



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ**

**ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΜΗΧΑΝΟΥΡΓΙΚΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΩΝ**

*ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ*

**ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ**  
**ΕΠΙΦΑΝΕΙΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑΒΡΩΣΗ.**

**ΙΑΚΩΒΟΥ ANNA**

**ΒΟΛΟΣ 2005**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗΣ & ΠΛΗΡΟΦΟΡΗΣΗΣ  
ΕΙΔΙΚΗ ΣΥΛΛΟΓΗ «ΓΚΡΙΖΑ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ»**

Αριθ. Εισ.: 4507/1  
Ημερ. Εισ.: 13-07-2005  
Δωρεά: Συγγραφέα  
Ταξιθετικός Κωδικός: ΠΤ – ΜΜΒ  
2005  
ΙΑΚ

© 2005 Ιακώβου Άννα

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ.2).

**Εγκρίθηκε από τα μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής :**

Πρώτος εξεταστής : Δρ. Ν. Βαξεβανίδης  
(Επιβλέπων) Διδάσκων, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής : Δρ. Γ. Πετρόπουλος  
(Επιβλέπων) Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων  
Μηχανικών Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος εξεταστής : Δρ. Γ. Χαϊδεμενόπουλος  
Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών  
Βιομηχανίας, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

*Ευχαριστώ τους επιβλέποντες  
καθηγητές μου, Δρ. Ν. Βαξεβανίδη και  
Δρ. Γ. Πετρόπουλο για την πολύτιμη  
βοήθεια, και καθοδήγησή τους.*

*Αφιερώνω την παρούσα  
διπλωματική εργασία στους γονείς  
μου και στον αδερφό μου.*

---

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

---

Είναι γενικά, γνωστό, ότι δεν υπάρχει απολύτως λεία τεχνική επιφάνεια. Με τον όρο τοπογραφία επιφάνειας ορίζεται το σύνολο των γεωμετρικών αποκλίσεων από την ιδεατή λειότητα. Οι αποκλίσεις αυτές οφείλονται στην κατεργασία που προηγήθηκε, στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες της επιφάνειας του κάθε υλικού, καθώς και στα κρυσταλλογραφικά και χημικά χαρακτηριστικά του.

Η κύρια συνιστώσα της τοπογραφίας είναι η τραχύτητα επιφάνειας. Ποιοτικά, η τραχύτητα επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ότι εκδηλώνεται με τη μορφή κορυφών και κοιλάδων. Η τιμή της τραχύτητας είναι μέγεθος στοχαστικό. Ουσιαστικά η τραχύτητα δεν μετράται αλλά χαρακτηρίζεται. Ο χαρακτηρισμός της τραχύτητας των επιφανειών παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό και την τριβολογική συμπεριφορά των μηχανών, σε προβλήματα όπως η λίπανση, στον έλεγχο της κατεργασίας κ.α.

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα μέτρα τραχύτητας (άνω των 50) με ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα μέτρα αυτά (ή παράμετροι τραχύτητας) κατατάσσονται σε : παραμέτρους ύψους, μήκους, υβριδικές και στατιστικές παραμέτρους. Οι τιμές των παραμέτρων αυτών καταγράφονται με σύγχρονα μετρητικά όργανα, με πλέον διαδεδομένα τα τραχύμετρα και τα προφιλόμετρα.

Η προσπάθεια για μοντελοποίηση των τοπογραφικών επιφανειακών παραμέτρων βοηθά τόσο στον προσδιορισμό και στην κατανόηση της «φύσης» της τραχύτητας μιας επιφάνειας, όσο και στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τα υλικά και την κατεργασία που κάθε φορά χρησιμοποιούνται. Για τη μοντελοποίηση των παραμέτρων αυτών χρειάζονται τόσο οι γνωστές μεταβλητές (ανεξάρτητες), των οποίων τις τιμές θέλουμε να προβλέψουμε, όσο και οι εξαρτημένες μεταβλητές. Οι εξαρτημένες μεταβλητές αφορούν είτε φυσικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού, είτε τις συγκεκριμένες συνθήκες κατεργασίας. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται στατιστικά εργαλεία με πολλές δυνατότητες ως αναφορά τη διεξαγωγή στατιστικών αποτελεσμάτων και διαγραμμάτων. Στόχος είναι να καταρτιστούν ακριβέστερα μοντέλα που με στατιστικές μεθόδους να βελτιώνουν τα αρχικά.

Το πλαίσιο αυτό ακολουθείται και στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η μέθοδος κατεργασίας που εφαρμόστηκε είναι η ηλεκτροδιάβρωση. Η ηλεκτροδιάβρωση (στη συνέχεια: Η/Δ) είναι μια μη-συμβατική κατεργασία αφαίρεσης υλικού που βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στη βιομηχανική πράξη. Η Η/Δ συνίσταται στην αποβολή ηλεκτρικά αγωγίμου υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (κατεργάσιμο τεμάχιο και εργαλείο) βυθισμένων εντός ενός κατάλληλου υγρού (διηλεκτρικό υγρό) με σκοπό την πρόσδοση της επιθυμητής μορφής στο τεμάχιο.

Χρησιμοποιώντας ως ανεξάρτητες μεταβλητές επιλεγμένες παραμέτρους της τραχύτητας και ως εξαρτημένες μεταβλητές τις κύριες συνθήκες κατεργασίας Η/Δς, σκοπός μας είναι η πολυπαραμετρική ανάλυση και η μοντελοποίησης παραμέτρων τραχύτητας επιφανειών κατεργασμένων με Η/Δ. Η μοντελοποίηση των παραμέτρων σκοπό έχει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις παραμέτρους που επιδέχονται μοντελοποίηση και την ακρίβεια της σχετικής διαδικασίας.

Στο 1<sup>ο</sup> Κεφάλαιο παρουσιάζονται οι βασικές έννοιες της τοπογραφίας της κατεργασμένης επιφάνειας και αναλύονται οι παράμετροι της τραχύτητας επιφάνειας που θα μελετηθούν στη συνέχεια.

---

Το 2<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αφορά την ανάλυση της κατεργασίας της Η/Δς. Γίνεται μια εκτενής περιγραφή των δύο τεχνικών Η/Δς που εφαρμόζονται στη βιομηχανική πράξη (Η/Δ αποτύπωσης και Η/Δ σύρματος), Παρουσιάζεται επίσης η αρχή λειτουργίας των εργαλειομηχανών (στη συνέχεια: Ε/Μ) Η/Δς τα δομικά στοιχεία τους, και τα είδη των γεννητριών που χρησιμοποιούνται. Συνοψίζεται επίσης ο μηχανισμός αποβολής υλικού κατά την Η/Δ και η μαθηματική περιγραφή του μηχανισμού αυτού.

Το 3<sup>ο</sup> Κεφάλαιο αναφέρεται στον πειραματικό εξοπλισμό που χρησιμοποιήθηκε και στη διαδικασία που εφαρμόστηκε. Στο κεφάλαιο αυτό καταγράφονται οι ιδιότητες των χαλύβων και τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εξοπλισμού (Ε/Μ Η/Δς και τραχύμετρο/προφιλόμετρο) που χρησιμοποιήθηκαν. Παρουσιάζεται η μέθοδος στατιστικής επεξεργασίας που θα χρησιμοποιηθεί και οι αρχές λειτουργίας του στατιστικού πακέτου με τη βοήθεια του οποίου θα γίνει η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των πειραματικών αποτελεσμάτων. Τα πειραματικά αποτελέσματα αφορούν την καταγραφή των επιλεγμένων παραμέτρων της τραχύτητας και των αντίστοιχων κατατομών τραχύτητας (προφίλ) για δώδεκα διαφορετικές συνθήκες κατεργασίας.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο γίνεται η στατιστική επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων του 4<sup>ου</sup> Κεφαλαίου. Η διαδικασία αυτή γίνεται με σκοπό να μελετηθεί και να μοντελοποιηθεί η μεταβολή των ανεξάρτητων μεταβλητών (επιλεγμένες παράμετροι τραχύτητας) συναρτήσει των εξαρτημένων μεταβλητών (συνθήκες κατεργασίας). Σημειώνεται ότι έχουν επιλεγεί τέσσερα διαφορετικά στατιστικά πρότυπα για την μοντελοποίηση των παραμέτρων της τραχύτητας. Η προσπάθεια εστιάζεται όχι μόνο στην διαπίστωση των παραμέτρων που επιδέχονται μοντελοποίηση αλλά και στην επιλογή του προτύπου που συσχετίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια τα πειραματικά δεδομένα.

Όπου κρίνεται σκόπιμο γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων, καταγραφή συμπερασμάτων και παράθεση διαγραμμάτων με σκοπό την πληρέστερη παρουσίαση και κατανόηση των πειραματικών και στατιστικών αποτελεσμάτων.

Τα γενικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αλλά και οι δυνατές μελλοντικές επεκτάσεις συνοψίζονται στο 6<sup>ο</sup> Κεφάλαιο.

Το κύριο μέρος της εργασίας ολοκληρώνεται με την **Βιβλιογραφία** στην οποία έχουν συμπεριληφθεί όλες οι βιβλιογραφικές πηγές που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της (συγγράμματα, δημοσιεύσεις, σημειώσεις και ιστοσελίδες στο διαδίκτυο).

Τέλος με σκοπό την πληρέστερη καταγραφή διαδικασιών που ακολουθήθηκαν και την πληροφόρηση των ενδιαφερομένων ακολουθούν τα **Παραρτήματα** στα οποία παρατίθενται πίνακες με όλες τις τραχυμετρήσεις και αποτελέσματα όλων των στατιστικών αποτελεσμάτων.

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	3
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ .....	5
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ομοιομορφία επιφάνειας.</b> ....	9
1.1 Βασικές έννοιες.....	9
1.2 Ομοιομορφία επιφάνειας.....	10
1.3 Τοπογραφία επιφάνειας.....	11
1.4 Τραχύτητα επιφάνειας.....	14
1.4.1 Παράμετροι ύψους.....	15
1.4.1.1 Τραχύτητα κεντρικής γραμμής ή μέση αριθμητική τραχύτητα, $R_a$ .....	15
1.4.1.2 Τραχύτητα μέσης τετραγωνικής τιμής ή ενδεικνυόμενη τιμή τραχύτητα, $R_q$ .....	16
1.4.1.3 Μέγιστο ύψος κορυφής, $R_p$ .....	16
1.4.1.4 Μέγιστο βάθος κοιλάδας, $R_v$ .....	17
1.4.1.5 Μέγιστη υψομετρική διαφορά προφίλ, $R_t$ ή $R_{max}$ .....	17
1.4.1.6 Μέσο ύψος κορυφών, $R_{pm}$ .....	17
1.4.1.7 Μέγιστη διαφορά κορυφής από κοιλάδα, $R_y$ .....	17
1.4.1.8 Μέτρηση ύψους δέκα (ή πέντε) σημείων, $R_z$ , $R_z(ISO)$ , $R_z(DIN)$ .....	18
1.4.2 Παράμετροι μήκους.....	18
1.4.2.1 Μέσο διάστημα διαδοχικών τοπικών κορυφών, $R_s$ ή $S$ .....	19
1.4.2.2 Μέσο διάστημα μέσης γραμμής, $R_{sm}$ ή $S_m$ .....	19
1.4.3 Υβριδικές παράμετροι.....	20
1.4.3.1 Η κλίση της κατατομής σε σχέση με την κεντρική γραμμή, $\gamma$ .....	20
1.4.3.2 Η μέση κλίση της κατατομής, $\Delta_a$ .....	20
1.4.3.3 Η RMS κλίση της κατατομής, $\Delta_q$ .....	21
1.4.3.4 Σχετικό μήκος της κατατομής, $l_o$ .....	21
1.4.4 Στατιστικές παράμετροι.....	21
1.4.4.1 Λοξότητα, $R_{sk}$ .....	21
1.4.4.2 Κυρτότητα, $R_{ku}$ .....	22
1.5 Μέτρηση τραχύτητας.....	23
1.6 Τραχύτητα κατεργασμένων επιφανειών.....	25
1.7 Αξιολόγηση των κυριότερων παραμέτρων τραχύτητας.....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup></b> .....	27
<b>Μέρος 1<sup>ο</sup> : Γενικά περί κατεργασιών.</b> ....	27
2.1 Ταξινόμηση κατεργασιών.....	27
2.2 Μη συμβατικές κατεργασίες.....	28
2.3 Ταξινόμηση μη συμβατικών κατεργασιών αποβολής υλικού.....	29

<b>Μέρος 2<sup>ο</sup> : Η κατεργασία της Ηλεκτροδιάβρωσης (Electro Discharge Machining).</b>	<b>30</b>
2.4 Εισαγωγή στην ηλεκτροδιάβρωση	30
2.4.1 Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης	32
2.4.1.1 Βασικά τεχνολογικά στοιχεία	32
2.4.1.2 Είδη γεννητριών	32
2.4.1.3 Ρυθμιστής πρόωσης	35
2.4.1.4 Διηλεκτρικό υγρό	35
2.4.1.5 Τεχνολογικές παράμετροι ηλεκτροδιάβρωσης	35
2.4.1.6 Υλικά κατασκευής εργαλείων ηλεκτροδιάβρωσης	36
2.4.1.7 Μηχανισμός αποβολής υλικού	37
2.4.1.8 Μαθηματική ανάλυση του μηχανισμού αποβολής υλικού κατά την ηλεκτροδιάβρωση	38
2.4.1.9 Ομοιομορφία (πιστότητα) κατεργασμένης επιφάνειας	44
2.4.2 Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος	48
2.5 Συνοπτική αξιολόγηση της ηλεκτροδιάβρωσης	49
2.6 Ηλεκτροδιάβρωση και υπέρηχοι	50
2.7 Ηλεκτροδιάβρωση προηγμένων υλικών	52
2.7.1 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας	52
2.7.2 Κεραμικά	52
2.7.3 Ημιαγωγοί	53
 <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Πειραματικός εξοπλισμός και διαδικασία.</b>	 <b>55</b>
3.1 Υλικά προς κατεργασία	55
3.1.1 SVERKER 21	55
3.1.2 IMPAX	56
3.1.3 ORVAR	57
3.2 Εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης	57
3.3 Μετρητικός εξοπλισμός για την αξιολόγηση της τοπογραφίας επιφάνειας	59
3.3.1 Τραχύμετρο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+	59
3.3.1.1 Διαδικασία μέτρησης επιφάνειας	59
3.3.1.2 Διαφορά τραχύτητας, κυμάτωσης και τελικής μορφής	60
3.3.1.3 Φίλτρα	61
3.3.1.4 Το Software του τραχυμέτρου Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+	62
3.3.1.5 Επιλογή παραμέτρων προς μελέτη, φίλτρου και μήκους αποκοπής	64
3.4 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων	64
3.4.1 Ανάλυση παλινδρόμησης	64
3.4.1.1 Στόχοι	65
3.4.1.2 Πρότυπα παλινδρόμησης	65
3.4.1.3 Απλή γραμμική παλινδρόμηση	66
3.4.1.4 Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση	70
3.4.2 Χρήση στατιστικού πακέτου Minitab 14	72
3.4.2.1 Ανάλυση μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυση παλινδρόμησης με το Minitab 14	73
3.4.2.2 Διαγραμματική απεικόνιση δεδομένων με το Minitab 14	75



---

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Πειραματικά αποτελέσματα.....</b>	<b>78</b>
4.1 Αριθμητικά πειραματικά αποτελέσματα.....	78
4.2 Χάραξη και παρουσίαση καμπυλών.....	80
4.3 Κατατομές τραχύτητας.....	95
4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.....	105
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Στατιστική ανάλυση.....</b>	<b>107</b>
5.1 Γενικά περί μοντελοποίησης.....	107
5.2 Στατιστικά αποτελέσματα.....	108
5.3 Μοντελοποίηση αποτελεσμάτων.....	111
5.3.1 Μοντέλα συσχέτισης για το χάλυβα SVERKER 21.....	112
5.3.2 Μοντέλα συσχέτισης για το χάλυβα IMPAX.....	113
5.3.3 Μοντέλα συσχέτισης για το χάλυβα ORVAR.....	114
5.4 Σύγκριση μοντέλων μέσω σφαλμάτων.....	116
5.5 Διαγράμματα υπολοίπων.....	117
5.5.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων υπολοίπων.....	136
5.6 Τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις.....	136
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες.....</b>	<b>143</b>
6.1 Γενικά συμπεράσματα.....	143
6.2 Μελλοντικές εργασίες.....	145
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>147</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ.....</b>	<b>151</b>



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Ομοιομορφία επιφάνειας.

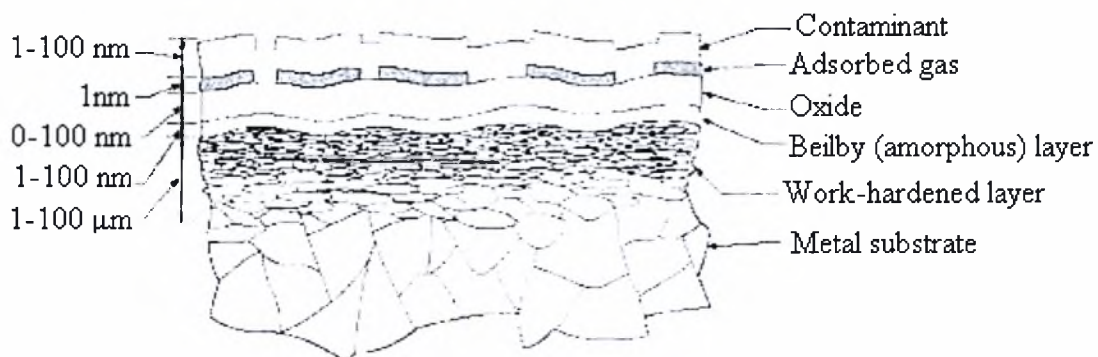
---

### 1.1 Βασικές έννοιες.

Εξ' αιτίας των μηχανικών, θερμικών και χημικών δράσεων που επενεργούν κατά τη μορφοποίηση ενός τεχνολογικού αντικειμένου, η επιφάνεια του γενικά χαρακτηρίζεται από ιδιότητες σημαντικά διαφορετικές από αυτές του υπολοίπου σώματος. Γίνεται κατά συνέπεια η διάκριση μεταξύ ιδιοτήτων επιφάνειας και ιδιοτήτων όγκου ή ιδιοτήτων εσωτερικού του υλικού. Οι ιδιότητες όγκου (bulk properties), καθορίζουν την ολική (μακροσκοπική) μηχανική συμπεριφορά του κατεργασμένου αντικειμένου, ενώ οι ιδιότητες επιφάνειας (surface properties) καθορίζουν χαρακτηριστικά όπως τη συμπεριφορά του τεμαχίου σε επαφή με άλλα σώματα (τριβή, φθορά, αντοχή σε οξείδωση ή/και διάβρωση), την εμφάνιση και τα γεωμετρικά στοιχεία της επιφάνειας, την τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων μέσω θερμικών ή θερμοχημικών διεργασιών, τη συναρμογή και τη λειτουργικότητα του στο πλαίσιο ενός ευρύτερου συναρμοσμένου συγκροτήματος κ.λ.π.

Γίνεται έτσι κατανοητό πως η μελέτη των επιφανειακών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων του κατεργασμένου υλικού αποκτά ιδιαίτερη σημασία, λαμβανομένων υπόψιν και των απαιτήσεων για ελαφρότερες, οικονομικότερες και ασφαλέστερες κατασκευές.

Στο *Σχήμα 1.1* εικονίζεται μία κάθετη τομή κατεργασμένης επιφάνειας με εμφανή την επίδραση της κατεργασίας και του περιβάλλοντος. Το κύριο χαρακτηριστικό είναι η ύπαρξη επάλληλων κατά βάθος στρώσεων που χαρακτηρίζονται από διαφορετική «κατάσταση» (σύσταση, δομή, ιδιότητες). Η ύπαρξη και ο συνδυασμός των διαφόρων στρώσεων προσδιορίζει τελικά την λειτουργική συμπεριφορά της επιφάνειας.



*Σχήμα 1.1:* Κάθετη τομή κατεργασμένης επιφάνειας.

Η μελέτη φαινομένων τριβής, φθοράς και λίπανσης αποτελεί το κύριο αντικείμενο της **τριβολογίας (tribology)** η οποία μελετά τις ιδιότητες και την συμπεριφορά μηχανολογικών στοιχείων που βρίσκονται σε επαφή ή/και σχετική κίνηση μεταξύ τους.

Η αλληλοσυσχέτιση της δομής και των χαρακτηριστικών των επιφανειακών στρωμάτων του υλικού με τις κατεργασίες με τις οποίες προκύπτει η κατεργασμένη τεχνική επιφάνεια και την ολική λειτουργική συμπεριφορά του αντικειμένου εντάσσεται στη γνωστική περιοχή της **μηχανικής των επιφανειών (surface engineering)**. Το σύνολο των μηχανικών, μεταλλουργικών και γεωμετρικών/

---

μορφολογικών χαρακτηριστικών της κατεργασμένης επιφάνειας περιγράφεται με τον όρο **ομοιομορφία** (ή **πιστότητα**) **επιφάνειας (surface integrity)**. Τέλος για την αναφορά, μόνο στα γεωμετρικά στοιχεία της επιφάνειας χρησιμοποιείται ο όρος **τραχύτητα επιφάνειας (surface roughness ή surface finish)**.

Μετά την μορφοποίηση (με κοπή ή διαμόρφωση) ενός εξαρτήματος η επιφάνειά του χαρακτηρίζεται από μία συγκεκριμένη κατάσταση ομοιομορφίας επιφάνειας. Σε αρκετές περιπτώσεις είναι επιθυμητή η αλλαγή των χαρακτηριστικών του επιφανειακού στρώματος (π.χ. δημιουργία στιλπνής επιφάνειας, βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων, μόνωση έναντι διάβρωσης κ.λ.π.). Αυτό επιτυγχάνεται με δύο τρόπους :

- ⇒ με κατεργασία τροποποίησης του επιφανειακού στρώματος (surface treatment),
- ⇒ με επικάλυψη, δηλαδή προσθήκη ενός επιπλέον εξωτερικού στρώματος (surface coatings).

Η μεθοδολογική προσέγγιση της ομοιομορφίας επιφάνειας και η έννοια της τραχύτητας επιφάνειας μελετώνται παρακάτω.

## 1.2 Ομοιομορφία επιφάνειας.

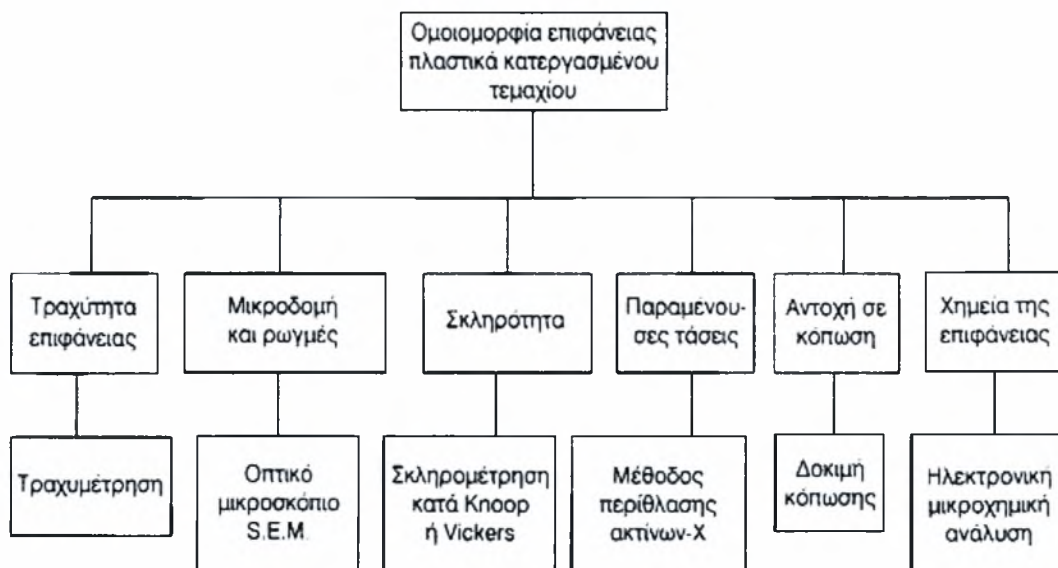
Ο όρος ομοιομορφία επιφάνειας συσχετίζει τις φυσικές ιδιότητες και τη λειτουργική συμπεριφορά μιας επιφάνειας και εμπεριέχει πληροφορίες σχετικά με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας (μορφολογία επιφάνειας) και τα φυσικά, μηχανικά, κρυσταλλογραφικά και χημικά χαρακτηριστικά του υλικού της επιφάνειας, όπως είναι η πλαστική παραμόρφωση, η σκληρότητα, οι παραμένουσες τάσεις, η αντίσταση σε διάβρωση ή οξείδωση, οι αλλαγές στον κρυσταλλικό ιστό και η εμφάνιση μικρο- και μακρο-ελαττωμάτων. Γενικά, η ομοιομορφία επιφάνειας καθορίζεται από μηχανικές και χημικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του υλικού του κατεργασμένου τεμαχίου σε συσχέτισμό με τις υπόλοιπες παραμέτρους της κατεργασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι στην πλειονότητα των κατεργασιών οι μηχανικές, οι θερμικές και οι χημικές φορτίσεις δρουν ταυτόχρονα. Η συσχέτιση επομένως, των αλλαγών στο επιφανειακό στρώμα με κάθε συνιστώσα της φόρτισης είναι πολύ δύσκολη.

Για μεθοδολογικούς, κυρίως, λόγους η μελέτη των αλλαγών της ομοιομορφίας επιφάνειας ως αποτέλεσμα της κατεργασίας μορφοποίησης χωρίζεται σε τέσσερις αλληλοεξαρτώμενες ενότητες/παραμέτρους :

- Μορφολογία επιφάνειας και τραχύτητα επιφάνειας.
- Ζώνη(ες) πλαστικής παραμόρφωσης και μεταλλουργικών αλλαγών.
- Ζώνη(ες) μεταβολής της σκληρότητας λόγω θερμικής ή/και μηχανικής φόρτισης .
- Πεδία παραμενουσών τάσεων.

Για την εκτίμηση των παραμέτρων της ομοιομορφίας επιφάνειας, εφαρμόζεται μια μεγάλη ποικιλία μετρητικών τεχνικών που περιλαμβάνουν τραχυμέτρηση, χρήση μηχανουργικών, μεταλλογραφικών και ηλεκτρονικών μικροσκοπίων, μέτρηση της σκληρότητας και της μικροσκληρότητας, χρήση ακτίνων -x ή μηχανικών μεθόδων για την μέτρηση των παραμενουσών τάσεων καθώς και ένα πλήθος κοινών ή ειδικών μηχανικών δοκιμών (εφελκυσμού, κόπωσης, ερπυσμού, αντοχής σε διάβρωση κ.λ.π.).

Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι συνιστώσες της ομοιομορφίας επιφάνειας και οι συνηθέστερα εφαρμοζόμενες αντίστοιχες μετρητικές μέθοδοι.

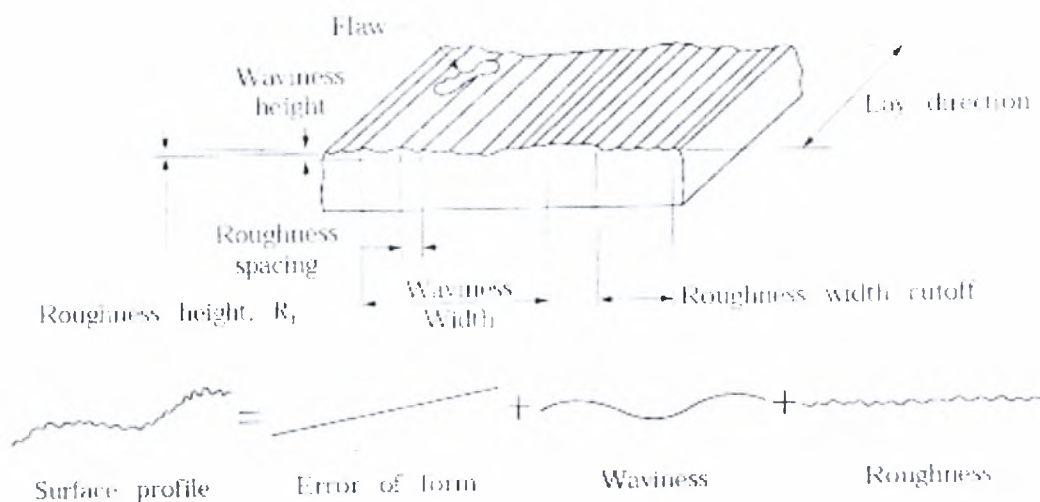


Σχήμα 1.2: Συνιστώσες της ομοιομορφίας επιφάνειας και αντίστοιχες μετρητικές μέθοδοι.

### 1.3 Τοπογραφία επιφάνειας.

Είναι γενικά, γνωστό, ότι δεν υπάρχει απολύτως λεία τεχνική επιφάνεια. Μία κατεργασμένη επιφάνεια χαρακτηρίζεται από ανωμαλίες (εσοχές ή κοιλάδες, εξοχές ή κορυφές, αποφλοιώσεις, ρωγμές κ.λ.π.) που εξαρτώνται από την μέθοδο δημιουργίας της, την λειτουργία της και τον τρόπο επαφής της με άλλα μηχανολογικά στοιχεία και συνοψίζονται με τον περιεκτικό όρο **μορφολογία επιφάνειας** (surface texture). Με δεδομένη τη σημασία της επιφάνειας για τη λειτουργική συμπεριφορά και τη διάρκεια ζωής του εξαρτήματος τα μορφολογικά χαρακτηριστικά της επιφάνειας σήμερα έχουν αναγνωρισθεί μονοσήμαντα και έχουν ταξινομηθεί σε διακριτές ομάδες, βλέπε Σχήμα 1.3. Σύμφωνα με τα ισχύοντα πρότυπα (ISO, DIN, ANSI/ASME) αυτά διακρίνονται σε:

- Ελαττώματα (flaw/defect).
- Κατεύθυνση ιχνών κατεργασίας (lay/directionality).
- Κυμάτωση (waviness).
- Τραχύτητα (roughness).
- Σφάλμα μορφής (error of form).

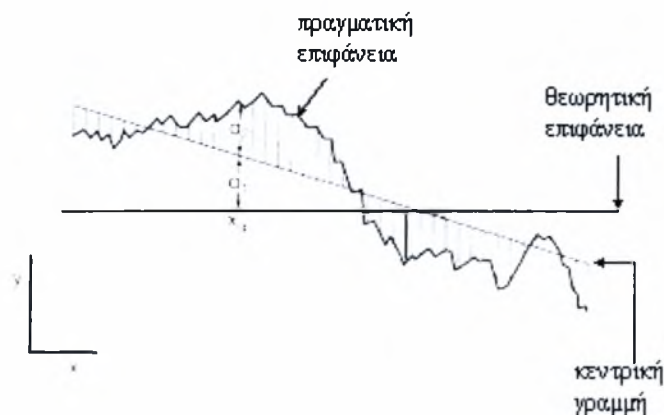


**Σχήμα 1.3:** Χαρακτηριστικά μεγέθη της τρισδιάστατης μορφολογίας της κατεργασμένης επιφάνειας.

Η πλήρης ανάλυση των ανωμαλιών της κατεργασμένης επιφάνειας μπορεί να γίνει είτε σε δύο διαστάσεις (2-D assessment), είτε σε τρεις διαστάσεις (3-D assessment). Η ανάλυση σε δύο διαστάσεις έχει χρησιμοποιηθεί σε διάφορες επιστήμες όπως και στη μηχανολογία για περισσότερο από μισό αιώνα. Η ανάλυση σε δύο διαστάσεις επιλέγεται στις περισσότερες μηχανουργικές κατεργασίες επειδή προκύπτει επιφάνεια με προσανατολισμένα χαρακτηριστικά. Δηλαδή αν  $y$  το ύψος πάνω από τη θεωρητική λεία επιφάνεια του σώματος είναι της μορφής  $y = y(x)$  και όχι της μορφής  $y = y(x,z)$  όπως σε ανάλυση τριών διαστάσεων.

Γενικά, η τομή μιας τεχνικής επιφάνειας από ένα κάθετο (γεωμετρικό) επίπεδο παρουσιάζει τη μορφή του Σχήματος 1.4. Σε τυχαία θέση  $x_a$  η απόκλιση της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια προκύπτει ως άθροισμα :

- της απόκλισης  $a_1$  μιας γραμμής αναφοράς της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια, λόγω εγγενών χαρακτηριστικών της κατεργασίας και
- της απόκλισης  $a_2$ , λόγω ύπαρξης τοπικών κορυφών και κοιλάδων.



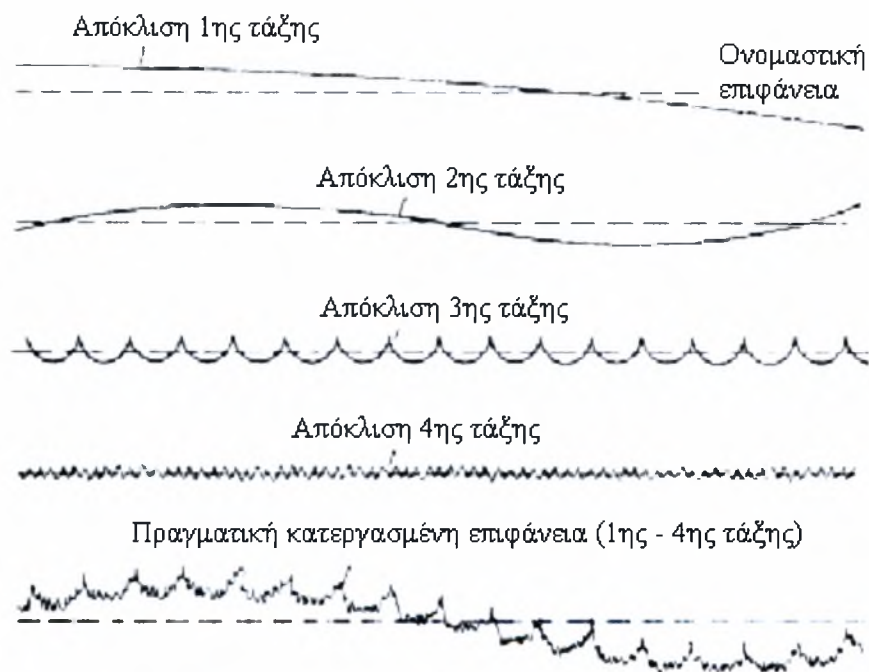
**Σχήμα 1.4:** Απόκλιση θεωρητικής και πραγματικής επιφάνειας (δισδιάστατη προσέγγιση).

Η απόκλιση  $\alpha_1$  είναι μακρογεωμετρικό χαρακτηριστικό της κατεργασμένης επιφάνειας, οφείλεται κατά κανόνα σε εσφαλμένη ρύθμιση της εργαλειομηχανής και ονομάζεται **σφάλμα μορφής** ή απόκλιση 1<sup>ης</sup> τάξης.

Η απόκλιση  $\alpha_2$  αποτελεί άθροισμα :

- ανωμαλιών μεγάλου μήκους κύματος (τάξη μεγέθους 0,5 – 100 mm) που χαρακτηρίζονται ως κυμάτωση (waviness) ή απόκλιση 2<sup>ης</sup> τάξης.
- ανωμαλιών μεσαίου μήκους κύματος (τάξη μεγέθους 1 – 100  $\mu\text{m}$ ) που χαρακτηρίζονται ως τραχύτητα (roughness) ή απόκλιση 3<sup>ης</sup> τάξης.
- ανωμαλιών μικρού μήκους κύματος (τάξη μεγέθους 0,1 – 1  $\mu\text{m}$ ) που χαρακτηρίζονται ως μικροτραχύτητα (microroughness) ή απόκλιση 4<sup>ης</sup> και ανωτέρας τάξης.

Προφανώς, η πραγματική επιφάνεια μπορεί να θεωρηθεί ως υπέρθεση (επαλληλία) των αποκλίσεων όλων των τάξεων, όπως παρουσιάζονται στο *Σχήμα 1.5* σε συνδυασμό και με το *Σχήμα 1.3*.



**Σχήμα 1.5:** Σύνθεση της πραγματικής επιφάνειας με υπέρθεση των αποκλίσεων όλων των τάξεων (δισδιάστατη προσέγγιση).

Κατά DIN 4760 (1982), ως **τραχύτητα** (κατεργασμένης) επιφάνειας (surface roughness) ορίζεται το άθροισμα των αποκλίσεων 3<sup>ης</sup> και ανωτέρας τάξεως, της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια, με αναφορά σ' ένα γεωμετρικό επίπεδο που τέμνει κάθετα την κατεργασμένη επιφάνεια. Οι αποκλίσεις 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> τάξης αποτελούν τα μακρογεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας. Ο Πίνακας 1.1 συνοψίζει τις αποκλίσεις της κατεργασμένης επιφάνειας και τις πιθανές αιτίες εμφάνισης αυτών των αποκλίσεων.

**Πίνακας 1.1:** Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας (DIN 4760).

Τάξη απόκλισης	Χαρακτηριστικά αποκλίσεων	Αιτίες αποκλίσεων
1η	Μη επιπεδότητα Μη στρογγυλότητα	Σφάλματα σε ολισθητήρες εργαλειομηχανής Παραμορφώσεις εργαλειομηχανής κατεργαζομένου τεμαχίου. Εσφαλμένη στήριξη τεμαχίου.
2η	Κυματώσεις	Έκκεντρη τοποθέτηση τεμαχίου ή εργαλείου. Ταλαντώσεις εργαλείου και τεμαχίου. Σημαντική ανομοιογένεια του υλικού του τεμαχίου.
3η	Αυλακώσεις	Μορφή της κόψης του εργαλείου. Κινηματική της κατεργασίας.
4η	Ρωγμές Αποφλοιώσεις κ.λ.π.	Ατέλειες τρόχισης της κόψης του εργαλείου. Φθορά εργαλείου. Τρόπος σχηματισμού του αποβλήτου. Δημιουργία ψευδόκοψης.
5η	Φύση μετάλλου	Τρόπος κρυστάλλωσης μετάλλου. Ανωμαλίες επιφάνειας λόγω χημικών επιδράσεων. Φαινόμενα διάβρωσης.
6η	Κρυσταλλικός σχηματισμός μετάλλου	Φυσικές-χημικές μεταβολές στη δομή του υλικού. Παραμορφώσεις του κρυσταλλικού ιστού (παραμένουσες τάσεις, ολισθήσεις κρυστάλλων).

#### 1.4 Τραχύτητα επιφάνειας.

Ποιοτικά, η τραχύτητα επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ότι εκδηλώνεται με τη μορφή κορυφών και κοιλάδων. Τα χαρακτηριστικά που ενδιαφέρουν είναι το ύψος των κορυφών, το βάθος των κοιλάδων και η απόσταση ανάμεσα τους. Στη γενική περίπτωση, η απόσταση ανάμεσα στις επιφανειακές ανωμαλίες δεν είναι ομοιόμορφη καθ' όλο το μήκος της επιφάνειας και για αυτό το λόγο μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια μόνο μέσω αρμονικής ανάλυσης. Πρακτικά, υπολογίζονται συμβατικά μεγέθη, με μετρήσεις που γίνονται σε ένα συγκεκριμένο μήκος της επιφάνειας και λαμβάνονται υπόψιν οι μέσες τιμές. Γενικά, η μέτρηση των χαρακτηριστικών της τοπογραφίας επιφάνειας παρουσιάζει σημαντικές μετρολογικές ιδιομορφίες. Η τιμή της τραχύτητας είναι μέγεθος στοχαστικό. Ουσιαστικά η τραχύτητα δεν μετράται αλλά χαρακτηρίζεται. Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα μέτρα τραχύτητας (άνω των 50) με ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα μέτρα αυτά (ή παράμετροι τραχύτητας) κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες : **παράμετροι ύψους** (amplitude parameters), **παράμετροι μήκους** (spacing parameters) και **υβριδικές παράμετροι** (hybrid parameters). Μια άλλη κατηγορία παραμέτρων είναι οι **στατιστικές παράμετροι**. Οι παράμετροι αυτές μπορούν να ενταχθούν και στην κατηγορία των παραμέτρων ύψους. Στο κεφάλαιο αυτό όμως, κρίνεται σκόπιμο να εξεταστούν ως ξεχωριστή κατηγορία. Στη μηχανουργική πρακτική χρησιμοποιούνται κυρίως οι παράμετροι ύψους οι οποίες αναφέρονται στις αποστάσεις μεταξύ κορυφών και κοιλάδων, χωρίς αναφορά στην μεταξύ τους απόσταση.

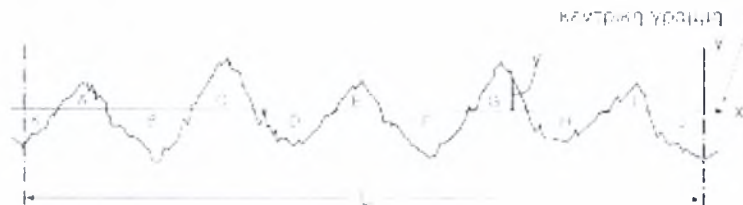
Για την εκτίμηση της τραχύτητας ορίζεται κατ' αρχήν ένα **μήκος μέτρησης** ή **μήκος δειγματοληψίας** (evaluation length/sample length),  $L$ , όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.6*.



Στη συνέχεια ορίζεται μια **γραμμή αναφοράς**, παράλληλη προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας ως προς την οποία αναφέρονται οι κάθετες τοπικές αποκλίσεις  $y_i$ . Στο χρησιμοποιούμενο σήμερα μετρολογικό σύστημα για την εκτίμηση της τραχύτητας και στα αντίστοιχα μετρητικά όργανα ως γραμμή αναφοράς χρησιμοποιείται η λεγόμενη **κεντρική (ή μέση) γραμμή (center line)**. Η κεντρική γραμμή καθορίζεται έτσι ώστε το εμβαδόν των περιοχών ανάμεσα σε αυτή και τις κορυφές να ισούται με το εμβαδόν των περιοχών ανάμεσα σε αυτή και τις κοιλάδες, όπως στο σχήμα *Σχήμα 1.6*.

Ισχύει η εξίσωση :

$$(A) + (C) + (E) + (G) + (I) = (K) + (B) + (D) + (F) + (H)$$



**Σχήμα 1.6:** Μέτρηση τραχύτητας επιφάνειας- ορισμός κεντρικής γραμμής ή γραμμής αναφοράς.

Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούμενα μεγέθη (παράμετροι) τα οποία εκφράζονται ως μέτρα για την εκτίμηση της τραχύτητας επιφάνειας παρουσιάζονται παρακάτω σύμφωνα με την κατηγορία στην οποία ανήκουν.

#### 1.4.1 Παράμετροι ύψους.

Οι παράμετροι ύψους αποτελούν την πλέον σημαντική κατηγορία για το χαρακτηρισμό της τοπογραφίας μιας επιφάνειας. Χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση των κάθετων αποκλίσεων από την επιφάνεια. Περιγραφή για κάθε μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους ύψους, δίνεται παρακάτω.

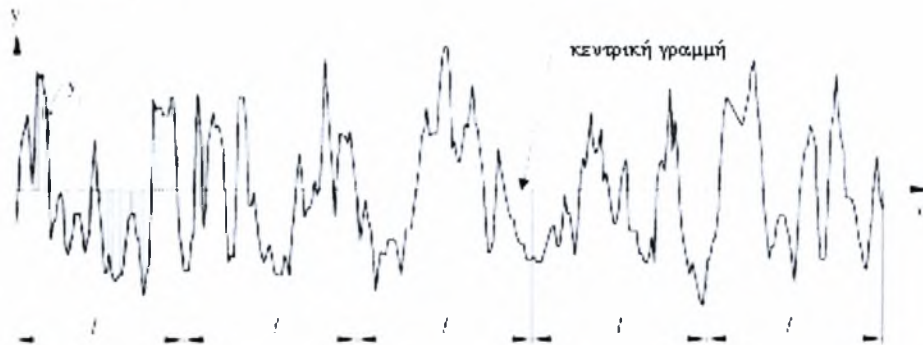
##### 1.4.1.1 Τραχύτητα κεντρικής γραμμής ή μέση αριθμητική τραχύτητα, $R_a$ .

