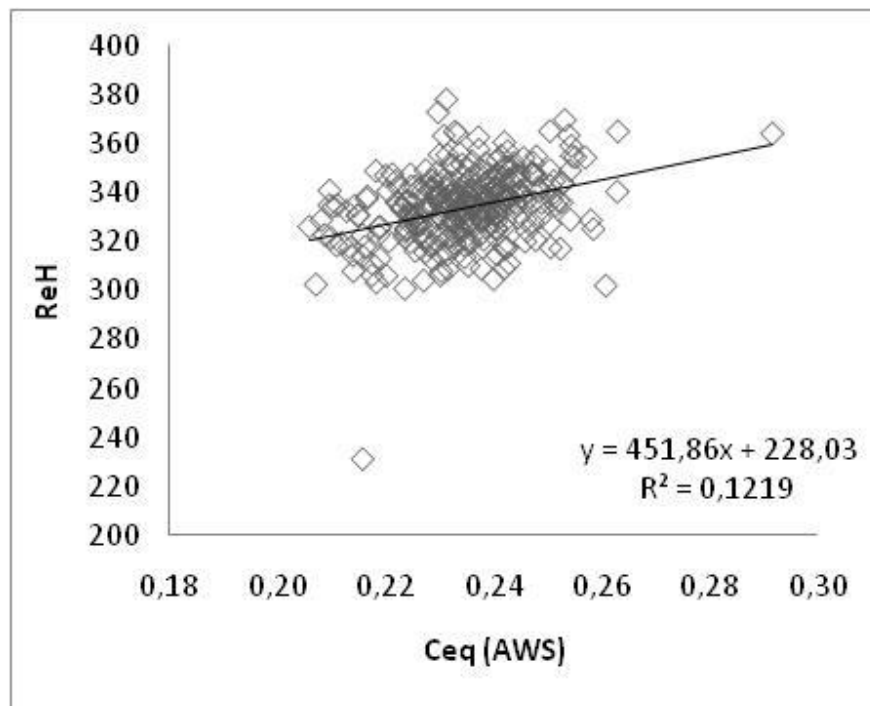
Ο ισοδύναμος άνθρακας δηλώνει την εμβαπτότητα ενός χάλυβα. Κατά αυτό τον τρόπο συνδέεται άμεσα με τη σκληρότητα του υλικού, η οποία επηρεάζει το όριο διαρροής.

Στις εικόνες 3.16 έως 3.20 παρατίθενται τα διαγράμματα που αφορούν τις πέντε σχέσεις ισοδύναμου άνθρακα με τους μεγαλύτερους συντελεστές συσχέτισης, όπως αυτοί παρουσιάζονται στον πίνακα 3.4(αρ. τύπου 34 έως 51).

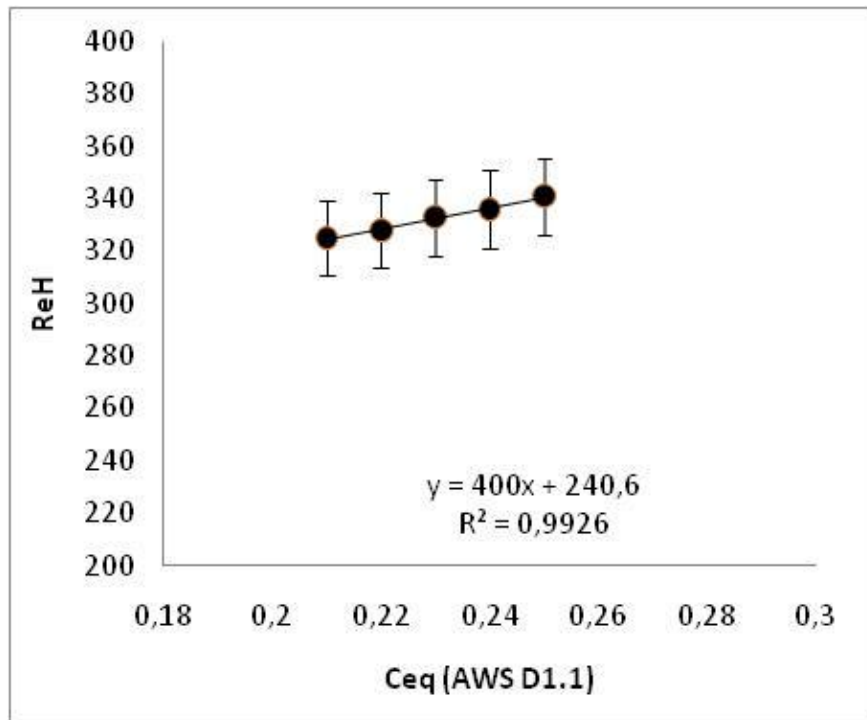
Πίνακας 3.4: Συντελεστής προσδιορισμού για κάθε τύπο που υπολογίστηκε με στατιστική παλινδρόμηση ως προς το όριο διαρροής.



Τίτλος	R <sup>2</sup>	Αρ. τύπου
ReH calc Ceq	6,2	34
ReH calc Ceq + d	13,6	35
ReH calc AWS D1.1	11,6	36
ReH calc AWS D1.1 + d	19,5	37
ReH calc Pcm	10,4	38
ReH calc Pcm + d	17,0	39
ReH calc Yurioka	4,2	40
ReH calc Yurioka + d	9,7	41
ReH calc Stout and Doty	7,8	42
ReH calc Stout and Doty + d	15,0	43
ReH calc Dearden - O Neil	6,3	44
ReH calc Dearden - O Neil + d	13,5	45
ReH calc Cottrell	6,2	46
ReH calc Cottrell +d	13,0	47
ReH calc CET	9,8	48
ReH calc CET + d	16,8	49
ReH calc CEwm	11,0	50
ReH calc CEwm + d	18,5	51

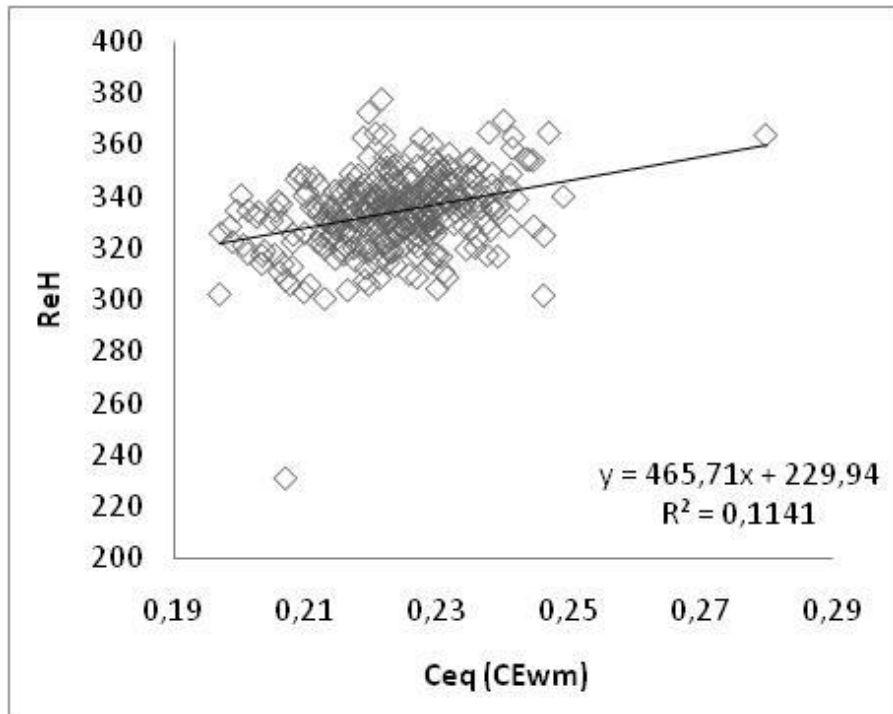


(α)

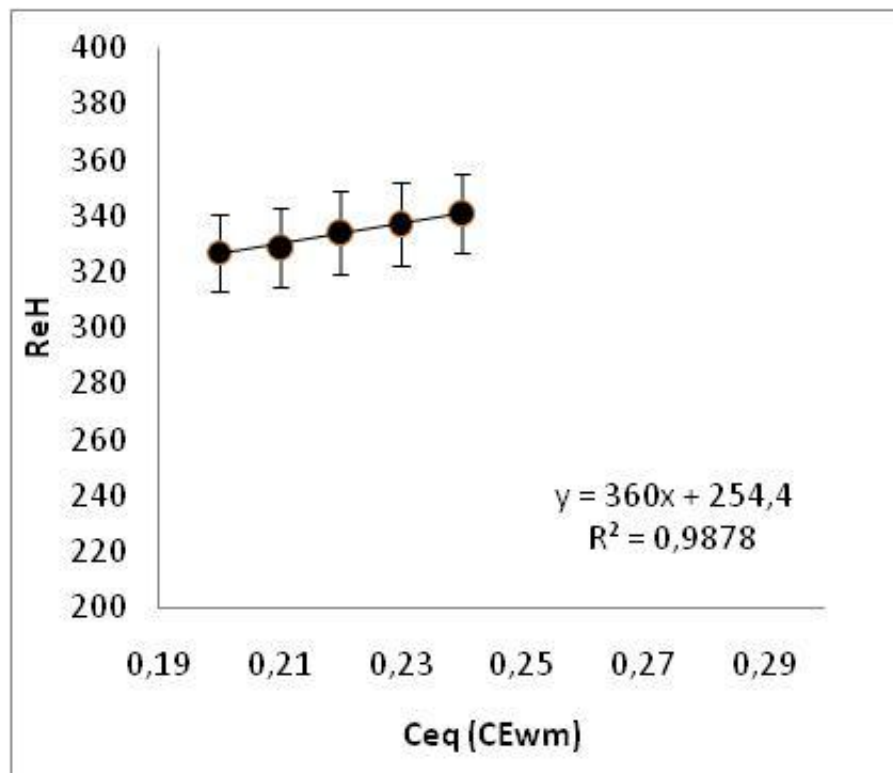


(β)

Εικόνα 3.16: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $ReH$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 2. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.

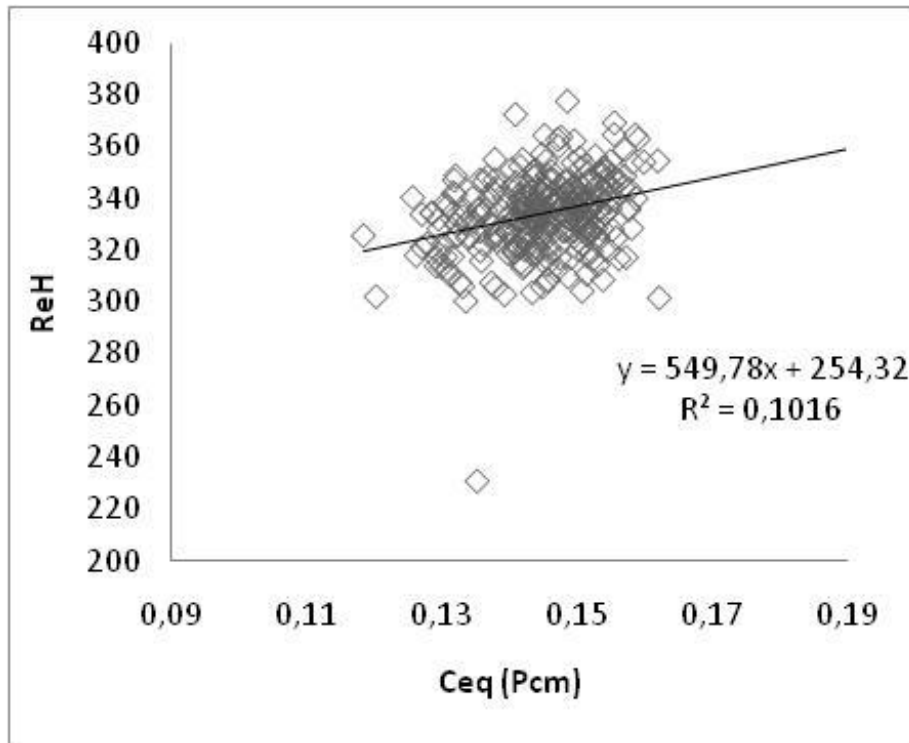


(α)

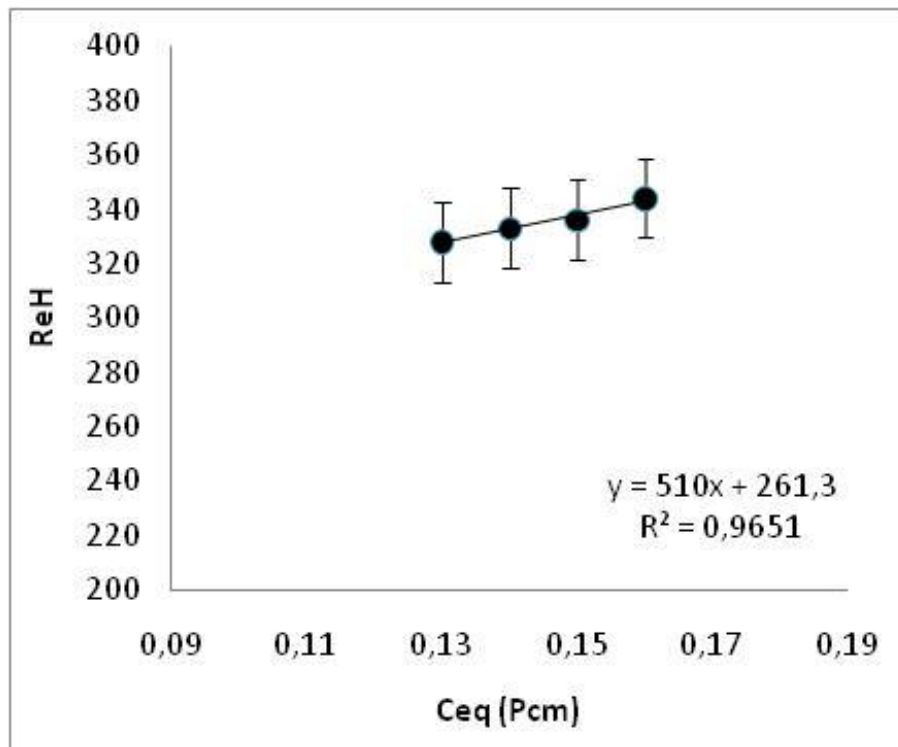


(β)

Εικόνα 3.17: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $ReH$  πειραματικό με  $Ceq$  από τον τύπο 9. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.

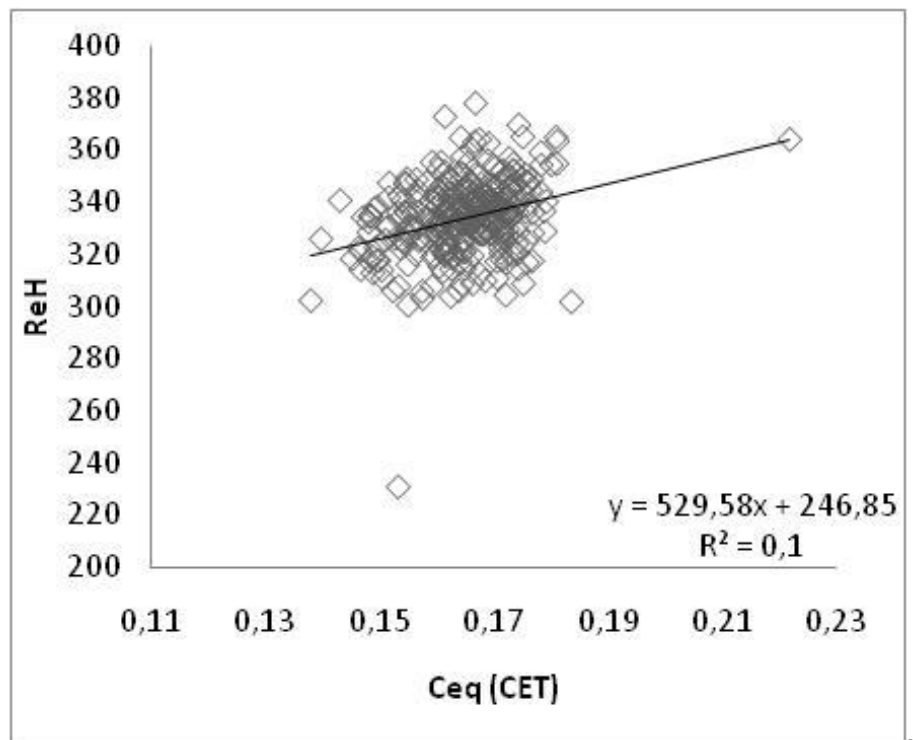


(α)

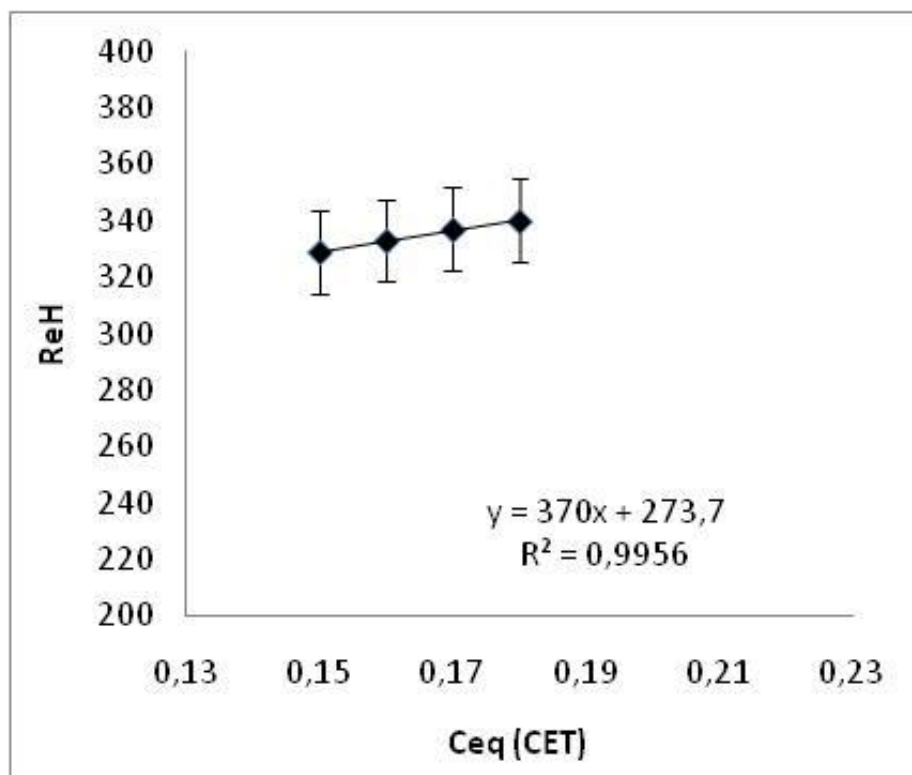


(β)

Εικόνα 3.18: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $ReH$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 3. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.

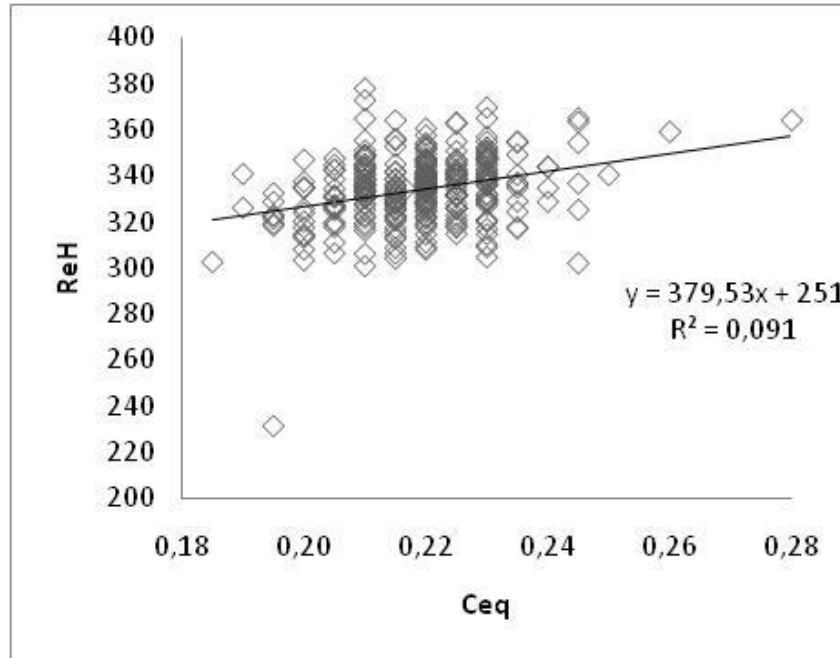


(α)

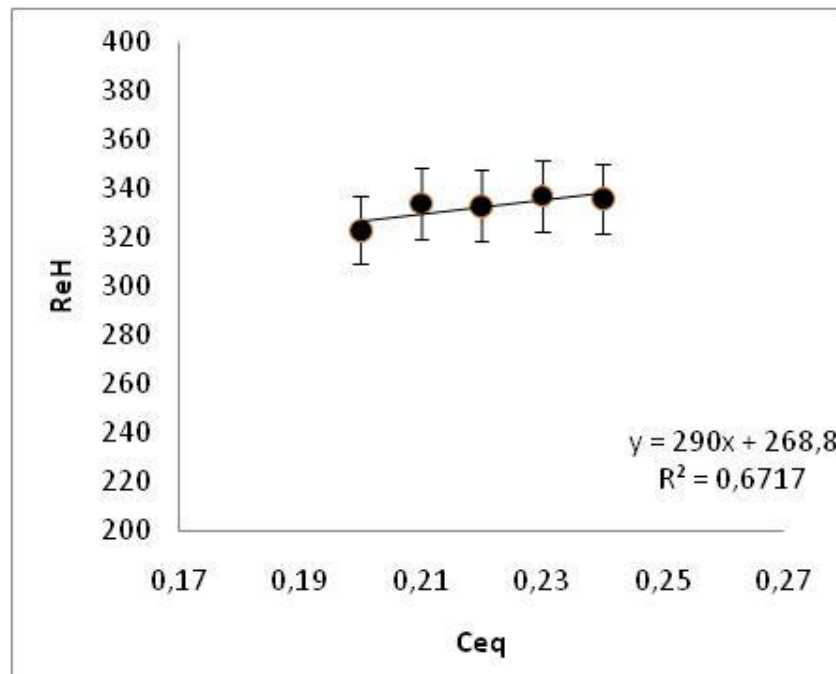


(β)

Εικόνα 3.19: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $ReH$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 8. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις



(α)



(β)

*Εικόνα 3.20: Πάνω διάγραμμα συσχέτισης  $ReH$  πειραματικό με  $Ceq$  από τον τύπο  
1. Κάτω το ίδιο διάγραμμα μόνο που οι τιμές έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις.*

## Κεφάλαιο 4

# **Ανάλυση αποτελεσμάτων της μελέτης συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τη χημική σύσταση**

---

Κατά τη διάρκεια της μελέτης συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων και χημικής σύστασης με χρήση στατιστικής παλινδρόμησης έλαβε χώρα η δημιουργία συνολικά σαράντα δύο διαφορετικών μαθηματικών σχέσεων (πίνακες 3.3 και 3.4), οι οποίες αφορούσαν τον υπολογισμό του ορίου θραύσης και διαρροής του υλικού και χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό κατάλληλων διαγραμμάτων, τα οποία θα βοηθούσαν στη μελέτη.

### **4.1 Συσχέτιση αντοχής σε θραύση με κραματικά στοιχεία**

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων που σχεδιάστηκαν με σκοπό τη συσχέτιση του ορίου θραύσης με τα διάφορα κραματικά στοιχεία (εικόνες 3.1 έως 3.5) και από τη μελέτη των τιμών του συντελεστή συσχέτισης σε κάθε περίπτωση, εξάγουμε τα παρακάτω συμπεράσματα.

Παρατηρούμε ότι η τιμή του συντελεστή συσχέτισης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα και στις έξι περιπτώσεις που μελετήσαμε. Με τη διαδοχική προσθήκη ενός κραματικού στοιχείου, δηλαδή ενός βαθμού ελευθερίας στη μαθηματική σχέση παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής του συντελεστή συσχέτισης. Το φαινόμενο αυτό είναι λογικό και εξηγείται από το γεγονός ότι με την διαδοχική προσθήκη βαθμών ελευθερίας μειώνεται κάθε φορά η αβεβαιότητα. Η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης αντιστοιχεί στη σχέση 15 (πίνακας 3.3 αρ. τύπου 15) και η χαμηλότερη στη σχέση 10 (πίνακας 3.3 αρ. τύπου 10).

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως η τιμή του συντελεστή συσχέτισης κρίθηκε ως μη ικανοποιητική, διότι κυμάνθηκε μεταξύ των τιμών 22,50% και 28,00% (ή 0,225 και 0,28). Η τιμή θα ήταν ικανοποιητική εάν πλησίαζε το 100% (ή 1).



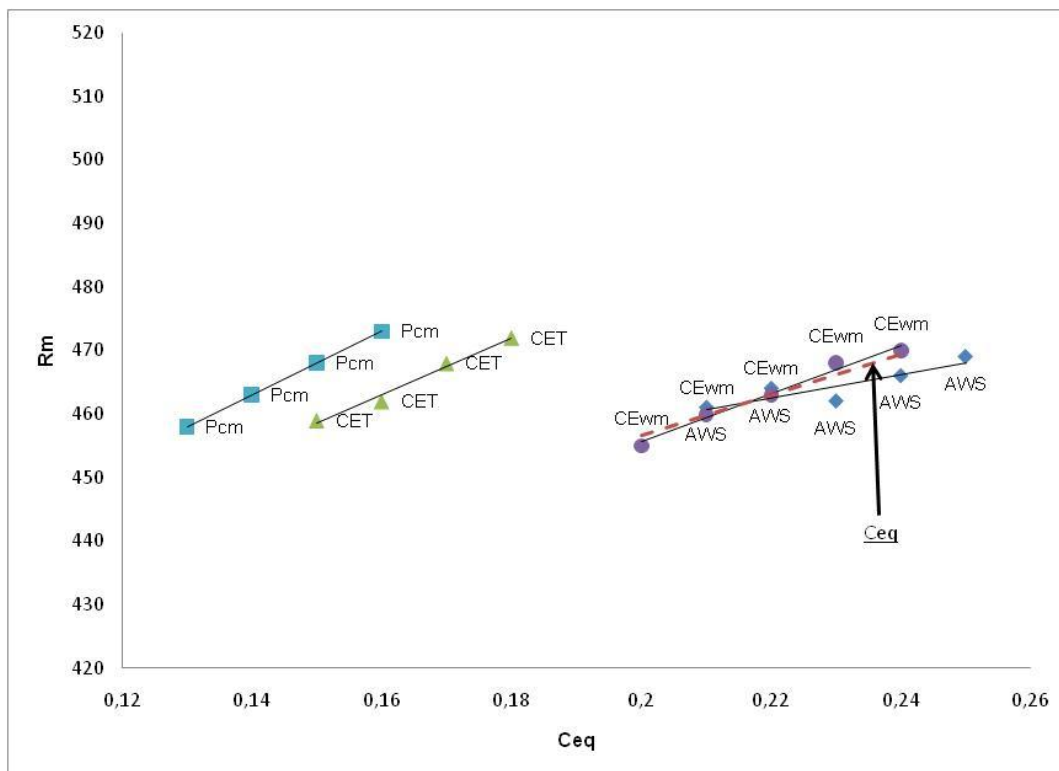
Η σχέση 10 όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο της περιγραφής της πειραματικής διαδικασίας, προέρχεται από τη βιβλιογραφία και δεν είναι αποτέλεσμα της στατιστικής παλινδρόμησης των κραματικών στοιχείων. Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης της σχέσης 10 ήταν η χαμηλότερη των έξι σχέσεων. Κατά αυτόν τον τρόπο κρίνεται ως μη ικανή σχέση για τη πρόβλεψη των τιμών του ορίου θραύσης του υλικού που μελετήσαμε.

#### **4.2 Συσχέτιση αντοχής σε θραύση με τον ισοδύναμο άνθρακα**

Στα διαγράμματα των εικόνων 3.6 έως 3.10 παρατηρούμε τη συσχέτιση των διαφόρων τιμών του ισοδύναμου άνθρακα (που υπολογίστηκαν από τις διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού) με τις πειραματικές τιμές του ορίου θραύσης.

Παρατηρούμε μια γραμμική συσχέτιση των τιμών, η οποία είναι περισσότερο εμφανής στα διαγράμματα τα οποία οι τιμές του ορίου θραύσης έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις. Στα ίδια διαγράμματα παρατηρούμε ότι η τυπική απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10 και 15 MPa. Η τιμή αυτή θεωρείται χαμηλή, οπότε και ικανοποιητική.

Από το διάγραμμα (εικόνα 4.1), παρατηρούμε ότι η κλίση των γραμμών τάσης δεν διαφέρει σε σημαντικό βαθμό σε κάθε περίπτωση. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές του ισοδύναμου άνθρακα επηρεάζουν σχεδόν στον ίδιο βαθμό την τιμή του ορίου θραύσης. Για τη περίπτωση του AWS που φαίνεται να διαφέρει ως προς την κλίση, αναφέρουμε ότι αυτή η διαφορά δεν λαμβάνεται υπόψη καθώς είναι μικρή και μπορεί να οφείλεται σε σφάλμα μέτρησης ή ομαδοποίησης κατά τη δημιουργία των κλάσεων.



Εικόνα 4.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ομαδοποιημένων τιμών, συσχέτισης ορίου θραύσης με τον ισοδύναμο άνθρακα

Επίσης αναφέρεται ότι οι τιμές του ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις Pcm και CET σχέσεις 3 και 8 αντίστοιχα (πίνακας 3.2 αρ. τύπου 3 και 8), ήταν χαμηλότερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις AWS και CEwm σχέσεις 2 και 9 αντίστοιχα (πίνακας 3.2 αρ. τύπου 2 και 9).

Παρατηρούμε ότι η γραμμή τάσης Ceq, που αντιστοιχεί στις τιμές ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τη σχέση που προτείνεται από τον κανονισμό χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος 2008 διατηρεί παρόμοια χαρακτηριστικά με τις καμπύλες που υπολογίστηκαν από τις υπόλοιπες σχέσεις υπολογισμού ισοδύναμου άνθρακα.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο της περιγραφής της πειραματικής διαδικασίας, με χρήση στατιστικής παλινδρόμησης των τιμών του ορίου θραύσης με τις τιμές του ισοδύναμου άνθρακα παρήχθησαν οι σχέσεις 16 έως 33 (πίνακας 3.3 αρ. τύπου 16 έως 33). Από τις σχέσεις αυτές υπολογίστηκαν νέες τιμές του ορίου θραύσης, οι οποίες συσχετίστηκαν με τις πειραματικές.

Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της συσχέτισης των ορίων θραύσης παρατηρήθηκε ότι η τιμή του συντελεστή συσχέτισης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα για όλες τις περιπτώσεις ισοδύναμου άνθρακα. Με τη προσθήκη της διαμέτρου, δηλαδή ενός βαθμού ελευθερίας στις μαθηματικές σχέσεις, παρατηρείται σημαντική αύξηση των τιμών του συντελεστή συσχέτισης. Παρόλα αυτά η αύξηση αυτή δεν ήταν αρκετή έτσι ώστε να χαρακτηριστούν ως ικανοποιητικές οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης.

Οι μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή συσχέτισης παρατηρήθηκε στη σχέση 19 (πίνακας 3.1 αρ. τύπου 19) και ήταν 26,20% (ή 0,262), ενώ η χαμηλότερη στη σχέση 22 (πίνακας 3.1 αρ. τύπου 22) και ήταν 6,10% (ή 0,061).

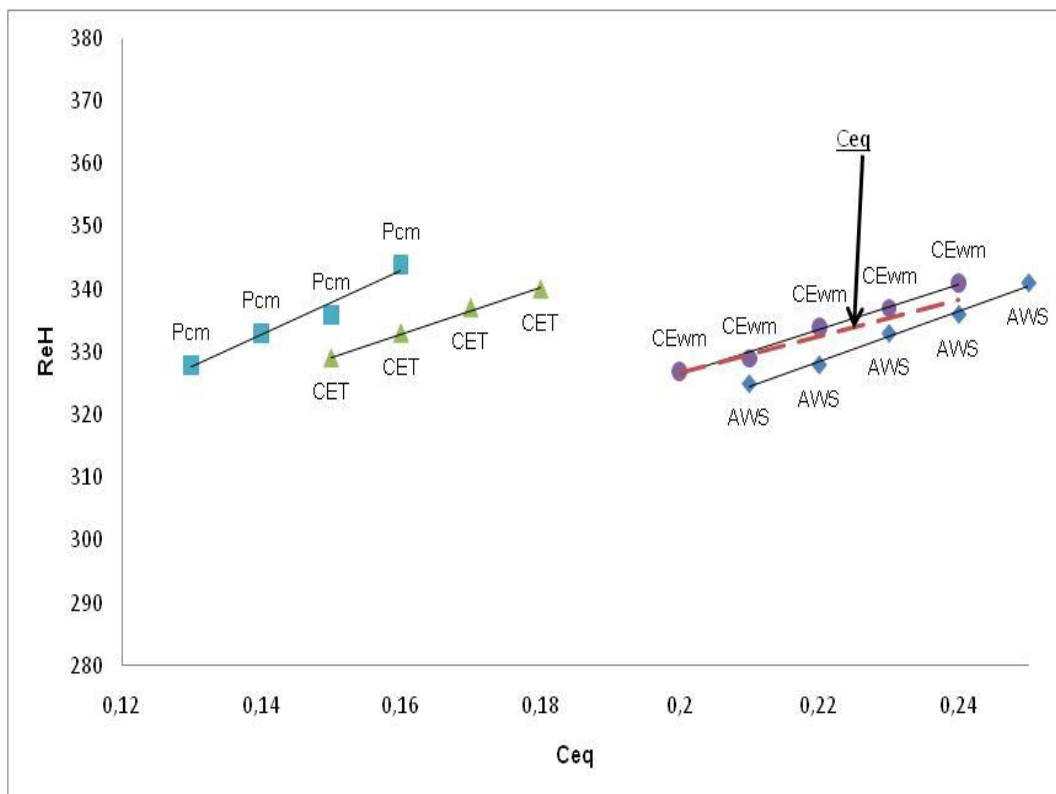
Δεν κατέστη δυνατός ο διαχωρισμός της καλύτερης σχέσης από τις υπόλοιπες γραφικά με χρήση των διαγραμμάτων που παρατίθενται στις εικόνες 3.11 έως 3.12 επειδή οι οπτικές διαφορές ήταν ελάχιστες.

