



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών

---



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

***«Συσχέτιση θερμικών κατεργασιών ελασμένων  
χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος και συνακόλουθων  
μηχανικών ιδιοτήτων»***

Όνοματεπώνυμο:  
Χρηστέα Στέλλα

Επιβλέπων:  
Γιώργος Φούρλαρης, Αναπληρωτής Καθηγητής, τομέα μεταλλουργίας και  
τεχνολογίας υλικών

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

# Περιεχόμενα

<b>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....</b>	<b>2</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....</b>	<b>4</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.0: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>6</b>
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.0 ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ .....</b>	<b>8</b>
2.1 Γενικά .....	8
2.2 Γενικές θερμοδυναμικές αρχές .....	11
2.3 Μαρτενσιτική βαφή.....	12
2.3.1 Προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού .....	14
2.3.2 Οι τιμές του Ms.....	16
2.3.3 Μηχανικές Ιδιότητες του Μαρτενσίτη .....	17
2.4 Το φαινόμενο της επαναφοράς.....	18
2.5 Χημική σύσταση.....	20
2.5.1 Ο ρόλος των κραματικών στοιχείων στον χάλυβα .....	20
2.6 Μέθοδος Θερμής Έλασης και Θερμικής Κατεργασίας, ΘΕ-ΘΚ (Tempcore) .....	26
2.6.1 Παράμετροι λειτουργίας .....	29
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.0 ΜΕΤΑΒΑΤΙΚΗ ΑΓΩΓΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ.....</b>	<b>33</b>
3.1 Κριτήρια για την ανάλυση ενός ολοκληρωτικού συστήματος.....	34
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.0 ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ .....</b>	<b>38</b>
4.1 Εισαγωγή.....	38
4.2 Περιγραφή στοιχείων .....	40
4.2.1 Μέθοδοι.....	40
4.3 Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων στους ΧΟΣ ΘΕ-ΘΚ .....	43
4.3.1 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα .....	44
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.0 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ .....</b>	<b>48</b>
5.1 Σκοπός .....	48
5.2 Εισαγωγή.....	53
5.3 Συλλογή στοιχείων.....	55

<b>5.4 Επίλυση μοντέλων .....</b>	<b>62</b>
5.4.1 Προσέγγιση 1 <sup>η</sup> .....	62
5.4.2 Προσέγγιση 2 <sup>η</sup> .....	71
<b>6.0 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....</b>	<b>89</b>
<b>7.0 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>90</b>

## Περίληψη

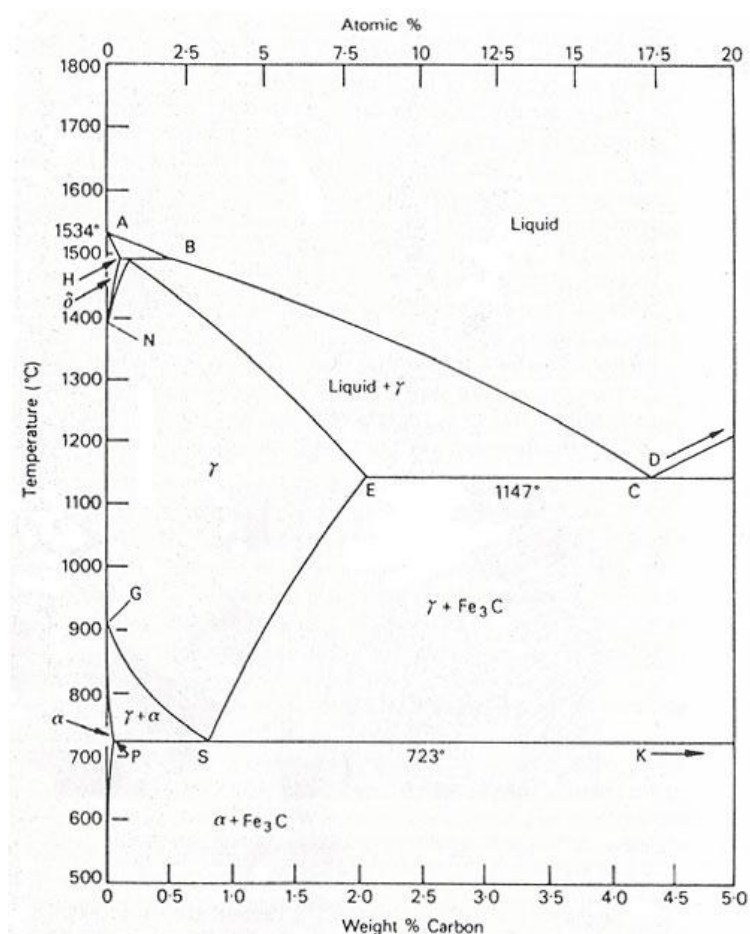
Στην παρούσα εργασία, αναπτύσσεται μαθηματικό μοντέλο με στόχο την συσχέτιση κύριων παραμέτρων παραγωγής με την αντοχή των ράβδων ( $R_{eH}$ ). **Το μοντέλο γραμμικής συσχέτισης που αναπτύχθηκε**, λαμβάνοντας υπόψη την χημική σύσταση των χαλύβων, την θερμοκρασία αναθέρμανσης, την διάμετρο των ράβδων, την ταχύτητα έλασης, την διάρκεια βαφής και την θερμοκρασία μετά την βαφή προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το όριο διαρροής των ράβδων που μετρήθηκε πειραματικά.

## Summary

In the present work, a mathematical model is developed aiming at the cross-correlation of main parameters of production with the resistance of bars ( $R_{eH}$ ). **The model of linear cross-correlation that was developed**, taking into consideration the chemical constitution of steels, the temperature of annealing, the diameter of bars, the speed of rolling, the duration of annealing and the temperature afterwards the annealing **approaches with satisfactory precision the limit of yield of bars that was measured experimentally.**

## Κεφάλαιο 1.0: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο χάλυβας είναι υλικό που προσφέρεται για πολλές χρήσεις. Μπορεί με μηχανική διαμόρφωση να γίνουν αλλαγές στο σχήμα του έτσι που να μετατρέπεται σε λεπτά φύλλα (λαμαρίνες) ή λεπτά και μακρυνά σύρματα, μπορεί να γίνει αρκετά σκληρός για γρανάζια, και ακόμα σκληρότερος για να χαράζει άλλους χάλυβες, μπορεί να γίνει μαγνήτης σκληρός ή μαλακός, ανθεκτικός στη διάβρωση (ανοξειδωτος χάλυβας) κ. α. Αυτές όλες οι αλλαγές εξαρτώνται από τη σύνθεση ανάλογα δηλαδή με την περιεκτικότητα τους σε κραματικά στοιχεία και την θερμική κατεργασία.



Εικόνα 1.1 Το διμερές διάγραμμα Fe-C

Με αυτό το τρόπο κατατάσσονται σε κατηγορίες όπως :

- Κοινοί ανθρακούχοι χάλυβες

- Ευτηκτοειδής (χάλυβες με ποσοστό 0,8 % C)
- Υποευτηκτοειδής (χάλυβες με ποσοστό από 0,025 % έως 0,8 % C)
- Υπερευτηκτοειδής (χάλυβες με ποσοστό από 0,8 % έως 2,1 % C)
- Ελαφρά κραματωμένοι χάλυβες
- Ισχυρά κραματωμένους χάλυβες ή ειδικούς χάλυβες

## Κεφάλαιο 2.0 Θερμικές Κατεργασίες

### 2.1 Γενικά

Γενικά η διαμόρφωση μετάλλων μεγάλων σε όγκο και μαζικής παραγωγής γίνεται εν θερμώ οπότε το μέταλλο είναι μαλακότερο και περισσότερο όλκιμο, και επί πλέον δεν ενδοτραχύνεται (σκληραίνει) αλλά παραμένει μαλακό και όλκιμο. Γενικά διαμόρφωση εν ψυχρώ γίνεται συνήθως σε αντικείμενα μικρών διατομών π. χ. φύλλα, σύρματα, λαμαρίνες ή σε αντικείμενα με τοπική διαμόρφωση π. χ. σχηματισμός κεφαλής βίδας.

Κάθε αύξηση της θερμοκρασίας στα μέταλλα οδηγεί σε αύξηση της ενδοατομικής απόστασης με αποτέλεσμα να γίνεται και μικρή ελάττωση της αντοχής του ατομικού δεσμού. Επίσης, οι διαταραχές μπορούν να μετακινηθούν εύκολα μέσα στον κρύσταλλο. Αποτέλεσμα όλων αυτών είναι να ελαττώνεται και το όριο διαρροής με την αύξηση της θερμοκρασίας.

Οι εν θερμώ κατεργασίες γίνονται σε θερμοκρασία ανώτερη της θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης του μετάλλου, και αυτό γιατί γίνεται συγχρόνως με την πλαστική παραμόρφωση ανακρυστάλλωση του μετάλλου, έτσι που επιτυγχάνεται μια σημαντική επιτάχυνση της όλης εργασίας, χωρίς να χρειάζονται οι ενδιάμεσες ανοπτήσεις του μετάλλου που γίνονται κατά την ψυχρή διαμόρφωση. Εκτός από τα παραπάνω, επειδή στα περισσότερα μέταλλα η κατεργασιμότητα και η πλαστικότητα είναι μεγαλύτερες σε ψηλή θερμοκρασία, καταναλώνεται λιγότερη ενέργεια για τη διαμόρφωση.



Οι κυριότερες μέθοδοι θερμικής κατεργασίας μετάλλων είναι :

- Θερμή έλαση
- Σφυρηλασία
- Σφυρηλασία με ελεύθερη πτώση (Drop forging)
- Σχηματισμός κεφαλής
- Πίεση εν θερμώ
- Διέλαση

Η παρούσα εργασία αναφέρεται στη κατεργασία της θερμής έλασης.

Συσκευή με δύο έλαστρα χρησιμοποιήθηκε το 1783 για την κατασκευή ράβδων σιδήρου. Αργότερα χρησιμοποιήθηκαν τρία έλαστρα και μετά πιο πολύπλοκες διατάξεις εξ' αιτίας της αυξανόμενης χρήσης του χάλυβα και της μαζικής παραγωγής του, μέχρι σήμερα που η θερμή έλαση αποτελεί ξεχωριστή μονάδα στην παραγωγή και στη διάταξη του εργοστασίου (ελασματοουργείο).

Θερμή έλαση εφαρμόζεται διεθνώς για να ελαττωθούν οι διαστάσεις μεγάλων πλινθωμάτων χάλυβα και να παραχθούν ταινίες, φύλλα και ράβδοι διάφορων διαστάσεων. Στην πράξη η μόνη περίπτωση που εφαρμόζεται ψυχρή διαμόρφωση σε χάλυβα είναι όταν το κομμάτι είναι πολύ μικρό και δεν μπορεί να κρατήσει θερμότητα, ή όταν επιζητείται ένα εξαιρετικό τελείωμα της επιφάνειας.

Για να γίνει έλαση του χάλυβα πρέπει να υπάρχουν δύο μεγάλης ισχύς αντίθετα στρεφόμενα έλαστρα, για την ελάττωση των διαστάσεων των λευκοκυρομένων πλινθωμάτων. Ακολουθως το θερμό μέταλλο διέρχεται από σειρές κυλίνδρων για παρά πέρα κατεργασία. Θερμή έλαση γίνεται και στα περισσότερα μη σιδηρούχα κράματα τουλάχιστον στο πρώτο στάδιο και ακολουθείται ψυχρή έλαση για το τελείωμα των επιφανειών.



Εικόνα 2.1 Δύο έλαστρα μεγάλης ισχύς αντίστροφα στρεφόμενα τα οποία καταβρέχονται με νερό καθώς η ωστενιτοποιημένη μπιγιέτα περνάει ανάμεσα τους (Χαλυβουργική Α.Ε., Ελασματοουργείο)

## 2.2 Γενικές θερμοδυναμικές αρχές

Γενικότερα, ως κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας ενός συστήματος νοείται η κατάσταση ελάχιστης ενέργειας σε μια δεδομένη θερμοκρασία. Η απόψυξη ενός συστήματος (π.χ. ενός στερεού διαλύματος) μπορεί μόνον τότε να οδηγήσει το σύστημα σε κατάσταση ισορροπίας στη νέα του θερμοκρασία, όταν πραγματοποιηθεί με θεωρητικά απείρως μικρό ρυθμό. Στην θεωρητική αυτή περίπτωση, δίδεται ο απαραίτητος χρόνος στο σύστημα να πραγματοποιήσει τις εσωτερικές του αλλαγές (που μικροσκοπικά συνιστούν μετακινήσεις μεγάλων σχετικά αποστάσεων σε ατομική κλίμακα) με τον πιο τυχαίο τρόπο (με μηχανισμό διάχυσης), που οδηγεί, κατά τη στατιστική φυσική, σε κατάσταση ελάχιστης ενέργειας.

**Για τον μηχανικό** τούτο σημαίνει την κατάσταση που είναι απαλλαγμένη από ατέλειες και εσωτερικές τάσεις. Παρέκκλιση από τον κανόνα της απείρως αργής απόψυξης οδηγεί σε δομές εκτός ισορροπίας, που έχουν ως εκ τούτου εσωτερική ενέργεια διάφορη της ελάχιστης. Τέτοιες δομές χαρακτηρίζονται από πυκνότητες σημειακών ή άλλων ατελειών που διαφοροποιούνται ανάλογα με τον ρυθμό απόψυξης και κυρίως ανάλογα με το είδος των αντιδράσεων που συντελούνται κατά τον μετασχηματισμό των φάσεων του υλικού.

**Αυτές οι δομές, οι εκτός ισορροπίας, είναι που αποτελούν το κεντρικό σημείο του φαινομένου της επαναφοράς (που θα αναπτυχθεί στη συνέχεια) και είναι εκείνες, την αναβαθμισμένη εσωτερική ενέργεια των οποίων εκμεταλλευόμαστε για να ελέγξουμε το φαινόμενο προς την επιθυμητή κατεύθυνση.**

## 2.3 Μαρτενσιτική βαφή

Οι χάλυβες είναι κράματα που περιέχουν σίδηρο σε βασικό μέταλλο και άνθρακα σε περιεκτικότητα μέχρι και 2 %. Είναι δηλαδή κράματα σιδήρου άνθρακα.

Η περιεκτικότητα σε άνθρακα επηρεάζει σημαντικά τη μικροδομή τους και συνεπώς τις ιδιότητές τους. Γενικά η περιεκτικότητα σε άνθρακα στους χάλυβες είναι μικρότερη του 1 % και σε ειδικές μόνο περιπτώσεις μπορεί να φτάσει μέχρι 2 %.

Για μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε άνθρακα 2 – 5 % τα κράματα Fe – C αποτελούν τους χυτοσιδήρους.

Ένας χάλυβας του εμπορίου έχει αναπόφευκτα υποστεί στη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας μέχρι την τελική του μορφή και διάφορες άλλες θερμικές και μηχανικές κατεργασίες διαμόρφωσης που του δίνουν ακατάλληλη μικρογραφική δομή και ιδιότητες για τη χρήση που προορίζεται. Για παράδειγμα ο χάλυβας μπορεί να περιέχει φερρίτη και σεμεντίτη, όπως προβλέπεται από το διάγραμμα ισοροπίας των φάσεων, αλλά μπορεί να περιέχει και άλλες φάσεις και συστατικά εκτός ισοροπίας, μεμονωμένα ή σε μίγμα. **Για να ελεγχτεί η δομή και οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα υποβάλλεται σε καλά ελεγχόμενη θερμική κατεργασία.**

Μια τυπική θερμική κατεργασία συνίσταται στη θέρμανση του χάλυβα σε κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να μετατραπεί σε ωστενίτη και στη συνέχεια η απόψυξή του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος είτε με αργή απόψυξη για προϊόντα ισοροπίας, είτε με ταχεία απόψυξη για προϊόντα εκτός ισοροπίας, όπως απόψυξη σε νερό που θα αναπτυχθεί και παρακάτω.

Με απότομη ψύξη του υλικού σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ο ωστενίτης δεν θα έχει τον απαιτούμενο χρόνο για να μετασχηματισθεί σε φερρίτη και σεμεντίτη καθώς δεν θα δοθεί ο επαρκής χρόνος διάχυσης στα άτομα άνθρακα. Έτσι, αυτό που θα πάρουμε θα είναι ένας ωστενίτης σε κατάσταση εξαιρετικά ισχυρού υπερκορεσμού, σε θερμοκρασία στην οποία η διαλυτότητα του άνθρακα στον σίδηρο είναι κατά πολύ

μειωμένη. Η φάση αυτή, που είναι γνωστή με τον όρο μαρτενσίτης, χαρακτηρίζεται ως μετασταθής, γιατί έχει την τάση να μετασχηματιστεί στις φάσεις ισορροπίας που αντιστοιχούν στην συγκεκριμένη θερμοκρασία, σύμφωνα με το διάγραμμα ισορροπίας, δηλ. φερρίτη και σεμεντίτη.

Όταν η απόψυξη από την ωστενιτική περιοχή μέχρι τη θερμοκρασία περιβάλλοντος γίνει απότομα, ο ωστενίτης μετασχηματίζεται σε μια μετασταθή φάση τον μαρτενσίτη. Η απότομη απόψυξη αυτή για την δημιουργία του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ονομάζεται **βαφή του χάλυβα**.

### 2.3.1 Προϋποθέσεις για την πραγματοποίηση του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού

Για να σχηματισθεί ο μαρτενσίτης, πρέπει να συντρέχουν ορισμένες προϋποθέσεις, τις οποίες αναπτύσσουμε στη συνέχεια:

Ο μαρτενσίτης σχηματίζεται μόνο μέσα από την ωστενιτική φάση, και επομένως απαραίτητη προϋπόθεση για τον μαρτενσιτικό μετασχηματισμό είναι η ωστενιτοποίηση του χάλυβα πριν από τη βαφή. Η θερμοκρασία της ωστενιτοποίησης ονομάζεται «θερμοκρασία βαφής» (quenching temperature).

Η ταχύτητα απόψυξης από την ωστενιτική κατάσταση πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη, και πάντως όχι μικρότερη από μια ελάχιστη ταχύτητα απόψυξης, η οποία ονομάζεται «κρίσιμη ταχύτητα μαρτενσιτικής βαφής» και παριστάνεται με  $V_c$  (critical cooling rate). Για τους κοινούς ανθρακούχους χάλυβες η κρίσιμη θερμοκρασία βαφής εξαρτάται από την περιεκτικότητα σε άνθρακα και κυμαίνεται ενδεικτικά από 1200° έως 200°C/s. Τόσο μεγάλες ταχύτητες απόψυξης, μπορούν πρακτικά να επιτευχθούν με βαφή του διάπυρου χάλυβα σε λουτρό νερού ή λαδιού. Για χάλυβες που περιέχουν και κραματικά στοιχεία η κρίσιμη ταχύτητα μειώνεται και εξαρτάται γενικά από το είδος και την περιεκτικότητά τους. **Αν η ταχύτητα απόψυξης του ωστενίτη είναι μικρότερη από την κρίσιμη, τότε σχηματίζονται προϊόντα διαχυσιακών μετασχηματισμών και όχι μαρτενσίτης.**

Για να γίνει ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός, πρέπει η θερμοκρασία να κατέβει κάτω από μια μέγιστη θερμοκρασία, χαρακτηριστική του χάλυβα, η οποία ονομάζεται θερμοκρασία  $M_s$  (Martensite Starts= ο μαρτενσίτης αρχίζει να σχηματίζεται). Όταν κατά την απόψυξη η θερμοκρασία του χάλυβα εγγίζει τη θερμοκρασία  $M_s$ , μετασχηματίζεται στιγμιαία μια απειροστή ποσότητα ωστενίτη σε μαρτενσίτη και σε κάθε επιπρόσθετη κάθοδο της θερμοκρασίας  $d\theta$ , μετασχηματίζεται μια επιπλέον μάζα ωστενίτη  $dm$ . Ο μαρτενσιτικός μετασχηματισμός ολοκληρώνεται με μία κατώτερη θερμοκρασία η οποία ονομάζεται θερμοκρασία  $M_f$  (Martensite Finishes = ο

μαρτενσιτικός μετασχηματισμός τελειώνει). Σε κάθε ενδιάμεση θερμοκρασία μεταξύ  $M_s$  και  $M_f$ , μόνο ένα ορισμένο ποσό του αρχικού ωστενίτη έχει μετασχηματιστεί σε μαρτενσίτη. Απόψυξη σε θερμοκρασίες χαμηλότερες από την  $M_f$ , δεν προκαλεί στη συνέχεια κανένα μετασχηματισμό και ο μαρτενσίτης παραμένει σε μετασταθή κατάσταση επ' αόριστο.

Από τη μεταβολή των σημείων  $M_s$  και  $M_f$ , συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα, διαπιστώνετε ότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε άνθρακα, τόσο οι θερμοκρασίες αυτές είναι χαμηλότερες. Δηλαδή ο άνθρακας σταθεροποιεί τον ωστενίτη και κατεβάζει δραστικά προς τα κάτω την περιοχή του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.

### 2.3.2 Οι τιμές του Ms

Οι τιμές του Ms **επηρεάζονται σε μεγάλο βαθμό από την περιεκτικότητα σε άνθρακα** και σε μικρότερο βαθμό από την παρουσία άλλων κραματικών στοιχείων. Όλα τα κραματικά στοιχεία, με εξαίρεση το Co και το Al, μειώνουν τη θερμοκρασία Ms.

Διάφοροι εμπειρικοί τύποι επιτρέπουν τον προσεγγιστικό υπολογισμό των θερμοκρασιών Ms (και Mf). Η ακρίβειά τους είναι μικρή, δεδομένου ότι πολλοί άλλοι παράγοντες, όπως η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, το μέγεθος κόκκου του ωστενίτη και η παρουσία εγκλεισμάτων επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τις τιμές τους. Ενδεικτικά δίνονται οι συνηθέστεροι απ' αυτούς, κυρίως για να δείξουμε τον διαφορετικό βαθμό επίδρασης των διαφόρων στοιχείων.

#### *Τύπος του Nehrrenberg*

$$Ms (C) = 500 - 300C - 33Mn - 22Cr - 17Ni - 11Si - 11Mo \quad (1)$$

#### *Τύπος του Jaffe and Hollomon*

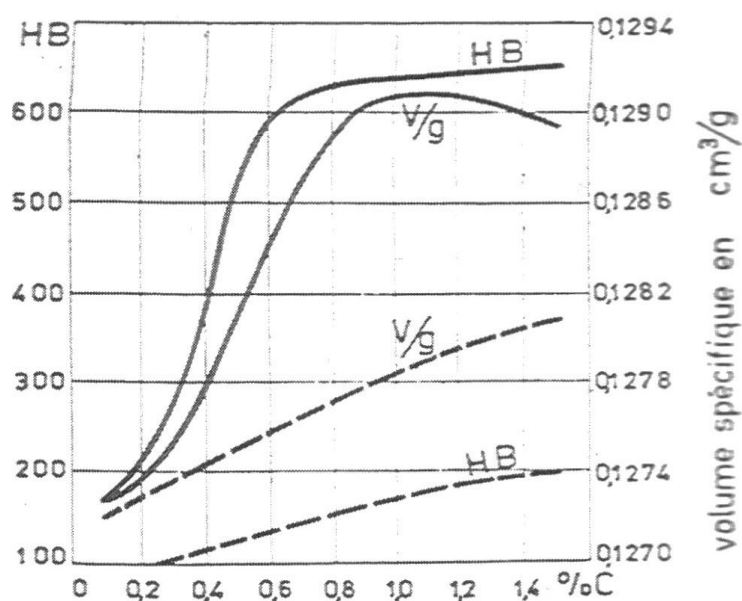
$$Ms (C) = 550 - 350C - 40Mn - 20Cr - 17Ni - 11Mo - 35V - 10Cu - 10Mo - 5W + 15Co + 30Al \quad (2)$$

Στις σχέσεις αυτές κάθε σύμβολο στοιχείου παριστάνει την επί τοις εκατό περιεκτικότητα κατά βάρος. Του κάθε στοιχείου προηγείται ένας συντελεστής βαρύτητας. Αξίζει να παρατηρήσουμε την ιδιαίτερα μεγάλη επίδραση του άνθρακα με συντελεστή βαρύτητας τουλάχιστον δεκαπλάσιο των άλλων στοιχείων.



### 2.3.3 Μηχανικές Ιδιότητες του Μαρτενσίτη

Ο μαρτενσίτης είναι πολύ σκληρή και ψαθυρή φάση. Η σκληρότητα και αντοχή του μαρτενσίτη αυξάνουν με την περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ συγχρόνως μειώνονται πολύ δραστικά η ολκιμότητα και η δυσθραυστότητα..



Γράφημα 2.1 Δείχνει την σκληρότητα και το ειδικό βάρος του βαμμένου χάλυβα συναρτήσει της περιεκτικότητας σε άνθρακα

## 2.4 Το φαινόμενο της επαναφοράς

Η θέρμανση του μαρτενσίτη για ορισμένο χρόνο και σε ορισμένη θερμοκρασία άνω της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος ονομάζεται επαναφορά του χάλυβα.

Η επιλογή της θερμοκρασίας επαναφοράς είναι ένας συμβιβασμός μεταξύ δυσθραυστότητας και ολκιμότητας αφενός, και ορίου ελαστικότητας, ορίου θραύσης και σκληρότητας αφ' ετέρου, γιατί η μία κατηγορία ιδιοτήτων βελτιώνεται σε βάρος της άλλης. Σημειώνεται πως η επιλογή της θερμοκρασίας επαναφοράς δεν είναι σε όλα τα συστήματα εύκολη, αυτό ήταν και ένα από τα βασικά προβλήματα της επεξεργασίας που παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία. Για έναν απλό ανθρακούχο χάλυβα ή ένα διμερές κράμα τα πράγματα είναι σχετικά εύκολα.

Το φαινόμενο της επαναφοράς είναι εκείνο το φαινόμενο του οποίου τα ευεργετικά αποτελέσματα εκμεταλλευόμαστε **για να ρυθμίσουμε τις ιδιότητες του κράματος στα επιθυμητά επίπεδα**. Η επαναφορά είναι φαινόμενο που παρατηρείται σε όλα σχεδόν τα είδη των χαλύβων αλλά και των μη σιδηρούχων κραμάτων. **Σκοπός της υποβολής σε συνθήκες επαναφοράς είναι η αύξηση της αντοχής του κράματος (που είναι ταυτόσημη με την αύξηση της σκληρότητας)**.

Σημειώνουμε ότι το φαινόμενο της επαναφοράς αποδίδεται σε κάποιο βαθμό από τις καμπύλες TTT αν και παρουσιάζει κάποιες διαφορές εξαιτίας του γεγονότος ότι οι καμπύλες αυτές αφορούν ισοθερμοκρασιακούς μετασχηματισμούς μετά από απόψυξη από την ωστενιτική φάση μέχρι την θερμοκρασία του μετασχηματισμού και όχι μετά από τον θερμικό κύκλο που ακολουθείται κατά την επαναφορά. **Η ύπαρξη του μαρτενσίτη επιταχύνει τα φαινόμενα σε μεγάλο βαθμό, λόγω της υψηλής ενέργειας που σχετίζεται με την δομή του**. Για τον λόγο αυτό, αξίζει να σημειώσουμε ότι φαινόμενα επαναφοράς λαμβάνουν χώρα ακόμη και σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αν και σπάνια προκαλούν ουσιαστικές αλλαγές στις ιδιότητες των χαλύβων ή άλλων κραμάτων.