Η μέση αριθμητική τραχύτητα, η οποία είναι γνωστή και ως τραχύτητα κεντρικής γραμμής, είναι η επικρατέστερη παράμετρος για έναν πρώτο έλεγχο ποιότητας μιας επιφάνειας. Ο προσδιορισμός της γίνεται αυτόματα από τα ολοκληρωμένα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης (τραχύμετρα, προφιλόμετρα) και κατά συνέπεια η διαδικασία προσδιορισμού της είναι απλή. Ορίζεται ως η μέση απόλυτη απόκλιση των ανωμαλιών της τραχύτητας από την κεντρική γραμμή σε ένα ορισμένο μήκος δειγματοληψίας όπως το *Σχήμα 1.7*. Αυτή η παράμετρος είναι εύκολο να οριστεί και να μετρηθεί, δίνοντας μια καλή προσέγγιση για την περιγραφή των αποκλίσεων ύψους από την κεντρική γραμμή. Δε δίνει καμιά πληροφορία σε ό,τι αφορά το μήκος κύματος και δεν παρουσιάζει ευαισθησία σε μικρές αλλαγές της κατατομής (προφίλ).

Ο μαθηματικός ορισμός μέσω ολοκληρώματος στο μήκος  $l$ , αλλά και ως ασυνεχή κατανομή μέσω του τύπου αθροίσματος δίνονται παρακάτω:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx$$

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$



**Σχήμα 1.7:** Απόκλιση της μέσης αριθμητικής τραχύτητας  $R_a$ .

#### 1.4.1.2 Τραχύτητα μέσης τετραγωνικής τιμής ή ενδεικνυόμενη τιμή τραχύτητα, $R_q$ .

Αυτή η παράμετρος είναι επίσης γνωστή και ως RMS. Δίνει την τυπική απόκλιση των αποστάσεων των κορυφών από την κεντρική γραμμή (γι' αυτό και συμβολίζεται και με  $\sigma$ ). Έτσι γίνεται αντιληπτό ότι είναι μια σημαντική παράμετρος για την περιγραφή της τραχύτητας της επιφάνειας συνδεδεμένη με στατιστικές μεθόδους. Αυτή η παράμετρος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία από τη μέση αριθμητική τραχύτητα ( $R_a$ ) όταν υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις από την κεντρική γραμμή.

Ο μαθηματικός ορισμός μέσω ολοκληρώματος στο μήκος  $l$ , αλλά και ως ασυνεχή κατανομή μέσω του τύπου αθροίσματος δίνονται παρακάτω:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \{y(x)\}^2 dx}$$

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$$

Η μέτρηση της τραχύτητας της μέσης τετραγωνικής τιμής μέσω ηλεκτρονικού σήματος είναι απλή αφού μετράται η ενδεικνυόμενη τιμή του σήματος που παράγεται από το τραχύμετρο και δεν απαιτείται καμιά περαιτέρω επεξεργασία.

#### 1.4.1.3 Μέγιστο ύψος κορυφής, $R_p$ .

Η παράμετρος  $R_p$  έχει καθοριστεί ως το μέγιστο ύψος κορυφής του προφίλ πάνω από την κεντρική γραμμή, εντός ενός συγκεκριμένου, προκαθορισμένου μήκους δειγματοληψίας, όπως στο **Σχήμα 1.8**. Στο σχήμα φαίνεται ότι το μέγιστο ύψος  $R_p$  ισούται με το  $R_{p3}$ . Δηλαδή  $R_p = R_{p3}$ .

#### 1.4.1.4 Μέγιστο βάθος κοιλάδας, $R_v$ .

Η παράμετρος  $R_v$  ορίζεται ως το μέγιστο βάθος κοιλάδας του προφίλ κάτω από την κεντρική γραμμή, εντός ενός συγκεκριμένου, προκαθορισμένου μήκους δειγματοληψίας, βλέπε *Σχήμα 1.8*. Στο σχήμα φαίνεται ότι το μέγιστο βάθος  $R_v$  ισούται με το  $R_{v4}$ . Δηλαδή  $R_v = R_{v4}$ .

#### 1.4.1.5 Μέγιστη υψομετρική διαφορά προφίλ, $R_t$ ή $R_{max}$ .

Αυτή η παράμετρος παρουσιάζει μεγάλη ευαισθησία όταν στην κατατομή (προφίλ) διακρίνονται ψηλές κορυφές ή βαθιές κοιλάδες. Το μέγεθος αυτό ( $R_t$  ή  $R_{max}$ ) ορίζεται ως η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην ψηλότερη κορυφή του προφίλ και τη βαθύτερη κοιλάδα εντός ενός συγκεκριμένου, προκαθορισμένου μήκους δειγματοληψίας, όπως στο *Σχήμα 1.8*. Δηλαδή το  $R_t$  ισούται με το άθροισμα των  $R_p$  και  $R_v$  που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι τα  $R_{p3}$  και  $R_{v4}$ . Δηλαδή  $R_t = R_{p3} + R_{v4}$ . Το μέγεθος  $R_t$  αν και μετράται εύκολα, έχει το μειονέκτημα να παρουσιάζει ευαισθησία σε τυχαίες τοπικές ανωμαλίες (π.χ. αμυχή στην επιφάνεια).

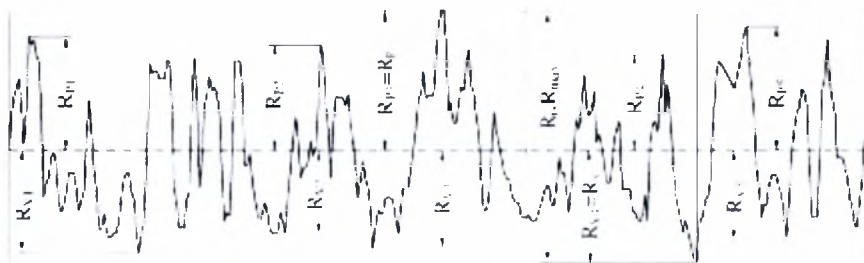
#### 1.4.1.6 Μέσο ύψος κορυφών, $R_{pm}$ .

Αν χωρίσουμε σε  $n$  διαστήματα ένα συγκεκριμένο μήκος προφίλ και πάρουμε το μέσο όρο του μέγιστο ύψους του κάθε διαστήματος  $R_{pi}$ , τότε μπορούμε να ορίσουμε το μέγιστο ύψος ( $R_{pm}$ ), όπως φαίνεται στο *Σχήμα 1.8*. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$R_{pm} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n R_{pi} \right)$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των διαστημάτων που έχουν καθοριστεί. Στην περίπτωση του *Σχήματος 1.8*, ως μέσο ύψος κορυφών έχουμε :

$$R_{pm} = (R_{p1} + R_{p2} + R_{p3} + R_{p4} + R_{p5}) / 5.$$

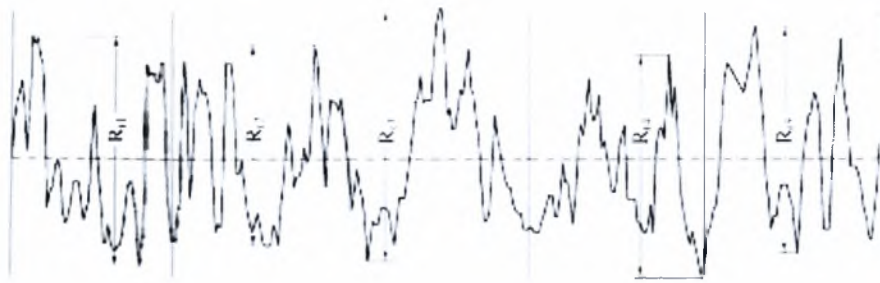


*Σχήμα 1.8:* Απόκλιση των παραμέτρων  $R_p$ ,  $R_v$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_{vm}$ ,  $R_t$  ( $R_{max}$ ).

#### 1.4.1.7 Μέγιστη διαφορά κορυφής από κοιλάδα, $R_y$

Αν ορίσουμε ως  $R_{ti}$  την υψομετρική διαφορά ανάμεσα στην ψηλότερη κορυφή και στη βαθύτερη κοιλάδα κάθε διαστήματος ενός συγκεκριμένου μήκους προφίλ που έχουμε ορίσει, τότε ως μέγιστη διαφορά κορυφής από κοιλάδα, ορίζεται το μέγιστο των

παραμέτρων  $R_{q_i}$  μέσα στο συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος μέτρησης του προφίλ. Έτσι από το *Σχήμα 1.9* ενδεικτικά βλέπουμε ότι  $R_y = R_{13}$ .



*Σχήμα 1.9:* Ορισμός της μέγιστης διαφοράς κορυφής από κοιλάδα  $R_y$ .

#### 1.4.1.8 Μέτρηση ύψους δέκα (ή πέντε) σημείων, $R_z$ , $R_{z(ISO)}$ , $R_{z(DIN)}$ .

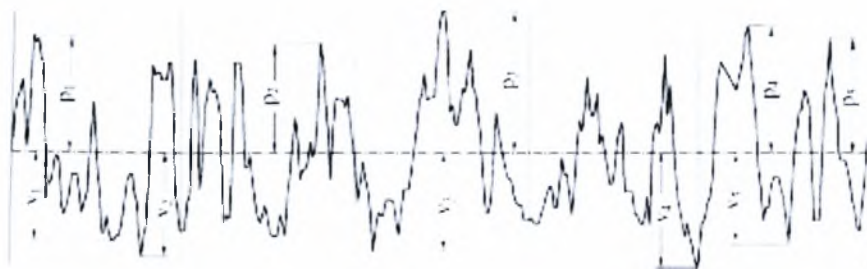
Αυτή η παράμετρος παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε τυχαίες τοπικές ανωμαλίες σε σχέση με την μέση αριθμητική τραχύτητα,  $R_a$ . Ορίζεται με δύο τρόπους.

Το Διεθνές σύστημα ISO ορίζει αυτή την παράμετρο ( $R_{z(ISO)}$ ) σαν τη μέση υψομετρική διαφορά του μέσου όρου των πέντε ψηλότερων κορυφών από τις πέντε χαμηλότερες κοιλάδες μέσα σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος προφίλ.

Το Γερμανικό σύστημα DIN ορίζει ως  $R_{z(DIN)}$  ως τη μέση τιμή του αθροίσματος των πέντε ψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων μέσα σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος προφίλ. Το *Σχήμα 1.10* δείχνει τον τρόπο ορισμού της παραμέτρου  $R_z$ . Οι μαθηματικές εξισώσεις των δύο τύπων του  $R_z$  είναι οι ακόλουθες :

$$R_{z(ISO)} = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right)$$

$$R_{z(DIN)} = \frac{1}{2n} \left( \sum_{i=1}^n p_i + \sum_{i=1}^n v_i \right)$$



*Σχήμα 1.10:* Ορισμός των παραμέτρων  $R_z$ ,  $R_{z(ISO)}$ ,  $R_{z(DIN)}$ .

#### 1.4.2 Παράμετροι μήκους.

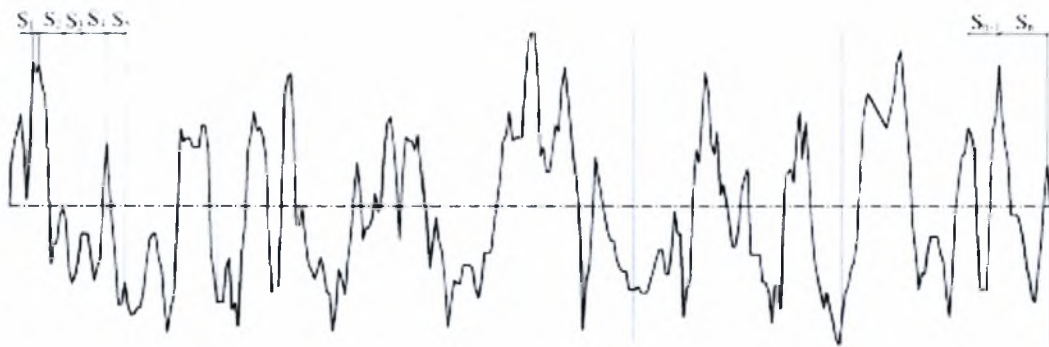
Οι παράμετροι μήκους είναι το σύνολο των παραμέτρων που βοηθούν στον υπολογισμό των οριζόντιων αποκλίσεων της επιφάνειας του προφίλ. Οι παράμετροι μήκους είναι αρκετά σημαντικές σε κάποιες κατασκευαστικές εφαρμογές όπως σε

χαλύβδινο έλασμα που υφίσταται κατεργασίες διαμορφώσεων. Σε τέτοιες περιπτώσεις η εκτίμηση των παραμέτρων μήκους είναι απαραίτητη ώστε να επιτυγχάνεται η σωστή λίπανση κατά την κατεργασία και να αποφεύγεται έτσι η εμφάνιση σκουριάς στην επιφάνεια του ελάσματος. Με τον έλεγχο των παραμέτρων μήκους, είναι πιθανόν να επιτευχθεί καλύτερο «φινίρισμα» στα υλικά που κατεργαζόμαστε και πιο ομοιόμορφες επιφάνειες.

#### 1.4.2.1 Μέσο διάστημα διαδοχικών τοπικών κορυφών, $R_s$ ή $S$ .

Αυτή η παράμετρος καθορίζεται ως η μέση οριζόντια απόσταση των διαδοχικών κορυφών του προφίλ, σε ένα συγκεκριμένο και προκαθορισμένο μήκος. Ως τοπική κορυφή ορίζεται η οριζόντια απόσταση ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κορυφές και υπολογίζεται μόνο αν η κατακόρυφη απόσταση των δύο διαδοχικών κορυφών είναι μεγαλύτερη του 10% του μέγιστου ύψους προφίλ ( $R_t$  ή  $R_{max}$ ). Στο Σχήμα 1.11 φαίνεται πώς υπολογίζεται αυτή η παράμετρος. Η μαθηματική εξίσωση για τον υπολογισμό της παραμέτρου  $R_s$  είναι :

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i$$



**Σχήμα 1.11:** Υπολογισμός του μέσου διαστήματος διαδοχικών τοπικών κορυφών,  $R_s$  ή  $S$ .

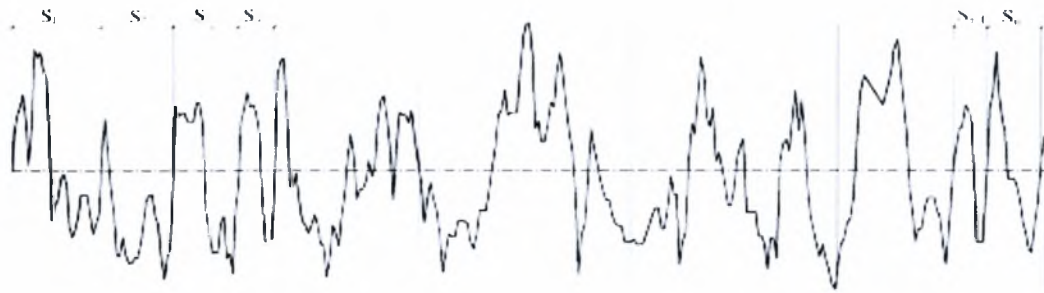
όπου  $N$  είναι ο αριθμός των τοπικών κορυφών κατά μήκος του προφίλ.

#### 1.4.2.2 Μέσο διάστημα μέσης γραμμής, $R_{sm}$ ή $S_m$ .

Αυτή η παράμετρος ορίζεται ως η μέση οριζόντια απόσταση των  $S_i$ . Ως  $S_i$  ορίζουμε την οριζόντια απόσταση διαδοχικών κορυφών όταν όμως αυτές διασταυρώνονται με την κεντρική γραμμή, δηλαδή ο υπολογισμός των  $S_i$  αρχίζει και τελειώνει μόλις η γραμμή του προφίλ ξεπεράσει την κεντρική γραμμή. Στο Σχήμα 1.12 φαίνεται πώς υπολογίζεται αυτή η παράμετρος. Αυτή η παράμετρος υπολογίζεται μαθηματικά από την ακόλουθη εξίσωση :

$$S_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n S_i$$

όπου  $N$  είναι ο αριθμός των τοπικών κορυφών κατά μήκος του προφίλ.



**Σχήμα 1.12:** Υπολογισμός του μέσου διαστήματος μέσης γραμμής,  $R_{sm}$  ή  $S_m$ .

Η διαφορά ανάμεσα στους δύο τύπους παραμέτρων μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$ , είναι πως στην πρώτη περίπτωση, η παράμετρος  $R_s$  υπολογίζεται για όλες τις διαδοχικές κορυφές του προφίλ, πάνω ή κάτω από την κεντρική γραμμή, ενώ στην δεύτερη περίπτωση, η παράμετρος  $R_{sm}$  υπολογίζεται στη διασταύρωση των κορυφών του προφίλ με τη μέση γραμμή.

### 1.4.3 Υβριδικές παράμετροι.

Οι υβριδικές παράμετροι αποτελούν έναν συνδυασμό των παραμέτρων ύψους και των παραμέτρων μήκους. Κάθε αλλαγή που συμβαίνει είτε σε μια παράμετρο ύψους, είτε σε μια παράμετρο μήκους, επηρεάζει και τις υβριδικές παραμέτρους. Στην τριβολογία, η κλίση που έχει μια επιφάνεια, η καμπύλωσή της και η περιοχή που μπορεί να αλληλεπιδράσει με άλλα σώματα (φέρουσα επιφάνεια), θεωρούνται σημαντικά στοιχεία προς εξέταση. Οι υβριδικές παράμετροι κατά συνέπεια είναι ιδιαίτερα σημαντικές σε τριβολογικές εφαρμογές. Οι παράμετροι αυτές δεν μελετώνται στην παρούσα εργασία, κρίνεται όμως χρήσιμη μια συνοπτική αναφορά των κυριότερων από αυτές.

#### 1.4.3.1 Η κλίση της κατατομής σε σχέση με την κεντρική γραμμή, $\gamma$ .

Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται αν υπολογίσουμε την κλίση της κατατομής (προφίλ) σε κάθε τομή (διασταύρωση) της με την κεντρική γραμμή και εν συνεχεία υπολογίσουμε τον μέσο όρο αυτών. Η εξίσωση για τον υπολογισμό της είναι :

$$\gamma = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \tan^{-1} \left( \frac{\delta y_i}{\delta x_i} \right)$$

#### 1.4.3.2 Η μέση κλίση της κατατομής, $\Delta_a$ .

Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται αν υπολογίσουμε όλες τις κλίσεις της κατατομής (προφίλ) και εν συνεχεία υπολογίσουμε τον μέσο όρο αυτών. Η παράμετρος αυτή είναι σημαντική σε μηχανολογικές εφαρμογές με έντονα φαινόμενα τριβής, κόπωσης, κ.α. Οι εξισώσεις για τον υπολογισμό της είναι :

$$J_2 = \frac{1}{L} \int_0^L \left| \frac{dy}{dx} \right| dx.$$

$$J_2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\rho_i}{\rho_{i+1}}$$

### 1.4.3.3 Η RMS κλίση της κατατομής, $\Delta_q$ .

Η παράμετρος αυτή είναι η τετραγωνική ρίζα της μέσης κλίσης της κατατομής (προφίλ). Η εξίσωση για τον υπολογισμό της είναι :

$$\Delta_q = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L (\theta(x) - \bar{\theta})^2 dx} \quad \bar{\theta} = \frac{1}{L} \int_0^L \theta(x) dx$$

### 1.4.3.4 Σχετικό μήκος κατατομής, $l_0$ .

Το σχετικό μήκος κατατομής υπολογίζεται αν υπολογίσουμε το μήκος του κάθε τμήματος της κατατομής και τα αθροίσουμε. Η παράμετρος αυτή υπολογίζεται από τον τύπο :

$$l_0 = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n l_i$$

όπου  $l_i$  το μήκος του τμήματος  $i$  της κατατομής που υπολογίζεται από την σχέση:

$$l_i = \sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + \Delta x^2}$$

όπου  $y_i$  είναι το ύψος της κατατομής στο σημείο  $i$  και  $\Delta x$  είναι η οριζόντια απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία.

## 1.4.4 Στατιστικές παράμετροι.

Οι στατιστικές παράμετροι, όπως υποδηλώνει και το όνομα τους, είναι οι παράμετροι από την στατιστική επεξεργασία των δεδομένων της κατατομής. Και βιβλιογραφικά αναφέρονται και ως ροπές της κατανομής των σημείων (της κατατομής). Ροπή 1<sup>ης</sup> τάξης είναι η μέση τιμή ( $\mu$ ) ενώ ροπή 2<sup>ης</sup> τάξης είναι η μεταβλητότητα ( $\sigma^2$ ). Ως ροπές 3<sup>ης</sup> και 4<sup>ης</sup> τάξης ορίζονται, αντίστοιχα, η λοξότητα ( $R_{sk}$ ) και κυρτότητα ( $R_{ku}$ ), παράμετροι οι οποίες εξετάζονται στη συνέχεια.

### 1.4.4.1 Λοξότητα, $R_{sk}$ .

Η λοξότητα μιας κατατομής είναι η ροπή 3<sup>ης</sup> τάξεως του πλάτους της συνάρτησης πυκνότητας-πιθανότητας, σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος. Χρησιμοποιείται για να μετράμε τη συμμετρία της κατατομής σχετικά με την κεντρική γραμμή. Αυτή η παράμετρος παρουσιάζει ευαισθησία όταν υπάρχουν βαθιές κοιλάδες και/ή ψηλές κορυφές. Συμμετρία υπάρχει όταν έχουμε ίσο αριθμός κορυφών και κοιλάδων. Στην περίπτωση αυτή η τιμή της λοξότητας είναι μηδέν. Κατατομές στις

οποιές οι κορυφές δεν είναι αιχμηρές αλλά είναι σαν να έχουν αφαιρεθεί ή υπάρχουν αρκετά βαθιές και απότομες κοιλάδες (το προφίλ είναι ‘γεμάτο’ από υλικό) χαρακτηρίζονται από αρνητική λοξότητα. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν υπάρχουν αιχμηρές κορυφές ή κοιλάδες (η κατατομή είναι ‘άδεια’ από υλικό), χαρακτηρίζονται από θετική λοξότητα. Η διάκριση αυτή φαίνεται χαρακτηριστικά στο *Σχήμα 1.13*.

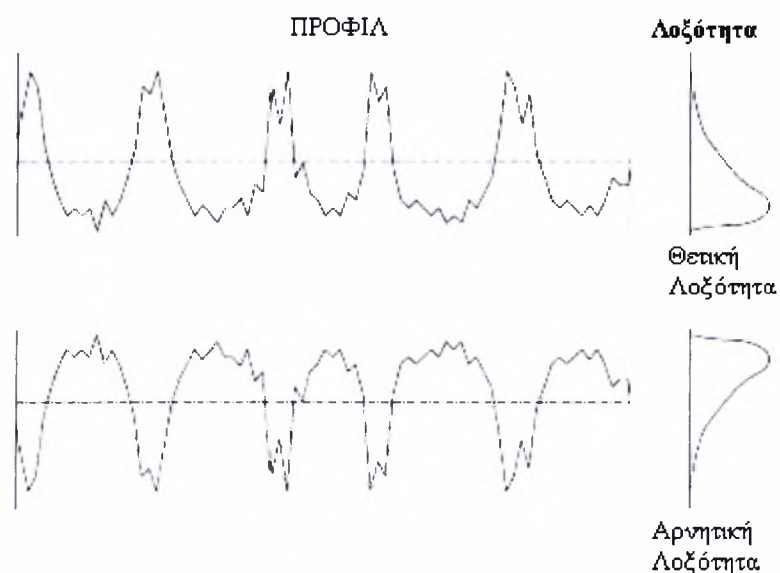
Η τιμή της λοξότητας διαφέρει αν το υλικό του δείγματος που μελετάμε είναι συγκεντρωμένο πάνω (αρνητική λοξότητα) ή κάτω (θετική λοξότητα) από την κεντρική γραμμή, βλέπε *Σχήμα 1.13*. Οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της λοξότητας μιας κατατομής με  $N$  σημεία είναι οι ακόλουθοι :

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3} \int_{-L}^L y^3 p(y) dy$$

$$R_{sk} = \frac{1}{NR_q^3} \left( \sum_{i=1}^N Y_i^3 \right)$$

$R_q$  είναι η RMS παράμετρος τραχύτητας και  $Y_i$  το ύψος του προφίλ στο σημείο  $i$ .

Η λοξότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για το διαχωρισμό επιφανειών οι οποίες έχουν διαφορετικό σχήμα αλλά ίδιες τιμές  $R_a$ . Στο *Σχήμα 1.13* αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό, αφού και οι δύο κατατομές έχουν ίδιες τιμές  $R_a$ , αλλά διαφορετικά μορφή και συνεπώς λοξότητα.



*Σχήμα 1.13:* Καθορισμός της παραμέτρου λοξότητας  $R_{sk}$  και απεικόνιση της καμπύλης της.

#### 1.4.4.2 Κυρτότητα, $R_{ku}$ .

Η κυρτότητα μιας κατατομής είναι η ροπή 4<sup>ης</sup> τάξης του πλάτους της συνάρτησης πυκνότητας-πιθανότητας, σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος. Περιγράφει το πόσο αιχμηρές είναι οι κορυφές και οι κοιλάδες της κατατομής. Εάν  $R_{ku} < 3$ , η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως πλατύκυρτη και η κατατομή της τραχύτητας έχει



ελάχιστες κορυφές ή κοιλάδες που να είναι αρκετά ψηλές και αιχμηρές. Εάν  $R_{ku} > 3$  η επιφάνεια χαρακτηρίζεται ως λεπτόκυρτη και η κατατομή της τραχύτητας έχει αρκετές κορυφές και κοιλάδες οι οποίες είναι αιχμηρές και ψηλές. Στο *Σχήμα 1.14* παρουσιάζονται οι δύο χαρακτηριστικές μορφές κυρτότητας.

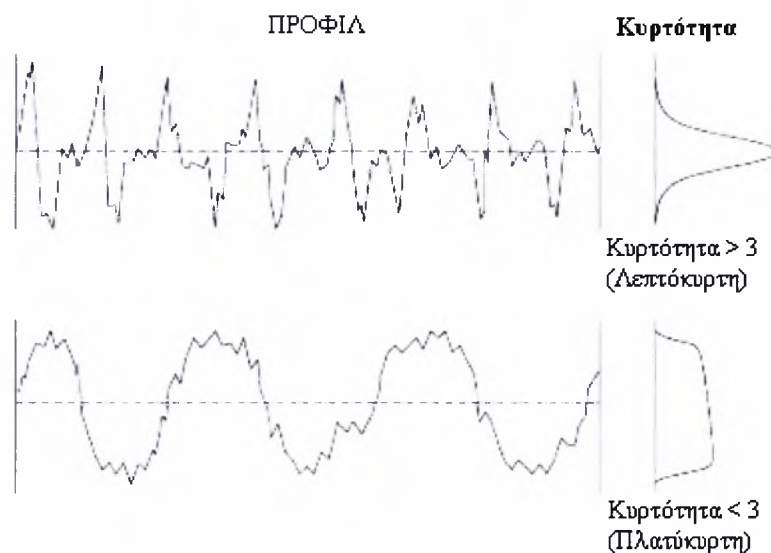
Οι μαθηματικοί τύποι που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της κυρτότητας μιας κατατομής η οποία έχει  $N$  σημεία είναι :

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^2} \int_{-\infty}^{\infty} y^4 p(y) dy$$

$$R_{ku} = \frac{1}{NR_q^2} \left( \sum_{i=1}^N Y_i^4 \right)$$

$R_q$  είναι η RMS παράμετρο τραχύτητας και  $Y_i$  το ύψος της κατατομής στο σημείο  $i$ .

Η κυρτότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως και η λοξότητα για το διαχωρισμό επιφανειών οι οποίες έχουν διαφορετικό σχήμα αλλά ίδιες τιμές  $R_a$ . Στο *Σχήμα 1.14* αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό, αφού και τα δύο προφίλ μπορεί να έχουν ίδιες τιμές  $R_a$ , αλλά διαφορετικά σχήματα και συνεπώς κυρτότητα.



**Σχήμα 1.14:** Ορισμός της παραμέτρου κυρτότητα  $R_{ku}$ .

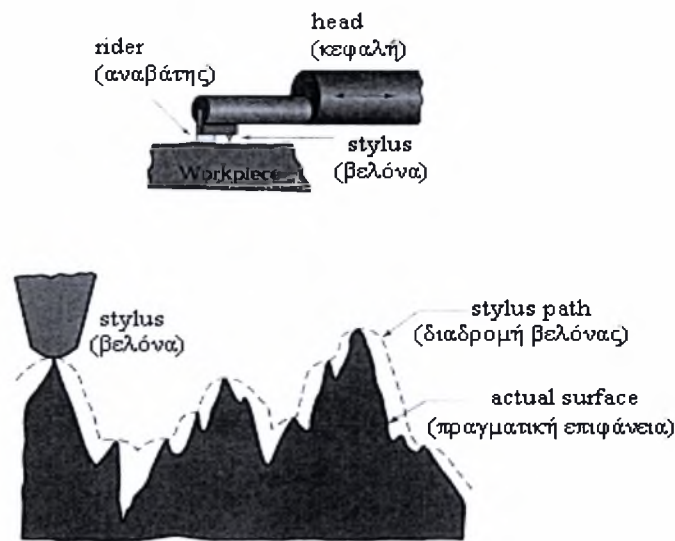
### 1.5 Μέτρηση τραχύτητας.

Η εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών τόσο στην ηλεκτρονική όσο και στις τεχνολογίες του μετρητικού εξοπλισμού, οδήγησε στην ανάπτυξη και την ευρύτατη χρήση ψηφιακών οργάνων μέτρησης της τραχύτητας. Στις ψηφιακές μετρήσεις η επιφανειακή κατατομή γίνεται αντιληπτή όχι ως συνεχής καμπύλη αλλά ως ασυνεχής κατανομή σειράς ισαπεχουσών μετρήσεων. Κατά συνέπεια, για τον καθορισμό των παραμέτρων τραχύτητας χρησιμοποιούνται οι τύποι των αθροισμάτων και όχι αυτοί με την μορφή των ολοκληρωμάτων.

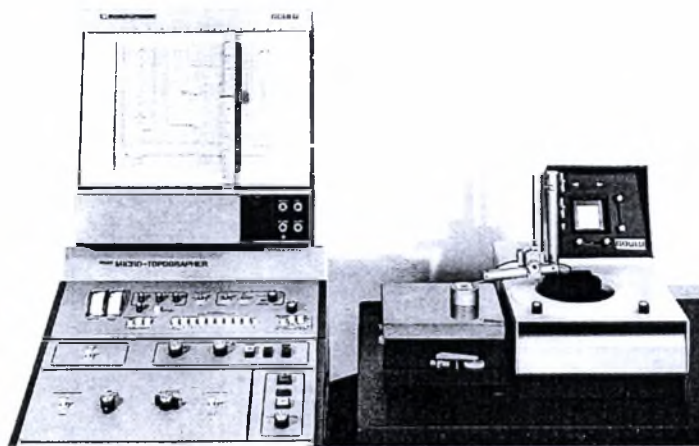
Η τραχύτητα καταγράφεται με όργανα τύπου βελόνας, τα τραχύμετρα και τα προφιλόμετρα. Η αρχή λειτουργίας τους φαίνεται στο *Σχήμα 1.15*. Τα όργανα αυτά

διαθέτουν μια σκληρή και λεπτή βελόνα (συνήθως από διαμάντι) η οποία κινείται οριζόντια πάνω στην κατεργασμένη επιφάνεια και ανιχνεύει τις επιφανειακές ανωμαλίες. Το καταγραφόμενο σήμα οδηγείται σ' έναν ενισχυτή/μετατροπέα όπου με τη βοήθεια φίλτρων απομονώνεται και επεξεργάζεται το μέρος του σήματος που αφορά την τραχύτητα και στη συνέχεια σ' ένα ψηφιακό όργανο ανάγνωσης και σε ένα καταγραφικό ή οθόνη. Τα φίλτρα που χρησιμοποιεί το κάθε τραχύμετρο ποικίλουν. Ενδεικτικά αναφέρονται ορισμένοι τύποι. Φίλτρο 2RC (2RC filter), Γκαουσιανό φίλτρο (Gaussian filter), φίλτρα  $R_k$ . Σήμερα υπάρχουν και πιο σύγχρονα φίλτρα όπως φίλτρα Splines, Γκαουσιανό φίλτρο παλινδρόμησης κ.α. Ένα σύγχρονο εργαστηριακό τραχύμετρο εικονίζεται στο Σχήμα 1.16.

Η τραχύτητα  $R_a$  είναι σήμερα η συνηθέστερα μετρούμενη παράμετρος, διότι ο προσδιορισμός της κεντρικής γραμμής γίνεται αυτόματα από τα ηλεκτρονικά όργανα μέτρησης και κατά συνέπεια η διαδικασία προσδιορισμού της είναι απλούστατη.



**Σχήμα 1.15:** Αρχή μέτρησης (καταγραφής) της τραχύτητας επιφάνειας. Κίνηση της βελόνας στην κατεργασμένη επιφάνεια.



**Σχήμα 1.16:** Φωτογραφία σύγχρονου τραχύμετρου/προφιλόμετρου.

## 1.6 Τραχύτητα κατεργασμένων επιφανειών.

Το εύρος των τιμών της μέσης τραχύτητας  $R_a$  (και της μέγιστης  $R_t$ ) που επιτυγχάνεται στην πράξη με τις διάφορες κατεργασίες των υλικών ποικίλει από κατεργασία σε κατεργασία (διαφορετική κινηματική και «μηχανική» της κάθε κατεργασίας, διαφορετική γεωμετρία των εργαλείων κ.α.) και εξαρτάται και από το κατεργαζόμενο υλικό. Ο Πίνακας 1.2 που ακολουθεί παρουσιάζει το τυπικό εύρος των τιμών τραχύτητας που επιτυγχάνεται με τις διάφορες κατεργασίες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός στα προκαταρκτικά στάδια της σχεδιομελέτης τεχνολογικών προϊόντων.

**Πίνακας 1.2:** Τιμές τραχύτητας επιφάνειας για τις συνηθέστερες κατεργασίες κοπής. (προέλευση: Kalpakjian and Schmid, 2003)

Process	Τραχύτητα ( $R_a$ )												
	mm 50	25	12.5	6.3	3.2	1.6	0.8	0.4	0.2	0.1	0.05	0.025	0.0125
	min 2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0.5
Flame Cutting													
Snagging (Coarse Grinding)													
Sawing													
Planing, Shaping													
Drilling													
Chemical Machining													
Electrical-Discharge Machining													
Milling													
Broaching													
Reaming													
Electron-Beam Machining													
Laser Machining													
Electrochemical Machining													
Turning, Boring													
Barrel Finishing													
Electrochemical Grinding													
Roller Burnishing													
Grinding													
Honing													
Electropolishing													
Polishing													
Lapping													
Superfinishing													

## 1.7 Αξιολόγηση των κυριοτέρων παραμέτρων τραχύτητας.

Παρά τις επανειλημμένες προσπάθειες χαρακτηρισμού της επιφάνειας με μία μοναδική παράμετρο, η στοχαστική φύση των χαρακτηριστικών των ανωμαλιών δεν έχει μέχρι στιγμής επιτρέψει την καθιέρωση μιας ικανοποιητικής και γενικά παραδεκτής τέτοιας παραμέτρου. Έτσι σήμερα όλη η σχετική ερευνητική προσπάθεια τείνει στην υιοθέτηση της περιγραφής της επιφάνειας με δύο ή περισσότερες παραμέτρους (ανεξάρτητες μεταξύ τους). Η εύρεση όμως του κατάλληλου τέτοιου ζεύγους παραμέτρων παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες κυρίως λόγω της μεγάλης

---

ποικιλίας παραμέτρων στα διάφορα Εθνικά μετρολογικά πρότυπα και της έλλειψης αυστηρών, συγκεκριμένων και γενικά παραδεκτών ορισμών για κάθε μιας παραμέτρου.

Όπως ήδη αναφέρθηκε οι παράμετροι ύψους ( $R_a$ ,  $R_q$  κ.λ.π.) αναφέρονται στο ύψος των ανωμαλιών της κατανομής. Από αυτές, η μεν τραχύτητα κεντρικής γραμμής  $R_a$  είναι η μέση αριθμητική απόκλιση των υψών από την κεντρική γραμμή και δεν έχει ουσιαστικά καμιά φυσική υπόσταση είναι όμως μέγεθος εύκολα μετρήσιμο, ενώ η τραχύτητα μέσης τετραγωνικής τιμής  $R_q$  παριστάνει την τυπική απόκλιση της κατανομής των υψών από τη μέση τιμή και χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό πολλών άλλων παραμέτρων.

Ενώ οι παράμετροι ύψους δεν δίνουν ουσιαστικές πληροφορίες για την ποιότητα της επιφάνειας (δύο επιφάνειες με πολύ διαφορετική ποιότητα μπορεί να έχουν ακριβώς το ίδιο μέτρο τραχύτητας κεντρικής γραμμής  $R_a$  ή  $R_q$ ), εν τούτοις σε συνδυασμό με στατιστικές παραμέτρους δίνουν ικανοποιητικές πληροφορίες τουλάχιστον από τριβολογικής άποψης, όπως η πραγματική επιφάνεια επαφής, ο πραγματικός αριθμός σημείων επαφής κ.α.

Κατά συνέπεια οι στατιστικές παράμετροι διευκολύνουν σημαντικά τη μελέτη της επαφής και της μεταβολής σημαντικών τριβολογικών μεγεθών όπως η σχέση φορτίου –πραγματικής επιφάνειας επαφής, η μεταβολή του συντελεστή τριβής κ.λπ.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### Μέρος 1<sup>ο</sup> : Γενικά περί κατεργασιών.

### Μέρος 2<sup>ο</sup> Η κατεργασία της Ηλεκτροδιάβρωσης (Electro Discharge Machining).

---

### Μέρος 1<sup>ο</sup> : Γενικά περί κατεργασιών.

#### 2.1 Ταξινόμηση κατεργασιών.

Με τον όρο **κατεργασία** ενός υλικού ορίζουμε την πρόσδοση στο υλικό μιας ορισμένης μορφής, εκμεταλλευόμενοι την ιδιότητα του υλικού να παραμορφώνεται πλαστικά, δηλαδή να αποκτά μια μόνιμη κατάσταση κάτω από ορισμένες συνθήκες φορτίου θερμοκρασίας και ταχύτητας.

Υπάρχει γενικά μια πληθώρα κατεργασιών οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα διεθνώς και αποτελούν τη βάση κάθε παραγωγικής διαδικασίας. Η κάθε κατεργασία έχει εδραιώσει το ρόλο και τη συνεισφορά της στην τεχνολογική ανάπτυξη, και με την πάροδο του χρόνου όλες οι κατεργασίες καθίστανται περισσότερο αποτελεσματικές, κατορθώνοντας να προσδώσουν την επιθυμητή μορφή στο υλικό με μεγαλύτερη ακρίβεια. Παρακάτω γίνεται μια προσπάθεια ταξινόμησης των κατεργασιών.

Ένα πρώτο σύστημα ταξινόμησης των κατεργασιών είναι με κριτήριο τη μορφή της κατεργασίας που χρησιμοποιείται, δηλαδή του τρόπου που χρησιμοποιείται για να διαμορφώσουμε το τεμάχιο όπως εμείς θέλουμε. Έτσι οι βασικές ομάδες των κατεργασιών είναι οι παρακάτω :

- “**Αρχέγονες**” **κατεργασίες** π.χ. χύτευση, κonioμεταλλουργία κ.λ.π.
- **Κατεργασίες διαμορφώσεων** στις οποίες έχουμε τροποποίηση της γεωμετρίας του υλικού π.χ. έλαση, διέλαση κ.λ.π..
- **Κατεργασίες αποβολής υλικού ή κατεργασίες κοπής** π.χ. τórνευση, φρεζάρισμα, πλάνισμα, λείανση κ.λ.π..
- **Κατεργασίες σύνδεσης** π.χ. συγκολλήσεις κ.λ.π.
- **Επιφανειακές κατεργασίες** π.χ. βαφή κ.λ.π.

Ένα άλλο κριτήριο ταξινόμησης των κατεργασιών είναι η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνουν χώρα. Η ταξινόμηση των κατεργασιών αυτών είναι η εξής :

- **Κατεργασίες εν ψυχρώ.** Οι κατεργασίες αυτές εκτελούνται στη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

- 
- **Κατεργασίες εν θερμώ.** Οι οποίες εκτελούνται σε θερμοκρασία ανώτερη από τη θερμοκρασία ανακρυστάλλωσης του τεμαχίου.
  - **Ημίθερμες κατεργασίες.** Οι οποίες εκτελούνται σε ενδιάμεσες θερμοκρασίες, οπωσδήποτε όμως αρκετά μεγαλύτερες από τις θερμοκρασίες του περιβάλλοντος.

Μια τελευταία, αλλά αρκετά σημαντική ταξινόμηση κατεργασιών είναι με βάση το κριτήριο της ενέργειας και του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται. Εδώ έχουμε δύο μεγάλες κατηγορίες, τις **συμβατικές** και τις **μη συμβατικές κατεργασίες**.

Στις συμβατικές κατεργασίες το φαινόμενο που κυρίως επικρατεί είναι η πλαστική παραμόρφωση του υλικού, η οποία λαμβάνει χώρα σε ορισμένα όρια παροχής του πλαστικού έργου και της ταχύτητας παραμόρφωσης, ώστε η κατεργασία να χαρακτηρίζεται πρακτικά ως στατική. Στις συμβατικές κατεργασίες υπάρχει μια σχέση εργαλείου – τεμαχίου – εργαλειομηχανής (Ε/Μές). Το εργαλείο μπορεί να είναι καθορισμένης γεωμετρίας π.χ. στον τόρνο, ή και μη καθορισμένης γεωμετρίας π.χ. σε λείανση.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες εξετάζονται παρακάτω.

## 2.2 Μη συμβατικές κατεργασίες.

Με τον όρο μη συμβατικές κατεργασίες (non – conventional processes), αναφερόμαστε σε ένα σημαντικό αριθμό μεθόδων διαμόρφωσης, αποβολής υλικού, συγκόλλησης και μορφοποίησης υλικών με χαρακτηριστικά διαφορετικά από την πρόσδοση του πλαστικού έργου με τα τυπικά εργαλεία / Ε/Μ. Οι μη συμβατικές κατεργασίες αφορούν στη χρήση άλλων μορφών ενέργειας (π.χ. ηλεκτρική, δυναμική, μαγνητική κ.λ.π.) πέρα από τη συμβατική πλαστική παραμόρφωση, στη μεγάλη ταχύτητα παραμόρφωσης, ενδεχομένως σε συνδυασμό με υψηλό ρυθμό πρόσδοσης του πλαστικού έργου ή στη διάδοση ελαστοπλαστικών και κρουστικών κυμάτων στο κατεργάσιμο υλικό.

Οι μη συμβατικές κατεργασίες προέκυψαν ουσιαστικά τα τελευταία χρόνια, από τις απαιτήσεις και τις ανάγκες της σύγχρονης κατασκευαστικής τεχνολογίας και ιδιαίτερα των κλάδων της αεροναυπηγικής, τις βιοϊατρικής και της μικροτεχνολογίας.

Ένας άλλος λόγος ανάπτυξης των μη συμβατικών κατεργασιών είναι οι σύγχρονες απαιτήσεις που έχουν εισάγει νέα προηγμένα υλικά για κατασκευές υψηλής ακρίβειας και αντοχής γεγονός που θέτει νέες απαιτήσεις για τις εφαρμοζόμενες κατεργασίες. Τα νέα υλικά υψηλής σκληρότητας, μεγάλου μέτρου ελαστικότητας κ.λ.π. που χρησιμοποιούνται σε προηγμένες κατασκευές απαιτούν νέες μεθόδους συγκόλλησης, κοπής, τórνευσης. Εκτός αυτού απαιτείται καλύτερη ποιότητα επιφάνειας και τελειότερη αποπεράτωση (φινίρισμα) γεγονός που απαιτεί ιδιαίτερη μελέτη των συνθηκών κατεργασίας.

Γενικά οι μη συμβατικές κατεργασίες χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται ακρίβεια διαστάσεων ή «μικροκατασκευή» (micromachining/miniaturization), ή τίθενται περιορισμοί λόγω πολύπλοκης γεωμετρίας, δηλαδή εκεί που δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συμβατικές κατεργασίες π.χ. στην επεξεργασία κεραμικών υλικών τα οποία χαρακτηρίζονται από μεγάλη ψαθυρότητα.

Τα βασικά κριτήρια με τα οποία γίνεται η σωστή επιλογή μιας μεθόδου από την «οικογένεια» των μη συμβατικών κατεργασιών μπορούν να συνοψιστούν στα εξής :

- 
- Χρήση νέων υλικών,
  - Πολυπλοκότητα σχήματος και διαστατική ακρίβεια,
  - Αυτοματοποίηση κατεργασιών και επικοινωνιών,
  - Απαιτήσεις πιστότητας επιφάνειας,
  - Σμίκρυνση διαστάσεων (miniaturization / micromachining),
  - Ταχύτητα παραγωγής και φυσικά οικονομία.