### **4.3 Συσχέτιση ορίου διαρροής με τον ισοδύναμο άνθρακα**

Στα διαγράμματα των εικόνων 3.16 έως 3.20 παρατηρούμε τη συσχέτιση των διαφόρων τιμών του ισοδύναμου άνθρακα (που υπολογίστηκαν από τις διαφορετικές σχέσεις υπολογισμού) με τις πειραματικές τιμές του ορίου διαρροής.

Όπως και στη περίπτωση της συσχέτισης του ορίου θραύσης με τον ισοδύναμο άνθρακα, παρατηρούμε μια γραμμική συσχέτιση των τιμών, η οποία είναι περισσότερο εμφανής στα διαγράμματα τα οποία οι τιμές του ορίου διαρροής έχουν ομαδοποιηθεί σε κλάσεις. Στα ίδια διαγράμματα παρατηρούμε ότι η τυπική απόκλιση κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 10 και 14 MPa. Η τιμή αυτή θεωρείται χαμηλή, οπότε και ικανοποιητική.

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.2\_ παρατηρούμε ότι η κλίση των γραμμών τάσης σε κάθε περίπτωση είναι σχεδόν ίδια. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε όλες τις περιπτώσεις οι τιμές του ισοδύναμου άνθρακα επηρεάζουν σχεδόν στον ίδιο βαθμό την τιμή του ορίου διαρροής.



Εικόνα 4.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα ομαδοποιημένων τιμών, συσχέτισης ορίου διαρροής με τον ισοδύναμο άνθρακα

Επίσης αναφέρεται ότι οι τιμές του ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις Pcm και CET σχέσεις 3 και 8 αντίστοιχα (πίνακας 3.2 αρ. τύπου 3 και 8), ήταν χαμηλότερες από τις τιμές που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις AWS και CEwm σχέσεις 2 και 9 αντίστοιχα (πίνακας 3.2 αρ. τύπου 2 και 9).

Όπως και στη περίπτωση της συσχέτισης του ορίου θραύσης με τις τον ισοδύναμο άνθρακα, παρατηρούμε ότι η γραμμή τάσης  $C_{eq}$ , που αντιστοιχεί στις τιμές ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τη σχέση που προτείνεται από τον ΚΤΧ 2008, διατηρεί παρόμοια χαρακτηριστικά με τις καμπύλες που υπολογίστηκαν από τις υπόλοιπες σχέσεις υπολογισμού ισοδύναμου άνθρακα.

# Κεφάλαιο **5**

## **Συμπεράσματα συσχέτισης μηχανικών ιδιοτήτων με τα κραματικά στοιχεία**

---

### **Συσχέτιση θραύσης με τα κραματικά στοιχεία**

Από τα διαγράμματα που συσχετίζουν τις τιμές του ορίου θραύσης της πειραματικής διαδικασίας με τις τιμές του ορίου θραύσης που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις παλινδρόμησης των κραματικών στοιχείων εξάγουμε το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Οι τιμές των ορίων θραύσης δεν ταυτίζονται με αποτέλεσμα οι καμπύλες να αποκλίνουν από τη θέση την οποία αναμενόταν να βρίσκονται. Δηλαδή οι σχέσεις που αναπτύχθηκαν με τη στατιστική παλινδρόμηση δεν είναι ικανοποιητικές.

### **Συσχέτιση ορίου θραύσης και διαρροής με τον ισοδύναμο άνθρακα**

Οι καμπύλες συσχέτισης του ορίου θραύσης και διαρροής με τις τιμές του ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τις σχέσεις υπολογισμού 1,2,3,8,9 του πίνακα 3.2 έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Οι τιμές ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν από τη σχέση 1 του πίνακα 3.2, (δηλαδή από τη σχέση που προβλέπεται από τον κανονισμό KTX του 2008 για τον υπολογισμό του ισοδύναμου άνθρακα για τους χάλυβες κατασκευών) δεν θεωρείται ικανοποιητική, καθώς οι καμπύλες που προέκυψαν από τη συσχέτιση των τιμών με τις τιμές του ορίου θραύσης και διαρροής είχαν παρόμοια εικόνα με τις υπόλοιπες.

Οι τιμές του ισοδύναμου άνθρακα και κατ'επέκταση τα κραματικά στοιχεία δεν επηρεάζουν από μόνα τους σε μεγάλο βαθμό τις τιμές του ορίου θραύσης και διαρροής. Το συμπέρασμα αυτό εξάγεται από την κλίση των καμπυλών των διαγραμμάτων που συσχετίζουν τα όρια θραύσης και διαρροής με τις τιμές του

ισοδύναμου άνθρακα. Μια μεταβολή του ισοδύναμου άνθρακα κατά 0,4 αντιστοιχεί σε μεταβολή του ορίου θραύσης και διαρροής κατά 15 MPa.

### **Συντελεστής προσδιορισμού $R^2$**

Οι συντελεστές προσδιορισμού που αφορούσαν το όριο θραύσης παρουσίασαν μεγαλύτερες τιμές από τις αντίστοιχες που αφορούσαν το όριο διαρροής.

Από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν με στατιστική παλινδρόμηση και αφορούσαν το όριο θραύσης, η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού αντιστοιχεί στη σχέση 15 του πίνακα 3.1 και είναι 28%, ενώ η μικρότερη αντιστοιχεί στη σχέση 22 του ίδιου πίνακα και η τιμή είναι 6,1%.

Από τις σχέσεις που αναπτύχθηκαν με στατιστική παλινδρόμηση και αφορούσαν το όριο διαρροής, η μεγαλύτερη τιμή του συντελεστή προσδιορισμού αντιστοιχεί στη σχέση 37 του πίνακα 3.4 και είναι 19,5%, ενώ η μικρότερη αντιστοιχεί στη σχέση 40 του ίδιου πίνακα και είναι 4,2%.

Η διάμετρος επηρεάζει σημαντικά τον συντελεστή προσδιορισμού.

Σε καμία από τις περιπτώσεις ο συντελεστής προσδιορισμού δεν κρίνεται ικανοποιητικός.

### **Γενικά συμπεράσματα**

Σε επίπεδο μεμονωμένων χυτηρίων παρατηρείται σημαντική διασπορά των τιμών η οποία αποδίδεται στις παραμέτρους παραγωγής που δεν εξετάστηκαν.

Τα κραματικά στοιχεία δεν αρκούν για τον ικανοποιητικό προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων ενός χάλυβα κατασκευών.

Η συσχέτιση των μηχανικών ιδιοτήτων απευθείας με τα κραματικά στοιχεία είναι προτιμότερη από τη συσχέτιση με οποιαδήποτε μορφή ισοδύναμου άνθρακα, σύμφωνα με τις τιμές του συντελεστή συσχέτισης.

Η ανάπτυξη σχέσεων με στατιστική παλινδρόμηση από την οποία προκύπτουν γραμμικές σχέσεις απέδωσε συντελεστή προσδιορισμού έως και 30%. Ίσως με την ανάπτυξη σχέσεων όπως πολυωνυμικές ή εκθετικές ο συντελεστής προσδιορισμού να είναι μεγαλύτερος.

# Κεφάλαιο **6**

## Υλικό και πειραματική διαδικασία μελέτης ενδοτράχυνσης

---

### 6.1 Περιγραφή υλικού που χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη ενδοτράχυνσης

Το υλικό που εξετάζεται είναι χονδρόσυρμα που παράγεται με θερμή έλαση. Το χονδρόσυρμα έχει πρακτικά κυλινδρική μορφή και λεία επιφάνεια και αποτελεί την πρώτη ύλη για την παραγωγή σύρματος (μικρότερης διαμέτρου) ή πλεγμάτων (εικόνα 6.1). Τα υλικά που εξετάζονται έχουν παραχθεί από την ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. και ταξινομούνται στις κατηγορίες SAE 1008 (ASTM A510M) ή S235JR (EN10025).



*Εικόνα 6.1: Αρχική μορφή υλικού που χρησιμοποιήθηκε*

Για τη μελέτη ενδοτράχυνσης χρησιμοποιήθηκε χονδρόσυρμα το οποίο προήλθε από δυο διαφορετικά χυτήρια (Α και Β), των οποίων η χημική σύσταση παρουσιάζεται στον πίνακα 6.1 και τα μηχανικά χαρακτηριστικά στον πίνακα 6.2.



Πίνακας 6.1: Χημική σύσταση χονδροσύρματος για τα χυτήρια A και B

Χημικά Στοιχεία / Αρ. Χυτηρίου	A	B
Άνθρακας <b>C</b> (%)	0,065	0,095
Μαγγάνιο <b>Mn</b> (%)	0,430	0,490
Θείο <b>S</b> (%)	0,029	0,030
Φώσφορος <b>P</b> (%)	0,013	0,013
Πυρίτιο <b>Si</b> (%)	0,095	0,100
Νικέλιο <b>Ni</b> (%)	0,100	0,095
Χρώμιο <b>Cr</b> (%)	0,065	0,100
Χαλκός <b>Cu</b> (%)	0,480	0,475
Βανάδιο <b>V</b> (%)	0,000	0,000
Μολυβδαίμο <b>Mo</b> (%)	0,020	0,019
Άζωτο <b>N</b> (%)	0,011	0,010
Μόλυβδος <b>Pb</b> (%)	0,000	0,000
Κασσίτερος <b>Sn</b> (%)	0,000	0,023
Ισοδύναμος άνθρακας <b>Ceq</b> (%)	0,190	0,240

Ως προς τη χημική σύσταση, παρατηρούμε ότι και στις δυο περιπτώσεις πρόκειται για χάλυβα χαμηλής περιεκτικότητας σε άνθρακα (προϊόν θερμής έλασης). Τα κυριότερα κραματικά στοιχεία είναι ο άνθρακας, το μαγγάνιο, ο χαλκός, το νικέλιο και το πυρίτιο. Απουσία του μολύβδου και του βαναδίου παρατηρείται και στις δυο περιπτώσεις χάλυβα. Το χυτήριο B ως προς A παρατηρούμε ότι έχει αυξημένη συγκέντρωση άνθρακα, μαγγανίου, χρωμίου, ελαφρώς αυξημένη συγκέντρωση πυριτίου και επίσης περιέχει κασσίτερο.

Πίνακας 6.2: Τιμές μηχανικών χαρακτηριστικών χονδροσύρματος για το χυτήριο A και B

	Μηχανικά χαρακτηριστικά / Αρ. μετρήσεων	1	2	3	μ.ο
A	Μάζα / Μέτρο (kg/m)	0,225	0,225	0,226	0,225
	Διατομή (mm <sup>2</sup> )	28,27	28,27	28,27	28,27
	Φορτίο Διαρροής (N)	9.066	9.745	9.560	9,457
	Φορτίο Θραύσης (N)	12.881	13.315	13.105	13,100
	Ομοιόμορφη Παραμόρφωση Agt (%)	17,8	17,9	17,5	17,7
	Παραμόρφωση Θραύσης (%)	37,5	39,5	38,5	38,5
	Όριο Διαρροής ReH (MPa)	321	345	338	334
	Εφελκυστική Αντοχή Rm (MPa)	456	471	464	463
	Λόγος Εφελκ. / Όριο Διαρροής Rm/ReH	1,42	1,37	1,37	1,38
B	Μάζα / Μέτρο (kg/m)	0,216	0,217	0,217	0,217
	Διατομή (mm <sup>2</sup> )	28,27	28,27	28,27	28,27
	Φορτίο Διαρροής (N)	9.099	9.399	8.907	9,135
	Φορτίο Θραύσης (N)	12.704	12.990	12.631	12,775
	Ομοιόμορφη Παραμόρφωση Agt (%)	20	19,2	17,6	18,9
	Παραμόρφωση Θραύσης (%)	38,5	38	37	37,8
	Όριο Διαρροής ReH (MPa)	322	332	315	323
	Εφελκυστική Αντοχή Rm (MPa)	449	459	447	451
	Λόγος Εφελκ. / Όριο Διαρροής Rm/ReH	1,40	1,38	1,42	1,40

Ως προς τις μηχανικές ιδιότητες αναφέρουμε ότι για το χυτήριο A η τιμή του ορίου διαρροής κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 321 με 345 MPa και η τιμή του ορίου θραύσης μεταξύ των τιμών 456 με 471 MPa. Επίσης ομοιόμορφη παραμόρφωση κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 17,5 με 17,9% και η παραμόρφωση θραύσης μεταξύ των τιμών 37,5 με 39,5%.

Αντιστοίχως για το χυτήριο B η τιμή του ορίου διαρροής κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 315 με 332 MPa και του ορίου θραύσης μεταξύ των τιμών 447 με 459 MPa. Ενώ αντίστοιχα η τιμή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 17,6 με 20% και της παραμόρφωσης θραύσης μεταξύ των τιμών 37 με 38,5%.

Γενικότερα ως προς τις μηχανικές ιδιότητες των δυο χυτηρίων παρατηρούμε ότι στην περίπτωση του χυτηρίου A οι τιμές των ορίων διαρροής και θραύσης είναι μεγαλύτερες από εκείνες του χυτηρίου B.

## 6.2 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας μελέτης ενδοτράχυνσης

Η πειραματική διαδικασία μελέτης ενδοτράχυνσης κινήθηκε σε δυο στάδια. Κατά το πρώτο στάδιο προκλήθηκε ενδοτράχυνση σε διάφορους βαθμούς, σε δοκίμια

που προήλθαν από χονδρόσυρμα χάλυβα SAE 1008. Κατά το δεύτερο στάδιο τα ενδοτραχυμένα δοκίμια εφελκύστηκαν έως τη θραύση. Τα μισά δοκίμια μετά την ενδοτράχυνση είχαν γηρανθεί.

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο της περιγραφής του υλικού, εξετάστηκε το χονδρόσυρμα δυο διαφορετικών χυτηρίων.

Η ενδοτράχυνση προκλήθηκε στα δοκίμια με παραμόρφωση από εφελκυσμό. Οι τιμές παραμόρφωσης που επιλέχθηκαν είναι οι ακόλουθες : 1%, 3%, 5%, 8%, 11% και 14%.

Ο συνολικός αριθμός των δοκιμών είναι εκατόν είκοσι (120) δοκίμια. Ο αριθμός των δοκιμών προέκυψε από το πλήθος των χυτηρίων, το πλήθος των τιμών παραμόρφωσης και το πλήθος των γηρασμένων και μη δοκιμών. Για κάθε χυτήριο έλαβαν χώρα έξι (6) διαφορετικές τιμές παραμόρφωσης. Παραμόρφωση υπέστησαν δέκα (10) δοκίμια για κάθε διαφορετική τιμή παραμόρφωσης, εκ των οποίων τα μισά υπέστησαν γήρανση ενώ τα υπόλοιπα παρέμειναν ως είχαν (πίνακας 6.3).

Πίνακας 6.3 : Πλήθος και κατανομή δοκιμών

		1%	3%	5%	8%	11%	14%	Σύνολο
Χυτήριο Α	Χωρίς γήρανση	5 (δοκίμια)	5	5	5	5	5	60
	Γήρανση	5	5	5	5	5	5	
Χυτήριο Β	Χωρίς γήρανση	5	5	5	5	5	5	60
	Γήρανση	5	5	5	5	5	5	

Η διαδικασία κατά το στάδιο του πρώτου εφελκυσμού, όπου τα δοκίμια δεν θραύονταν, αλλά μόνο ενδοτραχύνονταν είναι η ακόλουθη:

Πριν την ενδοτράχυνση με εφελκυσμό του κάθε δοκιμίου, γινόταν μέτρηση του μήκους της διαμέτρου και του βάρους ανά μήκος. Επίσης τα δοκίμια χαράσσονταν επιφανειακά με χρήση ειδικής συσκευής με σκοπό να διευκολυνθεί η μέτρηση της επιμήκυνσης με το πέρασ του πρώτου εφελκυσμού.

Με το πέρασ του πρώτου εφελκυσμού, όπου επιβάλλονταν αρχική παραμόρφωση στα δοκίμια, ακολουθούσε η μέτρηση της νέας διαμέτρου, του νέου βάρους ανά μήκος και της επιμήκυνσης με βάση τη χάραξη που είχε προηγηθεί. Τα δοκίμια μετά τον εφελκυσμό είχαν όλα συνολικό μήκος 500 mm.

Μετά το πρώτο στάδιο, κατά το οποίο έλαβαν χώρα οι πρώτοι εφελκυσμοί που είχαν σκοπό να ενδοτραχύνουν τα δοκίμια, ακολούθησε η γήρανση των εξήντα (60) από τα εκατόν είκοσι (120) δοκίμια. Για κάθε βαθμό ενδοτράχυνσης ανά χυτήριο, πέντε από τα δέκα δοκίμια υπέστησαν γήρανση (Πίνακας 6.3) στη θερμοκρασία των 100 °C για 1h και 15min.

Πριν το δεύτερο εφελκυσμό έγινε νέα χάραξη στα δοκίμια.

Κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού, το ωφέλιμο μήκος των δοκιμίων, δηλαδή το μήκος του δοκιμίου που βρίσκεται μεταξύ των αρπάγων της μηχανής εφελκυσμού, ήταν 300mm, ενώ η ταχύτητα εφελκυσμού ήταν 15 mm/min.

Με το πέρας του δεύτερου εφελκυσμού, όπου τα δοκίμια έφθαναν έως τη θραύση, γινόταν μέτρηση της νέας διαμέτρου, του νέου βάρους ανά μήκος, της ομοιόμορφης παραμόρφωσης ( $A_{gr}$ ) και της παραμόρφωσης θραύσης ( $A_5$ ).

Πριν τον δεύτερο εφελκυσμό κοβόταν κομμάτι μήκους 20 - 30mm από τυχαίο δοκίμιο για κάθε τιμή παραμόρφωσης.

Τα κομμένα αυτά μέρη των δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν για σκληρομέτρηση και μελέτη των δοκιμίων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Για την λείανση και τη στίλβωση χρησιμοποιήθηκαν τα ακόλουθα λειαντικά χαρτιά: 80 – 120 – 220 – 320 – 520 – 800 – 1000 – 1200 – 2400 και 3μm , 1μm.

### **6.3 Μέθοδοι και συσκευές μέτρησης μηχανικών ιδιοτήτων – Προετοιμασία για ηλεκτρονικό μικροσκόπιο**

#### **Εφελκυσμός**

Οι δοκιμές εφελκυσμού έλαβαν χώρα στον τομέα ποιοτικού ελέγχου της εταιρείας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. Για την πραγματοποίηση των εφελκυσμών χρησιμοποιήθηκε μηχανή εφελκυσμού της εταιρείας Zwick (Εικόνα 6.1). Η μηχανή εφελκυσμού ήταν συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή και λειτουργούσε με χρήση του προγράμματος TestXpert της εταιρείας

Ο ρυθμός παραμόρφωσης σε όλες τις περιπτώσεις ήταν 15mm/min.

*Εικόνα 6.2: Μηχανή εφελκυσμού*



## Γήρανση

Οι γήρανση των δοκιμών πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρείας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. Επετεύχθη με εμβάπτιση των δοκιμών εντός νερού το οποίο βρισκόταν σε κατάσταση βρασμού. Η συσκευή που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Dxintaras (εικόνα 6.3).



Εικόνα 6.3: Συσκευή η οποία χρησιμοποιήθηκε για την γήρανση των δοκιμών και η οποία λειτουργεί με αναβράζον νερό.

## Μέτρηση $A_5$ , $A_{gt}$ , επιμήκυνσης, διαμέτρου και βάρους

Για τη μέτρηση της επιμήκυνσης, της επιμήκυνσης στο σημείο της θραύσης ( $A_5$ ) και της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ) στα διάφορα στάδια του πειραματικής διαδικασίας, τα δοκίμια χάρασσονταν με χρήση κατάλληλης συσκευής (εικόνα 6.4).



Εικόνα 6.4: Συσκευή χάραξης

Κατόπιν με το πέρας του εφελκυσμού και με μέτρηση της μεταβολής του μήκους με βάση τη χάραξη υπολογιζόταν η επιμήκυνση.

Για την επιμήκυνση στη θραύση ( $A_5$ ), με βάση τη χάραξη γινόταν μέτρηση της μεταβολής του μήκους στο σημείο της θραύσης σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό EN – 15630 – 1.

Για την ομοιόμορφη παραμόρφωση (Agt), πάλι με βάση τη χάραξη γινόταν μέτρηση της μεταβολής του μήκους σε περιοχή του δοκιμίου μακριά που το σημείο θραύσης, σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό κανονισμό EN – 15630 – 1.

Για τη μέτρηση της διαμέτρου χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρονικό παχύμετρο ακρίβειας δυο δεκαδικών ψηφίων της εταιρείας Facom (εικόνα 6.5).



*Εικόνα 6.5: Ηλεκτρονικό παχύμετρο*

Για τη μέτρηση του βάρους των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε εργαστηριακός ζυγός της εταιρείας Dhaus (εικόνα 6.6) που διαθέτει το εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρείας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε.



*Εικόνα 6.6: Ζυγός που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας*

### **Σκληρομέτρηση**

Οι σκληρομετρήσεις πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή σκληρομέτρησης που διαθέτει το εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρείας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε (Εικόνα 6.7).



*Εικόνα 6.7: Μηχανή σκληρομέτρησης που χρησιμοποιήθηκε κατά τη πειραματική διαδικασία*

Η σκληρομέτρηση έγινε με τη μέθοδο Rockwell B.

### **Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης**

Για τη μελέτη της μικροδομής και του μεγέθους των κόκκων του υλικού χρησιμοποιήθηκε το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης το οποίο διαθέτει το εργαστήριο μεταλλογνωσίας της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Για την μελέτη των δοκιμίων στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία, η οποία περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα.

### **Εγκιβωτισμός**

Μετά την κοπή ακολουθεί ο εγκιβωτισμός. Συνήθως τα δείγματα εγκιβωτίζονται όταν είναι πολύ μικρά ή έχουν έντονα ανομοιόμορφο σχήμα ώστε να είναι πιο εύκολη η συγκράτησή τους στα επόμενα στάδια της λείανσης και της στίλβωσης. Ο εγκιβωτισμός γίνεται με τη χρήση ρητίνης η οποία στερεοποιείται γύρω από το δείγμα, αφήνοντας



*Εικόνα 6.8: Εγκιβωτισμένα δοκίμια*

ακάλυπτη την προς εξέταση επιφάνεια (εικόνα 6.8). Οι ρητίνες χωρίζονται σε θερμού και ψυχρού εγκιβωτισμού ανάλογα με το αν απαιτούν

ή όχι θέρμανση για να χυτευθούν. Το δείγμα πρέπει να καλύπτεται πλήρως από τη ρητίνη και να μην προεξέχει κανένα μέρος του έκτος και αν πρόκειται να υποστεί ηλεκτροχημική προσβολή.

### **Λείανση**

Η λείανση των δειγμάτων είναι το επόμενο βήμα μετά τον εγκιβωτισμό τους. Το στάδιο αυτό αποσκοπεί στην μείωση της επιφανειακής τραχύτητας των δειγμάτων, απομακρύνοντας το κατεστραμμένο στρώμα της επιφάνειας τους. Κατά τη λείανση χρησιμοποιούνται λειαντικά χαρτιά, διαδοχικά από το πιο χονδρόκοκκο στο πιο λεπτόκοκκο χαρτί, σε ένα μονοαξονικά, περιστρεφόμενο, υδρόψυκτο δίσκο.

Η λείανση και η στίλβωση πραγματοποιήθηκαν στη συσκευή λείανσης που διαθέτει το εργαστήριο ποιοτικού ελέγχου της εταιρείας ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε και είχε ως σκοπό την προετοιμασία των δοκιμίων για μελέτη στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM).

Η συσκευή λείανσης είναι της εταιρείας Struers (εικόνα 6.9).





*Εικόνα 6.9: Μηχανή στίλβωσης*

### Στίλβωση

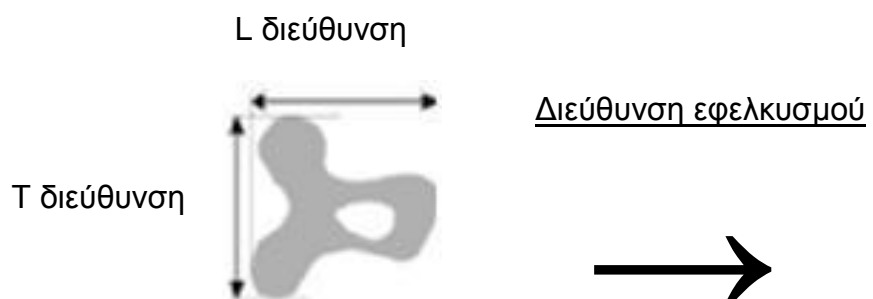
Μετά τη λείανση, τα δείγματα στίλβώνονται προκειμένου να αποκτήσουν επίπεδη επιφάνεια, χωρίς ατέλειες. Η στίλβωση γίνεται πάνω σε κατάλληλα υφάσματα στα οποία απλώνεται αδαμαντόπαστα ή πάστα οξειδίων (π.χ. αλούμινας).

### Χημική προσβολή

Προσβολή καλείται η διαδικασία κατά την οποία ένα δείγμα έρχεται σε επαφή με κάποιο αντιδραστήριο παρουσία ή μη δυναμικού με στόχο την αποκάλυψη της μικροδομής του. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία τα δοκίμια προσβλήθηκαν με Nital 2% για χρόνο 13 δευτερολέπτων.

### Μέτρηση διαστάσεων κόκκων

Η μέτρηση των διαστάσεων των κόκκων έγινε με μέτρηση δυο σταθερών σε όλες τις περιπτώσεις διαστάσεων. Δηλαδή σε κάθε κόκκο γινόταν μέτρηση δυο κάθετων διαστάσεων, οι οποίες αφορούσαν το μήκος και το πλάτος του κόκκου. Η μια διάσταση ήταν πάντοτε παράλληλη σε διεύθυνση του εφελκυσμού, ενώ η άλλη διάσταση ήταν πάντοτε κάθετη (εικόνα 6.10).



Εικόνα 6.10: Μέτρηση των δυο κάθετων διαστάσεων των κόκκων

# Κεφάλαιο 7

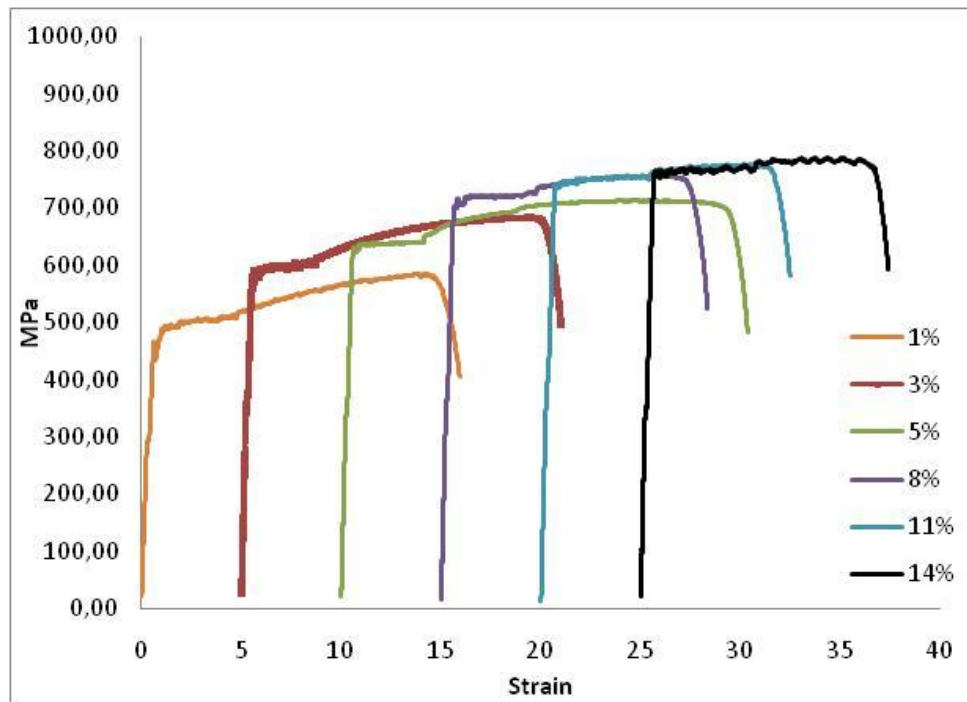
## Αποτελέσματα μελέτης ενδοτράχυνσης

### **7.1 Συγκεντρωτικά διαγράμματα εφελκυσμών**

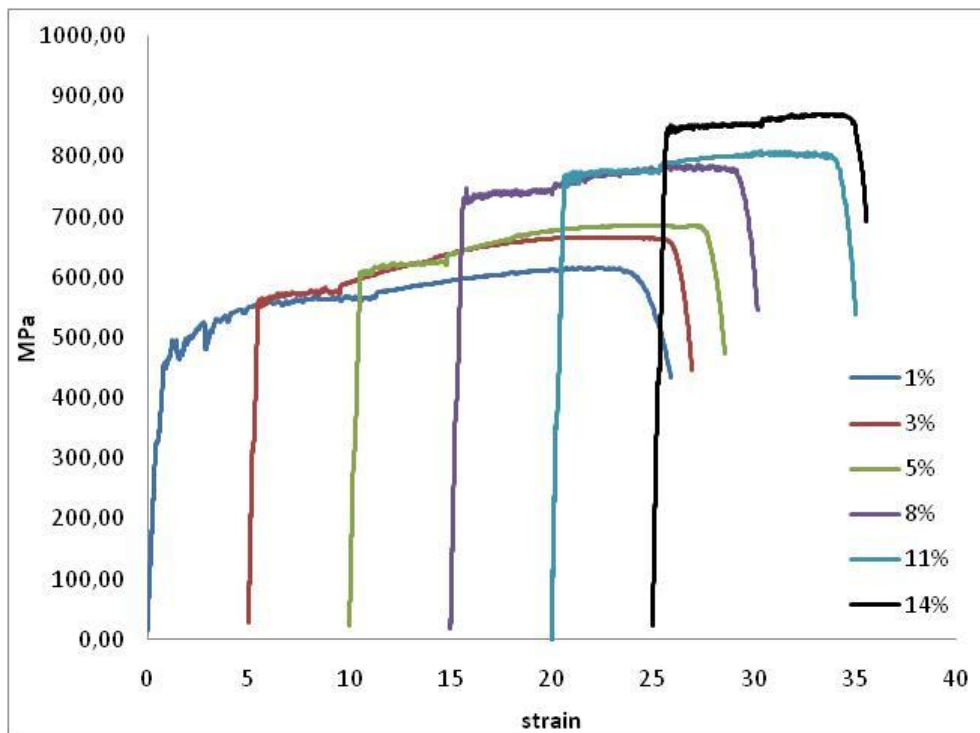
Έγινε μελέτη ενδοτράχυνσης σε χονδρόσυρμα από δυο διαφορετικά χυτήρια. Η ενδοτράχυνση εισήχθη στο υλικό με εφελκυσμό. Τα ποσοστά ενδοτράχυνσης είναι 1%,3%,5%,8%,11%,14%. Κατά την πειραματική διαδικασία ενδοτραχύνθηκαν συνολικά εκατόν είκοσι (120) δοκίμια. Από τα εκατόν είκοσι δοκίμια τα μισά υπέστησαν γήρανση.

Τα αποτελέσματα των εφελκυσμών παρουσιάζονται στα παρακάτω διαγράμματα.

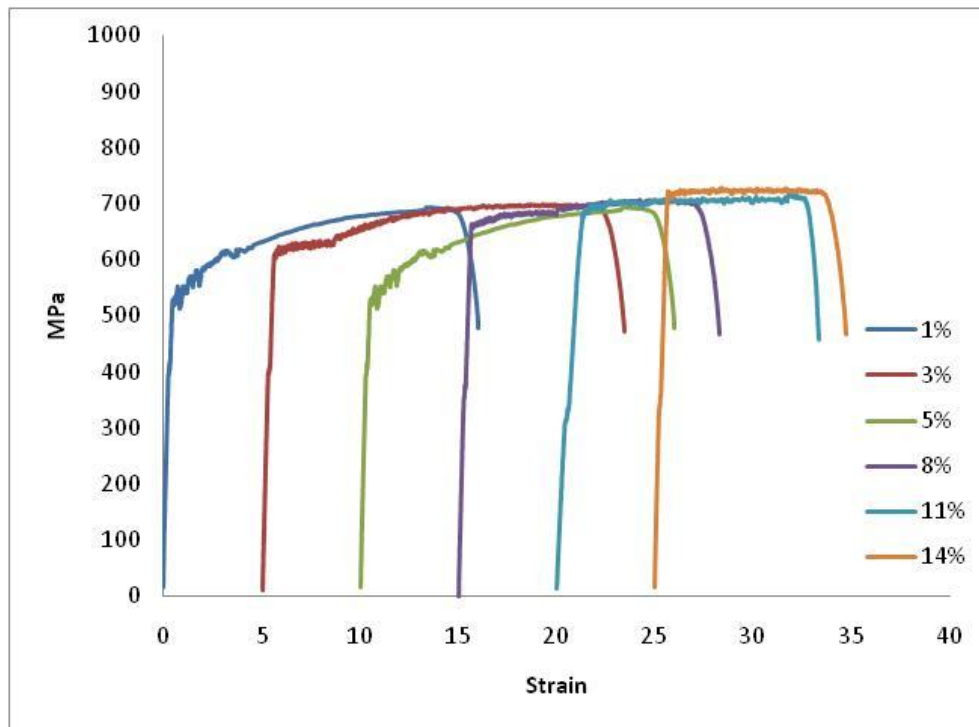
Στις εικόνες 7.1 έως 7.4 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των εφελκυσμών για τα δυο χυτήρια που εξετάστηκαν. Τα διαγράμματα των εικόνων 7.1 και 7.3 παρουσιάζουν τις καμπύλες εφελκυσμού για τα δοκίμια που δεν υπέστησαν γήρανση, ενώ τα διαγράμματα των εικόνων 7.2 και 7.4 τις αντίστοιχες καμπύλες των δοκιμίων που υπέστησαν γήρανση.