Οι χάλυβες που είναι κατάλληλοι για βαφή και επαναφορά ονομάζονται χάλυβες επιβελτίωσης. Παρόμοια συμπεριφορά εμφανίζουν και οι ΧΟΣ που παράγονται με άμεση θερμική κατεργασία μετά την θερμή έλαση (Tempcore, thermex), με την παρατήρηση ότι η επαναφορά πραγματοποιείται με την αποθηκευμένη θερμότητα στον πυρήνα της ράβδου.

Στην βιομηχανική πράξη η επαναφορά γίνεται σε ορισμένη σταθερή θερμοκρασία  $\theta$  (στην παρούσα εργασία γύρω στους  $600^{\circ}\text{C}$ ) επί έναν ορισμένο χρόνο  $t$ . Στην περίπτωση των ΧΟΣ σημειώνεται ότι η θερμοκρασία επαναφοράς δεν είναι σταθερή αλλά αυξάνεται συνεχώς φτάνοντας μία μέγιστη τιμή που κατά σύμβαση θεωρείται και ως θερμοκρασία επαναφοράς (βλ Σχήμα 123 σταδιο).

Μία πρακτική παράμετρος για την εκτίμηση της επάλληλης επίδρασης θερμοκρασίας και χρόνου προτείνεται από τους Hollomon και Jaffe και είναι η :

$$T ( A + \log t ) \quad (3)$$

Όπου :

- $T$  = απόλυτη θερμοκρασία επαναφοράς, και μετριέται σε kelvin
- $T$  = διάρκεια σε ώρες της επαναφοράς στη θερμοκρασία  $\theta$  ( $T$ )
- $A$  = σταθερά της τάξης του 20

Η παράμετρος αυτή επιτρέπει τη εκτίμηση της τελικής σκληρότητας και των συναφών ιδιοτήτων.

Η παρουσία κραματικών στοιχείων συμπεριλαμβανομένου και του άνθρακα, δυσχεραίνουν και καθυστερούν την επαναφορά. Αυτό είναι θετικό ειδικά στη συγκεκριμένη περίπτωση του χάλυβα Tempcore, γιατί έτσι οι χάλυβες γίνονται πιο σταθεροί σε ενδεχόμενη ανεξέλεγκτη θέρμανση κατά τη λειτουργία και κατά τη χρήση τους.

## **2.5 Χημική σύσταση**

### **2.5.10 ρόλος των κραματικών στοιχείων στον χάλυβα**

Η επιλογή των κραματικών στοιχείων παίζει σπουδαίο ρόλο:

#### **Άνθρακας**

Πρόκειται για το πλέον σύνηθες συστατικό των χαλύβων. Αν και συναντάται σε μικρές ποσότητες παίζει καθοριστικό ρόλο στις ιδιότητες των χαλύβων. Αυξάνει πολύ αποτελεσματικά την εμβαπτότητα του χάλυβα, συντελώντας σε μεγαλύτερα βάθη βαφής, μειώνοντας ραγδαία την συγκολλησιμότητα των χαλύβων. Αύξηση της περιεκτικότητας σε άνθρακα συνοδεύεται από μείωση της Ms, αύξηση της σκληρότητας του μαρτενσίτη αλλά και του υπολειπόμενου ωστενίτη.

#### **Μαγγάνιο**

Αυξάνει πολύ αποτελεσματικά την εμβαπτότητα του χάλυβα, συντελώντας σε μεγαλύτερα βάθη βαφής.

Αυξάνει, επίσης, σημαντικά το όριο ελαστικότητας και την αντοχή στη θραύση των χαλύβων.

## **Χρώμιο**

Η κυριότερη συμβολή του χρωμίου στους χάλυβες είναι η αύξηση της σκληρότητα και η αύξηση της αντίστασης στη διάβρωση. Αποτελεί το κύριο κραματικό στοιχείο των ανοξείδωτων χάλυβων. Το χρώμιο σταθεροποιεί το φερρίτη και σχηματίζει καρβίδια. Αυξάνει τη σκληρότητα των χάλυβων λόγω του σχηματισμού των πολύ ισχυρών καρβιδίων χρωμίου (σκλήρυνση με κατακρήμνιση) και το σχηματισμό διαλύματος με φερρίτη (σκλήρυνση με σχηματισμό στερεού διαλύματος με αντικατάσταση).

Στους χάλυβες υψηλού άνθρακα προσδίδει αντίσταση στη φθορά και στη τριβή, λόγω των καρβιδίων του χρωμίου.

Στους ανοξείδωτους χάλυβες όταν βρίσκεται σε ποσοστό μεγαλύτερο του 10% κ.β. σχηματίζει ένα διάφανο φιλμ οξειδίου που εμποδίζει την οξείδωσή τους (παθητικοποίηση των ανοξείδωτων χάλυβων). Το χρώμιο προσδίδει μηχανική αντοχή και αντίσταση σε διάβρωση στις υψηλές θερμοκρασίες λόγω διατήρησης του παθητικού επιστρώματος.

Αυξάνει ισχυρά την αντοχή στον εφελκυσμό κατά 80 με 100 N/mm<sup>2</sup> για κάθε 1 % Cr. Η παρουσία του χρωμίου μειώνει σε μικρό βαθμό τη δυσθραυστότητα κατά την επιμήκυνση κατά τη θραύση.

Αυξάνει την εμβαπτότητα (μειώνει την κρίσιμη ταχύτητα βαφής), με συνέπεια ο χάλυβας να μπορεί να υποστεί βαφή και σε μεγάλο βάθος. Έτσι περιορίζονται οι εσωτερικές τάσεις και βελτιώνει τη συμπεριφορά κατά την επαναφορά.

## **Πυρίτιο**

Αυξάνει την αντοχή σε εφελκυσμό στους χάλυβες αυξάνοντας την σκληρότητα του φερρίτη(που προορίζονται για βαφή και επαναφορά). Το πυρίτιο είναι παρόν σε όλους τους χάλυβες σε μικροποσά. Αποτελεί σταθεροποιητή του φερρίτη, δεν παρουσιάζει την τάση να σχηματίζει καρβίδια, διαλύεται στο φερρίτη και ο κύριος

ρόλος του πυριτίου στο χάλυβα έγκειται στην αποξειδωτική του ικανότητα. Το πυρίτιο αντιδρά αμέσως με το οξυγόνο στους τηγμένους χάλυβες, σχηματίζοντας πυριτικές ενώσεις. Οι πυριτικές ενώσεις απομακρύνονται από το τήγμα, ως επιπλέουσα σκουριά. Το πυρίτιο προστίθεται στους χάλυβες για ηλεκτρικές και μαγνητικές εφαρμογές, όπως μοτέρ και μετασχηματιστές, καθώς μειώνει τις απώλειες των δεινορευμάτων στην περίπτωση εναλλασσόμενου ρεύματος. Στους χάλυβες που περιέχουν νικέλιο, χρώμιο και μαγγάνιο, η προσθήκη πυριτίου αυξάνει την αντοχή στη δυσθραυστότητα, στους χάλυβες υψηλού άνθρακα, το πυρίτιο βελτιώνει τη δυνατότητα για σκλήρυνση και χυτευσιμότητα.

### **Νικέλιο**

Το νικέλιο, όπως και το μαγγάνιο, είναι σταθεροποιητής του ωστενίτη ενώ δεν σχηματίζει καρβίδια. Γι' αυτό χρησιμοποιείται στην παραγωγή ωστενιτικών χάλυβων. Σε ποσοστά μεγαλύτερα από 7%κ.β., στους ανοξειδωτους χάλυβες, το νικέλιο σταθεροποιεί τον ωστενίτη σε θερμοκρασία χαμηλότερη από 20 C. Στους ωστενιτικούς χάλυβες, προσδίδει επίσης αντίσταση σε διάβρωση, από μη ισχυρά όξινα περιβάλλοντα. Προσδίδει υψηλή αντοχή σε κρούση προχαραγμένων δοκιμίων. Επίσης αυξάνει τη δυνατότητα θερμικής κατεργασίας των χάλυβων. (μαρτενιτική βαφή και επαναφορά). Σε αντίθεση με το χρώμιο, είναι πιο ευγενές στοιχείο από το σίδηρο και η προστατευτική του δράση δεν προκύπτει από το σχηματισμό επικαλυπτικού οξειδίου, αλλά από το γεγονός ότι κάνει το κράμα πιο ευγενές. Έτσι το καθιστά ανθεκτικό, επεκτείνοντας τις αντιδιαβρωτικές ικανότητες και την εφαρμογή του και σε άλλα περιβάλλοντα.

Το νικέλιο βελτιώνει σε σημαντικό βαθμό τα μηχανικά χαρακτηριστικά μεταξύ των οποίων και τη δυσθραυστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες μετατοπίζοντας τη κρίσιμη θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στην ψαθυρή θραύση έως τους -50 C. Για το λόγο αυτό κάνει τους χάλυβες κατάλληλους για ψυχρά περιβάλλοντα.

Το νικέλιο αυξάνει την αντοχή στον ερπυσμό σε υψηλές θερμοκρασίες όπως επίσης και τη συγκολλησιμότητα. Οι θερμοκρασίες A<sub>1</sub> έως A<sub>4</sub>, όλες κατέρχονται με τη προσθήκη του νικελίου.

Η σπουδαιότερη ιδιότητα του είναι ότι αυξάνει τη δυσθραυστότητα και τη διατηρεί υψηλή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται για την αύξηση της δυσθραυστότητας στους χάλυβες επιβελτίωσης.

Δεν αυξάνει σημαντικά την εμβαπτότητα γι' αυτό στους χαμηλά κραματωμένους χάλυβες προστίθεται πάντα σε συνδυασμό με άλλα κραματικά στοιχεία (Cr, Mo ...), όπως και το νικέλιο.

### **Χαλκός**

Ο χαλκός αυξάνει το όριο ελαστικότητας και την εμβαπτότητα. Επειδή δεν διαλύεται ικανοποιητικά στα κράμματα σιδήρου σχετίζεται με προβλήματα κατά την έλαση και τις συγκολλήσεις.

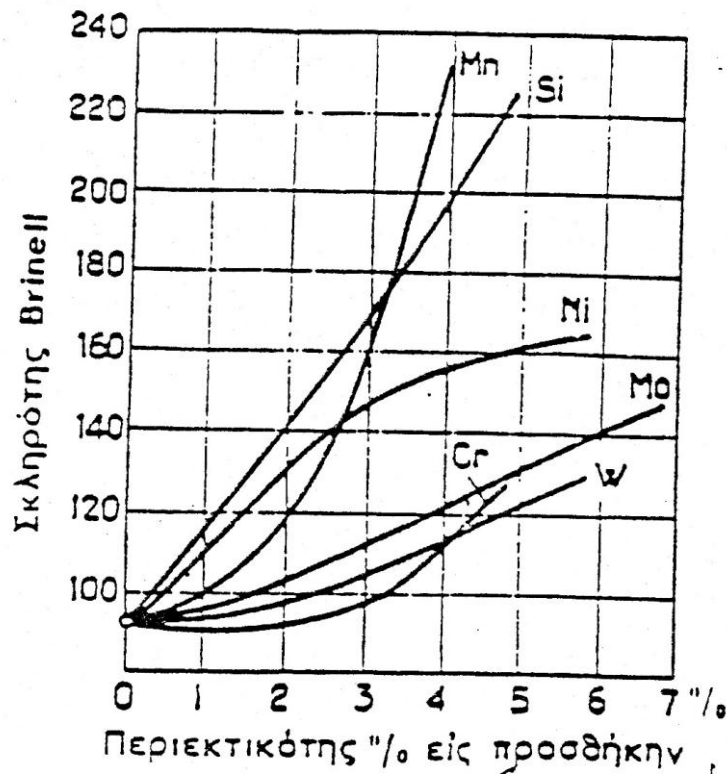
### **Μολυβδαίνιο**

Το μολυβδαίνιο συνήθως χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα κραματικά στοιχεία κυρίως με νικέλιο και χρώμιο διότι σχηματίζει πολύ εύκολα καρβίδια και παράλληλα μπορεί να σχηματίσει διάλυμα με το φερρίτη. Τα καρβίδια του, που κατακρημνίζονται κυρίως στα όρια των κόκκων, δρουν ως παρεμποδιστές αύξησης του κοκκομετρικού μεγέθους των χαλύβων. Το μολυβδαίνιο βελτιώνει τη δυνατότητα σκλήρυνσης με θερμική κατεργασία και την αντοχή σε ερπυσμό. Η παρουσία του σε διάλυση στους χάλυβες βελτιώνει την αντίσταση σε τοπική διάβρωση, σε βεζονισμό και γι' αυτό προστίθεται συχνά σε χρωμιούχους χάλυβες και ωστενιτικούς ανοξείδωτους χάλυβες.

Το μολυβδαίνιο μειώνει την επιδεκτικότητα των χαλύβων υψηλής κραμάτωσης στην ψαθυροποίηση λόγω επαναφοράς ( ευθραστοποίηση στους 400 - 500 C). Τέλος σε συνδυασμό με το χρώμιο παίζει σημαντικό ρόλο στη δευτερογενή σκλήρωση.

Αυξάνει την εμβαπτότητα, μειώνει την ευθραυστότητα κατά την επαναφορά, συντελεί στην εκλέπτυνση του κόκκου και βελτιώνει την συγκολλησιμότητα. Αυξάνει

το όριο ελαστικότητας και την αντοχή σε εφελκυσμό. Αυξάνει την αντοχή στην τριβή και στον ερπυσμό.



Γράφημα 2.2 Επίδραση του ισοδύναμου του άνθρακα  $C_{eq}$

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 περιεκτικότητα 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 ανοξειδωτών χαλύβων (Shaeffler-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.

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 ( $^{\circ}C/sec$ ) 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**.

**Η εμβαπτότητα των χαλύβων είναι κρίσιμη ιδιότητα διότι κατά την διάρκεια των συγκολλήσεων παρατηρούνται ταχύτατοι ρυθμοί θέρμανσης και ψύξης.** Κάθε περιοχή μιας συγκόλλησης υπόκειται σε έναν κύκλο θέρμανσης και στην συνέχεια ψύξης. Ψύξη από τους  $800^{\circ}C$  στους  $100^{\circ}C$  σε περίπου 8 sec. Για αυτούς τους ρυθμούς απόψυξης, ένας χάλυβας με υψηλή εμβαπτότητα θα σκληρύνει σε μεγαλύτερο βαθμό σε σχέση με έναν χάλυβα χαμηλής εμβαπτότητας, γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη διαφορετικών μικρογραφικών συστατικών.

## **2.6 Μέθοδος Θερμής Έλασης και Θερμικής Κατεργασίας, ΘΕ-ΘΚ (Tempcore)**

Αρχή Λειτουργίας: Η διαδικασία αυτή έχει ως αρχή την άμεση θερμική κατεργασία της ράβδου καθώς αυτή εξέρχεται από το τελευταίο έλαστρο. Το όνομα των χαλύβων αυτών, Tempcore, αντικατοπτρίζει την αρχή της διαδικασίας με την οποία παράγονται : επαναφορά (TEMPering = επαναφορά) της ήδη βαμμένης μαρτενσιτικά εξωτερικής στοιβάδας από θερμότητα που παρέχεται από το θερμό εσωτερικό (core = καρδιά) της ράβδου. Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια οικονομική λύση για την παραγωγή συγκολλησίμων χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος υψηλής αντοχής. Η μέθοδος αποτελείται από τρία στάδια.

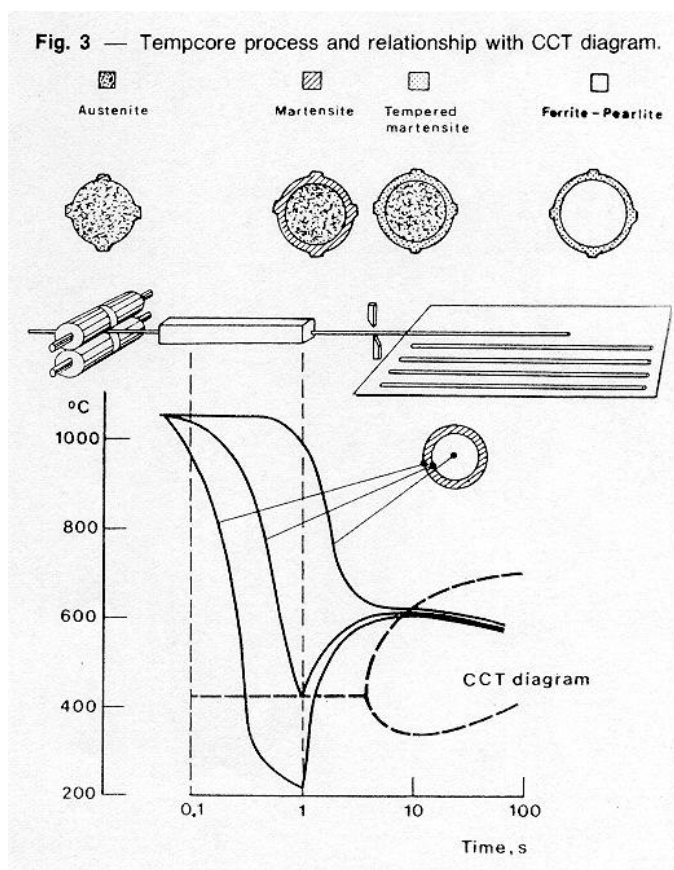
### **1<sup>ο</sup> Στάδιο:**

Όταν η χαλύβδινη ράβδος εγκαταλείπει το τελευταίο ράουλο διαμόρφωσης της τελικής μορφής και διάστασης υφίστανται μια απότομη και δραστική ψύξη με νερό υπό πίεση (ο ρυθμός πτώσης της θερμοκρασίας στην επιφάνεια του χάλυβα είναι περίπου 5000° C/s) με αποτέλεσμα ο ρυθμός ψύξης σε ορισμένο βάθος από την επιφάνεια της ράβδου, να ξεπερνάει την κρίσιμη ταχύτητα μαρτενσιτικού μετασχηματισμού. Ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι βρασμός σε ένα πολύ λεπτό οριακό στρώμα κοντά στην διεπιφάνεια υγρού – στερεού (film boiling). Αύξηση της πίεσης σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές αυξάνει την τιμή της θερμικής διαχυσιμότητας που κυμαίνεται μεταξύ 38-40 KW\*K/m<sup>2</sup>. Η ταχύτητα προώθησης των ράβδων στο θάλαμο ψύξης κυμαίνεται μεταξύ 10-20 m/s. Στο τέλος του πρώτου αυτού σταδίου, το εσωτερικό της ράβδου είναι ωστενιτικό και περιβάλλεται από ζώνη αποτελούμενη από ωστενίτη και μαρτενσίτη. Το ποσοστό του μαρτενσίτη αυξάνεται καθώς πλησιάζουμε την εξωτερική επιφάνεια. Η διάρκεια του πρώτου σταδίου εξαρτάται από το βάθος της μαρτενσιτικής ζώνης που επιθυμούμε να έχουμε.

### **2<sup>ο</sup> Στάδιο:**

Μετά το στάδιο της επιφανειακής απότομης ψύξης της ράβδου, η ράβδος εκτίθεται στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η θερμοκρασιακή διαβάθμιση στο εσωτερικό της ράβδου είναι σημαντική και λόγω της υψηλότερης θερμοκρασίας στο εσωτερικό,

θερμότητα διαχέεται από το εσωτερικό της ράβδου προς την επιφάνεια η οποία και θερμαίνεται. Σαν αποτέλεσμα, ο σχηματισμένος μαρτενσίτης υποβάλλεται σε θερμική κατεργασία επαναφοράς από τον εσωτερικό θερμό πυρήνα της ράβδου. Το δεύτερο στάδιο θεωρείται λήξαν εφόσον η θερμοκρασία λάβει μια μέγιστη τιμή, καλούμενη και θερμοκρασία επαναφοράς. Ένα τυπικό διάγραμμα απεικονίζεται στο γράφημα 2.3 Η διάρκεια του δεύτερου σταδίου εξαρτάται από τη διάμετρο της ράβδου και από τις συνθήκες ψύξης του πρώτου σταδίου. Παράλληλα με την επαναφορά του μαρτενσίτη, λόγω της αναθέρμανσης, ο υπολειπόμενος ωστενίτης στην επιφάνεια μετατρέπεται σε μπαινίτη ή φερρίτη και περλίτη (στην πραγματικότητα τροοσίτη λόγω της ταχείας ψύξης) ανάλογα με την χημική του σύσταση και τις συνθήκες ψύξης.

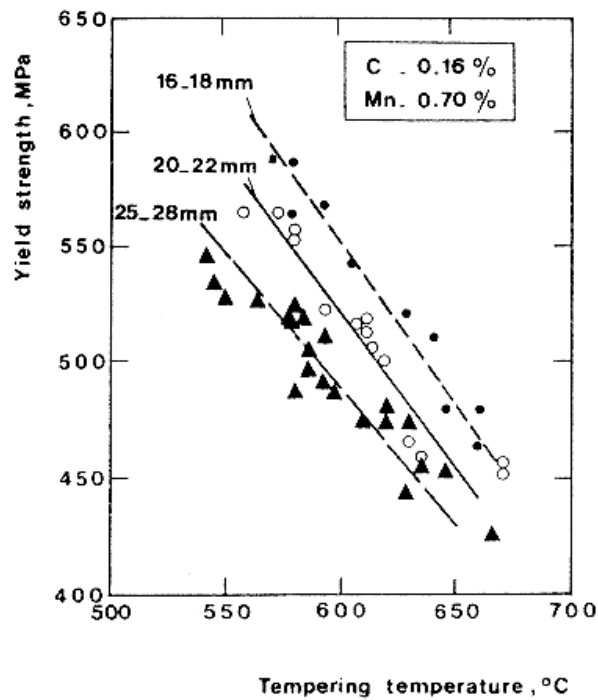


Γράφημα 2.3 Μακροσκοπική παρατήρηση της θερμικής κατεργασίας των χαλύβων, και σύνδεσή της σε διάγραμμα CCT

### 3<sup>ο</sup> Στάδιο:

Το τρίτο στάδιο, πραγματοποιείται κατά την παραμονή της ράβδου στη τράπεζα ψύξης όπου και ο ωστενίτης στον πυρήνα της ράβδου διασπάται πλέον περίπου

ισοθερμοκρασιακά σε φερρίτη και περλίτη ή και μπαινίτη. Σημειώνεται ότι η θερμοκρασία στο εσωτερικό της ράβδου παραμένει πρακτικά αμετάβλητη από το πρώτο στάδιο. Στο γράφημα 2.4 παρουσιάζεται η σχέση του ορίου διαρροής σε συνάρτηση με την θερμοκρασία επαναφοράς (self-tempering).



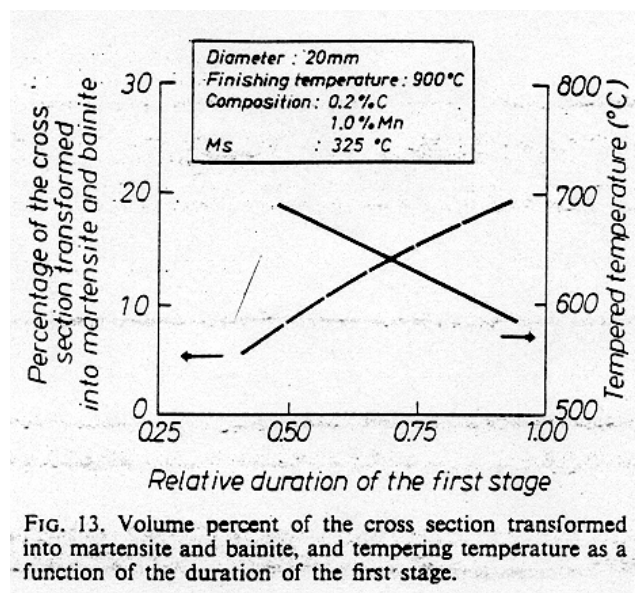
Γράφημα 2.4 Όριο Διαρροής ΧΟΣ συναρτήσει της θερμοκρασίας επαναφοράς

Ως αποτέλεσμα της παραγωγικής διαδικασίας των χαλύβων Tempcore, η μικρογραφική δομή τους αποτελείται από τρεις κύριες ζώνες: α) επαναφερμένη μαρτενσιτική, β) ενδιάμεση μεταβαλλόμενης δομής μπαινιτικής και γ) φερριτοπερλιτική στο κέντρο της ράβδου.

## 2.6.1 Παράμετροι λειτουργίας

Αύξηση της διάρκειας του πρώτου σταδίου επιφέρει αύξηση του ορίου διαρροής της ράβδου ως αποτέλεσμα της αύξησης του βάθους του μαρτενσιτικού στρώματος. Η αύξηση της παροχής ψυκτικού μέσου κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου οδηγεί σε αύξηση του ορίου διαρροής. Η αύξηση του ορίου διαρροής συνδέεται με παράλληλη πτώση της ολκιμότητας. Παρ' όλ' αυτά η αύξηση του ορίου διαρροής είναι κατά πολύ εντονότερη από την πτώση της ολκιμότητας. Η επαναφερμένη μαρτενσιτική στοιβάδα παρουσιάζει ικανοποιητική ολκιμότητα, η οποία και εξαρτάται για δεδομένη χημική σύσταση από την θερμοκρασία επαναφοράς της.

Η διάρκεια του πρώτου σταδίου επιδρά στο όριο διαρροής με τους εξής μηχανισμούς: Το ποσοστό του όγκου της μαρτενσιτικής εξωτερικής στοιβάδας αυξάνει με την αύξηση της διάρκειας του πρώτου σταδίου.



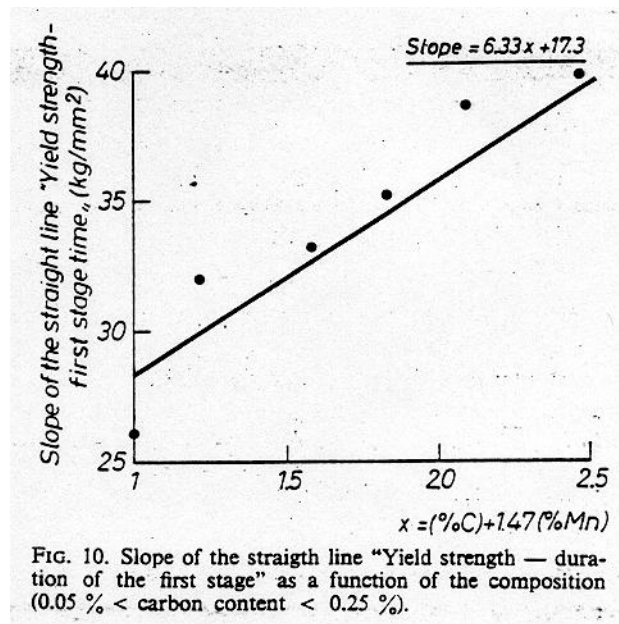
Γράφημα 2.3 Το ποσοστό των μετασηματισμένων φάσεων του μαρτενσίτη και του μπαϊνίτη, και η θερμοκρασία επαναφοράς

Η θερμοκρασία επαναφοράς της μαρτενσιτικής στοιβάδας μειώνεται με αύξηση της διάρκειας του πρώτου σταδίου όπως φαίνεται στο γράφημα 2.3

Η θερμοκρασία μετασχηματισμού του πυρήνα της ράβδου κατά την έναρξη του τρίτου σταδίου μειώνεται με αύξηση της διάρκειας του πρώτου σταδίου. Η θερμοκρασία αυτή επηρεάζει την μικρογραφική δομή στο πυρήνα της ράβδου και συγγεκριμμένα καθώς η θερμοκρασία ατή μειώνεται, η δομή από φερριτοπερλιτική μεταβάλλεται σε φερριτοπερλιτική και μπαινιτική. Δηλαδή είναι δυνατών να λάβουμε μπαινιτικές δομές ακόμα και στο κέντρο της ράβδου, εφόσον η διάρκεια του πρώτου σταδίου είναι αρκετά μεγάλη και η χημική σύσταση του χάλυβα το επιτρέπει. Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές μελέτες που έχουν σα στόχο την ποσοτική προσομοίωση της κατάστασης ψύξης σε διάφορα σημεία της ράβδου κατά τη διάρκεια της μεθόδου Tempcore και που βασίζονται σε αναλυτικές λύσεις, σε πεπερασμένα στοιχεία και σε ημιεμπειρικές σχέσεις (νευρωνικά δίκτυα).