### 2.3 Ταξινόμηση μη συμβατικών κατεργασιών αποβολής υλικού.

Η μεγάλη εξέλιξη της τεχνολογίας στην σύγχρονη εποχή είχε ως συνέπεια, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, την ανάπτυξη και εξέλιξη μη συμβατικών κατεργασιών οι οποίες σαφώς διαφέρουν από τις γνωστές και καθιερωμένες μεθόδους κοπής και διαμορφώσεως. Οι νέες μέθοδοι αναπτύχθηκαν, άλλες περισσότερο, άλλες λιγότερο και άλλες ακόμα βρίσκονται σε στάδιο εξελίξεως.

Υπάρχουν τουλάχιστον 53 νέες μη συμβατικές, μέθοδοι κατεργασιών που διακρίνονται σε τρεις κύριες ομάδες:

- **Μηχανικές κατεργασίες :**

Κοπή με δέσμη ύδατος (water jet machining).

Κοπή με επενδεδυμένα εκρηκτικά (cutting with shaped-charges).

Κοπή με δέσμη λειαντικών κόκκων (abrasive jet machining).

Κατεργασίες αποπεράτωσης (finishing processes).

Κοπή με υπερήχους (ultrasonic machining).

- **Θερμικές ή θερμοηλεκτρικές κατεργασίες :**

Ηλεκτροδιάβρωση (H/Δ) (electro-discharge machining / EDM).

Κοπή με Laser (Laser cutting ή Laser beam machining).

Κοπή με δέσμη ηλεκτρονίων (electro beam machining).

Κοπή με δέσμη πλάσματος (plasma beam machining).

- **Χημικές / ηλεκτροχημικές κατεργασίες :**

Ηλεκτροχημική κοπή (electrochemical machining).

Ηλεκτροχημική λείανση (electro-chemical grinding).

Χημική κοπή (chemical machining).

Εκείνες οι οποίες βρίσκουν μέχρι σήμερα τη μεγαλύτερη εφαρμογή στη βιομηχανική πράξη είναι: η H/Δ, η ηλεκτροχημική κατεργασία, οι κατεργασίες με Plasma, με Laser, και με υπερήχους. Από την άποψη της ευρύτητας των εφαρμογών αλλά και σε σχέση με τις παραλλαγές της, αναμφίβολα μια από τις πιο σημαντικές μη συμβατικές κατεργασίες κοπής, είναι η H/Δ, η οποία εξετάζεται στη συνέχεια.

---

## Μέρος 2<sup>ο</sup>: Η κατεργασία της Ηλεκτροδιάβρωσης (Electro Discharge Machining).

### 2.4 Εισαγωγή στην ηλεκτοδιάβρωση.

Η Η/Δ (electro-discharge machining/EDM) εξετάζεται ως μια αντιπροσωπευτική κατεργασία θερμικού/θερμοηλεκτρικού χαρακτήρα. Η ιδιαίτερη σημασία της έγκειται στη δυνατότητα κατεργασίας ασυνήθιστα σκληρών αγωγίμων υλικών και εξαιρετικά πολύπλοκων γεωμετρικών μορφών. Η θεωρητική της βάση απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη, ενώ και οι τεχνολογικές της παράμετροι, όπως ο ρυθμός αφαίρεσης υλικού και η ομοιομορφία της προκύπτουσας επιφάνειας, δεν έχουν διερευνηθεί σε βάθος. Παρόλα αυτά αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μη συμβατική κατεργασία και εφαρμόζεται ευρύτατα λόγω των εξαιρετικών δυνατοτήτων που προσφέρει σε υλικά μικρής κατεργασιμότητας.

Η Η/Δ συνίσταται στην αποβολή ηλεκτρικά αγωγίμου υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων μεταξύ δύο ηλεκτροδίων (κατεργάσιμο τεμάχιο και εργαλείο) κάτω από ένα μέσο κατεργασίας (διηλεκτρικό υγρό) με σκοπό την πρόσδοση της επιθυμητής μορφής στο τεμάχιο.

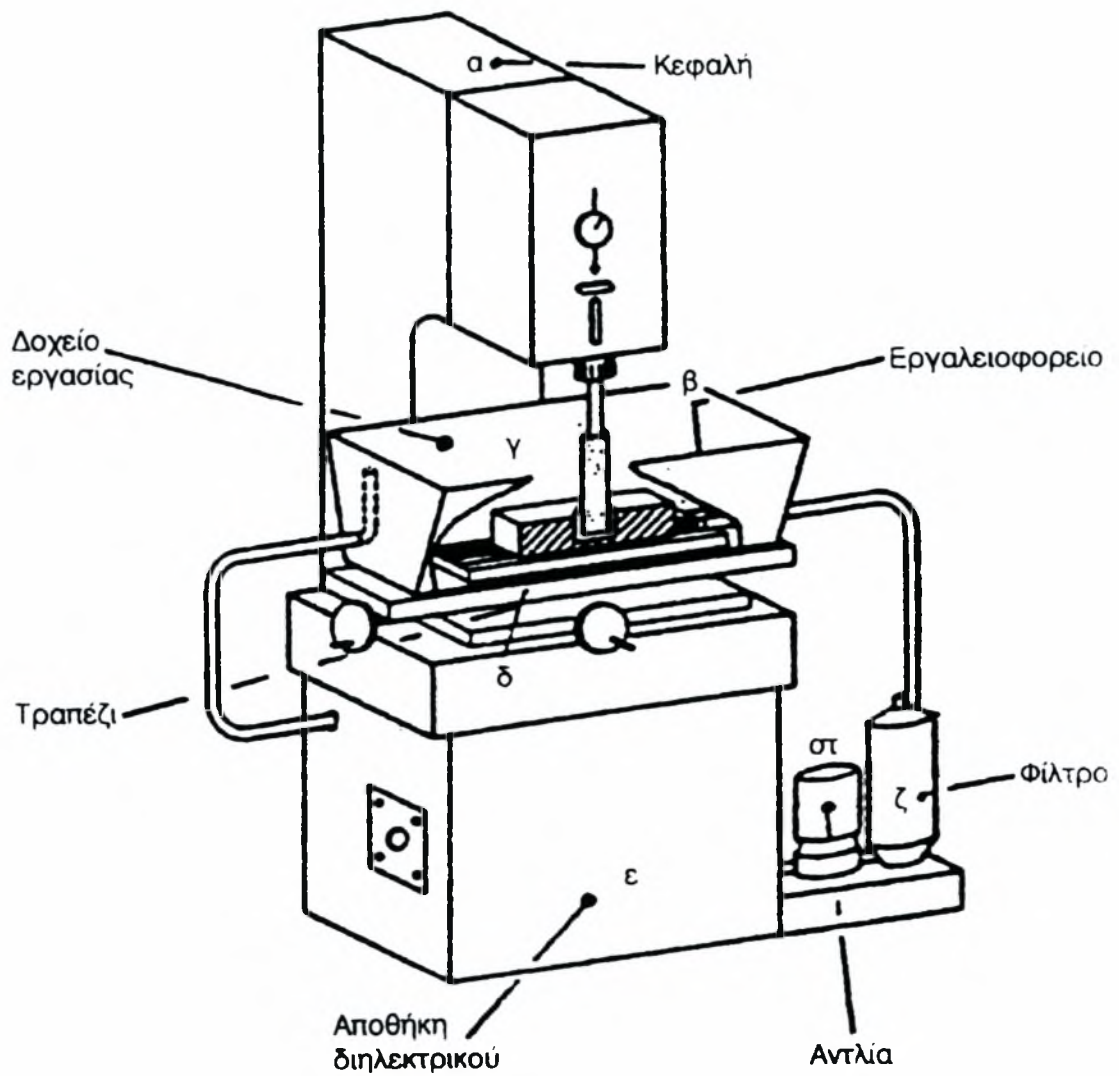
Στο *Σχήμα 2.1*, παρουσιάζεται μια τυπική Ε/Μ Η/Δς με τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται. Αυτά είναι η κεφαλή, το δοχείο εργασίας, το τραπέζι, το εργαλειοφορείο, η αποθήκη διηλεκτρικού, η αντλία και το φίλτρο. Στο *Σχήμα 2.2* παρουσιάζονται διάφορες τυπικές περιπτώσεις κατεργασίας αποβολής υλικού με Η/Δ.

Με τον γενικό όρο Η/Δ αναφερόμαστε σε δύο διαφορετικές τεχνικές :

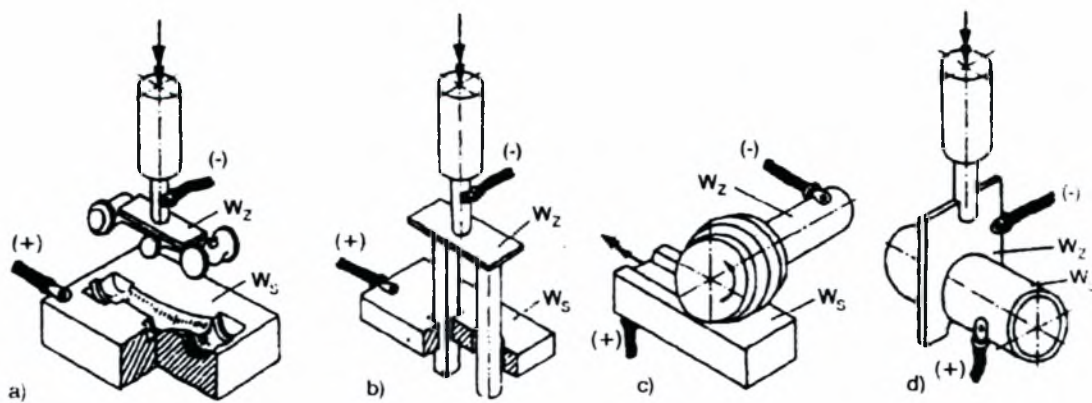
- **την ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης ή βύθισης (die-sinking EDM)** όπου με σταθερό εργαλείο γίνεται η πρόσδοση της μορφής του “εργαλείου – ηλεκτροδίου” στο “κατεργάσιμο τεμάχιο – ηλεκτρόδιο”,
- **την ηλεκτροδιάβρωση σύρματος (wire-EDM)** όπου το σταθερό ηλεκτρόδιο έχει αντικατασταθεί με μεταλλικό αγωγίμο σύρμα.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια τεχνολογικά χαρακτηριστικά των δύο αυτών τεχνικών.





Σχήμα 2.1: Ε/Μ Η/Δς (μέθοδος αποτύπωσης).

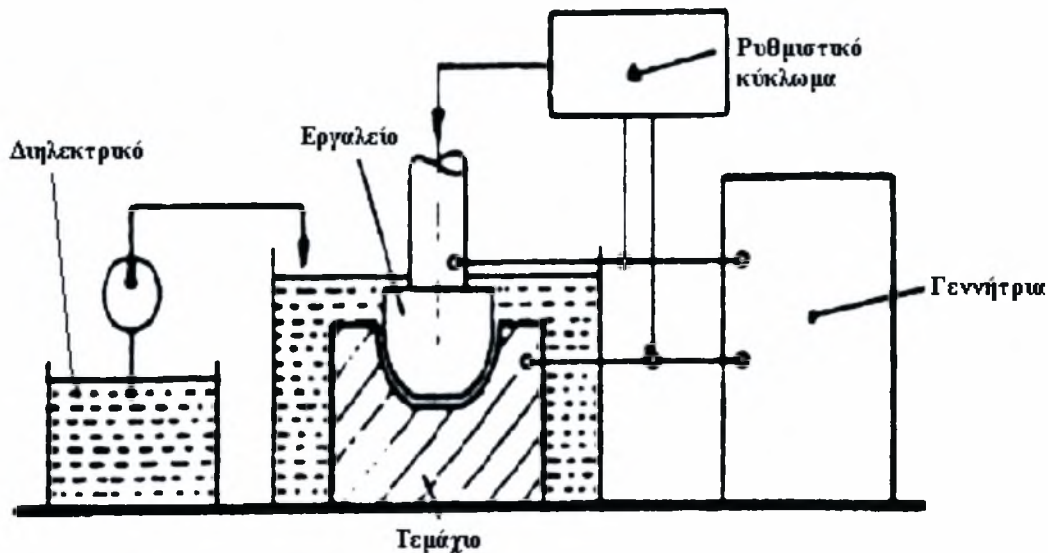


Σχήμα 2.2: Κατεργασίες αποβολής υλικού με Η/Δ.  
 (a) Κοπή, (b) Διάτρηση, (c) Λείανση, (d) Απότμηση  
 $W_s$  : κατεργασμένο τεμάχιο,  $W_z$  : εργαλείο.

## 2.4.1 Ηλεκτροδιάβρωση αποτύπωσης.

### 2.4.1.1 Βασικά τεχνολογικά στοιχεία.

Η αρχή της μεθόδου φαίνεται διαγραμματικά στο Σχήμα 2.3. Το τεμάχιο προσδένεται στο τραπέζι της Ε/Μς (όπως στο Σχήμα 2.1) και το εργαλείο κινείται με μία αυτορυθμιζόμενη πρόωση, ώστε μεταξύ του τεμαχίου και του εργαλείου να σχηματίζεται ένα ορισμένο "διάκενο". Το εργαλείο και το τεμάχιο βρίσκονται μέσα σε ένα διηλεκτρικό υγρό. Μεταξύ των ηλεκτροδίων επιβάλλεται μία τάση μεγαλύτερη από την τάση διάσπασης του διακένου μεταξύ των ηλεκτροδίων, που εξαρτάται από το σχήμα, την απόσταση των ηλεκτροδίων και τις μονωτικές ιδιότητες του διηλεκτρικού υγρού, με συνέπεια την πραγματοποίηση μίας εκκένωσης. Για την λειτουργία μιας Ε/Μής Η/Δς απαιτείται μια γεννήτρια παλμών τάσης και ένα σύστημα παροχής διηλεκτρικού υγρού.



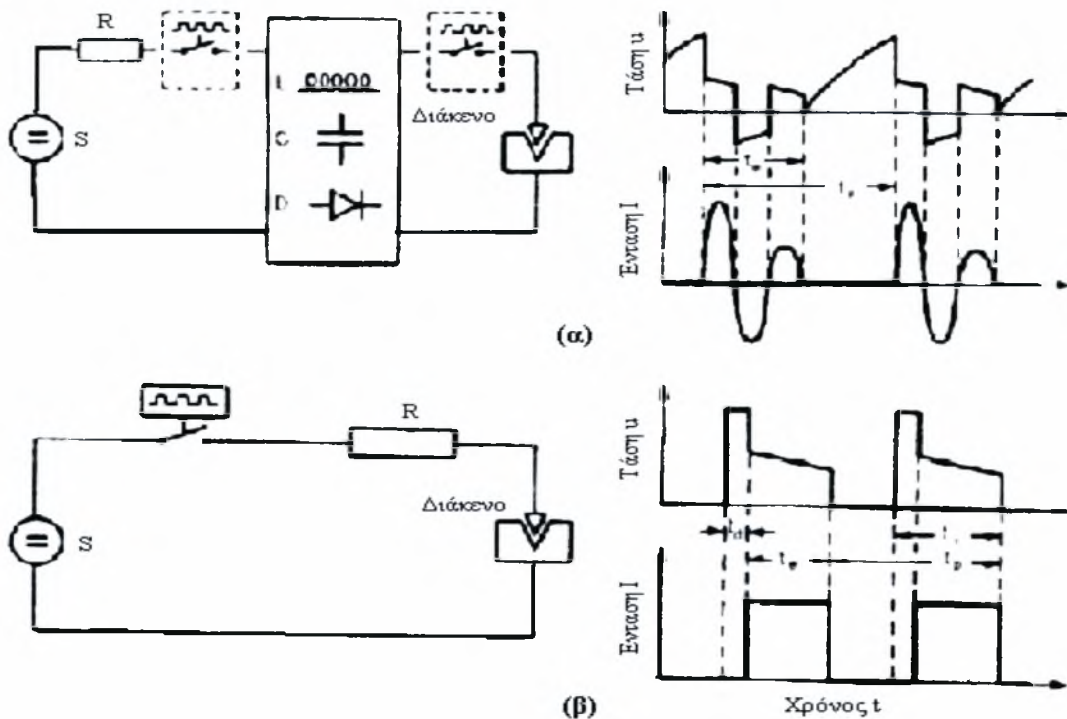
Σχήμα 2.3: Η/Δ αποτύπωσης (αρχή της μεθόδου).

### 2.4.1.2 Είδη γεννητριών.

Για την κατεργασία απαιτείται ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται από ειδικές γεννήτριες. Ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής παλμών, οι γεννήτριες τροφοδότησης διακρίνονται σε :

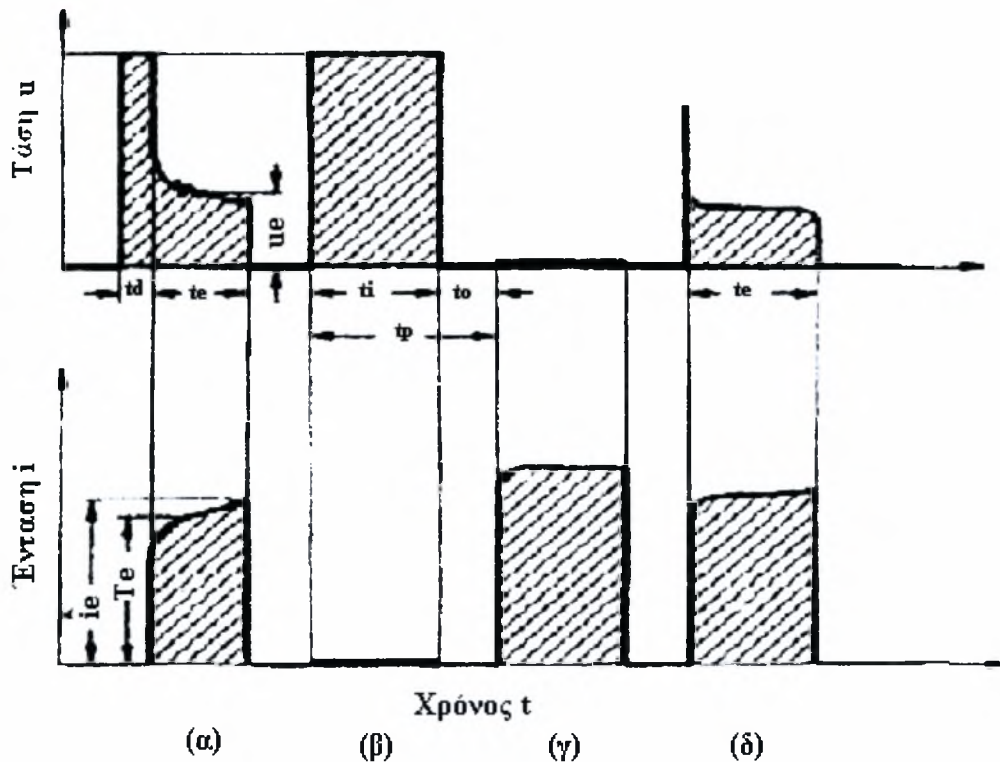
- **Περιστρεφόμενες παλμογεννήτριες**, που έχουν πολύ περιορισμένη εφαρμογή.
- **Γεννήτριες αποφόρτισης ή αποθήκευσης** Σχήμα 2.4(α), με κυκλώματα τροφοδοσίας μέσω πυκνωτών, πηνίων ή συνδυασμών τους.
- **Στατικές παλμογεννήτριες** Σχήμα 2.4(β) όπου το σύστημα τροφοδοσίας της τάσης συνδέεται μέσω συστοιχίας διακοπών με τον αγωγό εκκένωσης. Η διάρκεια

και η σειρά των εκκενώσεων εξαρτάται κυρίως από τη διαδοχή των φάσεων λειτουργίας των διακοπών.



**Σχήμα 2.4:** Είδη γεννητριών τροφοδοσίας Ε/Μς Η/Δς.  
 (α) Γεννήτρια απορρόφησης ή αποθήκευσης,  
 (β) Στατική παλμογεννήτρια.

Στο Σχήμα 2.4(α) & (β) δίνονται επίσης διαγραμματικά τυπικές μορφές παλμών τάσης και αντίστοιχης έντασης του ρεύματος για τους δύο τύπους των γεννητριών. Η μορφή των παλμών αυτών, τάσης και έντασης, εξαρτάται από το διάκενο μεταξύ του εργαλείου και του τεμαχίου, όπως φαίνεται στο σχήμα Σχήμα 2.5, για μία Ε/Μ στατικής παλμογεννήτριας. Επειδή οι συνθήκες στο διάκενο κατεργασίας αλλάζουν συνεχώς, οι διάφοροι παλμοί του Σχήματος 2.4 εμφανίζονται με μία στοχαστική (τυχαία) σειρά.



**Σχήμα 2.5:** Παλμοί τάσης και έντασης του ρεύματος σε μια στατική παλμογεννήτρια  
 (α) Παλμός εκκένωσης (κανονικό διάκενο).  
 (β) Παλμός εν κενώ (πολύ μεγάλο διάκενο).  
 (γ) Βραχυκύκλωμα (μηδενικό διάκενο).  
 (δ) Εσφαλμένη εκκένωση (πολύ μικρό διάκενο).

Ορίζονται:

- Η χρονική διάρκεια του παλμού,  $t_i$

$$t_i = t_d + t_e$$

- Η χρονική διάρκεια κατά την πρώτη φάση εκκένωσης  $t_d$  (φάσεις (α) και (β) στο Σχήμα 2.6).
- Η χρονική διάρκεια εκκένωσης,  $t_e$  (φάσεις (γ) και (δ) στο Σχήμα 2.6).
- Η χρονική απόσταση μεταξύ των παλμών,  $t_p$ .
- Ο λόγος χρονικής επαφής,  $\tau$  (duty factor).

$$\tau = t_i / t_p$$

- Η συχνότητα εκκένωσης,  $f_e$ , ως ο αριθμός των πραγματοποιούμενων εκκενώσεων στον αγωγό εκκένωσης στη μονάδα του χρόνου Σχήμα 2.6.

$$f_e = 1/t_e$$

- 
- Η παλμική συχνότητα,  $f_p$ , ως ο αριθμός των τασικών παλμών στη μονάδα του χρόνου.

$$f_p = 1/t_p$$

Στην πράξη χρησιμοποιούνται και γεννήτριες πολλαπλού τύπου, δηλαδή γεννήτριες που μπορεί να τροφοδοτούν συγχρόνως περισσότερα του ενός εργαλεία, είτε διαδοχικά είτε και ταυτόχρονα, για τη συντόμευση του χρόνου κατεργασίας, την κατασκευή πολύπλοκων τεμαχίων ή την ταυτόχρονη κατεργασία περισσότερων τεμαχίων.

#### 2.4.1.3 Ρυθμιστής πρόωσης.

Όλες οι Ε/Μές Η/Δς είναι εξοπλισμένες με ένα ρυθμιστή πρόωσης, ώστε το διάκενο να διατηρείται σταθερό. Η πρόωση πρέπει να ρυθμίζεται έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο, να αποφεύγεται η φθορά στο εργαλείο - ηλεκτρόδιο και επίσης, ανάλογα με τις εκάστοτε συνθήκες εργασίας, να αποφεύγονται βραχυκυκλώματα, εσφαλμένες εκκενώσεις και παλμοί λειτουργίας εν κενώ.

#### 2.4.1.4 Διηλεκτρικό υγρό.

Η κατεργασία με Η/Δ γίνεται μέσα σε ένα μέσο κατεργασίας που συνήθως είναι διηλεκτρικό υγρό. Ο κύριος ρόλος του διηλεκτρικού αυτού είναι:

- η δημιουργία διακένου ορισμένης διηλεκτρικής σταθεράς,
- η απομάκρυνση από το διάκενο των αφαιρούμενων μεταλλικών τεμαχιδίων,
- η ψύξη της περιοχής κατεργασίας για την απαγωγή της αναπτυσσόμενης θερμότητας από τις αλληπάλληλες διασπάσεις.

Τα διηλεκτρικά υγρά είναι, συνήθως, ενώσεις υδρογονανθράκων (βενζίνη, πετρέλαιο, έλαια μετασχηματιστών, ειδικά ορυκτέλαια, κηροζίνη κ.λπ). Η διάταξη ανακυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού, εκτός από την αντλία, περιλαμβάνει φίλτρο καθαρισμού και, ενδεχομένως, εναλλάκτη θερμότητας - διηλεκτρικού, νερού - για την απαγωγή της εκλυόμενης από τις εκκενώσεις θερμότητας. Τελευταία, για τη μικροκατεργασία και για την κοπή με Η/Δ με κινούμενο σύρμα - ηλεκτρόδιο, επιτυγχάνονται καλά αποτελέσματα και με απιονισμένο νερό ως μέσο κατεργασίας.

#### 2.4.1.5 Τεχνολογικές παράμετροι ηλεκτροδιάβρωσης.

Στην Η/Δ ορίζονται οι ακόλουθες τεχνολογικές παράμετροι :

- Η αποβολή υλικού ανά εκκένωση,  $V_{We}$ , που είναι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται από το κατεργάσιμο τεμάχιο σε μία εκκένωση.
- Η φθορά ανά εκκένωση,  $V_{Ee}$ , που είναι ο όγκος του υλικού που αποβάλλεται από το ηλεκτρόδιο - εργαλείο ανά εκκένωση.

- Η ταχύτητα αποβολής υλικού,  $v_w$ , που είναι ο ανά μονάδα χρόνου αποβαλλόμενος όγκος υλικού από το κατεργάσιμο τεμάχιο.
- Η ταχύτητα φθοράς,  $v_E$ , που είναι ο ανά μονάδα χρόνου αποβαλλόμενος όγκος του υλικού από το ηλεκτρόδιο – εργαλείο.
- Η σχετική φθορά,  $\theta$ , που είναι η σχέση της ταχύτητας φθοράς  $v_E$  με την ταχύτητα αποβολής υλικού  $v_w$ .

$$\theta = v_E / v_w$$

και αποτελεί το χαρακτηριστικό μέγεθος τις φθοράς του εργαλείου.

Τη μεγαλύτερη επίδραση στην κατεργασία έχουν η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης,  $W_e$  και ο λόγος χρονικής επαφής,  $t$ . Η **ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης** (ενέργεια παλμού) δίνεται από τη σχέση :

$$W_e = \int_{t_e} u_e(t) i_e(t) dt \approx \bar{u}_e \bar{i}_e t_e \quad (2.1)$$

όπου  $\bar{u}_e$  και  $\bar{i}_e$  είναι η μέση τάση και η μέση ένταση της εκκένωσης αντίστοιχα και  $t_e$  η χρονική διάρκεια της. Σημειώνεται ότι η ενέργεια μπορεί να μεταβληθεί με μεταβολή της μέσης έντασης του ρεύματος εκκένωσης, καθώς επίσης με μεταβολή της διάρκειας της εκκένωσης. Η μέση τάση εκκένωσης, που εξαρτάται μόνο από το υλικό των ηλεκτροδίων και το διηλεκτρικό μέσο, παραμένει σταθερή και είναι περίπου 15 - 30 V ανάλογα με το υλικό.

#### 2.4.1.6 Υλικά κατασκευής εργαλείων ηλεκτροδιάβρωσης.

Γενικά, κάθε υλικό που είναι αγωγός του ηλεκτρικού ρεύματος, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή εργαλείων Η/Δς. Η πράξη όμως έχει αποδείξει ότι για να επιτευχθούν τα καλύτερα δυνατά αποτελέσματα, επιβάλλεται να επιλέγονται υλικά εργαλείου λαμβάνοντας υπόψιν κάθε φορά το υλικό του προς κατεργασία τεμαχίου, το είδος της κατεργασίας που πρόκειται να γίνει καθώς και τον τύπο της γεννήτριας που διαθέτει η Ε/Μ. Χρησιμοποιούνται κυρίως ο χαλκός, τα κράματά του, ο γραφίτης, ενώ προϊόντα κονιομεταλλουργίας, όπως ο χαλκός - γραφίτης, βολφράμιο - χαλκός, καρβίδιο του βολφραμίου και κοβάλτιο, βρίσκουν εφαρμογή σε ειδικές περιπτώσεις.

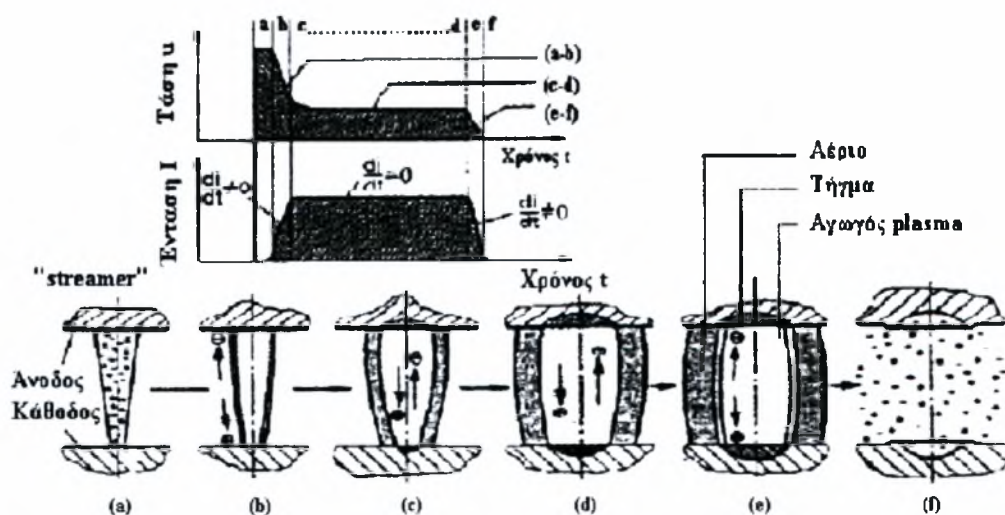
Ο γραφίτης προσφέρεται έναντι του χαλκού, για τις περισσότερες εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει είναι: μεγάλη αντοχή σε θερμική καταπόνηση, έχει επαρκή μηχανικά χαρακτηριστικά, χρησιμοποιείται για την κατεργασία δύσκολων σχημάτων και διατηρεί το σχήμα και τις διαστάσεις του κατά τη διάρκεια της κατεργασίας (συντελεστής διαστολής του γραφίτη το 1/4 περίπου του χαλκού). Επειδή το ειδικό βάρος του γραφίτη είναι το 1/5 του χαλκού, ενδείκνυται για μεγάλα εργαλεία - ηλεκτρόδια. Παράλληλα, εξασφαλίζει μεγαλύτερη απόδοση στην αφαίρεση υλικού, μικρότερη φθορά εργαλείου και συγκριτικά με το χαλκό καλύτερη ποιότητα επιφάνειας. Χρησιμοποιείται συνεπώς τόσο για κατασκευή εργαλείων ξεχονδρίσματος όσο και εργαλείων αποπερατώσεως.

Τα εργαλεία - ηλεκτρόδια κατασκευάζονται κυρίως με κοπή, σε συνήθεις Ε/Μές, ενώ για κατεργασία κομματιών πολύ μεγάλων διαστάσεων γίνεται ψυχρή διαμόρφωση ελασμάτων χαλκού. Στην τελευταία περίπτωση το σχήμα που δίνεται στο χάλκινο έλασμα ενισχύεται εσωτερικά με μεταλλικές νευρώσεις, για να αντέχει στις μηχανικές και υδροδυναμικές (από την εξαναγκασμένη ροή του διηλεκτρικού στο διάκενο) καταπονήσεις.

Για την κατασκευή εργαλείων Η/Δς, οι εποξειδικές ρητίνες με επιμετάλλωση (π.χ. επιψευδαργύρωση) και σπανιότερα εφαρμόζεται η χύτευση χαλκού. Έχει μεγάλη πρακτική σημασία να επιδιώκεται να ανοίγονται πολλές διαμπερείς σπές μικρής διαμέτρου (~ 0,35-0,5 mm) στο σώμα του εργαλείου - ηλεκτροδίου για την αποτελεσματικότερη κυκλοφορία του διηλεκτρικού στις θέσεις κατεργασίας, ιδίως στα πολύπλοκα εργαλεία. Για το σκοπό αυτό περισσότερο από το χαλκό προσφέρεται ο γραφίτης, που άνετα επιτρέπει διάνοιξη σπών διαμέτρου 0,4 mm και μήκους μέχρι 150 mm.

#### 2.4.1.7 Μηχανισμός αποβολής υλικού.

Ο ακριβής μηχανισμός με τον οποίο πραγματοποιείται η κατεργασία έχει αποτελέσει θέμα εκτεταμένης έρευνας και αρκετές θεωρίες έχουν προταθεί, χωρίς καμία ωστόσο να είναι πλήρης και να εξηγεί στο σύνολό της τα παρατηρούμενα φαινόμενα. Οι κυριότερες απ' αυτές είναι: η ηλεκτρομηχανική, η θερμομηχανική και η θερμοηλεκτρική η οποία αποτελεί την πλέον παραδεκτή προσέγγιση. Οι διάφορες φάσεις που πραγματοποιείται η εκκένωση και η αποβολή υλικού με βάση τη θεωρία αυτή φαίνονται διαγραμματικά στο *Σχήμα 2.6*, όπου παρουσιάζεται και η μεταβολή της εφαρμοζόμενης τάσης και της έντασης του ρεύματος εκκένωσης σε σχέση με τη χρονική διάρκειά τους.



*Σχήμα 2.6:* Μηχανισμός αποβολής υλικού κατά την Η/Δ.

Κατά την έναρξη της εκκένωσης υπάρχει μία χρονικά ταχεία μεταβολή της τάσης και της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου και δημιουργείται ένας έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης από τη διάσπαση του διηλεκτρικού *Σχήμα 2.6(a)*. Με την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα του διηλεκτρικού κινούνται προς την κατεύθυνση της αντίθετης πολικότητας ηλεκτροδίων. Τα πολύ

---

γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια συγκρούονται με μόρια του διηλεκτρικού, επιταχύνονται, συγκρούονται και πάλι με μόρια και, από την αλυσιδωτή αυτή αντίδραση, δημιουργείται σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα ο αγωγός εκκένωσης. Σύμφωνα με άλλες θεωρίες, ο μηχανισμός διάσπασης πραγματοποιείται από την αναπτυσσόμενη θερμότητα που έχει ως συνέπεια την εξάτμιση του διηλεκτρικού μέσου.

Ο έντονα ιονισμένος αγωγός εκκένωσης επιτρέπει τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μεγάλης έντασης. Η εκλυόμενη ηλεκτρική ενέργεια από την εκκένωση μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια, που έχει ως αποτέλεσμα να αρχίζει η τήξη και η ακαριαία εξάτμιση ορισμένου όγκου υλικού στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων *Σχήμα 2.6(β)*. Η ένταση του ρεύματος εκκένωσης αποκτά τότε τη μέγιστη τιμή της. Δημιουργείται στον κλάδο της εκκένωσης ένας αγωγός πλάσματος (ιονισμένο αέριο μεγάλης θερμοκρασίας 8000 - 12000° K), που αποτελείται από θετικά φορτισμένα ιόντα μετάλλου και αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια από την εξάτμιση των υλικών των ηλεκτροδίων και από ουδέτερα μεταλλικά άτομα.

Στις επόμενες φάσεις, η ένταση του ρεύματος εκκένωσης παραμένει χρονικά σταθερή, στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων ένας ορισμένος όγκος μετάλλου τήκεται ή εξατμίζεται ακαριαία σχηματίζοντας ένα νέφος αερίου υψηλής πίεσης (της τάξης αρκετών εκατοντάδων ατμοσφαιρών) και δημιουργείται ένας κρατήρας, *Σχήμα 2.6(γ) & (δ)*. Ο αγωγός πλάσματος και το νέφος του αερίου αυξάνονται σταθερά.

Με τη διακοπή της ηλεκτρικής τάσης, *Σχήμα 2.6(ε)*, η πίεση του νέφους μειώνεται απότομα, ο αγωγός πλάσματος και το νέφος διασπώνται και το, εν μέρει ρευστό εν μέρει εξαερωμένο, υλικό απομακρύνεται υπό σφαιροειδή μορφή από τον κρατήρα μέσω του διηλεκτρικού υγρού, *Σχήμα 2.6(στ)*.

Ο όγκος του υλικού που αφαιρείται από το εργαλείο και το κατεργάσιμο τεμάχιο σε μία εκκένωση δεν είναι ο ίδιος. Εξαρτάται κυρίως από την πολικότητα και τις ιδιότητες του υλικού των ηλεκτροδίων καθώς επίσης από τη διάρκεια και το ρεύμα της εκκένωσης. Με κατάλληλη εκλογή του υλικού του εργαλείου - ηλεκτροδίου και με αλλαγή των παραμέτρων εκκένωσης μπορεί να επιτευχθεί μία σημαντική ασυμμετρία, π.χ. 99,5 % αφαίρεση του υλικού στο τεμάχιο - ηλεκτρόδιο και 0,5 % στο εργαλείο - ηλεκτρόδιο.

Η παραπάνω περιγραφή αναφέρεται σε απλή εκκένωση (single discharge). Στην πραγματικότητα, οι βιομηχανικές εφαρμογές της Η/Δ αναφέρονται σε πολλαπλές εκκενώσεις (multiple discharges) σε τυχαίες θέσεις μεταξύ τεμαχίου - εργαλείου. Η στοχαστική φύση του φαινομένου αυτού καθιστά δύσκολη τη θεωρητική προσέγγιση και, μέχρι στιγμής, μόνο η εκτεταμένη πειραματική εργασία μπορεί να συσχετίσει τις παραμέτρους της κατεργασίας με τις μηχανικές ιδιότητες της προκύπτουσας επιφάνειας.

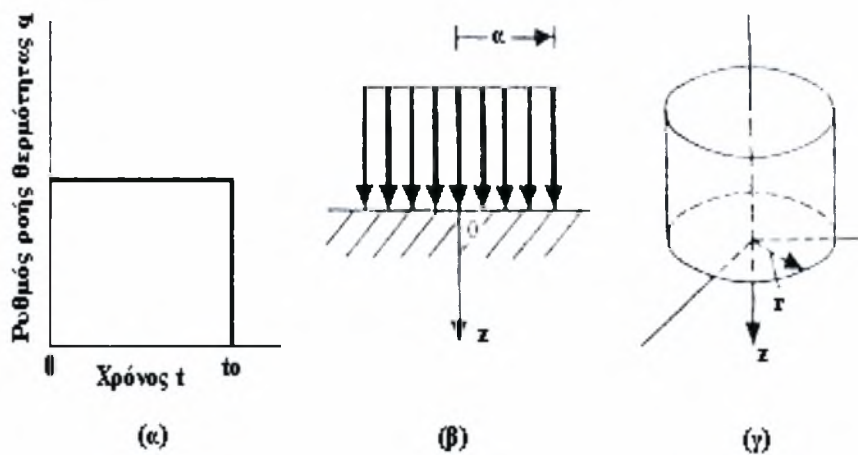
#### **2.4.1.8 Μαθηματική ανάλυση του μηχανισμού αποβολής υλικού κατά τη ηλεκτροδιάβρωση.**

Μία ακριβής μαθηματική σχέση του μηχανισμού αποβολής δεν είναι μέχρι τώρα γνωστή, ενώ, μία πρώτη προσέγγιση των πολύπλοκων φαινομένων που υπεισέρχονται μπορεί να γίνει με το μοντέλο της θερμικής πηγής (heat source) που παρουσιάζεται στη συνέχεια. Η θεωρία αυτή συσχετίζει τον όγκο που αποβάλλεται κατά την διάρκεια απλής εκκένωσης με τις παραμέτρους της κατεργασίας και στηρίζεται στις ακόλουθες παραδοχές :



- Ο σπινθήρας / εκκένωση θεωρείται ομοιόμορφη κυκλική πηγή θερμότητας με σταθερή διάμετρο.
- Η επιφάνεια του ηλεκτροδίου θεωρείται ημίγειρο μέσο και εκτός από το τμήμα της θερμικής πηγής είναι μονωμένο.
- Ο ρυθμός της ροής της θερμότητας παραμένει σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια της εκκένωσης.
- Οι ιδιότητες των υλικών δεν αλλάζουν με τη θερμοκρασία.
- Φαινόμενα ατμοποίησης αγνοούνται.

Το απλοποιημένο μοντέλο θερμικής πηγής εικονίζεται στο Σχήμα 2.7.



**Σχήμα 2.7:** Μοντέλο θερμικής πηγής για την Η/Δ,  
 (α) Χρονική μεταβολή της ροής θερμότητας.  
 (β) Ομοιομορφία της ροής θερμότητας.  
 (γ) Κυκλική θερμική πηγή.

Η αγωγή της θερμότητας περιγράφεται από την εξίσωση

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} = \alpha \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right) \quad (2.2)$$

με αρχικές και οριακές συνθήκες :

$$t \leq 0, \Theta(r, z, t) = 0$$

$$t > 0, r > a, \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 0 \quad (2.3)$$

$$0 < r < a, -K \frac{\partial \Theta}{\partial Z} = \frac{H}{\pi \alpha^2 t_e}$$

όπου  $H$  είναι το ποσό θερμότητας,  $\Theta$  η θερμοκρασία,  $t$  ο χρόνος,  $K$  η θερμική αγωγιμότητα,  $\alpha$  ο συντελεστής θερμικής διάχυσης,  $t_e$  η διάρκεια εκκένωσης και  $\Theta_m$  η θερμοκρασία τήξης.

Δεδομένου ότι το μέγιστο βάθος  $Z$ , όπου επιτυγχάνεται η θερμοκρασία τήξης  $\Theta_m$  (ισόθερμη καμπύλη τήξης), βρίσκεται στον άξονα συμμετρίας, προκύπτει κατά συνέπεια με  $r = 0$ .

$$\Theta(0, z, t_e) = \frac{1}{2} \frac{H}{\pi K \alpha t_e} \int_0^\infty J_0(\xi \alpha) J_1(\xi \alpha) \left[ e^{-\xi z} \operatorname{erfc} \left\{ \frac{z}{2\sqrt{\alpha t_e}} - \xi \sqrt{\alpha t_e} \right\} \right] \frac{d\xi}{\xi} \quad (2.4)$$

$$\Theta_m = \frac{2H\sqrt{\alpha t_e}}{\pi K \alpha^2 t_e} \left[ \operatorname{ierfc} \frac{Z}{2\sqrt{\alpha t_e}} - \operatorname{ierfc} \frac{\sqrt{Z^2 + \alpha^2}}{2\sqrt{\alpha t_e}} \right] \quad (2.5)$$

όπου

$$\operatorname{ierfc}(\zeta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\zeta^2} - \zeta \operatorname{erfc} \zeta, \operatorname{erfc}(\zeta) = 1 - \operatorname{erf}(\zeta) \quad (2.6)$$

και

$$\operatorname{erf}(\zeta) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\zeta e^{-x^2} dx \quad (2.7)$$

Αν ληφθεί υπόψη και η λανθάνουσα θερμότητα τήξης, η παροχή θερμότητας στο κατεργάσιμο υλικό,  $Q_\theta$  είναι :

$$Q_\theta = \frac{H_t - H_m \rho \pi \alpha^2 Z}{\pi \alpha^2 t_e} \quad (2.8)$$

όπου  $H_t$  είναι η ολική εκλυόμενη θερμότητα,  $H_m$  η λανθάνουσα θερμότητα και  $\rho$  η πυκνότητα του υλικού.

Η διάμετρος του κρατήρα,  $d_c$  λαμβάνεται ίση με τη διάμετρο της θερμικής πηγής,  $2a$ , οπότε:

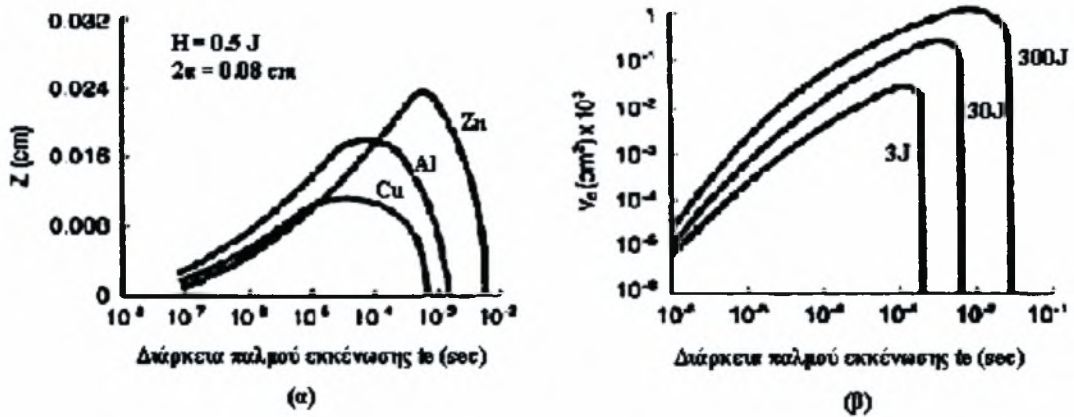
$$d_c = K W_e^{n_1} t_e^{n_2} \quad (2.9)$$

όπου  $W_e$  είναι η ολική ενέργεια του παλμού και  $n_1, n_2, K$  σταθερές που εξαρτώνται από τις ιδιότητες των ηλεκτροδίων και του διηλεκτρικού.