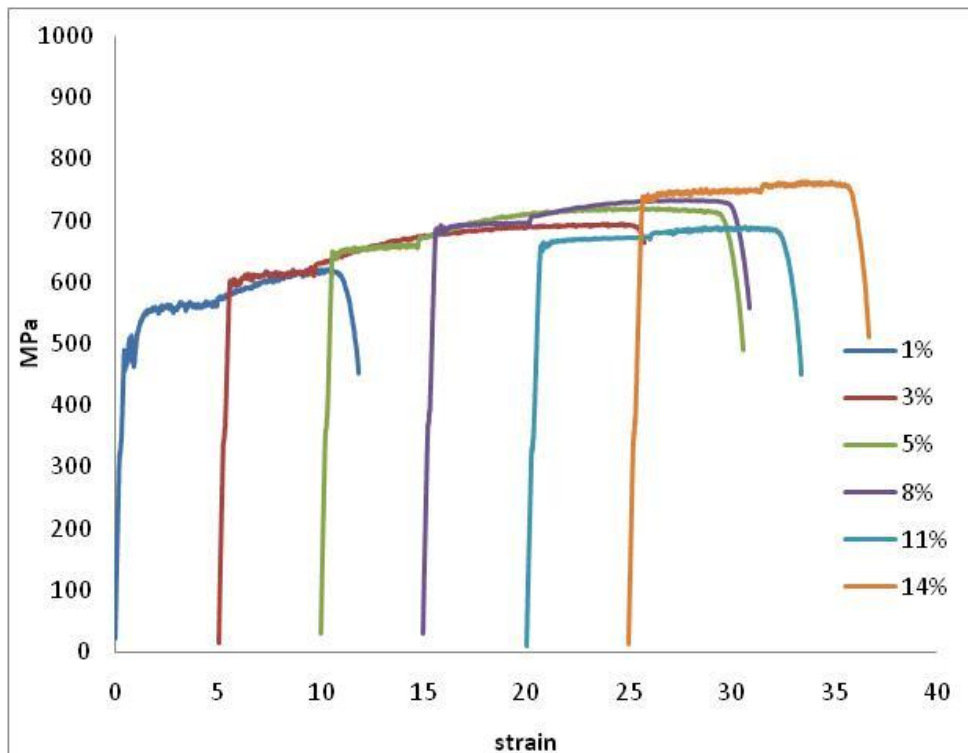
Εικόνα 7.1: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυσμών για το χυτήριο Α για τα δοκίμια που δεν έχουν υποστεί γήρανση



Εικόνα 7.2: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυσμών για το χυτήριο Α για τα δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση



Εικόνα 7.3: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυσμών για το χυτήριο B για τα δοκίμια που δεν έχουν υποστεί γήρανση



Εικόνα 7.4: Συγκεντρωτικό διάγραμμα εφελκυσμών για το χυτήριο B για τα δοκίμια που έχουν υποστεί γήρανση

## 7.2 Διαγράμματα μεταβολής των διαφόρων μεγεθών εξαιτίας της ενδοτράχυνσης

Τα μεγέθη τα οποία μελετήθηκαν κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας είναι, η ομοιόμορφη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ), η παραμόρφωση στο σημείο της θραύσης ( $A_5$ ), το όριο θραύσης ( $R_m$ ), το όριο διαρροής ( $Re$ ), η μεταβολή του βάρους ανά μήκος ( $Kg/m$ ), και η μεταβολή στη διάμετρο.

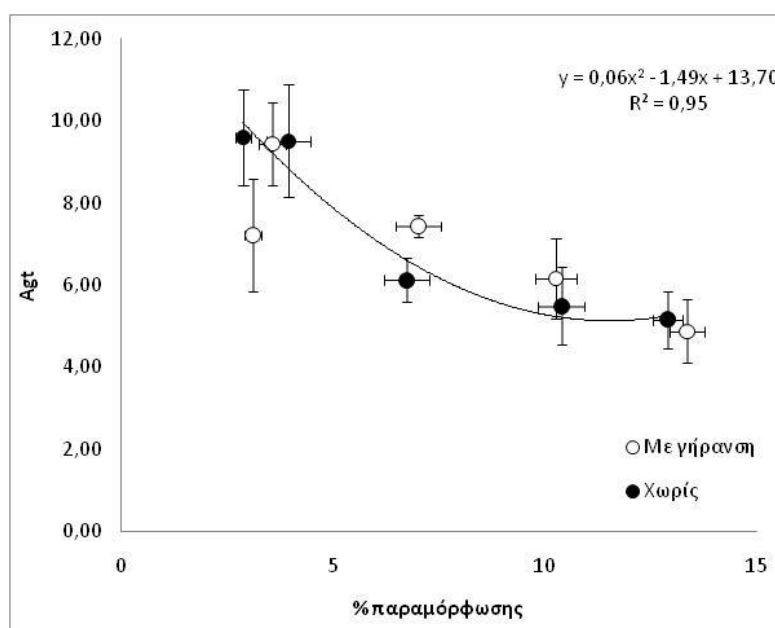
Από την επεξεργασία των δεδομένων προέκυψαν διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν τα παραπάνω μεγέθη ως προς το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης (ή αλλιώς βαθμό ενδοτράχυνσης) που επιβλήθηκε κατά τη διάρκεια του πρώτου εφελκυσμού. Το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης που παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα υπολογίστηκε με χρήση των μετρήσεων της επιμήκυνσης που λάβαμε με το πέρας του πρώτου εφελκυσμού για κάθε δοκίμιο και των δυο χυτηρίων.

Τα διαγράμματα που σχεδιάστηκαν συγκρίνουν είτε για το ίδιο χυτήριο τις διαφορές μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων, είτε τις διαφορές μεταξύ των δυο χυτηρίων.

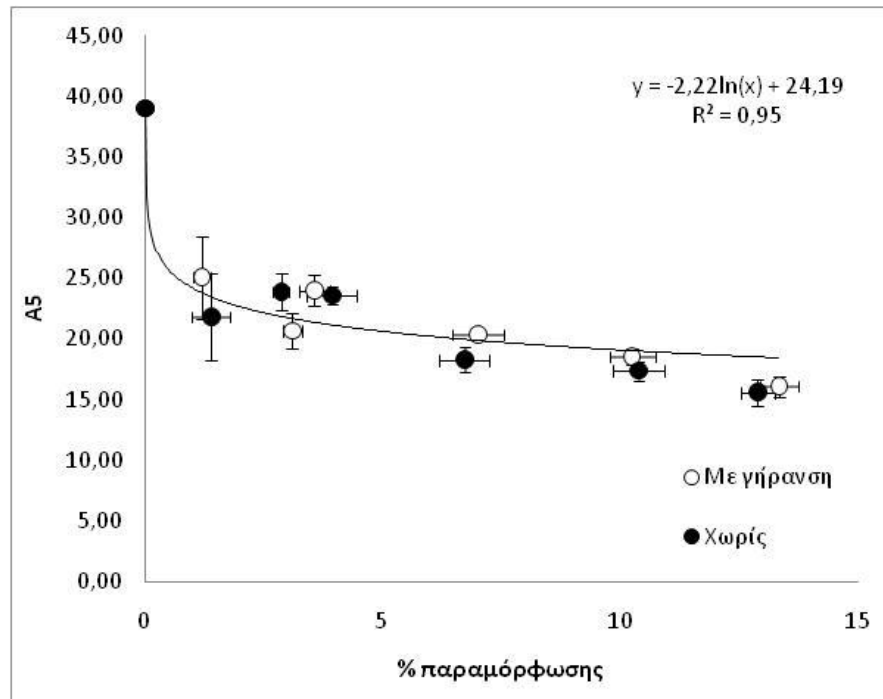
### Σύγκριση ανά χυτήριο

#### Χυτήριο A

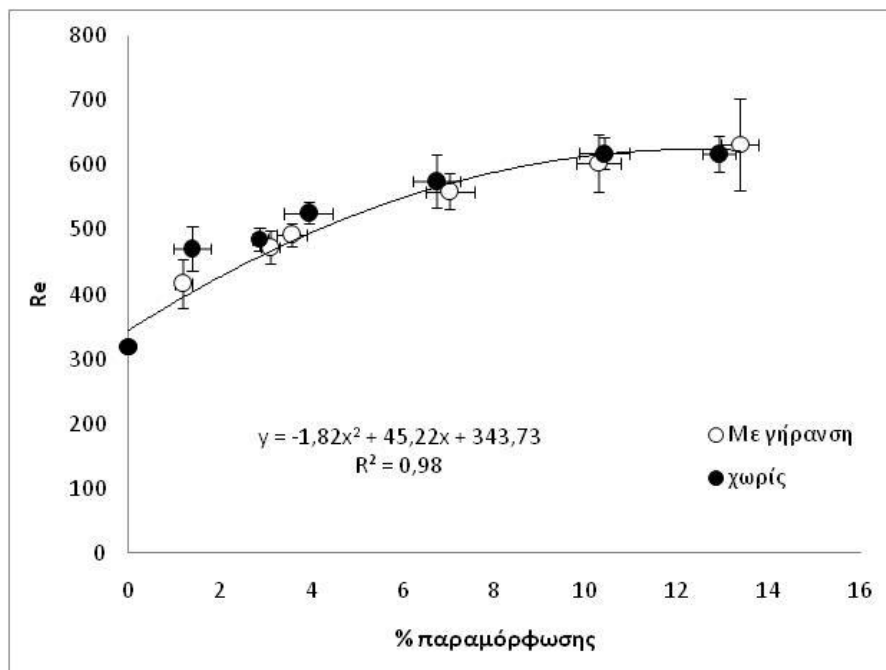
Στις εικόνες 7.5 έως 7.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν το χυτήριο A και συγκρίνουν τις διαφορές μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων.



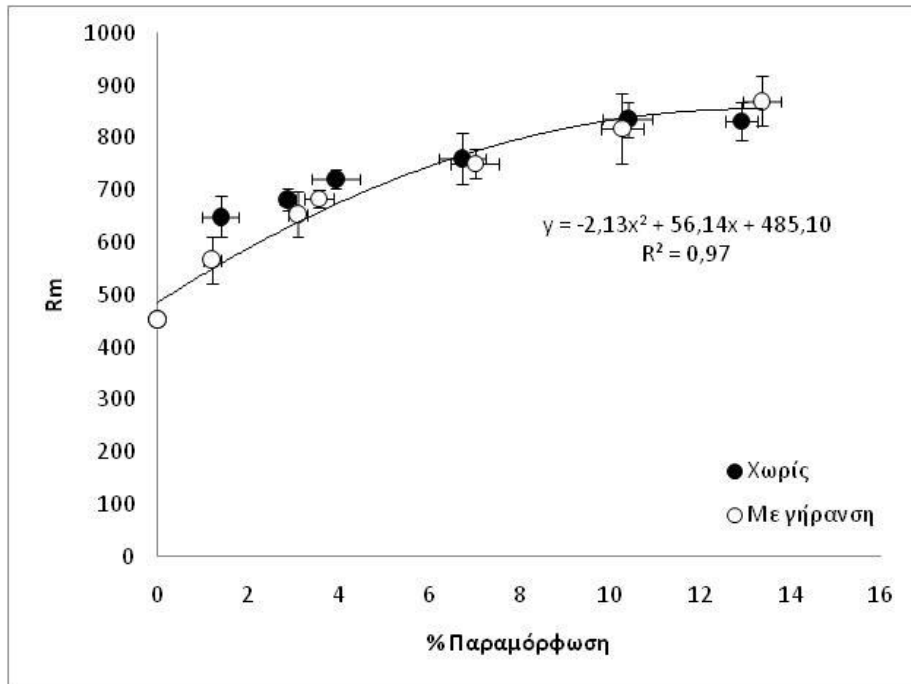
Εικόνα 7.5: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



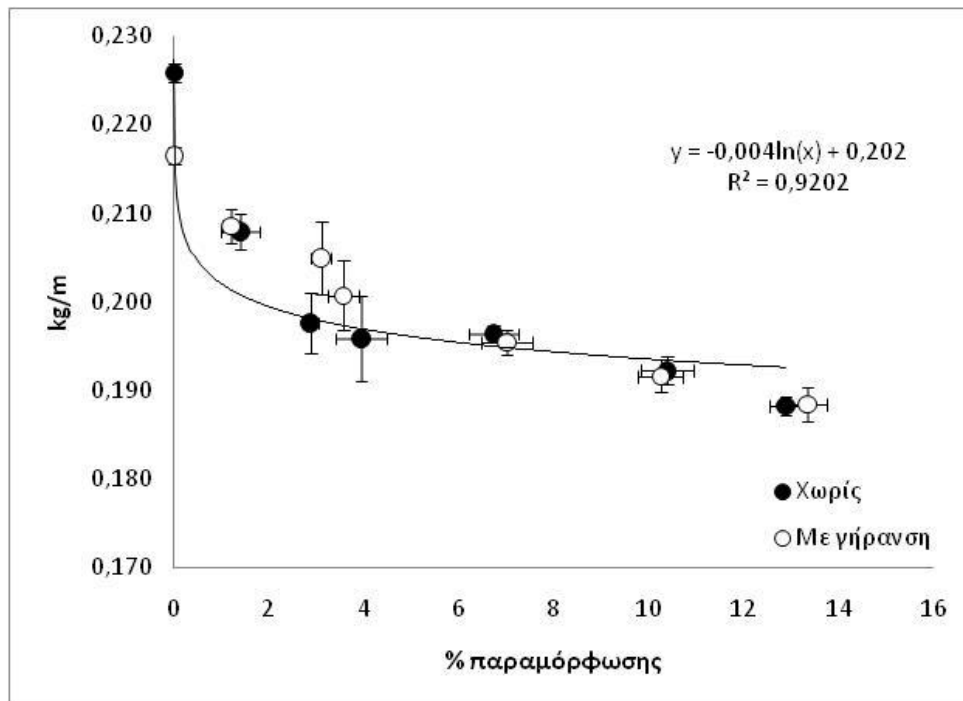
Εικόνα 7.6: : Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



Εικόνα 7.7: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, ορίου διαρροής ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση

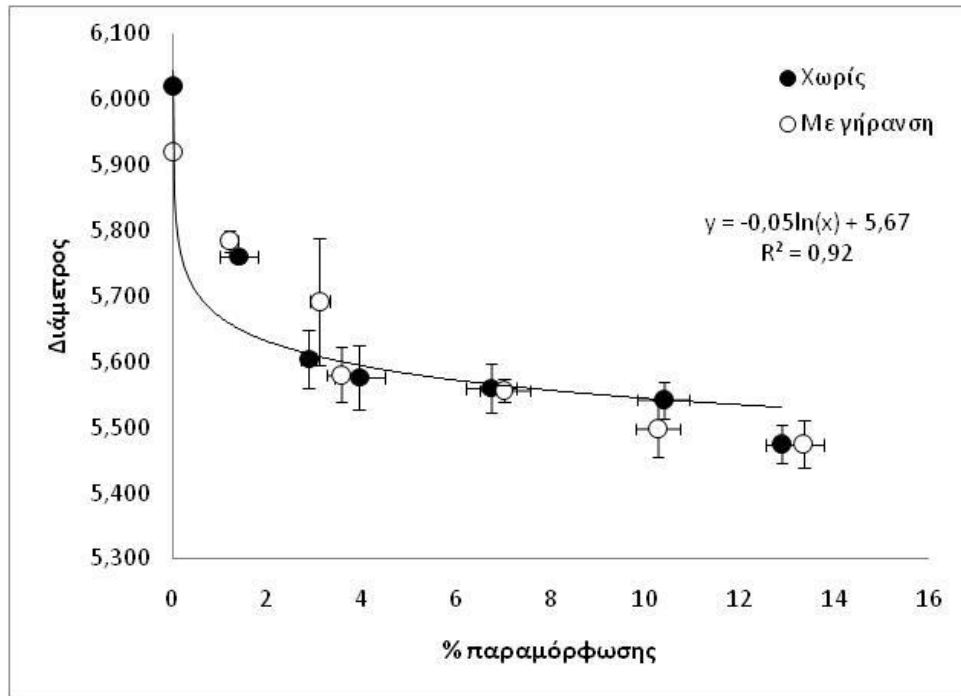


Εικόνα 7.8: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, ορίου θραύσης ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση

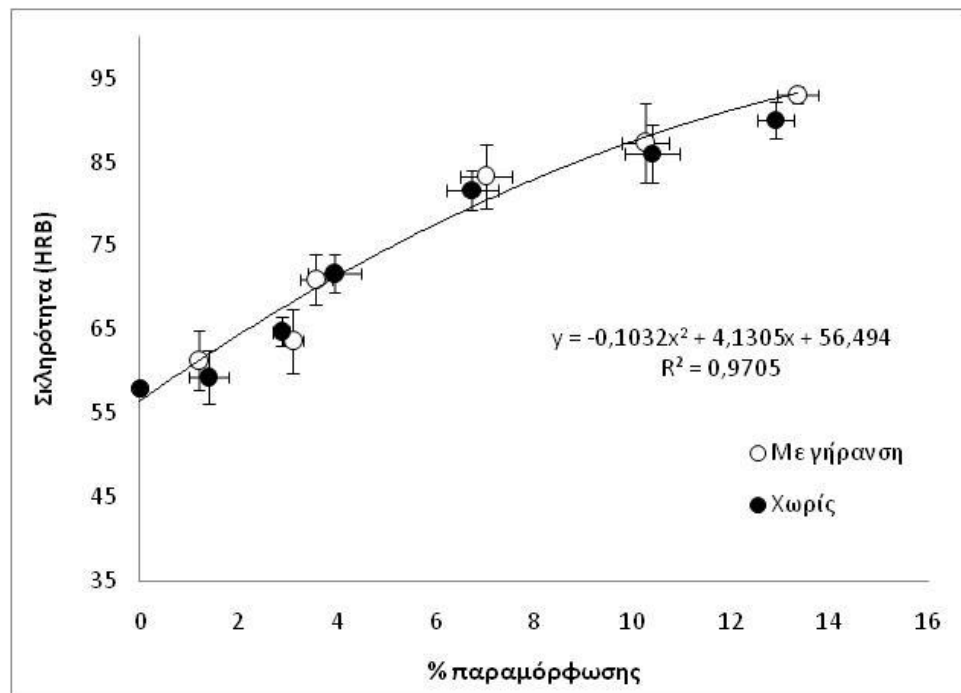


Εικόνα 7.9: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, βάρους ανά μήκος ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση





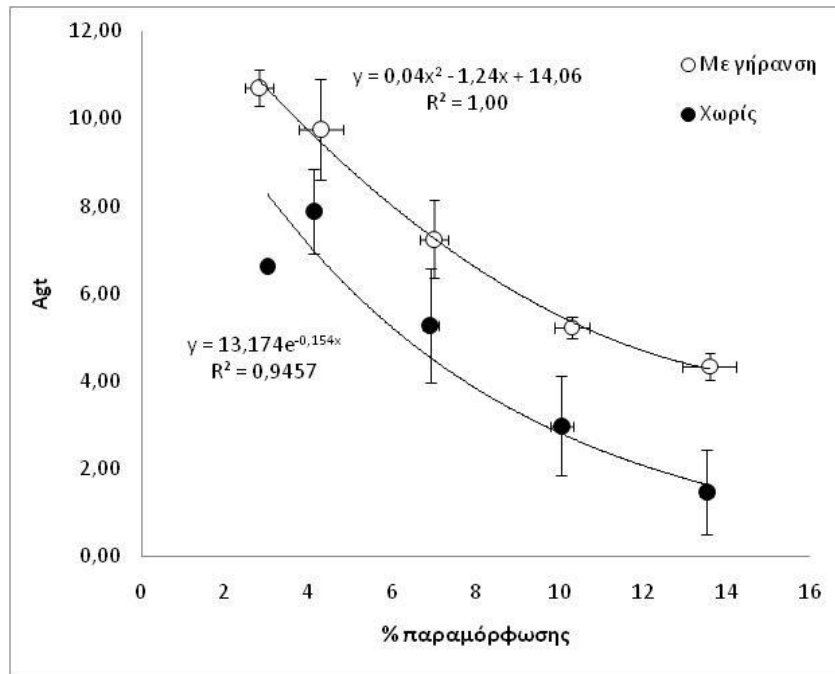
Εικόνα 7.10: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, διαμέτρου ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



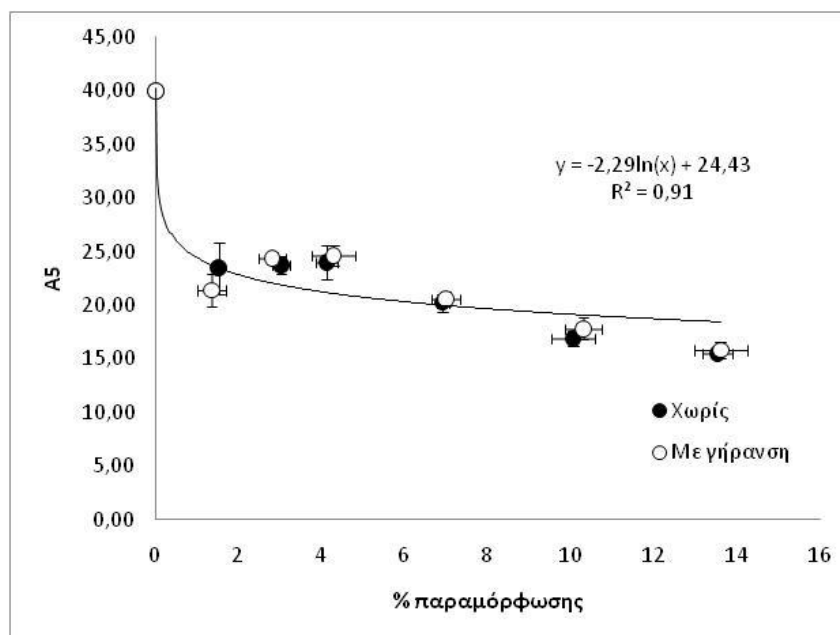
Εικόνα 7.11 Διάγραμμα σύγκρισης, σκληρότητας ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση για το χυτήριο A μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων

## Χυτήριο Β

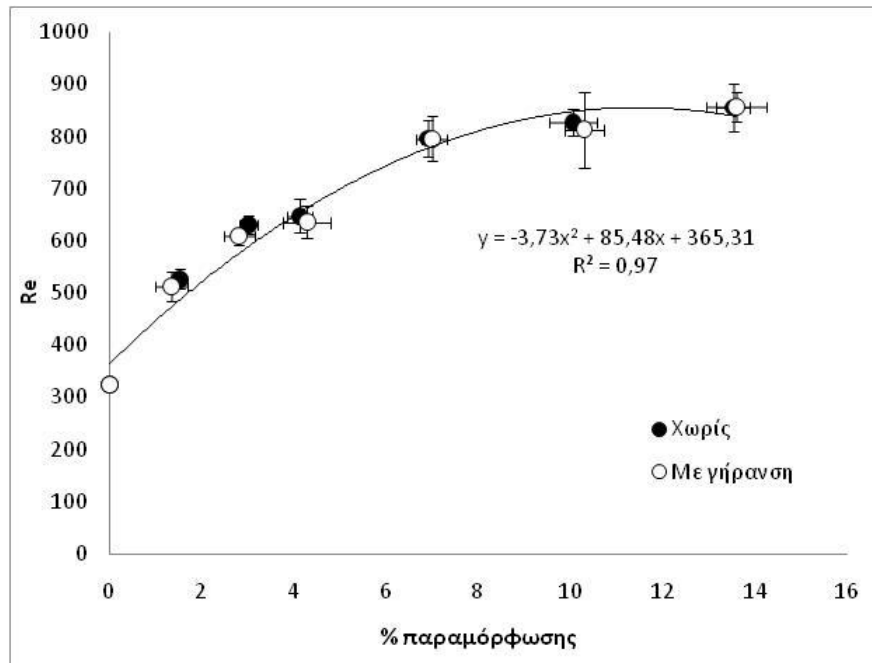
Στις εικόνες 7.12 έως 7.17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν το χυτήριο Β και συγκρίνουν τις διαφορές μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων ως προς τα διάφορα μεγέθη που μεταβάλλονται.



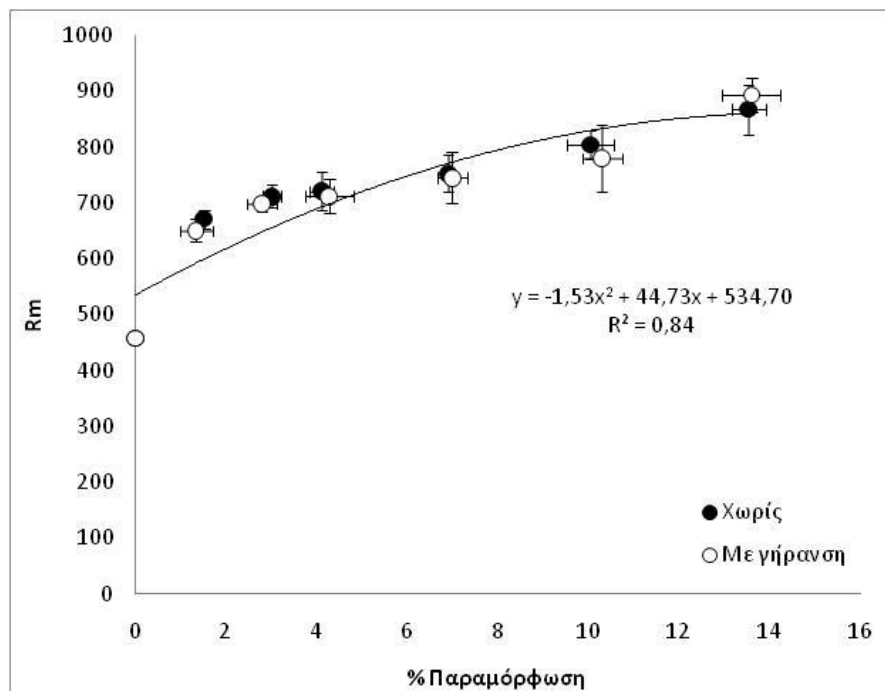
Εικόνα 7.12: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο Β μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



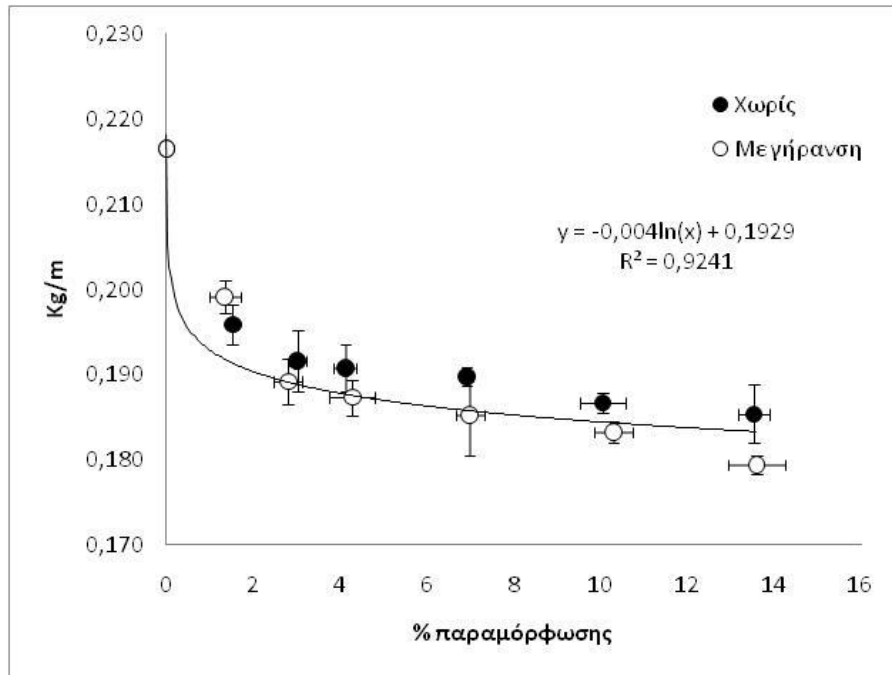
Εικόνα 7.13: : Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο B μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



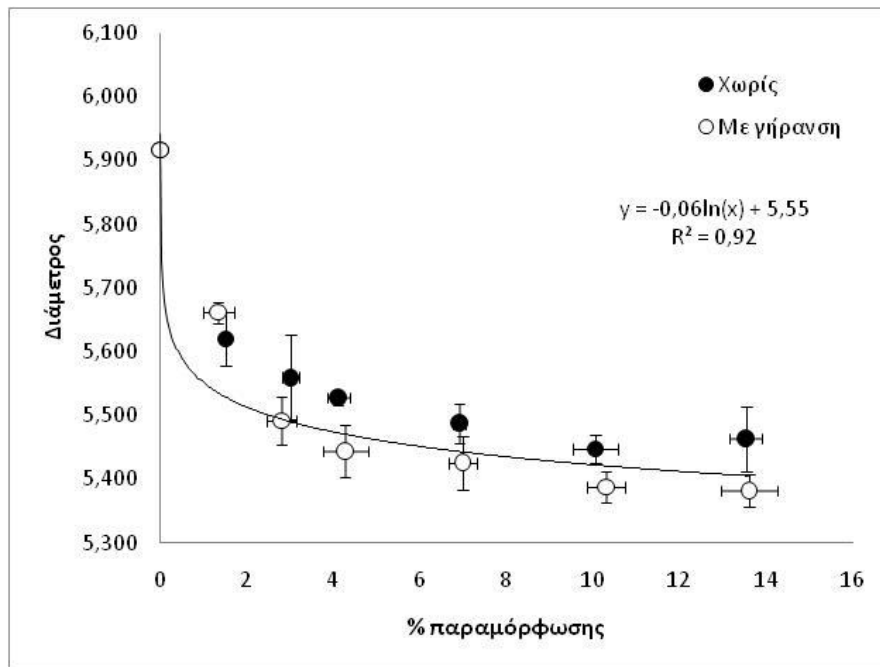
Εικόνα 7.14: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο B μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, ορίου διαρροής ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



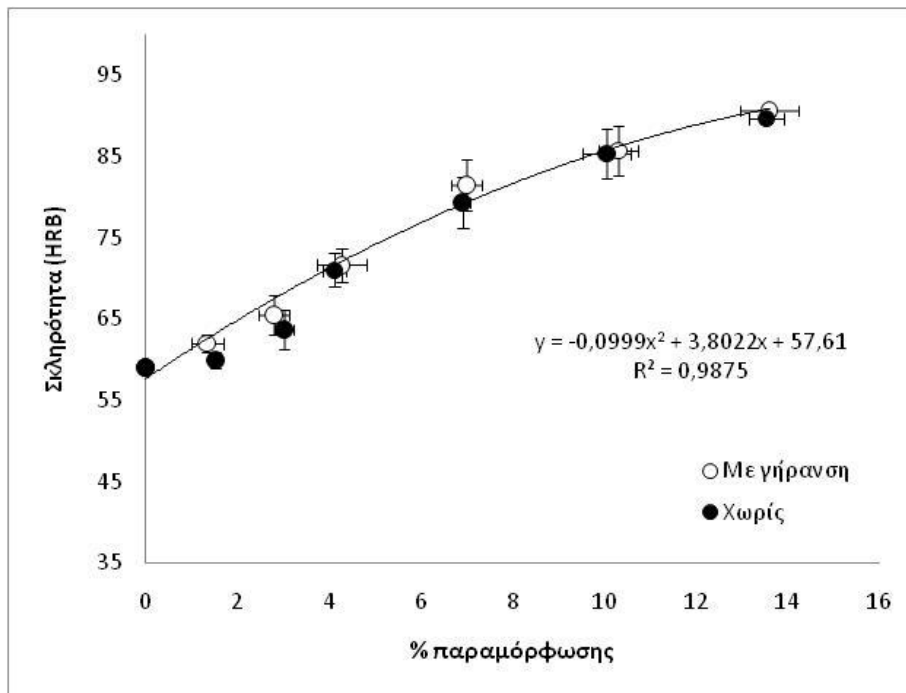
Εικόνα 7.15: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο B μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, ορίου θραύσης ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



Εικόνα 7.16: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο B μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, βάρους ανά μήκος ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



Εικόνα 7.17: Διάγραμμα σύγκρισης για το χυτήριο B μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων, διαμέτρου ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση



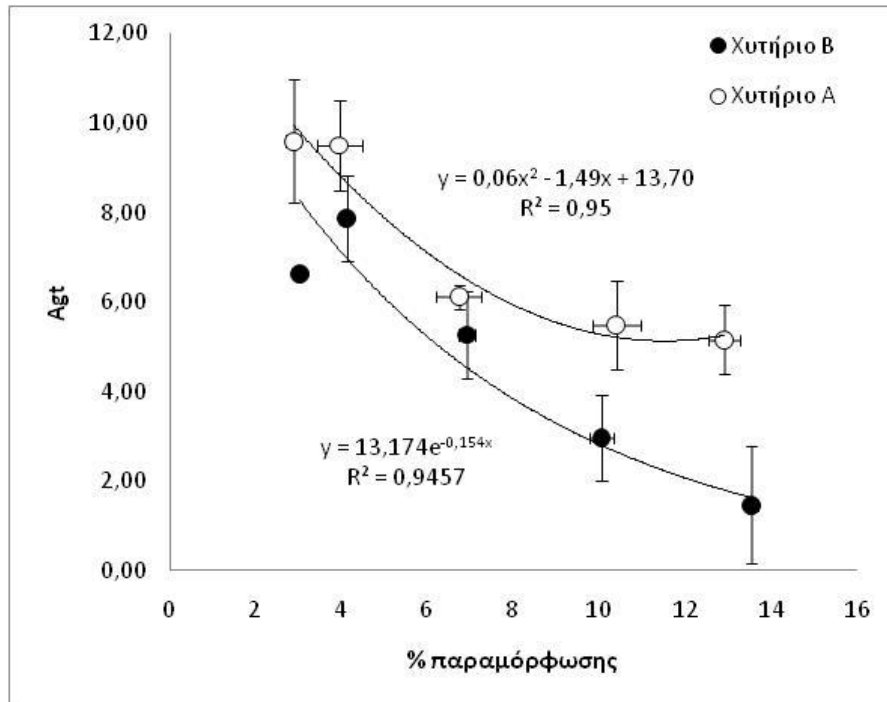
Εικόνα 7.18: Διάγραμμα σύγκρισης, σκληρότητας ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση για το χυτήριο B μεταξύ γηρασμένων και μη δοκιμίων

### Σύγκριση μεταξύ των χυτηρίων

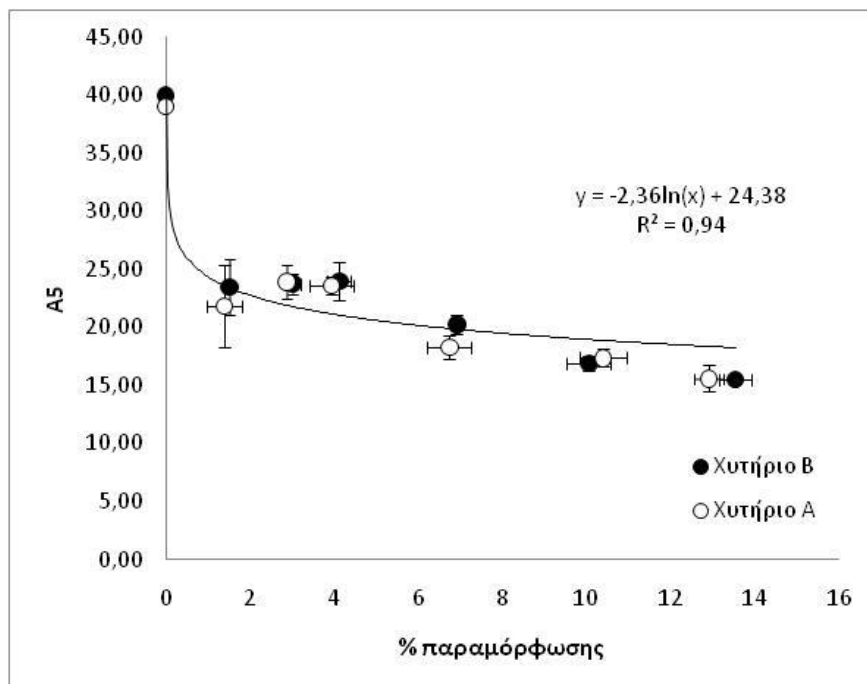
Στις εικόνες 7.19 έως 7.31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τη σύγκριση μεταξύ των δύο χυτηρίων, είτε για τα γηρασμένα δοκίμια είτε για τα μη γηρασμένα.