Όσον αφορά τη χημική σύσταση των χαλύβων, αυτή επηρεάζει όχι μόνο τις απόλυτες τιμές του ορίου διαρροής μετά το πρώτο στάδιο, αλλά και τον ρυθμό αύξησης. Στο γράφημα του σχήματος 2.5 παρουσιάζεται η σχέση του ορίου διαρροής μετά το πρώτο στάδιο της μεθόδου, για διαφορετικής χημικής σύστασης χάλυβες.

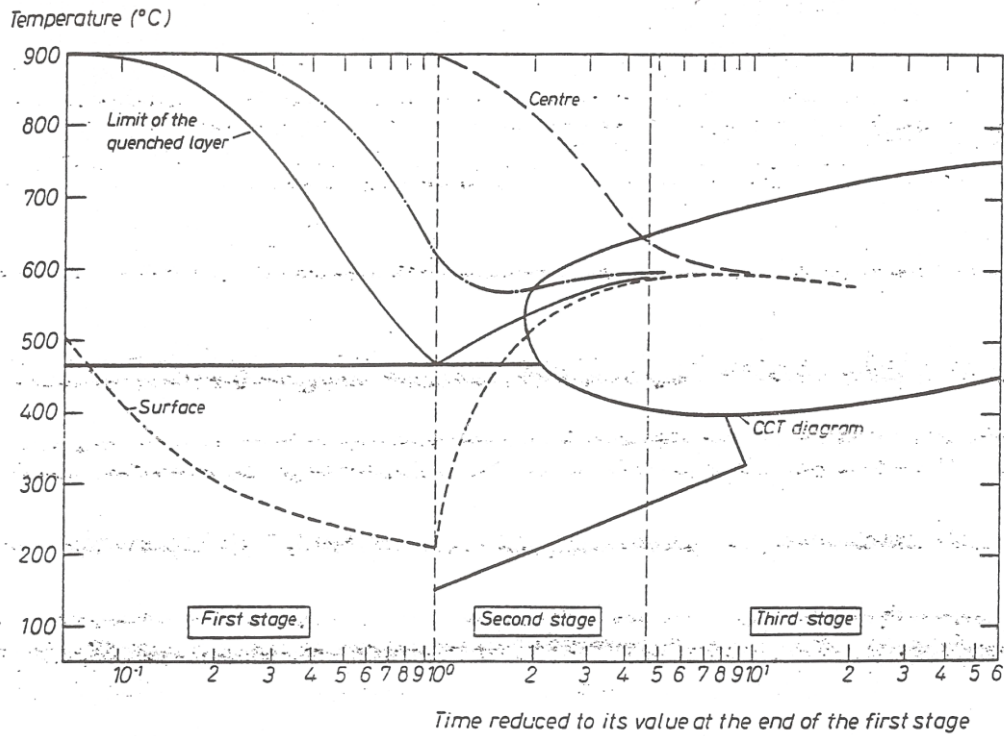
Στην ίδια μελέτη δείχθηκε ότι ο ρυθμός αύξησης του ορίου διαρροής εξαρτάται κυρίως από το ποσοστό το άνθρακα. Αύξηση του ποσοστού του άνθρακα, αυξάνει και την κλίση της ευθείας του ορίου διαρροής- διάρκειας του πρώτου σταδίου.



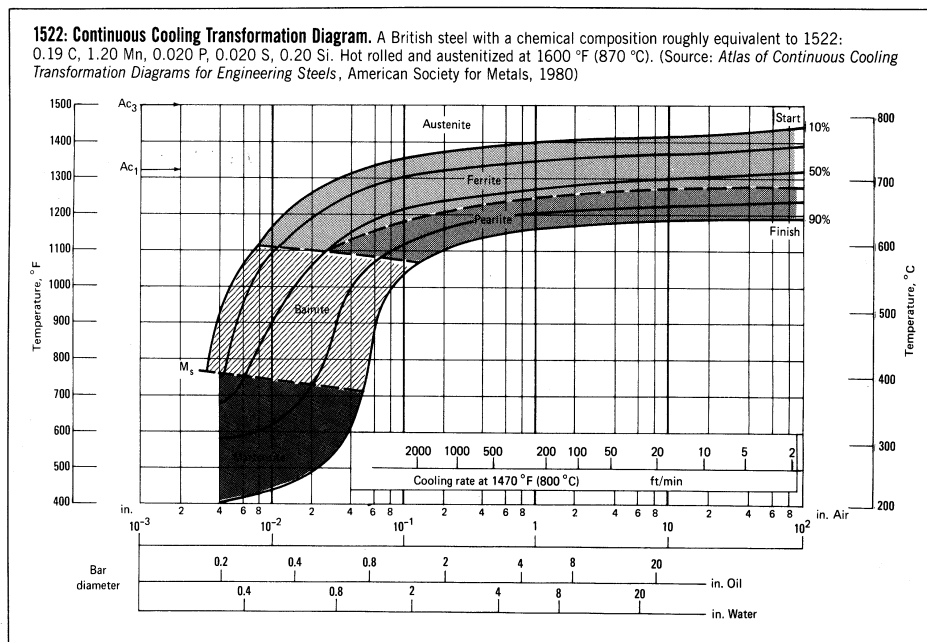
Γράφημα 2.5 Η σχέση του ορίου διαρροής μετά το πρώτο στάδιο της μεθόδου, για διαφορετικής χημικής σύστασης χάλυβες

Η σύνθετη επίδραση του ποσοστού του άνθρακα στο όριο διαρροής μπορεί να αποδοθεί ποιοτικά με τους εξής μηχανισμούς:

Καθώς το ποσοστό του άνθρακα αυξάνεται, η θερμοκρασία έναρξης μαρτενσιτικού μετασχηματισμού (Ms) μειώνεται, με αποτέλεσμα το ποσοστό του όγκου της μαρτενσιτικής στοιβάδας να μειωθεί αντίστοιχα. Η περιεκτικότητα σε μαγγάνιο (Mn), δεν έχει σημαντική επίδραση στην Ms και τη σκληρότητα του μαρτενσίτη. Παρόλα αυτά επιδρά σημαντική στη σχετική θέση των καμπυλών CCT, της σκλήρωσης του φερρίτη και της εκλέπτυνσης του περλίτη (βλ. γράφημα 2.6, 2.7)



Γράφημα 2.6 Τα στάδια θερμικής κατεργασίας σε διάγραμμα CCT



Γράφημα 2.7 Τυπικό διάγραμμα CCT χάλυβα AISI 1522



## Κεφάλαιο 3.0 Μεταβατική αγωγή θερμότητας

Η θερμοκρασία ενός σώματος, γενικά, μεταβάλλεται με το χρόνο καθώς και με τη θέση. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο καθώς και με τη θέση σε μονοδιάστατα και πολυδιάστατα συστήματα.

Στην ανάλυση των συστημάτων εντοπισμένης χωρητικότητας η θερμοκρασία ενός στερεού μεταβάλλεται με το χρόνο αλλά παραμένει ομοιόμορφη σε ολόκληρο το στερεό ανά πάσα στιγμή. Στη συνέχεια θεωρείται η μεταβολή της θερμοκρασίας με το χρόνο καθώς και με τη θέση στα προβλήματα μονοδιάστατης μεταφοράς θερμότητας όπως σε έναν κύλινδρο μεγάλου μήκους όπως είναι και στην προκειμένη περίπτωση οι χαλύβδινες ράβδοι, χρησιμοποιώντας πίνακες μεταβατικής θερμοκρασίας και αναλυτικές λύσεις.

### 3.1 Κριτήρια για την ανάλυση ενός ολοκληρωτικού συστήματος.

Η ανάλυση ενός ολοκληρωτικού συστήματος αναμφισβήτητα διευκολύνει την ανάλυση μεταφοράς θερμότητας.

Το πρώτο στάδιο για την καθιέρωση ενός κριτηρίου για την ισχύ της ανάλυσης ενός ολοκληρωτικού συστήματος είναι ο καθορισμός του χαρακτηριστικού μήκους ως εξής :

$$L_c = \frac{V}{A} \quad (4)$$

και του αριθμού Biot ως εξής:

$$Bi = \frac{h}{k/L_c} \frac{\Delta T}{\Delta T} \quad (5)$$

Ή

$$Bi = \frac{L_c/k}{1/h} \quad (6)$$

Όπου ο πρώτος τύπος δείχνει τη συναγωγή από το περιβάλλον στην επιφάνεια του σώματος προς την αγωγή στο εσωτερικό του σώματος, ή διαφορετικά την αντίσταση αγωγής στο εσωτερικό του σώματος προς την αντίσταση συναγωγής στην επιφάνεια του σώματος ( δεύτερος τύπος). Δηλαδή ο αριθμός Biot δείχνει το λόγο της εσωτερικής αντίστασης του σώματος στην αγωγή θερμότητας προς την εξωτερική αντίσταση του στη συναγωγή θερμότητας. Άρα, ένας μικρός αριθμός Biot παριστάνει μικρή αντίσταση στην αγωγή της θερμότητας. Η ανάλυση ενός ολοκληρωτικού

συστήματος είναι μικρή όταν ο αριθμός Biot είναι μηδέν και προσεγγιστική όταν ο αριθμός Biot είναι μεγαλύτερος του μηδενός. Γενικά είναι αποδεκτό ότι η ανάλυση ολοκληρωτικού συστήματος είναι μικρότερος ή ίσος του 0,1.

Για να κατανοηθεί ο μηχανισμός της μεταφοράς θερμότητας κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ή της ψύξης ενός στερεού, με τη βοήθεια ενός ρευστού που το περιβάλλει, εξετάζεται η αναλογία της συναγωγής, προς την αγωγή. Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η ψύξη σε νερό της χαλύβδινης ράβδου, μέσα στο υδροδοχείο βαφής (QTB, Quenched and Tempered Bars) .

Η θερμότητα μεταφέρεται από το σώμα προς το ρευστό λόγω της διαφοράς θερμοκρασίας (διάπυρη ράβδος, νερό σε θερμοκρασία περιβάλλοντος). Η ενέργεια προέρχεται από την περιοχή κοντά στην επιφάνεια, άρα η θερμοκρασία του σώματος κοντά στην επιφάνεια θα μειωθεί. Αυτό δημιουργεί θερμοκρασιακή βαθμίδα μεταξύ της εσωτερικής και της εξωτερικής περιοχής του σώματος και δηλώνει ροή θερμότητας με αγωγή από το εσωτερικό του σώματος προς την εξωτερική του επιφάνεια.

Όταν ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή  $h$  είναι μεγάλος, η θερμοκρασία του σώματος κοντά στην επιφάνεια θα πέσει γρήγορα. Αυτό θα δημιουργήσει μεγαλύτερη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εσωτερικής και εξωτερικής περιοχής, εκτός αν το σώμα μπορεί να μεταφέρει θερμότητα από την εσωτερική προς την εξωτερική επιφάνεια με την ίδια ταχύτητα. Επομένως, το μέγεθος της μέσης διαφοράς θερμοκρασίας μέσα στο σώμα εξαρτάται έντονα από την ικανότητα ενός σώματος να άγει θερμότητα προς την επιφάνεια του σε σχέση με την ικανότητα του ρευστού να συνάγει αυτή τη θερμότητα μακριά από την επιφάνεια του σώματος. Ο αριθμός Biot αποτελεί μέτρο των σχετικών μεγεθών των δύο αυτών ανταγωνιστικών φαινομένων.

Η θερμοκρασία στην επιφάνεια της ράβδου και κοντά σε αυτή αρχίζει να πέφτει λόγω της μεταφοράς θερμότητας προς το ρευστό. Αυτό δημιουργεί θερμοκρασιακή βαθμίδα, δηλαδή αγωγή θερμότητας από τα εσωτερικά μέρη του υλικού προς τις εξωτερικές επιφάνειες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η θερμοκρασία στο κέντρο του

υλικού παραμένει ίδια. Με την πάροδο του χρόνου η κατανομή της θερμοκρασίας γίνεται όλο και πιο επίπεδη, λόγω της μεταφοράς θερμότητας.

Η τυποποίηση των προβλημάτων για τον προσδιορισμό της μονοδιάστατης, μεταβατικής κατανομής θερμοκρασίας παρέχει μια μερική διαφορική εξίσωση, η οποία μπορεί να επιλυθεί χρησιμοποιώντας προηγμένες μαθηματικές τεχνικές. Γίνεται χρήση των παρακάτω αδιάστατων ποσοτήτων:

$$\text{Αδιάστατη θερμοκρασία: } \theta(x,t) = \frac{T(x,t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}}, \quad \text{για κύλινδρο } \frac{T - T_f}{T_i - T_f} \quad (7)$$

$$\text{Αδιάστατη θέση: } X = \frac{x}{L}, \quad \text{για κύλινδρο } \frac{r}{R} \quad (8)$$

$$\text{Αδιάστατος συντελεστής μεταφοράς θερμότητας: } Bi = \frac{hL}{k}, \quad \text{για κύλινδρο } \frac{hR}{k} \quad (9)$$

$$\text{Αδιάστατος χρόνος (Αριθμός Fourier): } \tau = \frac{at^2}{L^2}, \quad \text{για κύλινδρο } \frac{at}{R^2} = \frac{kt}{\rho c_p R^2} \quad (10)$$

Η φυσική σημασία του αριθμού Fourier  $\tau$ , εκφράζεται ως εξής:

$$\tau = \frac{at^2}{L^2} = \frac{kL^2 \left( \frac{1}{L} \right) \Delta T}{\rho C_p \frac{L^3}{t} \Delta T} \quad (11)$$

Ο τύπος δείχνει το ρυθμό με τον οποίο άγεται η θερμότητα δια μέσου ενός σώματος όγκου  $L^3$  προς το ρυθμό με τον οποίο αποθηκεύεται η θερμότητα σ' ένα σώμα όγκου  $L^3$ . Ο Fourier άρχισε την συγγραφή της αναλυτικής θεωρίας της θερμότητας το 1807 στην Γκενόμπλ και την τελείωσε το 1822 στο Παρίσι. Εκφράζει την Θερμική αγωγιμότητα σε δισδιάστατα αντικείμενα με την διαφορική εξίσωση:

$$\partial u / \partial t = k \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (12)$$

Όπου  $u$  η θερμοκρασία σε κάθε χρονική στιγμή  $t$ , στο σημείο  $(x,y)$  του επιπέδου και  $k$  ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού. Για τη λύση παρόμοιων προβλημάτων στον μονοδιάστατο χώρο, ο Fourier εισήγαγε σειρές με όρους ημίτονα και συνημίτονα της μορφής:

$$y = \frac{1}{2} \alpha_0 + (\alpha_1 \cos x + b_1 \sin x) + (\alpha_2 \cos 2x + b_2 \sin 2x) + \dots \quad (13)$$

Παρόμοιες σειρές Fourier είχαν ήδη περιστασιακά χρησιμοποιηθεί από τον Euler και άλλους μαθηματικούς του 18<sup>ου</sup> αιώνα, αλλά μέχρι την εποχή του Fourier οι μαθηματικοί κατά κανόνα τις απέφευγαν. Με το έργο του Fourier οι σειρές αυτές κατέλαβαν τη σημαντική θέση που κατέχουν μέχρι σήμερα στα νεώτερα μαθηματικά. Ο Fourier επεξέτεινε επίσης την έννοια αυτή στο ονομαζόμενο ολοκλήρωμα Fourier. Ορισμένες αμφιβολίες σχετικά με την αξία των σειρών Fourier, οι οποίες μάλιστα οδήγησαν μεταγενέστερους μαθηματικούς σε μια βασική ανανέωση της έννοιας της πραγματικής συνάρτησης, λύθηκαν από τους Dirikle, Reeman, Lebek και άλλους.

## Κεφάλαιο 4.0 Μοντέλα πρόβλεψης χαρακτηριστικών – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Έχει αναπτυχθεί πλήθος μοντέλων για βιομηχανική εφαρμογή που βασίζονται στην χρήση στατιστικής ανάλυσης και συσχέτισης (γραμμικής και μη), πεπερασμένων στοιχείων, νευρωνικών δικτύων και μαθηματικών μοντέλων.

Η ποιοτική και ποσοτική συσχέτιση των παραμέτρων παραγωγής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη μιας και μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των προϊόντων σε όλη τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας και όχι μόνο δειγματοληπτικά στα τελικά προϊόντα κατά τον έλεγχο ποιότητας. Η συνεχής και στενής παρακολούθηση βασικών και κρίσιμων παραγωγικών παραμέτρων οδηγεί σε μείωση της διασποράς των χαρακτηριστικών, αυξάνοντας έτσι το επίπεδο ποιότητας και την αξιοπιστία των τελικών προϊόντων.

### 4.1 Εισαγωγή

Νέα μοντέλα για την πρόβλεψη του ορίου θραύσης και του ορίου διαρροής του χάλυβα αναπτύχθηκαν στο εργοστάσιο του Rautaruukki Steel Plate Mill. Ένα μοντέλο πρόβλεψης της αντοχής είναι ένα σημαντικό εργαλείο σε εγκαταστάσεις χάλυβα. Χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό της κραμμάτωσης και τη διεργασία της έλασης με σκοπό την εκτίμηση των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων. Ένα μοντέλο κρίνεται ικανοποιητικό όταν μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά οφέλη. Στην συγκεκριμένη εργασία η ανάπτυξη του μαθηματικού μοντέλου βασίζεται στην ανάλυση με χρήση νευρωνικών δικτύων και τη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων (γραμμική συσχέτιση).

Οι μηχανισμοί αυτοί ελέγχονται με τη σύσταση, την θερμική κατεργασία, και τη διαδικασία ψύξης (θερμομηχανικές κατεργασίες). Η μοντελοποίηση των ιδιοτήτων χάλυβα είναι απαιτητική επειδή πολλές από τις ιδιότητες επιτυγχάνονται μόνο εάν προβλεφθούν και ελεγχθούν οι αλληλεπιδράσεις της σύστασης και των θερμομηχανικών διεργασιών. Τα **πλεονεκτήματα** της στατιστικής ανάλυσης και της

ανάλυσης ευαισθησίας είναι ότι είναι απλά στην ερμηνεία, στον υπολογισμό και στην εφαρμογή. Το **μειονέκτημά** τους είναι ότι η μορφή σχέσης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και των μεταβλητών εξόδου πρέπει να επιλεγτούν πριν από την ανάλυση.

Η μελέτη του τύπου της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών απαιτεί αρκετή εργασία για την ανάπτυξη του. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ένα πιο εύκαμπτο εργαλείο για την μοντελοποίηση. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διαφορετικούς σκοπούς, αλλά το νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται ευρύτατα για να προβλέψει τα προβλήματα, είναι το δίκτυο πολλαπλών επιπέδων κατανόησης, multi-layer perceptron (MLP). Το πρόβλημα με τα MLPs είναι ότι είναι δύσκολα στον υπολογισμό αλλά αυτό το πρόβλημα έχει επαλειφθεί δεδομένου ότι η τεχνολογία των υπολογιστών έχει εξελιχτεί. Μια χαρακτηριστική πρόβλεψη στην βιομηχανία περιλαμβάνει τις πιθανές μεταβλητές εξόδου, ο αντίκτυπός τους στην επίλυση είναι μη γραμμικός και υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μεταβλητών.

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν γίνει δημοφιλή τόσο στη μέθοδο διαμόρφωσης στις απαιτήσεις της υλικής βιομηχανίας, και υπάρχουν διάφορα νέα μοντέλα για τη χρησιμοποίηση των νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη του ορίου διαρροής του χάλυβα.

## 4.2 Περιγραφή στοιχείων

### 4.2.1 Μέθοδοι

Η μέθοδος των ελάχιστων τετραγώνων είναι η πιο κοινή στατιστική τεχνική, και είναι κατάλληλη για την πλειοψηφία των προβλημάτων πρόβλεψης. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί στην επιστήμη της μηχανικής, αλλά σε γενικές γραμμές είναι μια μορφή της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων.

Η μέθοδος των πολλαπλών επιπέδων κατανόησης θεωρείται κατάλληλη για να δώσει λύσεις για τα σύνθετα προβλήματα διαμόρφωσης του μοντέλου που θα εκτελέσει το πρόγραμμα μέσω του υπολογιστή. Συχνά μπορεί να βρεθεί μια πιο ακριβής πρόβλεψη με τη χρησιμοποίηση απλούστερων πρότυπων ανάλυσης.

Η σύγκριση μεταξύ μιας καλά-διευκρινισμένης μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων και ενός προτύπου πολλαπλών επιπέδων κατανόησης MLP για την ακριβέστερη πρόβλεψη είναι ένα ενδιαφέρον θέμα. Οι Dumortier & Leheret έχουν κάνει ήδη μερικές συγκρίσεις μεταξύ των νευρωνικών δικτύων και της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων, αλλά στην έρευνά τους το πρότυπο των ελάχιστων τετραγώνων ήταν πολύ απλό. Στην έρευνα του Carpenter & Barthelemy, τα πολυώνυμα των μεθόδων ελάχιστων τετραγώνων και τα πρότυπα πολλαπλών επιπέδων κατανόησης MLP προσαρμόστηκαν εξίσου καλά στις επιφάνειες απόκρισης όταν ο αριθμός των παραμέτρων των προτύπων ήταν ίσος και αρκετά μικρός. Η απλούστερη και πιο κοινή μορφή ανάλυσης της μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων είναι γραμμική.

$$Y_i = X_i\beta + \varepsilon_i, \varepsilon_i \square NID(0, \sigma^2) \quad (14)$$

Όπου, το  $NID(0, \sigma^2)$  σημαίνει ότι τα υπόλοιπα  $\varepsilon_i$  είναι διανεμημένα κατά όμοιο τρόπο με μια μεταβλητή (expectation value) και μια απόκλιση  $\sigma^2$ , η οποία είναι η



βασική υπόθεση του προτύπου. Μια άλλη σημαντική θεώρηση είναι ότι η μεταβλητή  $Y$  συνεπάγεται της μεταβλητής  $X$ , έτσι η  $Y$  δεν έχει επιπτώσεις στην  $X$ .

Με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων **μετασχηματισμένων μεταβλητών εισόδου και εξόδου**, αυτό η γραμμική σχέση είναι συχνά ικανοποιητική. Ένας πιθανός τρόπος να συνδεθεί το πρότυπο γραμμικής μεθόδου ελάχιστων τετραγώνων σε μια πιο σύνθετη επιφάνεια αντίδρασης λέγεται ανάλυση επιφάνειας αναφοράς, όπου μια μη γραμμική επιφάνεια αντίδρασης (response surface) αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας το χιαστή γινόμενο και την πολυωνυμική εξίσωση τετάρτου βαθμού των μεταβλητών επιπρόσθετα των γραμμικών όρων.

Η μεταβλητή αντίδρασης μπορεί επίσης να μετασχηματιστεί. Αυτό προκαλεί αλλαγές στην υποτιθέμενη κατανομή του συντελεστή σφάλματος (error term). Εάν η απόκλιση αυξάνει καθώς η αντίδραση αυξάνεται, ή η επίδραση των μεταβλητών επεξήγησης φαίνεται να είναι πολλαπλασιαστικές αντί για αθροιστικές, προτείνεται για τη χρήση λογαριθμικός μετασχηματισμός. Τα λογαριθμικά-γραμμικά πρότυπα είναι της μορφής:

$$\ln Y_i = X_i\beta + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2) \quad (15)$$

Αυτό το πλαίσιο μπορεί να αντιμετωπιστεί ως γραμμική ανάλυση, αλλά η πρόβλεψη στην αρχική κλίμακα της αντίδρασης λαμβάνεται από τον τύπο:

$$Y = \exp(X_i\beta) \exp(\sigma^2 / 2) \quad (16)$$

Η μη γραμμική ανάλυση σημαίνει ένα πλαίσιο:

$$Y_i = g(X_i\beta) + \varepsilon_i, \varepsilon_i \sim NID(0, \sigma^2) \quad (17)$$

Η λειτουργία  $g$  είναι μια λειτουργία των παραμέτρων και των μεταβλητών επεξήγησης. Σε αυτό το πλαίσιο δεν υπάρχει γενικά καμία αναλυτική λύση για τις εκτιμήσεις παραμέτρου, και οι παράμετροι υπολογίζονται αριθμητικά με την ελαχιστοποίηση του ποσού των τετραγώνων των λαθών με έναν επαναληπτικό αλγόριθμο. Με τη μη γραμμική ανάλυση είναι δυνατό να διαμορφωθούν οι μη γραμμικές σχέσεις πιο ελαστικά. Μια ειδική περίπτωση μη γραμμικού προτύπου

ανάλυσης θεωρείται επίσης ένα MLP με μία μεταβλητή εξόδου. Το πολλαπλό επίπεδο κατανόησης είναι ένα είδος νευρωνικού δικτύου, το οποίο μπορεί να διαιρεθεί σε στρώματα έτσι ώστε κάθε νευρώνας χρησιμοποιεί μόνο τις μεταβλητές εξόδου από τα προηγούμενα στρώματα. Κάθε νευρώνας υπολογίζει την μεταβλητή εξόδου του  $Y$  ως λειτουργία του αθροίσματος των υπολογισμένων μεταβλητών εισόδου  $k, x$  χρησιμοποιώντας τη λειτουργία ενεργοποίησης.

$$Y = f(\sum w_k x_k) \quad (18)$$

Το πολλαπλό επίπεδο κατανόησης έχει χαρακτηριστικά ένα έως τρία κρυμμένα στρώματα με διάφορη ποσότητα νευρώνων. Το πρώτο κρυμμένο στρώμα χρησιμοποιεί τις μεταβλητές επεξεργασίας ως μεταβλητές εισόδου και το επόμενο κρυμμένο στρώμα χρησιμοποιεί τις μεταβλητές εξόδου του προηγούμενου κρυμμένου στρώματος και ούτω καθεξής. Το στρώμα εξόδου χρησιμοποιεί τις μεταβλητές εξόδου του τελευταίου κρυμμένου στρώματος ως μεταβλητές εισόδου και υπολογίζει τις προβλέψεις των μεταβλητών επεξεργασίας. Τα βάρη των συνδέσμων  $k$  και  $w$  είναι οι κατ' εκτίμηση παράμετροι. Σε ένα MLP (πολυστρωματικό επίπεδο ανάλυσης) ο αριθμός των υπολογισμένων παραμέτρων είναι συνήθως μεγάλος και υπάρχει μια σχετικά μεγάλη περιοχή στο διάστημα παραμέτρου όπου οι προβλέψεις προσεγγίζουν τις καλύτερες δυνατές τιμές. Αυτό σημαίνει ότι η γραμμική προσαρμογή είναι δυνατή και εύκολη, και πρέπει να αποφευχθεί με ειδικές ενέργειες. Η επιλογή του αριθμού νευρώνων σε κάθε στρώμα και του αριθμού στρωμάτων δεν είναι μια απλή διαδικασία στην επιλογή. Με έναν ικανοποιητικό αριθμό νευρώνων είναι δυνατό να προσεγγιστεί οποιαδήποτε λειτουργία με την αυθαίρετη ακρίβεια ακόμη και με ένα κρυμμένο στρώμα. Ένα πάρα πολύ μεγάλο δίκτυο σημαίνει χάσιμο των παραμέτρων και ευκολία στην γραμμική προσαρμογή. Ένα πάρα πολύ μικρό δίκτυο δεν μπορεί να προσαρμοστεί στην επιφάνεια αντίδρασης. Το σωστό μέγεθος μπορεί να βρεθεί με τη δοκιμή διαφορετικών ειδών δικτύων ή με τη χρησιμοποίηση των αλγορίθμων που προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τη δομή του δικτύου. Παραδείγματος χάριν, οι αλγόριθμοι αρχίζουν από ένα μεγάλο δίκτυο και αφαιρούν τους περιττούς νευρώνες ενώ η περικοπή προχωρεί.