Το βάθος  $Z$  της επέκτασης της ισόθερμης καμπύλης της τήξης σχετίζεται με το βάθος του κρατήρα,  $h_c$  με τη σχέση :

$$V_c = \frac{\pi}{6} h_c (3\alpha^2 + h_c^2) \quad (2.10)$$

όπου  $V_c$  είναι ο όγκος του κρατήρα. Σημειώνεται ότι, η παράμετρος  $Z$  αποτελεί ένδειξη του όγκου του αφαιρούμενου υλικού,  $V_{we}$ , η δε θεωρητική μεταβολή της, συναρτήσει της διάρκειας εκκένωσης δίνεται στο Σχήμα 2.8(α), για διάφορα υλικά ηλεκτροδίου. Η πραγματική μεταβολή του όγκου του κρατήρα,  $V_c$ , που εξαρτάται άμεσα από το  $Z$  δίνεται στο Σχήμα 2.8(β). Καθίσταται εμφανές ότι η ταχύτητα αποβολής υλικού φθάνει μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια μηδενίζεται απότομα.



**Σχήμα 2.8:** Μεταβολή (α) της έκτασης της ισόθερμης τήξης και (β) του όγκου του κρατήρα με τη διάρκεια του παλμού εκκένωσης.

Για μια πρώτη προσέγγιση του ρυθμού αποβολής υλικού και, δεδομένου ότι το μέγεθος του κρατήρα εξαρτάται από την ενέργεια του παλμού (όταν οι άλλες παράμετροι μένουν αμετάβλητες), χρησιμοποιούνται οι σχέσεις :

$$\begin{aligned} h_c &= K_1 W_e^{1/3} \\ 2\alpha &= K_2 W_e^{1/3} \end{aligned} \quad (2.11)$$

όπου  $W_e$  είναι ενέργεια του παλμού και  $K_1, K_2$  σταθερές.

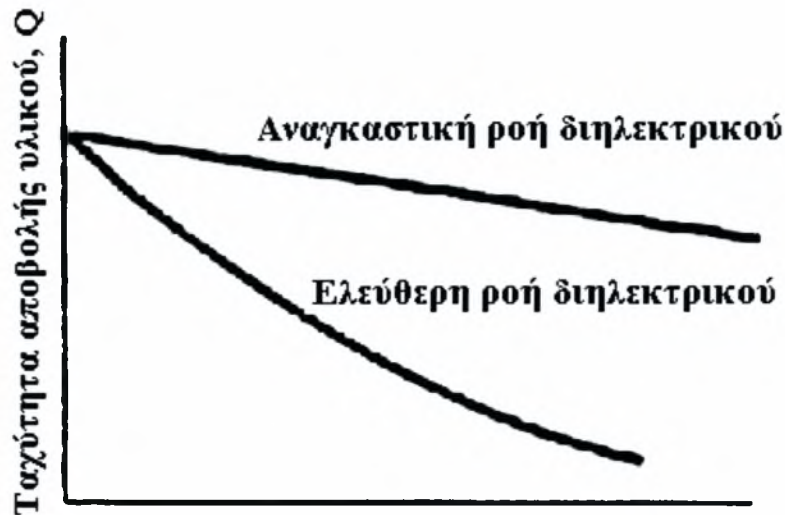
Αντικαθιστώντας στην εξίσωση (2.8) προκύπτει :

$$V_c = \frac{\pi}{6} K_1 \left( \frac{3K_2^2}{4} + K_1^2 \right) W_e \quad (2.12)$$

Για ηλεκτρόδιο από χαλκό (Cu) και διηλεκτρικό κηροζίνη  $K_1 \approx 0,4$  και  $K_2 = 0,045$ , και συνεπώς :

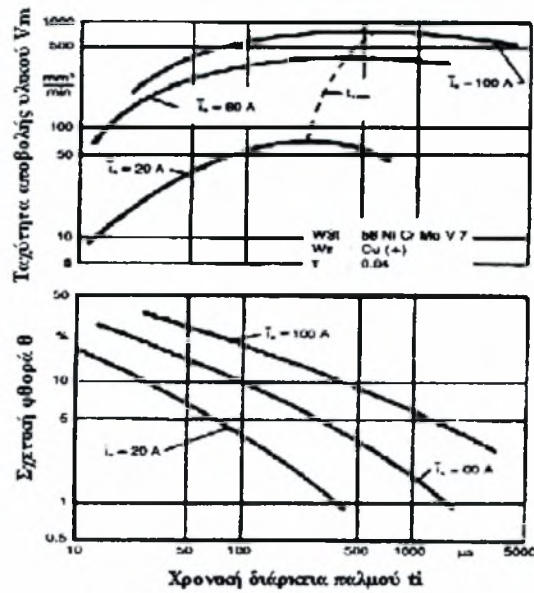
$$V_c = 0,034 W_e \quad (2.13)$$

Ο ρυθμός αποβολής υλικού εξαρτάται σημαντικά και από τον τρόπο κυκλοφορίας του διηλεκτρικού υγρού. Η αναγκαστική ροή του διηλεκτρικού απομακρύνει τα σωματίδια φθοράς και η ταχύτητα της κατεργασίας βελτιώνεται βλέπε Σχήμα 2.9.



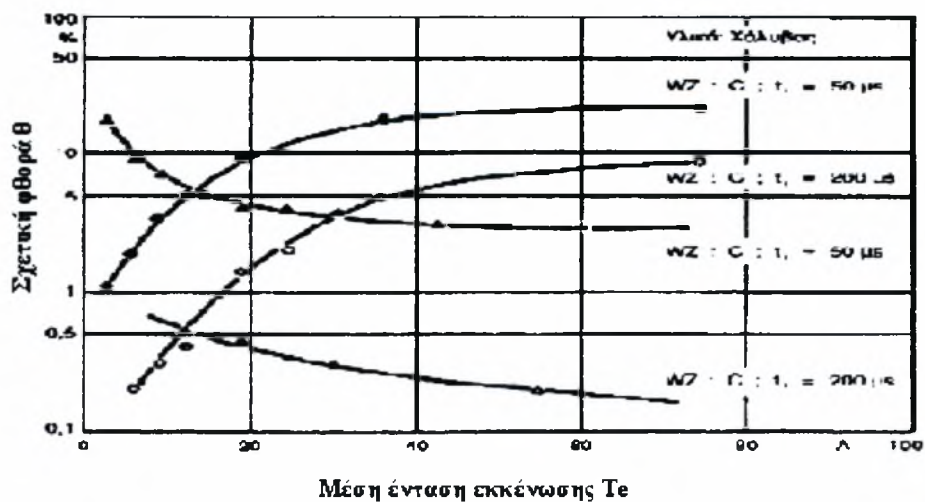
**Σχήμα 2.9:** Επίδραση της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού στο ρυθμό αποβολής υλικού κατά την Η/Δ.

Με αύξηση της χρονικής διάρκειας παλμού,  $t_i$  ή της εκκένωσης  $t_e$  μεγαλώνει το διάκενο μεταξύ των ηλεκτροδίων και αυτό έχει ως συνέπεια την αύξηση της σχετικής φθοράς βλέπε Σχήμα 2.10. Η ταχύτητα αποβολής υλικού του κατεργάσιμου τεμαχίου,  $v_w$  αυξάνεται στην αρχή με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού,  $t_i$ , αποκτά μια μέγιστη τιμή και στη συνέχεια ελαττώνεται βλέπε Σχήμα 2.10. Η ελάττωση αυτή της  $v_w$  οφείλεται στο ότι με την αύξηση της χρονικής διάρκειας του παλμού αυξάνεται το ποσό της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού και ο αγωγός εκκένωσης μεγαλώνει. Μετά την επίτευξη της βέλτιστης διαμέτρου του αγωγού, κατά τη χρονική στιγμή  $t_{opt}$ , αυξάνουν οι απώλειες ενέργειας λόγω απαγωγής στα ηλεκτρόδια και στο διηλεκτρικό μέσο και λόγω ακτινοβολίας και, συνεπώς, με την περαιτέρω αύξηση της διάρκειας του παλμού μειώνεται η ταχύτητα αποβολής υλικού. Επίσης, με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, αυξάνεται η ταχύτητα αποβολής λόγω της αύξησης του ωφέλιμου ποσού της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αφαίρεση του υλικού.



**Σχήμα 2.10:** Μεταβολή της ταχύτητας αποβολής υλικού από το τεμάχιο της σχετικής φθοράς σε σχέση με τη χρονική διάρκεια παλμού κατά την Η/Δ χάλυβα με εργαλείο από χαλκό και με στατική παλμογεννήτρια.

Η σχετική φθορά των υλικών των εργαλείων που χρησιμοποιούνται συχνότερα, χαλκός ή γραφίτης, σε σχέση με τη μέση ένταση εκκένωσης φαίνεται στο Σχήμα 2.11. Η σχετική φθορά του χαλκού αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος εκκένωσης, επειδή με την αύξηση της ενέργειας εκκένωσης, αυξάνεται επίσης το τηκόμενο υλικό του ηλεκτροδίου καθώς και το ποσό του υλικού που εξαερώνεται κατά την έναρξη της εκκένωσης. Αντίθετα, στο γραφίτη παρουσιάζεται μείωση της φθοράς με την αύξηση της μέσης έντασης της εκκένωσης. Συνεπώς, ο γραφίτης είναι πλέον κατάλληλος για κατεργασίες εκχόνδρισης όπου χρησιμοποιούνται μεγάλες εντάσεις ρεύματος εκκένωσης και μεγάλη διάρκεια εκκένωσης, ενώ ο χαλκός είναι προτιμητέος στις τελικές κατεργασίες, όπου απαιτούνται μικρή διάρκεια εκκένωσης και μικρές εντάσεις ρεύματος εκκένωσης.

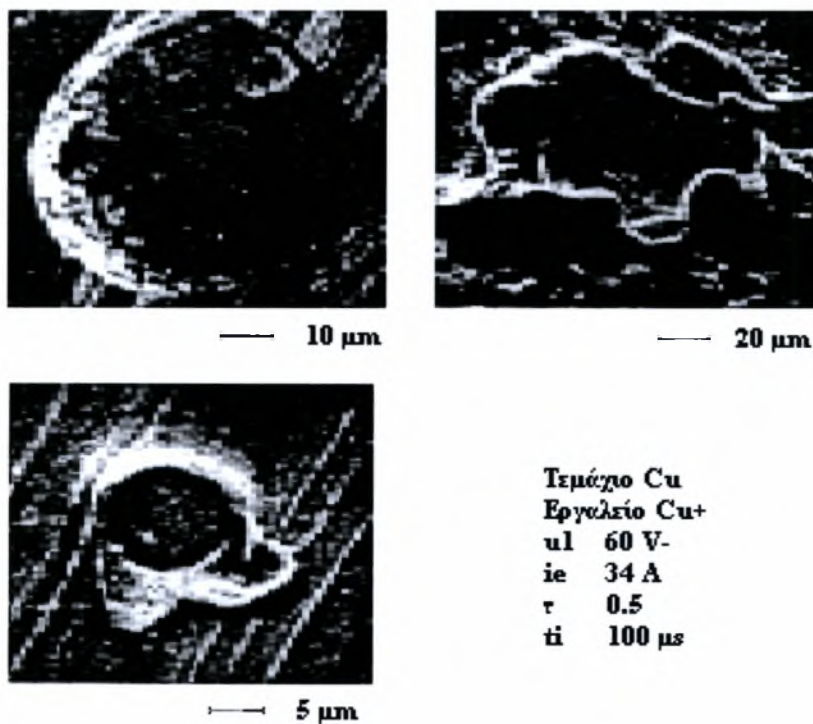


**Σχήμα 2.11:** Σχετική φθορά εργαλείου από χαλκό και γραφίτη κατά την Η/Δ.

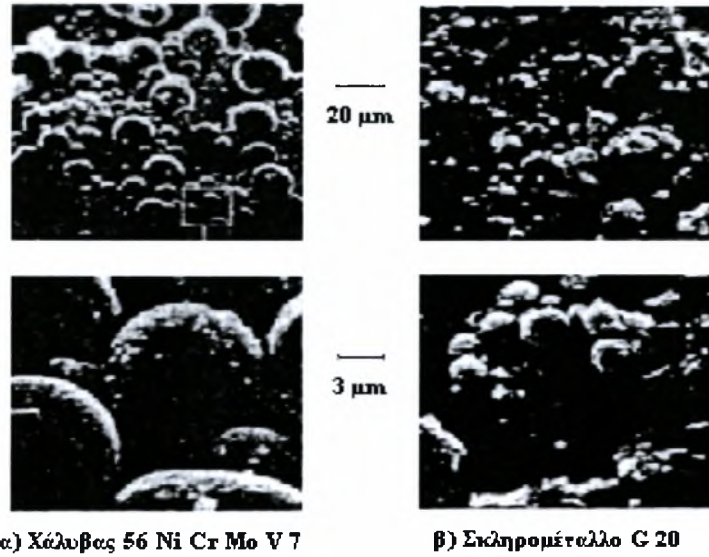
#### 2.4.1.9 Ομοιομορφία (πιστότητα) κατεργασμένης επιφάνειας.

Στις εφαρμογές της Η/Δς δίνεται μεγάλη έμφαση στις μεταλλουργικές αλλαγές και στη δημιουργία ζωνών θερμικής επίδρασης μιας ηλεκτροδιαβρωμένης επιφάνειας καθώς και στο συσχετισμό παραμέτρων της Η/Δς με τις μηχανικές ιδιότητες της προκύπτουσας επιφάνειας. Ο συσχετισμός αυτός επιτυγχάνεται με τη συστηματική προσέγγιση της ομοιομορφίας (πιστότητας) της κατεργάσιμης επιφάνειας (surface integrity).

Ο κύριος μηχανισμός της Η/Δς είναι το θερμικό φαινόμενο, πλην όμως υπεισέρχονται και μηχανικά φαινόμενα. Η δημιουργία κρατήρα στο κατεργάσιμο τεμάχιο, *Σχήμα 2.12*, η σφαιροειδής μορφή των αποβαλλομένων τεμαχίων του υλικού κατά την κατεργασία χάλυβα, *Σχήμα 2.13(a)*, η αλλαγή της δομής των υλικών των ηλεκτροδίων, οι παραμένουσες εφελκυστικές τάσεις και οι εμφανιζόμενες μικρορωγμές στην επιφάνεια του κατεργάσιμου τεμαχίου είναι σαφή δείγματα του θερμικού φαινομένου που λαμβάνει χώρα. Επιπλέον η μορφή του κρατήρα, *Σχήμα 2.13 (a)*, είναι συνέπεια όχι μόνο του θερμικού φαινομένου, αλλά και μηχανικών κρουστικών φορτίσεων. Γενικά, στην Η/Δ ψαθυρών υλικών τα οποία έχουν μεγαλύτερες θερμοκρασίες τήξης και εξαέρωσης, βλέπε *Σχήμα 2.13(β)* για Η/Δ σκληρομετάλλου, η συμβολή του μηχανικού φαινομένου στην κατεργασία είναι μεγαλύτερη σε σχέση με υλικά με μικρότερο σημείο τήξης.



*Σχήμα 2.12:* Διάφορες μορφές κρατήρα στο κατεργάσιμο τεμάχιο κατά την Η/Δ χαλκού με εργαλείο από χαλκό.



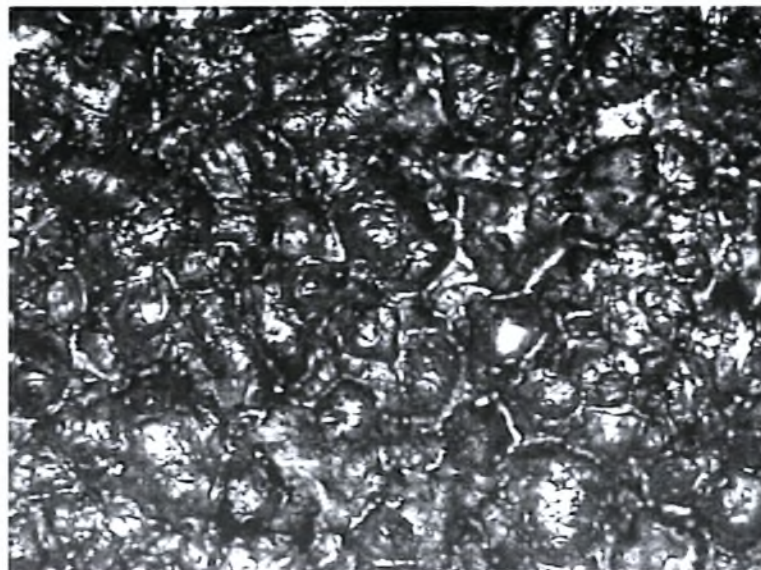
α) Χάλυβας 56 Ni Cr Mo V 7

β) Σκληρομέταλλο C 20

Εργαλείο γραφίτης	Δηλεκτροσό Shell - Sol - T
ie 28 A	τ 0.5
ti 100 μs	u1 150 V

**Σχήμα 2.13:** Μορφές αφαιρούμενων μεταλλικών τεμαχίων κατά την Η/Δ με εργαλείο από γραφίτη για υλικό: α) χάλυβα, β) σκληρομέταλλο.

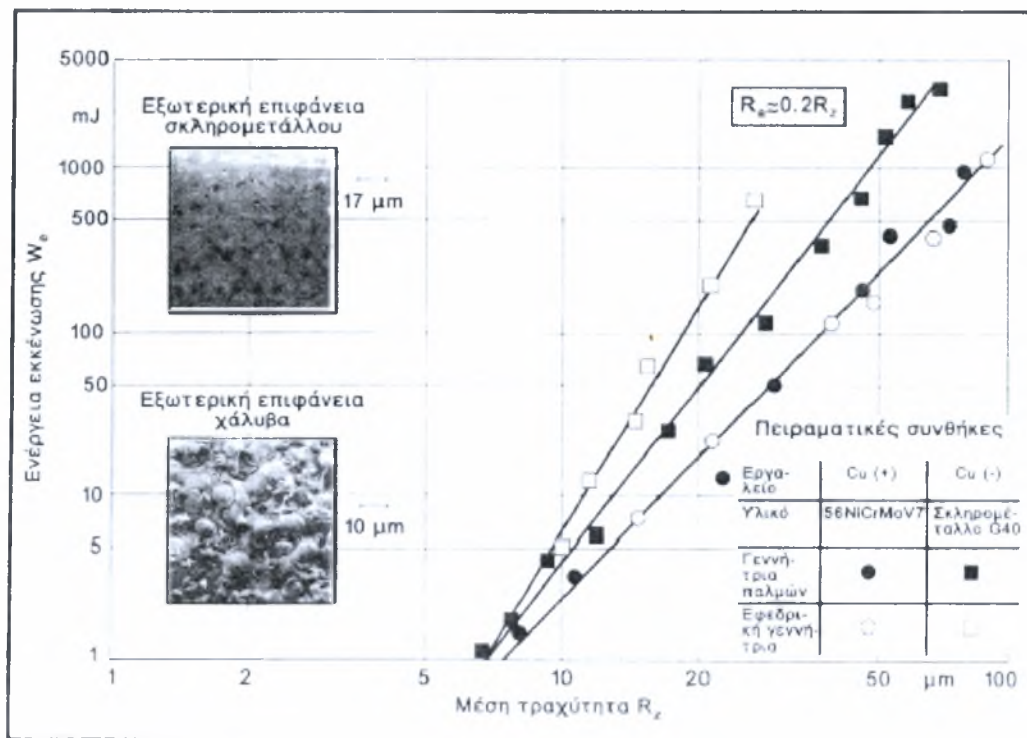
Τα προηγούμενα έχουν ως αποτέλεσμα η τοπογραφία της ηλεκτροδιαβρωμένης επιφάνειας να μπορεί να περιγραφεί ως μια γεωμετρία επαλληλίας κρατήρων. Η μορφή αυτή της επιφάνειας ανταποκρίνεται στη στοχαστική μορφή της κατεργασίας, που σε συνδυασμό με το θερμικό φαινόμενο, δημιουργεί επάλληλους κρατήρες με επιφανειακές σταγόνες επανατηγμένου υλικού, επιφανειακές κηλίδες και μικρορωγμές. Κατά συνέπεια, η ηλεκτροδιαβρωμένη επιφάνεια παρουσιάζει μια αρκετά τραχεία (μη στιλπνή) εμφάνιση, ενώ η επιφανειακή τραχύτητα γίνεται αντιληπτή και με την αφή. Τυπική μορφολογία ηλεκτροδιαβρωμένης επιφάνειας παρουσιάζεται στο *Σχήμα 2.14*.



**Σχήμα 2.14:** Τυπική μορφολογία ηλεκτροδιαβρωμένης επιφάνειας.

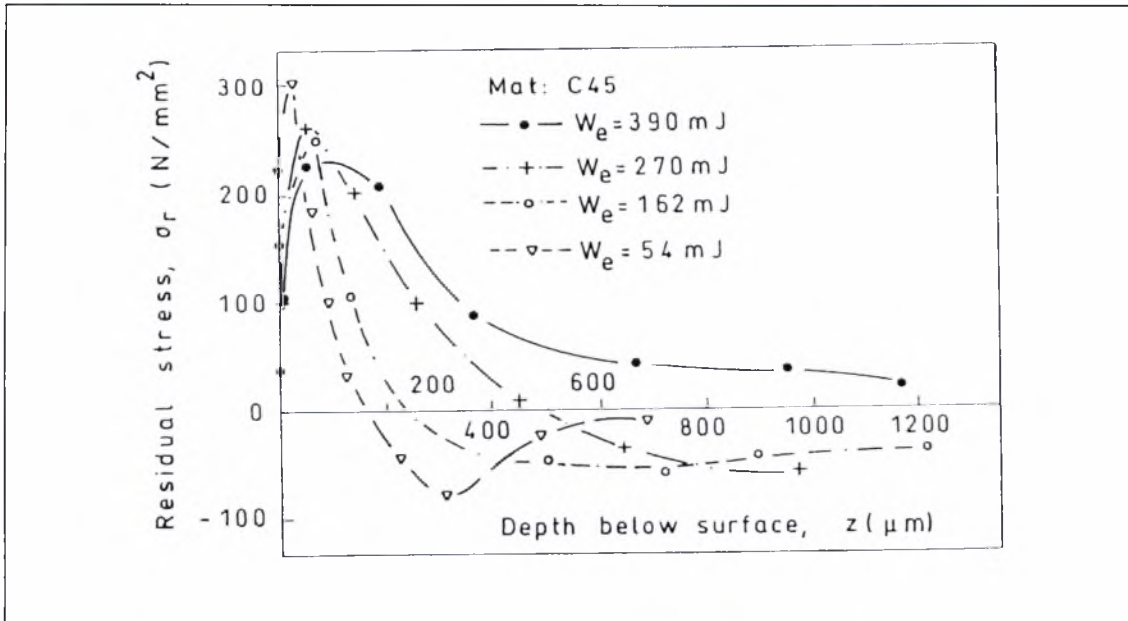
Η μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$  ή το μέγεθος  $R_z$ , εξαρτώνται από το μέγεθος του κρατήρα εκκένωσης. Για την επίτευξη μεγάλων ταχυτήτων αποβολής υλικού,  $v_w$  απαιτούνται μεγάλες ενέργειες εκκένωσης για την κατεργασία όπου η προκύπτουσα τραχύτητα επιφάνειας είναι μεγάλη. Για την επίτευξη μικρής τραχύτητας επακολουθεί κατεργασία με μικρότερη ενέργεια και συνεπώς επιτυγχάνεται μικρή μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$ . Η καλύτερη μέση τραχύτητα επιφάνειας που επιτυγχάνεται στην κατεργασία των σκληρομετάλλων έναντι αυτής των χαλύβων, οφείλεται στη μικρότερη αποβολή υλικού ανά εκκένωση. Γενικά, η επιφανειακή τραχύτητα αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας του παλμού εκκένωσης, *Σχήμα 2.15*. Σήμερα με υβριδικές τεχνικές Η/Δς μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν απόλυτα λεία επιφάνεια, ωστόσο το κόστος της μεθόδου αυτής είναι πολύ υψηλό για κοινή εμπορική χρήση.

Η θερμική επίδραση πάνω σε μια επιφάνεια έχει και μια άλλη σημαντική συνέπεια, τη δημιουργία ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης καθώς και την ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων, σε αντίθεση προς τις μηχανικές κατεργασίες. Το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων και το βάθος διείσδυσης της λεπτής ζώνης πλαστικής παραμόρφωσης στα επιφανειακά στρώματα κατά την Η/Δ εξαρτώνται από την ενέργεια εκκένωσης. Μεγάλο ποσό εκλυόμενης ενέργειας είναι δυνατό να οδηγήσει σε χαλάρωση των τάσεων, πράγμα που οφείλεται κυρίως στη δημιουργία μικρών ρωγμών στην κατεργασμένη επιφάνεια. Τυπικές κατανομές παραμενουσών τάσεων για διαφορετικές ενέργειες παλμών παρουσιάζονται στο *Σχήμα 2.16*.



**Σχήμα 2.15:** Μεταβολή της τραχύτητας επιφάνειας σε συνάρτηση με την ενέργεια του παλμού κατά την Η/Δ.





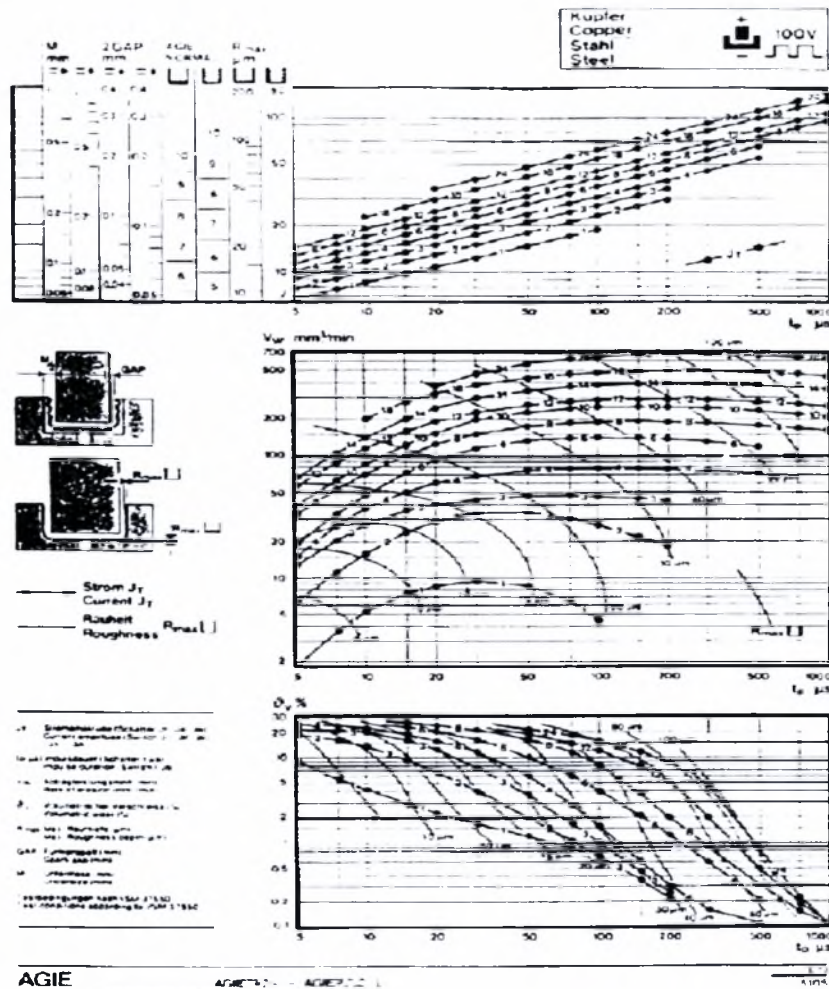
**Σχήμα 2.16:** Κατανομή παραμενουσών τάσεων κάτω από την επιφάνεια ηλεκτροδιαβρωμένων δοκιμίων χάλυβα C45.

Η ζώνη παραμόρφωσης στην Η/Δ, αν και εκτιμάται ότι εμπεριέχει και δευτερεύουσα ίχνη μηχανικής φόρτισης, χαρακτηρίζεται κυρίως από θερμικά φαινόμενα αλλαγής της μικροδομής και τη δημιουργία ενός επιφανειακού λευκού ψαθυρού στρώματος (white layer) που αποκαλύπτεται με μεταλλογραφική προβολή με κατάλληλο αντιδραστήριο (Nital). Στη ζώνη θερμικής επίδρασης αναγνωρίζονται σχηματικά τρία διακριτά στρώματα :

- Το εξωτερικό επανατηγμένο “λευκό” στρώμα (white layer),
- Ένα ενδιάμεσο (μεταβατικό) στρώμα,
- Το αρχικό υλικό που δεν έχει επηρεασθεί θερμικά.

Το πάχος του εξωτερικού στρώματος και η ύπαρξη και το πάχος των άλλων ζωνών εξαρτώνται από το είδος του κατεργάσιμου υλικού και τα χαρακτηριστικά των παλμών. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επιφάνεια του λευκού στρώματος χαρακτηρίζεται από πολύ μεγάλη σκληρότητα (τριπλάσια και πλέον) σε σχέση με το αρχικό υλικό. Οι τιμές όμως μειώνονται εκθετικά συναρτήσει του βάθους από την κατεργασμένη επιφάνεια και προσεγγίζουν την αρχική σκληρότητα σε βάθος μικρότερο των 500  $\mu\text{m}$ .

Η πιστότητα επιφάνειας του κατεργάσιμου τεμαχίου εξαρτάται από το υλικό του τεμαχίου, την τραχύτητα επιφάνειας του εργαλείου, το διηλεκτρικό μέσο και τον τρόπο κυκλοφορίας αυτού στο διάκενο κατεργασίας, αλλά κυρίως από την ενέργεια εκκένωσης ή ισοδύναμα από την ένταση  $i_e$  και τη διάρκεια του παλμού εκκένωσης  $t_p$ . Οι Ε/Μές Η/Δς συνοδεύονται από νομογραφήματα κατεργασιμότητας τα οποία χρησιμοποιούνται για την επιλογή των βέλτιστων συνθηκών για δεδομένη κατεργασία, βλέπε ενδεικτικά Σχήμα 2.17. Ωστόσο, λόγω της στοχαστικής φύσης της Η/Δς, τα νομογραφήματα αυτά έχουν σχετική σημασία στην πράξη, πρέπει να επαληθευθούν μέσω δοκιμίων.

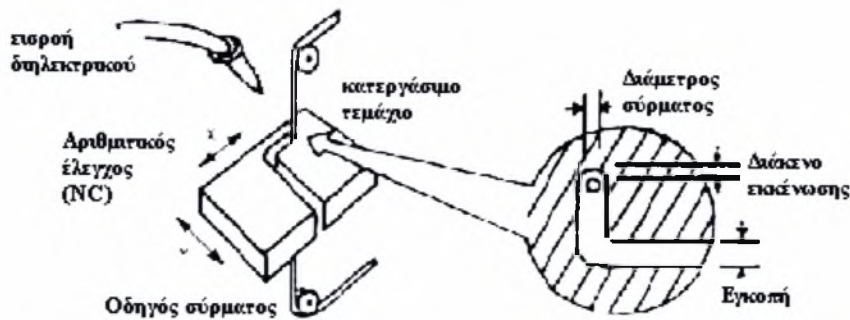


Σχήμα 2.17: Νομογράφημα κατεργασιμότητας Ε/Μών Η/Δς AGIE 1.1 ΜΤ.

Επισημαίνεται ότι η ακρίβεια της Η/Δς είναι στενά συνδεδεμένη με το μέγεθος του διακένου κατεργασίας μεταξύ εργαλείου και κατεργάσιμου τεμαχίου. Όσο μικρότερο είναι ή μπορεί να τηρηθεί αυτό, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια απόδοσης μορφής και διαστάσεων επιτυγχάνεται. Πρέπει όμως να επιδιώκεται πάντα η βελτιστοποίηση της ταχύτητας αποβολής υλικού με την επιζητούμενη ακρίβεια κατεργασίας. Το μέγεθος διακένου προσδιορίζεται από τη διάρκεια και την ένταση της εκκένωσης, την εν κενώ τάση, τα υλικά εργαλείου και τεμαχίου και από το διηλεκτρικό μέσο. Γενικά επιτυγχάνεται κατά την Η/Δ μια ακρίβεια διαστάσεων της τάξης των 10 μm, ενώ με ορισμένες προϋποθέσεις επιτυγχάνονται και τιμές της τάξης 1-2 μm.

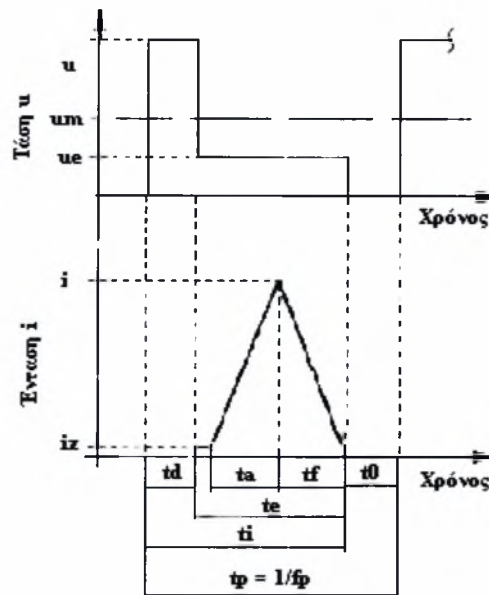
## 2.4.2 Ηλεκτροδιάβρωση σύρματος.

Η παρουσίαση στις προηγούμενες ενότητες αφορά την Η/Δ αποτύπωσης με σταθερό εργαλείο καθορισμένης γεωμετρικής μορφής. Οι ίδιες αρχές ισχύουν κατ' αρχήν και για την Η/Δ σύρματος (wire EDM). Στην κατεργασία αυτή, που είναι μία τεχνική ελεγχόμενη από Η/Υ, η επιθυμητή γεωμετρία του κατεργάσιμου τεμαχίου δημιουργείται από ένα λεπτό αγωγίμο σύρμα, διαμέτρου 0,05 - 0,25 mm, που κινείται από ένα σύστημα NC ή CNC, Σχήμα 2.18. Το υλικό του σύρματος είναι συνήθως χαλκός ή ορείχαλκος, ενώ, ως διηλεκτρικά, χρησιμοποιείται απιονισμένο νερό που ψεκάζεται στο διάκενο.



**Σχήμα 2.18:** Η/Δ σύρματος (αρχή της μεθόδου).

Ενώ στην Η/Δ αποτύπωσης το κατεργάσιμο τεμάχιο συνδέεται συνήθως στην κάθοδο, στην Η/Δ σύρματος συνδέεται στην άνοδο και, επιπλέον, εφαρμόζονται παλμοί μικρότερης διάρκειας,  $t_p$ , αλλά πολύ μεγαλύτερης έντασης. Τυπικές μορφές παλμών τάσης και έντασης του ρεύματος δίνονται στο Σχήμα 2.19.



**Σχήμα 2.19:** Παλμοί τάσης και έντασης ρεύματος σε Η/Δ σύρματος.

Η Η/Δ σύρματος χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 1970 ως εναλλακτική λύση στη μηχανική κοπή σωλήνων, κελυφών κ.λ.π. Σήμερα, με την πρόοδο της τεχνολογίας CNC και τη χρήση επικαλυμμένων συρμάτων (coated wires), η μέθοδος βρίσκει ευρύτατες εφαρμογές στην κατασκευή μητρών, εξαρτημάτων και γενικά τρισδιάστατων γεωμετριών στην οποία απαιτείται μικροκοπή ακριβείας (precision micro machining) στην αεροναυπηγική και σε βιοτεχνολογικά εξαρτήματα.

## 2.5 Συνοπτική αξιολόγηση της ηλεκτροδιάβρωσης.

Γενικά η Η/Δ αποτελεί σήμερα μία διαδεδομένη και αξιόπιστη κατεργασία κοπής που εφαρμόζεται με επιτυχία, όχι μόνο σε μέταλλα και κράματα αλλά και σε προηγμένα μη μεταλλικά υλικά (σύνθετα, κεραμικά κ.λ.π.). Το κύριο χαρακτηριστικό της, που αποτελεί ταυτόχρονα και πλεονέκτημα αλλά και μειονέκτημα, έγκειται στο

---

γεγονός ότι η επίτευξη της κατεργασίας δεν εξαρτάται από το είδος, τη μορφή ή το μέγεθος του υλικού, αλλά μόνο από την ηλεκτρική του αγωγιμότητα με απαιτούμενη ελάχιστη τιμή ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας 0,01 S/cm.

Έτσι είναι δυνατή η κατασκευή εκβαθύνσεων, ο τεμαχισμός και η κατασκευή σπειρωμάτων σε βαμμένο χάλυβα και σκληρομέταλλα. Χρησιμοποιείται επίσης για διάνοιξη πολύ μικρών οπών και δημιουργία σχισμών της τάξεως των 0.003''. Χρησιμοποιείται επίσης για την κατασκευή περίπλοκων γεωμετρικών σχημάτων, αλλά και για το φινίρισμα αντικειμένων, ειδικά όταν θέλουμε να εξασφαλίσουμε υψηλή ποιότητα.

Επιτυγχάνεται ακρίβεια στη μορφή και τις διαστάσεις δύο συναρμοζόμενων κομματιών όπως π.χ. έμβολο με μήτρα αποτιμήσεως.

Εξασφαλίζεται πολύ καλή και ομοιόμορφη ποιότητα επιφάνειας με καλή πρόσφυση στο λιπαντικό υλικό.

Από την άλλη όμως είναι μικρός ο ρυθμός αφαιρέσεως υλικού, ιδίως κατά την τελική κατεργασία.

Χρειάζεται προσοχή στη φθορά των ηλεκτροδίων από τη χρήση, για να μην προέλθει μεταβολή των διαστάσεων και της μορφής που πρέπει να αποδοθούν από την κατεργασία.

Υπάρχει κίνδυνος αλλαγής της κρυσταλλικής δομής του υλικού και δημιουργίας μικρορωγμών λόγω υψηλών θερμοκρασιών των εκκενώσεων.

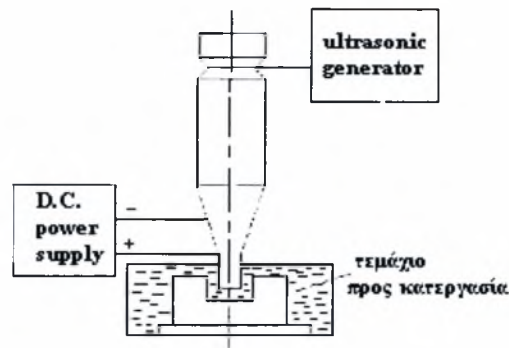
Το κόστος των Ε/Μών Η/Δς είναι σχετικά υψηλό. Αξίζει να αναφερθεί εδώ σαν παράδειγμα η σύγκριση της μεθόδου Η/Δς με αυτή της δέσμης νερού. Αν και με την Η/Δ πετυχαίνουμε καλύτερα ποιοτικά αποτελέσματα ως προς τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επιδιώκουμε (αυτό γιατί το σύρμα είναι πολύ λεπτό της τάξεως 0.00''), εξαιτίας του μεγάλου κόστους της προτιμάται η μέθοδος της δέσμης νερού.

Η μέθοδος της Η/Δς χρησιμοποιείται για συνήθεις εργασίες εκσκαφής σε καλούπια κοπτικά ή διαμορφωτικά – ψυχρής / θερμής διαμορφώσεως – ελασμάτων, σε καλούπια διελάσεως, χυτοπρεσσών, πλαστικών, ελαστικού καθώς και για κατεργασία στοιχείων των καλουπιών αυτών.

Οι περισσότερες Ε/Μές Η/Δς σήμερα, είναι εξοπλισμένες με μονάδα CNC για τον προγραμματισμό της λειτουργίας της. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης για κατεργασία σκληρομετάλλων ή σκληροκραμάτων της αεροναυπηγικής, για διάνοιξη οπών μικρής διαμέτρου στα υλικά αυτά για κατεργασία εύθραυστων κομματιών κ.λ.π. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι η κεφαλή προσδέσεως του εργαλείου - ηλεκτροδίου και ο μηχανισμός ακριβείας για την αυτόματη πρόωση της κεφαλής αυτής κατά τον άξονα z. Με προσαρμογή κατάλληλης διατάξεως και εργαλειοθήκης είναι δυνατή η αυτόματη εναλλαγή των εργαλείων – ηλεκτροδίων.

## **2.6 Ηλεκτροδιάβρωση και υπέρηχοι.**

Έρευνα έχει γίνει πρόσφατα για το συνδυασμό της τεχνολογίας των υπέρηχων και της Η/Δς. Πειραματικά δεδομένα δείχνουν ότι η δόνηση του ηλεκτροδίου της Η/Δς είχε σημαντικό αποτέλεσμα στην συνολική απόδοση της κατεργασίας. Αυτή η εφαρμογή μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε Η/Δ σύρματος για κοπή, είτε σε Η/Δ αποτύπωσης. Στην περίπτωση της κοπής με Η/Δ σύρματος, έχει βρεθεί ότι υπάρχει ένας βέλτιστος συνδυασμός έντασης δόνησης του σύρματος – ενέργειας Η/Δς με τον οποίο επιτυγχάνεται μέγιστος ρυθμός κοπής και βέλτιστη ποιότητα κατεργασμένης επιφάνειας ενώ ταυτόχρονα μειώνονται οι παραμένουσες τάσεις.



**Σχήμα 2.20:** Σχηματικός συνδυασμός Η/Δς αποτύπωσης και υπερήχων.

Στο Σχήμα 20, φαίνεται μια διάταξη Η/Δς αποτύπωσης με υπερήχους. Μια πρώτη και σημαντική παρατήρηση είναι ότι χρησιμοποιείται συνεχές ρεύμα αντί της κλασικής παλμογεννήτριας της Η/Δς.

Η αύξηση της αποτελεσματικότητας που επιτυγχάνεται με τη χρήση υπερήχων στην Η/Δ και γενικότερα τα χαρακτηριστικά της μεθόδου έναντι της κλασικής μεθόδου Η/Δς είναι επιγραμματικά:

- Βελτίωση της κυκλοφορίας του διηλεκτρικού με αποτέλεσμα καλύτερη αφαίρεση υλικού.
- Δημιουργία μεγαλύτερης μεταβολής πίεσης ανάμεσα στο ηλεκτρόδιο και το κατεργαζόμενο τεμάχιο που αυξάνει και πάλι τον ρυθμό αφαίρεσης υλικού.
- Η χρήση D.C. ρεύματος αντί της συνηθισμένης παλμογεννήτριας και ο παλμός εκκένωσης που παράγεται από τη σχετική κίνηση ανάμεσα στο εργαλείο και το προς κατεργασία τεμάχιο, μπορεί να απλοποιήσει τον εξοπλισμό και να μειώσει το κόστος.
- Το εργαλείο δονείται ημιτονοειδώς με τη συχνότητα των υπερήχων, η οποία επιτρέπει την εύκολη διαφυγή του λιωμένου και διαβρωμένου υλικού από το διάκενο και τη βελτίωση της σταθερότητας των συνθηκών κατεργασίας.
- Αυτή η μέθοδος κατεργασίας είναι πιο εύχρηστη για κοπές, διατρήσεις και εγχαραξίες κ.λ.π.
- Με αυτή τη μέθοδο έχουμε συνδυασμό των προτερημάτων των κατεργασιών με υπερήχους και της Η/Δ.

Από πειραματικές μετρήσεις που έχουν γίνει σε κοπή με Η/Δ σύρματος φάνηκε η επίδραση της εφαρμογής υπερήχων στην τραχύτητα επιφάνειας. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η τραχύτητα επιφάνειας ( $R_a$ ) μειώνεται με την εφαρμογή των υπερήχων.

Η επίδραση αυτή των υπερήχων στην τραχύτητα θα μπορούσε να αποδοθεί στο εξής :

- 
- Στη συχνότερη επαφή του δονούμενου σύρματος με το κατεργαζόμενο τεμάχιο ώστε να γίνεται λείανση της επιφάνειας Η/Δς.

Με τη δόνηση του ηλεκτροδίου σε μεγάλες συχνότητες είναι δυνατό να συμβαίνουν εκκενώσεις σε πολλά σημεία. Με αυτόν τον τρόπο η ενέργεια εκκένωσης μοιράζεται σε περισσότερες από μία εκκενώσεις, οπότε και η μέση ενέργεια εκκένωσης μειώνεται κάτι που επιφέρει μείωση της τραχύτητας της.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο συνολικός χρόνος κατεργασίας με την τεχνική της χρήσης υπερήχων είναι αρκετά μικρότερος. Όπως επίσης μειώνονται και οι παραμένουσες τάσεις.