### **Χωρίς γήρανση**

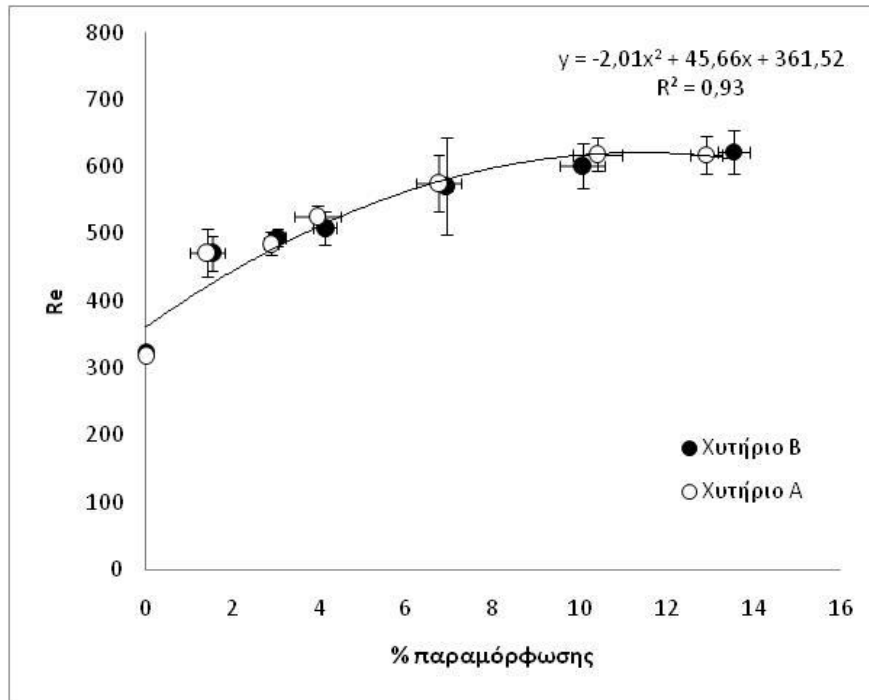
Οι εικόνες 7.19 έως 7.24 παρουσιάζουν τα διαγράμματα που συγκρίνουν τα δυο χυτήρια ως προς τα μεγέθη που μεταβάλλονται και που αφορούν τα δοκίμια που δεν έχουν γηρανθεί.



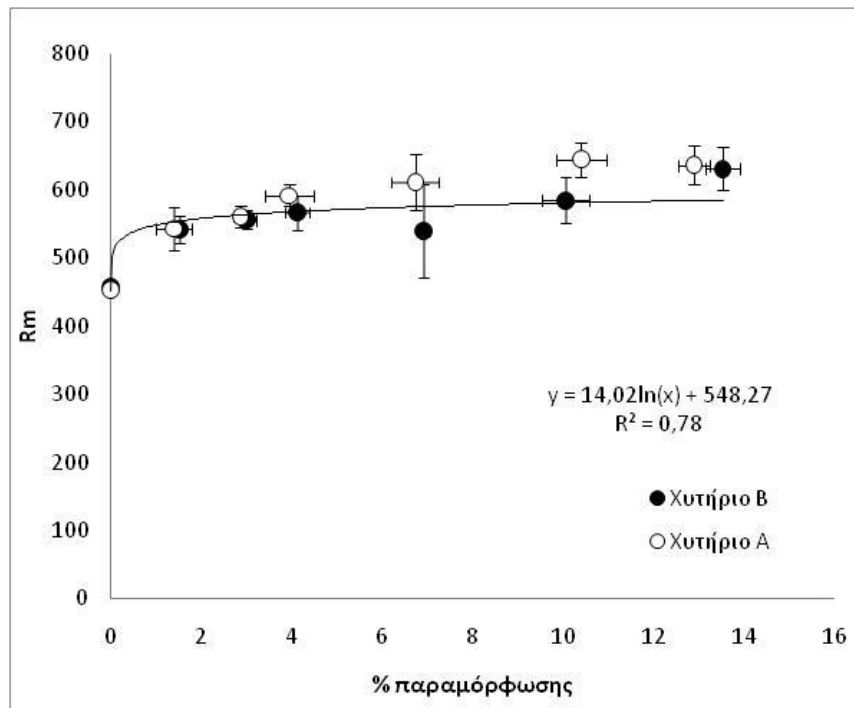
Εικόνα 7.19: Σύγκριση των δυο χυτηρίων της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρασθεί.



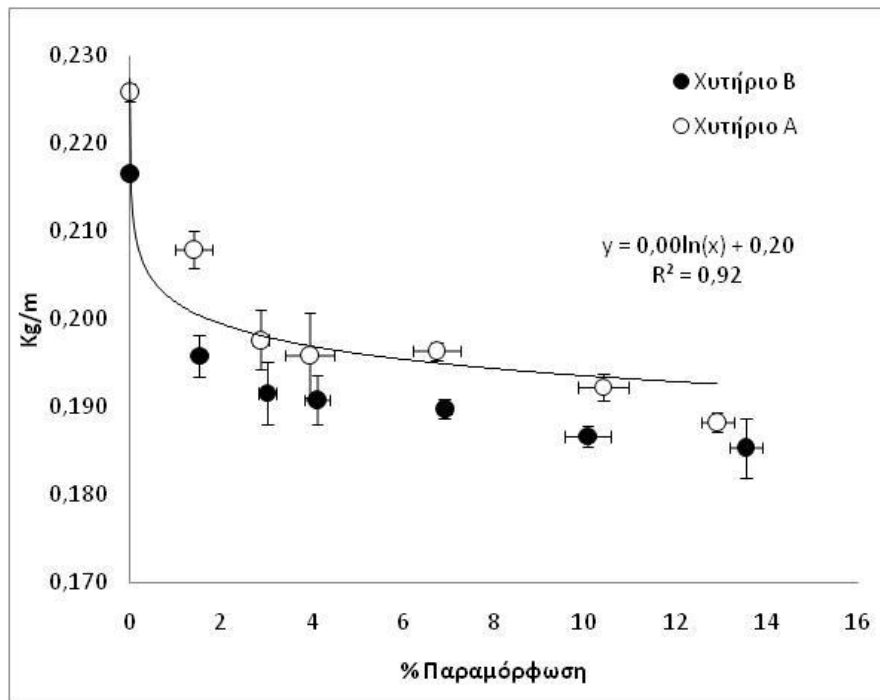
Εικόνα 7.20: Σύγκριση των δυο χυτηρίων της παραμόρφωσης στο σημείο θραύσης ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρασθεί.



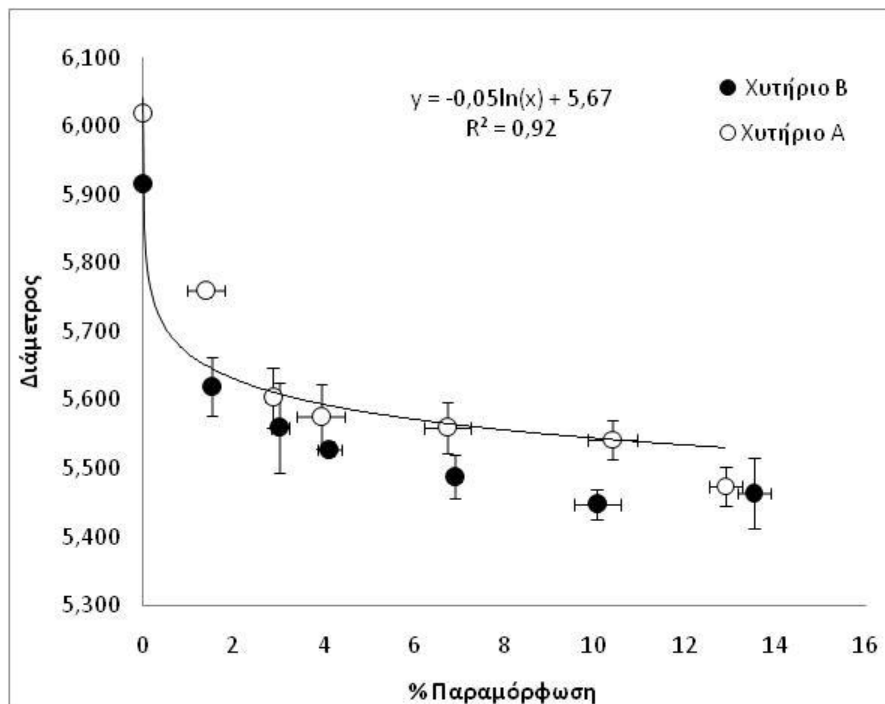
Εικόνα 7.21: Σύγκριση των δυο χυτηρίων του ορίου διαρροής ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρασθεί.



Εικόνα 7.22: Σύγκριση των δυο χυτηρίων του ορίου θραύσης ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρασθεί.

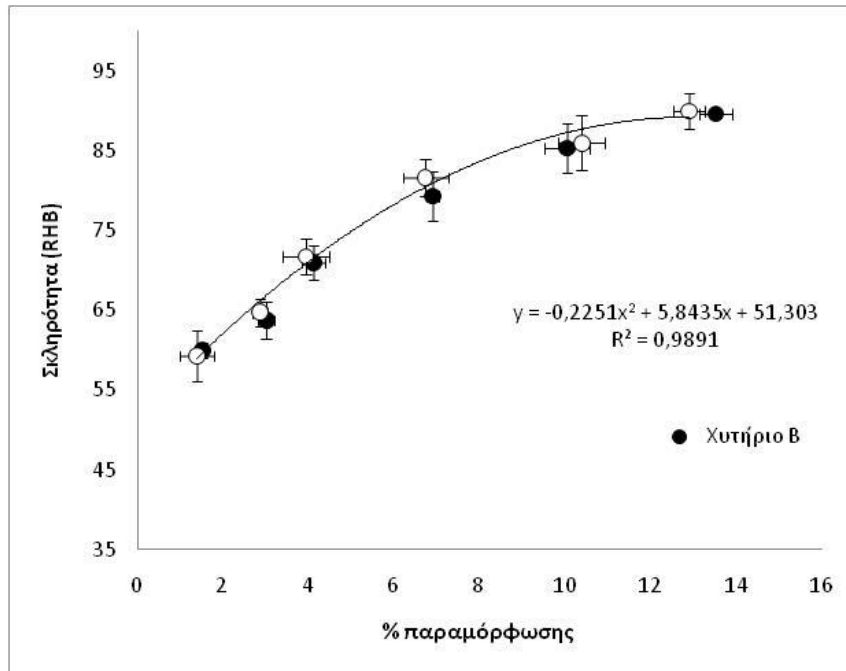


Εικόνα 7.23: Σύγκριση των δυο χυτηρίων του βάρους ανά μήκος ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρασθεί.



Εικόνα 7.24: Σύγκριση των δυο χυτηρίων της διαμέτρου ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρασθεί.

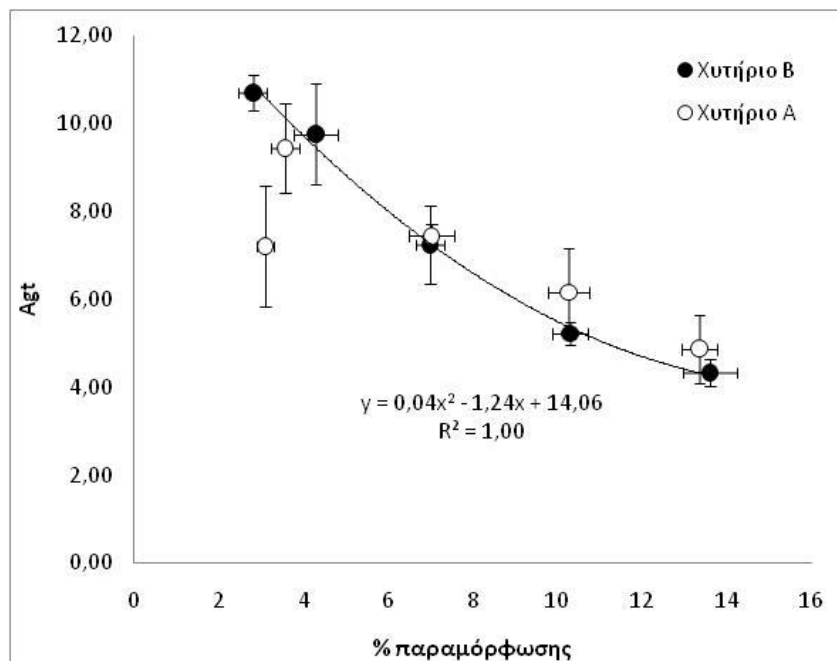




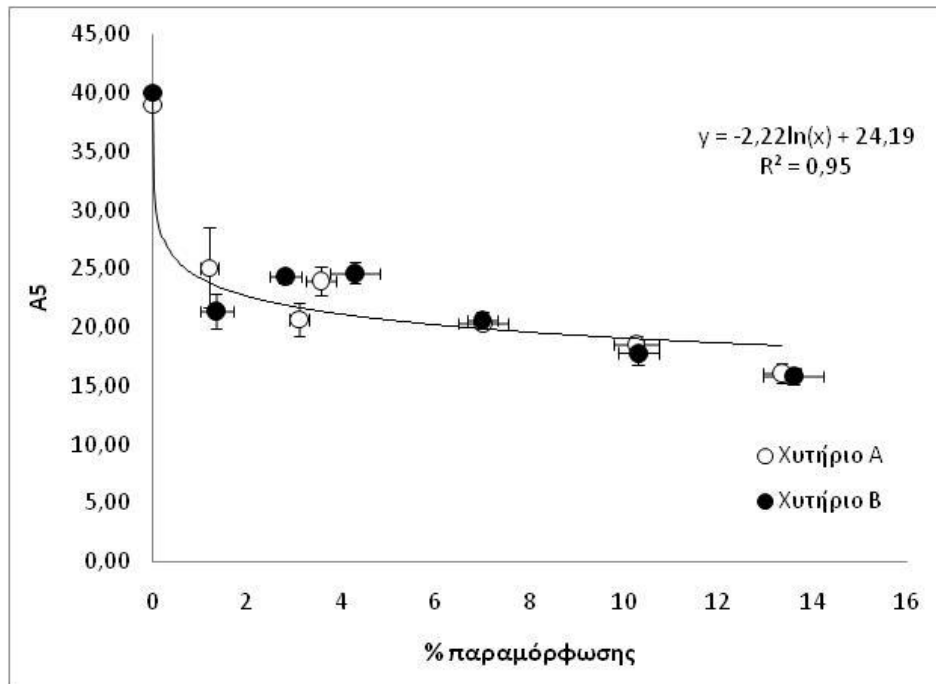
Εικόνα 7.25: Διάγραμμα σύγκρισης, σκληρότητας ως προς επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση για τα χυτήρια A και B για τα δοκίμια που δεν έχουν γηρανθεί.

### Με γήρανση

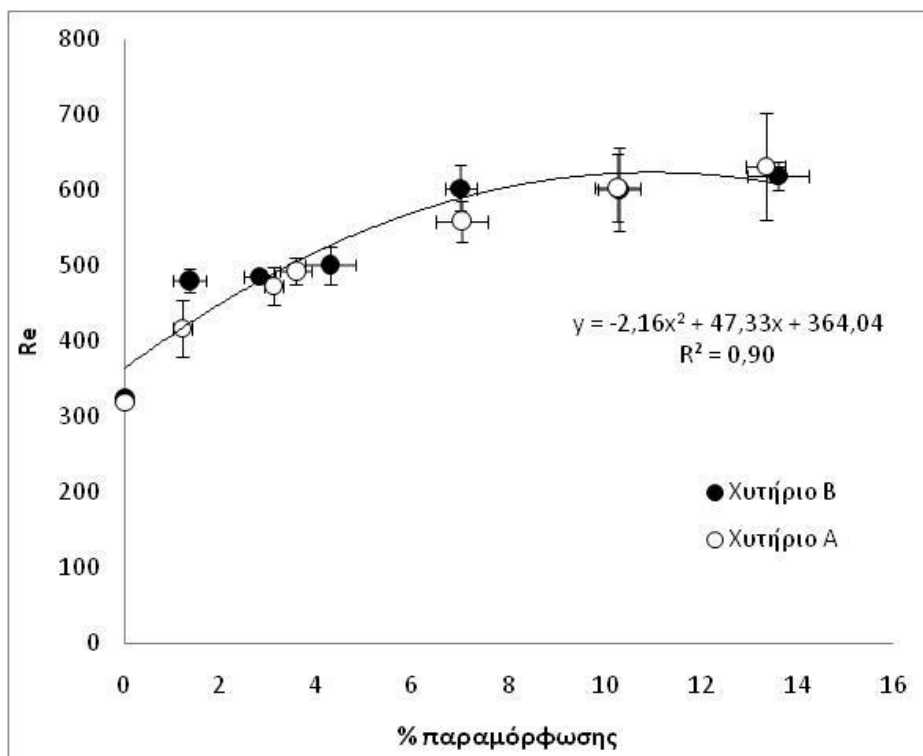
Οι εικόνες 7.26 έως 7.31 παρουσιάζουν τα διαγράμματα που συγκρίνουν τα δυο χυτήρια ως προς τα μεγέθη που μεταβάλλονται και που αφορούν τα δοκίμια που έχουν γηρανθεί.



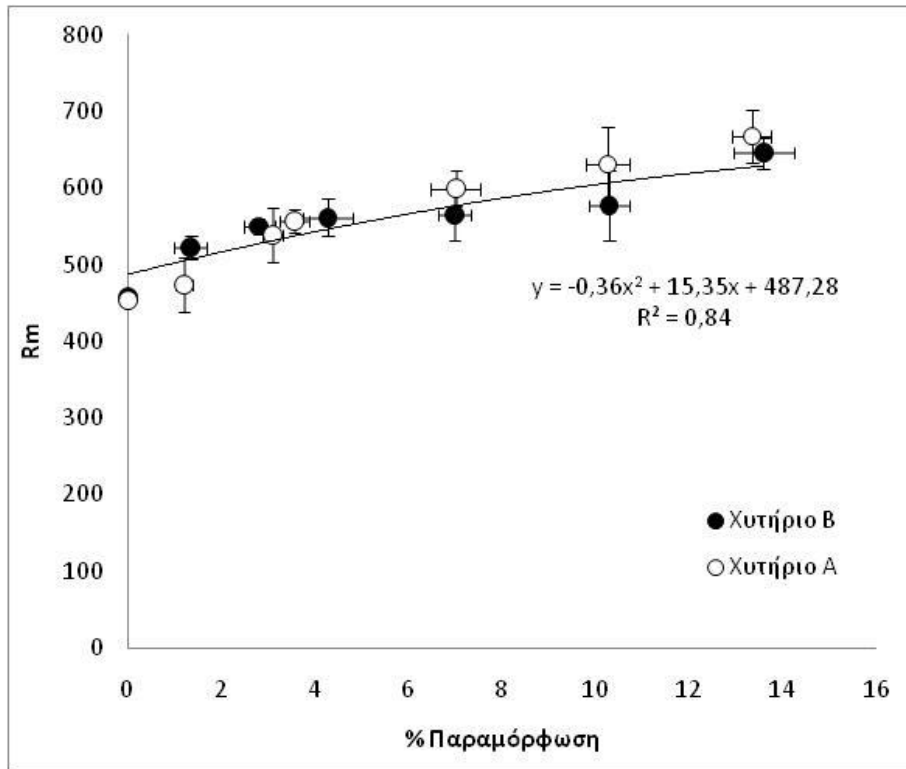
Εικόνα 7.26: Σύγκριση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο των δυο χυτηρίων ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



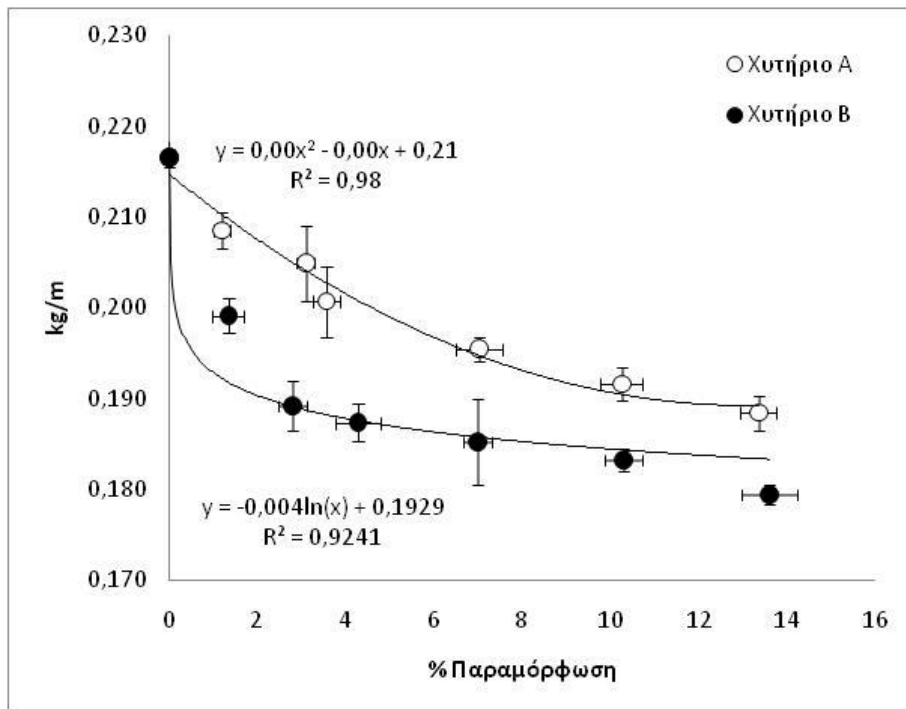
Εικόνα 7.27: Σύγκριση της παραμόρφωσης στο σημείο θραύσης των δυο χυτηρίων ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



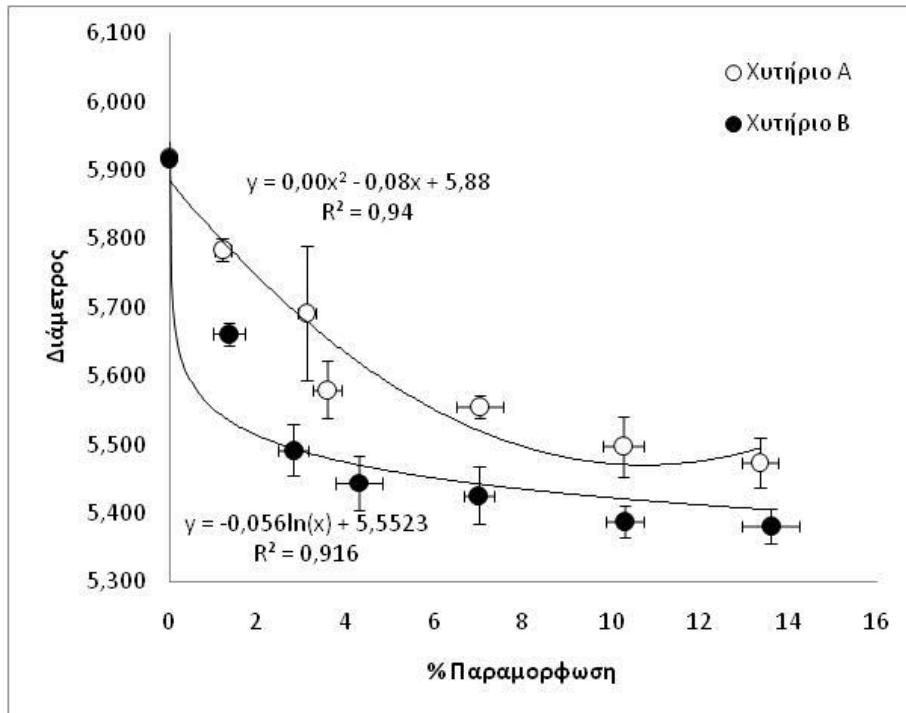
Εικόνα 7.28: Σύγκριση του ορίου διαρροής των δυο χυτηρίων ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



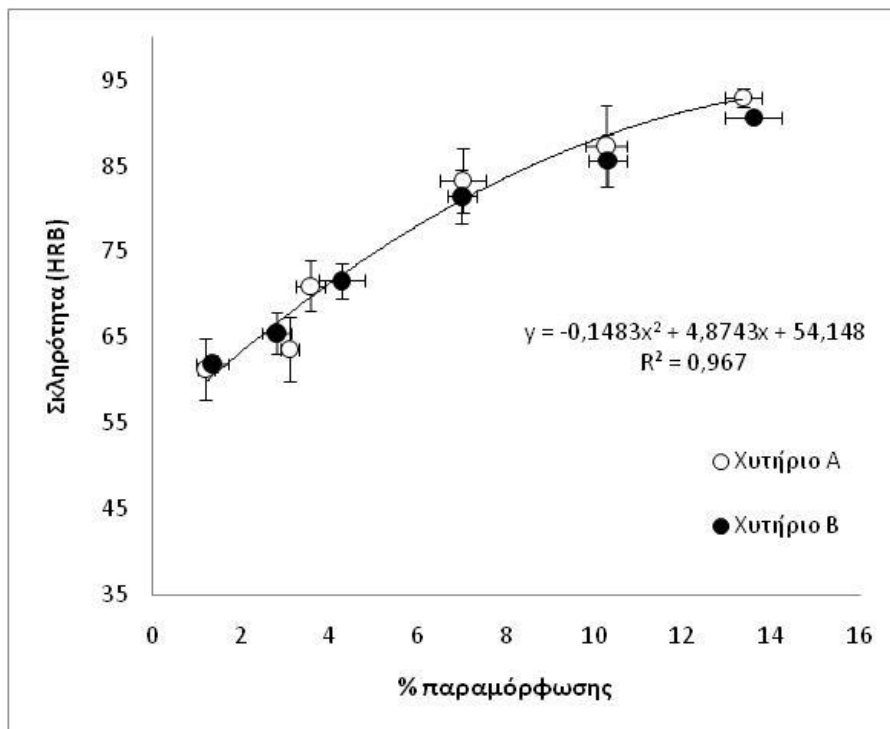
Εικόνα 7.29: Σύγκριση του ορίου θραύσης των δυο χυτηρίων ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



Εικόνα 7.30: Σύγκριση του βάρους των δυο χυτηρίων ανά μήκος ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



Εικόνα 7.31: Σύγκριση της διαμέτρου των δυο χυτηρίων ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



Εικόνα 7.32: Σύγκριση της σκληρότητας των δυο χυτηρίων ως προς την επί τοις εκατό αρχική παραμόρφωση, για τα δοκίμια που έχουν γηρασθεί.



# Κεφάλαιο 8

## Ανάλυση αποτελεσμάτων μελέτης ενδοτράχυνσης

---

Κατά τη διάρκεια της μελέτης ενδοτράχυνσης μελετήθηκε χονδρόσυρμα το οποίο προερχόταν από δυο διαφορετικά χυτήρια (Α και Β). Από τη μελέτη ενδοτράχυνσης προέκυψαν συνολικά πενήντα δυο διαγράμματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούσαν τις ιδιότητες του υλικού.

### 8.1 Συγκεντρωτικά διαγράμματα εφελκυσμών

Τα συγκεντρωτικά διαγράμματα των εφελκυσμών παρουσιάζουν μόνο ένα μικρό κομμάτι των αποτελεσμάτων οπότε δεν δύνανται για εξαγωγή σωστών συμπερασμάτων παρά μόνο για μια γενική εποπτεία της τάσης που υπάρχει.

Όπως ήταν αναμενόμενο παρατηρείται μια αύξηση των ορίων θραύσης και διαρροής με την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης.

### 8.2 Σύγκριση μεθόδων μέτρησης της διατομής των δοκιμίων

Όπως αναφέρεται και στο κεφάλαιο της περιγραφής της πειραματικής διαδικασίας, η διάμετρος, συνεπώς και η διατομή, ελέγχονταν με δυο τρόπους. Ο πρώτος έλεγχος γινόταν με χρήση παχύμετρου και ο δεύτερος με μέτρηση του βάρους και εν συνεχεία με υπολογισμό της διαμέτρου μέσω της πυκνότητας και του όγκου του υλικού σύμφωνα με τη σχέση 8.1.

$$R = \left( \frac{m}{L} \right) \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \rho} \quad (8.1)$$

Έλαβε χώρα έλεγχος της ορθότητας των τιμών των δυο μεθόδων μέτρησης της διαμέτρου.

Κατά την παραμόρφωση (εφελκυσμό στην περίπτωση μας) ισχύει η διατήρηση της μάζας. Η διατήρηση της μάζας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις.

$$\pi(R_1^2) \cdot L_0 \cdot \rho = \pi(R_2^2) \cdot (L_0 + \delta L) \cdot \rho \rightarrow (R_1^2) \cdot L_0 = (R_2^2) \cdot (L_0 + \delta L) \rightarrow$$

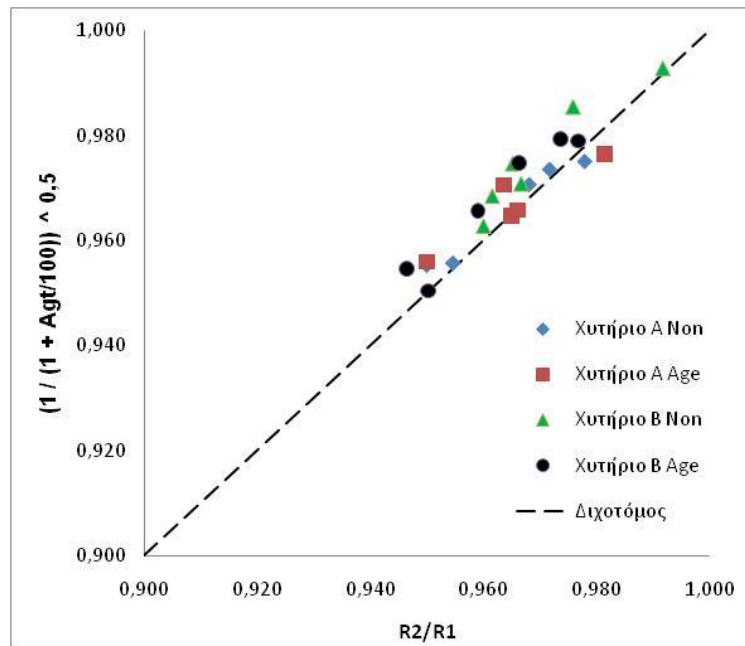
$$(R_1^2) / (R_2^2) = (L_0 + \delta L) / L_0 \rightarrow (R_1^2) / (R_2^2) = L_0 / L_0 + \delta L / L_0 \rightarrow$$

$$(R_1^2) / (R_2^2) = 1 + \delta L / L_0 \rightarrow (R_1^2) / (R_2^2) = 1 + Agt / 100 \text{ (δηλαδή } 14\% / 100 = 0,14) \rightarrow$$

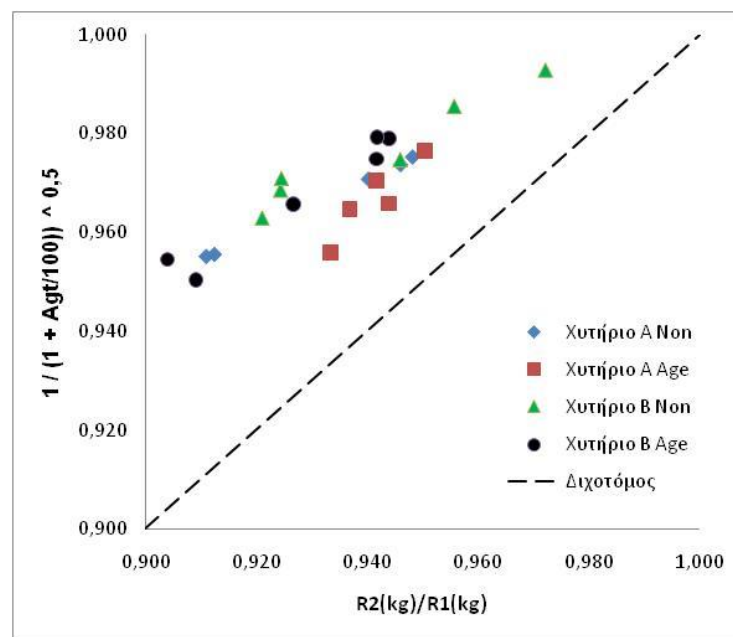
$$(R_2^2) / (R_1^2) = 1 / (1 + Agt / 100) \rightarrow \underline{(R_2) / (R_1) = (1 / (1 + Agt / 100))^{0,5}}$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \sqrt{\frac{1}{1 + Agt / 100}} \quad (8.2)$$

Εξετάζοντας την ισοδυναμία μεταξύ του δεξιού με το αριστερό μέρος της εξίσωσης 8.2, ελέγχουμε και τις μεθόδους μέτρησης της διαμέτρου. Υπολογίζεται το δεξί μέρος της εξίσωσης με χρήση των τιμών της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο και εν συνεχεία συγκρίνεται το με το αριστερό μέρος, όπου στην πρώτη περίπτωση χρησιμοποιούνται οι τιμές της διαμέτρου μετρημένες με το παχύμετρο και στη δεύτερη υπολογισμένες από τη σχέση 8.1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα των εικόνων 8.1 και 8.2.