Η γραμμική προσαρμογή αποτελεί επίσης ένα πρόβλημα στη μέθοδο των ελάχιστων τετραγώνων, ειδικά όταν υπάρχει ένα απέραντο ποσό δεδομένων και μια σύνθετη επιφάνεια αντίδρασης. Αφότου επιτυγχάνεται η βέλτιστη πολυπλοκότητα, η προσθήκη των νέων όρων στο πρότυπο αυξάνει συχνά το λάθος πρόβλεψης σε ένα νέο σύνολο στοιχείων. Ένα πάρα πολύ σύνθετο πρότυπο μπορεί να εγκατασταθεί στο σύνολο στοιχείων εκτίμησης με μεγάλη ακρίβεια, αλλά το πρότυπο είναι μια φτωχή γενίκευση.

### **4.3 Εφαρμογή νευρωνικών δικτύων στους ΧΟΣ ΘΕ-ΘΚ**

Στη διαδικασία Tempcore, απαιτούνται ακριβώς και παρατεταμένα πειράματα για να καθορίσουν την ποιότητα των παραχθέντων υλικών ανάλογα με τις ποικίλες παραμέτρους όπως η διάρκεια έλασης και η διάμετρος της ράβδου. Εντούτοις, χρησιμοποιώντας τις μαθηματικές μεθόδους, όλες αυτές οι δυσκολίες μπορούν να υπερνικηθούν εύκολα. Παρουσιάστηκε από τον Cetinel et al ότι οι μικροδομές και οι θερμοκρασίες επαναφοράς ράβδων διαφορετικών διαμέτρων, διαφορετικής διάρκειας έλασης στη διαδικασία Tempcore θα μπορούσαν να καθοριστούν με την μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων γρηγορότερα απ' ό,τι από τις πειραματικές μελέτες. Το υπολογισμένο ποσό μαρτενσίτη, μπαινίτη, περλίτη που εκφράζεται ως ποσοστό όγκου, οι μηχανικές ιδιότητες και οι τιμές θερμοκρασίας επαναφοράς συγκρίνονται με τα πειραματικά αποτελέσματα. Κατά συνέπεια, είναι δυνατό να προβλεφθεί η απαιτούμενη διάρκεια έλασης για τις διαφορετικές διαμέτρους ράβδων και τις μηχανικές ιδιότητες χωρίς καμία αλλαγή στη γραμμή παραγωγής. Σαν αποτέλεσμα, οι μηχανικές ιδιότητες μπορούν να προβλεφθούν και να ελεγχθούν με τη βελτιστοποίηση της διάρκειας της έλασης, και η γραμμή παραγωγής μπορεί να σχεδιαστεί όπως απαιτείται.

### 4.3.1 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Σήμερα, οι μηχανικοί και οι επιστήμονες προσπαθούν να αναπτύξουν έξυπνες μηχανές. Τα τεχνητά νευρωνικά συστήματα είναι σημερινά παραδείγματα τέτοιων μηχανών και έχουν μεγάλη δυνατότητα περαιτέρω βελτίωσης της ποιότητας της ζωής. Είναι ευρέως γνωστό ότι οι άνθρωποι και τα ζώα είναι πολύ καλύτεροι και γρηγορότεροι στην αναγνώριση των εικόνων από τους περισσότερους προηγμένους υπολογιστές. Αν και οι υπολογιστές ξεπερνούν και τα βιολογικά και τα τεχνητά νευρωνικά συστήματα για στόχους βασισμένους στις ακριβείς και γρήγορες αριθμητικές διαδικασίες, τα τεχνητά νευρωνικά συστήματα αντιπροσωπεύουν την ελπιδοφόρο νέα γενιά των δικτύων επεξεργασίας πληροφοριών. Πρόοδος έχει γίνει στην εφαρμογή τέτοιων συστημάτων για δύσκολα προβλήματα που έχουν να κάνουν με τον παραδοσιακό υπολογισμό. Τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να συμπληρώσουν την τεράστια δύναμη επεξεργασίας των ψηφιακών υπολογιστών με τη δυνατότητα να ληφθούν λογικές αποφάσεις. Ο υπολογισμός δικτύων εκτελείται από ένα πυκνό πλέγμα υπολογισμένων κόμβων και συνδέσεων. Λειτουργούν συλλογικά και ταυτόχρονα στα περισσότερα ή σε όλα τα στοιχεία και τις εισαγωγές. Τα βασικά στοιχεία επεξεργασίας των νευρωνικών δικτύων καλούνται τεχνητοί νευρώνες, ή απλά νευρώνες. Συχνά καλούνται απλά κόμβοι. Οι νευρώνες συμπεριφέρονται ως αθροίσματα και μη γραμμικές συνδέσεις χαρτογράφησης. Σε μερικές περιπτώσεις, μπορούν να θεωρηθούν ως μονάδες κατώτατων ορίων που εκτινάσσονται όταν η συνολική εισαγωγή τους υπερβαίνει συγκεκριμένα προκατειλημμένα επίπεδα. Οι νευρώνες λειτουργούν συνήθως παράλληλα και διαμορφώνονται σε κανονικές αρχιτεκτονικές. Οργανώνονται συχνά σε στρώματα, και οι συνδέσεις ανατροφοδότησης επιτρέπονται και μέσα στο ίδιο το στρώμα και προς τα παρακείμενα στρώματα. Η δύναμη σύνδεσης εκφράζεται από μια αριθμητική αξία αποκαλούμενη βάρος, το οποίο μπορεί να είναι τροποποιημένο.

Μεταξύ των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, στοιχειώδη πολλαπλά επίπεδα κατανόησης (multi layer perceptrons (MLP) βλ. εικόνα 4.1) έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς για να λύσουν μερικά δύσκολα και διαφορετικά προβλήματα ως μη

γραμμικούς ταξινομητές λειτουργίας. Το δίκτυο μαθαίνει από τα δεδομένα εισόδου κάτω από την επίβλεψη των δεδομένων εξόδου που δημιουργούν τις ενιαίες γραμμικές διακεκριμένες λειτουργίες από κάθε κρυμμένη μονάδα και τα συνδυάζει. Κατά συνέπεια, αυτή η τμηματικά γραμμική λειτουργία λειτουργεί ως μη γραμμικός διευκρινιστής.

Η βασική ιδέα της τεχνικής είναι να υπολογιστούν αποτελεσματικά τα μερικά παράγωγα μιας προσεγγίζοντας συνάρτησης  $F(w, x)$  που πραγματοποιείται από το δίκτυο όσον αφορά όλα τα στοιχεία του προσαρμοσμένου διανυσματικού βάρους  $W$  για μια τιμή του διανύσματος εισόδου  $X$  και του διανύσματος εξόδου  $Y$ . Τα βάρη προσαρμόζονται στις γραμμικά κατάλληλες τμηματικές συναρτήσεις για να χαρακτηρίσουν το διάστημα για την καλύτερη κατηγορία διαχωρισμού. Η διαφορά μεταξύ των δικτύων εξόδου και των επιβλεπόμενων δικτύων εξόδου ελαχιστοποιείται σύμφωνα με μια προκαθορισμένη λειτουργία λάθους (κριτήριο απόδοσης) όπως είναι το μέσο τετράγωνο λάθος (MSE) κ.λπ.

Σε αυτήν την εργασία, το νευρωνικό σύστημα δικτύων έχει εφαρμοστεί μαζί με τα πολλαπλά επίπεδα κατανόησης, και τον BP αλγόριθμο κάτω από συγκεκριμένη επίβλεψη. Ένα πρόγραμμα υπολογιστών, που γράφτηκε σε PASCAL, έχει χρησιμοποιηθεί για την παρούσα εργασία.

Η μέτρηση των μεταβλητών όπως : τα ποσοστά όγκου του μαρτενσίτη, μπαινίτη, περλίτη και των τιμών της επιμήκυνσης, τα όρια θραύσης και τα όρια διαρροής, οι θερμοκρασίες επαναφοράς που παράγονται ως συνάστηση των διαμέτρων των ράβδων χάλυβα και η διάρκεια έλασης έχουν χρησιμοποιηθεί για την παρούσα εργασία.

**Ο γενικός στόχος είναι να συσχετιστούν μεταξύ τους οι τιμές εισόδου και εξόδου με το πρόγραμμα και να αποκτηθούν τα αποτελέσματα με τα πιθανά χαμηλότερα λάθη.** Οι μεταβλητές εισόδου είναι οι διάμετροι των ράβδων χάλυβα και η διάρκεια έλασης που μετράτε μέσω της ταχύτητας έλασης. Οι μεταβλητές εξόδου είναι ποσοστά όγκου του μαρτενσίτη, μπαινίτη και περλίτη και οι τιμές της επιμήκυνσης, οι τιμές θερμοκρασίας επαναφοράς και το όριο διαρροής. Επομένως, υπάρχουν δύο μεταβλητές εισόδου και επτά μεταβλητές εξόδου.

Στις νευρωνικές εφαρμογές δικτύων, οι τιμές εξόδου μειώνονται σε τιμές μεταξύ 0 και 1, η διαδικασία αυτή καλείται διαδικασία κανονικοποίησης. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη διαίρεση των τιμών εισόδου και εξόδου από μερικούς ακέραιους αριθμούς.

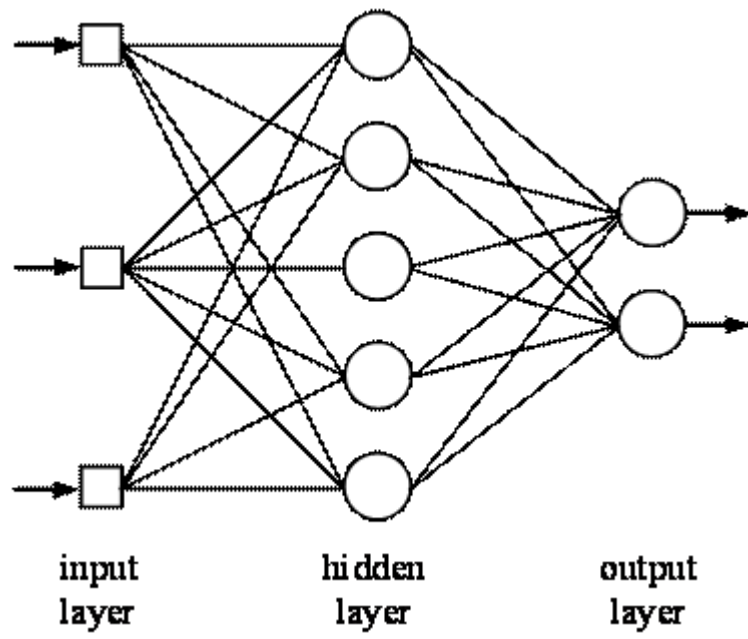
Δύο διαφορετικές δομές μελετήθηκαν σε αυτήν την εργασία. Πρώτα, επτά χωριστά προγράμματα χρησιμοποιήθηκαν για κάθε τιμή εξόδου, έτσι κάθε ένα από αυτά τα προγράμματα έχει δύο κόμβους εισόδου και έναν μοναδικό κόμβο εξόδου.

Στη συνέχεια, ένα άλλο πρόγραμμα που αποτελείται από δύο κόμβους εισόδου και επτά κόμβους εξόδου χρησιμοποιήθηκε. Οι πειραματικές τιμές τέθηκαν ως τιμές εισόδου και εξόδου και αποτελούνταν από 31 σειρές σε κάθε πρόγραμμα. Η διαδικασία υπολογισμού μέσω προγράμματος υπολογιστή εκτελείται πάντα με τη μέθοδο «δοκιμής και λάθους», δεν υπάρχει αυτόματος τρόπος όταν χρησιμοποιούνται τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα. Οι επαναλήψεις κατά τον υπολογισμό γίνονται με την αλλαγή των ποσοστών, των τιμών και των αριθμών κόμβων στα κρυμμένα στρώματα. Η καλύτερη αρχιτεκτονική λαμβάνεται κατ' αυτό τον τρόπο για να ελαχιστοποιήσουν τα λάθη.

Με την εκτέλεση των προγραμμάτων νευρωνικών δικτύων μπορούν να καθοριστούν, το ποσοστό επί τοις εκατό των μέσων λαθών, και οι διαφορές μεταξύ των τιμών εξόδου και των τιμών μετά από τις επαναλήψεις κατά την εκτέλεση των υπολογισμών από τον υπολογιστή.

Τα λάθη ελαχιστοποιούνται με περισσότερες επαναλήψεις στα προγράμματα νευρωνικών δικτύων με τη χρησιμοποίηση των κατάλληλων μεταβλητών και των κόμβων στα κρυμμένα στρώματα. Οι επαναλήψεις κατά τους υπολογισμούς από το πρόγραμμα του υπολογιστή παίρνουν χρόνο λόγω των πολλών δοκιμών που γίνονται με την αλλαγή των παραμέτρων των.

Η διαδικασία έχει ολοκληρωθεί όταν μέσω του προγράμματος καθορίζονται οι βέλτιστες παράμετροι. Προηγμένοι υπολογιστές απαιτούνται για να μειώσουν το χρόνο υπολογισμού από το πρόγραμμα του υπολογιστή.



Εικόνα 4.1 Παρουσίαση του πολλαπλού επιπέδου ανάλυσης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.0 Πειραματικό Μέρος

### 5.1 Σκοπός

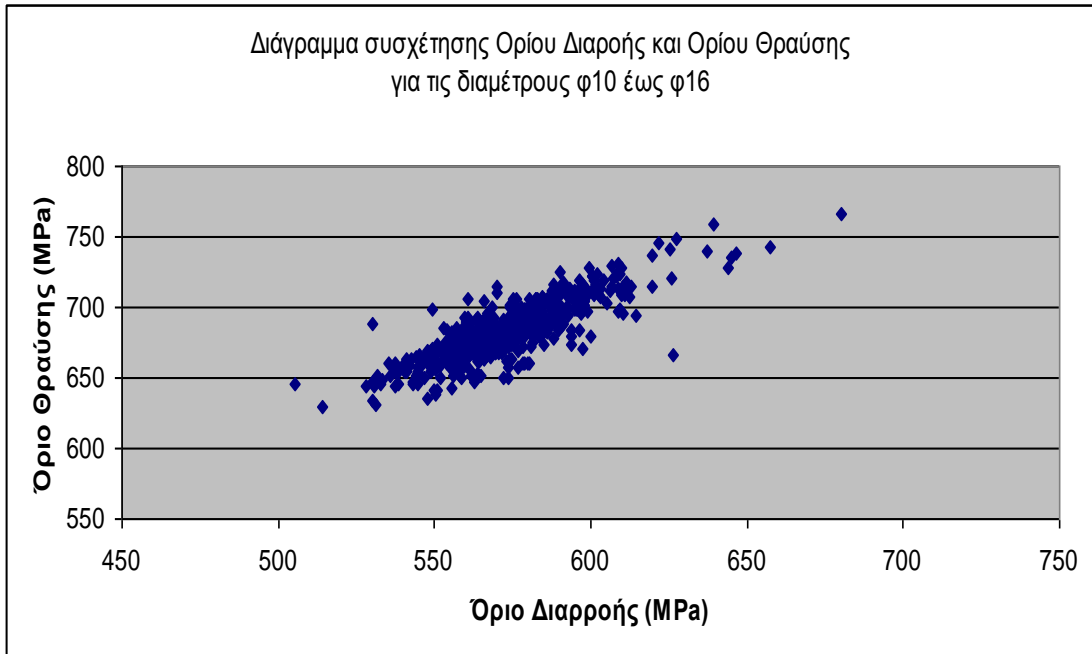
Στη βιομηχανία τα υλικά υποβάλλονται σε δοκιμές, από τις οποίες μπορεί να εξαχθεί συμπέρασμα για τις ιδιότητες των υλικών στην συγκεκριμένη παραγωγή και με χρήση στατιστικής εξάγονται συμπεράσματα για το σύνολο της παραγωγής. Μέρος του ελέγχου ποιότητας της παραγωγής περιλαμβάνει τη παραλαβή δείγματος από το τελικό προϊόν (δειγματοληψία), στη συγκεκριμένη περίπτωση της χαλύβδινης ράβδου. Αντιθέτως, ο έλεγχος διεργασιών επιτρέπει συνεχή παρακολούθηση και όχι δειγματοληπτικά. Η θερμοκρασία μετράται συνεχώς από πυρόμετρο σε συγκεκριμένη θέση και για συγκεκριμένη ταχύτητα χωρίς να διακόπτεται η γραμμή παραγωγής. Επίσης η χημική σύσταση του υλικού μετράται συνεχώς μιας και είναι συγκεκριμένη από το προηγούμενο στάδιο της χύτευσης.

Η ποιοτική και ποσοτική συσχέτιση των παραμέτρων παραγωγής είναι ιδιαίτερα κρίσιμη μιας και μπορεί να εφαρμοστεί για τον έλεγχο των χαρακτηριστικών των προϊόντων σε όλη την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας και όχι μόνο δειγματοληπτικά στα τελικά προϊόντα κατά τον έλεγχο ποιότητας, μιας και σπάνια στην βιομηχανική παραγωγή οι συνθήκες είναι σταθερές, αλλά αντίθετα κυμαίνονται εντός ορισμένων ορίων. Η συνεχής παρακολούθηση παραμέτρων παραγωγής και η ρύθμιση τους μέσω της πρόβλεψης δίνουν τη δυνατότητα οι όποιες μεταβολές των παραμέτρων να μετρηθούν και να αλλαχτούν αν δεν δίνουν τα επιθυμητά αποτελέσματα χωρίς διακοπή της παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η μείωση της διασποράς των χαρακτηριστικών και η αύξηση του επίπεδου ποιότητας των τελικών προϊόντων.

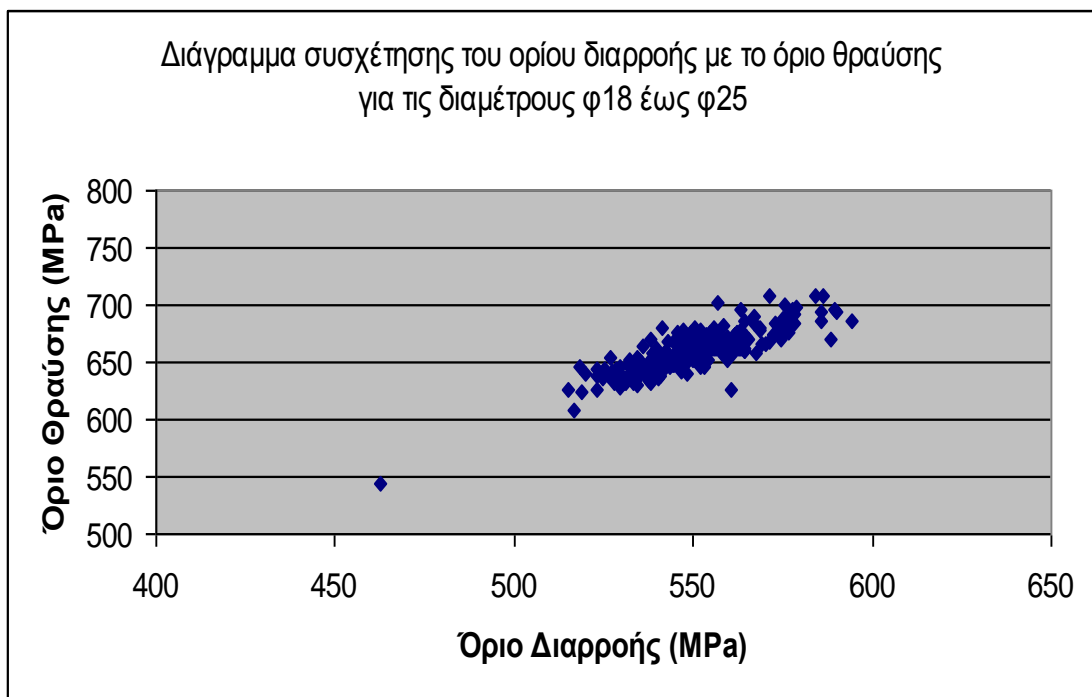


Μεταξύ των χαρακτηριστικών των ΧΟΣ το όριο διαρροής είναι καθοριστικό, μιας και αποτελεί χαρακτηριστικό του υλικού το οποίο συνδέεται άμεσα με τον στατικό σχεδιασμό των κατασκευών και κατά συνέπεια αποτελεί ένα από τα κρισιμότερα μεγέθη. Για το λόγο αυτό, αποφασίστηκε ότι στην παρούσα εργασία θα περιλαμβάνει συσχέτιση των παραμέτρων με το όριο διαρροής. Επίσης, το όριο διαρροής είναι στενά συνδεδεμένο με την σκληρότητα (που εκτιμάται από το  $c_{eq}$ ) που με την σειρά της εξαρτάται από την χημική σύσταση αλλά καθορίζεται από τις θερμικές κατεργασίες παραγωγής.

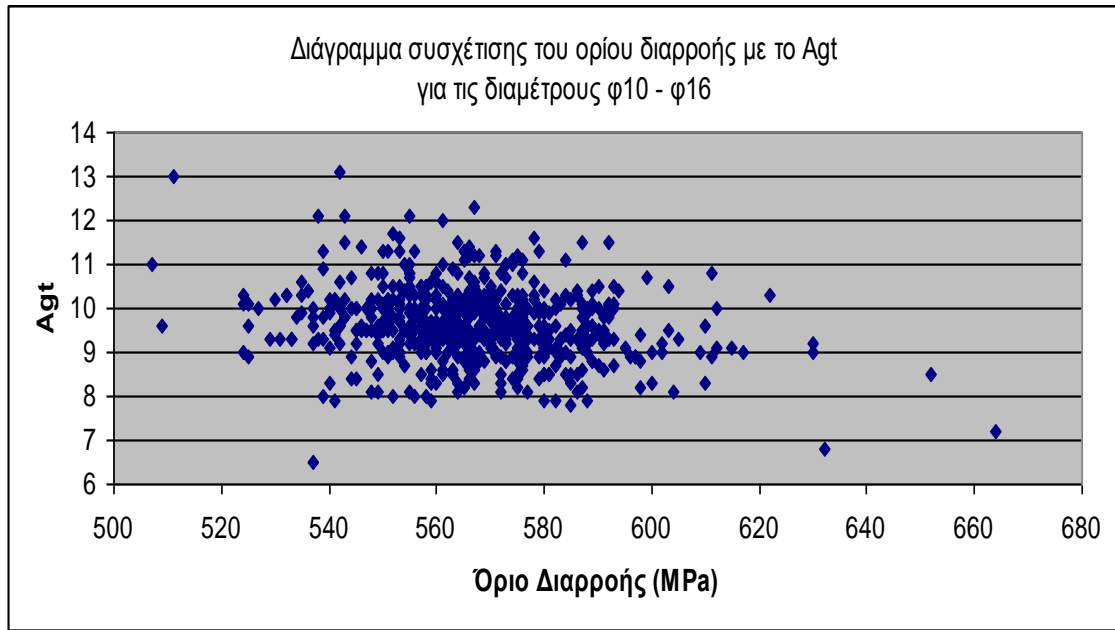
Στη συνέχεια μια σύντομη προκαταρκτική εργασία των μηχανικών χαρακτηριστικών των ΧΟΣ πραγματοποιήθηκε προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα επέκτασης της πρόβλεψης από το όριο διαρροής σε άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά. Στα γραφήματα 5.1 - 5.4 παρουσιάζεται η σχέση του ορίου διαρροής με το όριο θραύσης και την ολκιμότητα. Διακρίνεται σχέση με το όριο θραύσης. Τούτο ισχύει διότι οι χάλυβες που εξετάζονται έχουν στενά σχετικά όρια ιδιοτήτων και συστάσεων με αποτέλεσμα να είναι δυνατή μια μελλοντική εκτίμηση και άλλων μηχανικών χαρακτηριστικών πέραν του ορίου διαρροής. Αντιθέτως δεν είναι ξεκάθαρη, από τα γραφήματα 5.3 και 5.4 η σχέση του ορίου διαρροής με την πλαστική παραμόρφωση  $Agt$ .