Η Η/Δ λοιπόν με υπερήχους έχει αναπτυχθεί ευρύτατα, μιας και όπως αναφέρθηκε παραπάνω συνδυάζει τα πλεονεκτήματα τόσο της μεθόδου της Η/Δς, όσο και αυτής των υπερήχων.

## **2.7 Ηλεκτροδιάβρωση προηγμένων υλικών.**

Η ανάπτυξη της μεθόδου Η/Δς, η οποία ανήκει όπως πλέον είναι γνωστό, στις μη συμβατικές κατεργασίες, ασχολείται με την επεξεργασία προηγμένων και σύγχρονων υλικών. Αυτό γιατί ως μη συμβατική μέθοδος παρουσιάζει σαφή πλεονεκτήματα στην επεξεργασία των προηγμένων αυτών υλικών. Παρακάτω παρουσιάζονται τρία από τα σημαντικότερα προηγμένα υλικά τα οποία επεξεργάζεται η Η/Δ. Αυτά είναι: τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας, τα κεραμικά υλικά και οι ημιαγωγοί.

### **2.7.1 Σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας.**

Τα σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας (Metal Matrix Composites) έχουν γίνει όλο και περισσότερο σημαντικά στη σύγχρονη βιομηχανική τεχνολογία. Χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών λόγω των χρήσιμων ιδιοτήτων τους όπως η μεγάλη αντοχή, το χαμηλό βάρος και η μεγάλη αντοχή σε φθορά.

Οι μη συμβατικές μέθοδοι κατεργασίας όπως και η κατεργασία Η/Δ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποτελεσματική κατεργασία των υλικών αυτών.

### **2.7.2 Κεραμικά.**

Τα κεραμικά υλικά χαρακτηρίζονται από συγκεκριμένα εγγενή χαρακτηριστικά, όπως: υψηλή σκληρότητα, καλή χημική αδράνεια και υψηλή αντοχή, ιδιότητες που τα καθιστούν «ιδανικούς υποψηφίους» για εφαρμογές σε υψηλή θερμοκρασία και για εφαρμογές υψηλής αντίστασης σε τριβή. Οι εφαρμογές των προηγμένων κεραμικών περιλαμβάνουν τα κοπτικά πλακίδια, μήτρες (καλούπια) διαφόρων χρήσεων, τμήματα βαλβίδων, ρουλεμάν, ποικίλα μέρη μηχανών κ.λ.π.

Συχνά από τα κεραμικά υλικά απαιτούνται υψηλή διαστατική ακρίβεια και καλή ομοιομορφία επιφάνειας. Μεταξύ των διαφόρων κατεργασιών οι διαδικασίες φινιρίσματος με αδαμαντοτροχό ή Η/Δς είναι ευρύτατα διαδεδομένες.

Η Η/Δ εφαρμόζεται μόνο στα ηλεκτρικά αγωγά κεραμικά. Η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των κεραμικών είναι της τάξης των 100 Ωcm. Η θερμική ενέργεια που χρησιμοποιείται με αυτήν την διαδικασία ενεργεί έντονα στις μεταλλουργικές ιδιότητες του κεραμικού.

---

Σύμφωνα με πολλές μελέτες, η Η/Δ στα κεραμικά μπορεί να δημιουργήσει «κατεστραμμένα» στρώματα επιφάνειας όπου αναπτύσσονται οι δυσμενείς εφελκυστικές παραμένουσες τάσεις και οι ρωγμές. Η κατεστραμμένη από την κατεργασία ζώνη μπορεί να εκταθεί μέχρι 100  $\mu\text{m}$ . Οι ρωγμές και οι παραμένουσες τάσεις σε κατεργασμένες από Η/Δ κεραμικές επιφάνειες οδηγούν συχνά σε μια μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων και της αξιοπιστίας. Οι περιορισμοί στην επεξεργασία των κεραμικών, αφορούν συχνά τις ευαίσθητες ιδιότητες επιφάνειας όπως τα χαρακτηριστικά έναρξης ρωγμής και τα αποτελέσματά τους στις ιδιότητες των συμπαγών υλικών.

Επομένως η Η/Δ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί σε κεραμικά υλικά, αλλά είναι απαραίτητο να ακολουθείται από κατεργασίες τροποποίησης της επιβαρημένης από ατέλειες επιφάνειας.

Μια σειρά κατεργασιών επιφάνειας στα κεραμικά έχει εισαχθεί πρόσφατα για να βελτιώσει αυτές τις ιδιότητες και για να μειώσει τη συνεισφορά της επιφάνειας, στην πιθανότητα θραύσης. Π.χ. η μεταβολή της μικροδομής, ή των ιδιοτήτων του στρώματος επιφάνειας με μηχανική, χημική ή θερμική δράση.

Εντούτοις, κανένας από τους παραπάνω δεν είναι δυνατόν να επιδράσει καθολικά στις ιδιότητες. Κάθε είδος επεξεργασίας βελτιώνει μόνο ορισμένα ελαττώματα.

Παρόλα αυτά είναι αρκετά διαδεδομένη η κατεργασία με Η/Δ κεραμικών όπως καρβίδια, κεραμικά από αλουμίνα ή αλουμίνα και καρβίδιο του τιτανίου και γενικότερα υλικών για εξειδικευμένες εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας.

### 2.7.3 Ημιαγωγοί.

Είναι γεγονός ότι τις τελευταίες 10ετίες η ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών έχει πάρει ραγδαίες διαστάσεις. Κύριο συστατικό αυτής της τεχνολογίας των microchips είναι οι ημιαγωγοί και κυρίως το πυρίτιο.

Το 1990 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η Η/Δ σε wafers πυριτίου με απρόσμενα αποτελέσματα. Κατεργάστηκαν wafers πυριτίου με πάχος 330  $\mu\text{m}$  και ειδική αντίσταση από 10 έως 100  $\Omega\text{cm}$  και διαπιστώθηκε ότι η ταχύτητα κατεργασίας του είναι σχεδόν διπλάσια αυτής του ανοξειδωτου χάλυβα ενώ η μετωπική φθορά του ηλεκτροδίου εμφανίστηκε να είναι μικρότερη (150  $\mu\text{m}$  για τον χάλυβα και 40  $\mu\text{m}$  για το πυρίτιο σε κατεργασία διάνοιξης οπής βάθους 330  $\mu\text{m}$  και διαμέτρου 50  $\mu\text{m}$ ). Αργότερα το 1992 χρησιμοποιήθηκε Η/Δ σύρματος για την κοπή των wafers από ράβδο. Το σύρμα του ηλεκτροδίου ήταν κατασκευασμένο από μολυβδαίνιο με διάμετρο 50 – 140  $\mu\text{m}$  ενώ το διηλεκτρικό υγρό ήταν κηροζίνη. Το σύρμα του ηλεκτροδίου μετά την χρήση δεν καταστράφηκε κάτι που πάλι αποδεικνύει ότι η φθορά του ηλεκτροδίου είναι μικρότερη στην κατεργασία του πυριτίου. Γενικά έχει αποδειχτεί ότι η Η/Δ με διηλεκτρικό υγρό απιονισμένο νερό εμφανίζει αξιοσημείωτα αποτελέσματα τόσο στην ταχύτητα κατεργασίας όσο στην ακρίβεια και την τραχύτητα επιφανείας. Στην έρευνα που αναφέρθηκε προηγουμένως για παράδειγμα τεμαχίστηκε ράβδος πυριτίου τύπου n (ειδική αντίσταση 7 – 15  $\Omega\text{cm}$ ) με επίστρωση νικελίου για τη μείωση των επιφανειακών επαφών, σε τμήματα πάχους 94 – 210  $\mu\text{m}$ . Η ταχύτητα κοπής ήταν 170  $\text{mm}^2$  ενώ για μεγαλύτερες ταχύτητες αύξανε σημαντικά η τραχύτητα επιφάνειας.

Είναι λοιπόν φανερό ότι η χρήση της Η/Δς μπορεί να επεκταθεί και σε ημιαγωγούς με ικανοποιητικά αποτελέσματα και για εφαρμογές υψηλής ακρίβειας.





## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>: Πειραματικός εξοπλισμός και διαδικασία.

### 3.1 Υλικά προς κατεργασία.

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν στη διεξαγωγή των πειραμάτων, ήταν τρεις διαφορετικοί χάλυβες εργαλείων (tool steels). Αυτοί είναι (εμπορικές ονομασίες) οι **SVERKER 21**, **IMPAX** και **ORVAR** της εταιρείας Uddeholm. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά η σύσταση, οι μηχανικές ιδιότητες και οι εφαρμογές τους.

#### 3.1.1 SVERKER 21.

Ο SVERKER 21 είναι ένας εργαλειοχάλυβας με υψηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα (C), χρώμιο (Cr) και προσθήκη μολυβδένιου (Mo) και βαναδίου (V). Χαρακτηρίζεται από:

- Υψηλή αντοχή σε φθορά (high wear resistance).
- Υψηλή αντοχή σε πίεση/θλίψη.
- Καλή εμβαιπτότητα και σταθερότητα σε βαφή.

Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του SVERKER 21, ενώ στον Πίνακα 3.2 συνοψίζονται οι φυσικές ιδιότητες του υλικού αυτού.

<b>Σύσταση</b>	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	1,55	0,3	0,4	11,8	0,8	0,8
<b>Ταξινόμηση /ταυτοποίηση</b>	AISI D2, W. - Nr. 1.2379					
<b>Αρχική κατάσταση</b>	Ανοπτημένος με σκληρότητα περίπου 210 HB					

Πίνακας 3.1: Σύσταση και κύρια χαρακτηριστικά του χάλυβα SVERKER 21.

<b>Θερμοκρασία</b>	20°C (68°F)	200°C (390°F)	400°C (750°F)
<b>Πυκνότητα, kg/m<sup>3</sup> lbs/in<sup>3</sup></b>	7700 0,277	7650 0,276	7600 0,275
<b>Συντελεστής θερμικής διαστολής από 20°C από 68°F</b>		11,2 x 10 <sup>-6</sup> 6,8 x 10 <sup>-6</sup>	
<b>Θερμική αγωγιμότητα W/m °C Btu in/ft<sup>2</sup> h °F</b>	20 139	21 146	23 159
<b>Μέτρο ελαστικότητας Mpa ksi</b>	210000 30450	200000 29000	180000 26100

Πίνακας 3.2: Φυσικές ιδιότητες του χάλυβα SVERKER 21.

Ο εργαλειοχάλυβας SVCKER 21 συνιστάται για την κατασκευή εργαλείων που πρέπει να διαθέτουν μεγάλη αντοχή σε φθορά και μεσαία δυσθραυστότητα.

Τυπικά παραδείγματα εργαλείων τα οποία κατασκευάζονται από το συγκεκριμένο εργαλειοχάλυβα αποτελούν :

- Ακροφύσια αμμοβολής.
- Καλύμματα δίσκων.
- Εργαλεία διαμόρφωσης, βαθείας κοίλανσης και κάμψης.
- Μήτρες (καλούπια) διέλασης και απότμησης.
- Κοπτικά εργαλεία.

### 3.1.2 IMPAX.

Ο IMPAX είναι χάλυβας εργαλείων με κύρια στοιχεία κραμάτωσης το χρώμιο (Cr), το νικέλιο (Ni) και το μολυβδένιο (Mo). Τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι:

- Δεν απαιτεί θερμική κατεργασία.
- Πολύ καλή μηχανουργική κατεργασιμότητας.
- Ομοιόμορφη σκληρότητα.
- Δυνατότητα τοπικής φλογοβαφής ή εμποτισμού.
- Ομοιογένεια σύστασης και μηχανικών ιδιοτήτων.

Στον Πίνακα 3.3 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του IMPAX, ενώ στον Πίνακα 3.4 συνοψίζονται οι φυσικές ιδιότητες του υλικού αυτού.

<b>Σύσταση</b>	C 0,37	Si 0,3	Mn 1,4	Cr 2	Ni 1	Mo 0,2	S <0,010
<b>Ταξινόμηση /ταυτοποίηση</b>	τροποποιημένος AISI P20						
<b>Αρχική κατάσταση</b>	Ύστερα από βαφή και επαναφορά με σκληρότητα 290 - 330 HB						

**Πίνακας 3.3:** Σύσταση και κύρια χαρακτηριστικά του χάλυβα IMPAX.

<b>Θερμοκρασία</b>	20°C (68°F)	200°C (390°F)
<b>Πυκνότητα, kg/m<sup>3</sup> lbs/in<sup>3</sup></b>	7800 0,282	7750 0,28
<b>Συντελεστής θερμικής διαστολής από 20°C από 68°F</b>		12,7 x 10 <sup>-6</sup> 7 x 10 <sup>-6</sup>
<b>Θερμική αγωγιμότητα W/m °C Btu in/ft<sup>2</sup> h °F</b>	29 202	30 205
<b>Μέτρο ελαστικότητας N/mm<sup>2</sup> psi</b>	205000 13280	200000 12960

**Πίνακας 3.4:** Φυσικές ιδιότητες του χάλυβα IMPAX.

Οι κύριες εφαρμογές του υλικού αυτού αφορούν κατασκευή καλουπιών για πλαστικά, μήτρες διέλασης θερμοπλαστικών υλικών, καλούπια χύτευσης υπό πίεση, εργαλεία κατεργασιών διαμόρφωσης και δομικά μέρη στοιχείων μηχανών (π.χ. άξονες).

### 3.1.3 ORVAR.

Ο ORVAR είναι χάλυβας με κύρια στοιχεία κραμάτωσης μολυβδένιο (Mo), βανάδιο (V), χρώμιο (Cr) και τα εξής χαρακτηριστικά:

- Υψηλή αντοχή σε θερμική κόπωση.
- Πολύ καλή αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες.
- Πολύ καλή ολκιμότητα και δυσθραυστότητα.
- Καλή κατεργασιμότητα σε κατεργασίες κοπής και λείανσης.
- Εξαιρετική εμβαπτότητα.
- Διαστασιακή σταθερότητα στις θερμικές κατεργασίες.

Στον Πίνακα 3.5 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του εργαλειοχάλυβα ORVAR.

Σύσταση	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,39	1	0,4	5,2	1,4	0,9
Ταξινόμηση /ταυτοποίηση	AISI H13, W. - Nr. 1.2344					
Αρχική κατάσταση	Ανοπτημένος με σκληρότητα περίπου 180 HB					

**Πίνακας 3.5:** Σύσταση και κύρια χαρακτηριστικά του χάλυβα ORVAR.

### 3.2 Εργαλειομηχανή ηλεκτροδιάβρωσης.

Η Η/Δ όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 είναι η πλέον διαδεδομένη μη συμβατική κατεργασία. Είναι κατεργασία θερμικής φύσεως και η αποβολή υλικού επιτυγχάνεται με τη δημιουργία ηλεκτρικών σπινθήρων μεταξύ ανόδου (εργαλείο) και καθόδου (κατεργάσιμο τεμάχιο) τα οποία είναι βυθισμένα σε διηλεκτρικό υγρό.

Η Η/Δ των δοκιμών της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε σε Ε/Μ Η/Δς τύπου HOSTEK SH-38 GP, βλέπε Σχήμα 3.1.



*Σχήμα 3.1:* Ε/Μ Η/Δς τύπου HOSTEK SH-38 GP.

Ο Πίνακας 3.6 συνοψίζει τα κυριότερα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης εργαλειομηχανής.

<b>Διαστάσεις τραπεζιού</b>	<b>23 &amp; 1/2" x 11 &amp; 7/8"</b>
<b>Μέγιστο βάρος τεμαχίου</b>	<b>660 lbs</b>
<b>Μέγιστη ένταση</b>	<b>50 Amp</b>
<b>Μέγιστη τάση</b>	<b>5.2 kV</b>
<b>Καθαρό βάρος</b>	<b>2200 lbs</b>
<b>Συνολικό μήκος</b>	<b>66"</b>
<b>Συνολικό πλάτος</b>	<b>36"</b>
<b>Συνολικό ύψος</b>	<b>65"</b>

*Πίνακας 3.6:* Τα κυριότερα χαρακτηριστικά της Ε/Μής Η/Δς τύπου HOSTEK SH-38 GP.

Η τάση λειτουργίας ρυθμίστηκε στα 30V και η τάση του ανοικτού κυκλώματος στα 100V. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε τυπικό διηλεκτρικό BP250, ενώ σαν εργαλείο (άνοδος) χρησιμοποιήθηκε ηλεκτρολυτικός χαλκός καθαρότητας 99,99 %.

---

### 3.3 Μετρητικός εξοπλισμός για την αξιολόγηση της τοπογραφίας επιφάνειας.

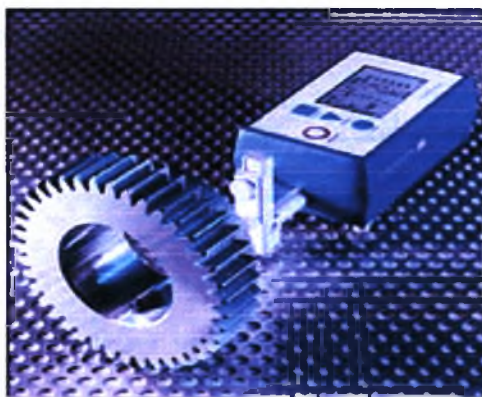
Στο παρελθόν λόγω έλλειψης οργάνων μέτρησης της τραχύτητας μιας επιφάνειας, ο μόνος τρόπος να αξιολογηθεί αυτή ήταν διακρίνοντας κάποια χαρακτηριστικά της με το μάτι ή απλά με την αφή. Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους μετράμε την τραχύτητα μιας επιφάνειας είναι δύο :

- Να προβλέψουμε τις ιδιότητες του υλικού.
- Να επιλέγουμε, αλλά και να ελέγχουμε τη διαδικασία κατεργασίας του υλικού καθώς αυτή παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της επιφάνειας.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας μετρητικών οργάνων για τη μέτρηση της τοπογραφίας μιας επιφάνειας παρέχει τη δυνατότητα λήψης ποσοτικών αποτελεσμάτων τα οποία οδηγούν σε πλέον ακριβή και σωστά αποτελέσματα. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 1.5 τέτοια τυπικά μετρητικά όργανα είναι τα τραχύμετρα και τα προφιλόμετρα.

#### 3.3.1 Τραχύμετρο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+.

Οι τραχυμετρήσεις για την πολυπαραμετρική ανάλυση της επιφάνειας των δοκιμίων έγιναν χρησιμοποιώντας ένα τραχύμετρο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+, βλέπε Σχήμα 3.2, εφοδιασμένο με κατάλληλο software (Talyprof). Το τραχύμετρο αυτό είναι ιδιαίτερα εύχρηστο εξαιτίας του σχήματός του ακόμα και για επιφάνειες που θεωρούνται δύσκολα προσβάσιμες.



Σχήμα 3.2: Τραχύμετρο τύπου Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+.

##### 3.3.1.1 Διαδικασία μέτρησης επιφάνειας.

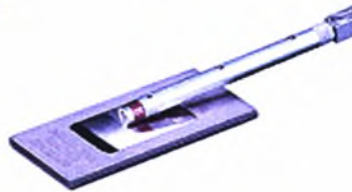
Στην υποενότητα αυτή γίνεται μια συνοπτική περιγραφή της διαδικασίας μέτρησης της τραχύτητας και της λήψης και επεξεργασίας των σημάτων.

Ένα τραχύμετρο κατά τα γνωστά αποτελείται από μια βελόνα (stylus), βλέπε Σχήμα 3.3, η οποία είναι ουσιαστικά μια προεξοχή που έρχεται σε επαφή με την επιφάνεια που μετράμε, την κεφαλή, η οποία είναι ένας κύλινδρος που στηρίζεται η βελόνα (head ή gauge), ένα σύστημα κίνησης, το οποίο βοηθάει στην κίνηση της βελόνας (traverse datum)- όλα αυτά φαίνονται στο Σχήμα 3.4 - και τέλος έναν

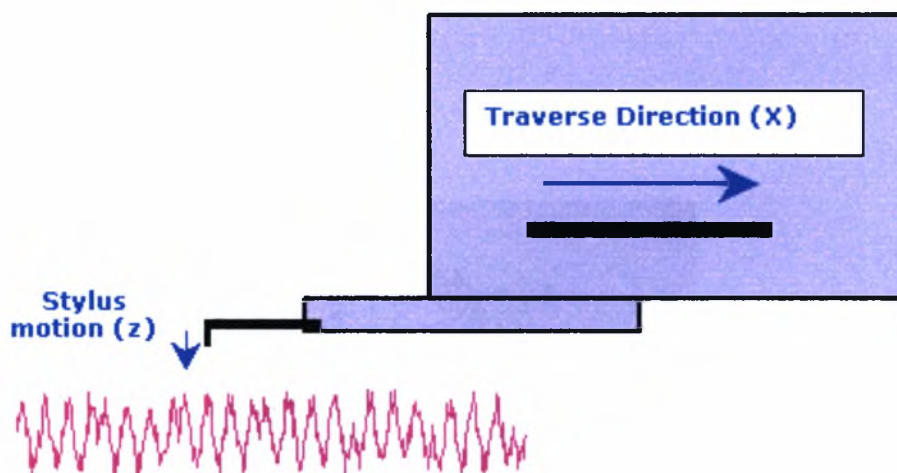
επεξεργαστή/ενισχυτή/μετατροπέα (processor), για την επεξεργασία του μέρους του σήματος που αφορά την τραχύτητα. Το σήμα απομονώνεται με τη βοήθεια φίλτρων.

Μετρήσεις από την επιφάνεια λαμβάνονται με την κίνηση της βελόνας κατά μήκος της επιφάνειας. Καθώς η βελόνα κινείται, η κεφαλή μετατρέπει την κίνησή της σε ένα σήμα, το οποίο λαμβάνει ο επεξεργαστής και με τη σειρά του το μετατρέπει σε αριθμητικό δεδομένο (ψηφιακό όργανο ανάγνωσης) αλλά και σε 'προφίλ' (οθόνη) για οπτικά αποτελέσματα.

Για μια σωστή τραχυμέτρηση, που θα μας δώσει σωστά δεδομένα, μεγάλη σημασία έχει η τοποθέτηση της βελόνας η οποία πρέπει να είναι κάθετη με τη επιφάνεια που μετράει.



**Σχήμα 3.3:** Βελόνα που χρησιμοποιείται στο τραχύμετρο τύπου Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+.

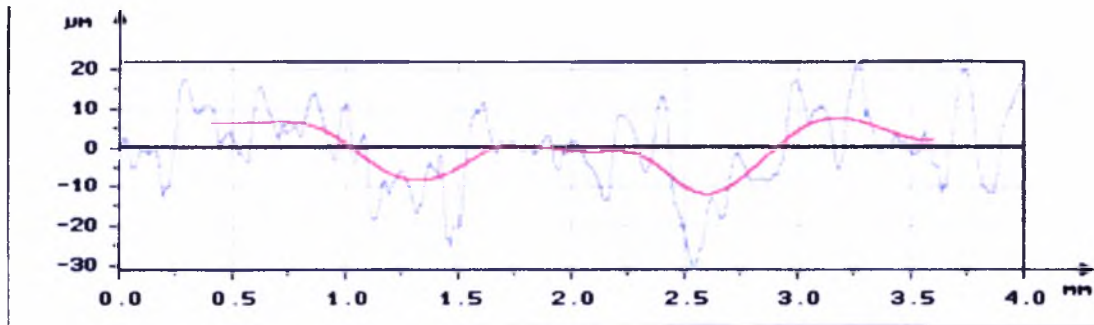


**Σχήμα 3.4:** Παράδειγμα κίνησης της βελόνας σε κατεύθυνση z πάνω στην επιφάνεια που μετράται η τραχύτητα, αλλά και του συστήματος κίνησης που βοηθάει να κινείται ο κύλινδρος και συνεπώς η βελόνα. Το σύστημα κίνησης έχει κατεύθυνση x.

### 3.3.1.2 Διαφορά τραχύτητας, κυμάτωσης και τελικής μορφής.

Το τραχύμετρο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+ παρέχει τρεις κύριες αναλύσεις σε σχέση με τη μέτρηση της επιφάνειας. Την τραχύτητα (roughness), την κυμάτωση (waviness) και τη σύνθετη μορφή της επιφάνειας (form-profile). Περισσότερες πληροφορίες περιέχονται στο εγχειρίδιο χρήσης του τραχύμετρου, βλέπε τη βιβλιογραφία στο τέλος της εργασίας.

Γενικά, ένα τραχύμετρο όπως το Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+ δίνει και τις τρεις παραπάνω αναλύσεις, σε μορφή προφίλ. Πρέπει να διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει κάποιο σημείο στο οποίο η τραχύτητα να γίνεται κυμάτωση ή το αντίθετο καθώς αυτά εξαρτώνται από το μέγεθος του δοκιμίου και τη φύση της επιφάνειας.



**Σχήμα 3.5:** Προφίλ τραχύτητας (με μπλε χρώμα) και κυμάτωση (με κόκκινο χρώμα), όπως λαμβάνονται από το τραχύμετρο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+. Είναι σαφές ότι η κυμάτωση έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος.

### 3.3.1.3 Φίλτρα.

Η ύπαρξη φίλτρων είναι απαραίτητη για τη λειτουργία κάθε τραχυμέτρου. Τα φίλτρα είναι μαθηματικοί ή αλγοριθμικοί μέθοδοι οι οποίες διαχωρίζουν τα διάφορα μήκη κύματος και μας επιτρέπουν να βλέπουμε τα μήκη κύματος που μας ενδιαφέρουν.

Τα φίλτρα που έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί το Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+ είναι τα εξής :

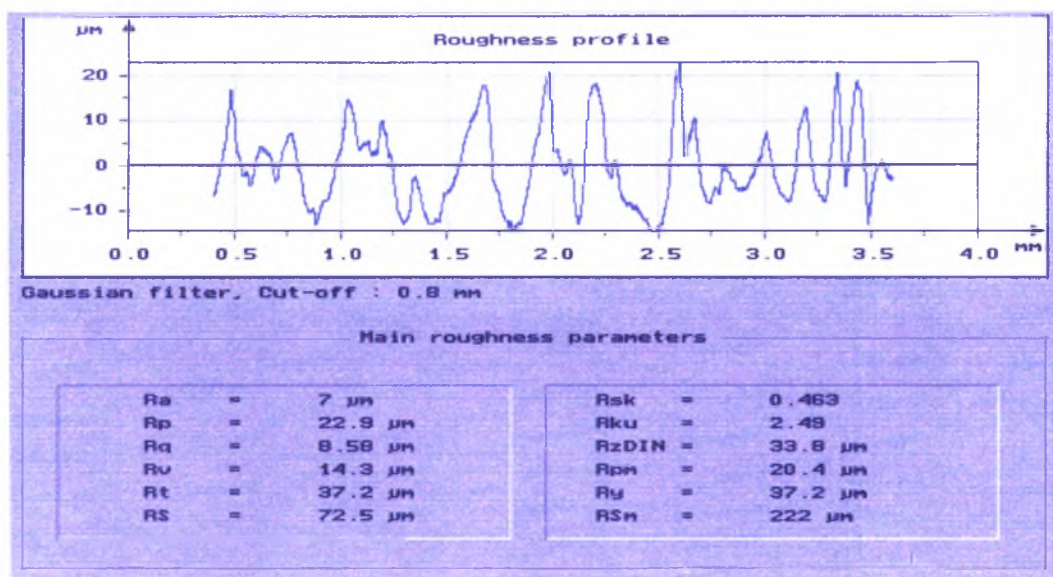
- Gaussian filter.
- 2RC Phase Corrected.
- 2RC I.S.O.
- Sliding average.

Εκτός από τα φίλτρα για τη λειτουργία του τραχυμέτρου ουσιώδης είναι η ύπαρξη του λεγόμενου μήκους αποκοπής (cut-off length). Σε γενικές γραμμές το μήκος αποκοπή μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ένα φίλτρο που χρησιμοποιείται ως μέσο αποκοπής ή φιλτραρίσματος του μήκους κύματος. Το μήκος αποκοπής έχει μια αριθμητική τιμή που μόλις επιλεγεί μειώνει ή αφαιρεί τα μήκη κύματος που δε θέλουμε. Για παράδειγμα ένα φίλτρο αποκοπής τραχύτητας ή διακύμανσης με τιμή 0.8 mm, επιτρέπει τα μήκη κύματος κάτω από 0.8 mm να μπορούν να καθοριστούν, ενώ τα μήκη κύματος πάνω από 0.8 mm μειώνονται σε πλάτος. Έτσι όσο μεγαλύτερο είναι το μήκος κύματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η μείωση του πλάτους. Οι τιμές του μήκους αποκοπής είναι καθορισμένες. Αυτές συναντώνται σε όλα τα τραχύμετρα όπως και στο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+ και είναι 0.08 mm, 0.25 mm, 0.8 mm, 2.5 mm και 8 mm.

Το τι είδους φίλτρο θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά εξαρτάται από τη φύση της κατεργασίας που έχει υποστεί το τεμάχιο και όχι από το μήκος μέτρησης. Μια άστοχη επιλογή του φίλτρου ενδεχομένως οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα.

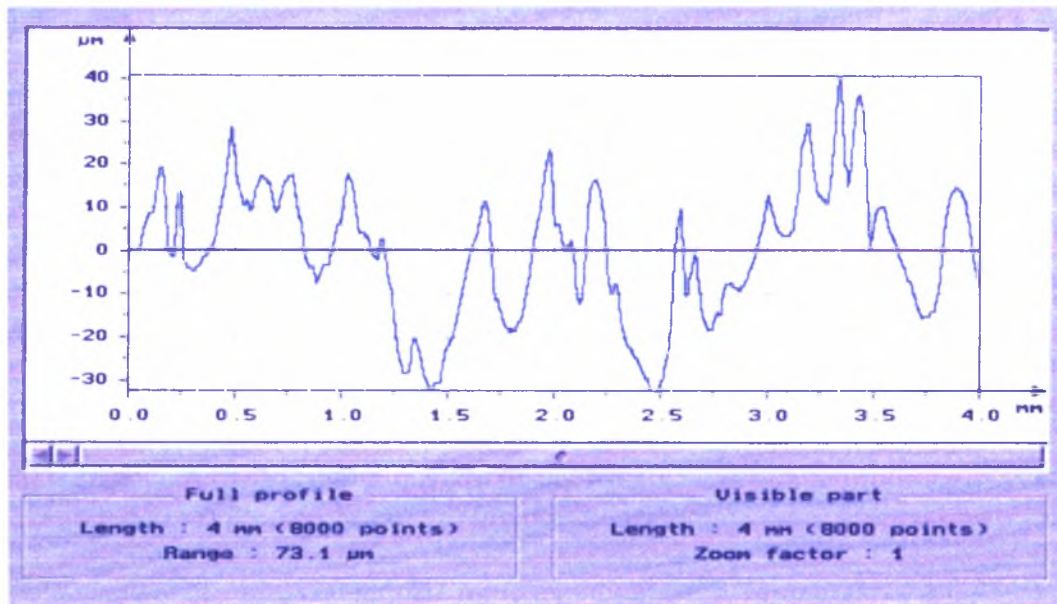
### 3.3.1.4 Το software του τραχύμετρου Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+.

Το τραχύμετρο Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+ είναι εφοδιασμένο, όπως αναφέρθηκε και πριν, με ένα κατάλληλο software, το Talyprof. Το πρόγραμμα αυτό μας δίνει τη δυνατότητα να παίρνουμε αριθμητικές τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας. Αυτές οι παράμετροι μπορεί να είναι παράμετροι ύψους, μήκους, υβριδικές αλλά και στατιστικές παράμετροι, οι οποίες έχουν αναλυθεί στην παράγραφο 1.4. Ένα βασικό πλεονέκτημα του προγράμματος Talyprof είναι ότι παρέχει σαφή προφίλ της τραχύτητας αλλά και της τραχύτητας με τη διακύμανση. Υπάρχει επίσης η δυνατότητα της επιλογής φίλτρων. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά τόσο τα αποτελέσματα των παραμέτρων, Σχήμα 3.6, όσο και τα διαγράμματα της τραχύτητας, Σχήματα 3.7 & 3.8, όπως τα παίρνουμε από το software (Talyprof). Τα αποτελέσματα αυτά είναι αντιπροσωπευτικά, με σκοπό να παρουσιαστούν οι δυνατότητες του software (Talyprof), για ένα τεμάχιο ενός από τους χάλυβες που χρησιμοποιούνται σε αυτή τη διπλωματική εργασία.

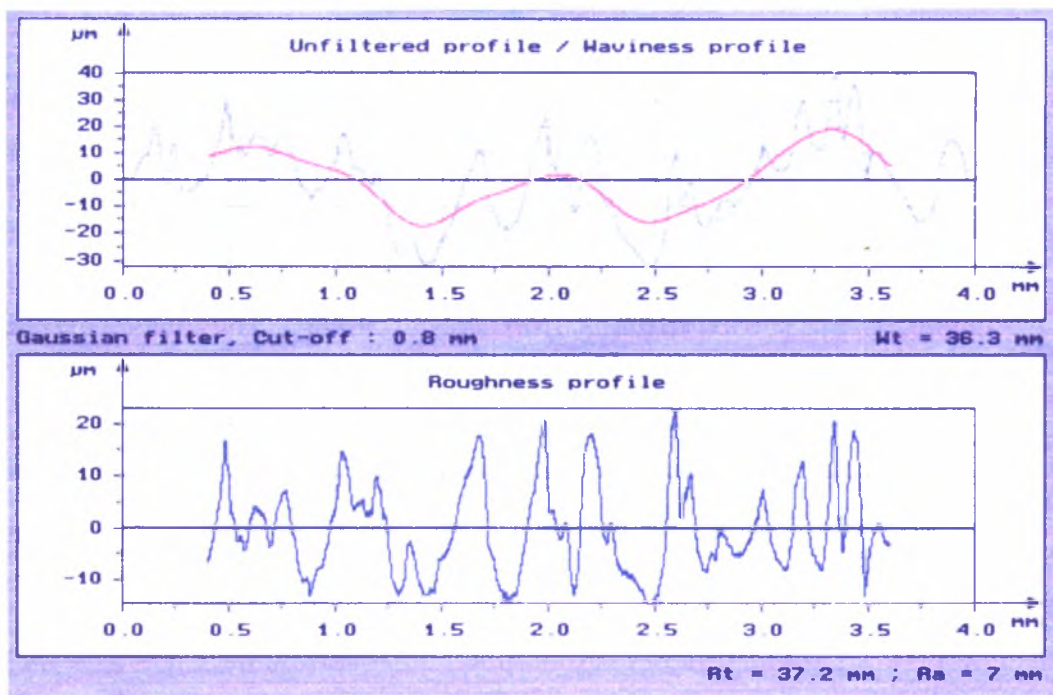


**Σχήμα 3.6:** Εδώ το software (Talyprof) μας δίνει το προφίλ της τραχύτητας, το φίλτρο που χρησιμοποιεί (στη συγκεκριμένη περίπτωση Gaussian filter), το μήκος αποκοπής (cut-off length = 0.8 mm), αλλά και όλες τις παραμέτρους τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_s$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{pn}$ ,  $R_y$ ,  $R_{sm}$ .





**Σχήμα 3.7:** Εδώ το πρόγραμμα Talysurf μας δίνει το προφίλ της τραχύτητας. Το μήκος στο οποίο έγινε η τραχυμέτρηση (length = 4 mm) διαιρείται σε 8000 σημεία (8000 points).



**Σχήμα 3.8:** Μια άλλη δυνατότητα του προγράμματος Talysurf είναι η παραπάνω οθόνη. Εδώ παρουσιάζεται τόσο η άνω εικόνα που είναι το προφίλ που δεν έχει υποστεί φιλτράρισμα με μπλε (unfiltered profile) μαζί με το προφίλ της κυμάτωσης με κόκκινο (waviness profile), όσο και η κάτω εικόνα, που είναι το προφίλ της τραχύτητας (roughness profile).

### 3.3.1.5 Επιλογή παραμέτρων προς μελέτη, φίλτρου και μήκους αποκοπής.

- Οι παράμετροι που εμείς θα εξετάσουμε και παίρνουμε από το πρόγραμμα Talysprof είναι :

$$R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{zDIN}, R_{pm}, R_y, R_{sm}.$$

Ο ορισμός και η απαιτούμενη ανάλυση των παραμέτρων αυτών έχει γίνει στην ενότητα 1.4. Για κάθε δοκίμιο έγιναν 10 τραχυμετρήσεις, τα αποτελέσματα των οποίων θα παρουσιαστούν στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο. Για την περαιτέρω ανάλυση αυτών θα χρησιμοποιηθούν οι μέσοι όροι.

- Το φίλτρο το οποίο έχει επιλεγεί για τις τραχυμετρήσεις είναι το Gaussian filter, ενώ σαν μήκος αποκοπής (cut-off length) έχουμε επιλέξει την τιμή 0.8 mm.
- Προφίλ όπως αυτά που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.8, θα δοθούν και θα σχολιαστούν στη συνέχεια, για κάθε υλικό και για όλες τις συνθήκες κατεργασίας.

### 3.4 Στατιστική επεξεργασία αποτελεσμάτων.

Στη μελέτη πολλών φαινομένων του φυσικού κόσμου και τεχνικών συστημάτων χρησιμοποιούνται πιθανοτικά πρότυπα, τα οποία αντικατοπτρίζουν την αντίληψη του εκάστοτε ερευνητή για κάποια φυσική σχέση ή για το μηχανισμό παραγωγής των δεδομένων που έχουν παρατηρηθεί. Μια κατηγορία πιθανοτικών προτύπων, τα **πρότυπα παλινδρόμησης**, αναφέρονται στη σχέση που μπορεί να έχει μια μεταβλητή που λέγεται **εξαρτημένη μεταβλητή** ή **μεταβλητή απόκρισης** με ορισμένες άλλες μεταβλητές που λέγονται **ανεξάρτητες μεταβλητές**.

Η ορολογία προέρχεται από την αντίληψη που υπάρχει σε ορισμένα φαινόμενα, ότι μια μεταβλητή (η εξαρτημένη μεταβλητή) επηρεάζεται με κάποιον τρόπο από άλλες μεταβλητές. Οι τελευταίες λέγονται παραδοσιακά ανεξάρτητες μεταβλητές χωρίς να είναι απαραίτητα ανεξάρτητες με την αλγεβρική ή τη στατιστική έννοια της ανεξαρτησίας. Για παράδειγμα η χιλιομετρική απόδοση ενός αυτοκινήτου (εξαρτημένη μεταβλητή) φαίνεται λογικό να επηρεάζεται από το βάρος, την ταχύτητα του αυτοκινήτου και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος (ανεξάρτητες μεταβλητές).

Σε άλλα φαινόμενα όμως δεν είναι προφανής η επίδραση μιας μεταβλητής σε μια άλλη. Απλώς ο ερευνητής πιστεύει ότι υπάρχει σημαντικός βαθμός συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών και θέλει να προβλέψει την τιμή της μιας μεταβλητής που είναι η εξαρτημένη μεταβλητή, από την τιμή που έχει παρατηρήσει νωρίτερα για την άλλη μεταβλητή που είναι η ανεξάρτητη μεταβλητή.

#### 3.4.1 Ανάλυση παλινδρόμησης.

Η ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) είναι ίσως η πιο διαδεδομένη μέθοδος που μας βοηθάει να βρίσκουμε τη σχέση που υπάρχει ανάμεσα σε μια εξαρτημένη μεταβλητή και στις ανεξάρτητες μεταβλητές. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι να έχουν καθοριστεί ποιες οι εξαρτημένες και οι ανεξάρτητες μεταβλητές στο μοντέλο μας και να ξέρουμε ή να υποψιαζόμαστε ότι υπάρχει κάποια σχέση. Το αν είναι μεγάλη ή μικρή θα μας το δείξει η ανάλυση παλινδρόμησης.

---

### 3.4.1.1 Στόχοι.

Οι κύριοι στόχοι της ανάλυσης παλινδρόμησης είναι οι ακόλουθοι:

- Η προσαρμογή κατάλληλων πιθανοτικών προτύπων σε δεδομένα από δύο ή περισσότερες μεταβλητές.
- Η στατιστική συμπερασματολογία για παραμέτρους και άλλες σημαντικές ποσότητες των προτύπων.
- Η πρόβλεψη της τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής, όταν είναι γνωστές οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών.
- Ανάλυση της μεταβλητότητας στα δεδομένα της εξαρτημένης μεταβλητής και προσδιορισμός της ακρίβειας προσαρμογής ενός συγκεκριμένου προτύπου παλινδρόμησης.

### 3.4.1.2 Πρότυπα παλινδρόμησης.

Η γενική μορφή ενός προτύπου παλινδρόμησης με  $k$  ανεξάρτητες μεταβλητές είναι :

$$Y = g(x_1, x_2, \dots, x_k) + E \quad (3.1)$$

$x_1, x_2, \dots, x_k$  παριστάνουν δοσμένες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, που είτε προκαθορίζονται είτε παρατηρούνται (μετριοούνται),  $Y$  είναι η αντίστοιχη τυχαία παρατήρηση της εξαρτημένης μεταβλητής, η οποία έχει μέση τιμή  $g(x_1, x_2, \dots, x_k)$  και  $E$  είναι ένα τυχαίο σφάλμα με μέση τιμή μηδέν. Επιπλέον, στις περιπτώσεις που οι τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών δεν είναι προκαθορισμένες, αλλά παρατηρούνται, θα υποθέτουμε ότι οι τιμές αυτές δεν περιέχουν ουσιαστικά σφάλματα μέτρησης, δηλαδή η μεταβλητότητα των σφαλμάτων μέτρησης είναι μικρή σε σχέση με τη μεταβλητότητα της εξαρτημένης μεταβλητής.

Μια απλή σχετικά μορφή του προτύπου (3.1) προκύπτει όταν η συνάρτηση  $g$  είναι γραμμικός συνδυασμός των  $x_i$ , οπότε το πρότυπο παλινδρόμησης παίρνει τη μορφή :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + E \quad (3.2)$$

Όλα τα πρότυπα της μορφής (3.2) λέγονται **γραμμικά πρότυπα** γιατί σε αυτά η συνάρτηση  $\beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k$  είναι γραμμική ως προς τις παραμέτρους  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ . Οι παράμετροι  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$  είναι άγνωστες σταθερές, που μπορούν να εκτιμηθούν όταν δίνονται δεδομένα  $\{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}, y_i) ; i = 1, 2, \dots, n\}$  με  $n \geq k + 1$ . Η εκτίμηση των παραμέτρων στα γραμμικά πρότυπα είναι πιο εύκολη από την εκτίμηση των παραμέτρων στα μη γραμμικά πρότυπα.

Επίσης οι μεταβλητές του προτύπου (3.2) μπορεί να παριστάνουν συναρτήσεις κάποιων παρατηρούμενων μεταβλητών χωρίς αυτές να εξαρτώνται από άγνωστες παραμέτρους.

Μια άλλη ειδική περίπτωση γραμμικού προτύπου αποτελεί το **πολυωνομικό πρότυπο παλινδρόμησης**.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_1 x^2 + \dots + \beta_k x^k + E \quad (3.3)$$

Είναι προφανές ότι παίρνουμε το πρότυπο (3.2) αν θέσουμε στο πρότυπο (3.3)  $x = x_1$ ,  $x^2 = x_2$ , ...,  $x^k = x_k$ . Δηλαδή στο πρότυπο (3.3) οι ανεξάρτητες μεταβλητές ταυτίζονται με τις  $k$  πρώτες δυνάμεις της μεταβλητής  $x$ .

Η απλούστερη μορφή προτύπου παλινδρόμησης είναι ένα πρότυπο **απλής γραμμικής παλινδρόμησης**, δηλαδή ένα πρότυπο (3.3) με  $k = 1$ . Ο χαρακτηρισμός της παλινδρόμησης ως απλής διακρίνει το πρότυπο αυτό από ένα πρότυπο της μορφής (3.2) με  $k > 1$ , που αναφέρθηκε ως **πρότυπο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης**.

### 3.4.1.3 Απλή γραμμική παλινδρόμηση.

Το πρότυπο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης, όπως παρουσιάστηκε πιο πάνω, είναι :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x + E \quad (3.4)$$

Όπου με  $x$  συμβολίζεται μια συγκεκριμένη τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής,  $Y$  είναι η τυχαία παρατήρηση της εξαρτημένης μεταβλητής που αντιστοιχεί στην τιμή  $x$ ,  $\beta_0$  και  $\beta_1$  είναι άγνωστες σταθερές (παράμετροι) και  $E$  είναι τυχαίο σφάλμα. Υποθέτουμε βέβαια ότι η σχέση (3.4) δεν ισχύει για μια και μόνο τιμή  $x$ , αλλά για κάθε τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής που ανήκει σε ένα διάστημα.