Εικόνα 8.1: Διάγραμμα σύγκρισης του δεξιού μέρους της εξίσωσης 8.2 ως προς το αριστερό με χρήση των τιμών των διαμέτρων μετρημένων με παχύμετρο



Εικόνα 8.2: Διάγραμμα σύγκρισης του δεξιού μέρους της εξίσωσης 8.2 ως προς το αριστερό με χρήση των τιμών των διαμέτρων υπολογισμένων από τη σχέση 8.1

Από τα διαγράμματα των εικόνων 8.1 και 8.2 παρατηρούμε ότι οι τιμές των διαμέτρων που μετρήθηκαν με το παχύμετρο είναι πιο σωστές σε σχέση με τις αντίστοιχες υπολογισμένες από τη σχέση 8.1. Οι τιμές των διαμέτρων του διαγράμματος 8.1 βρίσκονται πάνω στη διχοτόμο, δηλαδή έχουν μια αναλογία 1:1



με τις τιμές υπολογισμένες από το δεξιό μέρος της εξίσωσης της διατήρησης της μάζας (σχέση 8.2).

Ο κανονισμό χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος ΚΤΧ 2008, αναφέρει ότι η διάμετρος θα πρέπει να υπολογίζεται μέσω του βάρους ανά μήκος, όπως υπολογίστηκε από την σχέση 8.1. Η αιτία που προτείνεται αυτή η μέθοδος από τον κανονισμό είναι ότι οι μετρήσεις αφορούν όλο το υλικό και όχι μόνο ορισμένα σημεία. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγονται τα σφάλματα μέτρησης εξαιτίας της ανομοιομορφίας της επιφάνειας των δοκιμίων.

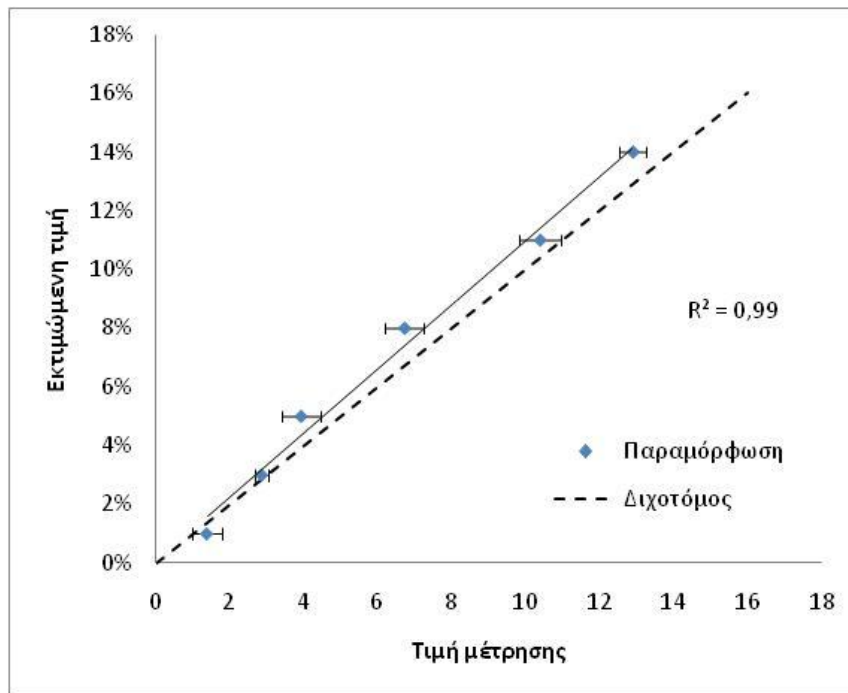
Από τα διαγράμματα των εικόνων 8.1 και 8.2 παρατηρείται ότι βέλτιστη μέθοδος είναι η μέτρηση με το παχύμετρο. Η παρατήρηση αυτή έρχεται σε αντίθεση με τον κανονισμό. Η εξήγηση είναι ότι ο κανονισμός αφορά χάλυβες οπλισμού, οι οποίοι κατά κύριο λόγο έχουν νευρώσεις, όπου εξαιτίας των δεν γίνεται η μέτρηση της διαμέτρου με παχύμετρο. Το υλικό που μελετάται δεν έχει νευρώσεις, οπότε και η μέτρηση με παχύμετρο είναι δυνατή.

### 8.3 Εκτίμηση πλαστικής παραμόρφωσης δοκιμίων

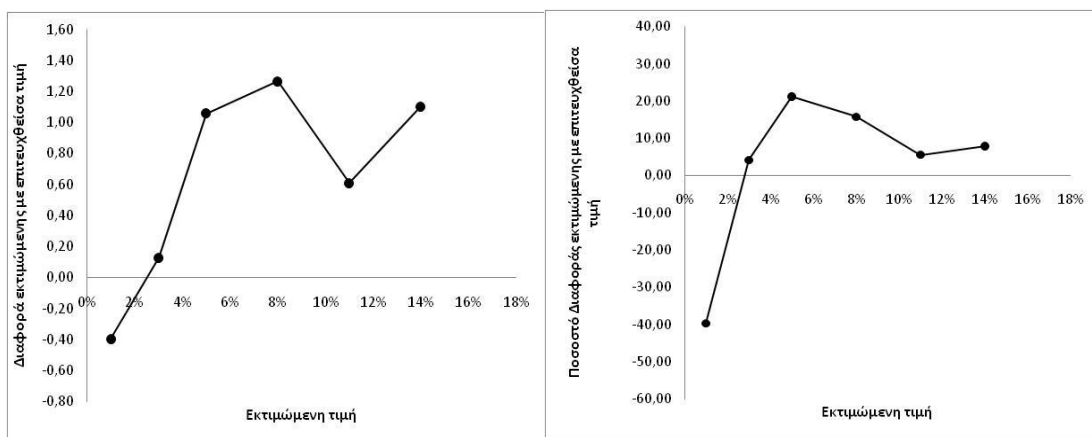
Όπως αναφέρθηκε η ενδοτράχυνση εισήχθη στα δοκίμια με εφελκυσμό. Οι βαθμοί ενδοτράχυνσης που τελικά επιτεύχθηκαν, όπως ήταν αναμενόμενο διέφεραν από αυτούς που είχαν στοχευθεί. Η διαφορά του ποσοστού ή βαθμού ενδοτράχυνσης που τελικά επιτεύχθη ως προς αυτού που είχε σχεδιαστεί να επιβληθεί παρουσιάζεται στα παρακάτω διαγράμματα.

Αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το χυτήριο A ( $C_{eq}=0,19$ ). Τα αποτελέσματα των δοκιμών που αργότερα υπέστησαν γήρανση παρουσιάζονται σε διαφορετικές εικόνες από αυτά που δεν υπέστησαν.

Οι εικόνες 8.3 και 8.4 παρουσιάζουν τη σύγκριση των βαθμών ενδοτράχυνσης που είχαν σχεδιαστεί να γίνουν, ως προς τους βαθμούς που τελικά επιτεύχθηκαν για τα δοκίμια που δεν υπέστησαν γήρανση. Στο πρώτο διάγραμμα (εικόνα 8.3) παρουσιάζεται μια απευθείας σύγκριση των τιμών των ποσοστών που αναμέναμε με αυτών που επιτεύχθηκαν. Στα διαγράμματα τις εικόνας 8.4 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των ποσοστών ως προς την εκτιμώμενη τιμή του βαθμού ενδοτράχυνσης σύμφωνα με το σχεδιασμό. Η διαφορά παρουσιάζεται είτε σαν απόλυτος αριθμός (εικόνα 8.4 (α)) είτε σαν ποσοστό μεταβολής (εικόνα 8.4 (β)).



Εικόνα 8.3: Σύγκριση εκτιμώμενης τιμής αρχικής παραμόρφωσης που επιβλήθηκε με την αντίστοιχη τιμή που τελικά μετρήθηκε για τα δοκίμια του χυτηρίου Α που δεν γηράνθηκαν

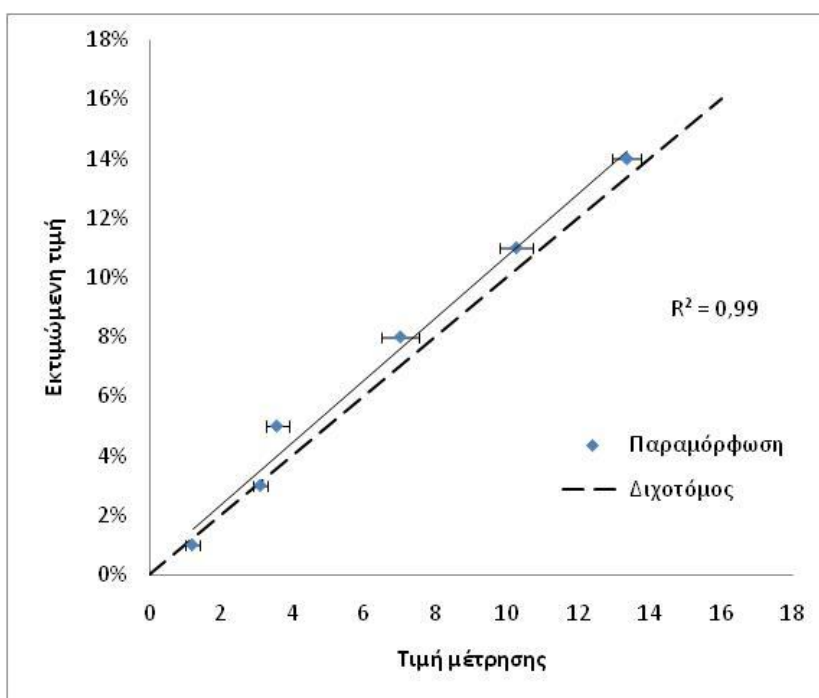


(α)

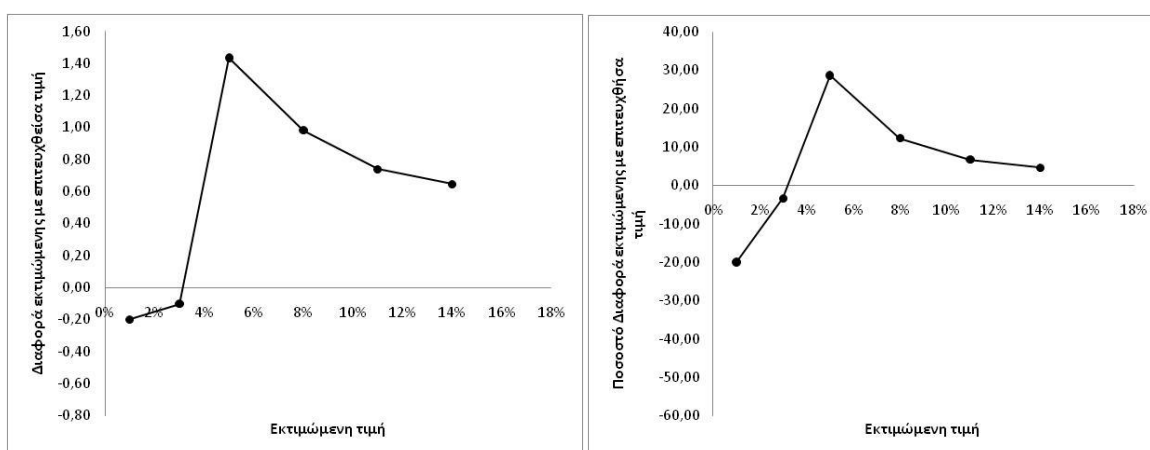
(β)

Εικόνα 8.4: (α) Αριθμητική διαφορά εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. (β) Ποσοστό διαφοράς εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Τα διαγράμματα αφορούν τα δοκίμια του χυτηρίου Α που δεν γηράνθηκαν.

Οι εικόνες 8.5 και 8.6 παρουσιάζουν τη σύγκριση των βαθμών ενδοτράχυνσης που είχαν σχεδιαστεί να γίνουν, ως προς τους βαθμούς που τελικά επετεύχθησαν για τα δοκίμια που υπέστησαν γήρανση. Στο διάγραμμα της εικόνας 8.5 παρουσιάζεται μια απευθείας σύγκριση των τιμών των ποσοστών που αναμέναμε με αυτών που επετεύχθησαν. Στα διαγράμματα της εικόνας 8.6 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των ποσοστών ως προς την εκτιμώμενη τιμή του βαθμού ενδοτράχυνσης σύμφωνα με το σχεδιασμό. Η διαφορά παρουσιάζεται είτε σαν απόλυτος αριθμός (εικόνα 8.6 (α)) είτε σαν ποσοστό μεταβολής (εικόνα 8.6 (β)).



Εικόνα 8.5: Σύγκριση εκτιμώμενης τιμής αρχικής παραμόρφωσης που επιβλήθηκε με την αντίστοιχη τιμή που τελικά μετρήθηκε για τα δοκίμια του χυτηρίου Α που γηράνθηκαν.



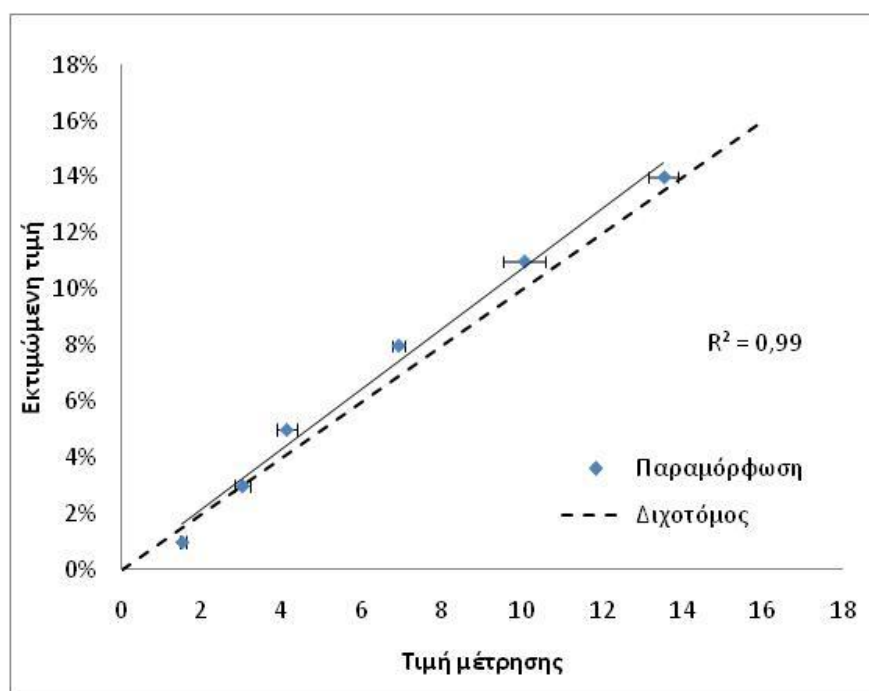
(α)

(β)

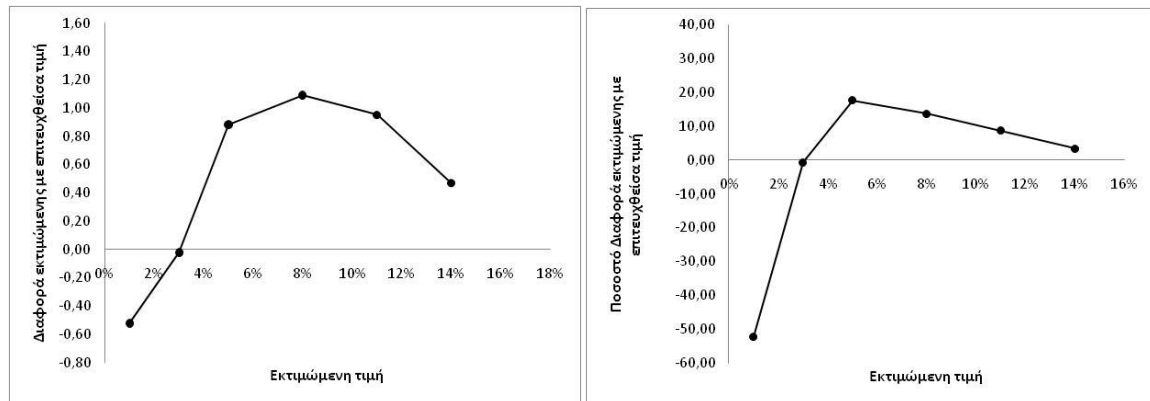
Εικόνα 8.6: (α) Αριθμητική διαφορά εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. (β) Ποσοστό διαφοράς εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Τα διαγράμματα αφορούν τα δοκίμια του χυτηρίου A που γηράνθηκαν.

Ομοίως για το χυτήριο B ( $C_{eq}=0.24$ ) σχεδιάστηκαν διαγράμματα που συγκρίνουν τις τιμές του βαθμού ενδοτράχυνσης που αναμένονταν σύμφωνα με τον σχεδιασμό της πειραματικής διαδικασίας, με αυτές που τελικά επιτεύχθηκαν. Τα διαγράμματα παρουσιάζονται στις εικόνες 8.7 και 8.8 για τα δοκίμια που τελικά δεν γηράνθηκαν και στις εικόνες 8.9 και 8.10 για τα δοκίμια που γηράνθηκαν.

Στο διάγραμμα της εικόνας 8.5 παρουσιάζεται μια απευθείας σύγκριση των τιμών των ποσοστών που αναμέναμε με αυτών που επιτεύχθηκαν. Στα διαγράμματα της εικόνας 8.8 παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ των ποσοστών ως προς την εκτιμώμενη τιμή του βαθμού ενδοτράχυνσης σύμφωνα με το σχεδιασμό. Η διαφορά παρουσιάζεται είτε σαν απόλυτος αριθμός (εικόνα 8.8 (α)) είτε σαν ποσοστό μεταβολής (εικόνα 8.8 (β)).



Εικόνα 8.7: Σύγκριση εκτιμώμενης τιμής αρχικής παραμόρφωσης που επιβλήθηκε με την αντίστοιχη τιμή που τελικά μετρήθηκε για τα δοκίμια του δεύτερου χυτηρίου που δεν γηράνθηκαν

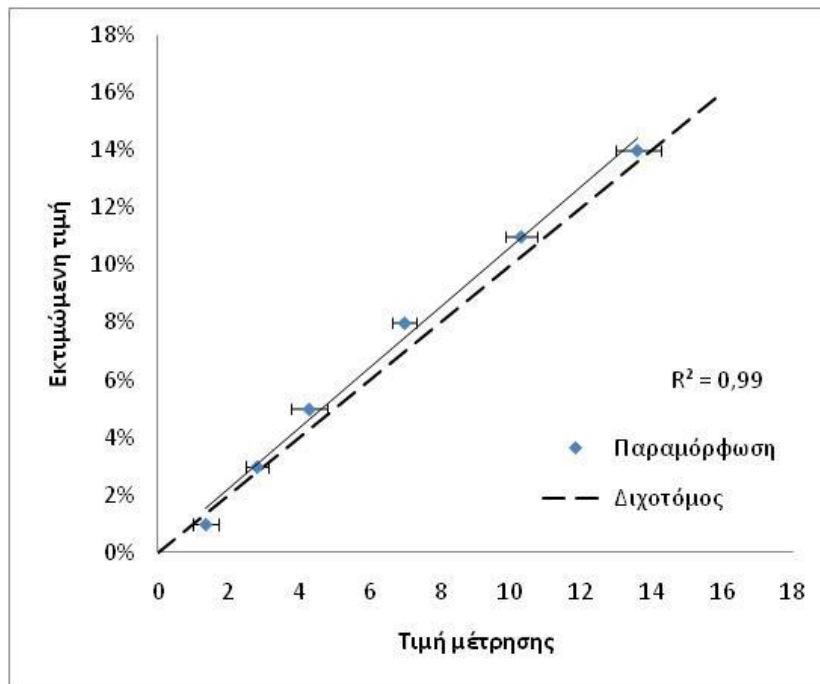


(α)

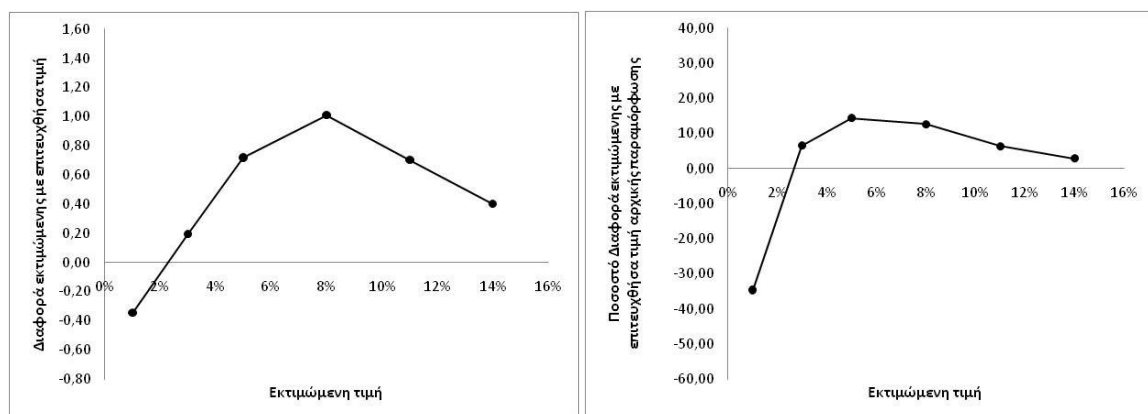
(β)

Εικόνα 8.8: (α) Αριθμητική διαφορά εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. (β) Ποσοστό διαφοράς εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Τα διαγράμματα αφορούν τα δοκίμια του χυτηρίου B που δεν γηράνθηκαν.

Ομοίως όπως για την περίπτωση του πρώτου χυτηρίου σχεδιάστηκαν διαγράμματα που αφορούν τα δοκίμια που τελικά υπέστησαν γήρανση. Τα διαγράμματα αυτά παρουσιάζονται στις εικόνες 8.9 και 8.10.



Εικόνα 8.9: Σύγκριση εκτιμώμενης τιμής αρχικής παραμόρφωσης που επιβλήθηκε με την αντίστοιχη τιμή που τελικά μετρήθηκε για τα δοκίμια του χυτηρίου Β που γηράνθηκαν



Εικόνα 8.10: (α) Αριθμητική διαφορά εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. (β) Ποσοστό διαφοράς εκτιμώμενης με επιτευχθείσα τιμή αρχικής παραμόρφωσης, ως προς την τιμή της αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκε σύμφωνα με τον σχεδιασμό. Τα διαγράμματα αφορούν τα δοκίμια του χυτηρίου Β που γηράνθηκαν.

Από τα διαγράμματα που αφορούν το βαθμό επίτευξης του ποσοστού ενδοτράχυνσης παρατηρούμε τα εξής.

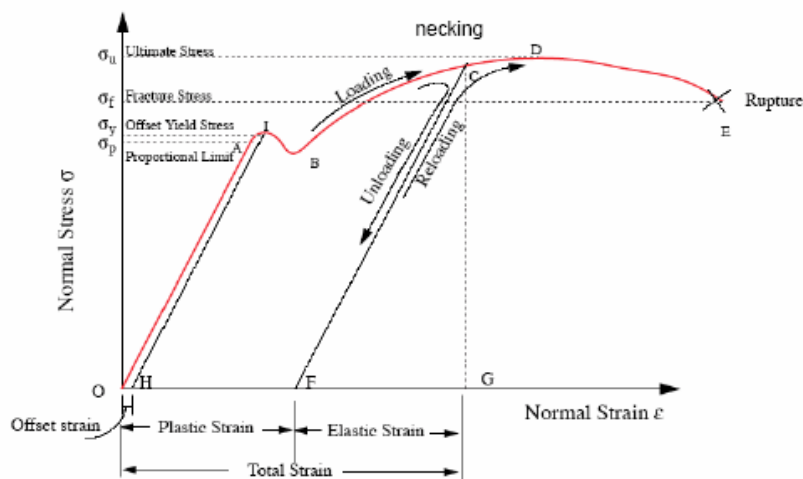
Στα διαγράμματα που αφορούν την απευθείας σύγκριση των βαθμών ενδοτράχυνσης που είχαν στοχευθεί ως προς τους βαθμούς ενδοτράχυνσης που τελικά επετεύχθησαν, παρατηρείται μια ταύτιση της καμπύλης που σχεδιάστηκε ως προς τη διχοτόμο, η οποία περιγράφει την ιδανική κατάσταση. Αυτή η ταύτιση φαίνεται να χάνεται με την αύξηση της τιμής του ποσοστού ενδοτράχυνσης.

Η μείωση της ταύτισης είναι διακριτή και στα διαγράμματα που αφορούν τη διαφορά απόκλισης και το ποσοστό της διαφοράς (α και β διαγράμματα σε κάθε περίπτωση).

Σε όλες τις περιπτώσεις τα μεγαλύτερα εύρη των αποκλίσεων βρίσκονται μεταξύ 5% και 11% αρχικής παραμόρφωσης, με μέγιστη απόκλιση να έχουμε στο 8% αρχικής παραμόρφωσης η οποία κατά προσέγγιση είναι 1% (διαγράμματα α).

Στο 1% αρχικής παραμόρφωσης εκτός από την περίπτωση του χυτηρίου A ( $C_{eq}=0,19$ ) χωρίς γήρανση (εικόνες 8.3 και 8.4), η τιμή που μετρήθηκε ήταν μεγαλύτερη από 1%.

Οι αποκλίσεις μεταξύ των ποσοστών αρχικής παραμόρφωσης που είχαν οριστεί ως προς τα ποσοστά αρχικής παραμόρφωσης που τελικά μετρήθηκαν, προκαλούνται εξαιτίας δυο παραγόντων. Ο πρώτος είναι η ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών κατά τη διάρκεια των εφελκυσμών, όπου το υλικό παρόλο που βρίσκεται στην πλαστική περιοχή, ένα μικρό μέρος της επιμήκυνσης του οφείλεται σε ελαστική συμπεριφορά, η οποία χάνεται μόλις οι δυνάμεις που το εφελκύνουν παύουν να ασκούνται. Το φαινόμενο αυτό παρουσιάζεται και στην εικόνα 8.11, όπου το υλικό μετακινήθηκε από το σημείο G στο σημείο F όταν οι δυνάμεις σταμάτησαν να ασκούνται, χάνοντας την ελαστική επιμήκυνση.





*Εικόνα 8.11: Ελαστοπλαστική συμπεριφορά των υλικών κατά τη διάρκεια ενός εφελκυσμού*

Ο δεύτερος παράγοντας προέρχεται από τη προετοιμασία του δοκιμίου, κατά την οποία τα δοκίμια ευθυγραμμίστηκαν. Επειδή δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί τέλεια ευθυγράμμιση, μέρος της απόστασης που προοριζόταν να καλυφθεί από τις άρπαγες της μηχανής εφελκυσμού για την επιμήκυνση καταναλίσκεται πρώτα για την ευθυγράμμιση και μετά επιμηκύνει το δοκίμιο. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα ποσοστά μέτρησης της παραμόρφωσης να είναι μικρότερα από αυτά που είχαν οριστεί.

#### **8.4 Διαγράμματα μεταβολής των διαφόρων μεγεθών εξαιτίας της ενδοτράχυνσης**

Κατά τη διάρκεια ενός εφελκυσμού τα δυο βασικά μεγέθη που μελετούνται είναι η τάση και η επιμήκυνση. Εκτός από τη μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών, μελετήθηκε και η μεταβολή του βάρους και της διαμέτρου.

Όλα αυτά τα μεγέθη είναι αλληλένδετα και η μεταβολή του κάθε ενός ξεχωριστά συνδέεται με τη μεταβολή των υπολοίπων.

##### **Σύγκριση ανά χυτήριο**

Στις εικόνες 7.5 έως 7.17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τη σύγκριση ως προς όλα τα μεγέθη που μεταβάλλονται μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων για κάθε χυτήριο ξεχωριστά.

## Χυτήριο Α

Τα διαγράμματα των εικόνων 7.5 έως 7.10, αφορούν το χυτήριο Α ( $C_{eq}=0,19$ ) και παρουσιάζουν τα διάφορα μεγέθη που μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του εφελκυσμού, ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης που είχε επιβληθεί σε αρχικό στάδιο.

Στις εικόνες 7.5 , 7.6 και 7.9 , 7.10 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις διαστάσεις των δοκιμίων (δηλαδή  $A_{gt}$ ,  $A_5$ , διάμετρος, βάρος/m).

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.5 παρουσιάζεται η μεταβολή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ) ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι οι τιμές παρουσιάζουν πτωτική τάση καθώς αυξάνεται το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης, όπως και στην περίπτωση των διαγραμμάτων που συσχετίζουν την ομοιόμορφη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο με το όριο διαρροής. Η πτωτική πορεία των τιμών εξηγείται από το γεγονός ότι όσο πιο μεγάλο είναι το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης που εισάγουμε τόσο πιο πολύ τείνουμε προς τη θραύση, με αποτέλεσμα τόσο λιγότερα περιθώρια επιμήκυνσης να παραμένουν στο δοκίμιο για περαιτέρω παραμόρφωση. Γενικότερα παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων. Οι τιμές ακολούθησαν πολυωνυμική καμπύλη. Επίσης από τη καμπύλη συμπεραίνουμε ότι η ομοιόμορφη παραμόρφωση τείνει να επηρεάζεται συνεχώς λιγότερο από το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης που εισάγουμε. Ιδιαίτερος μετά από 10% αρχική παραμόρφωση φαίνεται ότι τείνει να μην επηρεάζεται καθόλου. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πλησιάζει το σημείο όπου θα αρχίσει να σχηματίζεται λαιμός.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.6 παρουσιάζει τη μεταβολή των τιμών της παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ( $A_5$ ) ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Όπως και στην περίπτωση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, παρατηρείται πτωτική τάση στις τιμές, καθώς αυξάνεται το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Η παραμόρφωση στο σημείο της θραύσης φαίνεται να επηρεάζεται συνεχώς λιγότερο από την αύξηση του βαθμού αρχικής παραμόρφωσης. Η τάση αυτή είναι πολύ πιο έντονη από τη περίπτωση της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο. Η παρατήρηση αυτή μας οδηγεί

στο συμπέρασμα ότι η παραμόρφωση στην περιοχή του λαιμού φτάνει σε οριακές τιμές και δεν αυξάνεται παραπάνω από κάποια τιμή αρχικής παραμόρφωσης και ύστερα. Η καμπύλη που περιγράφει τη συμπεριφορά των τιμών της παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ακολουθεί λογαριθμική γραμμή. Τέλος παρατηρούμε ότι οι τιμές των γηρασμένων δοκιμίων και των μη γηρασμένων ταυτίζονται.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.9 παρουσιάζει τη μεταβολή του βάρους ανά μήκος του δοκιμίου ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Το μέγεθος του βάρους ανά το μήκος εξετάζει εμμέσως τη διάμετρο, καθώς με χρήση της πυκνότητας και του όγκου του χάλυβα μπορούμε και την υπολογίζουμε. Στο διάγραμμα παρατηρούμε ότι η καμπύλη έχει πτωτική τάση. Το φαινόμενο αυτό είναι αναμενόμενο διότι όσο το δοκίμιο επιμηκύνεται ελαττώνεται η μάζα του ως προς ένα σταθερό μήκος. Επίσης παρατηρείται ταύτιση των σημείων μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων. Τέλος παρατηρούμε ότι οι τιμές περιγράφονται από λογαριθμική καμπύλη.

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.10\_παρουσιάζεται η μεταβολή της διαμέτρου ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι η καμπύλη έχει πτωτική τάση. Η συμπεριφορά είναι αναμενόμενη καθώς με κάθε αύξηση της αρχικής παραμόρφωσης το δοκίμιο αυξάνει σε μήκος, αλλά ελαττώνεται ως προς τις άλλες δυο διαστάσεις, με συνέπεια να ελαττώνεται η διάμετρος. Επίσης παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων. Τέλος παρατηρούμε ότι το διάγραμμα έχει παρόμοια μορφή με εκείνο του βάρους ανά μέτρο και οι τιμές του ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη.