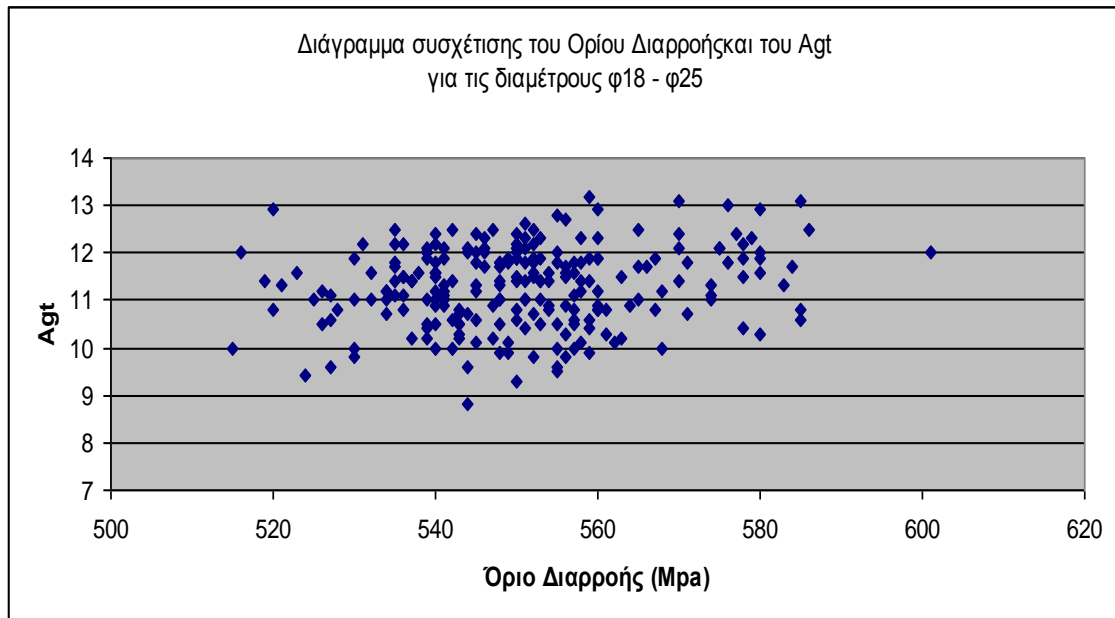
Γράφημα 5.1 Διάγραμμα συσχέτισης του  $R_{eH}$  και του  $R_{m}$  για τις διαμέτρους φ10 – φ16



Γράφημα 5.2 Διάγραμμα συσχέτισης του  $R_{eH}$  και του  $R_{m}$  για τις διαμέτρους φ18– φ25



Γράφημα 5.3 Διάγραμμα συσχέτισης του ReH και του Agt για τις διαμέτρους φ10–φ16



Γράφημα 5.4 Διάγραμμα συσχέτισης του ReH και του Agt για τις διαμέτρους φ18–φ25

Η απόκριση, δηλαδή η επίδραση, των παραμέτρων παραγωγής στα χαρακτηριστικά των προϊόντων είναι δυνατή εφόσον είναι γνωστή η σχέση που συνδέει τα παραγωγικά μεγέθη με τα χαρακτηριστικά των υλικών. Η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου και η περαιτέρω **ανάλυση ευαισθησίας** θα επέτρεπε να ανιχνευθούν οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν το φαινόμενο και να ποσοτικοποιηθούν. Στην εργασία αυτή, επιχειρείται μια ανάλυση ευαισθησίας κρίσιμων παραμέτρων που έχει ως κύριο σκοπό την φυσική ερμηνεία του μοντέλου. Δηλαδή παρουσιάζεται ο τρόπος επίδρασης των παραμέτρων της παραγωγής στα χαρακτηριστικά του υλικού. Δηλαδή αν η θερμοκρασία για μια ορισμένη διάμετρο αυξηθεί κατά 20° C, τότε ποια η επίδραση αυτής στην αντοχή του υλικού;

**Σκοπός της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός μαθηματικού μοντέλου για την εκτίμηση της αντοχής των χαλύβων οπλισμού σκυροδέματος θερμικής κατεργασίας.**

## 5.2 Εισαγωγή

Η παραγωγή χάλυβα οπλισμού σκυροδέματος με θερμική κατεργασία είναι πλέον μια ευρέως διαδεδομένη βιομηχανική πράξη. Η μέθοδος περιλαμβάνει άμεση θερμική κατεργασία βαφής και επαναφοράς μετά από το στάδιο θερμής έλασης που προηγείται.

Όπως έχουμε προαναφέρει η άμεση εν σειρά θερμική κατεργασία βαφής και μερικής επαναφοράς επιτυγχάνεται σε τρία στάδια:

- Στάδιο βαφής : κατά την έξοδο της ράβδου από το τελευταίο έλαστρο υφίσταται μια απότομη δραστική ψύξη με νερό υπό πίεση με αποτέλεσμα μέχρι ενός ορισμένου βάθους να γίνεται μαρτενσίτης. Η βαφή επιτυγχάνεται με την βοήθεια ειδικών συσκευών που εκτοξεύουν νερό υπό πίεση στο προϊόν (υδροδοχεία).
- Στάδιο επαναφοράς : η ράβδος μετά την απότομη ψύξη αποψύχεται ελεύθερα στον αέρα της ατμόσφαιρας. Λόγω της μεγάλης θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ κέντρου και επιφάνειας της ράβδου, η θερμότητα διαχέεται από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με αποτέλεσμα να επαναφέρεται ο δημιουργημένος μαρτενσίτης.
- Στάδιο αργής / ισοθερμοκρασιακής ψύξης : ο ωστενίτης στον πυρήνα της ράβδου μετασχηματίζεται σχεδόν ισοθερμοκρασιακά σε φερρίτη και περλίτη.

Πλήθος παραμέτρων και μηχανισμών επηρεάζουν τα μηχανικά χαρακτηριστικά των χαλύβων. Οι μηχανισμοί εξαρτώνται κυρίως από τη χημική σύσταση και από τις συνθήκες θέρμανσης, διαμόρφωσης (έλασης) και ψύξης. Έχει αναπτυχθεί πλήθος μοντέλων για βιομηχανική εφαρμογή που βασίζονται στην χρήση στατιστικής ανάλυσης και συσχέτισης (γραμμικής και μη), πεπερασμένων στοιχείων, νευρωνικών δικτύων και μαθηματικών μοντέλων. Τα πλεονεκτήματα των μοντέλων γραμμικής συσχέτισης είναι ότι είναι ευνόητα, εύχρηστα και οδηγούν γρήγορα σε αποτελέσματα συγκρίσιμης ακρίβειας με άλλα περισσότερο πολύπλοκα μοντέλα. Βασικό μειονέκτημα τους είναι ότι η μορφή της σχέσης των εξαρτημένων μεταβλητών πρέπει

να καθορισθεί πριν την συσχέτιση. Η μελέτη της σχέσης εξάρτησης των παραμέτρων αποτελεί την μεγαλύτερη δυσκολία σε τέτοιου είδους μοντέλα.

### 5.3 Συλλογή στοιχείων

Η συλλογή στοιχείων πραγματοποιήθηκε από μια μονάδα έλασης της ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗ Α.Ε. μεταξύ Μαρτίου και Αυγούστου 2009 πλήθους περίπου 900 περιπτώσεων.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η συλλογή των απαραίτητων στοιχείων που περιλαμβάνει ανά χυτήριο (και γραμμή έλασης) τα εξής:

Διάμετρος $\phi$
Γραμμή Έλασης
Ημερομηνία
Ώρα
Αριθμός Χυτηρίου
Ταχύτητα έλασης, <b>RS</b> (m/s)
Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης, <b>Tf</b> (oC)
Θερμοκρασία μετά την βαφή, <b>Ta</b> (oC)
Παροχή Νερού <b>m3/h</b>
Πίεση <b>Bar</b>
Ποσοστό Βαλβίδων ανοιχτό %
Αριθμός coolers
Άνθρακας, <b>C</b>
Μαγγάνιο, <b>Mn</b>
Πυρίτιο, <b>Si</b>
Νικέλιο, <b>Ni</b>
Χρώμιο, <b>Cr</b>
Χαλκός, <b>Cu</b>
Μολυβδαίνιο, <b>Mo</b>
Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, <b>Ceq</b>
Όνομαστικό Όριο Διαρροής, <b>R<sub>eH, nom</sub></b> (MPa)
Πραγματικό Όριο Διαρροής, <b>R<sub>eH, πειραματικό</sub></b> (MPa)
Εφελκυστική Αντοχή, <b>Rm</b> (MPa)
Λόγος <b>Rm / R<sub>eH, nom</sub></b>
Μάζα/Μέτρο, <b>m</b> (kgf/m)
Ομοιόμορφη Πλαστική Παραμόρφωση, <b>Agt</b> (%)
Πλαστική Παραμόρφωση στην Θραύση, <b>ε</b> (%)
Διάρκεια Βαφής, <b>t<sub>QTB</sub></b> (sec)
Μήκος ψύξης <b>m</b>

Πίνακας 5.1 Στοιχεία που συλλέχτηκαν

Τα στοιχεία που παραβάλλονται στον πίνακα 5.1 ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες:

Τις βασικές παραμέτρους της παραγωγής, που περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, τη θερμοκρασία μετά τη βαφή, τη διάρκεια βαφής, την ταχύτητα έλασης, την παροχή του νερού, την πίεση καθώς και το ποσοστό % των βαλβίδων που είναι ανοιχτές κατά την ψύξη.

Τη χημική σύσταση δηλαδή, τον άνθρακα C, το μαγγάνιο Mn, το πυρίτιο Si, το νικέλιο Ni, το χρώμιο Cr, το χαλκό Cu, το μολυβδαίνιο Mo, και την ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα C<sub>eq</sub>.

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά δηλαδή το ονομαστικό όριο διαρροής, το πραγματικό όριο διαρροής, την εφελκυστική αντοχή, τον λόγο του ορίου θραύσης προ το όριο διαρροής, το λόγο της μάζας ανά μέτρο, την ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση και την πλαστική παραμόρφωση κατά τη θραύση.

Κάποιες από τις παραμέτρους συλλέχτηκαν από την παραγωγή σε πραγματικές συνθήκες (ομάδα 1) και κάποιες αντιστοιχίστηκαν από τον ποιοτικό έλεγχο (ομάδες 2,3).

Οι παράμετροι που συλλέχτηκαν σε πραγματικές συνθήκες είναι : η διάμετρος, η γραμμή έλασης, η ημερομηνία και η ώρα που βγαίνει από τον φούρνο προθέρμανσης η μπιγιέτα, ο αριθμός του χυτηρίου δηλαδή η ακριβής σύσταση του υλικού, η ταχύτητα έλασης της γραμμής, η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης δηλαδή η θερμοκρασία εξόδου της μπιγιέτας από το φούρνο η οποία είναι σταθερή γιατί μετράται πάντα σε συγκεκριμένη θέση από ένα πυρόμετρο λίγα εκατοστά μακριά από το φούρνο, η παροχή και η πίεση του νερού και η θέση των βαλβίδων, η θερμοκρασία επαναφοράς επίσης η μέτρηση γίνεται με ένα πυρόμετρο λίγο μετά την έξοδο της ράβδου πλέον από το υδροδοχείο ψύξης, όπως θα αναφερθεί και παρακάτω **η θερμοκρασία επαναφοράς δεν έχει πάρει την τελική της τιμή** αφού η επαναφορά δεν έχει ολοκληρωθεί μόλις το πυρόμετρο πάρει την μέτρηση όμως θεωρείται και αυτή σταθερή για τον ίδιο λόγο. Μετά την επαναφορά ακολουθεί δειγματοληψία και η ράβδος εφελκύεται.



Η μονάδα έλασης της ΧΑΛΥΒΟΥΡΓΙΚΗΣ Α.Ε. χαρακτηρίζεται από μια ιδιαιτερότητα που αφορά τον διαχωρισμό σε συγκεκριμένο στάδιο της έλασης του. Ο αριθμός των γραμμών που προκύπτουν εξαρτάται από την παραγόμενη διάμετρο και φαίνεται παρακάτω στον Πίνακα 5.2. Ο διαχωρισμός έχει σαν στόχο την αύξηση της παραγωγικότητας της μονάδας και αποτελεί τεχνολογικό επίτευγμα της εταιρείας.

Διάμετρος	Γραμμή έλασης
Φ10	4
Φ12	3
Φ14	2
Φ16	2
Φ18	1
Φ20	1
Φ22	1
Φ25	1

Πίνακας 5.2 Απεικονίζει τις γραμμές έλασης ανά διάμετρο και τον αριθμό των coolers

Μετά από την καταγραφή των παραμέτρων από την παραγωγή έγινε αντιστοίχιση από τα αρχεία του Τμήματος Ποιοτικού Ελέγχου. Αφορούν την ακριβή στιγμή καταγραφής και όχι τους μέσους όρους των χυτηρίων. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να υπάρχουν περισσότερα δεδομένα ακόμα και για ένα συγκριμένο χυτήριο στο οποίο μεταβλήθηκαν ελαφρά κάποιες παράμετροι παραγωγής.

Οι παράμετροι που αντιστοιχίζονται, με βάση τις παραπάνω παραμέτρους, από τον ποιοτικό έλεγχο είναι : η χημική σύσταση από τον αριθμό του χυτηρίου και την πραγματική ώρα παραγωγής, και από το όριο διαρροής και τον αριθμό του χυτηρίου οι υπόλοιπες μηχανικές ιδιότητες. Από την ταχύτητα έλασης και το μήκος ψύξης υπολογίζεται ο χρόνος βαφής δηλαδή η διάρκεια του πρώτου σταδίου. Το μήκος

ψύξης ισούται με το γινόμενο ενός cooler επί τον αριθμό των coolers που δουλεύουν ανά διάμετρο όπως φαίνεται παρακάτω.

Από την θεωρία το βασικό στάδιο που επηρεάζει σημαντικά τις ιδιότητες του υλικού είναι το πρώτο, δηλαδή το στάδιο της απότομης **ψύξης και βαφής** μέσα στο υδροδοχείο (QTB). Η ψύξη καθορίζεται στην παραγωγή από την παροχή και την πίεση του νερού αλλά και τη θέση των βαλβίδων μέσα στο υδροδοχείο. Επομένως από τη στιγμή που η ψύξη είναι βασική για το υλικό, η αρχική προσπάθεια συσχέτισης περιλαμβάνει την πίεση και την παροχή.

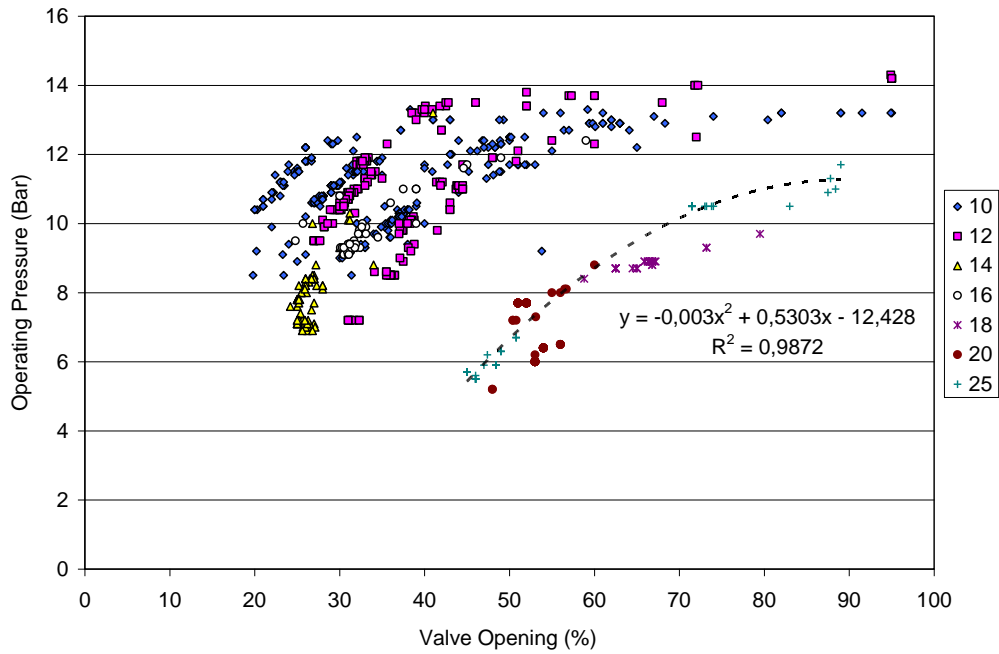
Ο χειριστής στην παραγωγή αυτό που μεταβάλλει μέσα στο υδροδοχείο βαφής είναι το νερό δηλαδή η παροχή του νερού και το ποσοστό % των βαλβίδων που είναι ανοιχτές άρα και τη θέση τους. Αλλά και την πίεση γιατί στον ίδιο χώρο αν αυξηθεί η παροχή αυξάνεται αυτόματα και η πίεση.

Στα γραφήματα 4.5 και 4.6 επιβεβαιώνεται η συσχέτιση της πίεσης και της παροχής με το ποσοστό % των ανοιχτών βαλβίδων ανά διάμετρο. Όσο αυξάνεται το ποσοστό των ανοιχτών βαλβίδων τόσο αυξάνεται η πίεση του νερού και η παροχή του. Και στα δύο διαγράμματα φαίνεται ότι το κύκλωμα του νερού ομαδοποιείται κατά κάποιο τρόπο πάνω σε δύο καμπύλες λειτουργίας.

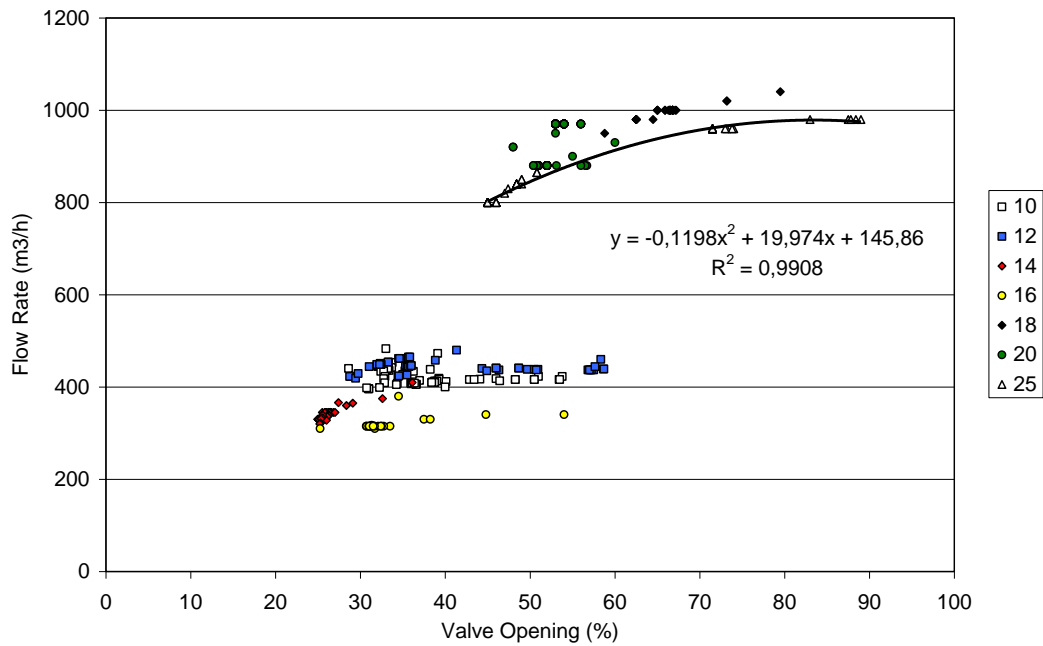
Οι διαμέτροι φ18, φ20 και φ25 αποτελούν την μία ομάδα και οι διαμέτροι φ10, φ12, φ14 και φ16 τη δεύτερη. Οι πιέσεις και οι παροχές των διαμέτρων φ18 – φ25 βρίσκονται πάνω σε μία καμπύλη, έτσι για παράδειγμα για ένα ποσοστό % ανοιχτής βαλβίδας της τάξης του 60 % η πίεση για τις διαμέτρους είναι : 8,4 , 8,8 και 9,2 για τις διαμέτρους φ18, φ20, φ25 αντίστοιχα. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάμετρος για ίδιο ποσοστό % νερού η πίεση αυξάνεται.

Αντίθετα για τις διαμέτρους φ10 – φ16 φαίνεται μια συσχέτιση όμως τα στοιχεία είναι διάσπαρτα σαν να χωρίζονται σε κάθε διάμετρο σε παράλληλες καμπύλες. Αυτό ισχύει γιατί με βάση τον πίνακα 4.1 χωρίζεται η έλαση σε γραμμές παράλληλες μεταξύ τους. Οι συνθήκες ψύξης διαφέρουν σε κάθε γραμμή μιας και οι ακρινές γραμμές ψύχονται παραπάνω. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μελέτη να γίνει αρκετά πολύπλοκη. Προκαταρκτική στατιστική ανάλυση επιβεβαίωσε τα παραπάνω και για

τον λόγο αυτό, στην συνέχεια η ανάλυση εστιάστηκε μόνο στις μη διαχωριζόμενες διαστάσεις (Φ18 mm min).



Γράφημα 5.5 Σχέση της πίεσης με το ποσοστό % των ανοιχτών βαλβίδων ανά διάμετρο



Γράφημα 5.6 Σχέση της παροχής με το ποσοστό των ανοιχτών βαλβίδων

Το εύρος των τιμών λειτουργίας στο κύκλωμα νερού στις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, ήταν μικρό και μεταξύ πολύ στενών περιοχών για όλες τις διαμέτρους, όπως ενδεικτικά φαίνεται στον πίνακα 5.3. Αυτό δεν επιτρέπει μέσω στατιστικής ανάλυσης να προκύψουν σχετικά συμπεράσματα επίδρασης αυτών των παραμέτρων.

Διάμετρος και γραμμή	Παροχή νερού (m <sup>3</sup> /h)		Πίεση (bar)		Ποσοστό % βαλβίδων	
	min	max	min	max	min	max
Φ10 γραμμή 1	113	144	9	11,7	30,3	55
Φ10 γραμμή 2	73	88	8,5	13,2	19,8	56
Φ10 γραμμή 3	114	120	8,5	11,9	23,3	34,4
Φ10 γραμμή 4	93	105	8,5	13,2	30	90
Φ25 γραμμή 1	800	980	5,5	11,7	45	89

Πίνακας 5.3 Τα εύρη των παραμέτρων της πίεσης, του ποσοστού % ανοιχτών βαλβίδων και της παροχής του νερού

Στους Πίνακες 5.4 και 5.5 συνοψίζονται τα εύρη μέσα στα οποία κυμαίνονται οι παράμετροι που τελικά χρησιμοποιήθηκαν. Για λόγους όγκου και εμπιστευτικότητας συνοψίζονται μόνο οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές.

Όνομαστική Διάμετρος (mm)	10		12		14		16	
Βασικές Παράμετροι Παραγωγής	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης, <b>Tf</b> (oC)	1006	1066	921	1071	998	1075	1019	1082
Θερμοκρασία μετά την βαφή, <b>Ta</b> (oC)	538	617	484	603	547	576	497	567
Διάρκεια Βαφής, <b>tQTB</b> (sec)	0,265385	0,318462	0,371538	0,371538	0,644	0,666207	0,825641	0,825641
Παροχή νερού (m <sup>3</sup> /h)	73	177,2	123	183	155	240	155	200
Πίεση (Bar)	8,5	13,3	7,2	14,3	6,6	13,8	9,1	12,4
Ποσοστό ανοιχτών βαλβίδων %	19,8	95	27	95	24,2	56	24,8	59
Ταχύτητα έλασης, <b>RS</b> (m/s)	13,0		13,0		14,5		11,7	
<b>Χημική σύσταση (% κ.β.)</b>								
Άνθρακας, <b>C</b>	0,2	0,26	0,19	0,24	0,19	0,25	0,18	0,25
Μαγγάνιο, <b>Mn</b>	0,88	1,12	0,88	1,09	0,94	1,05	0,94	1,1
Πυρίτιο, <b>Si</b>	0,17	0,25	0,18	0,26	0,15	0,24	0,15	0,27
Νικέλιο, <b>Ni</b>	0,09	0,18	0,08	0,13	0,09	0,15	0,1	0,16
Χρώμιο, <b>Cr</b>	0,05	0,17	0,07	0,22	0,07	0,19	0,08	0,14
Χαλκός, <b>Cu</b>	0,38	0,57	0,36	0,64	0,26	0,67	0,35	0,56
Μολυβδαίνιο, <b>Mo</b>	0,018	0,028	0,018	0,03	0,013	0,036	0,018	0,031
Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, <b>Ceq</b>	0,41	0,5	0,41	0,48	0,4	0,48	0,41	0,5
<b>Μηχανικά Χαρακτηριστικά</b>								
Όνομαστικό Όριο Διαρροής, <b>ReH, nom</b> (MPa)	507	664	509	630	539	603	535	610
Πραγματικό Όριο Διαρροής, <b>ReH, πειραματικό</b> (MPa)	505,3566	680,1426	527,9155	645,1396	541,2273	596,5215	553,2848	626,2152
Εφελκυστική Αντοχή, <b>Rm</b> (MPa)	625,3	747,9	621,1	748	638,9	711,6	641,6	717,9
Λόγος <b>Rm / ReH, nom</b>	1,126355	1,278501	1,121709	1,297398	1,115009	1,237857	1,064918	1,22972
Μάζα/Μέτρο, <b>m</b> (kgf/m)	0,589	0,638	0,818	0,901	1,192	1,23	1,514	1,55
Ομοιόμορφη Πλαστική Παραμόρφωση, <b>Agt</b> (%)	6,5	11,5	7,9	12,1	7,8	13,1	7,9	11,5
Πλαστική Παραμόρφωση στην Θραύση, <b>ε</b> (%)	18	23,5	19	23	19	23,5	16,5	23
<b>Πλήθος μετρήσεων</b>	268		204		72		54	

Πίνακας 5.4 Διάμετροι 10 – 16 Ελάχιστη και μέγιστη τιμή παραμέτρων παραγωγής, χημικής σύστασης και μηχανικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία

Όνομαστική Διάμετρος (mm)	18		20		22		25	
Βασικές Παράμετροι Παραγωγής	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης, <b>Tf</b> (oC)	970	1066	989	1076	1014	1074	976	1076
Θερμοκρασία μετά την βαφή, <b>Ta</b> (oC)	507	556	510	562	504	525	486	522
Διάρκεια Βαφής, <b>tQTB</b> (sec)	1,18	1,27	1,27	1,44	1,57		1,91	1,97
Παροχή νερού (m <sup>3</sup> /h)	950	1040	880	970	930	930	800	980
Πίεση (Bar)	8,4	9,7	5,2	8,8	6	6	5,5	11,7
Ποσοστό ανοιχτών βαλβίδων %	58,8	79,5	48	60	51	51	45	89
Ταχύτητα έλασης, <b>RS</b> (m/s)	15,0		12,3	14,0	11,2	11,3	9,0	9,3
<b>Χημική σύσταση (% κ.β.)</b>								
Άνθρακας, <b>C</b>	0,19	0,23	0,19	0,26	0,22	0,25	0,20	0,24
Μαγγάνιο, <b>Mn</b>	0,94	1,07	0,94	1,14	0,97	1,08	0,95	1,17
Πυρίτιο, <b>Si</b>	0,19	0,24	0,16	0,28	0,20	0,24	0,17	0,28
Νικέλιο, <b>Ni</b>	0,09	0,12	0,09	0,16	0,10	0,13	0,09	0,13
Χρώμιο, <b>Cr</b>	0,09	0,19	0,05	0,20	0,10	0,13	0,04	0,18
Χαλκός, <b>Cu</b>	0,37	0,62	0,37	0,72	0,51	0,70	0,38	0,65
Μολυβδαίνιο, <b>Mo</b>	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	0,05
Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, <b>Ceq</b>	0,42	0,47	0,41	0,49	0,43	0,50	0,42	0,48
<b>Μηχανικά Χαρακτηριστικά</b>								
Όνομαστικό Όριο Διαρροής, <b>ReH, nom</b> (MPa)	530	561	515	566	535	570	541	601
Πραγματικό Όριο Διαρροής, <b>ReH, πειραματικό</b> (MPa)	513	562	515	563	549	572	543	596
Εφελκυστική Αντοχή, <b>Rm</b> (MPa)	622	676	611	695	637	693	637	706
Λόγος <b>Rm / ReH, nom</b>	1,18	1,25	1,17	1,26	1,17	1,24	1,16	1,23
Μάζα/Μέτρο, <b>m</b> (kgf/m)	1,969	2,078	2,43	2,544	2,859	3,025	3,64	3,986
Ομοιόμορφη Πλαστική Παραμόρφωση, <b>Agt</b> (%)	9,6	12,5	8,8	13,2	10,5	11,9	9,3	13,1
Πλαστική Παραμόρφωση στην Θραύση, <b>ε</b> (%)	20,0	22,5	18,0	23,0	21,0	23,0	19,0	24,0
<b>Πλήθος μετρήσεων</b>	31		102		11		114	

Πίνακας 5.5 Διάμετροι 18 – 25 Ελάχιστη και μέγιστη τιμή παραμέτρων παραγωγής, χημικής σύστασης και μηχανικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία

## 5.4 Επίλυση μοντέλων

### 5.4.1 Προσέγγιση 1<sup>η</sup>

Σύμφωνα με τους Kumar et al, επιχειρείται πρόβλεψη του ορίου διαρροής το οποίο βασίζεται στην πρόβλεψη των μικρογραφικών συστατικών, την αντοχή τους και την σχετική συμμετοχή τους στην συνολική αντοχή της ράβδου. Η εκτίμηση γίνεται σύμφωνα με τον τύπο (1) επιλύοντας την διαφορική εξίσωση διάδοσης θερμότητας.

$$Y_s = X_m Y_m + X_b Y_b + X_p Y_p + X_f Y_f \quad (1)$$

Όπου  $X_m$ ,  $X_b$ ,  $X_p$ ,  $X_f$  είναι τα ποσοστά των φάσεων του μαρτενσίτη, του μπαινίτη, του περλίτη και του φερρίτη και τα  $Y_m$ ,  $Y_b$ ,  $Y_p$ ,  $Y_f$  αναφέρονται στην αντοχή των αντίστοιχων φάσεων. Αυτά έχουν προσδιοριστεί ως εξής :

$$Y_m = 1785,1 - 1,75T_r \quad (2)$$

$$Y_b = 1406,6 + 166(\%Si) - 1,6T_b \quad (3)$$

$$Y_f = 998 + 111(\%Si) - 0,98T_f \quad (4)$$

$$Y_p = 553 \quad (5)$$

Όπου  $T_r$ ,  $T_b$  και  $T_f$  οι θερμοκρασίες έναρξης των μετασχηματισμών του μπαινίτη και του φερρίτη. Το επί τοις εκατό ποσοστό του Πυριτίου συμβολίζεται %Si.