Για να προχωρήσουμε στην προσαρμογή και ανάλυση του προτύπου (3.4) θα πρέπει να μας δοθούν  $n$  τιμές της ανεξάρτητης μεταβλητής  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , οι οποίες είτε προκαθορίζονται από τον ερευνητή, είτε προκύπτουν από τυχαίες παρατηρήσεις.

Έστω  $Y_i$  η τυχαία παρατήρηση της εξαρτημένης μεταβλητής που αντιστοιχεί στη δοσμένη τιμή  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Το πρότυπο (3.4) γράφεται και στη μορφή :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + E \quad (3.5)$$

Η ανάλυση παλινδρόμησης θα βασίζεται στα ζεύγη τιμών  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$  όπου  $y_i$  είναι η τιμή της  $Y_i$ .

Στο πρότυπο (3.4) της απλής γραμμικής παλινδρόμησης πρέπει να γίνουν κάποιες υποθέσεις οι οποίες θα μας βοηθήσουν στη λύση του. Αυτές είναι :

- 1 Για κάθε τιμή  $x$  (που ανήκει σε ένα διάστημα) η μέση τιμή του  $E$  είναι μηδέν.
- 2 Η διασπορά του  $E$  εξαρτάται από την τιμή  $x$ , δηλαδή είναι μια σταθερή ποσότητα  $\sigma^2$ .
- 3 Η συνδιασπορά μεταξύ δύο σφαλμάτων είναι επίσης μηδέν  $cov(E_i, E_j) = 0$ .
- 4 Για κάθε τιμή  $x$  το σφάλμα  $E$  έχει κανονική κατανομή.

Το πρότυπο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης έχει τρεις παραμέτρους, τις σταθερές  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  και  $\sigma^2$  που πρέπει να εκτιμηθούν με τη χρήση των δεδομένων  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ . Οι δύο από αυτές οι  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ , μπορούν να εκτιμηθούν με διάφορες μεθόδους προσαρμογής εξίσωσης σε δεδομένα. Η πιο γνωστή και ευρέως

χρησιμοποιούμενη μέθοδος προσαρμογής είναι η **μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων**, η οποία αναπτύχθηκε από τον *Gauss* και τον *Legendre* στα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα.

Με τη μέθοδο αυτή βρίσκουμε τις τιμές  $b_0$ ,  $b_1$  των  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  αντίστοιχα, που ελαχιστοποιούν τη συνάρτηση :

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_0 + \beta_1 x)]^2$$

Οι τιμές  $b_0$ ,  $b_1$  ονομάζονται **εκτιμητές ελαχίστων τετραγώνων** (ε.ε.τ.) των παραμέτρων  $\beta_0$ ,  $\beta_1$ . Για να βρούμε τις (ε.ε.τ.), παίρνουμε τις μερικές παραγώγους της  $S(\beta_0, \beta_1)$  ως προς  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  και τις εξισώνουμε με μηδέν. Αν αντικαταστήσουμε  $\beta_0$  με  $b_0$  και  $\beta_1$  με  $b_1$ , αποδεικνύεται ότι οι κανονικές εξισώσεις είναι ισοδύναμες με τις εξισώσεις :

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x_i) &= 0 \\ \sum_{i=1}^n x_i (y_i - b_0 - b_1 x_i) &= 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Λύνοντας τις εξισώσεις (3.6), βρίσκουμε ότι οι ε.ε.τ. είναι :

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i)(\sum_{i=1}^n y_i)}{n(\sum_{i=1}^n x_i^2) - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (3.7)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \quad (3.8)$$

Από τη σχέση (3.7) και τις αλγεβρικές ταυτότητες έχουμε :

$$\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) = \sum x_i y_i - \frac{(\sum x_i)(\sum y_i)}{n} \quad (3.9)$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = \sum x_i^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n} \quad (3.10)$$

προκύπτει και μια άλλη μορφή του ε.ε.τ.  $b_1$  που είναι :

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.11)$$

η τιμή του  $b_1$  στην (3.11) μπορεί να οριστεί όταν :

$$\sum (x_i - \bar{x}) \neq 0 \quad (3.12)$$

η σχέση (3.10) ικανοποιείται όταν  $n > 2$  και οι δοσμένες τιμές  $x_i$  δεν είναι όλες ίδιες.

Έχοντας υπολογίσει τους ε.ε.τ. των παραμέτρων  $\beta_0$  και  $\beta_1$  από τις σχέσεις (3.7) και (3.8) ή (3.11), μπορούμε να βρούμε την **προσαρμοσμένη ευθεία παλινδρόμησης**.

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x = \hat{y} + b_1 (x_i - \bar{x}) \quad (3.13)$$

Επίσης μπορούμε να υπολογίσουμε τα **υπόλοιπα ή κατάλοιπα**.

$$e_i = y_i - \hat{y}_i = (y_i - \bar{y}) - b_1 (x_i - \bar{x}) \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.14)$$

που είναι οι διαφορές των τιμών  $\hat{y}_i$  από τα δεδομένα  $y_i$  της εξαρτημένης μεταβλητής. Από τις σχέσεις (3.6) έπεται ότι τα υπόλοιπα ικανοποιούν τις σχέσεις :

$$\sum_{i=1}^n e_i = 0, \sum_{i=1}^n x_i e_i = 0 \quad (3.15)$$

Η ακρίβεια μιας ευθείας σε δεδομένα  $(x_i, y_i)$  είναι τέλεια μόνο όταν τα σημεία αυτά πέφτουν εξαρχής πάνω σε ευθεία γραμμή. Στις άλλες περιπτώσεις η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εξασφαλίζει ότι η προσαρμογή είναι η καλύτερη δυνατή, με την έννοια ότι έχει βρεθεί μια ευθεία ώστε τα δεδομένα  $y_i$  να έχουν το μικρότερο δυνατό άθροισμα τετραγωνικών αποκλίσεων από αυτήν, αλλά μπορεί οι αποκλίσεις (οι απόλυτες τιμές των υπολοίπων  $e_i$ ) να είναι από μόνες τους μεγάλες ή μικρές. Είναι επομένως επιθυμητό να μπορούμε να μετρήσουμε την ακρίβεια της προσαρμογής σε κάθε περίπτωση.

Για να γίνει αυτό δυνατό, πρέπει πρώτα να αναλύσουμε τη μεταβλητότητα των δεδομένων  $y_1, y_2, \dots, y_n$ . Η ανάλυση αυτή βασίζεται στην αλγεβρική ταυτότητα :

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.16)$$

η οποία μπορεί να αποδειχτεί υψώνοντας στο τετράγωνο τα δύο μέλη της ισότητας :

$$y_i - \bar{y} = (\hat{y}_i - \bar{y}) + (y_i - \hat{y}_i) \quad (3.17)$$

Η σχέση (3.16) αναφέρεται και ως τύπος ανάλυσης της διασποράς. Το αριστερό της μέλος είναι το άθροισμα τετραγώνων των αποκλίσεων των δεδομένων  $y_i$  από τη δειγματική μέση τιμή. Το άθροισμα αυτό είναι ένα μέτρο της ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων  $y_i$ . Λέγεται **ολικό άθροισμα τετραγώνων** και συμβολίζεται με **SST** (από τα αρχικά του αγγλικού όρου *sum of squares total*).

Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (3.16) είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των προσαρμοσμένων τιμών  $\hat{y}_i$  από τη δειγματική μέση

τιμή  $\bar{y}$ . Λέγεται **άθροισμα τετραγώνων που οφείλεται στην παλινδρόμηση** και συμβολίζεται με **SSR** (από τα αρχικά του αγγλικού όρου *sum of squares due to regression*). Το άθροισμα SSR εκφράζει το μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων (της ολικής μεταβλητότητας) που έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο, δηλαδή που οφείλεται στην παλινδρόμηση.

Τέλος ο δεύτερος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης (3.16) είναι το άθροισμα τετραγώνων των υπολοίπων  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  και γι' αυτό λέγεται **υπόλοιπο άθροισμα τετραγώνων** ή **άθροισμα τετραγώνων γύρω από την παλινδρόμηση** ή **άθροισμα τετραγώνων που οφείλεται σε σφάλματα**. Το άθροισμα αυτό συμβολίζεται με **SSE** (από τα αρχικά του αγγλικού όρου *sum of squares due to error*) και εκφράζει το μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων που παραμένει ανεξήγητο μετά την προσαρμογή του προτύπου παλινδρόμησης.

Με βάση τον προηγούμενο συμβολισμό ο τύπος (3.16) παίρνει τη μορφή :

$$SST = SSR + SSE \quad (3.18)$$

Οι τρεις ποσότητες της εξίσωση (3.18) είναι αθροίσματα τετραγώνων, και επομένως, είναι θετικές. Η ποιότητα της προσαρμογής είναι καλύτερη όσο πλησιέστερα στη μονάδα βρίσκεται ο θετικός λόγος :

$$r^2 = SSR/SSE \quad (3.19)$$

Δηλαδή όσο μεγαλύτερο είναι το ποσό της ολικής μεταβλητότητας που έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο. Ο λόγος αυτός καλείται **συντελεστής προσδιορισμού** και χρησιμοποιείται ως μέτρο της ακρίβειας της προσαρμογής.

Για την εκτίμηση της τρίτης παραμέτρου του προτύπου, που είναι κοινή διασπορά  $\sigma^2$  των σφαλμάτων  $E$ , βασιζόμαστε στα υπόλοιπα  $e_i = y_i - \hat{y}_i$ , γιατί τα  $e_i$  είναι σφάλματα προσαρμογής που έχουν παρατηρηθεί και αντιστοιχούν στα θεωρητικά σφάλματα  $E_i$ . Συγκεκριμένα, παίρνουμε ως εκτίμηση της  $\sigma^2$  την ποσότητα :

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-2} = \frac{SSE}{n-2} \quad (3.20)$$

Ο εκτιμητής αυτός είναι σχεδόν ταυτόσημος με τη δειγματική διασπορά των υπολοίπων. Λέμε «σχεδόν», γιατί στο τύπο (3.20) δε διαιρούμε με  $n-1$ , αλλά με  $n-2$ . ο λόγος που διαιρούμε με  $n-2$  είναι γιατί η αντίστοιχη εκτιμήτρια συνάρτηση

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2} \quad (3.21)$$

είναι αμερόληπτη στην εκτίμηση της παραμέτρου  $\sigma^2$  όταν το πρότυπο είναι σωστό.

#### 3.4.1.4 Πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση.

Στην ενότητα 3.4.1.2 ορίσαμε το γραμμικό πρότυπο (3.2) το οποίο αναφέρεται και ως πρότυπο πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιάσουμε βασικά στοιχεία για την προσαρμογή του προτύπου σε δεδομένα και για προβλήματα στατιστικής συμπερασματολογίας που αναφέρονται στο πρότυπο αυτό.

Πριν προχωρήσουμε υπενθυμίζουμε ότι στη γενική κατηγορία των γραμμικών προτύπων υπάγεται το πρότυπο της πολυωνυμικής παλινδρόμησης (3.3) και οποιοδήποτε άλλο πρότυπο γραμμικό ως προς τις παραμέτρους  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ . Για παράδειγμα όταν θέλουμε να εξετάσουμε δύο παράγοντες (ανεξάρτητες μεταβλητές)  $x_1$  και  $x_2$  που μπορούν να επηρεάζουν την απόκριση (εξαρτημένη μεταβλητή), μπορούμε να θεωρήσουμε τα εξής πολυωνυμικά πρότυπα πολλαπλής παλινδρόμησης :

- Το πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού (3.2) με  $k = 2$  :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + E \quad (3.22)$$

το οποίο αναφέρεται και ως **γραμμικό πρότυπο πρώτου βαθμού**. Στο πρότυπο αυτό η επίδραση των δύο παραγόντων στην εξαρτημένη μεταβλητή είναι προσθετική.

- Το πρότυπο αλληλεπίδρασης :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + E \quad (3.23)$$

στο οποίο εκτός από τους γραμμικούς όρους, υπάρχει και ο όρος της αλληλεπίδρασης  $\beta_3 x_1 x_2$ . στο πρότυπο αυτό οι παράγοντες επηρεάζουν την απόκριση προσθετικά και πολλαπλασιαστικά.

- Το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + E \quad (3.24)$$

στο πρότυπο αυτό οι παράγοντες  $x_1$  και  $x_2$  επιδρούν στη απόκριση  $Y$  προσθετικά, πολλαπλασιαστικά και τετραγωνικά.

Το καταλληλότερο μεταξύ των προτύπων μπορεί να βρεθεί με ελέγχους υποθέσεων.

Όταν έχουμε προκαθορίσει ή παρατηρήσει τους  $n$  συνδυασμούς τιμών  $\{(x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{in}) ; i = 1, 2, \dots, n\}$  των προβλεπουσών μεταβλητών, μπορούμε να αποδώσουμε το πρότυπο (3.2) με τις εξισώσεις :

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_k x_{ik} + E \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.25)$$

Για να κάνουμε ευκολότερη την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της ανάλυσης γραμμικής παλινδρόμησης, θα εργαστούμε με διανύσματα και πίνακες. Έστω:



$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \cdot & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \cdot & x_{2k} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \cdot & x_{nk} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_k \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ E_n \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Ο πίνακας  $n \times (k+1)$  πίνακας  $X$ , που λέγεται πίνακας σχεδιασμού, περιέχει στις στήλες 2, 3, ...,  $k+1$  τα δεδομένα που αντιστοιχούν στις προβλέπουσες τιμές  $X_1, X_2, \dots, X_k$  αντίστοιχα. Το διάνυσμα  $Y$  περιέχει  $n$  τυχαίες παρατηρήσεις της απόκρισης που αντιστοιχούν στους  $n$  συνδυασμούς των προβλεπουσών μεταβλητών. Με το συμβολισμό (3.26) οι  $n$  εξισώσεις γράφονται συνοπτικά :

$$Y = X\beta + E \quad (3.27)$$

Αν έχουμε δεδομένα  $\{(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}, y) ; i = 1, 2, \dots, n\}$  με  $n \geq k+2$ , μπορούμε να εκτιμήσουμε τις  $k+2$  παραμέτρους  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k, \sigma^2$  του προτύπου (3.27). Για την εκτίμηση των συνιστωσών του διανύσματος  $\beta$ , χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Ο εκτιμητής ελαχίστων τετραγώνων (ε.ε.τ.),  $b$  του  $\beta$  είναι διάνυσμα που ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση:

$$S(\beta) = (y - X\beta)'(y - X\beta) \quad (3.28)$$

Μπορεί να αποδειχτεί ότι το διάνυσμα  $b$  ικανοποιεί τη διανυσματική εξίσωση :

$$(X'X)b = X'y \quad (3.29)$$

η οποία είναι ισοδύναμη με  $k+1$  κανονικές εξισώσεις. Ο  $(k+1) \times (k+1)$  πίνακας  $X'X$  είναι συμμετρικός. Αν είναι και αντιστρέψιμος, τότε η (3.29) έχει τη μοναδική λύση :

$$b = (X'X)^{-1} X'y = CX'y \quad (3.30)$$

όπου  $C$  είναι ο  $(k+1) \times (k+1)$  πίνακας  $(X'X)^{-1}$ .

Το προσαρμοσμένο πρότυπο παλινδρόμησης είναι το υπερεπίπεδο:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_k x_k \quad (3.31)$$

όπου  $b_0, b_1, \dots, b_k$  είναι οι συνιστώσες του διανύσματος  $b$ .

Πρέπει να σημειωθεί βέβαια ότι υπάρχει μια ραγδαία ανάπτυξη έτοιμων προγραμμάτων (στατιστικών πακέτων), τα τελευταία χρόνια, τα οποία αναλαμβάνουν να κάνουν την προσαρμογή γραμμικών προτύπων ακόμα και όταν ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι μεγάλος. Αυτό καταλαβαίνουμε ότι αποτελεί μεγάλη διευκόλυνση μιας και ο αριθμός των πράξεων είναι αρκετά μεγάλος σε αυτές τις περιπτώσεις. Ένα τέτοιο στατιστικό πακέτο θα χρησιμοποιηθεί και παρακάτω. Αυτό είναι το Minitab 14.

Για τα υπόλοιπα  $e_i = y_i - \hat{y}$  ισχύουν οι  $k+1$  σχέσεις :

$$\sum_{i=1}^n e_i = 0, \sum_{i=1}^n x_{ij} e_i = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (3.32)$$

Οι σχέσεις αυτές δείχνουν ότι το διάνυσμα των υπολοίπων  $e' = (e_1, e_2, \dots, e_n)$  είναι κάθετο στο διανυσματικό χώρο που παράγουν οι στήλες του πίνακα σχεδιασμού  $X$ .

Ο υπολογισμός του ολικού αθροίσματος  $SST$  γίνεται με τον τύπο (3.16). Για το υπόλοιπο άθροισμα τετραγώνων  $SSE = e'e$  έχουμε :

$$\begin{aligned} SSE &= (y - Xb)'(y - Xb) \\ &= (y'y - 2b'X'y + b'X'X(CX'y)) = y'y - b'X'y \end{aligned} \quad (3.33)$$

Το άθροισμα των τετραγώνων που οφείλεται στη παλινδρόμηση είναι :

$$SSR = b'X'y - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (3.34)$$

Για την εκτίμηση της κοινής διασποράς  $\sigma^2$  των σφαλμάτων  $E$  του προτύπου (3.2) χρησιμοποιείται ο εκτιμητής :

$$s^2 = \frac{SSE}{n - k - 1} \quad (3.35)$$

Με την εισαγωγή περισσότερων όρων σε ένα πρότυπο το  $SSE$  μειώνεται ή, το λιγότερο παραμένει σταθερό. Επίσης μειώνεται ο παρονομαστής του  $s^2$ , αφού αυξάνεται ο αριθμός  $k$ .

Ας θεωρήσουμε τώρα την εκτιμήτρια ελαχίστων τετραγώνων  $B$  του διανύσματος  $b$ . Έχει αποδειχτεί ότι η  $B$  έχει την πολυδιάστατη κανονική κατανομή (στις  $k+1$  διαστάσεις) με μέση «τιμή»  $\beta$  και πίνακα διασπορών – συνδιασπορών:

$$D(B) = E[(B - \beta)(B - \beta)'] = \sigma^2 C \quad (3.36)$$

Από την ιδιότητα αυτή του διανύσματος  $B$  έπεται ότι η  $j$  συνιστώσα του  $B_j$ , έχει την κανονική κατανομή με μέση τιμή και διασπορά

$$E(B_j) = \beta_j, \text{var}(B_j) = \sigma^2 c_{(j+1)} \quad (j = 0, 1, \dots, k) \quad (3.37)$$

όπου  $c_{(j+1)}$  είναι το  $j+1$  στοιχείο της διαγωνίου του πίνακα  $C$ . Σημειώνουμε ότι η εκτιμήτρια  $B_j$  είναι η καλύτερη γραμμική αμερόληπτη εκτιμήτρια για την παράμετρο  $\beta_j$ , ακόμα και στην περίπτωση που τα σφάλματα του προτύπου δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή.

### 3.4.2 Χρήση στατιστικού πακέτου Minitab 14.

Τόσο για την ανάλυση απλής γραμμικής παλινδρόμησης, αλλά κυρίως για την ανάλυση πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης και τη χάραξη των διαγραμμάτων που είναι απαραίτητα για την κατανόηση και το σχολιασμό των αποτελεσμάτων,

χρησιμοποιείται το στατιστικό πακέτο Minitab 14. Το Minitab 14 είναι ένα στατιστικό πακέτο με πολλές δυνατότητες ως προς την επεξεργασία στατιστικών αποτελεσμάτων και τη χάραξη των αντίστοιχων διαγραμμάτων.

### 3.4.2.1 Ανάλυση μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυση παλινδρόμησης με το Minitab 14.

Εδώ θα αναλύσουμε τους πίνακες που παίρνουμε από το Minitab 14, ως αναφορά την ανάλυση μεταβλητότητας ή διακύμανσης και την ανάλυση παλινδρόμησης. Έτσι επιλέγουμε :

**Stat > ANOVA > General Linear Model.**

Είναι βασικό να συμπληρωθούν οι περιοχές των ενδείξεων responses (αποκρίσεις) και factors (παράγοντες) σωστά.

Για να γίνει αυτό κατανοητό θα δοθεί ένα παράδειγμα της διπλωματικής εργασίας (η στατιστική ανάλυση της διπλωματικής εργασίας θα γίνει παρακάτω λεπτομερώς). Έτσι ως responses συμπληρώνουμε τα  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{ZDIN}, R_{apm}, R_y, R_{sm}$ , και ως factors τα  $I_c$  και  $t_c$ .

Οι Πίνακες των αποτελεσμάτων 3.7 & 3.8 είναι αντιπροσωπευτικοί και χρησιμοποιούνται για την κατανόηση του τι αντιπροσωπεύουν. Σε άλλο κεφάλαιο θα γίνει πλήρης στατιστική ανάλυση, παρουσίαση και σχολιασμός όλων των αποτελεσμάτων.

Analysis of Variance for  $R_a$ , using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	73,392	8,082	73,392	103,30	0,000
te	1	53,179	3,635	53,179	74,85	0,000
Ie*Ie	1	3,779	3,779	3,779	5,32	0,001
te*te	1	1,257	1,257	1,257	1,77	0,232
Ie*te	1	2,227	2,227	2,227	3,13	0,027
Error	6	4,263	4,263	0,710		
Total	11	138,097				

S = 0,842885 R-Sq = 96,91% R-Sq(adj) = 94,34%

**Πίνακας 3.7:** Αντιπροσωπευτικός πίνακας ανάλυση μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) για μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$ .

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,790	1,523	-0,52	0,063
Ie	0,4791	0,1421	3,37	0,000
te	0,018724	0,008278	2,26	0,000
Ie*Ie	-0,008643	0,003747	-2,31	0,001
te*te	-0,000017	0,000013	-1,33	0,232
Ie*te	0,000275	0,000155	1,77	0,027

**Πίνακας 3.8:** Αντιπροσωπευτικός πίνακας ανάλυσης παλινδρόμησης πλήρους μοντέλου (regression analysis) για μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$ .

Ας σχολιάσουμε τώρα τι αντιπροσωπεύει κάθε αποτέλεσμα των πινάκων αυτών.

Ο πρώτος πίνακας, Πίνακας 3.7 είναι ο πίνακας της ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA-> analysis of variance). Ο πίνακας αυτός δίνει για κάθε όρο

---

του μοντέλου, τους βαθμούς ελευθερίας (degrees of freedom DF), το διαδοχικό άθροισμα τετραγώνων (sequential sum of squares SeqSS), το μερικό άθροισμα τετραγώνων (adjusted sum of square AdjSS), τη διαδοχική μεταβλητή (sequential mean square SeqMS), το στατιστικό F του μερικού αθροίσματος τετραγώνων και τους στατιστικούς ελέγχους P (P-values).

Η πρώτη στήλη του πίνακα της ανάλυσης μεταβλητότητας (ANOVA) δίνει τους βαθμούς ελευθερίας (DF). Για τον κάθε παράγοντα έχουμε ένα βαθμό ελευθερίας. Το σύνολό τους, εφόσον επιλέγουμε πέντε παράγοντες  $I_c$ ,  $t_c$ ,  $I_c^2$ ,  $t_c^2$ ,  $I_c * t_c$ , είναι  $5 \times 1 = 5$ . Άρα  $k=5$ . Ο αριθμός των πειραματικών αποτελεσμάτων που χρησιμοποιήσαμε είναι 12. Άρα  $n=12$ . Η τιμή του DF στο *Error* είναι  $n-k-1 = 12-5-1 = 6$ . Ενώ η τιμή του DF στο *Total* είναι το άθροισμα των παραπάνω, δηλαδή  $5 \times 1 + 6 = 11$ .

Το διαδοχικό άθροισμα τετραγώνων (SeqSS) είναι το άθροισμα τετραγώνων για κάθε παράγοντα (factor), εξαρτάται από τη σειρά με την οποία οι παράγοντες μπαίνουν στο μοντέλο. Είναι δηλαδή η τιμή του αθροίσματος τετραγώνων ενός παράγοντα όταν έχουν δηλωθεί με μια συγκεκριμένη σειρά οι υπόλοιποι παράγοντες στο μοντέλο. Ενώ το μερικό άθροισμα τετραγώνων (AdjSS) είναι τα αθροίσματα τετραγώνων τα οποία δίνονται όταν όλοι οι όροι είναι στο μοντέλο.

Π.χ. αν έχουμε ένα μοντέλο με τρεις παράγοντες  $X_1$ ,  $X_2$ , και  $X_3$ , το διαδοχικό άθροισμα τετραγώνων (SeqSS) για τον παράγοντα  $X_2$  δείχνει το κατά πόσο από την απομένουσα μεταβλητότητα εξηγείται από τον παράγοντα  $X_2$ , με δεδομένο ότι ο παράγοντας  $X_1$  είναι στο μοντέλο.

Αντίθετα η τιμή του μερικού αθροίσματος τετραγώνων (AdjSS) δεν εξαρτάται από τη σειρά με την οποία οι παράγοντες μπαίνουν στο μοντέλο. Είναι δηλαδή η τιμή του αθροίσματος τετραγώνων ενός παράγοντα όταν έχουν δοθεί όλοι οι άλλοι παράγοντες στο μοντέλο, αγνοώντας τη σειρά που έχουν δηλωθεί στο μοντέλο.

Η στήλη της διαδοχικής μεταβλητής (SeqMS) δίνεται από τη σχέση :  $SeqMS / DF$ . Υπάρχει βέβαια η επιλογή της μέσης αντί της διαδοχικής μεταβλητής (Adjusted mean Square AdjMS).

Η στήλη των στατιστικών F, χρησιμοποιείται για να δούμε αν ο κάθε παράγοντας (factor) επηρεάζει την απόκριση (response). Η τιμή των F δίνεται από την σχέση :  $SeqMS$  (όροι) /  $MS Error$ . Για να δούμε αν ένας παράγοντας επηρεάζει μια απόκριση κάνουμε έναν έλεγχο μιας υπόθεσης  $H_0$ . Συγκρίνουμε δηλαδή το αποτέλεσμα που το πρόγραμμα μας δίνει με την τιμή F που παίρνουμε από τον πίνακα της κατανομής F. Ο πίνακας αυτός μας δίνει τις τιμές  $F_{1-\alpha, v1, v2}$ . Για  $\alpha$  χρησιμοποιείται συνήθως η τιμή 0.05, 5% επίπεδο σημαντικότητας, άρα  $1-\alpha = 95\%$  διάστημα εμπιστοσύνης, ενώ  $v1$  και  $v2$  είναι οι βαθμοί ελευθερίας κάθε φορά. Αν  $F > F_{1-\alpha, v1, v2}$  τότε η  $H_0$  υπόθεση απορρίπτεται. Αυτό σημαίνει ότι ο παράγοντας επηρεάζει την απόκριση.

Η στήλη των στατιστικών ελέγχων P (P-values), μας βοηθάει να αποφασίσουμε αν θα κρατήσουμε ή θα απορρίψουμε μια μηδενική υπόθεση. Όσο μικρότερη είναι η τιμή P τόσο μειώνεται η πιθανότητα λάθους να απορρίψουμε τη μηδενική υπόθεση. Η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη τιμή με την οποία συγκρίνουμε τις τιμές των P είναι η τιμή 0.05. Για παράδειγμα αν η τιμή P είναι μικρότερη του 0.05, τότε απορρίπτουμε τη μηδενική υπόθεση, πράγμα που σημαίνει ότι είναι σωστό να κρατήσουμε το συγκεκριμένο παράγοντα στο μοντέλο μας, μιας και παίζει ρόλο.

Η τιμή S είναι ουσιαστικά το  $\sigma$ , η υπολογισμένη απόκλιση στο μοντέλο μας.

Η τιμή του πολλαπλού συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , ( $R-Sq$ ), αποτελεί ένα μέτρο του πόσο καλά το μοντέλο εξηγεί τα δεδομένα. Έχει οριστεί ως το ποσοστό της συνολικής διακύμανσης των παρατηρήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής που μπορεί

---

να εξηγηθεί από τη χρήση της παλινδρόμησης. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερη τιμή πάρει ο συντελεστής αυτός, δηλαδή όσο πιο κοντά στη μονάδα είναι, τόσο καλύτερο είναι το μοντέλο που έχουμε θεωρήσει διότι ερμηνεύει μεγαλύτερο μέρος της παρατηρούμενης μεταβλητότητας. Η τιμή του  $R-Sq$  υπολογίζεται από τη σχέση :  $1-(SS\ Error)/SS\ Total$ .

Επειδή στην πολλαπλή παλινδρόμηση η τιμή  $R-Sq$  αυξάνεται όταν προστίθεται μια ανεξάρτητη μεταβλητή, χρησιμοποιείται ένας συντελεστής διορθωμένος λαμβάνοντας υπόψιν τόσο τον αριθμό των παρατηρήσεων όσο και τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών ή αντίστοιχα τον αριθμό των παραμέτρων που εκτιμώνται ή ισοδύναμα των βαθμών ελευθερίας. Ο συντελεστής αυτός ονομάζεται προσαρμοσμένος συντελεστής προσδιορισμού  $R^2(Adj)$  ,  $(R-Sq(Adj))$ . Η τιμή του δίνεται από :  $1-( MS\ Error/(SS\ Total/DF\ Total))$ .

Στον δεύτερο πίνακα τον Πίνακα 3.8 είναι ο πίνακας ανάλυσης της παλινδρόμησης.

Στην πρώτη στήλη του βλέπουμε τους συντελεστές των μεταβλητών του προσαρμοσμένου προτύπου coefficients (Coef). Η μεθοδολογία με την οποία υπολογίζονται αυτοί οι συντελεστές παρουσιάστηκε στην παράγραφο 3.4.1.4.

Η επόμενη στήλη είναι η απόκλιση συντελεστών αυτών standard error of the coefficient (SE Coef). Είναι η απόκλιση που υπάρχει όταν υπολογίζουμε τους συντελεστές.

Τέλος η στήλη των ελεγχουσυναρτήσεων  $T$  μας δίνει τους στατιστικά σημαντικότερους όρους. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόλυτη τιμή  $T$ , τόσο περισσότερες πιθανότητες έχουμε ο παράγοντας να είναι σημαντικός. Η εξίσωση των  $T$  είναι η εξής :  $Estimated\ Coefficient / Standard\ error\ of\ the\ Coefficient$ .

### 3.4.2.2 Διαγραμματική απεικόνιση δεδομένων με το Minitab 14.

Όπως ήδη αναφέρθηκε και παραπάνω, το Minitab 14 είναι ένα πρόγραμμα που μας παρέχει τη δυνατότητα να έχουμε ένα πλήθος από διαφορετικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων μας. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί αφενός υπάρχει μια οπτική επαφή της δουλειάς μας και αυτό βοηθάει πολύ στην κατανόηση των αποτελεσμάτων, αφετέρου μας βοηθάει στη διεξαγωγή συμπερασμάτων εύκολα και γρήγορα. Το πλήθος των διαγραμματικών απεικονίσεων των αποτελεσμάτων φαίνεται από την επιλογή graph που διαθέτει το Minitab 14. Παρακάτω θα παρουσιαστούν και θα σχολιαστούν ως αναφορά του τι απεικονίζουν και τι συμπεράσματα παίρνουμε, τα διαγράμματα εκείνα που θα χρησιμοποιηθούν στα αποτελέσματα των τραχυμετρήσεων της διπλωματικής εργασίας. Ενδεικτικά παίρνουμε τα διαγράμματα της μέσης αριθμητικής τραχύτητας  $R_a$  για έναν από τους εργαλειοχάλυβες. Αναλυτική παρουσίαση όλων των αποτελεσμάτων θα γίνει σε άλλο κεφάλαιο.

Στο παρακάτω διάγραμμα, *Διάγραμμα 3.1*, φαίνονται τέσσερις γραφικές παραστάσεις μαζί. Και οι τέσσερις αυτές γραφικές παραστάσεις έχουν σχέση με τα υπόλοιπα (residuals) τα οποία συζητήθηκαν στις παραγράφους 3.4.1.3 και 3.4.1.4. Αναφέρουμε πως ως υπόλοιπα χαρακτηρίζουμε τις διαφορές των τιμών  $\hat{y}_i$  (εκτιμούμενες τιμές) από τα δεδομένα  $y_i$  (παρατηρούμενες τιμές) της εξαρτημένης μεταβλητής,  $e_i = y_i - \hat{y}_i$ .

Στην 1<sup>η</sup> γραφική παράσταση του *Διαγράμματος 4.1*, βλέπουμε το διάγραμμα υπολοίπων κανονικής κατανομής (normal probability plot of the residuals), το διάγραμμα αυτό μας δείχνει κατά πόσο τα υπόλοιπα του εκτιμούμενου μοντέλου

---

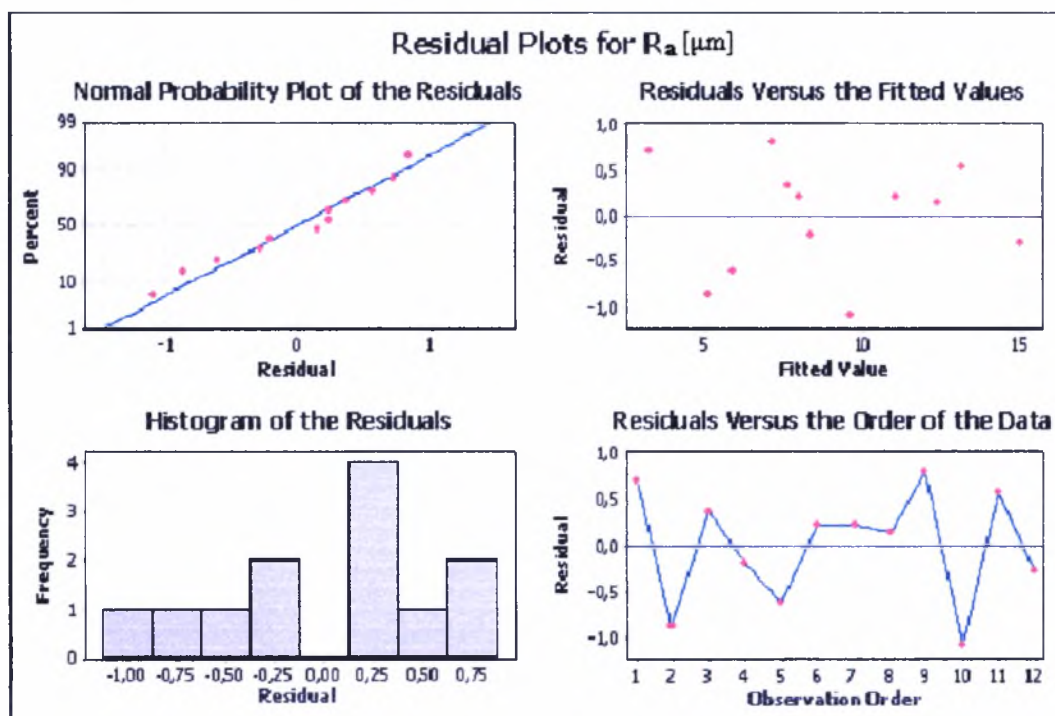
ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στον άξονα των  $x$  έχουμε τις τιμές των υπολοίπων (residuals) και στον άξονα των  $y$  έχουμε ένα % ποσοστό εμφάνισής τους. Η μπλε ευθεία είναι η συνάρτηση αθροιστικής κατανομής ενώ με κόκκινες κουκκίδες συμβολίζονται τα υπόλοιπα. Μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι όσο περισσότερο τα υπόλοιπα τείνουν στην ευθεία της συνάρτησης αθροιστικής κατανομής, τόσο περισσότερο τα υπόλοιπα θα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Ιδανική περίπτωση είναι αυτή που οι τιμές όλων των υπολοίπων πέφτουν πάνω στην ευθεία της συνάρτησης κανονικής κατανομής. Στην περίπτωση αυτή έχουμε τέλεια κανονικότητα.

Στην 2<sup>η</sup> γραφική παράσταση έχουμε το Διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (residuals versus the fitted values). Στο διάγραμμα αυτό σε κάθε

εκτιμούμενη τιμή  $\hat{y}_i$ , τοποθετούμε τη διακύμανση των υπολοίπων του αντίστοιχου επιπέδου. Το διάγραμμα λοιπόν αυτό δείχνει μια τυχαία διάταξη των υπολοίπων γύρω από την ευθεία  $r = 0$ . Τα υπόλοιπα θα πρέπει να εμφανίζονται στο διάγραμμα τυχαιοποιημένα.

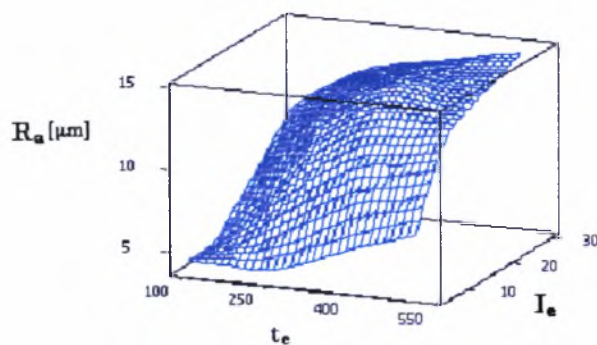
Στην 3<sup>η</sup> γραφική παράσταση παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων των υπολοίπων (histogram of the residuals). Η γραφική αυτή παράσταση αποτελεί έναν ακόμη τρόπο ελέγχου της κανονικότητας. Στο άξονα  $x$  έχουμε τις τιμές των υπολοίπων, ενώ στον άξονα  $y$  έχουμε τις συχνότητες (frequency) εμφάνισής τους. Οι τιμές που πέφτουν ακριβώς στο όριο του διαστήματος, συμπεριλαμβάνονται πάντα στο δεξί από αυτές διάστημα.

Τέλος, στην 4<sup>η</sup> γραφική παράσταση έχουμε το διάγραμμα των υπολοίπων με τη σειρά που έχει γίνει η εισαγωγή των δεδομένων (residuals versus the order of the data). Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της σταθερότητας της διακύμανσης των υπολοίπων, εξετάζουμε δηλαδή αν τα υπόλοιπα είναι ανεξάρτητα από τη σειρά με την οποία πήραμε τις μετρήσεις. Αν μελετώντας το διάγραμμα παρατηρήσουμε μια σχέση ανάμεσα στα υπόλοιπα, τότε υπάρχει πρόβλημα συσχέτισης. Στον άξονα των  $x$  λοιπόν έχουμε τη σειρά των δεδομένων που έχουμε εισάγει. Στην συγκεκριμένη περίπτωση τα δεδομένα μας είναι 12 και δίνονται με τη σειρά 1, 2, 3, ..., 12. Στον άξονα των  $y$  έχουμε τις τιμές των υπολοίπων. Τα σημεία θα πρέπει να διασκορπίζονται το ίδιο πάνω και κάτω από την οριζόντια γραμμή στο ύψος 0 ( $r = 0$ ) κατά μήκος όλης της γραμμής διατηρώντας σταθερή τη διακύμανση.



**Διάγραμμα 3.1:** Διαγράμματα υπολοίπων της εξαρτημένης μεταβλητής  $R_a$ . Το 1<sup>ο</sup> είναι το διάγραμμα υπολοίπων κανονικής κατανομής (normal probability plot of the residuals). Το 2<sup>ο</sup> είναι το διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (residuals versus the fitted values). Το 3<sup>ο</sup> είναι το ιστόγραμμα συχνοτήτων των υπολοίπων (histogram of the residuals). Και 4<sup>ο</sup> είναι το διάγραμμα των υπολοίπων με τη σειρά που έχει γίνει η εισαγωγή των δεδομένων (residuals versus the order of the data).

Ένα άλλος τρόπος απεικόνισης των αποτελεσμάτων μας είναι αυτός του Διαγράμματος 3.2. Το διάγραμμα αυτό είναι μια τρισδιάστατη γραφική παράσταση στην οποία υπάρχουν τόσο η εξαρτημένη μεταβλητή  $R_a$  (άξονας z), όσο και οι ανεξάρτητες μεταβλητές  $t_e$  και  $I_e$  (άξονες x και y αντίστοιχα). Από το διάγραμμα αυτό διεξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα μιας και μπορούμε να βρούμε την τιμή των  $t_e$  και  $I_e$  για μια συγκεκριμένη τιμή του  $R_a$  και το αντίθετο.



**Διάγραμμα 3.2:** Τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση της εξαρτημένης μεταβλητής  $R_a$  και των ανεξάρτητων μεταβλητών  $t_e$  και  $I_e$





---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Πειραματικά αποτελέσματα.

---

### 4.1 Αριθμητικά πειραματικά αποτελέσματα.

Στην παράγραφο 3.1 παρουσιάστηκαν λεπτομερώς τόσο οι συστάσεις, όσο και οι ιδιότητες των υλικών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στη διεξαγωγή των πειραμάτων. Τα υλικά αυτά είναι τρεις διαφορετικοί χάλυβες: SVERKER 21, IMPAX και ORVAR.

Τα δοκίμια των χάλυβων αυτών έχουν υποστεί κατεργασία με τη μέθοδο της Η/Δς. Οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι 70x70x10 mm. Η μέθοδος αυτή παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, ενώ η παρουσίαση της Ε/Μής Η/Δς που χρησιμοποιήθηκε έγινε στην παράγραφο 3.2.

Οι συνθήκες κατεργασίας που επιλέχθηκαν είναι οι εξής :

$I_e$  : 5, 10, 20, 30 [A]

$t_e$  : 100, 300, 500 [μsec]

Με τη χρήση του τύπου  $W_e = I_e t_e V_e$  και με δεδομένο ότι η τάση λειτουργίας είναι σταθερή,  $V_e = 30$  Volts, προκύπτει ο Πίνακας 4.1. Ο πίνακας αυτός μας δείχνει όλους του δυνατούς συνδυασμούς δοκιμίων για κάθε υλικό, ο αριθμός αυτός είναι 12.

**Πίνακας 4.1:** Δυνατοί συνδυασμοί δοκιμίων για κάθε υλικό.

Συνδυασμοί	$I_e$ [A]	$t_e$ [μsec]	$V_e$ [Volts]	$W_e$ [mJ]
1	5	100	30	15
2	10	100	30	30
3	20	100	30	60
4	30	100	30	90
5	5	300	30	45
6	10	300	30	90
7	20	300	30	180
8	30	300	30	270
9	5	500	30	75
10	10	500	30	150
11	20	500	30	300
12	30	500	30	450

Επειδή έχουμε τρεις σειρές χάλυβων (SVERKER 21, IMPAX, ORVAR), ο αριθμός των δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή του πειράματος, είναι  $12 \times 3 = 36$ . Οι τραχυμετρήσεις έγιναν με ένα τραχύμετρο, Taylor-Hobson Sutronic 3+ εφοδιασμένο με το software Talyprof, όπως παρουσιάστηκε αναλυτικά στην παράγραφο 3.3.1. Το φίλτρο το οποίο έχει επιλεγεί για τις τραχυμετρήσεις είναι το Gaussian filter, ενώ σαν μήκος αποκοπής (cut-off length) έχουμε επιλέξει την τιμή 0.8 mm.

Για καθένα δοκίμιο έγιναν 10 διαφορετικές τραχυμετρήσεις, δηλαδή έγιναν συνολικά  $36 \times 10 = 360$  τραχυμετρήσεις. Από τις 10 αυτές τραχυμετρήσεις κάθε δοκιμίου χρησιμοποιήθηκαν οι μέσοι όροι.

Ο λόγος για τον οποίο έγιναν τόσες τραχυμετρήσεις είναι για να ελαχιστοποιηθεί η πιθανότητα να πάρουμε δεδομένα τα οποία δεν ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα, πράγμα το οποίο θα είχε αντίκτυπο στα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο. Οι μετρήσεις αυτές έγιναν σε διάφορα σημεία του δοκιμίου και με διάφορες κατευθύνσεις (μιας και η Η/Δ μας δίνει ισότροπες κατεργασμένες επιφάνειες), ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο αληθινές.

Οι παράμετροι που μετρήθηκαν είναι οι :

$R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{zDIN}, R_{pm}, R_y, R_{sm}$ .

Πίνακες με τους μέσους όρους για κάθε υλικό και για κάθε παράμετρο δίνονται παρακάτω (Πίνακες 4.2, 4.3 & 4.4). Ενώ αναλυτικά αποτελέσματα όλων των μετρήσεων, δηλαδή αποτελέσματα για κάθε υλικό, για κάθε παράμετρο και για τις 10 μετρήσεις, δίνονται σε πίνακες στα Παραρτήματα 1 έως 3.