Τα δυο αυτά μεγέθη (kg/m και η διάμετρος) μελετούν ουσιαστικά την ίδια παράμετρο που είναι η μεταβολή της διαμέτρου, με αποτέλεσμα να έχουν παρόμοια συμπεριφορά.

Στις εικόνες 7.7 και 7.8 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις τάσεις που ασκήθηκαν στα δοκίμια κατά τη διάρκεια των εφελκυσμών.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.7 περιγράφει τη μεταβολή του ορίου διαρροής ως προς το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης. Η τιμές του ορίου διαρροής έχουν αυξητική τάση, κάτι το οποίο εξηγείται από το γεγονός ότι με την παραμόρφωση

που προκαλείται στα δοκίμια αυξάνεται η ποσότητα των διαταραχών που βρίσκονται μέσα στο υλικό, με αποτέλεσμα αυτό να ενδοτραχύνεται. Με την ενδοτράχυνση ο αριθμός των διαταραχών στο εσωτερικό του υλικού, αυξάνει δραματικά με αποτέλεσμα να εισέρχεται στην πλαστική περιοχή πιο δύσκολα και άρα αυξάνει το όριο διαρροής του. Οι τιμές παρουσιάζουν εντονότερη αύξηση έως και με 8% αρχική παραμόρφωση περίπου και στη συνέχεια η αύξηση γίνεται λιγότερο έντονη. Επίσης παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων. Με την γήρανση αναμενόταν αύξηση της σκληρότητας, οπότε και αύξηση του ορίου διαρροής. Τέλος παρατηρούμε ότι οι τιμές ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη.

Στην εικόνα 7.8 παρουσιάζεται το διάγραμμα που περιγράφει τη μεταβολή του ορίου θραύσης ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης των δοκιμίων. Παρατηρούμε ότι οι τιμές του ορίου θραύσης έχουν αυξητική τάση. Το φαινόμενο αυτό εξηγείται από τη πρόκληση ενδοτράχυνσης στο υλικό, όπως και στην περίπτωση του ορίου διαρροής. Η ενδοτράχυνση επηρεάζει σε μικρότερο βαθμό το όριο θραύσης από ότι το όριο διαρροής, κάτι το οποίο παρατηρείται άμα συγκρίνουμε τη κλίση των καμπυλών των δυο μεγεθών. Όπως και στην περίπτωση του ορίου διαρροής, δεν παρατηρείται διαφορά μεταξύ των τιμών του ορίου θραύσης που έχουν υποστεί γήρανση και αυτών που δεν έχουν γηρανθεί. Τέλος οι τιμές ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη.

Η εικόνα 7.11 παρουσιάζει το διάγραμμα το οποίο εξετάζει τη μεταβολή της σκληρότητας ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης των δοκιμίων. Παρατηρούμε ότι οι τιμές έχουν αυξητική τάση και ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη. Η αύξηση των τιμών είναι αναμενόμενη, εξαιτίας της ενδοτράχυνσης η οποία εισάγεται στα δοκίμια με τους αρχικούς εφελκυσμούς. Επίσης παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων.

### **Χυτήριο Β**

Τα διαγράμματα των εικόνων 7.12 έως 7.17 αφορούν το χυτήριο Β ( $C_{eq}=0.24$ ) και παρουσιάζουν τη μεταβολή των μεγεθών ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης.

Στις εικόνες 7.12 , 7.13 και 7.16 , 7.17 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις διαστάσεις των δοκιμίων (δηλαδή  $A_{gt}$ ,  $A_5$ , διάμετρος, βάρος/m).

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.12 παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές παρουσιάζουν πτωτική πορεία καθώς αυξάνεται το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Επιπλέον δεν υπάρχει ταύτιση μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων. Τα δοκίμια που δεν έχουν υποστεί γήρανση παρουσιάζουν χαμηλότερες τιμές ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο σε σύγκριση με αυτά που έχουν γηρανθεί. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται παράλογο διότι σύμφωνα με τη θεωρία εξαιτίας της γήρανσης, θα έπρεπε να έχουμε επανεμφάνιση του νέφους Cottrell, με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η κίνηση των διαταραχών.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.13 παρουσιάζει τη μεταβολή των τιμών της παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης για το χυτήριο Β. Παρατηρούμε ότι οι τιμές έχουν πτωτική πορεία, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο. Επιπλέον δεν επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης, καθώς η μεταβολή των τιμών με την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης είναι πολύ μικρή. Επίσης οι τιμές ακολουθούν τη λογαριθμική καμπύλη. Τέλος σε αντίθεση με τις τιμές της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο, οι τιμές της παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ταυτίζονται μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων.

Η εικόνα 7.16 παρουσιάζει το διάγραμμα που αφορά της μεταβολή του βάρους ανά μήκος ως προς το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι οι τιμές του βάρους ανά μήκος έχουν πτωτική πορεία, καθώς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης αυξάνεται. Επιπλέον οι τιμές ακολουθούν την λογαριθμική καμπύλη. Επίσης παρατηρούμε ότι οι τιμές του βάρους ανά μήκος των γηρασμένων δοκιμίων αρχικά ταυτίζονται με αυτές των μη γηρασμένων δοκιμίων. Από αρχική παραμόρφωση 5% περίπου και ύστερα φαίνεται ότι η ταύτιση δεν ισχύει, με τις τιμές των δοκιμίων που έχουν υποστεί γήρανση να είναι χαμηλότερες, από τις τιμές των δοκιμίων που δεν έχουν υποστεί.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.17 παρουσιάζεται η μεταβολή της διαμέτρου ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές της διαμέτρου παρουσιάζουν πτωτική πορεία, ακολουθώντας τη λογαριθμική καμπύλη. Οι τιμές της διαμέτρου μεταξύ των δοκιμίων που έχουν υποστεί γήρανση δεν ταυτίζονται με εκείνες που δεν έχουν υποστεί, με τις διαμέτρους των γηρασμένων να είναι μικρότερες από εκείνες των μη γηρασμένων. Παρόλα αυτά οι τιμές δεν αποκλίνουν σε σημαντικό βαθμό και βρίσκονται μέσα στα όρια του σφάλματος.

Στις εικόνες 7.14 και 7.15 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις τάσεις που ασκήθηκαν στα δοκίμια κατά τη διάρκεια των εφελκυσμών.

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.14 παρουσιάζεται η μεταβολή του ορίου διαρροής του χυτηρίου Β ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρείται ότι οι τιμές έχουν ανοδική πορεία, ακολουθώντας πολυωνυμική καμπύλη. Η ανοδική πορεία των τιμών είναι εντονότερη για τις χαμηλές τιμές αρχικής παραμόρφωσης έως και 8%. Από εκείνο το σημείο και ύστερα φαίνεται ότι με αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης το όριο διαρροής δεν επηρεάζεται. Τέλος παρατηρούμε ότι οι τιμές του ορίου διαρροής μεταξύ των γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων ταυτίζονται για κάθε ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.15 παρουσιάζει τη μεταβολή του ορίου θραύσης ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές του ορίου θραύσης αυξάνονται καθώς εισάγεται μεγαλύτερο ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης και η μορφή της καμπύλης που ακολουθούν είναι η πολυωνυμική. Ο ρυθμός αύξησης των τιμών είναι χαμηλότερος από εκείνον του ορίου διαρροής. Τέλος παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση των τιμών μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων για κάθε ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης.

Η εικόνα 7.18 παρουσιάζει το διάγραμμα το οποίο εξετάζει τη μεταβολή της σκληρότητας ως προς τη μεταβολή του ποσοστού της αρχικής παραμόρφωσης των δοκιμίων. Οι τιμές της σκληρότητας έχουν αυξητική πορεία και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Η αύξηση δεν είναι έντονη. Παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων.

### **Σύγκριση μεταξύ των χυτηρίων**

Στις εικόνες 7.19 έως 7.31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που αφορούν τη σύγκριση ως προς όλα τα μεγέθη μεταξύ των δύο χυτηρίων, είτε για τα γηρασμένα δοκίμια είτε για τα μη γηρασμένα.

### **Χωρίς γήρανση**

Οι εικόνες 7.19 έως 7.25 παρουσιάζουν τα διαγράμματα που συγκρίνουν τα δυο χυτήρια ως προς τα μεγέθη που μεταβάλλονται και που αφορούν τα δοκίμια που δεν έχουν γηρανθεί.

Στις εικόνες 7.19 , 7.20 και 7.23 , 7.24 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις διαστάσεις των δοκιμίων (δηλαδή Agt, A<sub>5</sub>, διάμετρος, βάρος/m).

Το διάγραμμα της εικόνας 7.19 συγκρίνει τη μεταβολή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ως προς το ποσοστό της αρχικής παραμόρφωσης, για τα δυο χυτήρια. Παρατηρείται ότι οι τιμές της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ακολουθούν πτωτική πορεία και για τα δυο χυτήρια. Μεταξύ των τιμών των δυο χυτηρίων δεν παρατηρείται ταύτιση. Το χυτήριο B φαίνεται να έχει επιμηκυνθεί λιγότερο λαμβάνοντας μικρότερες τιμές Agt από ότι το χυτήριο A.

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.20 παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών της παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές ταυτίζονται για τα δυο χυτήρια, έχουν πτωτική πορεία και ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.23 συγκρίνει τη μεταβολή του βάρους ανά μήκος για τα δυο χυτήρια. Οι τιμές έχουν πτωτική πορεία όπως είναι αναμενόμενο και ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη. Ταύτιση των τιμών όμως δεν εμφανίζεται για όλα τα ποσοστά αρχικής παραμόρφωσης, καθώς οι τιμές του χυτηρίου B είναι χαμηλότερες από εκείνες του χυτηρίου A. Η παρατήρηση αυτή επαναλαμβάνεται και από το διάγραμμα της εικόνας 7.24\_όπου συγκρίνεται η μεταβολή της διαμέτρου για τα δυο χυτήρια. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, το βάρος ανά μήκος εξετάζει εμμέσως τη διάμετρο των δοκιμίων. Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα δυο διαγράμματα (βάρος ανά μήκος και διάμετρο) αναμένετε να είναι παρόμοια. Οι τιμές της διαμέτρου λοιπόν έχουν πτωτική πορεία και ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη. Η διαφορά με το βάρος ανά μήκος είναι ότι

η απόκλιση των τιμών μεταξύ των δυο χυτηρίων είναι μικρότερη στην περίπτωση της διαμέτρου.

Στις εικόνες 7.21 και 7.22 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις τάσεις που ασκήθηκαν στα δοκίμια κατά τη διάρκεια των εφελκυσμών.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.21 συγκρίνει τις τιμές του ορίου διαρροής μεταξύ των δοκιμίων των δυο χυτηρίων, ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρούμε ότι οι τιμές αυξάνονται και για τα δυο χυτήρια με την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης, ακολουθώντας πολυωνυμική καμπύλη. Επίσης οι τιμές μεταξύ των χυτηρίων ταυτίζονται για όλους τους βαθμούς ενδοτράχυνσης.

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.22 παρουσιάζεται η μεταβολή του ορίου θραύσης για τα δυο χυτήρια ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρείται άνοδος των τιμών με την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης. Επίσης οι τιμές ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη. Όπως και στην περίπτωση του ορίου διαρροής, οι τιμές μεταξύ των χυτηρίων για το όριο θραύσης ταυτίζονται. Το όριο θραύσης επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από την αύξηση του ποσοστού αρχικής παραμόρφωσης σε σχέση με το όριο διαρροής.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.25 παρουσιάζει τη μεταβολή της σκληρότητας των δυο χυτηρίων ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης των δοκιμίων. Οι τιμές έχουν αυξητική πορεία και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Παρατηρείται ότι υπάρχει ταύτιση των τιμών.

### **Με γήρανση**

Οι εικόνες 7.26 έως 7.31 παρουσιάζουν τα διαγράμματα που συγκρίνουν τα δυο χυτήρια ως προς τα μεγέθη που μεταβάλλονται και που αφορούν τα δοκίμια που έχουν γηρανθεί.

Στις εικόνες 7.26 , 7.27 και 7.30 , 7.31 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις διαστάσεις των δοκιμίων (δηλαδή  $A_{gt}$ ,  $A_5$ , διάμετρος, βάρος/m).

Το διάγραμμα της εικόνας 7.26 συγκρίνει τις τιμές της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο μεταξύ των δυο χυτηρίων ως προς το



ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Παρατηρείται ότι οι τιμές παρουσιάζουν πτώση καθώς αυξάνεται το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Επίσης οι τιμές μεταξύ των δυο χυτηρίων παρουσιάζουν ταύτιση.

Το διάγραμμα που συγκρίνει τις τιμές της παραμόρφωσης στο σημείο θραύσης ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης για τα δυο χυτήρια παρουσιάζεται στην εικόνα 7.27. Οι τιμές έχουν πτωτική τάση και ακολουθούν λογαριθμική καμπύλη. Επίσης οι τιμές ταυτίζονται μεταξύ των δυο χυτηρίων για κάθε ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης.

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.30 παρουσιάζεται η μεταβολή του βάρους ανά μήκος ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης για τα δυο χυτήρια. Οι τιμές έχουν πτωτική πορεία και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Οι τιμές δεν ταυτίζονται μεταξύ των δυο χυτηρίων, με τις τιμές του χυτηρίου Β να είναι χαμηλότερες από εκείνες του χυτηρίου Α για κάθε ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης.

Η εικόνα 7.31 παρουσιάζει το διάγραμμα που αφορά τη σύγκριση των τιμών της διαμέτρου μεταξύ των δυο χυτηρίων ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι παρατηρήσεις είναι παρόμοιες με εκείνες του βάρους ανά μήκος ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Αναλυτικότερα οι τιμές έχουν πτωτική πορεία και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Επίσης οι τιμές μεταξύ των χυτηρίων έχουν απόκλιση για κάθε ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης, με τις τιμές που αντιστοιχούν στο χυτήριο Β να είναι χαμηλότερες από εκείνες του χυτηρίου Α.

Στις εικόνες 7.28 και 7.29 παρουσιάζονται τα διαγράμματα που εξετάζουν τη μεταβολή των μεγεθών που αφορούν τις τάσεις που ασκήθηκαν στα δοκίμια κατά τη διάρκεια των εφελκυσμών.

Στο διάγραμμα της εικόνας 7.28\_παρουσιάζεται η μεταβολή του ορίου διαρροής για τα δυο χυτήρια ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές και των δυο χυτηρίων παρουσιάζουν αυξητική τάση, όπως είναι αναμενόμενο και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Από 11% αρχική παραμόρφωση και ύστερα οι τιμές του ορίου διαρροής σταθεροποιούνται και δεν αυξάνονται. Συγκρίνοντας τις τιμές μεταξύ των δυο χυτηρίων παρατηρούμε ότι υπάρχει ταύτιση μεταξύ τους.

Το διάγραμμα της εικόνας 7.29 παρουσιάζει τη μεταβολή του ορίου θραύσης για τα δυο χυτήρια ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές έχουν

αυξητική πορεία και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Η αυξητική τάση των τιμών του ορίου θραύσης είναι μικρότερη από την αντίστοιχη του ορίου διαρροής. Επίσης παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ των δυο χυτηρίων.

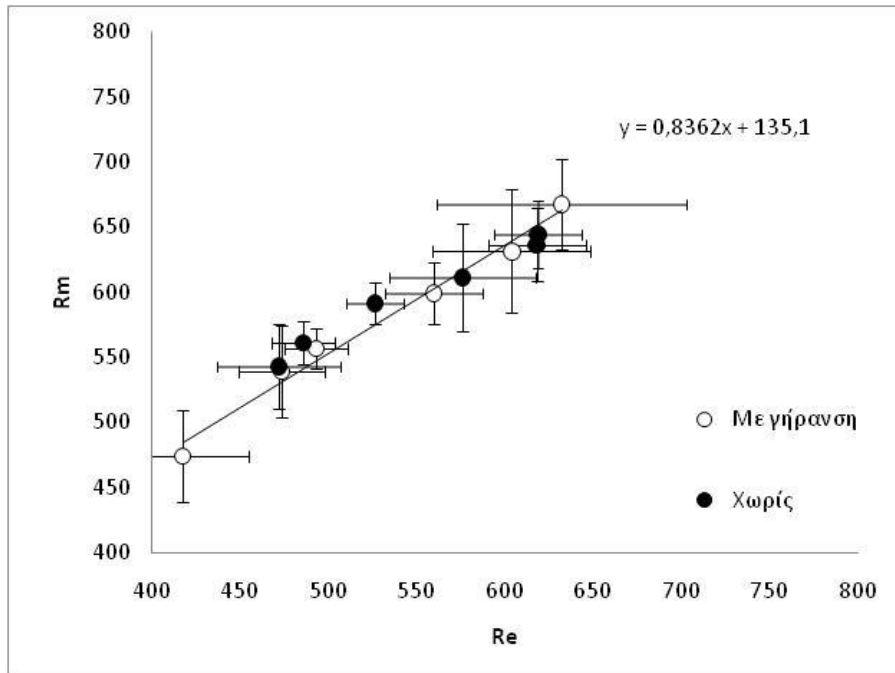
Η εικόνα 7.32 παρουσιάζει το διάγραμμα το οποίο εξετάζει τη μεταβολή της σκληρότητας για τα δυο χυτήρια ως προς το ποσοστό αρχικής παραμόρφωσης. Οι τιμές της σκληρότητας παρουσιάζουν αυξητική πορεία και ακολουθούν πολυωνυμική καμπύλη. Επίσης παρατηρείται ταύτιση των τιμών μεταξύ των δυο χυτηρίων.

### **8.5 Διαγράμματα σύγκρισης μεταξύ ορίου θραύσης – ορίου διαρροής – ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο**

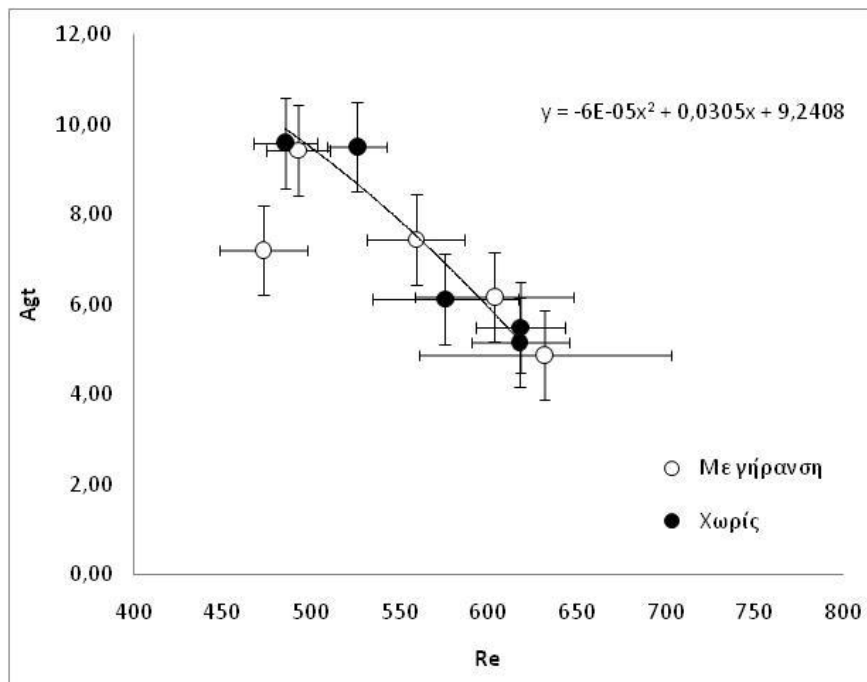
Τα βασικά μεγέθη που μεταβάλλονται εξαιτίας της ενδοτράχυνσης κατά τη διάρκεια μιας δοκιμής εφελκυσμού είναι η δύναμη – τάση και η επιμήκυνση.

Στα παρακάτω διαγράμματα παρουσιάζονται οι μεταβολές του ορίου θραύσης ως προς το όριο διαρροής και του  $A_{gt}$ , δηλαδή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ως προς το όριο διαρροής. Οι μεταβολές που παρουσιάζονται αφορούν τα δοκίμια των δυο χυτηρίων που εξετάστηκαν για τους έξι βαθμούς ενδοτράχυνσης που επιβλήθηκαν (1%,3%,5%,8%,11%,14%).

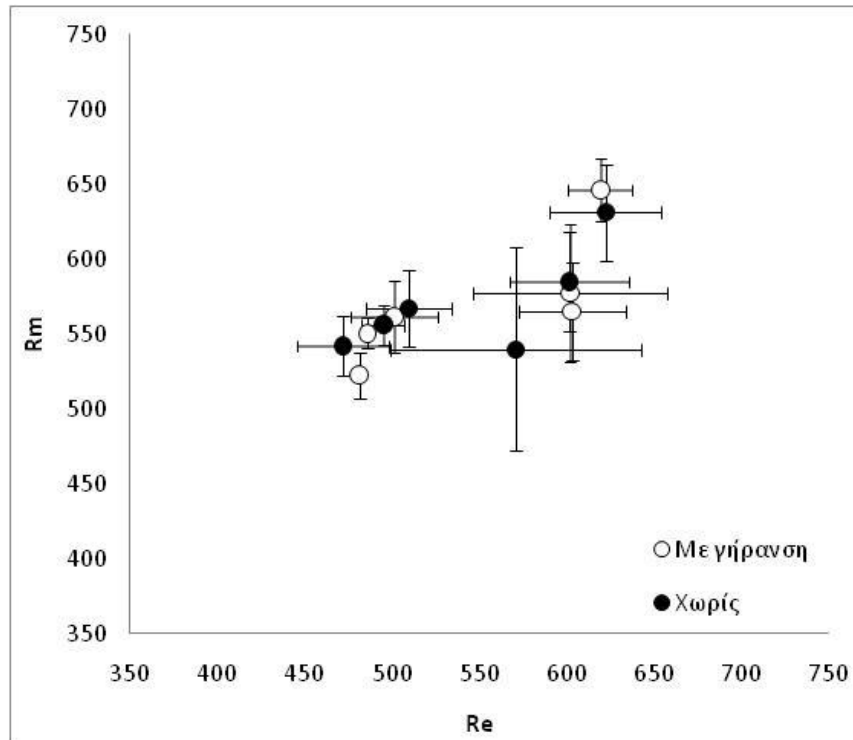
Τα διαγράμματα που αφορούν τα δοκίμια του χυτηρίου Α παρουσιάζονται στις εικόνες 8.12 και 8.13 και τα διαγράμματα που αφορούν τα δοκίμια του χυτηρίου Β παρουσιάζονται στις εικόνες 8.14 και 8.15.



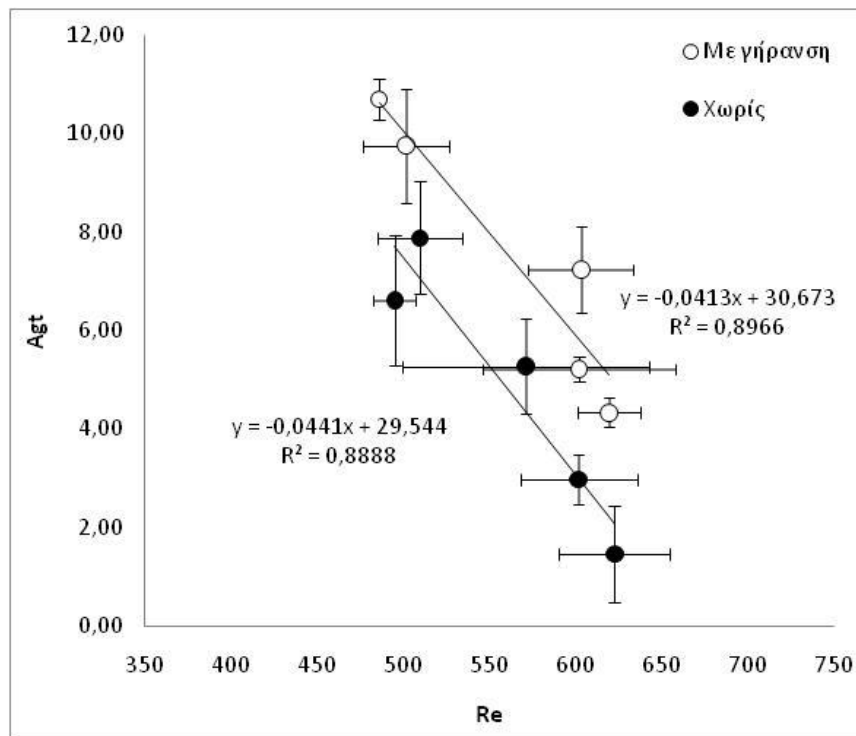
Εικόνα 8.12: Μεταβολή του ορίου θραύσης ως προς το όριο διαρροής για το χυτήριο A και για όλα τα δοκίμια, για τους έξι βαθμούς ενδοτράχυνσης που επιβλήθηκαν.



Εικόνα 8.13: Μεταβολή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ) ως προς το όριο διαρροής για το χυτήριο A και για όλα τα δοκίμια, για τους έξι βαθμούς ενδοτράχυνσης που επιβλήθηκαν.



Εικόνα 8.14: Μεταβολή του ορίου θραύσης ως προς το όριο διαρροής για το χυτήριο B και για όλα τα δοκίμια, για τους έξι βαθμούς ενδοτράχυνσης που επιβλήθηκαν.



*Εικόνα 8.15: Μεταβολή της ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ) ως προς το όριο διαρροής για το χυτήριο B και για όλα τα δοκίμια, για τους έξι βαθμούς ενδοτράχυνσης που επιβλήθηκαν.*

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων που συσχετίζει το όριο θραύσης με το όριο διαρροής για τα δύο χυτήρια, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες είναι ανοδικές, όπως είναι άλλωστε αναμενόμενο.

Η γήρανση δεν φαίνεται να επηρεάζει τις τιμές των ορίων διαρροής και θραύσης. Παρατηρείται δηλαδή μια ταύτιση των σημείων μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων.

Το χυτήριο A ( $C_{eq}=0,19$ ) ακολουθεί γραμμική αύξηση ενώ για το χυτήριο B ( $C_{eq}=0,24$ ) η τάση είναι αυξητική, αλλά δεν είναι γραμμική.

Από τη μελέτη των διαγραμμάτων που συσχετίζει την ομοιόμορφη παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο με το όριο διαρροής, παρατηρούμε ότι οι καμπύλες είναι καθοδικές όπως είναι αναμενόμενο.

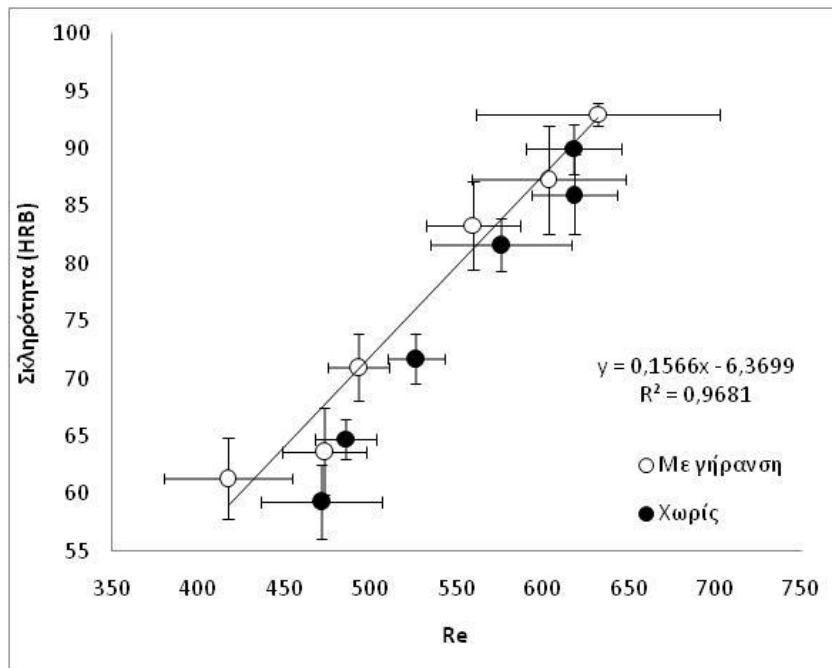
Η γήρανση δεν φαίνεται να έχει επηρεάσει το χυτήριο A καθώς παρατηρείται ταύτιση των σημείων του διαγράμματος.

Το χυτήριο B φαίνεται ότι επηρεάστηκε από τη γήρανση καθώς τα σημεία που αντιστοιχούν στα γηρασμένα δοκίμια βρίσκονται υψηλότερα στο διάγραμμα από εκείνα των μη γηρασμένων δοκιμίων.

## **8.6 Συσχέτιση τιμών σκληρότητας ως προς το όριο διαρροής**

Κατά τη δοκιμή σκληρότητας το διεισδυτικό σώμα δημιουργεί αποτύπωμα στην επιφάνεια του υλικού που μετράται. Τη στιγμή που το διεισδυτικό σώμα δημιουργεί το αποτύπωμα, το υλικό τοπικά ξεπερνά το όριο διαρροής και εισάγεται στην πλαστική περιοχή (σε αντίθετη περίπτωση δεν θα είχαμε αποτύπωμα). Το γεγονός αυτό συνδέει τη σκληρότητα με το όριο διαρροής.

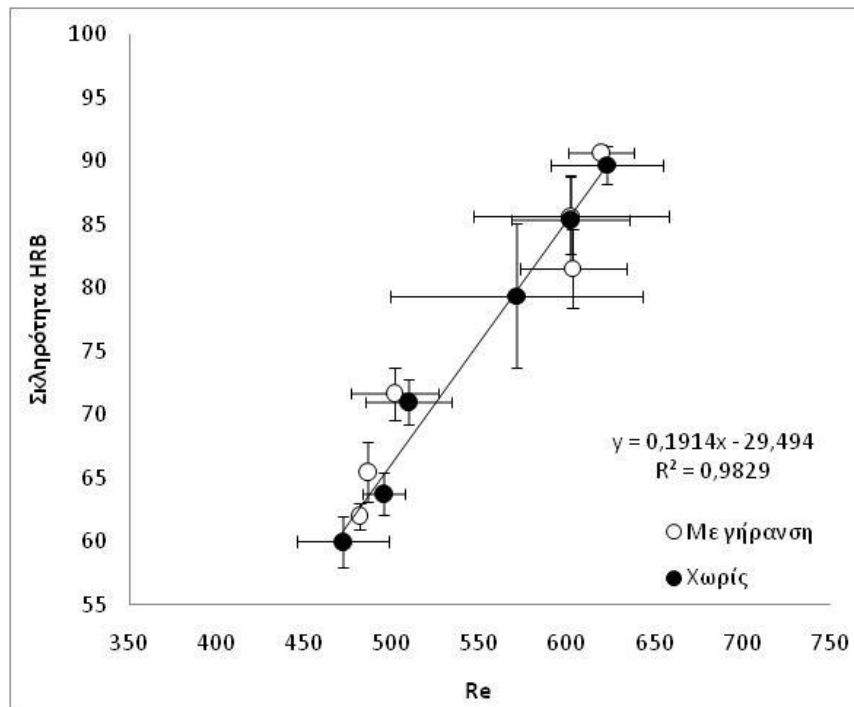
Στην εικόνα 8.16 παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών της σκληρότητας ως προς τις τιμές του ορίου διαρροής για το υλικό που προήλθε από το χυτήριο A.



Εικόνα 8.16: Μεταβολή των τιμών της σκληρότητας ως προς τις τιμές του ορίου διαρροής για το χυτήριο A

Παρατηρείται ότι οι τιμές της σκληρότητας έχουν αυξητική πορεία. Οι τιμές σχεδόν ταυτίζονται με τη διχοτόμο. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο καθώς οι τιμές της σκληρότητας είναι άμεσα συνδεδεμένες με τις τιμές του ορίου διαρροής και ακολουθούν ανάλογη πορεία. Οι τιμές μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμών ταυτίζονται.

Στην εικόνα 8.17 παρουσιάζεται η μεταβολή των τιμών της σκληρότητας ως προς τις τιμές του ορίου διαρροής για το υλικό που προήλθε από το χυτήριο B.



Εικόνα 8.17: Μεταβολή των τιμών της σκληρότητας ως προς τις τιμές του ορίου διαρροής για το χυτήριο B

Παρατηρείται ότι οι τιμές της σκληρότητας έχουν αυξητική πορεία. Οι τιμές μεταξύ γηρασμένων και μη γηρασμένων δοκιμίων ταυτίζονται σε μεγαλύτερο βαθμό από εκείνες του χυτηρίου A. Επίσης όπως και στην περίπτωση του χυτηρίου A έχουμε ανάλογη μεταβολή των τιμών της σκληρότητας σε σχέση με τη μεταβολή των τιμών του ορίου διαρροής.

### 8.7 Συγκεντρωτικά διαγράμματα μεταβολής όλων των μεγεθών

Οι εικόνες 8.18 έως 8.21 παρουσιάζουν συνολικά τη μεταβολή όλων των μεγεθών για τα δυο χυτήρια που μελετήθηκαν.

Τα διαγράμματα των εικόνων 8.18 έως 8.21 σχεδιάστηκαν με βάση τις τιμές που προέκυψαν χρησιμοποιώντας τις σχέσεις παλινδρόμησης που σχηματίστηκαν από τις γραμμές τάσης των διαγραμμάτων που συγκρίνουν τα διάφορα μεγέθη με την επί τοις εκατό παραμόρφωση.