Η αντοχή της κάθε φάσης έχει οριστεί με βάση την ακτίνα βαφής δηλαδή από την επιφάνεια στον πυρήνα το ποσοστό του όγκου μέσα στη ράβδο καταλαμβάνει ο μαρτενσίτης. Ο Kumar επιλύει την διαφορική αυτή εξίσωση μέσω του υπολογιστή με τη χρήση πεπερασμένων στοιχείων.

Έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το όριο διαρροής των διαφόρων μικρογραφικών συστατικών με τις παραπάνω θερμοκρασίες μετασχηματισμών:

$$\text{Μαρτενσίτης: } Re_m \text{ (N/mm}^2\text{)} = 1781,5 - 1,75 Te \quad (6)$$

$$\text{Μπαινίτης: } Re_b \text{ (N/mm}^2\text{)} = 1404,6 + 166,0[\%Si] - 1,6 Bs \quad (7)$$

$$\text{Φερρίτης: } Re_f \text{ (N/mm}^2\text{)} = 998,0 + 111,0[\%Si] - 0,98 Fs \quad (8)$$

$$\text{Περλίτης: } Re_p \text{ (N/mm}^2\text{)} = 553,0 \quad (9)$$

Όπου  $Te$ : η θερμοκρασία επαναφοράς της εξωτερικής στοιβάδας

$Bs$ ,  $Fs$ : οι μέσες θερμοκρασίες του μπανιτικού και του φερριτικού μετασχηματισμού αντίστοιχα.

Η θερμοκρασία  $Ms$  κάτω από την οποία αρχίζει μαρτενσιτική βαφή δίνεται από τη σχέση (Payson & Grange 1948):

$$Ms(^{\circ}C) = 500 - 300[\%C] - 33,3[\%Mn] - 22,2[\%Cr] - 16,7[\%Ni] - 11,1[\%Si] - 11,1[\%Mo] \quad (10)$$

Αντίστοιχα οι θερμοκρασίες έναρξης του μπανιτικού ( $Bs$ ) και του φερριτικού ( $Fs$ ) μετασχηματισμού μπορούν να εκτιμηθούν από τις σχέσεις:

$$Bs(^{\circ}C) = 718 - 425[\%C] - 42,5[\%Mn] \quad (11)$$

$$Fs(^{\circ}C) = 875 - 27,6(dT/dt)0,155 \quad (12)$$

Όπου  $dT/dt$ : ο ρυθμός ψύξης

Το μοντέλο της πρόβλεψης βασίζεται στη μεθοδολογία επίλυσης του Kumar et al, τα  $X_m, X_b, X_f, X_p$  και τα  $Y_m, Y_b, Y_f$  είναι άγνωστα, διότι βασίζονται στην μέση θερμοκρασία μετασχηματισμών που δεν μετράται στην παρούσα εργασία και κατά συνέπεια υπάρχει σχετική αβεβαιότητα. Έγινε προσπάθεια επίλυσης του μοντέλου χρησιμοποιώντας τις παραμέτρους πίεσης, παροχής του νερού, θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης, των συντελεστών διόρθωσης της επαναφοράς του μαρτενσίτη, τους συντελεστές μέσης θερμοκρασίας και θερμοκρασίας έναρξης των μετασχηματισμών και τα ποσοστά των φάσεων, για τις διαμέτρους  $\phi 18 - \phi 25$ . Για παράδειγμα το  $X_m$  είναι το ποσοστό του μαρτενσίτη άρα εξαρτάται από τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησης, επαναφοράς και τις συνθήκες βαφής δηλαδή από την παροχή του νερού. Το αντίστοιχο γίνεται και με τους υπόλοιπους άγνωστους. Η μορφή της σχέσης των παραμέτρων είναι και η μεγαλύτερη δυσκολία σε τέτοιου είδους μοντέλα συσχέτισης. Για τον λόγο αυτό είναι αναπόφευκτο να πραγματοποιείται μεγάλος όγκος δοκιμών και ελέγχων σχετικά με την μορφή της εξάρτησης μεμονωμένων ή/και συνδυασμένων παραγόντων.

Για να είναι ορθότερη η πρόβλεψη θα πρέπει η διαφορά (το απόλυτο άθροισμα) του ορίου διαρροής από την πρόβλεψη, και του πειραματικού ορίου διαρροής, ή να είναι μηδέν ή να τείνει στο μηδέν. Αυτό επιλύεται μέσω του υπολογιστή με τη χρήση ενός προγράμματος βελτιστοποίησης του Solver. Ορίζοντας περιορισμούς για τον κάθε παράγοντα και συντελεστή όπως φαίνεται στους πίνακες 5.6 – 5.9. Δίνεται η εντολή στο πρόγραμμα να βελτιστοποιήσει τις μεταβλητές έτσι ώστε η διαφορά να μηδενιστεί.

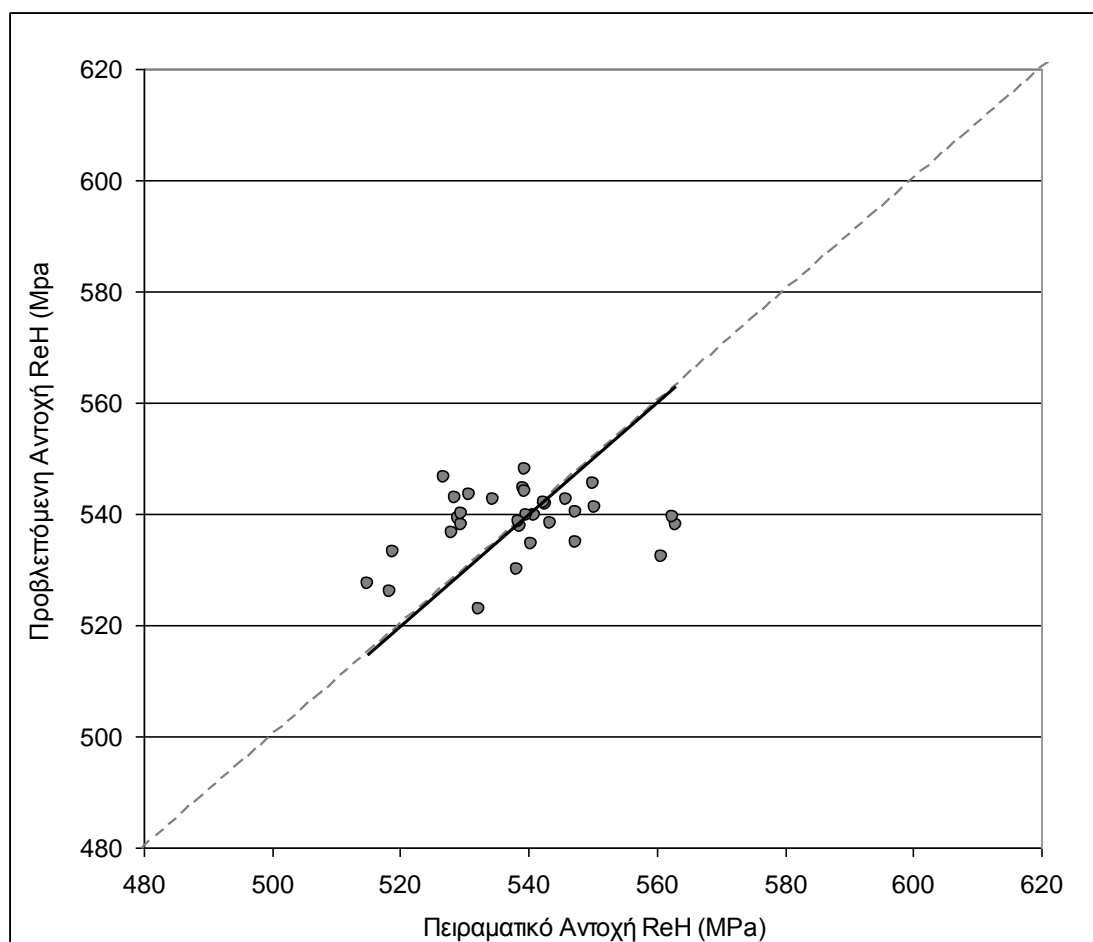
Στα Γραφήματα 5.7 έως 5.10 και στους Πίνακες 5.6 έως 5.9 παρουσιάζονται συνοπτικά όλες οι μεταβλητές και οι περιορισμοί που βελτιστοποιούν το αποτέλεσμα πρόβλεψης έτσι ώστε να αποτυπωθεί η σχέση της αντοχής που προκύπτει από τα στοιχεία που συλλέχτηκαν, με την αντοχή που προκύπτει από το μοντέλο της πρόβλεψης για τις διαμέτρους  $\phi 18$  έως  $\phi 25$ .



Στους Πίνακες δίνονται τα ποσοστά των μικρογραφικών φάσεων, οι βασικές παράμετροι, δηλαδή η πίεση, η παροχή του νερού, η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης και η αντοχή. Επίσης δίνονται οι συντελεστές διόρθωσης των θερμοκρασιών έναρξης και των μέσων θερμοκρασιών των μετασχηματισμών. Όλες οι μεταβλητές πρέπει να κυμαίνονται εντός συγκεκριμένων ορίων (περιορισμοί).

	Διαφορά	Απόλυτο Άθροισμα	Περιορισμοί		
Solver	1,2835E-08	322,696619	(#)	min	max
Μεταβλητές	Ποσοστό Μαρτενσιτικής φάσης	xm18	0,13	0,00	1,20
	Ποσοστό Μπαινιτικής φάσης	xb18	0,40	0,00	0,80
	Ποσοστό Περλιτικής φάσης	xp18	0,48	0,00	0,50
	Ποσοστό Φερριτικής φάσης	xf18	0,23	0,00	0,50
	Σύνολο ποσοστού φάσης		1,00	1,00	1,00
	Πίεση	pf	6,11	5,00	9,50
	Παροχή νερού	ms18	100	0	500
	Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης	bss	964	920	1200
	Αντοχή	fss	0,001	0,000	
	Συντελεστής Επαναφοράς του Μαρτενσίτη	uf	1,263	0,500	1,500
	Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Μπαινιτικού Μετασχηματισμού	uff	1,144	1,000	3,000
	Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Φερριτικού Μετασχηματισμού	ff	0,546	0,500	0,900
	Συντελεστής Θερμοκρασίας Έναρξης Φερριτικού Μετασχηματισμού	pp	1,517	0,700	1,900

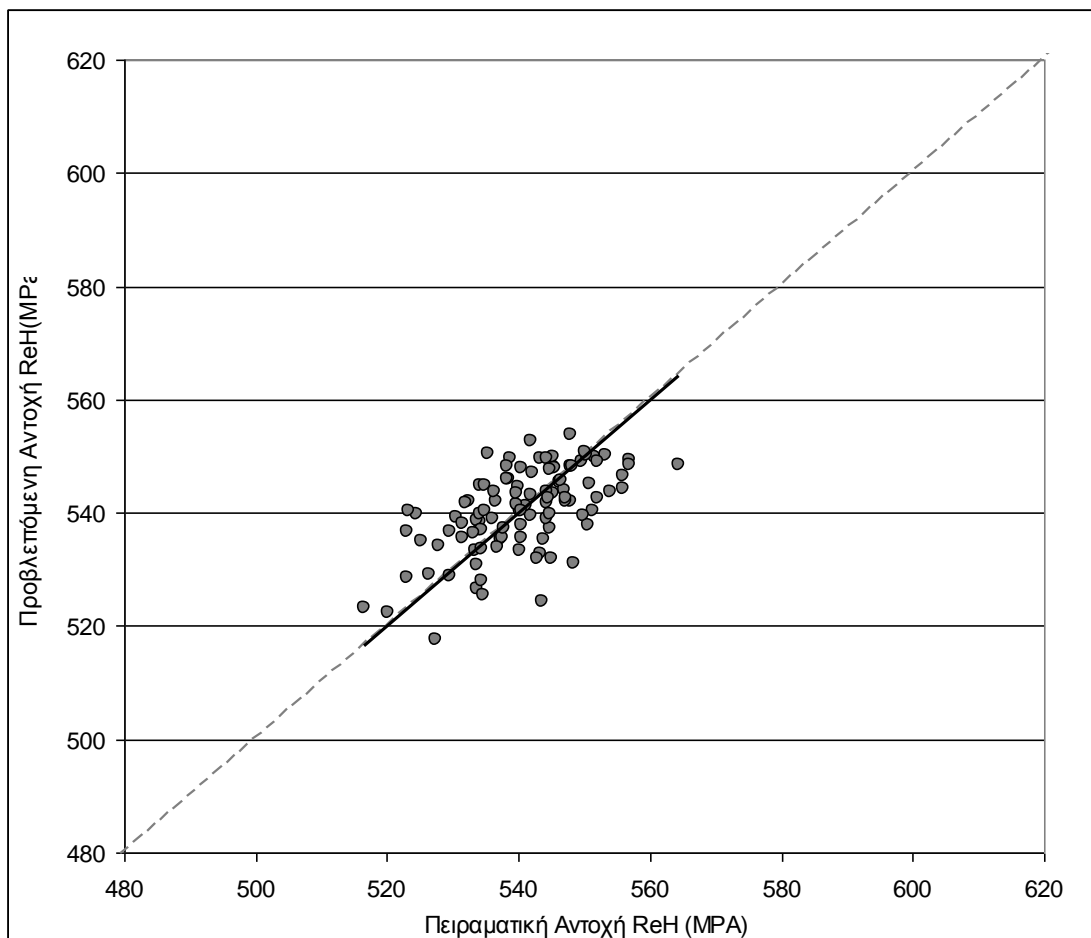
Πίνακας 5.6 Οι μεταβλητές και οι περιορισμοί με βάση τους οποίους επιχειρείται η πρόβλεψη για τη διάμετρο φ18



Γράφημα 5.7 Η σχέση μεταξύ της αντοχής από τα στοιχεία που συλλέχθηκαν και της αντοχής από το μοντέλο της Πρόβλεψης για τη διάμετρο φ18

	Διαφορά	Απόλυτο Αθροισμα		Περιορισμοί	
Solver	-1,38463E-07	644,013465	(#)	min	max
Μεταβλητές	Ποσοστό Μαρτενσιτικής φάσης	xm20	0,31	0,16	0,35
	Ποσοστό Μπαϊνιτικής φάσης	xb20	0,25	0,10	0,50
	Ποσοστό Περλιτικής φάσης	xp20	0,33	0,10	0,35
	Ποσοστό Φερριτικής φάσης	xf20	0,11	0,10	0,40
	Σύνολο ποσοστού φάσης		1,00	1,00	1,00
	Πίεση	pf	6,01	6,00	9,50
	Παροχή νερού	ms20	312	0	20000
	Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης	bss	952	950	1200
	Αντοχή	fss	0,000	0,000	
	Συντελεστής Επαναφοράς του Μαρτενσίτη	uf	1,022	1,000	1,500
	Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Μπαϊνιτικού Μετασχηματισμού	uff	-1,397	-2,000	5,000
	Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Φερριτικού Μετασχηματισμού	ff	0,807	0,800	2,000
	Συντελεστής Θερμοκρασίας Έναρξης Φερριτικού Μετασχηματισμού	pp	0,838	0,800	1,100

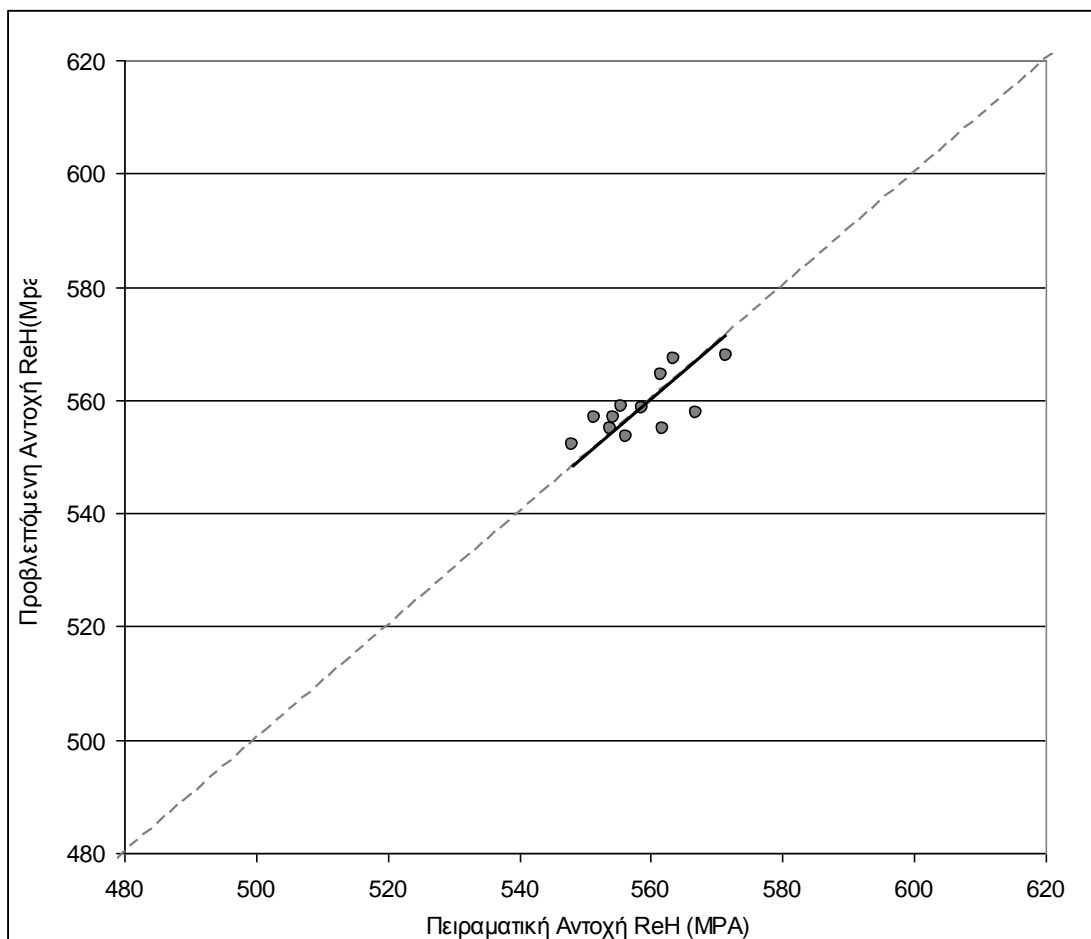
Πίνακας 5.7 Οι μεταβλητές και οι περιορισμοί με βάση τους οποίους επιχειρείται η πρόβλεψη για τη διάμετρο φ20



Γράφημα 5.8 Η σχέση μεταξύ της αντοχής από τα στοιχεία που συλλέχτηκαν και της αντοχής από το μοντέλο της Πρόβλεψης για τη διάμετρο φ20

	Διαφορά	Απόλυτο Άθροισμα	Περιορισμοί		
Solver	-3,16732E-10	62,25094366	(#)	min	max
Μεταβλητές	Ποσοστό Μαρτενσιτικής φάσης	xm22	0,16	0,16	0,35
	Ποσοστό Μπαινιτικής φάσης	xb22	0,33	0,10	0,50
	Ποσοστό Περλιτικής φάσης	xp22	0,25	0,10	0,35
	Ποσοστό Φερριτικής φάσης	xf22	0,26	0,10	0,40
	Σύνολο ποσοστού φάσης		1,00	1,00	1,00
	Πίεση	pf	6,03	6,00	11,00
	Παροχή νερού	ms22	625	0	20000
	Θερμοκρασία Ωστενιποίησης	bss	953	950	1200
	Αντοχή	fss	0,250	0,000	
	Συντελεστής Επαναφοράς του Μαρτενσίτη	uf	0,527	0,200	1,300
	Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Μπαινιτικού Μετασχηματισμού	uff	-0,982	-2,000	5,000
	Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Φερριτικού Μετασχηματισμού	ff	0,939	0,800	1,200
Συντελεστής Θερμοκρασίας Έναρξης Φερριτικού Μετασχηματισμού	pp	0,770	0,700	1,200	

Πίνακας 5.8 Οι μεταβλητές και οι περιορισμοί με βάση τους οποίους επιχειρείται η πρόβλεψη για τη διάμετρο φ22



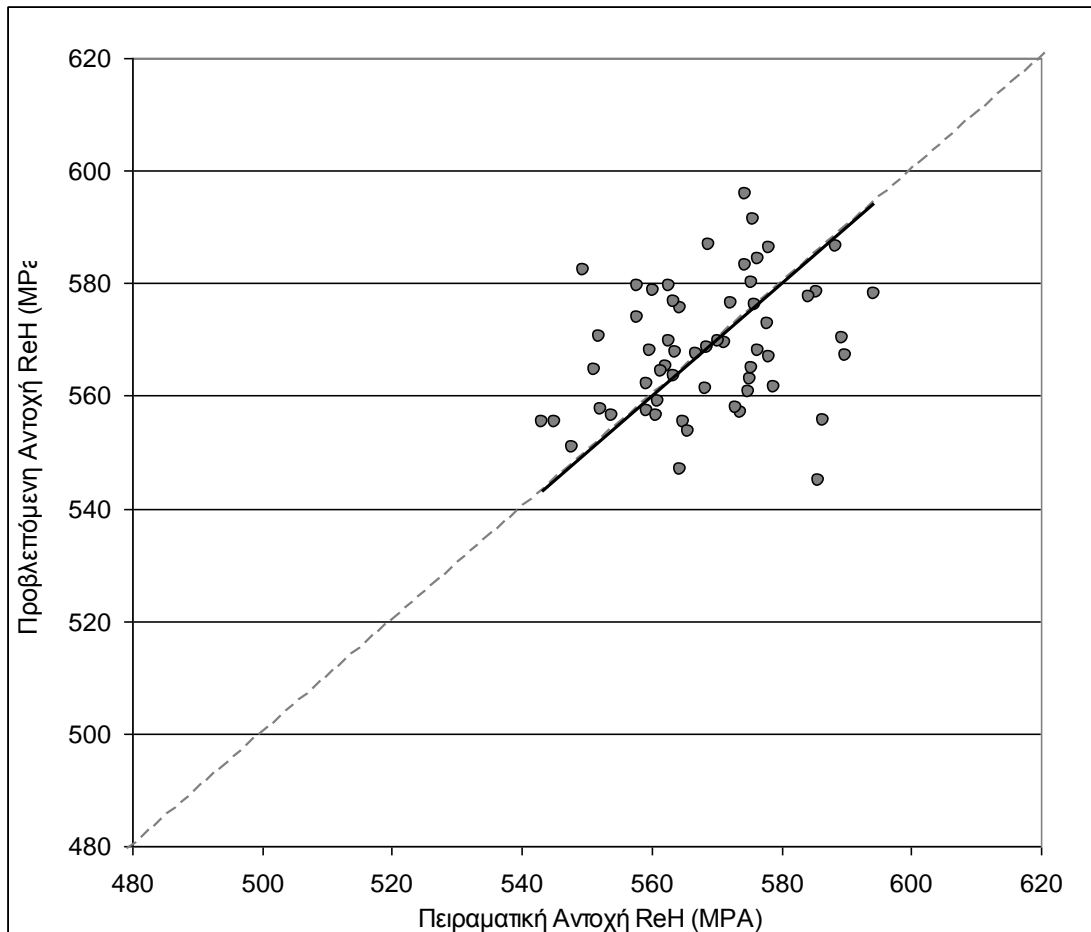
Γράφημα 5.9 Η σχέση μεταξύ της αντοχής από τα στοιχεία που συλλέχτηκαν και της αντοχής από το μοντέλο της Πρόβλεψης για τη διάμετρο φ22

Διαφορά		Απόλυτο Άθροισμα	
Solver	-4,66694E-07		688,083268

Μεταβλητές	(#)	Περιορισμοί	
		min	max
Ποσοστό Μαρτενσιτικής φάσης	xm25	0,17	0,16 0,35
Ποσοστό Μπαινιτικής φάσης	xb25	0,26	0,10 0,50
Ποσοστό Περλιτικής φάσης	xp25	0,22	0,10 0,35
Ποσοστό Φερριτικής φάσης	xf25	0,35	0,10 0,40
Σύνολο ποσοστού φάσης		1,00	1,00 1,00
Πίεση	pf	6,63	6,00 11,00
Παροχή νερού	ms25	2500	0 20000
Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης	bss	981	950 1200
Αντοχή	fss	0,000	0,000
Συντελεστής Επαναφοράς του Μαρτενσίτη	uf	1,244	0,200 1,300
Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Μπαινιτικού Μετασχηματισμού	uff	0,533	-2,000 6,000
Συντελεστής Μέσης Θερμοκρασίας Φερριτικού Μετασχηματισμού	ff	0,835	0,800 1,200
Συντελεστής Θερμοκρασίας Έναρξης Φερριτικού Μετασχηματισμού	pp	0,722	0,700 1,200

Πίνακας 5.9 Οι μεταβλητές και οι περιορισμοί με βάση τους οποίους επιχειρείται η πρόβλεψη για τη διάμετρο φ25



Γράφημα 5.10 Η σχέση μεταξύ της αντοχής από τα στοιχεία που συλλέχτηκαν και της αντοχής από το μοντέλο της Πρόβλεψης για τη διάμετρο φ25

Στα γραφήματα τα στοιχεία βρίσκονται κοντά στη διαγώνιο του διαγράμματος, για παράδειγμα για μια τιμή της προβλεπόμενης αντοχής της τάξης των 545 MPa η πειραματική αντοχή είναι 540 MPa. Το απόλυτο άθροισμα της πειραματικής αντοχής με την προβλεπόμενη είναι μεγαλύτερο του μηδενός σε κάθε διάμετρο και αποτελεί μέτρο της απόκλισης από τις πραγματικές τιμές. Αυτό είναι ικανοποιητικό αποτέλεσμα, όμως το μοντέλο της πρόβλεψης δεν προσεγγίζει ικανοποιητικά διότι δεν μπορεί να ερμηνεύσει φυσικά την παραγωγική διεργασία.