**Πίνακας 4.2:** Μέσοι όροι των παραμέτρων για το χάλυβα SVERKER 21.

<b>ΧΑΛΥΒΑΣ SVERKER 21</b>												
ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	$R_a$ [μm]	$R_p$ [μm]	$R_q$ [μm]	$R_v$ [μm]	$R_t$ [μm]	$R_s$ [μm]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [μm]	$R_y$ [μm]	$R_{sm}$ [μm]	$R_{pm}$ [μm]
15	3,95	11,435	4,27	12,515	23,84	76	-0,191	3,164	19,1	22,35	190,65	9,155
30	4,24	16,3	5,91	15,74	31,94	83,85	-0,076	3,133	24,65	30,1	205,4	12,45
45	5,257	18,515	7,31	18,815	37,44	85,38	-0,146	2,877	29,02	35,57	224,45	14,175
60	7,946	26,03	9,19	22,19	48,14	99,55	0,154	3,227	35,75	45,6	234,9	19,04
75	7,971	25,595	10,35	25,115	51,04	94,76	-0,101	2,621	38,94	48,79	258,25	19,195
90	8,268	23,38	8,95	22,04	45,54	93,23	-0,031	2,908	34,57	43,32	239,2	17,47
90	8,12	35,76	12,47	28,64	64,34	539,15	0,384	3,289	46,85	61,1	264,4	25,63
150	8,481	30,46	11,99	28,34	59,14	102,61	0,014	2,652	44,49	48,79	273	22,49
180	11,29	33,11	12,23	28,49	61,74	108,93	0,199	2,971	45,67	58,82	268,7	24,06
270	12,5	42,84	15,51	34,94	77,94	124,63	0,429	3,033	56,77	74,32	298,2	30,65
300	13,72	40,19	15,27	34,79	75,34	118,31	0,244	2,715	55,59	72,04	302,5	29,08
450	14,71	49,92	18,55	41,24	91,54	134,01	0,474	2,777	66,69	87,54	332	35,67

**Πίνακας 4.3:** Μέσοι όροι των παραμέτρων για το χάλυβα IMPAX.

<b>ΧΑΛΥΒΑΣ IMPAX</b>												
ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	$R_a$ [μm]	$R_p$ [μm]	$R_q$ [μm]	$R_v$ [μm]	$R_t$ [μm]	$R_s$ [μm]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [μm]	$R_y$ [μm]	$R_{sm}$ [μm]	$R_{pm}$ [μm]
15	4,388	17,94	5,568	15,2	33,14	82,2	0,042	3,433	23,96	31,93	159,5	12,083
30	4,502	14,87	5,809	20,5	35,06	55,81	-0,395	3,702	24,593	34,32	168,9	12,855
45	4,918	15,78	6,131	17,45	35,21	84,49	-0,089	2,951	25	30,43	213,3	12,26
60	6,935	26,93	8,736	17,31	44,58	70,96	0,567	3,125	43,44	42,75	208	20,62
75	7,386	31	9,309	22,44	53,43	48,15	0,444	3,308	40,22	51,69	143,43	22,17
90	8,897	29,65	11,026	26,51	56,17	48,52	0,274	2,745	43,31	54,74	194,2	23,49
90	9,918	37,25	12,776	33,9	71,14	63,35	0,261	3,457	49,74	67,1	217,6	28,05
150	10,948	38,84	13,45	31,73	70,6	102,85	0,329	2,809	50,56	63,15	275,7	27,86
180	13,06	42,17	16,26	40,39	82,62	70,35	0,179	2,929	62,33	76,78	273,3	32,24
270	13,34	48,11	16,43	31,13	79,24	63,35	0,587	3,103	59,48	76,06	305,6	34,45

300	13,39	44,33	16,57	41,58	85,89	117,96	0,25	2,757	61,66	83,59	272,9	32,31
450	14,65	52,23	18,36	42,75	94,95	114,21	0,38	3,17	66,74	90,69	352,2	35,17

**Πίνακας 4.4:** Μέσοι όροι των παραμέτρων για το χάλυβα **ORVAR**.

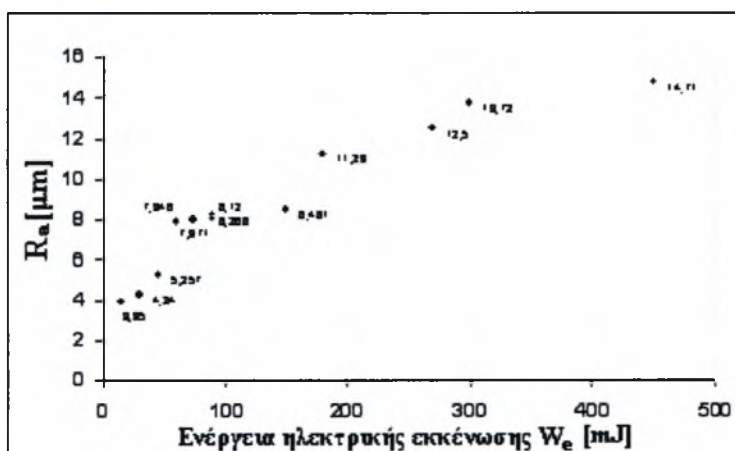
### ΧΑΛΥΒΑΣ ORVAR

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
15	5,315	18,12	6,665	16,7	34,82	87,46	0,164	2,826	27,65	33,11	165,7	14,63
30	6,011	22,13	7,478	17,9	40,06	109,29	0,226	3,045	30,06	37,75	210,9	16,51
45	6,689	21,94	12,995	20,29	42,29	149,2	0,022	2,939	31,52	41,9	280,8	15,45
60	7,452	31,1	9,433	25,02	56,11	103,82	0,486	3,621	39,41	49,97	242,9	22,75
75	7,676	22,81	9,401	19,88	42,68	139,77	0,053	2,491	34,2	41,29	331,7	17,71
90	7,96	29,13	10,109	22,58	51,79	82,88	0,121	2,794	40,39	49,41	256,7	20,99
90	8,144	37,07	10,332	22,65	54,66	117,25	0,638	3,488	40,49	54,54	230	23,45
150	8,862	24,09	10,781	24,7	43,9	111,78	-0,098	2,428	36,68	48,65	284,5	18,34
180	11,59	36,36	14,27	33,32	69,7	111,15	0,235	2,672	52,75	65,3	322,9	27,52
270	12,62	43,23	15,61	33	80,24	130,2	0,359	2,97	58,29	77,01	312	31,68
300	13,34	39,72	16,14	37,5	114,25	133,88	0,153	2,568	56,1	75,74	419,8	29,38
450	14,91	56,29	18,94	42,63	101,91	167,5	0,356	3,394	69,37	97,79	340,9	37,1

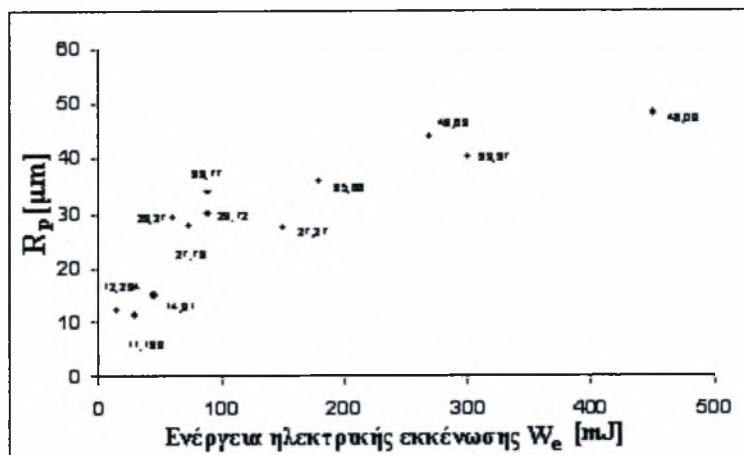
#### 4.2 Χάραξη και παρουσίαση καμπυλών.

Στην παράγραφο αυτή θα παρατεθούν οι γραφικές παραστάσεις της κάθε παραμέτρου της τραχύτητας συναρτήσει της ενέργειας παλμού  $W_e$  και για τα τρία υλικά. Δηλαδή τα αποτελέσματα των Πινάκων 4.2, 4.3 & 4.4 θα παρουσιαστούν με μορφή καμπυλών. Σκοπός μας είναι να δούμε τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την επεξεργασία των πινάκων.

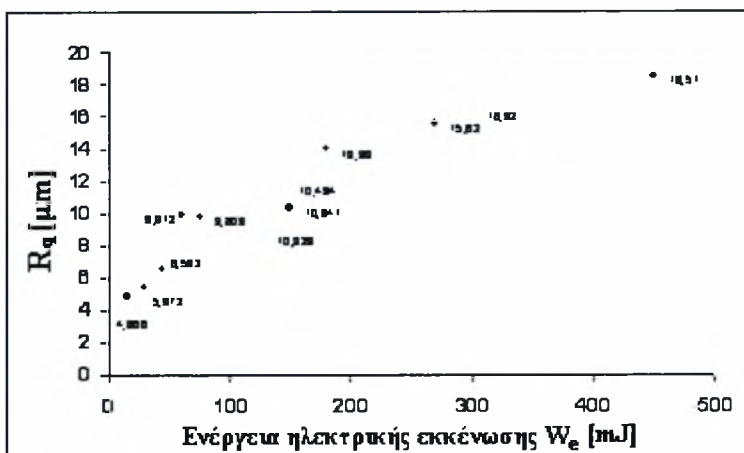
Γραφικές παραστάσεις για το χάλυβα **SVERKER 21**:



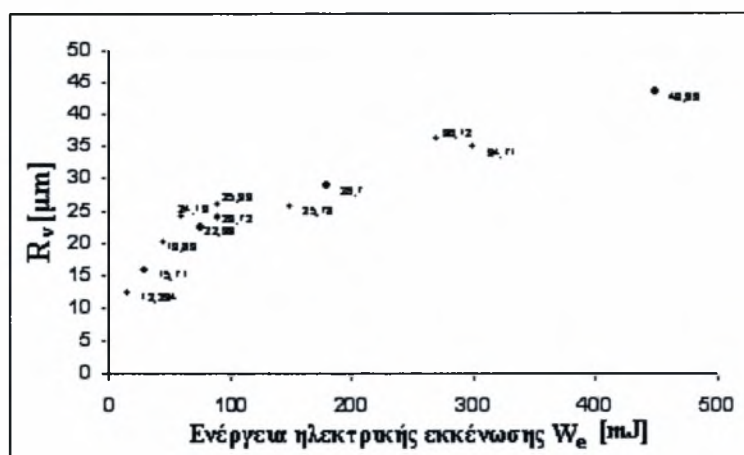
**Γραφική παράσταση 4.1:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **SVERKER 21**.



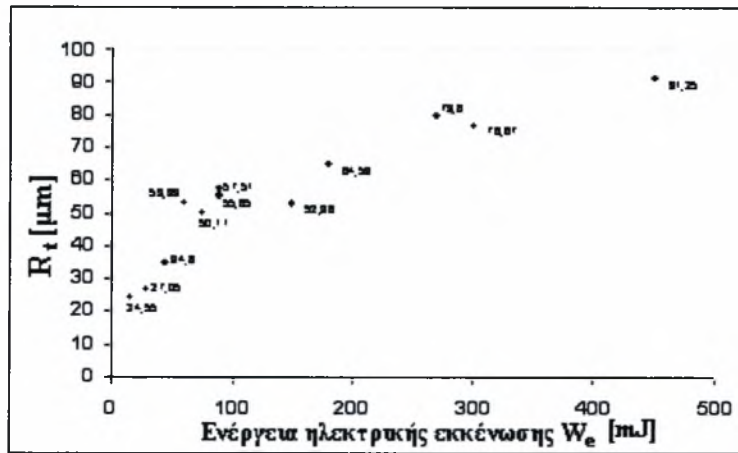
**Γραφική παράσταση 4.2:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_p$  [ $\mu$ m] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.



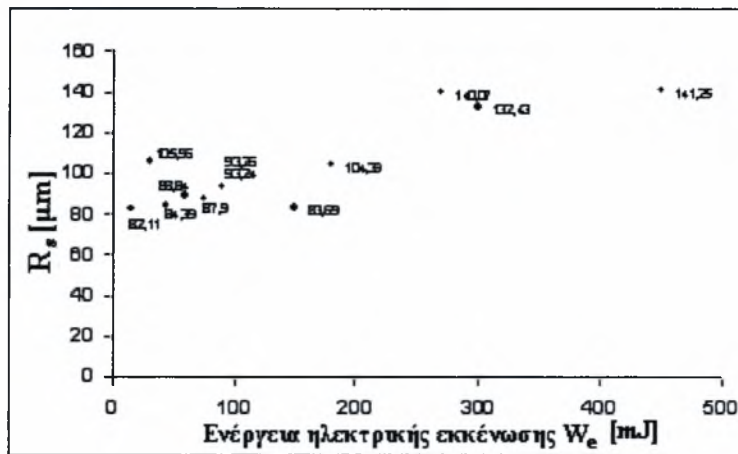
**Γραφική παράσταση 4.3:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_q$  [ $\mu$ m] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.



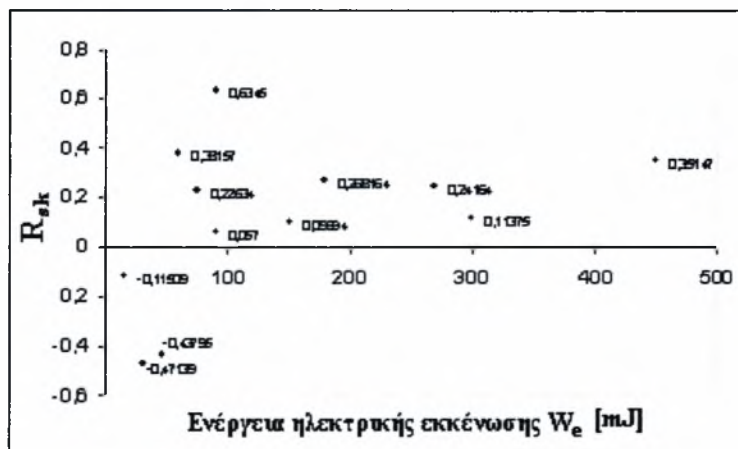
**Γραφική παράσταση 4.4:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_v$  [ $\mu$ m] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.



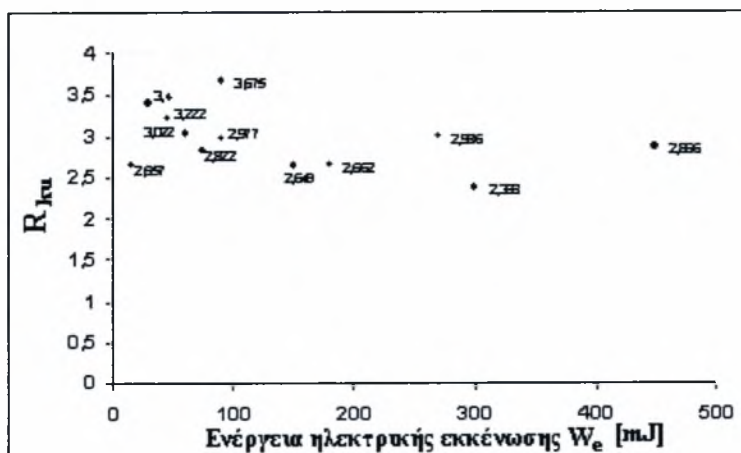
**Γραφική παράσταση 4.5:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_i$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [ $\text{mJ}$ ] για το χάλυβα SVERKER 21.



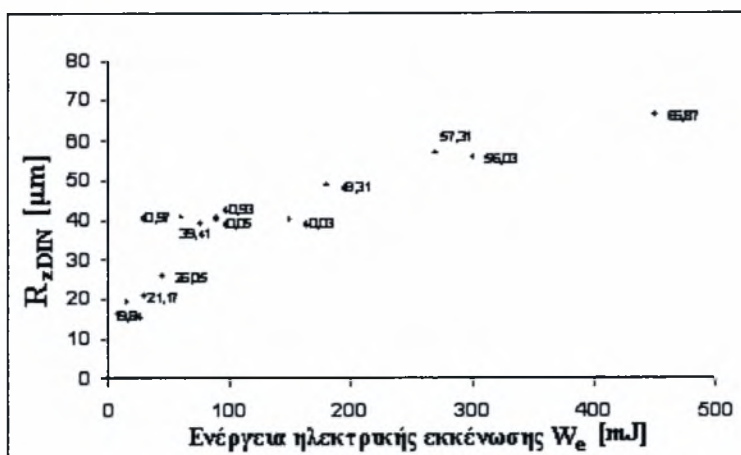
**Γραφική παράσταση 4.6:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_s$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [ $\text{mJ}$ ] για το χάλυβα SVERKER 21.



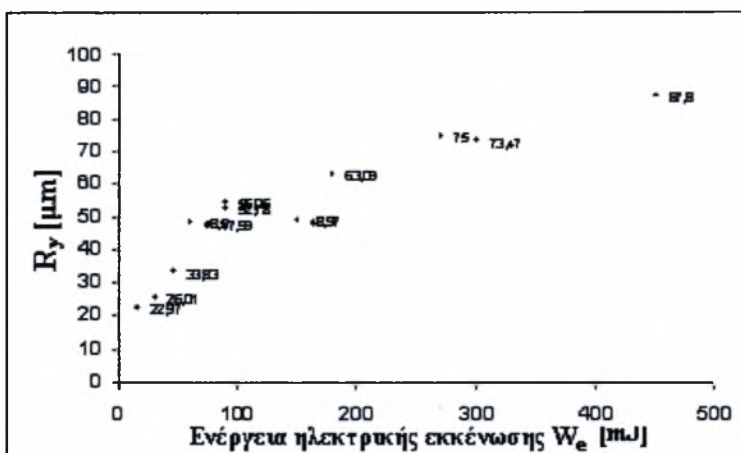
**Γραφική παράσταση 4.7:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{sk}$  συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [ $\text{mJ}$ ] για το χάλυβα SVERKER 21.



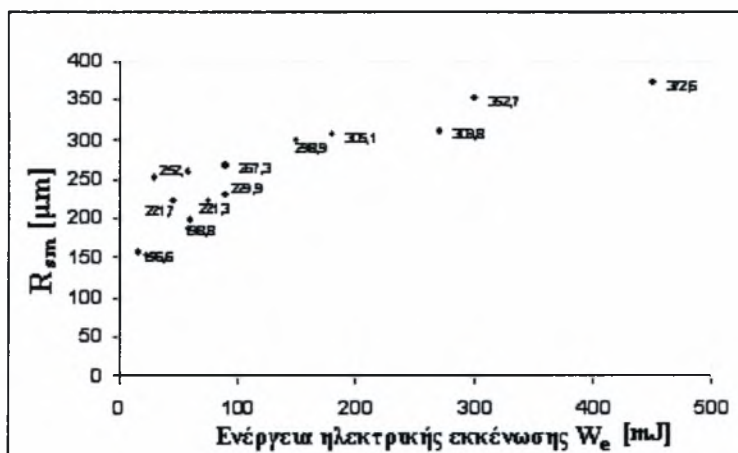
**Γραφική παράσταση 4.8:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{z,ku}$  συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.



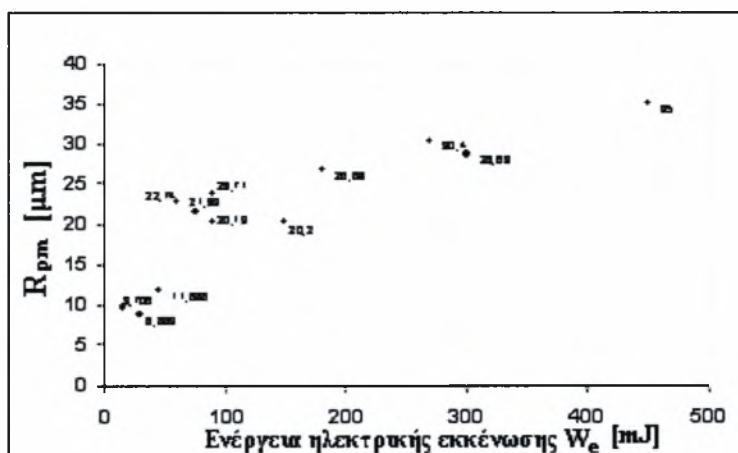
**Γραφική παράσταση 4.9:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{z,DIN}$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.



**Γραφική παράσταση 4.10:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_y$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.

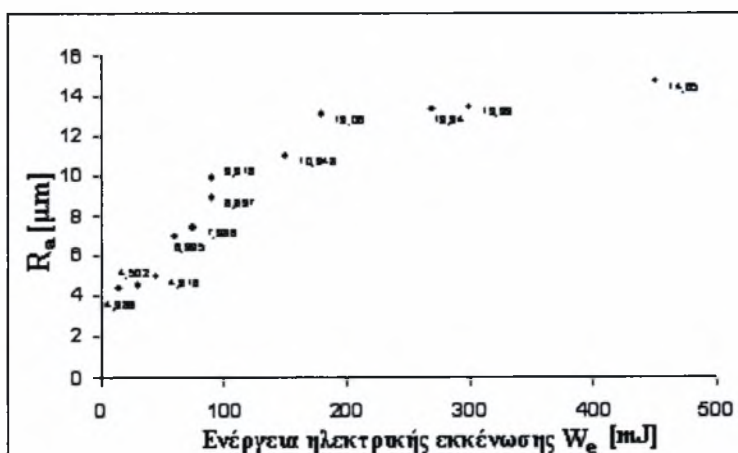


**Γραφική παράσταση 4.11:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{sm}$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.

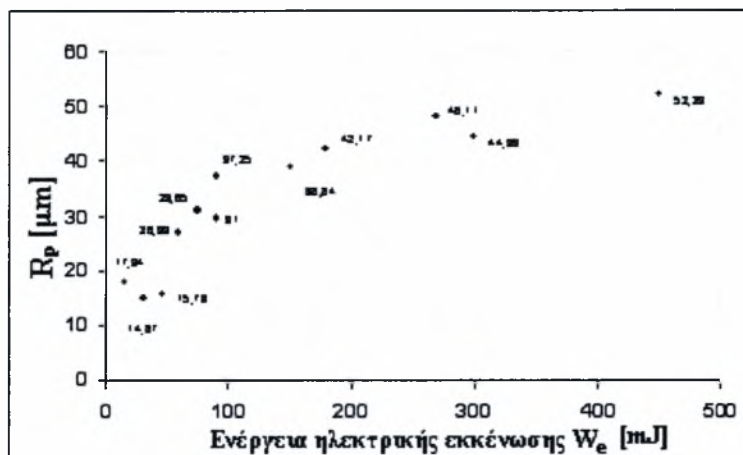


**Γραφική παράσταση 4.12:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{pm}$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα SVERKER 21.

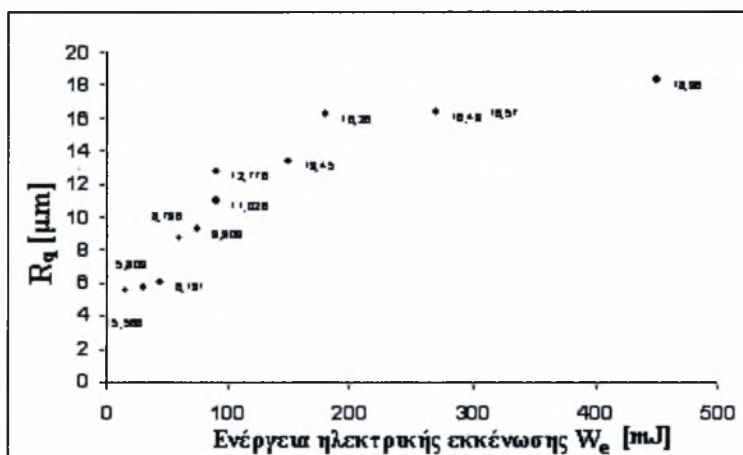
Γραφικές παραστάσεις για το χάλυβα IMPAX:



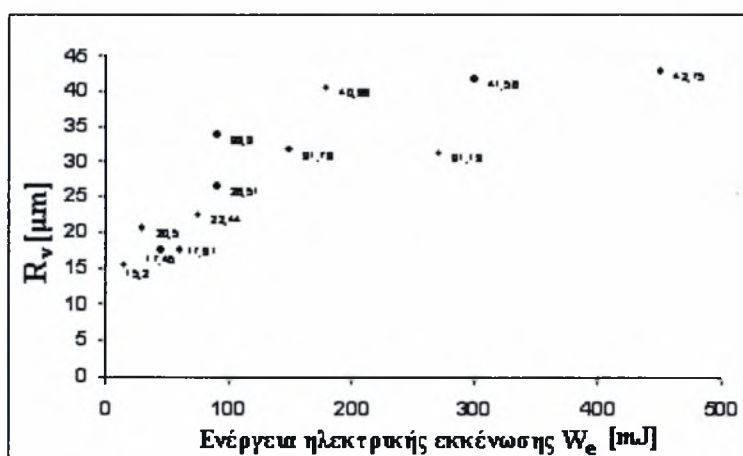
**Γραφική παράσταση 4.13:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.



**Γραφική παράσταση 4.14:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_p$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **IMPAX**.

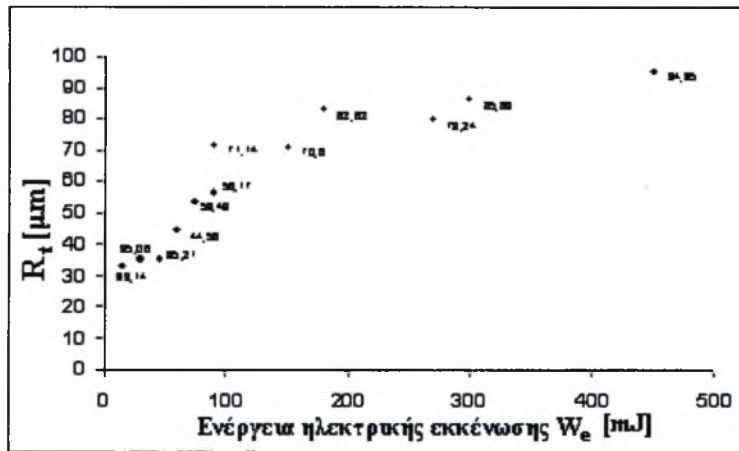


**Γραφική παράσταση 4.15:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_q$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **IMPAX**.

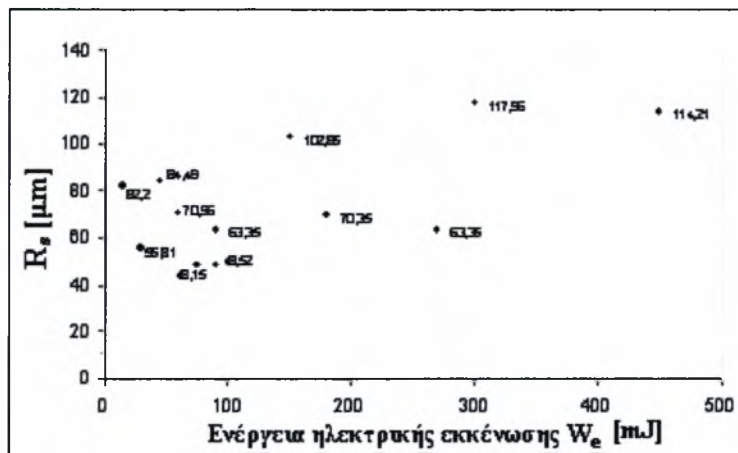


**Γραφική παράσταση 4.16:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_v$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **IMPAX**.

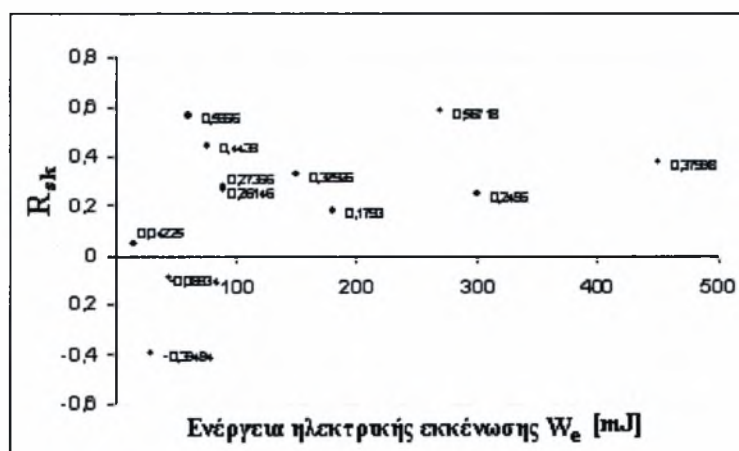




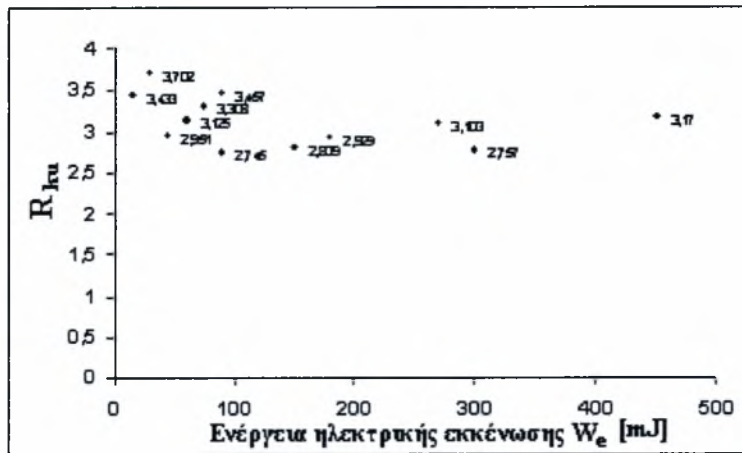
**Γραφική παράσταση 4.17:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_t$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.



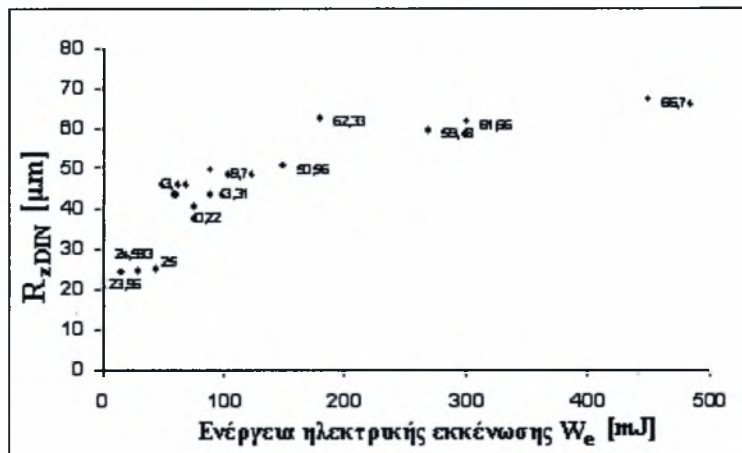
**Γραφική παράσταση 4.18:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_s$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.



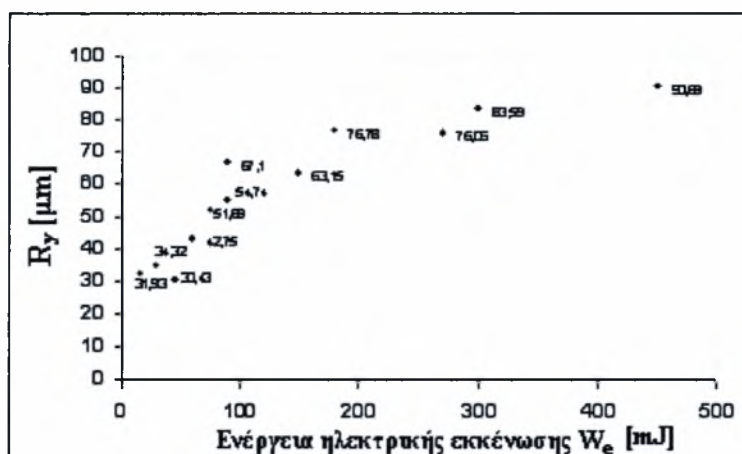
**Γραφική παράσταση 4.19:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{sk}$  συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.



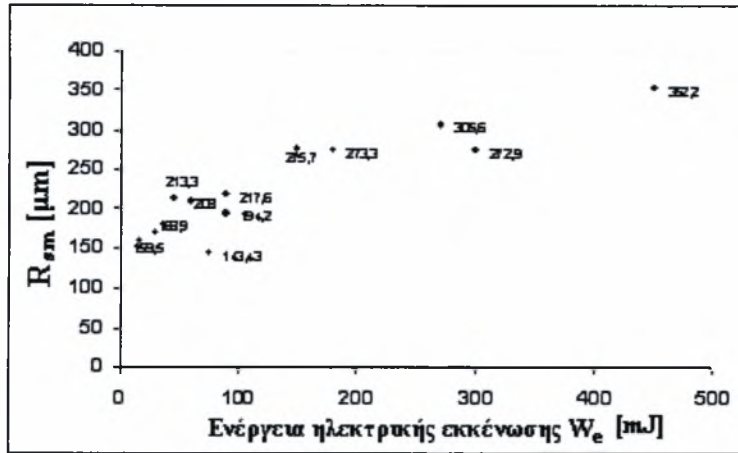
**Γραφική παράσταση 4.20:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{ku}$  συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.



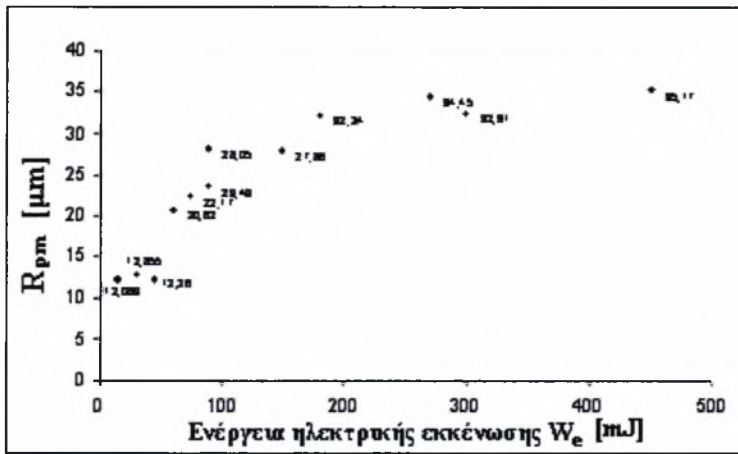
**Γραφική παράσταση 4.21:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{zDIN}$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.



**Γραφική παράσταση 4.22:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_y$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.

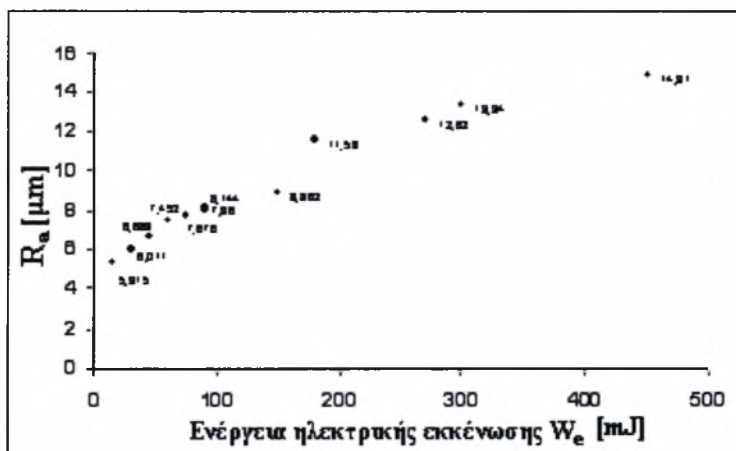


Γραφική παράσταση 4.23: Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{sm}$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.

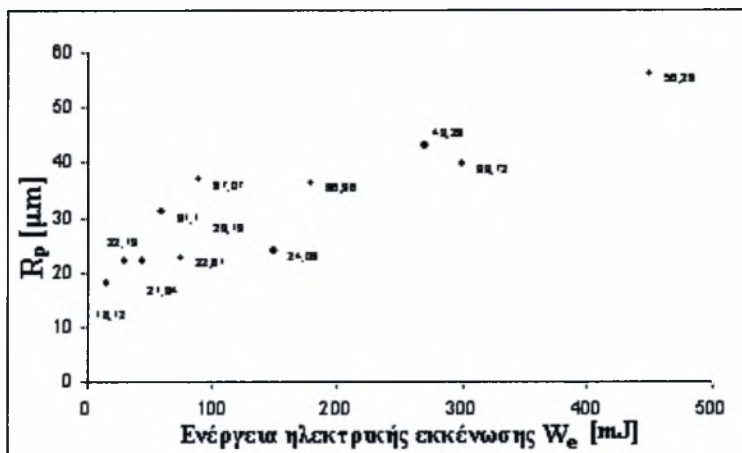


Γραφική παράσταση 4.24: Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{pm}$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα IMPAX.

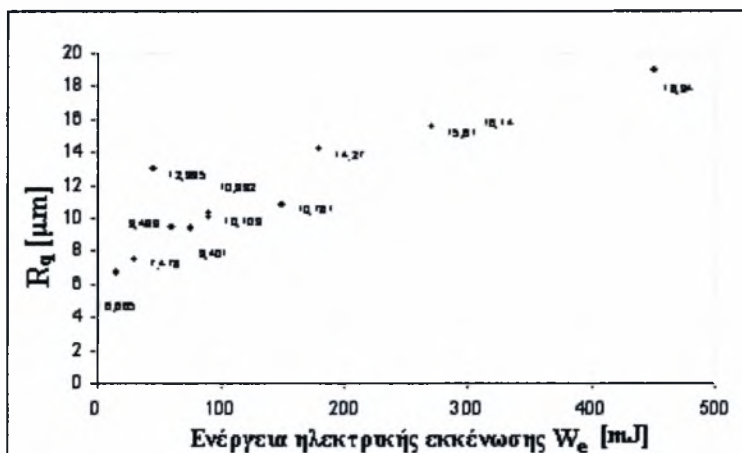
Γραφικές παραστάσεις για το χάλυβα ORVAR:



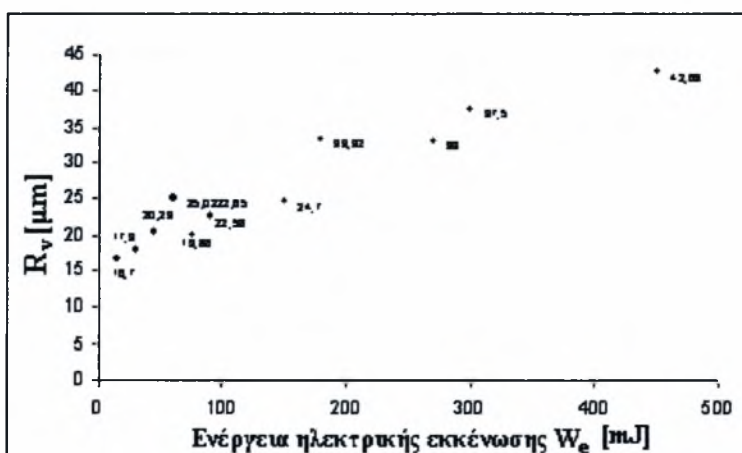
Γραφική παράσταση 4.25: Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_a$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα ORVAR.



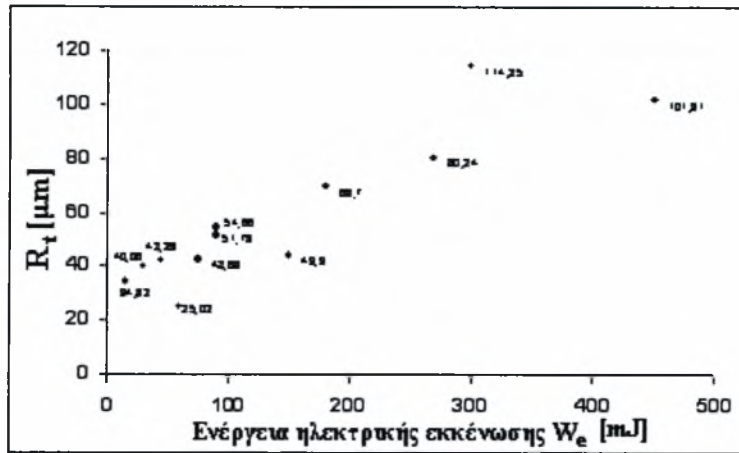
Γραφική παράσταση 4.26: Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_p$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα ORVAR.



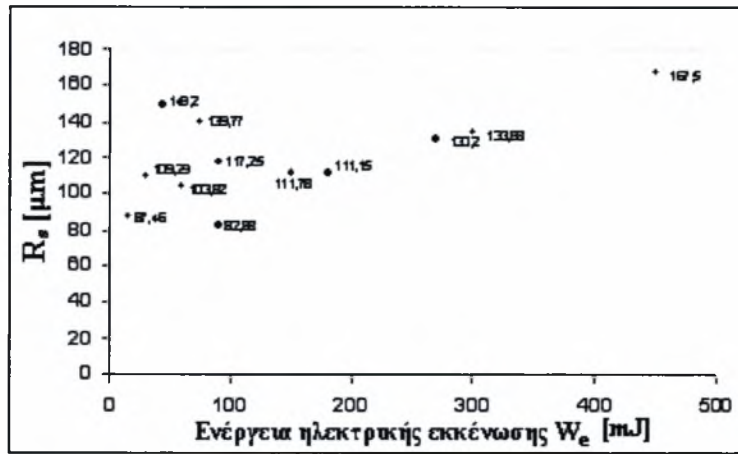
Γραφική παράσταση 4.27: Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_q$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα ORVAR.



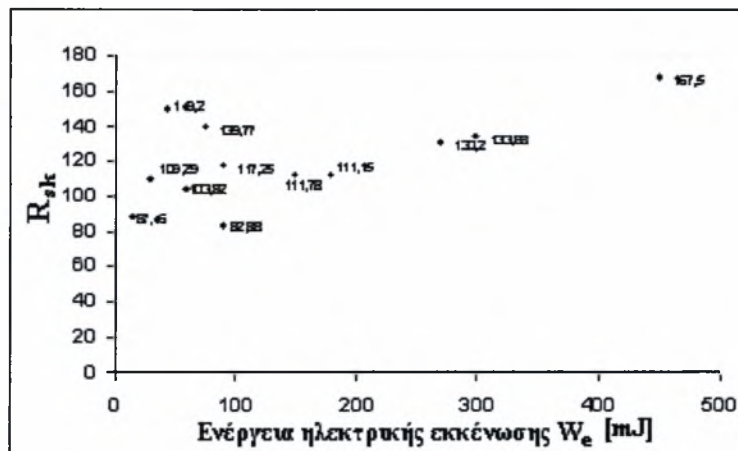
Γραφική παράσταση 4.28: Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_v$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα ORVAR.