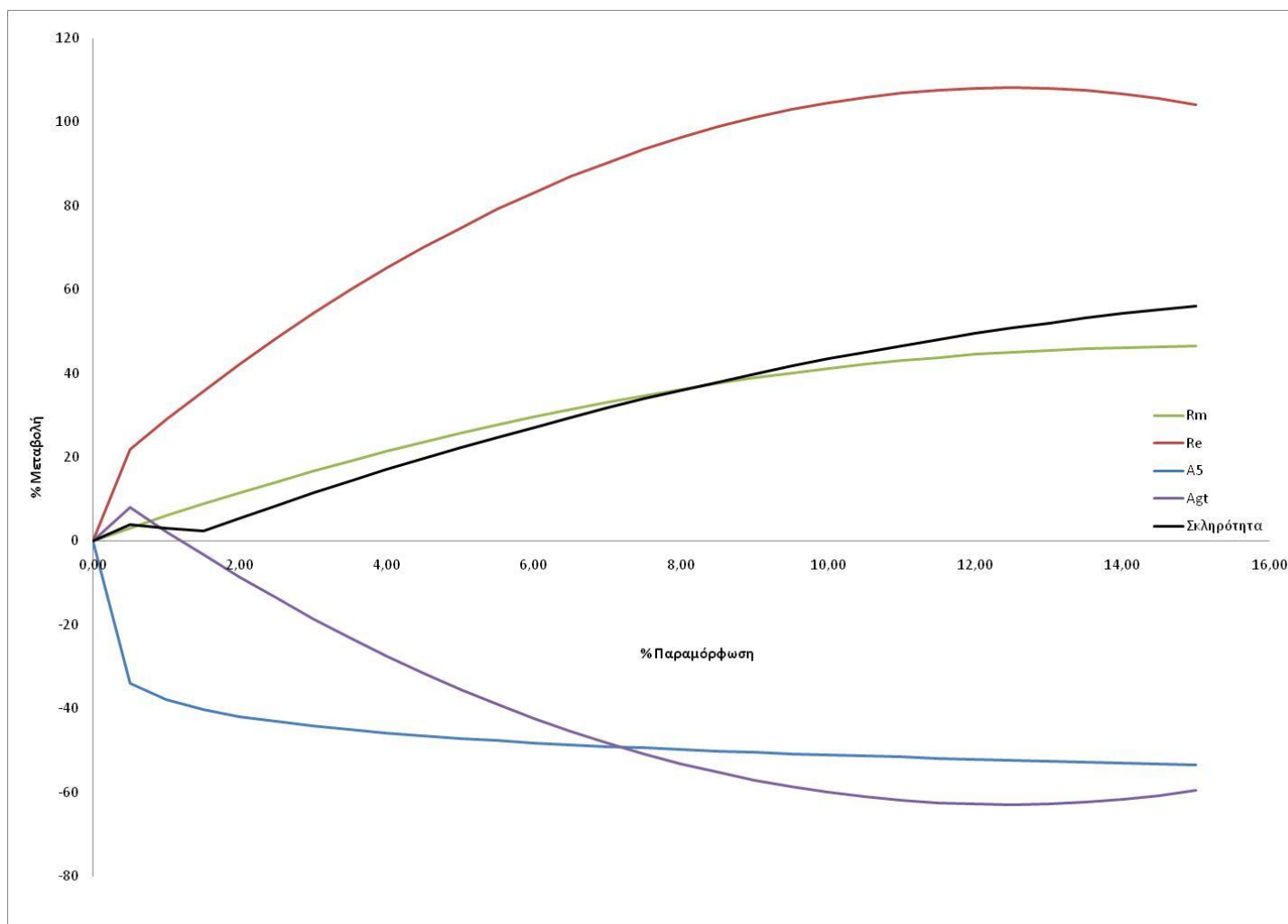
Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για κάθε χυτήριο παρουσιάζονται στον πίνακα 8.1.

Πίνακας 8.1: Σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων των εικόνων 8.18 έως 8.21

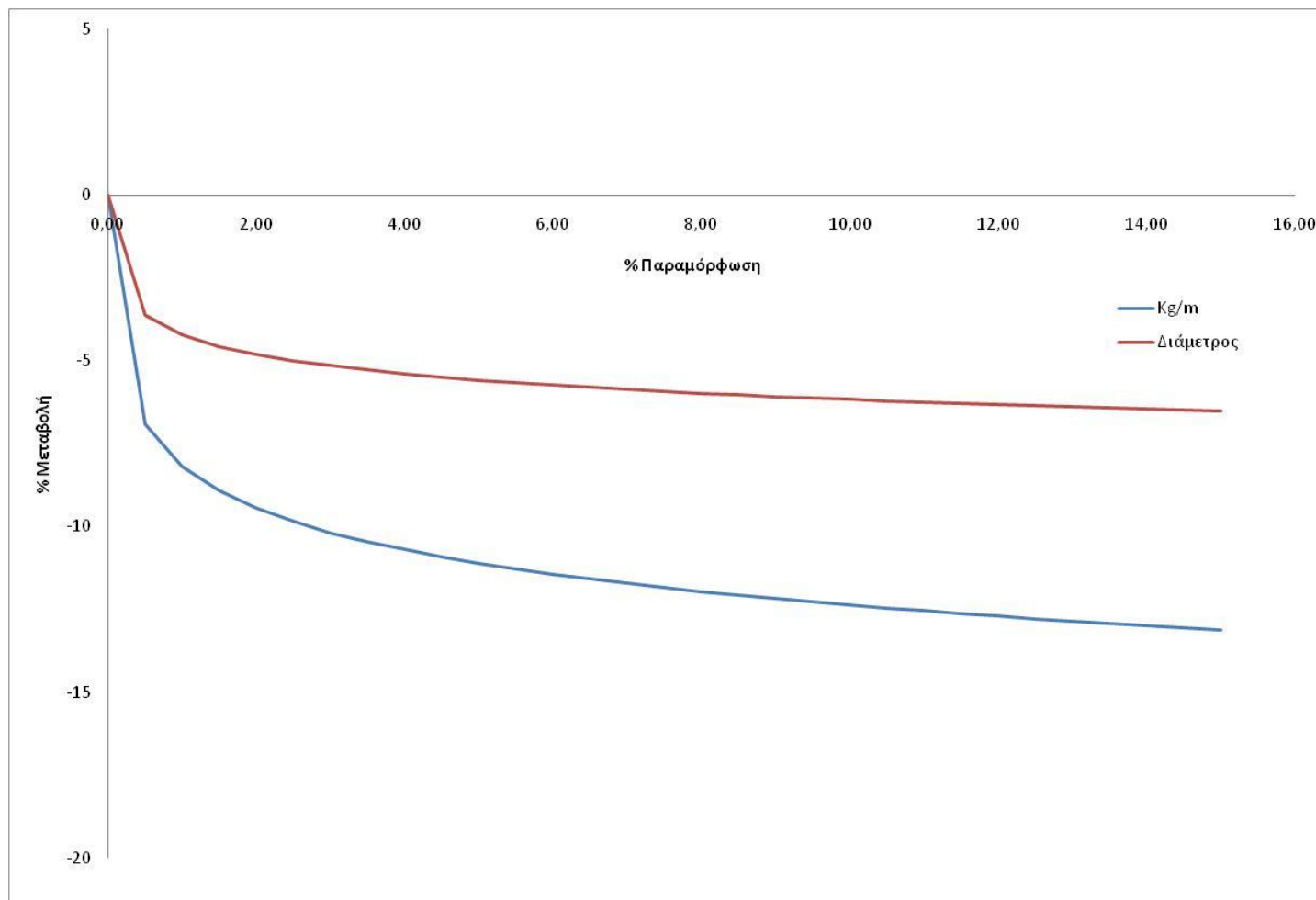
Μέγεθος <sup>Χυτήριο</sup>	A	B
<b>Agt</b>	$y = 0,06x^2 - 1,49x + 13,70$	$y = 0,04x^2 - 1,24x + 14,06$
<b>A5</b>	$y = -2,22\ln(x) + 24,19$	$y = -2,29\ln(x) + 24,43$
<b>Re</b>	$y = -1,82x^2 + 45,22x + 343,73$	$y = -2,16x^2 + 47,33x + 364,04$
<b>Rm</b>	$y = -0,92x^2 + 27,84x + 454,37$	$y = -0,36x^2 + 15,35x + 487,28$
<b>Kg/m</b>	$y = -0,004\ln(x) + 0,202$	$y = -0,004\ln(x) + 0,1929$
<b>Διάμετρος</b>	$y = -0,05\ln(x) + 5,67$	$y = -0,06\ln(x) + 5,55$
<b>Σκληρότητα</b>	$y = -0,1032x^2 + 4,1305x + 56,494$	$y = -0,0999x^2 + 3,8022x + 57,61$

Ως μη εξαρτημένη μεταβλητή (x) χρησιμοποιήθηκαν αυθαίρετα τιμές παραμόρφωσης από 0 έως 15%.

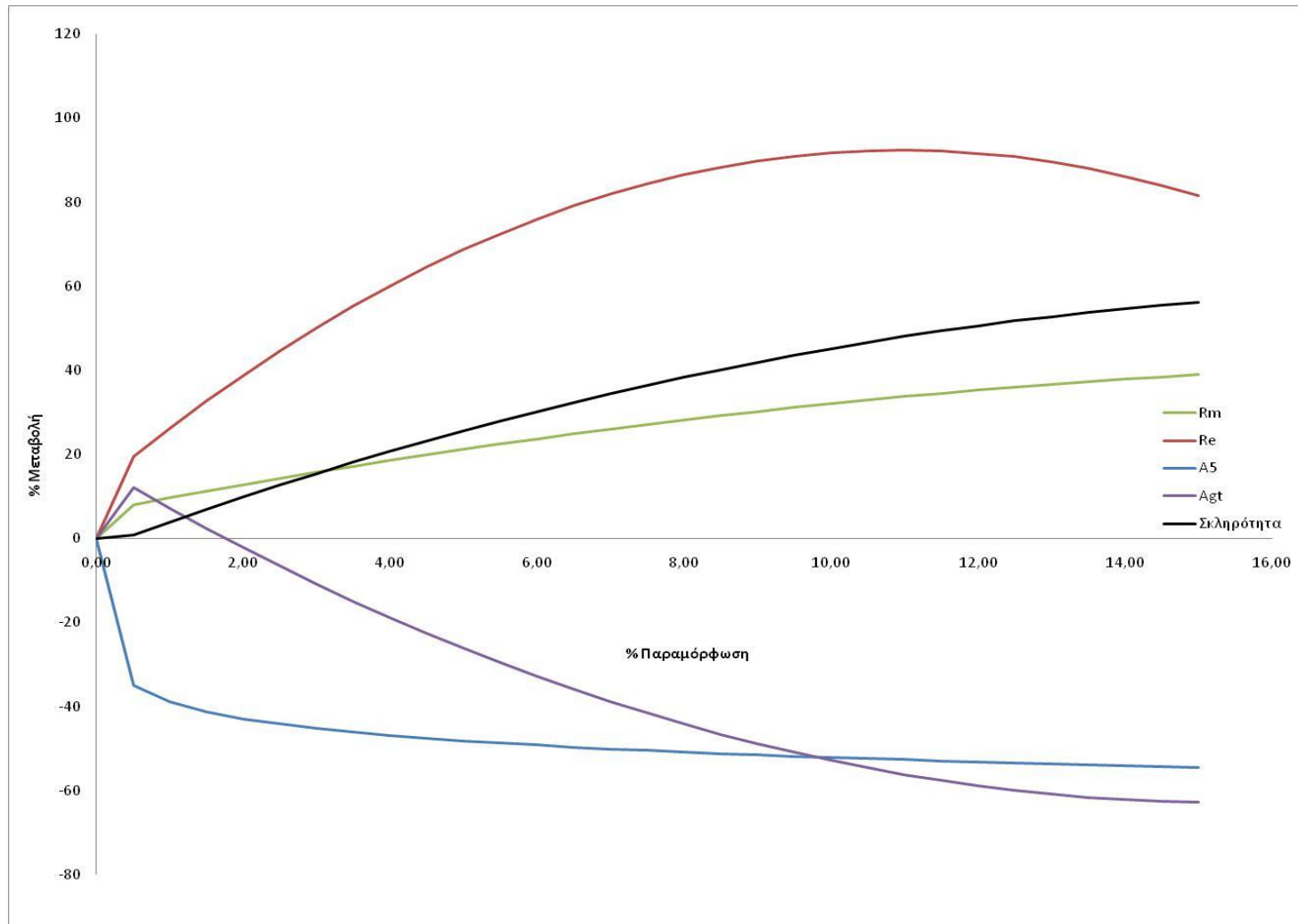




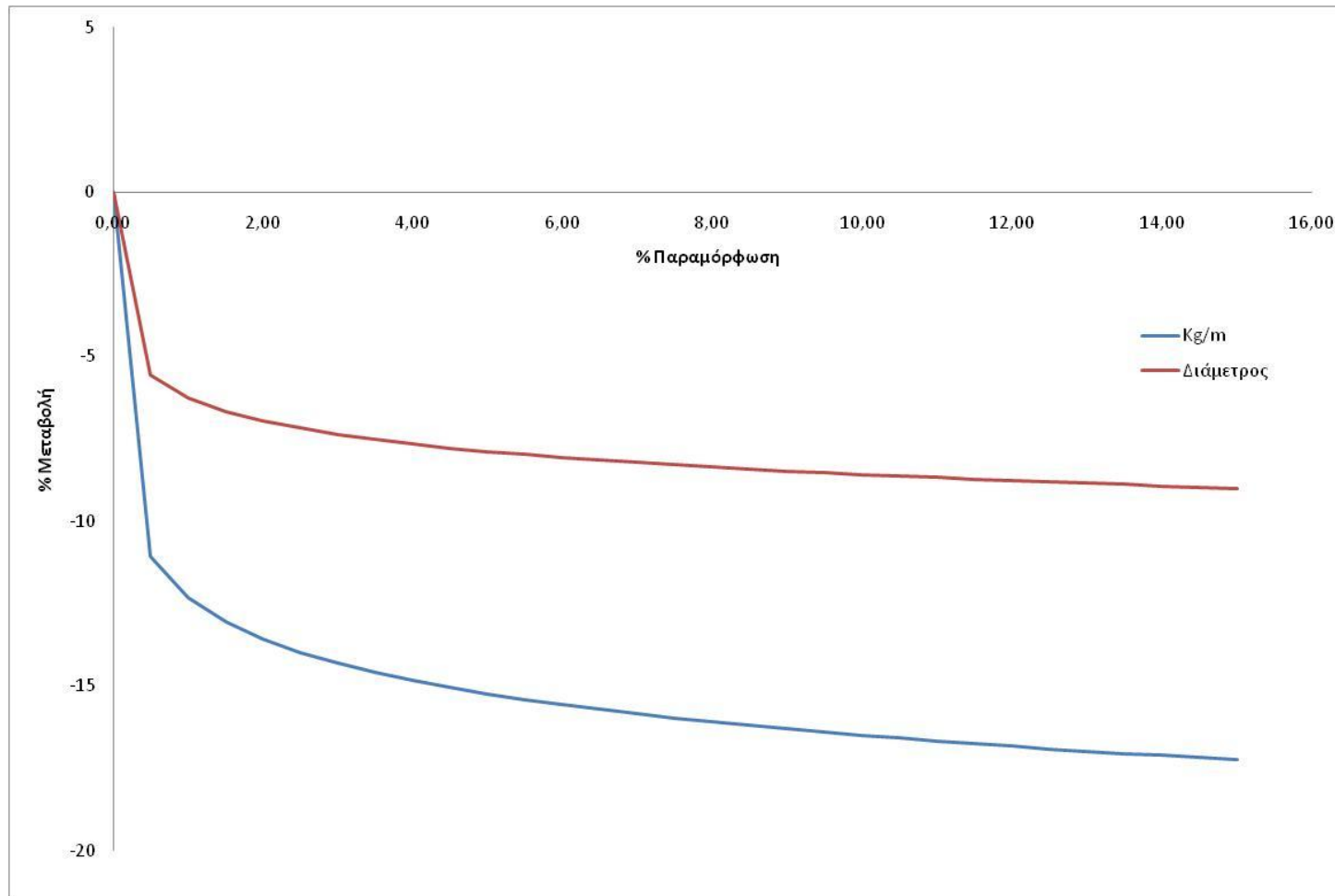
Εικόνα 8.18: Συνολικό διάγραμμα μεταβολής του ορίου διαρροής, θραύσης και ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο και παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης για το χυτήριο A, ως προς την % παραμόρφωσης



Εικόνα 8.19: Συνολικό διάγραμμα μεταβολής του βάρους ανά μήκος και της διαμέτρου για το χυτήριο A, ως προς το % παραμόρφωσης



Εικόνα 8.20: Συνολικό διάγραμμα μεταβολής του ορίου διαρροής, θραύσης και ομοιόμορφης παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο και παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης για το χυτήριο B, ως προς το % παραμόρφωσης



Εικόνα 8.21: Συνολικό διάγραμμα μεταβολής του βάρους ανά μήκος και της διαμέτρου για το χυτήριο B, ως προς το % παραμόρφωσης



Παρατηρούμε ότι τα διαγράμματα των εικόνων 8.18 έως 8.21 παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά και δεν επηρεάζονται από τη διαφορά στη χημική σύσταση που έχουν τα δυο χυτήρια.

Παρατηρούμε ότι τη μεγαλύτερη μεταβολή μεταξύ των διαφόρων μεγεθών που εξετάστηκαν, εμφανίζει το όριο διαρροής ( $Re$ ), ενώ τη μικρότερη εμφανίζει η διάμετρος.

Το όριο θραύσης παρουσιάζει μια σταθερή αυξητική μεταβολή, η οποία όμως είναι αρκετά μικρότερη από την αντίστοιχη του ορίου διαρροής.

Η σκληρότητα μεταβάλλεται αυξητικά και παρουσιάζει τη δεύτερη μεγαλύτερη μεταβολή.

Η παραμόρφωση στο μέγιστο φορτίο ( $A_{gt}$ ) και στο σημείο θραύσης παρουσιάζει πτωτική πορεία. Οι τιμές της παραμόρφωσης στο σημείο της θραύσης σταματά να μεταβάλλεται σχεδόν από την αρχή, ενώ οι τιμές της παραμόρφωσης στο μέγιστο φορτίο μεταβάλλονται έως και 12% παραμόρφωση.

Οι τιμές της μεταβολής του βάρους ανά μήκος ακολουθούν παρόμοια πορεία με εκείνες της διαμέτρου όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο.

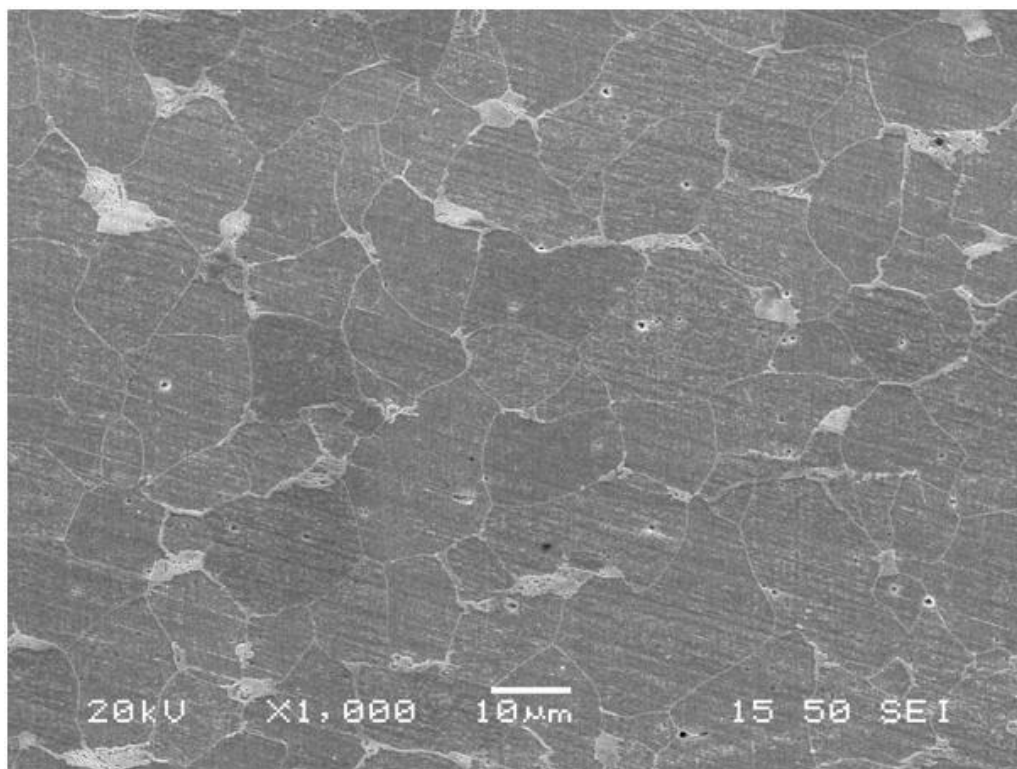
## **8.8 Παραμόρφωση κόκκων εξαιτίας της ενδοτράχυνσης**

Στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης έγινε μελέτη της παραμόρφωσης των κόκκων του χάλυβα εξαιτίας της ενδοτράχυνσης.

Το υλικό που μελετήθηκε προήλθε από το χυτήριο B ( $C_{eq}=0.24$ ) και τα ποσοστά παραμόρφωσης που μελετήθηκαν αφορούσαν την αρχική κατάσταση του υλικού (0% παραμόρφωση) και την τελική (14% παραμόρφωση).

Η δομή που του υλικού που εξετάστηκε ήταν αυτή ενός υποευθηκτοειδούς κοινού ανθρακούχου χάλυβα, ο οποίος αποτελείται από κόκκους φερρίτη και περλίτη.

Η κυτταροειδής μορφή του φερρίτη (εικόνα 8.22) υποδηλώνει ότι πρόκειται για προευθηκτοειδή φερρίτη του οποίου η ταχύτητα απόψυξης ήταν σχετικά αργή. Παράλληλα παρατηρούμε κόκκους περλίτη οι οποίοι περιβάλλονται από τη μητρική φάση του φερρίτη. Συνολικά παρατηρούμε προευθηκτοειδή φερρίτη και κόκκους περλίτη, ο οποίος αποτελείται από φερρίτη και σεμεντίτη στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 8.22: Εικόνα από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης δοκιμίου το οποίο δεν έχει υποστεί παραμόρφωση

Από μετρήσεις των διαστάσεων των κόκκων του φερρίτη και του περλίτη στην αρχική και την τελική κατάσταση προέκυψαν οι παρακάτω πίνακες:

Πίνακας 8.2: Μεταβολή διαστάσεων των κόκκων του φερρίτη ως απόλυτοι αριθμοί και ως ποσοστά

Φερρίτης						
	Επιμήκες (L)			Εγκάρσιο (T)		
	Αρχικό	Non	Age	Αρχικό	Non	Age
AVG	14,36	15,90	16,86	11,87	11,14	11,98
StDev	4,88	9,79	4,29	3,67	6,49	2,55
% μεταβολής	-	11%	17%	-	-6%	1%

Πίνακας 8.3: Μεταβολή διαστάσεων των κόκκων του περλίτη ως απόλυτοι αριθμοί και ως ποσοστά

Περλίτης						
	Επιμήκης (L)			Εγκάρσιο (T)		
	Αρχικό	Non	Age	Αρχικό	Non	Age
AVG	10,33	10,62	11,06	8,60	8,08	8,98
StDev	2,66	5,30	1,79	2,19	4,51	1,56
% μεταβολής	-	3%	7%	-	-6%	4%

Στους πίνακες 8.2 και 8.3 παρουσιάζεται η επιμήκης μεταβολή (Longitudinal (L)) των κόκκων και η εγκάρσια (transverse (T)). Η διεύθυνση του Longitude ήταν πάντοτε παράλληλη με τη διεύθυνση του εφελκυσμού, ενώ η διεύθυνση του transverse ήταν πάντοτε κάθετη στη διεύθυνση του εφελκυσμού.

Στους πίνακες παρουσιάζεται η επιμήκης και η εγκάρσια έκταση των κόκκων για την αρχική κατάσταση (0% παραμόρφωση) και για την τελική (14% παραμόρφωση), στην οποία το υλικό είτε έχει υποστεί γήρανση (Age) είτε δεν έχει (Non). Οι τιμές που παρουσιάζονται αποτελούν τη μέση τιμή των δέκα τιμών που μετρήθηκαν για κάθε περίπτωση και οι οποίες παρατίθενται σε παράρτημα 3.

Για τους κόκκους του φερρίτη παρατηρούμε ότι υπάρχει αύξηση ως προς την επιμήκη διάσταση (L), η οποία είναι παράλληλη στη διεύθυνση εφελκυσμού, ενώ υπάρχει μικρή μείωση ως προς την εγκάρσια (T) διεύθυνση. Η επιμήκης μεταβολή βρίσκεται στα επίπεδα του 11% μεταξύ των δοκιμών που δεν έχουν υποστεί γήρανση και 17% για τα δοκίμια που έχουν υποστεί. Η εγκάρσια μεταβολή κινείται μεταξύ του -6% για τα δοκίμια που δεν έχουν υποστεί γήρανση και 1% για τα δοκίμια που έχουν υποστεί. Θα πρέπει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο ότι η τυπική απόκλιση των τιμών βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα σε κάθε περίπτωση.

Για τους κόκκους του περλίτη παρατηρούμε ότι οι μεταβολές των διαστάσεων είναι σχετικά μικρές και για τις δυο διευθύνσεις και βρίσκονται στα επίπεδα του 3% για τα δοκίμια που δεν έχουν υποστεί γήρανση και 7% για τα δοκίμια που έχουν υποστεί, όσον αφορά την επιμήκη διεύθυνση, και -6% και 4% αντίστοιχα όσον αφορά την εγκάρσια. Όπως και στην περίπτωση του φερρίτη, η τυπική απόκλιση βρίσκεται σε υψηλά επίπεδα.

Η μεταβολή των διαστάσεων των κόκκων του φερρίτη είναι σαφώς μεγαλύτερη από τη μεταβολή των διαστάσεων των κόκκων του περλίτη. Η παρατήρηση αυτή εξηγείται διότι η δομή του περλίτη είναι σκληρότερη από τη δομή του φερρίτη, με αποτέλεσμα να αντιστέκεται σε μεγαλύτερο βαθμό, σε οποιαδήποτε απόπειρα παραμόρφωσης.



Η υψηλή τυπική απόκλιση σε όλες τις περιπτώσεις μαρτυρά, ότι θα πρέπει να γίνει εκτενέστερη μελέτη πάνω στη μεταβολή του μεγέθους και των διαστάσεων των κόκκων, έτσι ώστε να μειωθεί το σφάλμα και να γίνουν τα αποτελέσματα περισσότερο αξιόπιστα.

Στο παράρτημα 3 παρουσιάζονται ενδεικτικά ορισμένες εικόνες του τελικού δοκιμίου όταν έχει υποστεί γήρανση και χωρίς να έχει υποστεί γήρανση.

## **Κεφάλαιο 9**

### **Συμπεράσματα μελέτης ενδοτράχυνσης**

---

Από τη μελέτη ενδοτράχυνσης σε χάλυβες θερμής έλασης εξήχθησαν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η καταλληλότερη μέθοδος για τη μέτρηση της διατομής χονδροσύρματος το οποίο δεν έχει νευρώσεις, είναι η μέτρηση με χρήση παχυμέτρου.

#### **Χυτήριο A**

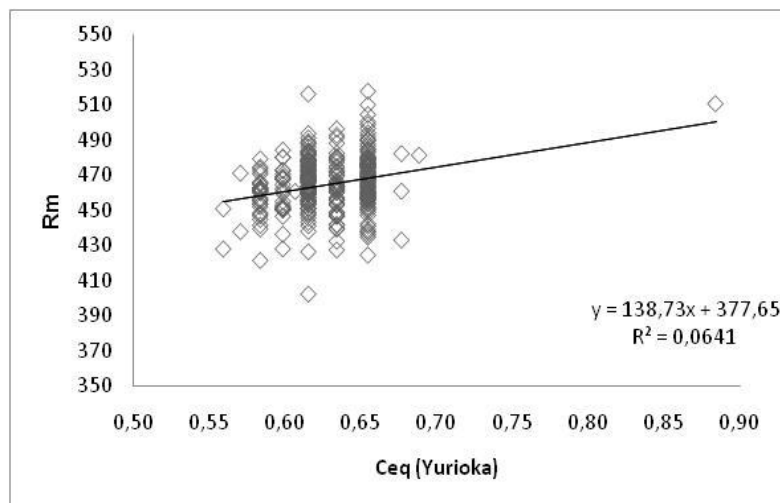
- Η ολκιμότητα μειώθηκε έως και 50% όσον αφορά τη επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο, 40% όσον αφορά την επιμήκυνση στο σημείο της θραύσης και 5% όσον αφορά τη διάμετρο.
- Η αντοχή αυξήθηκε έως και 100% όσον αφορά το όριο διαρροής, 30% όσον αφορά το όριο θραύσης και 40% όσον αφορά τη σκληρότητα.

#### **Χυτήριο B**

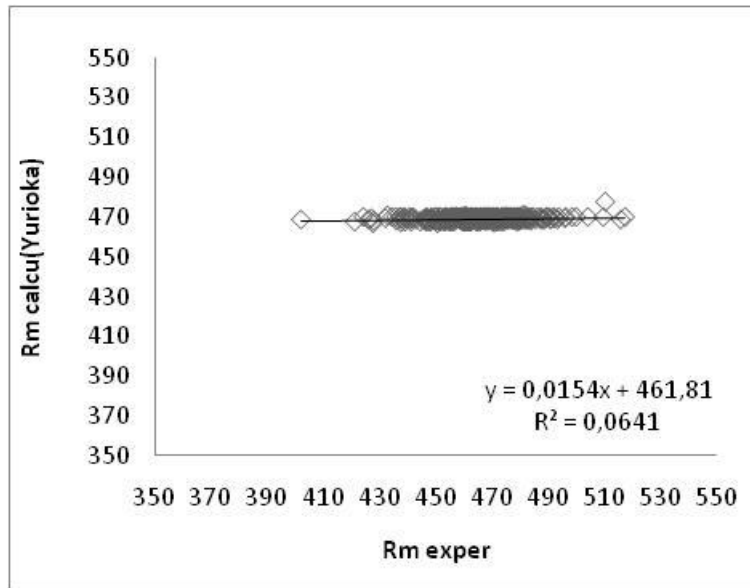
- Η ολκιμότητα μειώθηκε έως και 60% όσον αφορά τη επιμήκυνση στο μέγιστο φορτίο, 50% όσον αφορά την επιμήκυνση στο σημείο της θραύσης και 5% όσον αφορά τη διάμετρο.
  - Η αντοχή αυξήθηκε έως και 80% όσον αφορά το όριο διαρροής, 30% όσον αφορά το όριο θραύσης και 40% όσον αφορά τη σκληρότητα.
- 
- Το χυτήριο B επηρεάστηκε από τη γήρανση, σε αντίθεση με το χυτήριο A το οποίο δεν επηρεάστηκε καθόλου.

# Παράρτημα 1

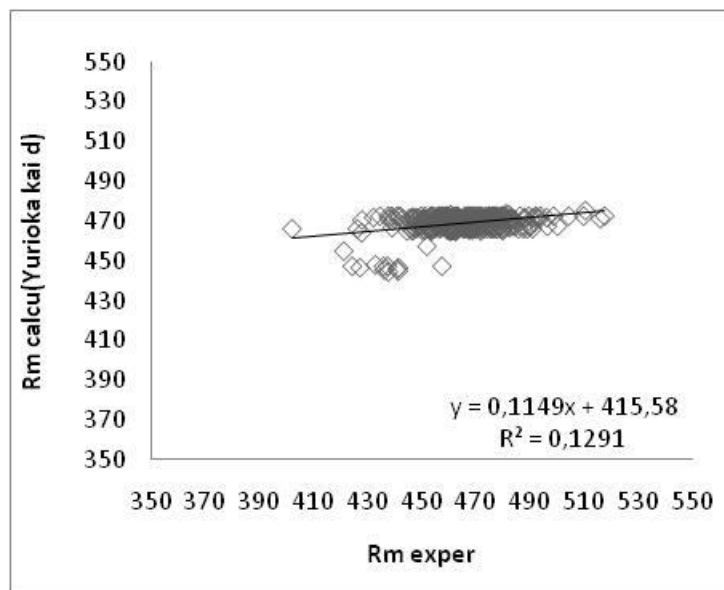
Στο παράρτημα παρουσιάζονται τα διαγράμματα συσχέτισης του ορίου θραύσης ως προς τον ισοδύναμο άνθρακα, για τις τιμές του ισοδύναμου άνθρακα που υπολογίστηκαν με τις σχέσεις 4 έως 7 και 22 έως 29 του πίνακα 5.3. Οι συντελεστές συσχέτισης που υπολογίστηκαν για τις συγκεκριμένες σχέσεις δεν ήταν ικανοποιητικοί με συνέπεια τα αποτελέσματα να μην παρουσιαστούν στο αντίστοιχο κεφάλαιο των αποτελεσμάτων.