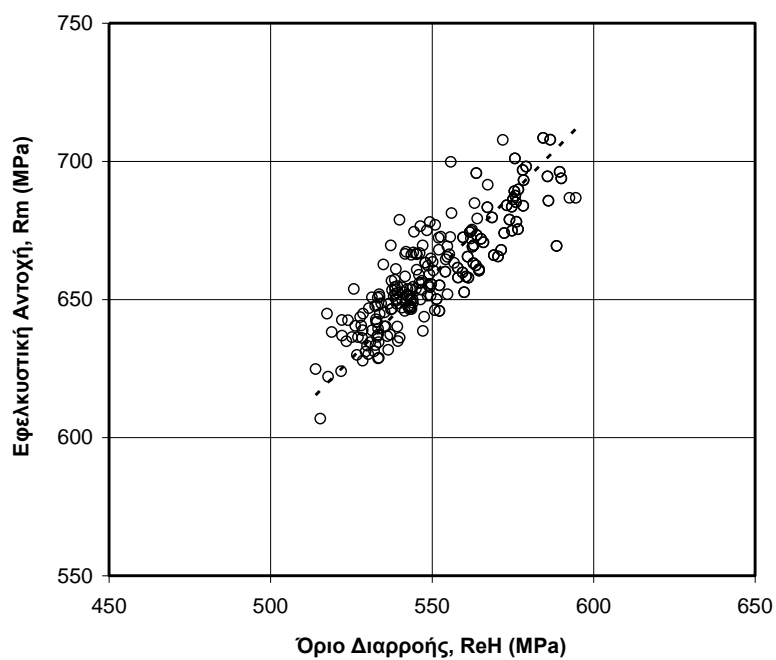
Παρατηρώντας τους Πίνακες 5.6 έως 5.9 βλέπουμε ότι τα ποσοστά των φάσεων που υπολογίζονται διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Επιπλέον δεν διαφαίνεται μια σχέση μεταξύ τους, δηλαδή να μεταβάλλονται συστηματικά. Για παράδειγμα το ποσοστό του μαρτενσίτη στη διάμετρο φ20 είναι 31% ενώ στη διάμετρο φ22 είναι 16%, και αντίστοιχα το ποσοστό του φερρίτη για τη διάμετρο φ18 είναι 23% ενώ για τη διάμετρο φ25 είναι 35%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν γνωρίζουμε τα ποσοστά των φάσεων και κατά συνέπεια δεν μπορούμε να οδηγήσουμε το μοντέλο σε εύρεση βέλτιστης λύσης που να έχει συμπεριληφθεί. Ένας τρόπος αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος θα μπορούσε να είναι η μέτρηση των μεταλλογραφικά των φάσεων και η εκτίμηση των  $X_m$ ,  $X_b$ ,  $X_f$ ,  $X_p$ . Αυτό θα οδηγούσε σε μειωμένο αριθμό μη ελέγξιμων παραμέτρων και κατά συνέπεια σε μεγαλύτερη βεβαιότητα των αποτελεσμάτων.

Επιπλέον παρατηρώντας τους πίνακες βλέπουμε ότι οι παράμετροι πίεσης, παροχής και θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης που υπολογίζονται διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους. Επίσης δεν διαφαίνεται μια σχέση μεταξύ τους, δηλαδή να μεταβάλλονται συστηματικά. Για παράδειγμα στη διάμετρο φ20 ο συντελεστής μέσης θερμοκρασίας έναρξης του μπαινιτικού μετασχηματισμού υπολογίζεται αρνητικός.

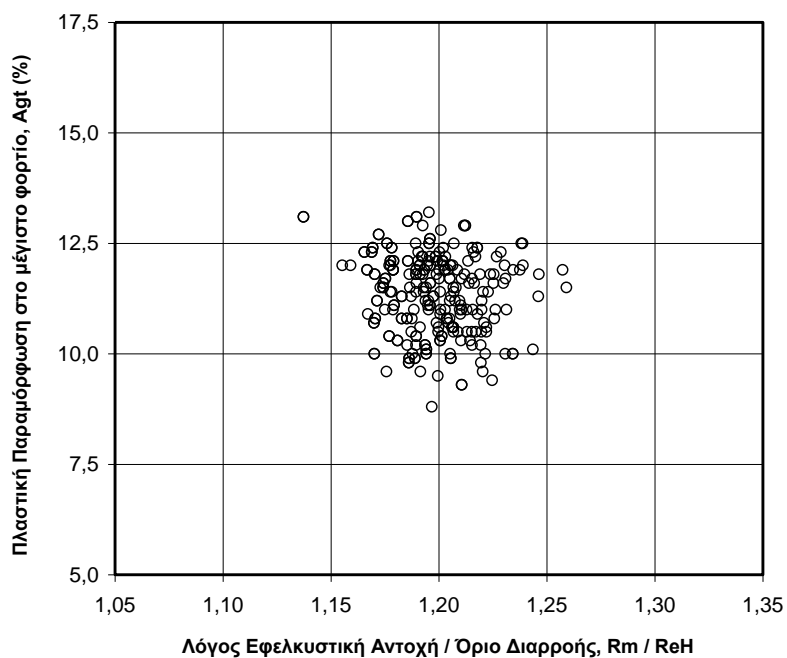
## 5.4.2 Προσέγγιση 2<sup>η</sup>

Ο υπολογισμός του ορίου διαρροής των προϊόντων με την πρώτη προσέγγιση παρουσιάζει πολλές αδυναμίες. Σύμφωνα με την προσέγγιση του Kumar et. al. το μοντέλο βασίζεται στην πρόβλεψη των ποσοστών των μικρογραφικών συστατικών και των αντίστοιχων αντοχών τους. Λόγω του πλήθους των παραδοχών και αβεβαιότητας, η εκτίμηση της αντοχής των ράβδων με την προηγούμενη προσέγγιση δεν ήταν ικανοποιητική. Η 2<sup>η</sup> προσέγγιση η οποία θα παρουσιαστεί παρακάτω βασίζεται στη μεταβατική αγωγή θερμότητας, που συμβαίνει στο στάδιο θερμικής κατεργασίας δηλαδή στο στάδιο της βαφής και της επαναφοράς.

Πραγματοποιήθηκε μια σύντομη προκαταρκτική εργασία σχετικά με τα μηχανικά χαρακτηριστικά των ΧΟΣ προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα επέκτασης της πρόβλεψης από το όριο διαρροής σε άλλα μηχανικά χαρακτηριστικά. Στα γραφήματα 5.11 και 5.12 παρουσιάζεται η σχέση του ορίου διαρροής με το όριο θραύσης και την ολκιμότητα για τις διαμέτρους φ18 έως φ25. Είναι εμφανής η σχέση του ορίου διαρροής με το όριο θραύσης. Αντιθέτως η σχέση του ορίου διαρροής με την πλαστική παραμόρφωση δεν είναι ξεκάθαρη.



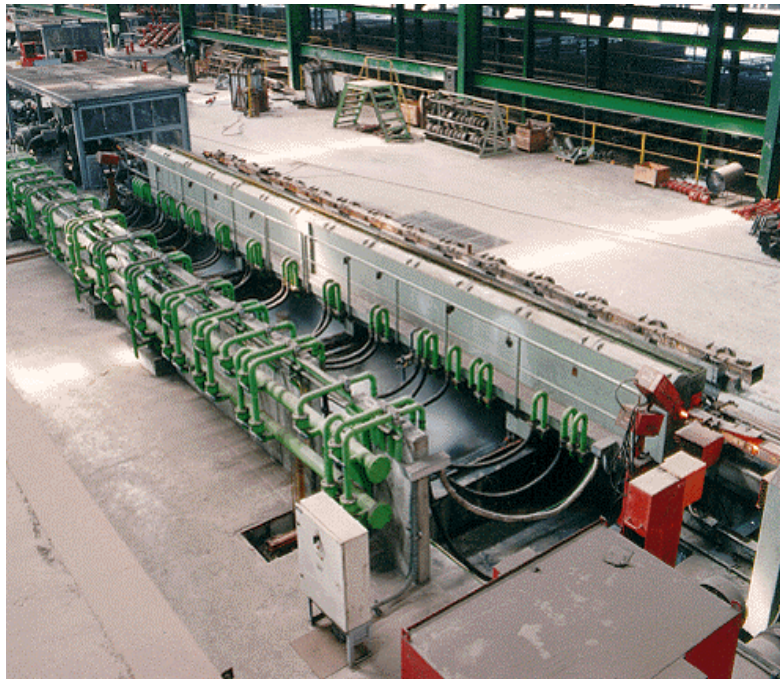
Γράφημα 5.11 Διάγραμμα συσχέτισης του ορίου διαρροής με την εφελκυστική αντοχή



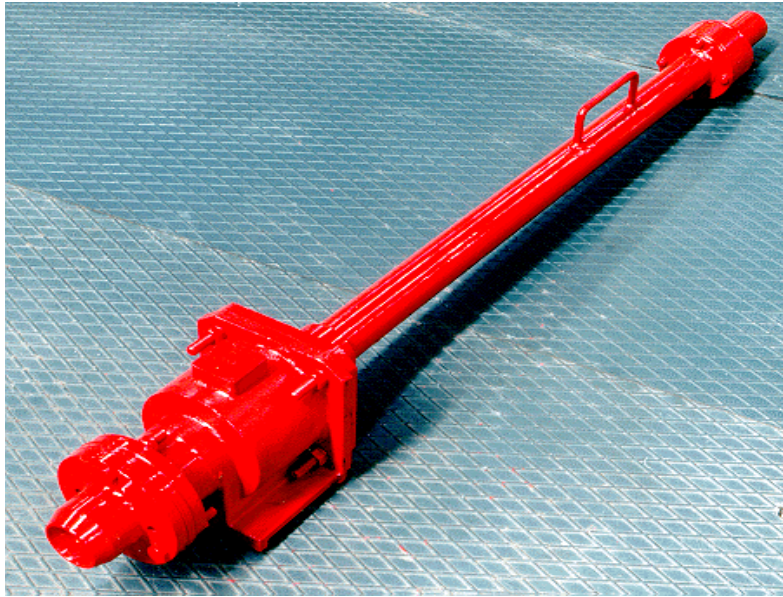
Γράφημα 5.12 Διάγραμμα συσχέτισης του ορίου διαρροής με την πλαστική παραμόρφωση



Στη βιομηχανική πράξη, η βαφή επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικών συσκευών που εκτοξεύουν νερό υπό πίεση στο προϊόν (βλ. εικόνα 5.1, 5.2). Η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ψυχρού ύδατος και του θερμού προϊόντος είναι της τάξης των  $800 - 1000^{\circ}C$  και ο μηχανισμός μεταφοράς θερμότητας είναι βρασμός σε ένα πολύ λεπτό οριακό στρώμα κοντά στη διεπιφάνεια υγρού - στερεού. Διάφοροι ερευνητές δίνουν μεγάλες τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας  $h(kW/m^2/K)$  με την αύξηση της πίεσης του νερού. **Η τυπική περιοχή τιμών για πίεση λειτουργίας της τάξης των  $P \approx 10bar$  και  $\Delta T \approx 1000^{\circ}C$  είναι  $h \approx 38 - 40kW/m^2/K$ .**



Εικόνα 5.1 Μακροσκοπική παρατήρηση του υδροδοχείου ψύξης QTΒ



Εικόνα 5.2 Το υδροδοχείο ψύξης εσωτερικά του QTB μέσα από το οποίο περνάει η ράβδος και σε αντίθετη κατεύθυνση το νερό

Σύμφωνα με τα γραφήματα 5.5 και 5.6 οι συνθήκες ψύξης διαφέρουν σε κάθε γραμμή μιας και οι γραμμές των άκρων ψύχονται με διαφορετικό ρυθμό και κατά κανόνα γρηγορότερα. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η μελέτη να γίνει αρκετά πολύπλοκη. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση εστιάστηκε μόνο στις μη διαχωριζόμενες διαστάσεις για τις ονομαστικές διαμέτρους  $\phi 18$  έως  $\phi 25$  mm (πλήθος 258 περιπτώσεων) και παρουσιάζουν κοινή μηχανολογική διάταξη παραγωγής (βλ. Πίνακα 5.10). Οι περιπτώσεις που αναλύονται έχουν ληφθεί σε συνθήκες κανονικής ροής της παραγωγής, δηλαδή δεν συμπεριλαμβάνονται περιπτώσεις έναρξης και λήξης λειτουργίας.

Όνομαστική Διάμετρος (mm)	18		20		22		25	
Βασικές Παράμετροι Παραγωγής	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Θερμοκρασία Ωστενιτοποίησης, $T_f$ (°C)	970	1066	989	1076	1014	1074	976	1076
Θερμοκρασία μετά την βαφή, $T_a$ (°C)	507	556	510	562	504	525	486	522
Διάρκεια Βαφής, $t_{αTB}$ (s)	1,18		1,27		1,44		1,91	
Ταχύτητα έλασης, $RS$ (m/s)	15,0		12,3		14,0		9,0	
<b>Χημική σύσταση (% κ.β.)</b>								
Άνθρακας, <b>C</b>	0,19	0,23	0,19	0,26	0,22	0,25	0,20	0,24
Μαγγάνιο, <b>Mn</b>	0,94	1,07	0,94	1,14	0,97	1,08	0,95	1,17
Πυρίτιο, <b>Si</b>	0,19	0,24	0,16	0,28	0,20	0,24	0,17	0,28
Νικέλιο, <b>Ni</b>	0,09	0,12	0,09	0,16	0,10	0,13	0,09	0,13
Χρώμιο, <b>Cr</b>	0,09	0,19	0,05	0,20	0,10	0,13	0,04	0,18
Χαλκός, <b>Cu</b>	0,37	0,62	0,37	0,72	0,51	0,70	0,38	0,65
Μολυβδαίνιο, <b>Mo</b>	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,01	0,05
Ισοδύναμη τιμή σε άνθρακα, <b>Ceq</b>	0,42	0,47	0,41	0,49	0,43	0,50	0,42	0,48
<b>Μηχανικά Χαρακτηριστικά</b>								
Όνομαστικό Όριο Διαρροής, $R_{eH, nom}$ (MPa)	530	561	515	566	535	570	541	601
Πραγματικό Όριο Διαρροής, $R_{eH, πειραματικό}$ (MPa)	513	562	515	563	549	572	543	596
Εφελκυστική Αντοχή, $R_m$ (MPa)	622	676	611	695	637	693	637	706
Λόγος $R_m / R_{eH, nom}$	1,18	1,25	1,17	1,26	1,17	1,24	1,16	1,23
Μάζα/Μέτρο, $m$ (kgf/m)	1,969	2,078	2,43	2,544	2,859	3,025	3,64	3,986
Ομοιόμορφη Πλαστική Παραμόρφωση, $Agt$ (%)	9,6	12,5	8,8	13,2	10,5	11,9	9,3	13,1
Πλαστική Παραμόρφωση στην Θραύση, $\epsilon$ (%)	20,0	22,5	18,0	23,0	21,0	23,0	19,0	24,0
Πλήθος παρατηρήσεων	31		102		11		114	

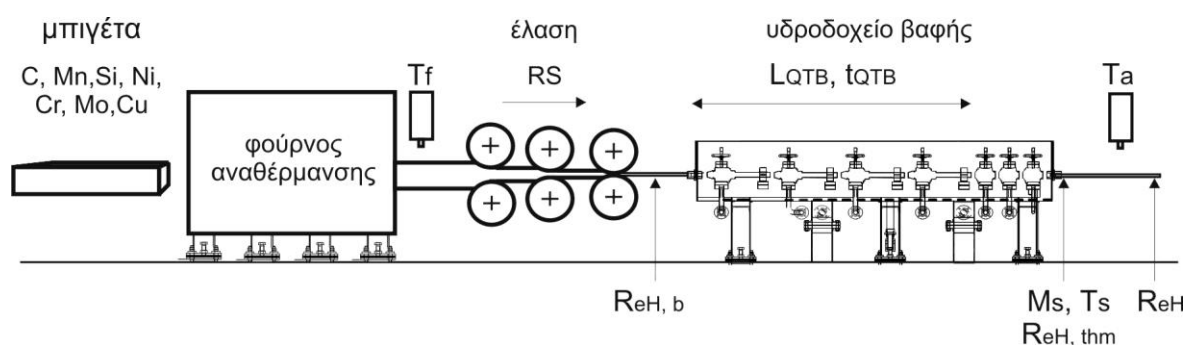
Πίνακας 5.10 Διάμετροι 18 – 25 Ελάχιστη και μέγιστη τιμή παραμέτρων παραγωγής, χημικής σύστασης και μηχανικών χαρακτηριστικών που χρησιμοποιήθηκαν στην επεξεργασία



Εικόνα 5.3 Μεταλλουργική διεργασία κατά την οποία καθορίζεται η κραμμάτωση του μείγματος

Η μέθοδος παραγωγής των χαλύβων απεικονίζεται στο Γράφημα 5.11X. Μπιγέτα ορισμένης χημικής σύστασης και διαστάσεων τροφοδοτείται στον φούρνο

αναθέρμανσης με σκοπό την ωστενιτοποίηση για την θερμή έλαση που ακολουθεί. Η θερμοκρασία εξόδου από τον φούρνο καταγράφεται με την βοήθεια τοποθετημένου πυρομέτρου ( $T_f$ ) και η έλαση πραγματοποιείται με συγκεκριμένη ταχύτητα προώθησης ( $RS$ ). Μετά το τελευταίο έλαστρο, η θερμή ράβδος εισέρχεται στο υδροδοχείο απότομης ψύξης (στάδιο βαφής) το οποίο χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένο μήκος ( $L_{QTB}$ ). Ο χρόνος βαφής ( $t_{QTB}$ ) ταυτίζεται με τον χρόνο παραμονής τμήματος ράβδου εντός του υδροδοχείου και καθορίζεται από την ταχύτητα έλασης ( $RS$ ). Με την έξοδο της ράβδου από το υδροδοχείο βαφής ξεκινάει και το στάδιο επαναφοράς. Σε σταθερή απόσταση από το υδροδοχείο μετράται η θερμοκρασία που αποκτά η ράβδος λόγω της θερμότητας που διαχέεται από το εσωτερικό προς την επιφάνεια της ράβδου ( $T_a$ ). Σημειώνεται ότι, η θερμοκρασία αυτή δεν ταυτίζεται με την πραγματική θερμοκρασία επαναφοράς και είναι κατά κανόνα μικρότερη.



Σχήμα 5.11 Σχηματική αναπαράσταση βασικών σταδίων παραγωγής χαλύβων οπλισμού θερμής έλασης με άμεση θερμική κατεργασία όπου σημειώνεται η θέση λήψης των βασικών παραμέτρων παραγωγής καθώς επίσης και των υπολογιζόμενων στοιχείων του μοντέλου.



Εικόνα 5.4 Έξοδος της μπιγιέτας από το φούρνο αναθέρμανσης και μέτρηση της θερμοκρασίας  $T_f$  από πυρόμετρο σε συγκεκριμένη απόσταση από τον φούρνο

Το όριο διαρροής της ράβδου μετά από την θερμή έλαση και την άμεση θερμική κατεργασία ( $R_{eH, \text{ υπολογισμένο}}$ ) προσεγγίζεται σε δύο στάδια: α) θερμής έλασης ( $R_{eH, b}$ ) και β) θερμικής κατεργασίας ( $R_{eH, thm}$ ):

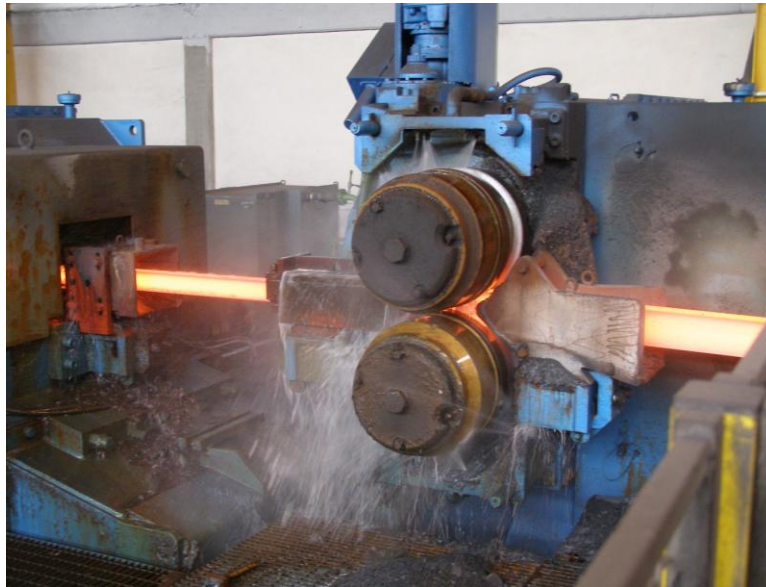
$$R_{eH, \text{ υπολογισμένο}} = R_{eH, b} + R_{eH, thm} \quad (13)$$

Το όριο διαρροής που θα εμφάνιζε η ράβδος αν δεν ακολουθούσε θερμική κατεργασία ( $R_{eH, b}$ ) και είναι πρακτικά συνάρτηση της χημικής σύστασης και της πραγματικής ακτίνας  $R$  υπολογίζεται σύμφωνα με την σχέση [6]:

$$R_{eH, b} = 0,8 \{ 321 - 12040 \cdot R + 100 \cdot [6,16 \cdot C + 1,35 \cdot Mn + 1,21 \cdot Si + 0,62 \cdot Cr + 0,44 \cdot Cu] \} \quad (14)$$

όπου οι περιεκτικότητες των στοιχείων λαμβάνονται σε % κ.β. και η πραγματική ακτίνα (σε m) υπολογίζεται από την μετρούμενη μάζα ανά μέτρο (kg/m), σύμφωνα με την σχέση:

$$R(m) = [(kg/m)/(\pi \cdot \rho)]^{0,5} \quad (15)$$



Εικόνα 5.5 Η μέθοδος της θερμής έλασης όπου η ράβδος περνάει διαδοχικά τα έλαστρα. Φαίνεται η μείωση της διατομής της

Η αύξηση του ορίου διαρροής που οφείλεται στην άμεση θερμική κατεργασία μετά την έλαση, εκτιμάται υπολογίζοντας την θερμοκρασία στην επιφάνεια της ράβδου στο τέλος του υδροδοχείου βαφής ( $T_s$ ) από σχέση της μορφής [31]:

$$(T_s - T_w) / (T_f - T_w) = 2 \{ \xi_1 \exp(-k_1^2 Fo) + \xi_2 \exp(-k_2^2 Fo) \} \quad (16)$$

όπου  $T_w$ : η θερμοκρασία του νερού ψύξης,  $T_f$ : η θερμοκρασία ωστενιτοποίησης,  $Fo$ : ο αδιάστατος αριθμός Fourier και  $\xi_1$ ,  $\xi_2$ ,  $k_1$  και  $k_2$  σταθερές που καθορίστηκαν για την γραμμή παραγωγής.

Από τη θεωρία για σώματα σχήματος κυλίνδρου όπως παρουσιάζονται στην παρούσα εργασία στις ράβδους σπλισμού σκυροδέματος ισχύουν :

$$\text{Συσχέτιση θερμοκρασίας (Relative Temperature)} \equiv \frac{T - T_f}{T_i - T_f} \quad (17)$$

$$\text{Ο αριθμός Fourier } F_0 \equiv \frac{a \Delta t}{R^2} = \frac{k \Delta t}{\rho c_p R^2} \quad (18)$$

$$\text{Ο αριθμός Biot } B_i \equiv \frac{hR}{k} \quad (19)$$

$$\text{Προσδιοριζόμενη θέση (Relative Position)} \equiv \frac{r}{R} \quad (20)$$

Αρχικά θεωρήθηκε η προσδιοριζόμενη θέση  $\frac{r}{R} = 1$  ότι δηλαδή η επεξεργασία γίνεται στην επιφάνεια. Για κυλινδρικές χαλύβδινες ράβδους ισχύει :

Αν ο  $B_i \leq 0,1$  τότε για τα νευτωνικά υγρά ισχύει :

$$T_i = T_{furnace}, \quad (21)$$

$T_f$  : θερμοκρασία νερού ψύξης

$$T_{surface} = T_{aprons} \quad (22)$$

$T_s$  : θερμοκρασία στην επιφάνεια της ράβδου

$T_a$  : θερμοκρασία επαναφοράς

Ενδεικτικά οι υπολογισμοί

Από τους τύπους στην επιφάνεια και για  $\frac{r}{R} = 1$  :

$$\frac{T_a - T_f}{T_i - T_f} \cong \frac{540 - 30}{1050 - 30} = \frac{510}{1020} = 0,50 \quad (23)$$

$$\frac{1}{B_i} = \frac{hR}{k}, \quad (24)$$

$$h = 38000 \frac{w}{m^2 \cdot k}, \quad (25)$$

$k = 28 \frac{W}{m \cdot K}$ , το k είναι ίδιο για όλες τις διαμέτρους γιατί εξαρτάται μόνο από το υλικό.

$$R = 0,01$$

$$m = \rho \cdot V = 7850 \left( \frac{kg}{m^3} \right) \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L \quad (26)$$

Όπου L η διάρκεια ψύξης

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (27)$$

Όπου α είναι ο συντελεστής θερμικής διαχυτότητας

$$F_o = \frac{\alpha \cdot t}{R^2} = \frac{k \cdot t}{\rho \cdot c_p \cdot R^2} = \frac{28 \cdot dt_{QTB}}{7850 \cdot 700 \cdot R^2} \cong 7,6 \cdot 10^{-2} \quad (28)$$

$$dt_{QTB} \cong 1,5$$

$$R^2 \cong 0,0001$$

Άρα ο τύπος γίνεται :

$$F_o = (k \cdot t_{QTB}) / (c_p \cdot \rho \cdot R^2) \quad (29)(5)$$

Στους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται οι εξής τιμές φυσικών σταθερών: πυκνότητα  $\rho=7850 \text{kg/m}^3$ , θερμική αγωγιμότητα  $k=40 \text{W/(m} \cdot \text{K)}$  και ειδική θερμότητα  $c_p=870 \text{J/(kg} \cdot \text{K)}$ .

Η θερμοκρασία  $M_s$  κάτω από την οποία αρχίζει να πραγματοποιείται μαρτενσιτικός μετασχηματισμός υπολογίζεται από την σχέση [8]:

$$M_s (^{\circ}\text{C}) = 500 - 300 \cdot C - 33,3 \cdot \text{Mn} - 22,2 \cdot \text{Cr} - 16,7 \cdot \text{Ni} - 11,1 \cdot (\text{Si} + \text{Mo}) \quad (30)(6)$$



Κατά την επαναφορά του μαρτενσίτη διακόπτεται η ψύξη με νερό και η ράβδος ψύχεται ελεύθερα στον αέρα. Η μεταφορά θερμότητας όμως είναι πολύ αργή γι' αυτό και ο θερμός πυρήνας διαχέει την θερμότητα του προς την εξωτερική επιφάνεια του υλικού τείνοντας προς ίσο-θερμοκρασιακή κατανομή εντός του χάλυβα. Η μεταφορά θερμότητας από την χαλύβδινη ράβδο προς τον αέρα είναι μηδαμινή. Η τιμή του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας είναι της τάξης  $h \approx 0.05 - 0.20 \text{ kW} / \text{m}^2 / \text{K}$ .