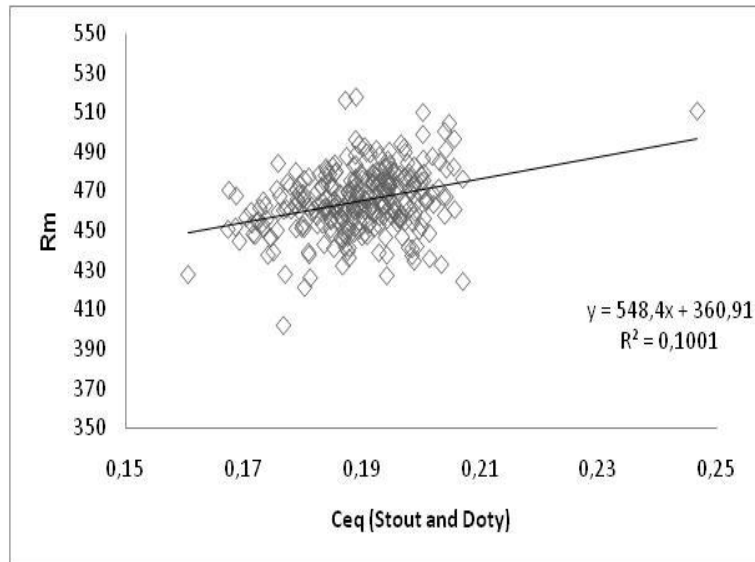
Εικόνα Π1: Συσχέτιση  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 4



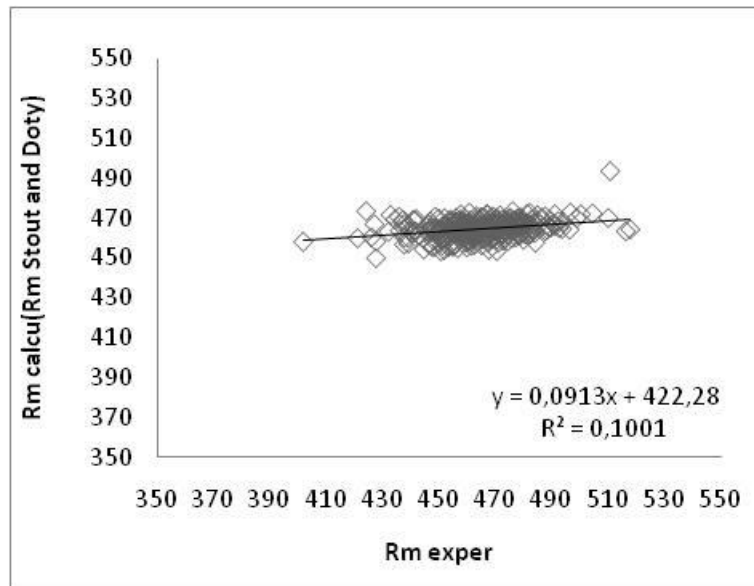
Εικόνα Π2: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 22



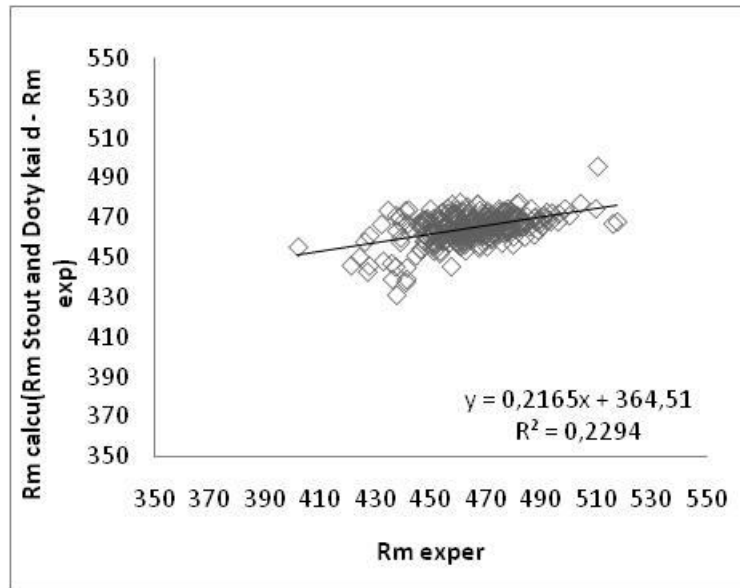
Εικόνα Π3: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 23



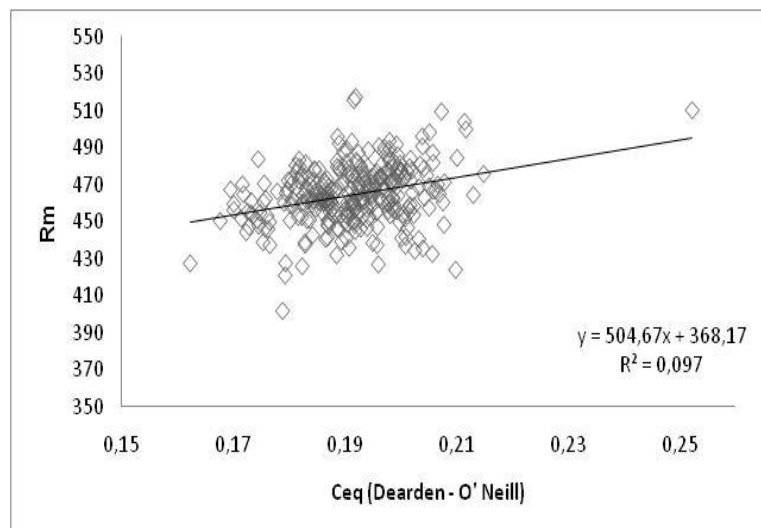
Εικόνα Π4: Συσχέτιση  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 5



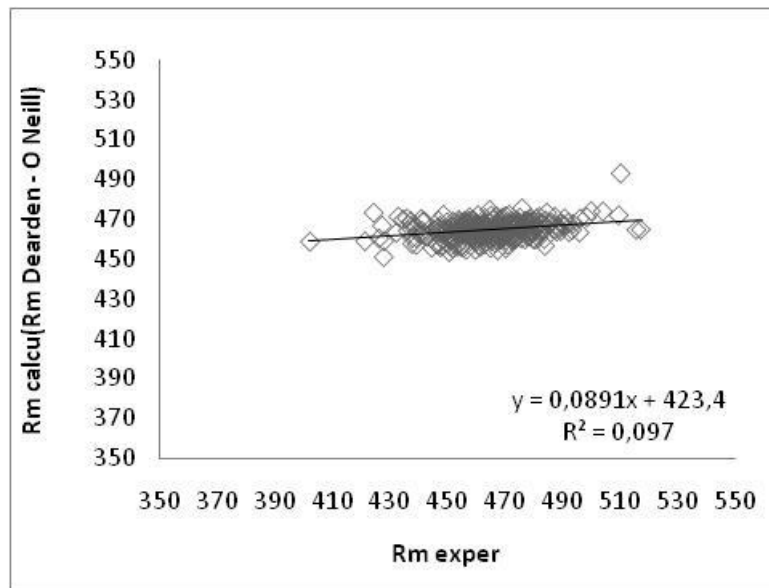
Εικόνα Π5: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 24



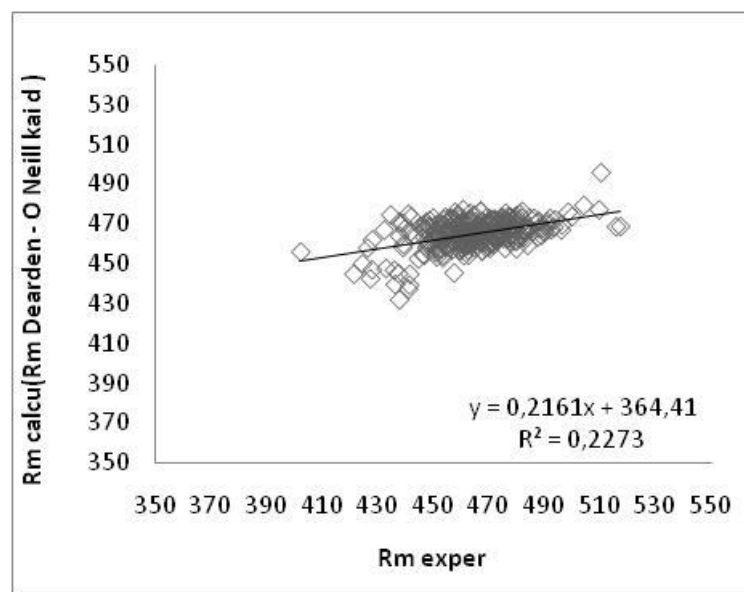
Εικόνα Π6: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 25



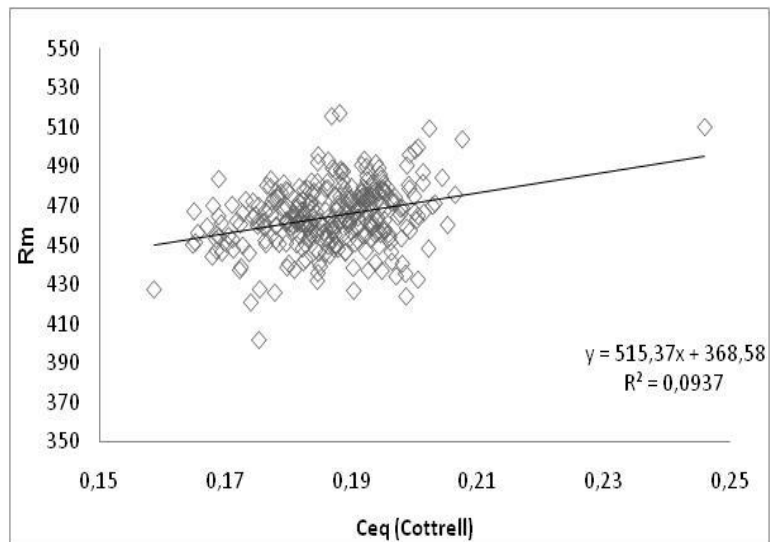
Εικόνα Π7: Συσχέτιση  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 6



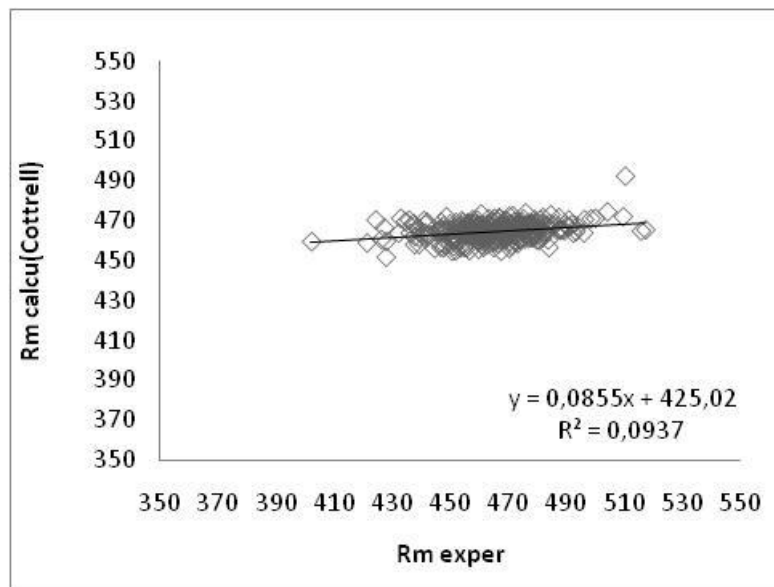
Εικόνα Π8: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 26



Εικόνα Π9: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 27

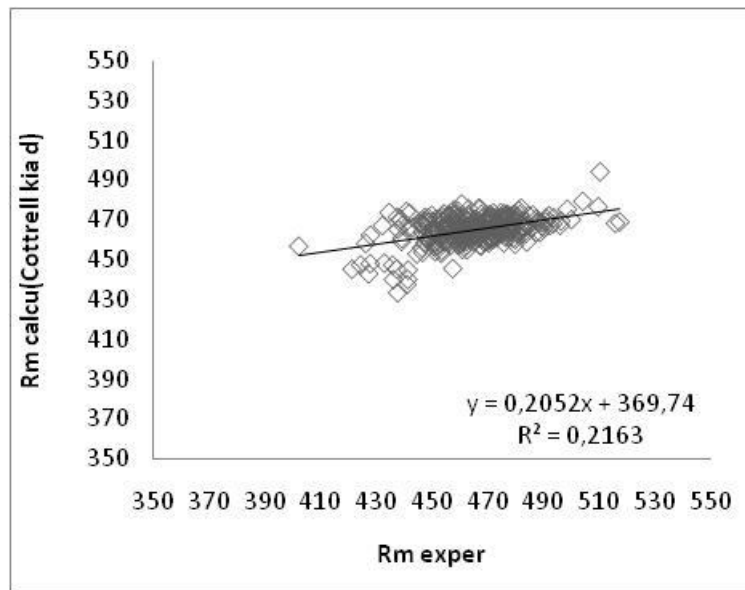


Εικόνα Π10: Συσχέτιση  $R_m$  πειραματικό με  $C_{eq}$  από τον τύπο 7



Εικόνα Π11: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 28



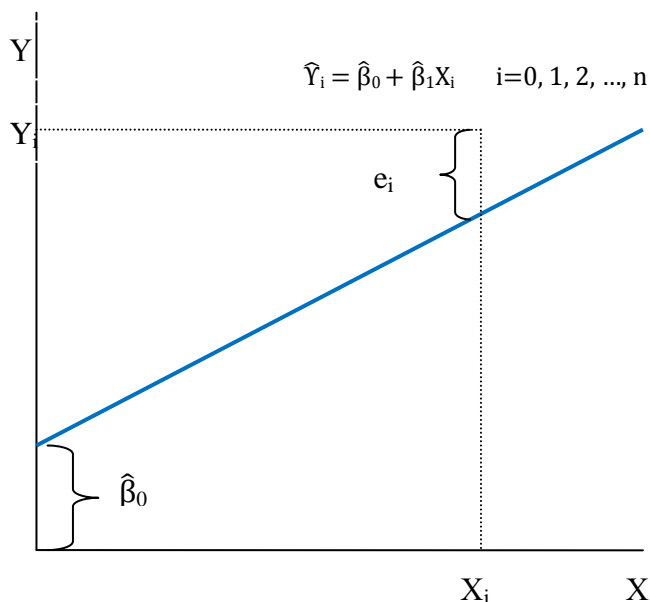


Εικόνα Π12: Διάγραμμα συσχέτισης  $R_m$  πειραματικό με  $R_m$  υπολογισμένο από τον τύπο 29

## Παράρτημα 2

### Μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων (OLS)

Έστω ότι για την εξίσωση Π1 έχουν εκτιμηθεί οι συντελεστές παλινδρόμησης  $\beta_0 = \hat{\beta}_0$  και  $\beta_1 = \hat{\beta}_1$ . Ο στόχος μας είναι οι τιμές αυτές να αποκλίνουν όσο το δυνατόν λιγότερο. Έτσι προκύπτει η γραμμή παλινδρόμησης:



Η γραμμή παλινδρόμησης  $\hat{Y}_i$  είναι η εκτίμηση της  $E(Y_i)$ . Οι αποκλίσεις μεταξύ των πραγματικών τιμών  $Y_i$  και των εκτιμώμενων τιμών  $\hat{Y}_i$  λέγονται **κατάλοιπα** (residuals). Τα κατάλοιπα ( $e_i$ ) είναι οι εκτιμήσεις του διαταρακτικού όρου ( $\epsilon_i$ ):

$$e_i = Y_i - \hat{Y}_i \quad \text{ή} \quad e_i = Y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i$$

Ο κύριος σκοπός της OLS

είναι ο υπολογισμός των εκτιμητών  $\hat{\beta}_0$  και  $\hat{\beta}_1$  που ελαχιστοποιούν το άθροισμα των τετραγώνων των καταλοίπων  $\sum_{i=1}^n (e_i)^2$ :

$$\min \sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \min \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_i)^2$$

παραγωγίζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και λύνοντας τα συστήματα προκύπτει ότι:

$$\hat{\beta}_1 = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{n(\sum X_i^2) - (\sum X_i)^2} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}$$

$$\hat{\beta}_0 = \bar{Y} - \hat{\beta}_1 \bar{X}$$

Οι τιμές των εκτιμητών έχουν τις ακόλουθες ιδιότητες:

α. Είναι αμερόληπτοι (unbiased) εκτιμητές των συντελεστών παλινδρόμησης του πληθυσμού.

$$E(\hat{\beta}_1) = \beta_1, E(\hat{\beta}_2)$$

**β.** Είναι **συνεπείς** (consistent) διότι με την επ' άπειρον αύξηση του δείγματος, οι εκτιμητές  $\hat{\beta}_0$  και  $\hat{\beta}_1$  συγκλίνουν προς τους συντελεστές παλινδρόμησης του πληθυσμού  $\beta_0$  και  $\beta_1$ .

**γ.** Είναι αποτελεσματικοί (efficient) διότι έχουν την μικρότερη διακύμανση άρα και το μικρότερο τυπικό σφάλμα (standard error) εκτίμησης μεταξύ όλων των αμερόληπτων εκτιμητών.

**δ.** Το άθροισμα των καταλοίπων ( $e_i$ ) γύρω απ την γραμμή παλινδρόμησης  $Y_i$  ισούται με το μηδέν.

$$\sum e_i = \sum (Y_i - \bar{Y})$$

- Το **κατάλοιπο** ( $e_i$ ), μετρά την απόκλιση της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y_i$  από την γραμμή παλινδρόμησης.
- Ο **διαταρακτικός ορος** ( $\epsilon$ ), μετρά την απόκλιση της εξαρτημένης μεταβλητής  $Y_i$  από την μέση της τιμή  $\bar{Y}$ .

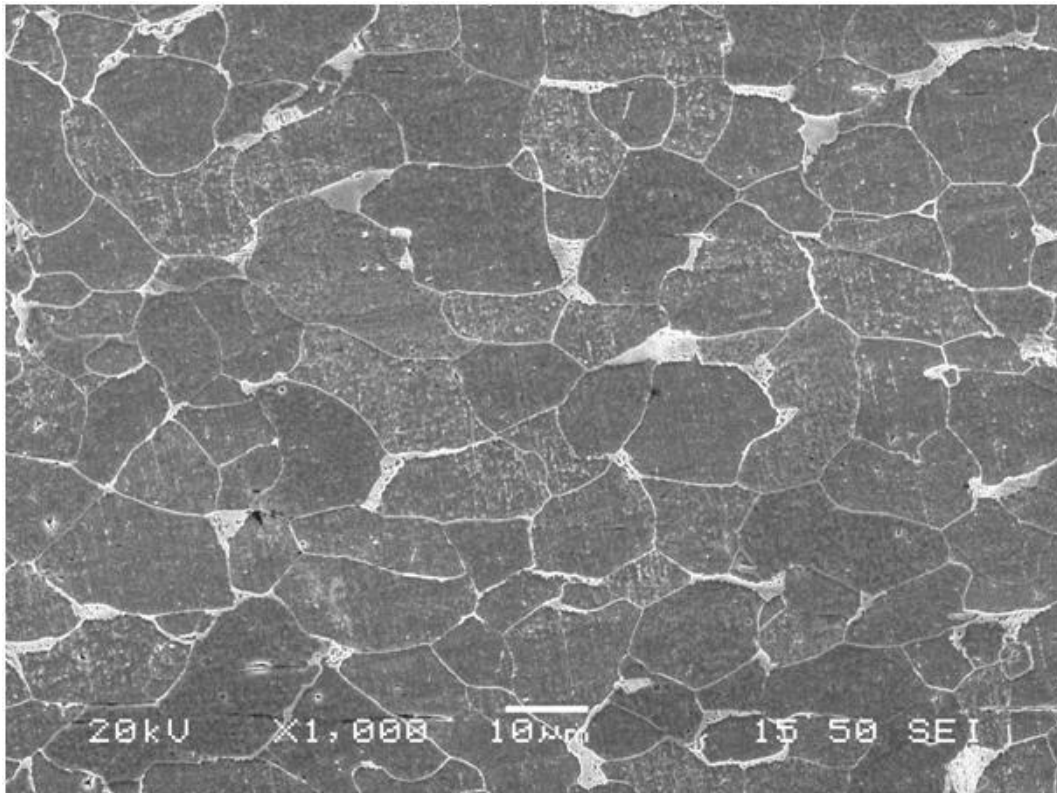
# Παράρτημα 3

Πίνακας Π1: Οι δέκα τιμές για τον φερρίτη και τον περλίτη της επιμήκης(L) και της εγκάρσιας (T) μεταβολής των διαστάσεων που αφορούν το υλικό που δεν έχει υποστεί παραμόρφωση.

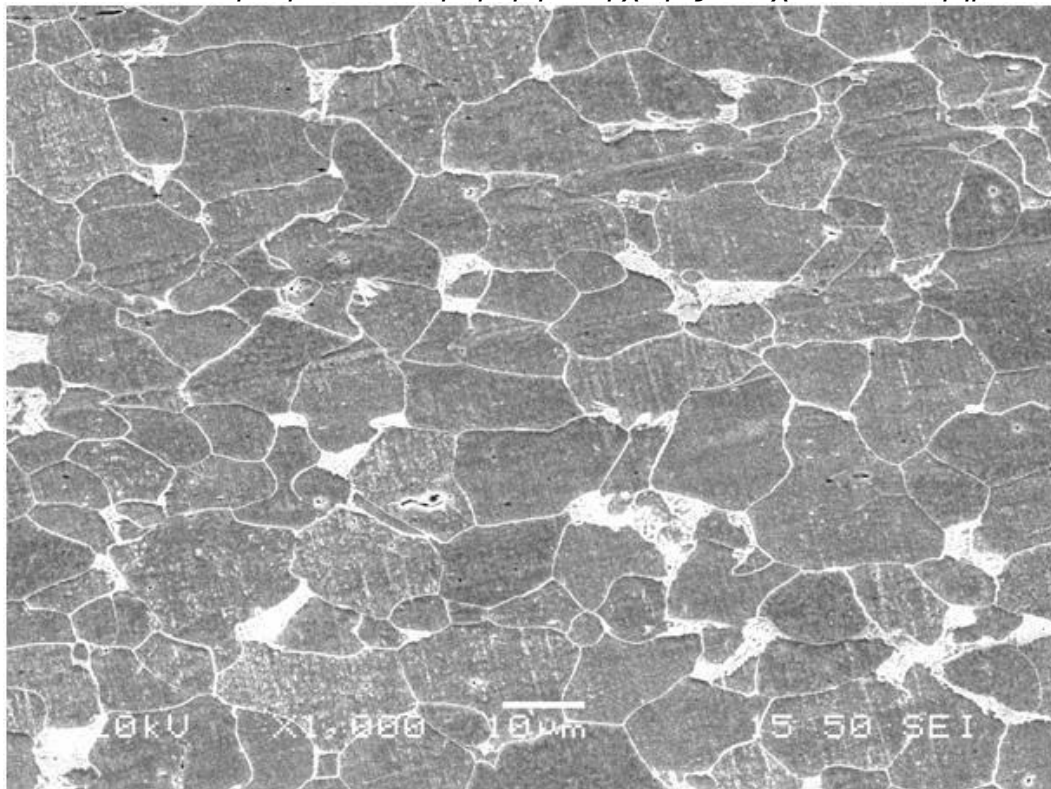
Αρχικό (0%)			
Φερρίτης		Περλίτης	
L	T	L	T
16,36	13,52	11,18	9,24
21,82	18,03	11,82	5,45
13,64	11,27	9,09	8,18
10,91	9,02	12,73	11,82
9,09	6,31	9,09	7,27
19,36	15,52	6,36	7,27
20,82	14,06	6,36	8,18
11,64	13,27	11,82	7,27
8,91	11,02	14,55	12,73
11,09	7,34	10,97	8,62

Πίνακας Π2: Οι δέκα τιμές για τον φερρίτη και τον περλίτη της επιμήκης(L) και της εγκάρσιας (T) μεταβολής των διαστάσεων που αφορούν το υλικό που έχει υποστεί παραμόρφωση.

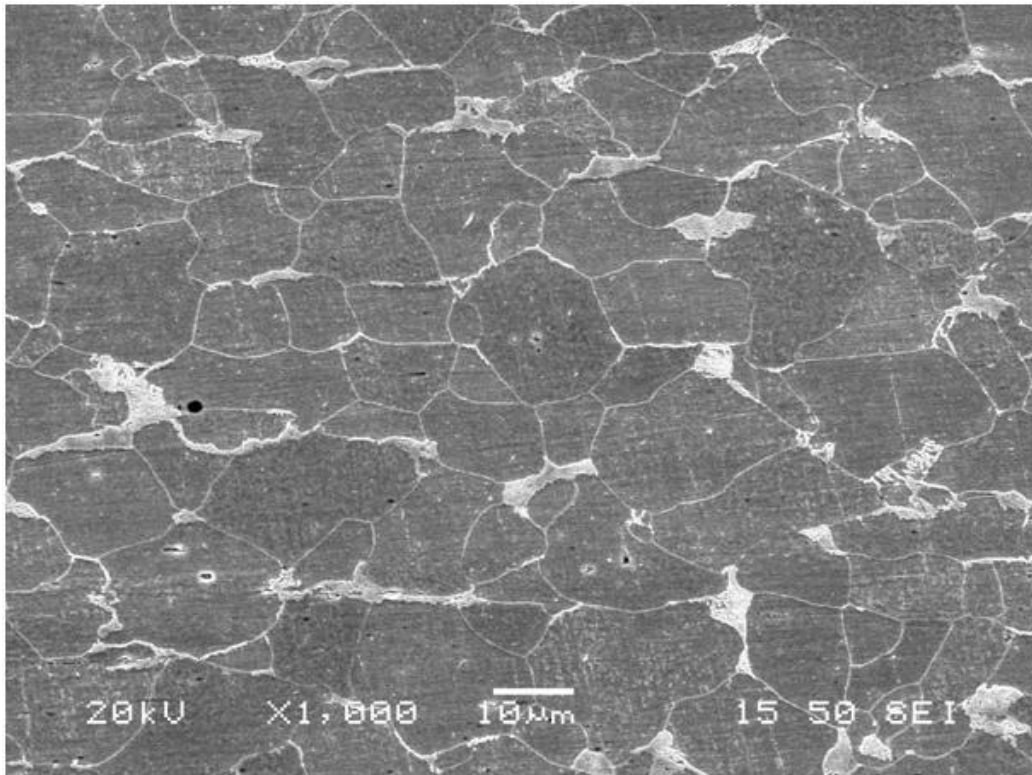
Τελικό (14%)							
Non				Age			
Φερρίτης		Περλίτης		Φερρίτης		Περλίτης	
L	T	L	T	L	T	L	T
23,64	19,53	16,14	13,34	13,64	14,36	13,52	8,69
29,09	20,00	12,73	10,52	18,18	12,73	10,52	10,56
24,55	14,55	13,64	11,27	16,36	15,45	12,77	8,69
22,73	15,45	18,91	16,28	17,27	12,73	10,52	6,55
24,55	17,27	15,45	12,77	15,45	8,91	9,02	9,93
8,69	7,18	5,94	4,91	14,55	8,03	12,02	9,31
7,45	6,16	4,94	3,91	13,64	14,64	11,27	6,83
6,21	5,13	5,09	4,21	20,00	9,87	8,26	8,69
6,83	5,64	6,36	5,26	27,27	12,73	10,52	11,18
4,35	3,59	6,97	5,76	12,73	10,38	13,52	7,16



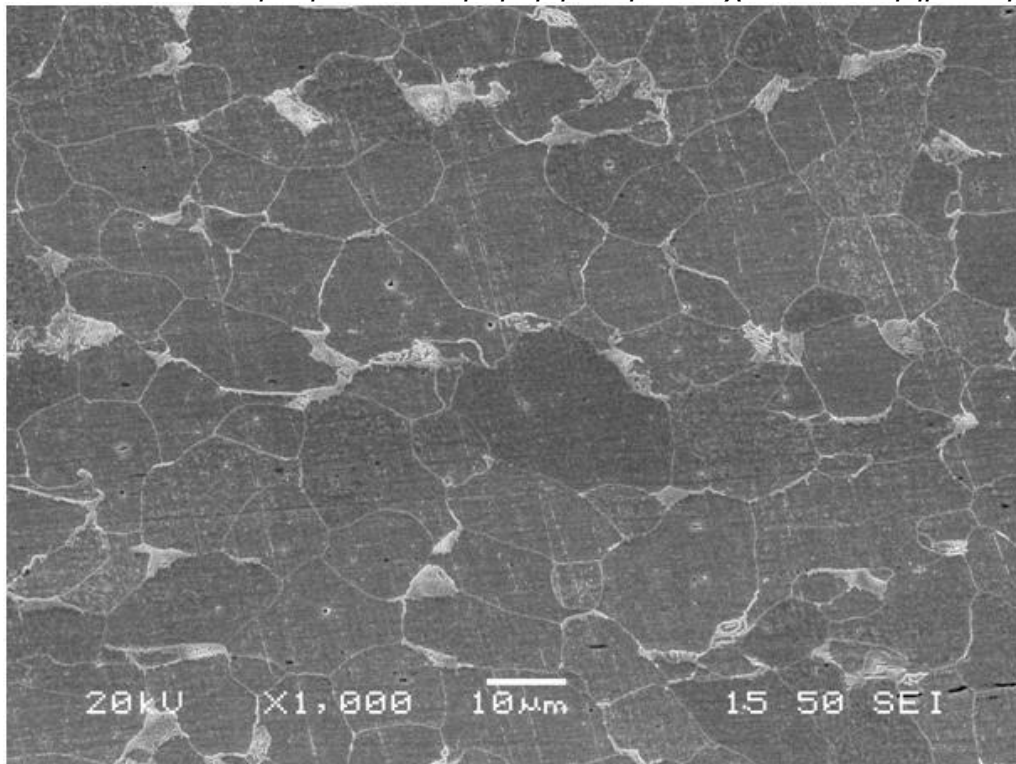
*Εικόνα Π13: Δοκίμιο με 14% παραμόρφωση χωρίς να έχει υποστεί γήρανση*



*Εικόνα Π14: Δοκίμιο με 14% παραμόρφωση χωρίς να έχει υποστεί γήρανση*



*Εικόνα Π15: Δοκίμιο με 14% παραμόρφωση που έχει υποστεί γήρανση*



*Εικόνα Π16: Δοκίμιο με 14% παραμόρφωση που έχει υποστεί γήρανση*

## **Βιβλιογραφία**

### **Ελληνική βιβλιογραφία**

- Ανοξειδωτος Χάλυβας Οπλισμού Σκυροδέματος, Μ.Δέδε, Ε. Δημόγλου, 2007
- Ανάλυση Δεδομένων με Χρήση του Στατιστικού Πακέτου R, Δ. Φουσκάκης, ΣΕΜΦΕ, τομέας μαθηματικών
- Ανάλυση Παλινδρόμησης, Γ. Παπαδόπουλος, ΓΠΑ, εργαστήριο μαθηματικών και στατιστικής
- Γραμμικό Υπόδειγμα Παλινδρόμησης, Α. Βουκελάτος
- Γενική Μεταλλογνωσία 1, Γ.Δ Παπαδημητρίου, Αθήνα 2000
- Γενική Μεταλλογνωσία 2, Τα κράματα Γ.Δ Παπαδημητρίου, Αθήνα 2000
- Διαδικασία θερμικής κατεργασίας χαλύβων για οπλισμένο σκυροδέμα, Π. Σισμάνης
- Διερεύνηση προβλημάτων γήρανσης σε χάλυβες οπλισμού σκυροδέματος Π. Μαυροειδής, Ι.Νικολάου, Γ.Δ Παπαδημητρίου, 2007
- Εισαγωγή στη Θεωρία Πιθανοτήτων και Στατιστική, Γ. Κοκολάκης, Ι. Σπηλιώτης, 4<sup>η</sup> έκδοση, 1999
- Επίδραση παρατεταμένης θέρμανσης στα Μηχανικά Χαρακτηριστικά Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος, Π. Μαυροειδής, Ι.Νικολάου, Γ.Δ Παπαδημητρίου, 2007
- Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών, Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, 1996
- Εφαρμοσμένη Στατιστική 2, Δ. Παντελής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- Η ευρωπαϊκή τυποποίηση των χαλύβων και χυτοσιδήρων, Κ.Γ. Πασπαλάς
- Κανονισμός Τεχνολογίας Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος ΚΤΧ 2008
- Μεταλλογνωσία, τόμος 1, Τα μέταλλα, Κ.Η. Κονοφάγος, Αθήνα 1984
- Μεταλλογνωσία, τόμος 2, Τα κράματα, Κ.Η. Κονοφάγος, Αθήνα 1984
- Μεταλλοτεχνία, Γ.Δ Παπαδημητρίου, Αθήνα 2000
- Το Κλασικό Πολλαπλό Γραμμικό Μοντέλο Παλινδρόμησης – Στατιστικά Συμπεράσματα και Εκτιμήσεις, Κιουφεντζή
- Στατιστική, Α. Λεοντίσης Phd, τμήμα ΔΠΠΝΤ, Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων
- Συγκολλησιμότητα Χαλύβων Οπλισμού Σκυροδέματος, Ι. Νικολάου, 2010
- Φυσική Μεταλλουργία Σιδήρου και Χάλυβα, Γ.Δ Παπαδημητρίου, Αθήνα 2000
- Χαρακτηριστικά Χαλύβων οπλισμού Σκυροδέματος Μετά από Παρατεταμένη Θέρμανση, Ι. Νικολάου, Γ.Δ Παπαδημητρίου, 2007

### **Ξένη βιβλιογραφία**

- ASTM Metal Handbook, Vol 1,8,9
- Dislocation multi – junctions and strain hardening, Bulatov, Hsiung, Tang, Arsenlis, Bartlet, Cai, Florando, Hiratani, Rhee, Hommes, Pierce, Diaz de la Rubia, 2006
- Effects of strain hardening and fine structure on strength and toughness of tempered martensite in carbon steels, G. Krauss, D.K. Matlock, 1995
- Material Science and Engineering An Introduction, 5<sup>th</sup> edition, William D. Callister Jr, 2008
- Measurement of ASTM grain size number, R.E Napolitano, Material Science and engineering, Iowa State University
- Mechanical Metallurgy, 3<sup>rd</sup> edition, Mc Graw-Hill book company, Dieter G.E., 1986
- Mechanical Behavior of Materials, 3<sup>rd</sup> edition, Norman E. Dowling, 2007
- Metallography, principles and practice, G.F. Vander Voort
- Microstructures and mechanical properties after heating of reinforcing 500 MPa class weldable steels produced by various processes (Tempcore , Microalloyed with vanadium and work hardened), J Nikolaou, GD Papanikolaou, 2004
- Modeling the strength of steel plates using regression and neural networks, I. Juutilainen, J. Roning, L. Myllykoski, 2002
- The assessment of carbon equivalent formulas in predicting the properties of steel weld metals, Sukru Talas, 2009
- The Science and Engineering of Materials, 3<sup>rd</sup> SI edition, Donald, R. Askeland
- [http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Dislocations\\_02.html#Top](http://www.spaceflight.esa.int/impress/text/education/Mechanical%20Properties/Dislocations_02.html#Top)
- <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dislocations/printall.php>
- <http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/mechanical-testing/theory3.php>
- [http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/slip/work\\_hardening.php](http://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/slip/work_hardening.php)

<http://www.matter.org.uk/matscicdrom/manual/di.html>