Η θερμοκρασία επαναφοράς σχετίζεται με την ταχύτητα έλασης και με την διάμετρο. Γιατί αν σε ράβδο μεγάλης διαμέτρου π. χ. φ20 αυξηθεί η ταχύτητα της γραμμής έλασης, η μέτρηση του πυρομέτρου που βρίσκεται σε συγκεκριμένη πάντα θέση δεν θα είναι η τελική θερμοκρασία επαναφοράς μιας και ο πυρήνας χρειάζεται κάποιο χρόνο έτσι ώστε να διαχυθεί η ενέργεια από τον πυρήνα του προς την επιφάνεια (αυτή ήταν και μια βασική δυσκολία επίλυσης του μοντέλου).

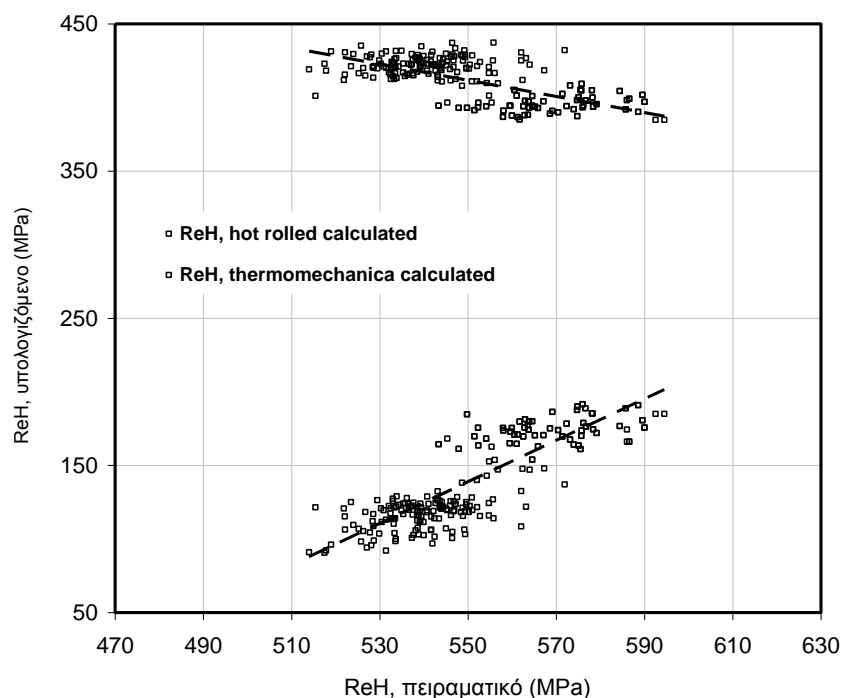
Στατιστική ανάλυση των παρατηρήσεων επιβεβαίωσε τα παραπάνω, και έδειξε ότι το όριο διαρροής των χάλυβων που οφείλεται στην θερμική κατεργασία εξαρτάται από τους ανεξάρτητους παράγοντες:  $M_s - T_s$ , θερμοκρασία μετά την βαφή  $T_a$  και ταχύτητα έλασης  $RS$  με την ακόλουθη συσχέτιση:

$$R_{eH, thm} = 388 + 0,842 \cdot (M_s - T_s) - 0,546 \cdot (T_a + 7,694 \cdot RS) \quad (31)$$

Από τα παραπάνω καθίσταται σαφές, ότι πρωταρχικό ρόλο στη μέθοδο Tempcore κατέχει το πρώτο στάδιο της κατεργασίας.

Σύμφωνα με την σχέση 13, η συνολική αντοχή καθορίζεται από δύο κύριους παράγοντες: α) θερμής έλασης ( $R_{eH,b}$ ) και β) θερμικής κατεργασίας ( $R_{eH, thm}$ ). Στο Γράφημα 5.12 παρουσιάζεται η συνεισφορά του κάθε παράγοντα βάσει των υπολογισμών μας. Παρατηρείται ότι **το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής οφείλεται στην κραμάτωση του υλικού (75 - 80%) ενώ η θερμική κατεργασία προσδίδει μικρότερο μέρος της συνολικής αντοχής**. Επιπλέον παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η αντοχή των ΧΟΣ, τόσο λιγότερη είναι συνεισφορά της θερμικής κατεργασίας που υποδεικνύει μικρότερη αποτελεσματικότητα της διεργασίας βαφής. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αύξησης της κραμάτωσης οδηγεί σε αύξηση της αντοχής αλλά παράλληλα σε μείωση της θερμοκρασίας  $M_s$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι υπάρχει ένας

βέλτιστος συνδυασμός κραμάτωσης και βαφής έτσι ώστε να αυξάνεται η συνεισφορά της αντοχής που επιθυμούμε να δώσουμε μέσω θερμικής κατεργασίας.



Γράφημα 5.12 Η επίδραση της έλασης, της βαφής και της επαναφοράς στο όριο διαρροής

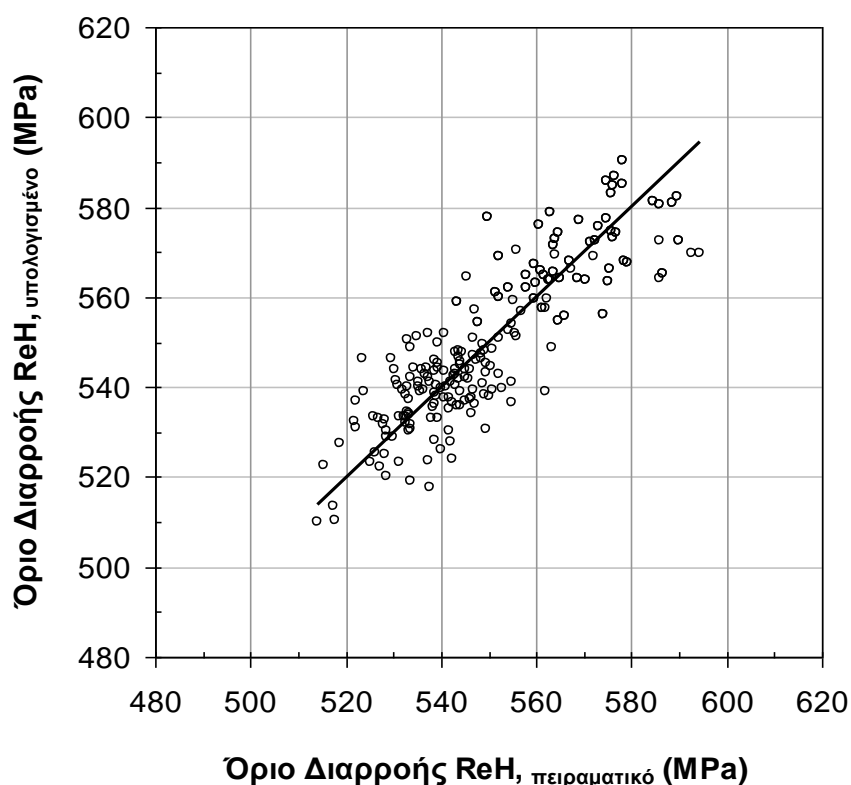
### Ακρίβεια μαθηματικού μοντέλου

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, σύμφωνα με τα παραπάνω, λαμβάνοντας υπόψη την χημική σύσταση των χαλύβων, την θερμοκρασία αναθέρμανσης, την διάμετρο των ράβδων, την ταχύτητα έλασης, την διάρκεια βαφής και την θερμοκρασία μετά την βαφή προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το όριο διαρροής των ράβδων που μετρήθηκε πειραματικά ( $R_{eH, \text{πειραματικό}}$ ), Γράφημα 4.μ. Τα αποτελέσματα παρουσιάζουν τυπική απόκλιση από τις πραγματικές τιμές ίση με (+/-) 9,3 MPa που διαμορφώνουν επίπεδο εμπιστοσύνης με 90% βεβαιότητα, ότι το 95% των υπολογισμών κυμαίνεται σε εύρος (+/-) 16 MPa από τις πραγματικές όπως φαίνεται από τον πίνακα 5.11.

ReH πειραματικό - υπολογιζόμεν	
Avg	7,24
StDev	9,30
min	-27,92
max	24,82
Range	52,73

Παράμετροι		περιορισμοί	
(#)		min	max
Tw	25	25,00	30,00
h	39000	3700,00	41000,00
k	40	30,00	40,00
p	7850	7850,00	7850,00
cp	870	870,00	900,00
Ms	0,883513	1,00	1,00
ξ1	0,330276	0,200	0,450
ξ2	-0,355474	-0,500	-0,200
λL1	2,708202	2,000	3,000
λL2	4,025149	3,000	4,500

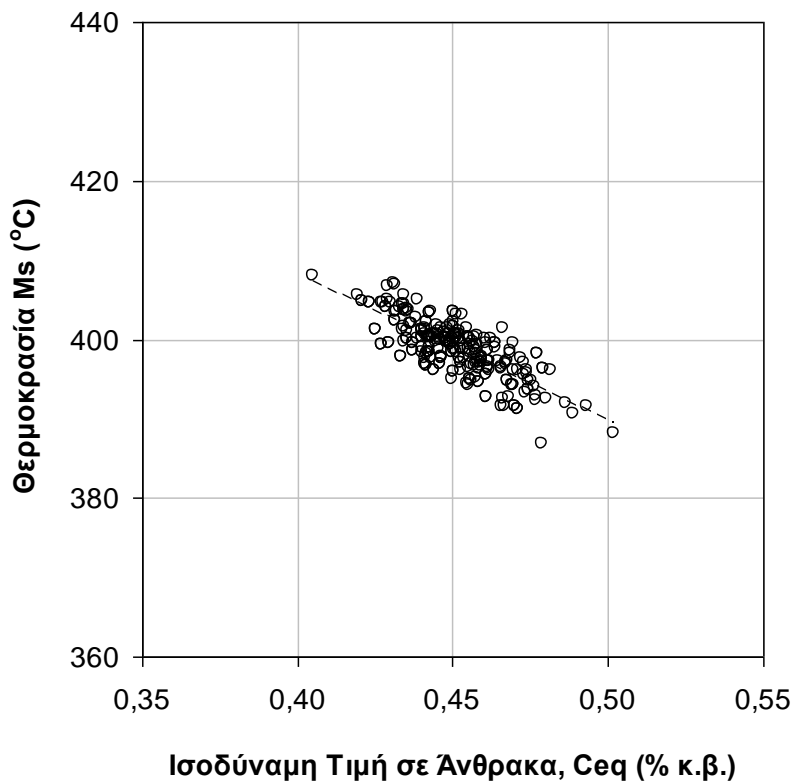
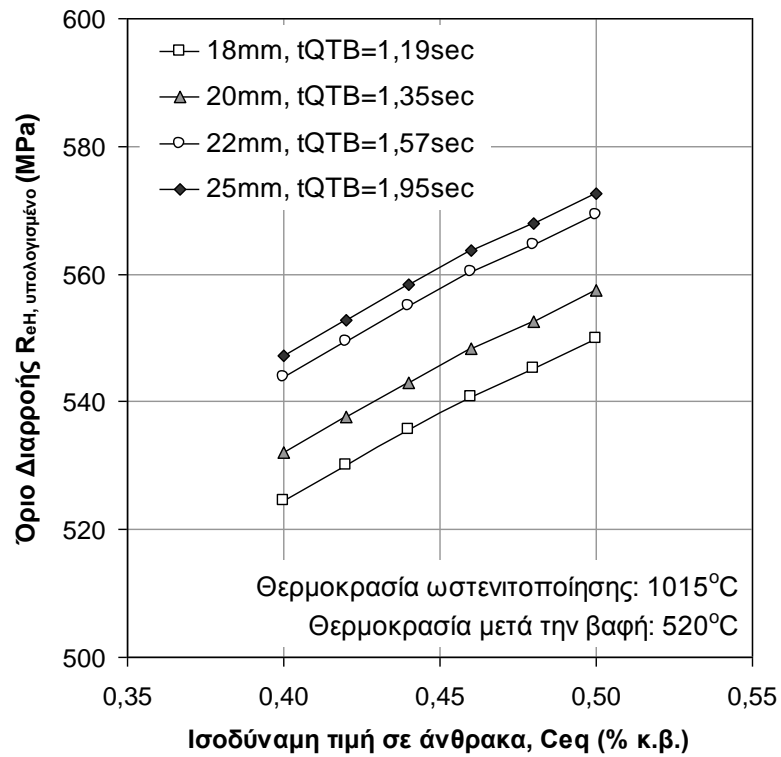
Πίνακας 5.11 Τιμές των μεταβλητών και σταθερών με βάση τους οποίους επιχειρείται η πρόβλεψη



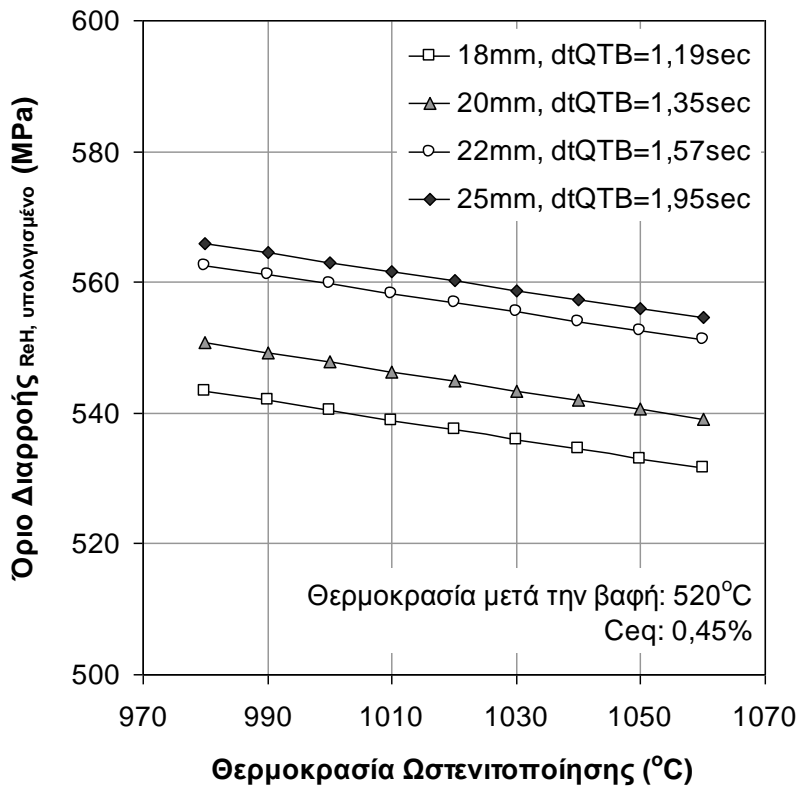
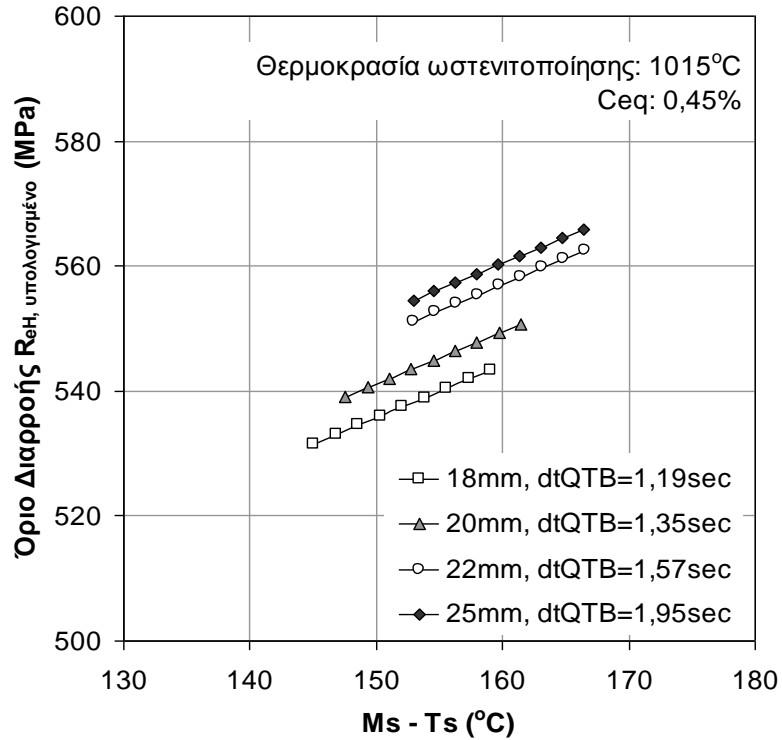
Γράφημα 5.13 Σύγκριση υπολογισμένων ( $R_{eH, \text{υπολογισμένο}}$ ) και πειραματικών ( $R_{eH, \text{πειραματικό}}$ ) τιμών ορίου διαρροής.

Από την ανάλυση των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι, αύξηση της κραμάτωσης των χαλύβων, κατά 0,04% της τιμής σε ισοδύναμο άνθρακα ( $C_{eq}$ ), οδηγεί σε αύξηση  $\approx 10$ MPa του ορίου διαρροής ( $R_{eH}$ ) των χαλύβων οπλισμού (Γράφημα 5.14). Η αύξηση της ισοδύναμης τιμής σε άνθρακα ( $C_{eq}$ ) προκαλεί όμως μείωση στην θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού ( $M_s$ ) μειώνοντας έτσι, για σταθερές συνθήκες ψύξης, την θερμοκρασιακή διαφορά  $M_s - T_s$  (Γράφημα 5.14). Η μείωση αυτή αντικατοπτρίζει την μείωση της αποτελεσματικότητας της ψύξης και άρα έμμεσα την μείωση του ποσοστού μαρτενσίτη που δημιουργείται. Αντιθέτως, αύξηση της διαφοράς  $M_s - T_s$  κατά  $10^\circ\text{C}$ , δηλαδή της εκτιμώμενης αποτελεσματικότητας της βαφής, συνοδεύεται από αύξηση του ορίου διαρροής κατά 8,5 MPa (Γράφημα 5.15).

Η θερμοκρασία έλασης-ωστενιτοποίησης και έμμεσα της εισόδου στο υδροδοχείο βαφής δρα αρνητικά στην αντοχή των χαλύβων. Αποδεικνύεται ότι, αύξηση της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης ( $T_f$ ) κατά  $50^\circ\text{C}$  συνοδεύεται από μείωση του ορίου διαρροής κατά 7 MPa (Γράφημα 5.14) και συνδέεται άμεσα με μείωση της θερμοκρασιακής διαφοράς  $M_s - T_s$ , σύμφωνα με την σχέση (16).

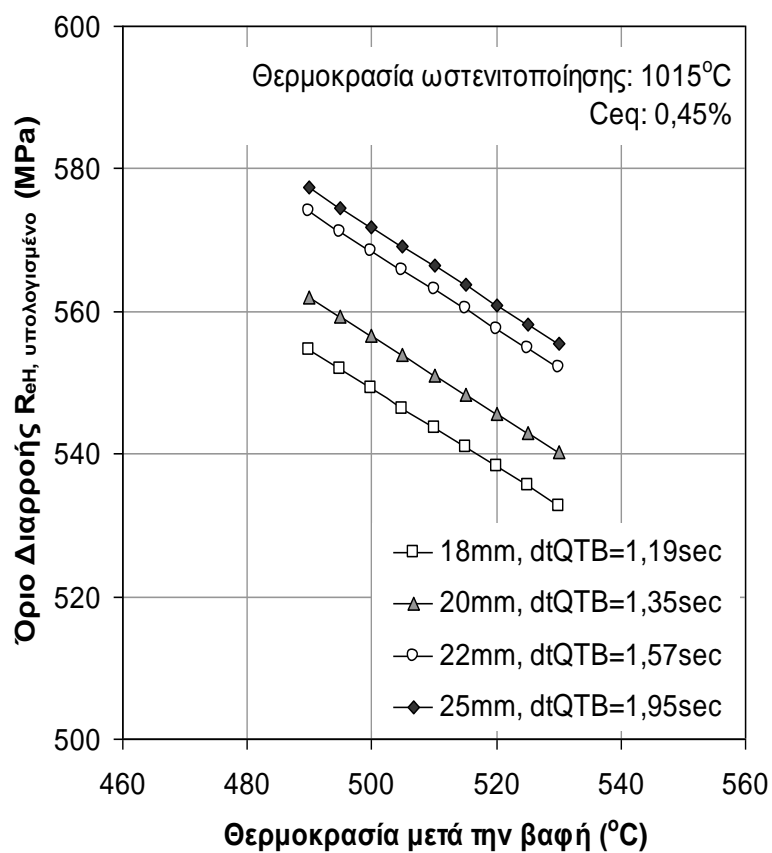


Γράφημα 5.14 Επίδραση της ισοδύναμης τιμής σε άνθρακα ( $C_{eq}$ ) στο υπολογιζόμενο όριο διαρροής των χαλύβων και στην θερμοκρασία έναρξης του μαρτενσιτικού μετασχηματισμού.



Γράφημα 5.15. Επίδραση της θερμοκρασιακής διαφοράς  $M_s - T_s$  και της θερμοκρασίας ωστενιτοποίησης στο υπολογιζόμενο όριο διαρροής των χαλύβων ( $R_{eH}$ , υπολογισμένο ανάλογα με την διάμετρο των ράβδων δεδομένης χημικής σύστασης και θερμοκρασίας μετά την βαφή ( $T_a$ )).

Το όριο διαρροής των χαλύβων επηρεάζεται πέραν της αποτελεσματικότητας της βαφής ( $M_s - T_s$ ) και από την θερμοκρασία επαναφοράς λόγω της διάχυσης θερμότητας από τον εσωτερικό διάπυρο πυρήνα προς την επιφάνεια των ράβδων. Η θερμοκρασία που μετράται μετά την βαφή είναι ενδεικτική της τελικής θερμοκρασίας επαναφοράς μιας και λαμβάνεται σε σταθερό σημείο από την έξοδο του υδροδοχείου βαφής.



Γράφημα 5.16 Επίδραση της θερμοκρασιακής μετά την βαφή στο Όριο διαρροής

Όπως είναι λογικό, όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα έλασης της ράβδου τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της καταγεγραμμένης θερμοκρασίας και της πραγματικής θερμοκρασίας επαναφοράς μιας και στην θέση αυτή η επιφάνεια της ράβδου δεν έχει προλάβει να φτάσει την τελική θερμοκρασία επαναφοράς. Για αυτόν τον λόγο στην σχέση (31), σημειώνεται η αρνητική επίδραση της καταγεγραμμένης θερμοκρασίας μετά την βαφή ( $T_a$ ) σε συνδυασμό με την ταχύτητα έλασης ( $RS$ ) που γενικά είναι μεγαλύτερη στις μικρότερες διαμέτρους χαλύβων οπλισμού (Γράφημα 5.16).



Εικόνα 5.6 Το τραπέζι επαναφοράς, η ράβδος αφήνεται να ψυχθεί στην θερμοκρασία περιβάλλοντος και αποκτά την θερμοκρασία επαναφοράς ομοιόμορφα.



## 6.0 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε, λαμβάνοντας υπόψη την χημική σύσταση των χαλύβων, την θερμοκρασία αναθέρμανσης, την διάμετρο των ράβδων, την ταχύτητα έλασης, την διάρκεια βαφής και την θερμοκρασία μετά την βαφή προσεγγίζει με ικανοποιητική ακρίβεια το όριο διαρροής των ράβδων που μετρήθηκε πειραματικά. Σύμφωνα με το μοντέλο που αναπτύσσεται, μπορούν να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις κύριων παραμέτρων, του σταδίου βαφής και επαναφοράς, στην αντοχή των χαλύβων οπλισμού με στόχο των ακριβέστερο έλεγχο των παραγωγικών διεργασιών.

## 7.0 Βιβλιογραφία

1. Simon P., Economopoulos M., Nilles P. “Tempcore: A new process for the production of high-quality reinforcing bars”, Iron and Steel Engineer, March (1984) 53-57.
2. Economopoulos M., Respen Y., Lessel G., Steffes G. “Application of the Tempcore Process to the Fabrication of High Yield Strength Concrete Bars”, C.R.M. No. 45, December 1975, 1-17.
3. Γ.Δ.Παπαδημητρίου «Γενική Μεταλλογνωσία II – Τα κράματα» Ε.Μ.Π., Αθήνα 1993, 142-155, 34, 185-190.
4. Rehm G., Russwurm D. “Assessment of concrete reinforcing bars made by the Tempcore process”, Betonwerk Fertigteil-Technik 6 (1977) 300-307.
5. Σισμάνης Π. “Διαδικασία θερμικής κατεργασίας χαλύβων για οπλισμένο σκυρόδεμα – Θεωρητικά και Πρακτικά συμπεράσματα”, Πρακτικά 13ου Εθνικού Συνέδριου Οπλισμένου Σκυροδέματος, Ρέθυμνο, Κρήτη, 473-480.
6. Kumar A., Singhai L. K., Sarna S. K. “Mathematical model for predicting the thermal and mechanical behavior of rebar during quenching and self tempering”, Steel Research, 66 (11) (1995) 476-481.
7. Çetinel H., Toparli M., Özsoyeller L. “A finite element based prediction of the Microstructural evolution of steels subjected to the Tempcore process” Mechanics of Materials 32 (2000) 339-347.

8. Çetinel H., Ozyigit H. A., M., Özsoyeller “Artificial neural networks modeling of mechanical property and microstructure evolution in the Tempcore process” *Computers & Structures* 80 (2002) 213-218.
9. Γ.Δ.Παπαδημητρίου «Γενική Μεταλλογνωσία Ι» Ε.Μ.Π., Αθήνα 1989, 103-116, 159-160.
10. Bakkaloglu A., Effect of processing parameters on the microstructure and properties of an Nb microalloyed steel” *Material Letters* 56 (2002) 200-209.
11. Singh A. P., Prasad A., Prakash K., Sengupta D., Murty G. M. D., Jha S. “Influence of thermomechanical processing and accelerated cooling on microstructures and mechanical properties of plain carbon and microalloyed steels” , *Materials Science and Technology* 15 (1999) 121-126.
12. J. Nikolaou, G. D. Papadimitriou “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 Constr Build Mater* (2003) 14 (8) (2003) 243-254.
13. Dolzhenkov I. E, Chaikovskii O. A, Khudik Y. T, Ivchenko A. V. Influence of heating on structure and properties of quenched and self tempered reinforcing steel. *Steel in the USSR* 17 (1987) 278-281.
14. C. Dumortier, P. Lehert, *ISIJ Int.*, 39 (1999) 10, pp. 980-985
15. T. Vecko-Pirtovsek, I. Perus, G. Kugler, M. Tercelj, *ISIJ Int.*, 49 (2009) 3, pp. 395-401
16. L.A.Dobrzanski, M.Kowalski, J.Madejski, *J. Mater. Proces. Tech.*, 164-165 (2005), pp.1500-1509

17. D.R. Poirier, G.H. Geiger, Transport phenomena in materials processing, 1994, TMS Society, Pennsylvania
  
18. P. Payson, R.A. Grange, The temperature range of martensite formation, 1948, Metals Handbook, ASM