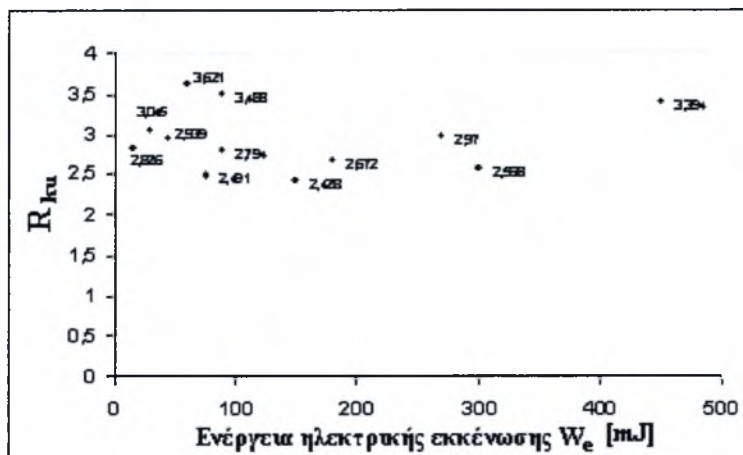
**Γραφική παράσταση 4. 29:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_t$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



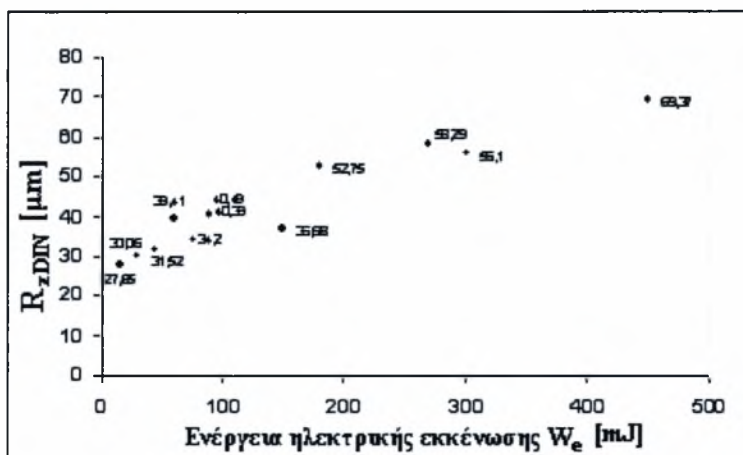
**Γραφική παράσταση 4. 30:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_s$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



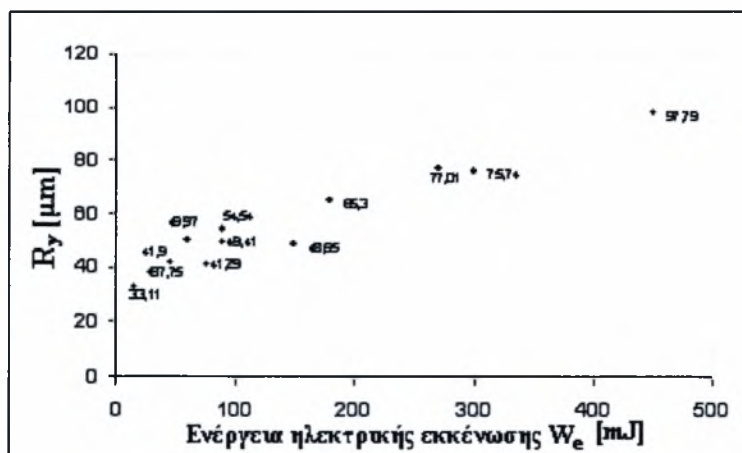
**Γραφική παράσταση 4. 31:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{sk}$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



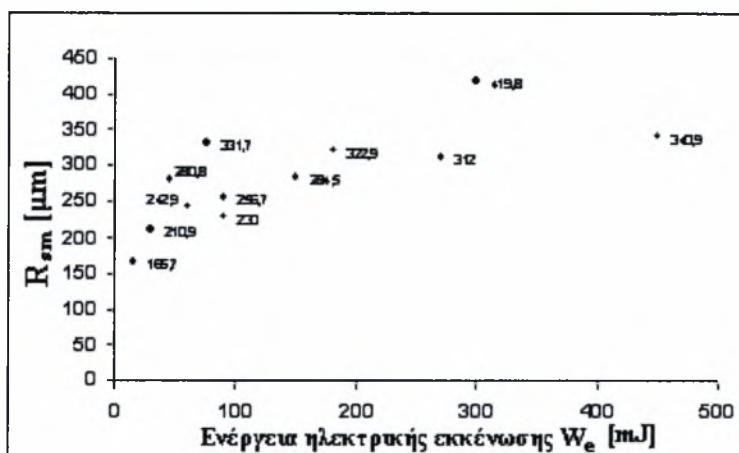
**Γραφική παράσταση 4.32:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{ku}$  συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



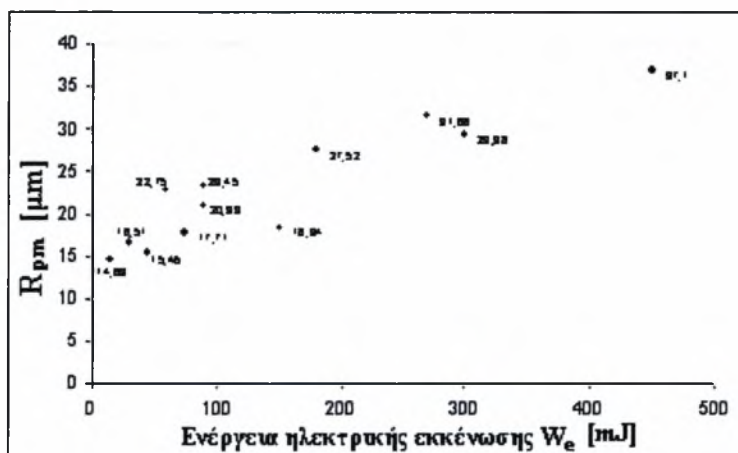
**Γραφική παράσταση 4.33:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{zDIN}$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



**Γραφική παράσταση 4.34:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_y$  [ $\mu m$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



**Γραφική παράσταση 4.35:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{sm}$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.



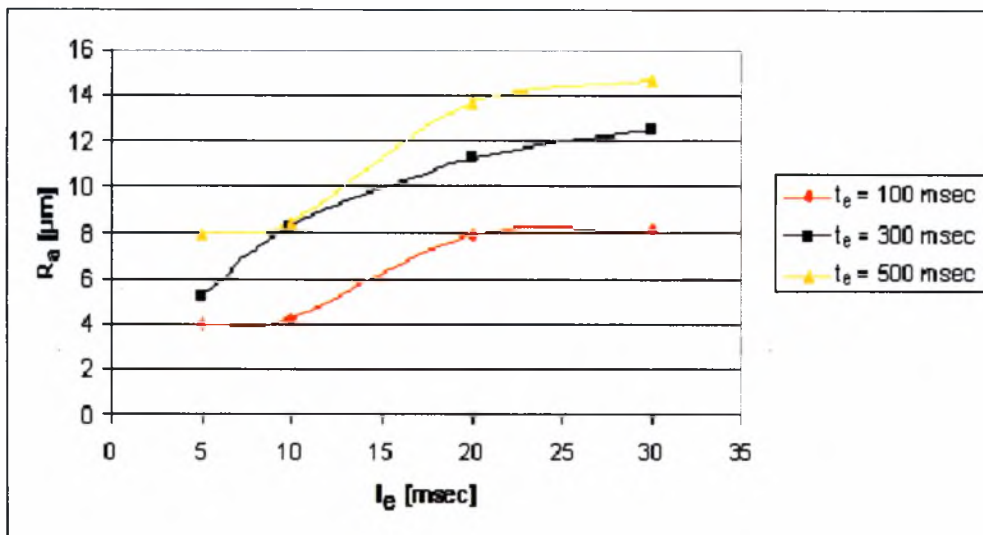
**Γραφική παράσταση 4.36:** Γραφική παράσταση παραμέτρου  $R_{pm}$  [ $\mu\text{m}$ ] συναρτήσει της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης  $W_e$  [mJ] για το χάλυβα **ORVAR**.

Επισημαίνεται ότι για τη μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$ , θα παρουσιασθούν στη συνέχεια πρόσθετες γραφικές παραστάσεις για τα τρία υλικά που εξετάζουμε. Οι γραφικές αυτές παραστάσεις θα δείχνουν το πώς μεταβάλλεται η μέση αριθμητική τραχύτητα συναρτήσει των τιμών της έντασης παλμού  $I_e$  (οι τιμές της έντασης παλμού  $I_e$  είναι 5, 10, 20, 30 [A]) για τις τρεις τιμές, άρα και τρεις καμπύλες, της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  (οι τιμές της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  είναι 100, 300, 500 [msec]), αλλά και το αντίθετο, δηλαδή το πώς μεταβάλλεται η μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$  συναρτήσει των τιμών της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  (οι τιμές της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  είναι 100, 300, 500 [msec]) για τις τέσσερις τιμές, άρα και τέσσερις καμπύλες, των τιμών της έντασης παλμού  $I_e$  (οι τιμές της έντασης παλμού  $I_e$  είναι 5, 10, 20, 30 [A]).

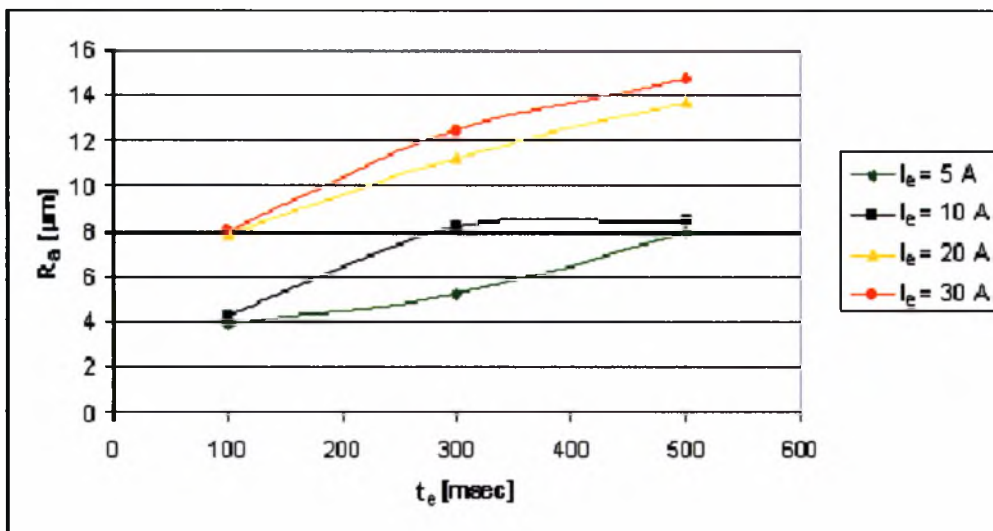




Γραφικές παραστάσεις για το χάλυβα **SVERKER 21** :

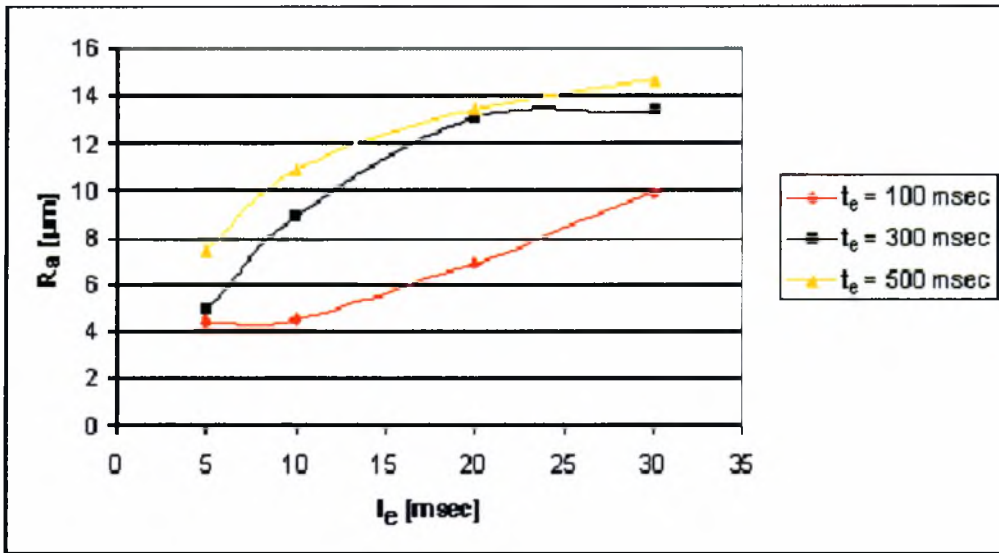


**Γραφική παράσταση 4.37:** Γραφική παράσταση μέσης αριθμητικής τραχύτητας συναρτήσει της έντασης παλμών  $I_e$  για τις τρεις τιμές της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$ .

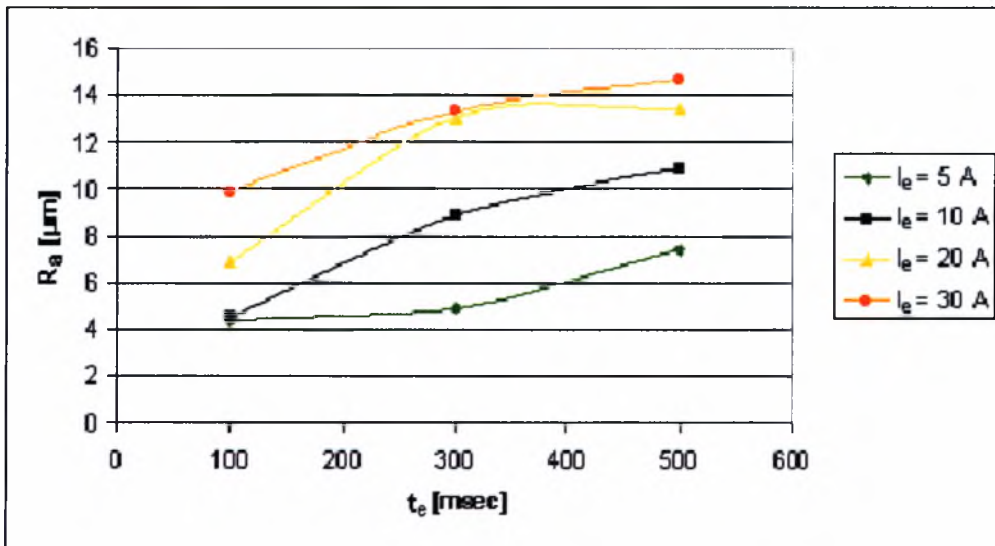


**Γραφική παράσταση 4.38:** Γραφική παράσταση μέσης αριθμητικής τραχύτητας συναρτήσει της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  για τις τρεις τιμές της έντασης παλμών  $I_e$ .

Γραφικές παραστάσεις για το χάλυβα IMPAX :

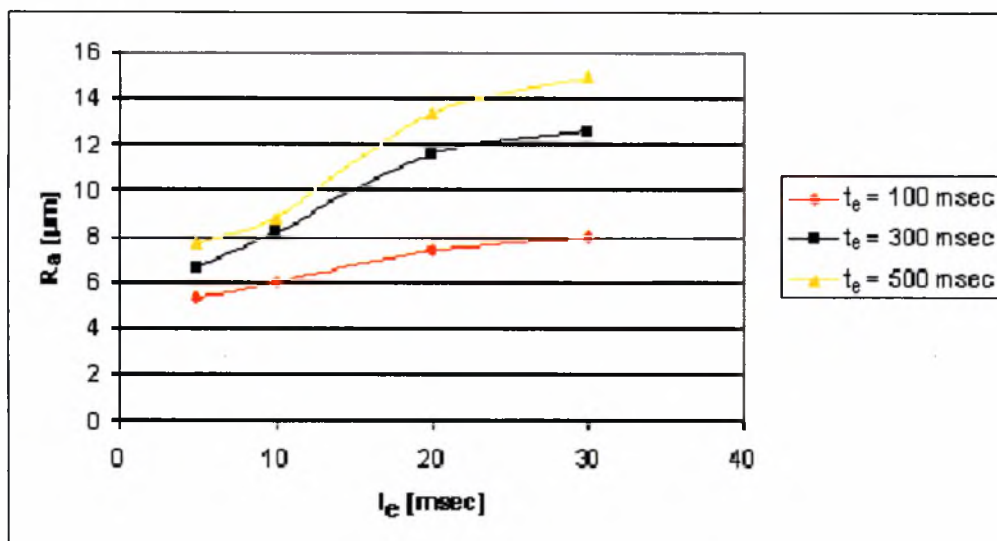


Γραφική παράσταση 4.39: Γραφική παράσταση μέσης αριθμητικής τραχύτητας συναρτήσει της έντασης παλμών  $I_e$  για τις τρεις τιμές της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$ .

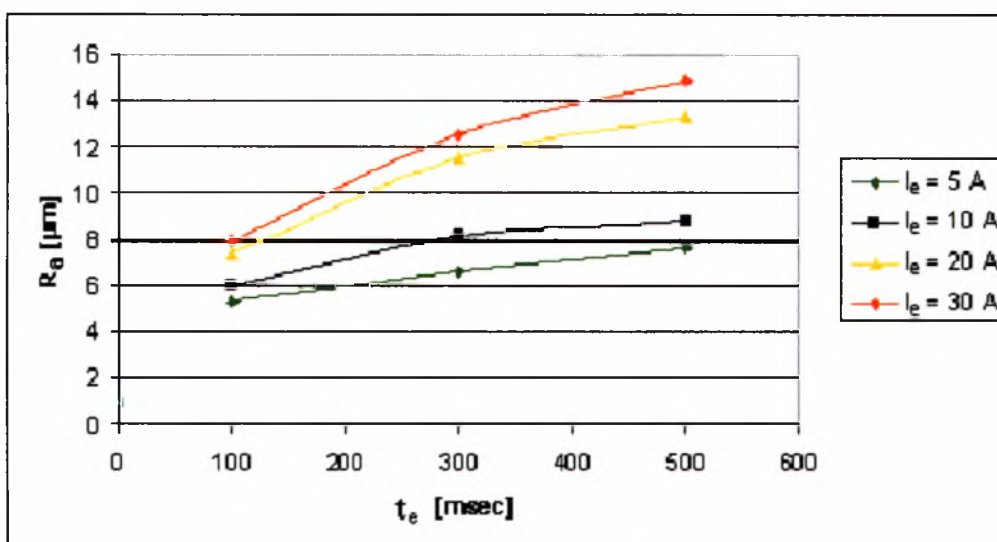


Γραφική παράσταση 4.40: Γραφική παράσταση μέσης αριθμητικής τραχύτητας συναρτήσει της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  για τις τρεις τιμές της έντασης παλμών  $I_e$ .

Γραφικές παραστάσεις για το χάλυβα ORVAR :



Γραφική παράσταση 4.41: Γραφική παράσταση μέσης αριθμητικής τραχύτητας συναρτήσει της έντασης παλμών  $I_e$  για τις τρεις τιμές της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$ .



Γραφική παράσταση 4.42: Γραφική παράσταση μέσης αριθμητικής τραχύτητας συναρτήσει της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  για τις τρεις τιμές της έντασης παλμών  $I_e$ .

### 4.3 Κατατομές τραχύτητας.

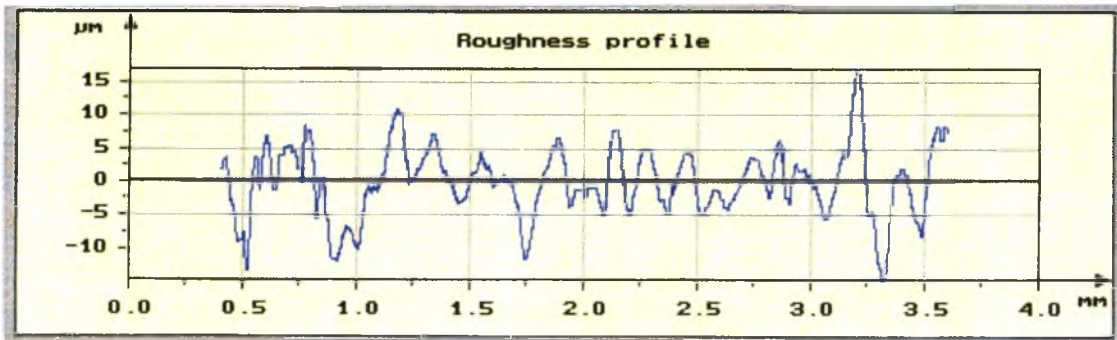
Οι κατατομές (προφίλ) της τραχύτητας, λαμβάνονται όπως και τα αριθμητικά πειραματικά αποτελέσματα από το τραχύμετρο Taylor-Hobson Sutronic 3+.

Με κάθε τραχυμέτρηση παίρνουμε και το αντίστοιχο προφίλ τραχύτητας. Δηλαδή και εδώ θα έχουμε  $10 \times 36 = 360$  προφίλ τραχύτητας.

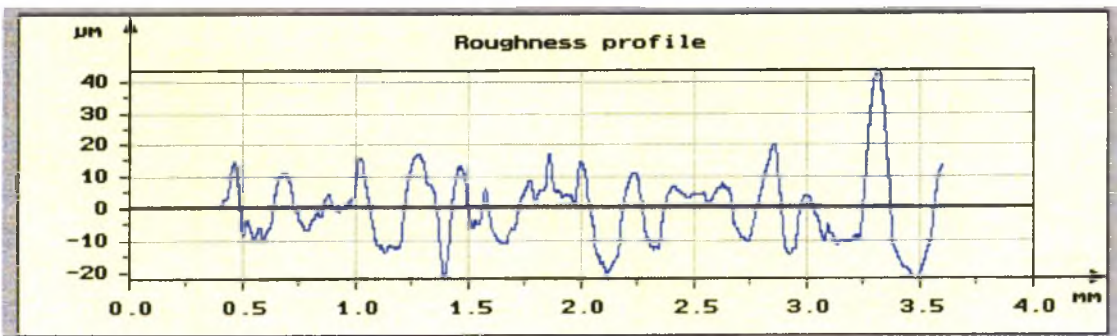
Στα παρακάτω σχήματα παρουσιάζεται ενδεικτικά ένα προφίλ τραχύτητας για κάθε δοκίμιο του κάθε υλικού όπως παίρνονται από το τραχύμετρο. Στα Σχήματα 4.1 – 4.12, παρουσιάζονται τα προφίλ για το χάλυβα SVERKER 21. Στα Σχήματα 4.13 -

4.24, παρουσιάζονται τα προφίλ για το χάλυβα IMPAX, ενώ στα Σχήματα 4.25 – 4.36, παρουσιάζονται τα προφίλ για το χάλυβα ORVAR.

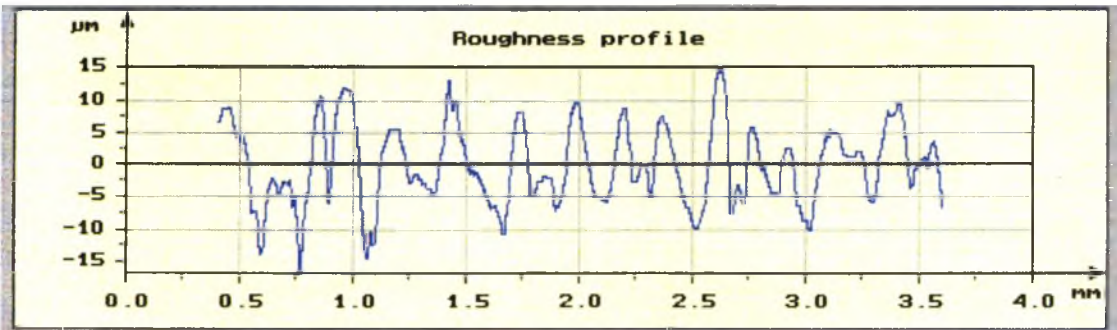
Προφίλ για το χάλυβα SVERKER 21 :



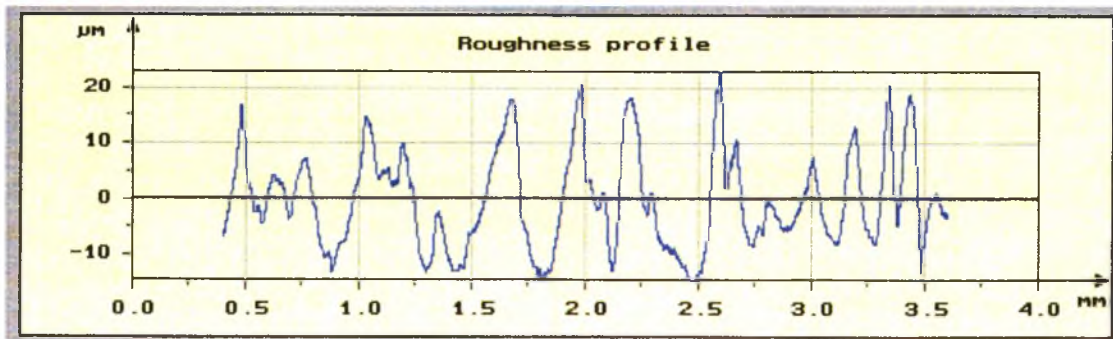
Σχήμα 4.1: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5$  A και  $t_e = 100$  μsec όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



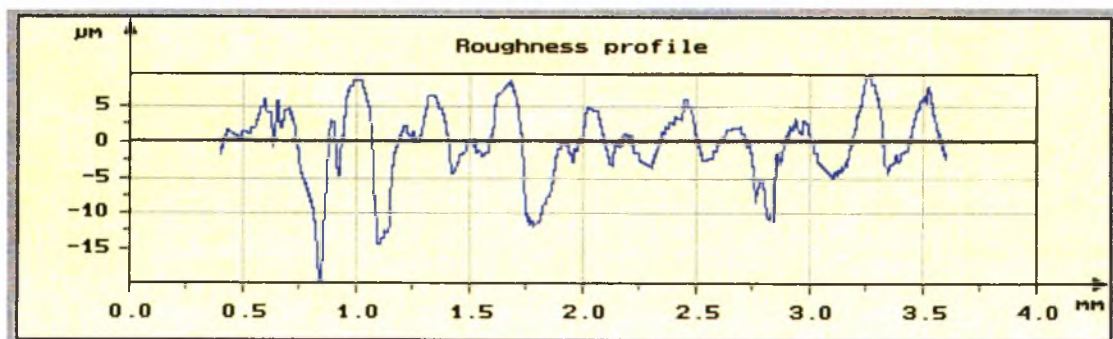
Σχήμα 4.2: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10$  A και  $t_e = 100$  μsec όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



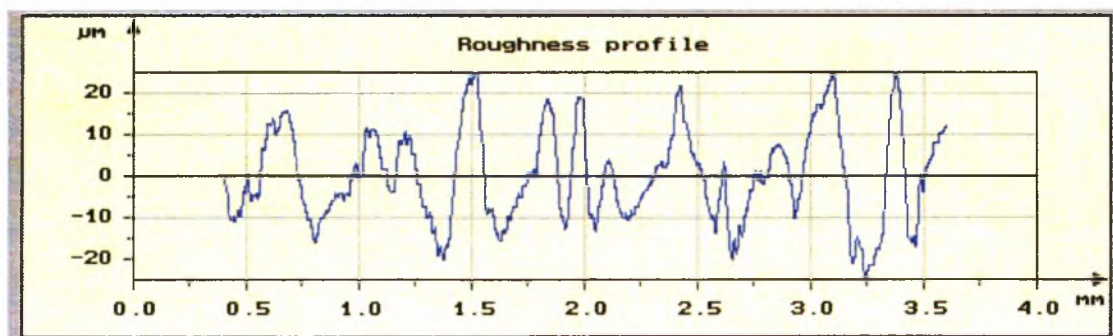
Σχήμα 4.3: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5$  A και  $t_e = 300$  μsec όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



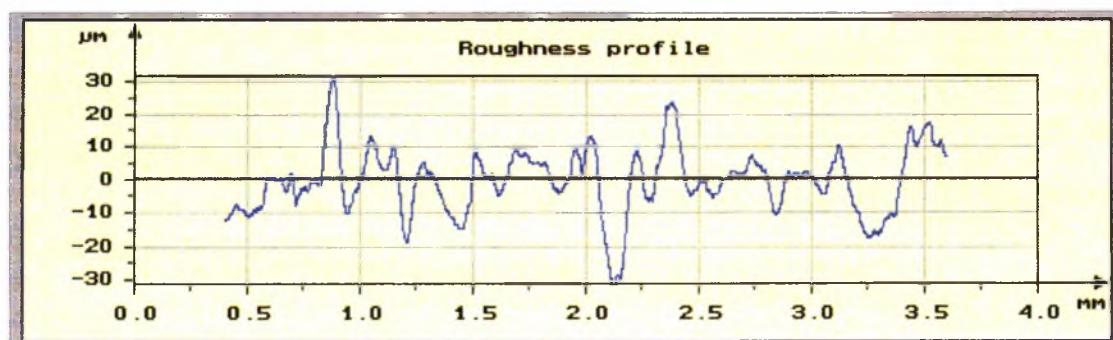
**Σχήμα 4.4:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



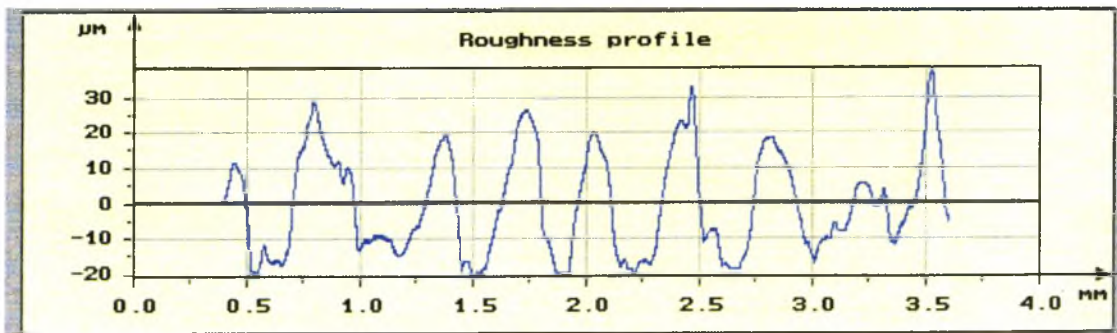
**Σχήμα 4.5:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



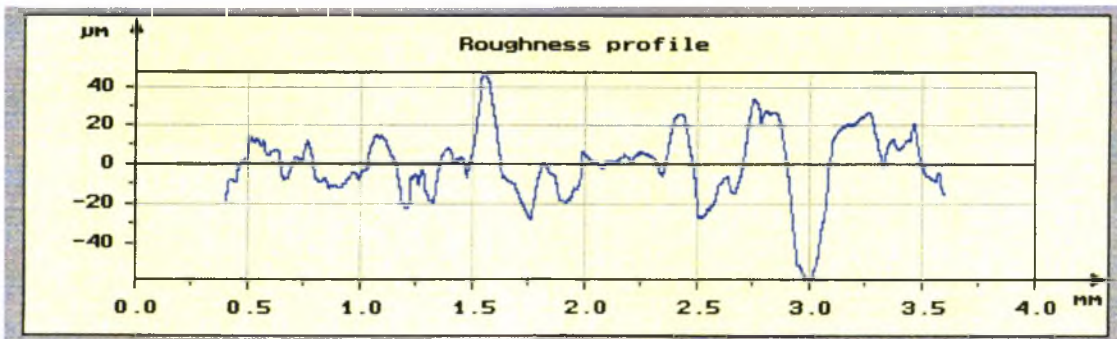
**Σχήμα 4.6:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



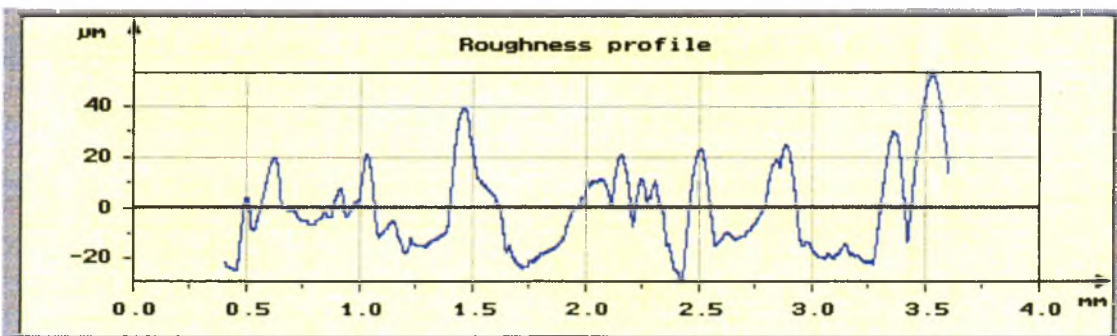
**Σχήμα 4.7:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



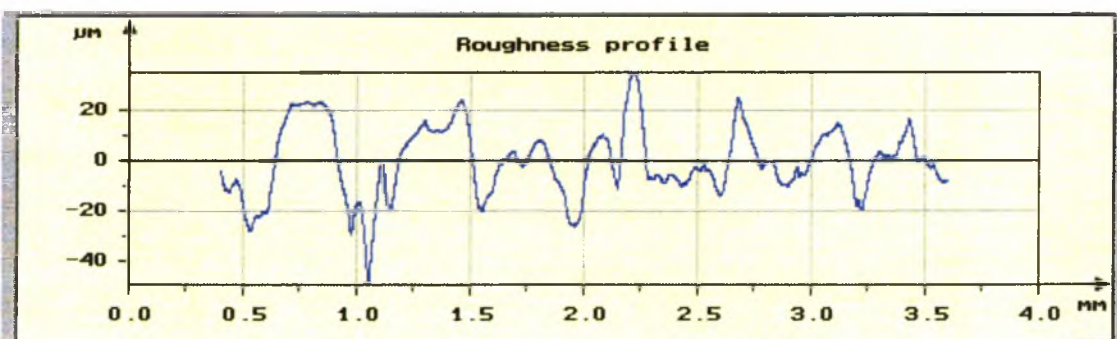
**Σχήμα 4.8:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



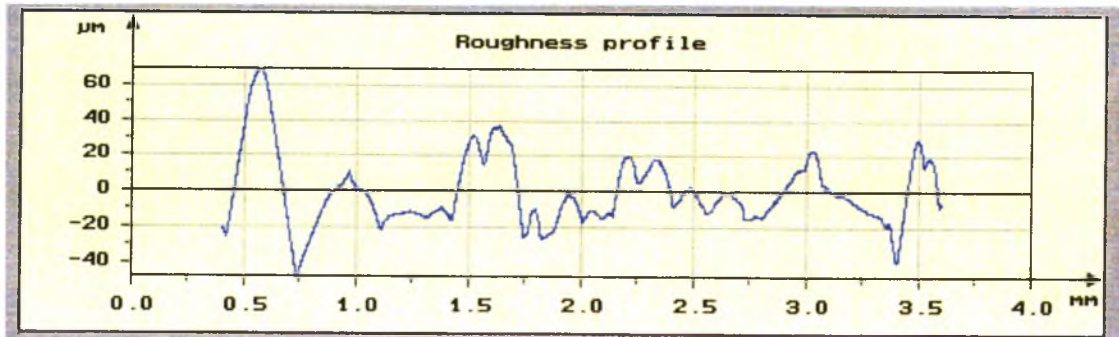
**Σχήμα 4.9:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.



**Σχήμα 4.10:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.

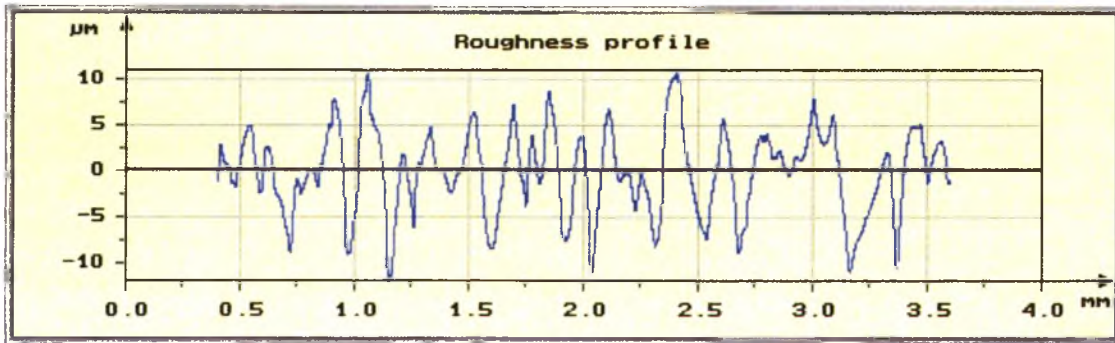


**Σχήμα 4.11:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.

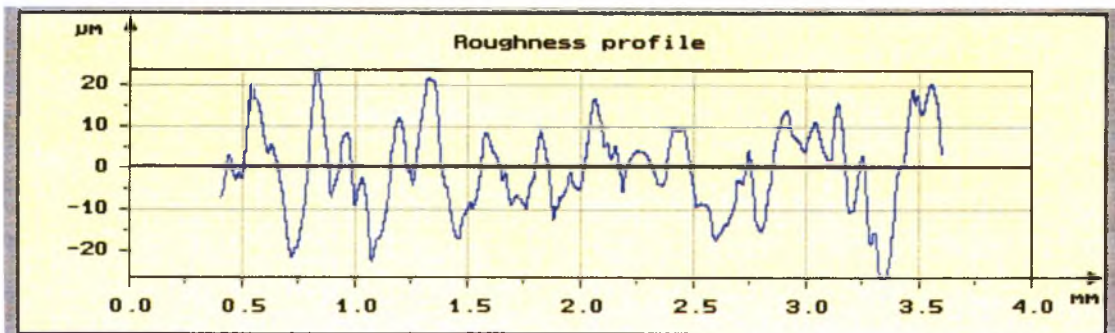


**Σχήμα 4.12:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ } \mu\text{sec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα SVERKER 21.

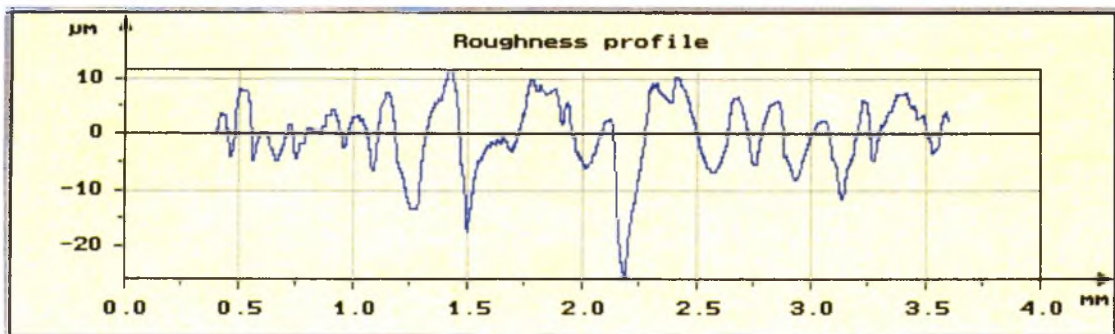
Προφίλ για το χάλυβα **IMPAX** :



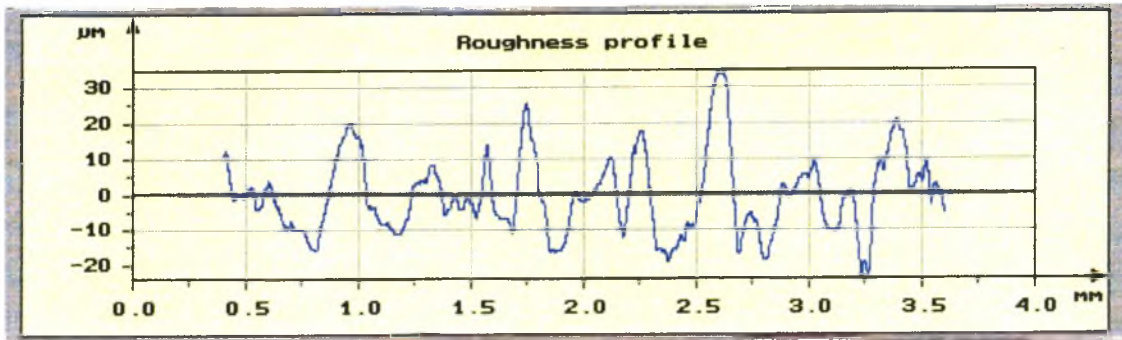
**Σχήμα 4.13:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.



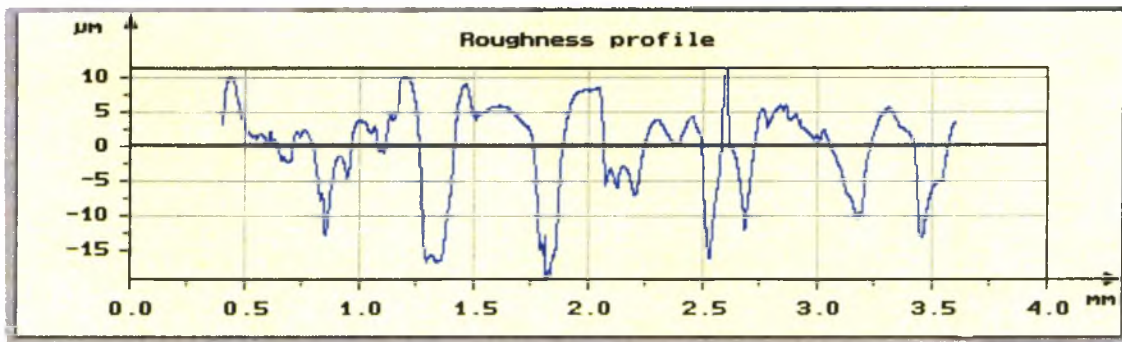
**Σχήμα 4.14:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.



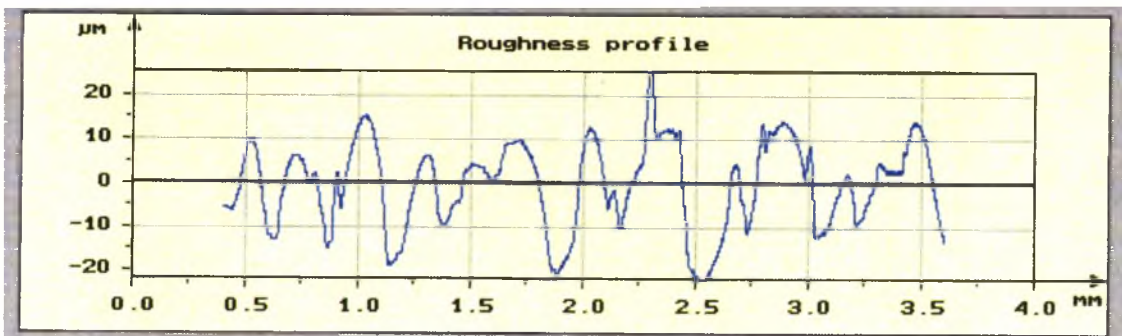
**Σχήμα 4.15:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.



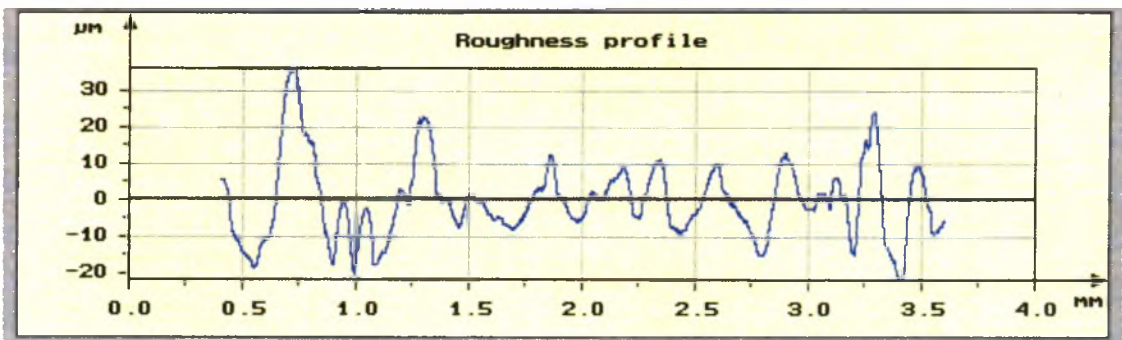
**Σχήμα 4.16:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.



**Σχήμα 4.17:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.

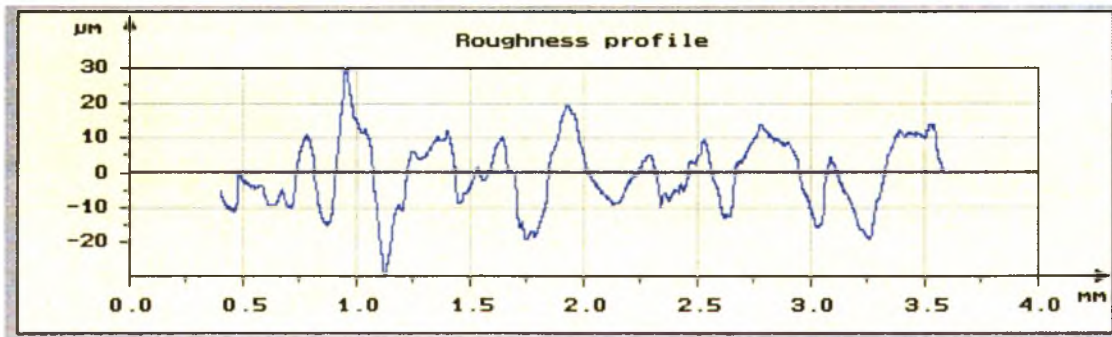


**Σχήμα 4.18:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.

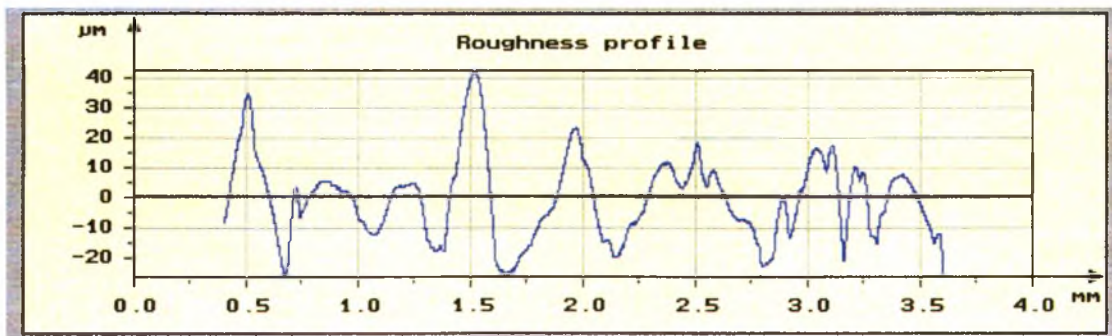


**Σχήμα 4.19:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.

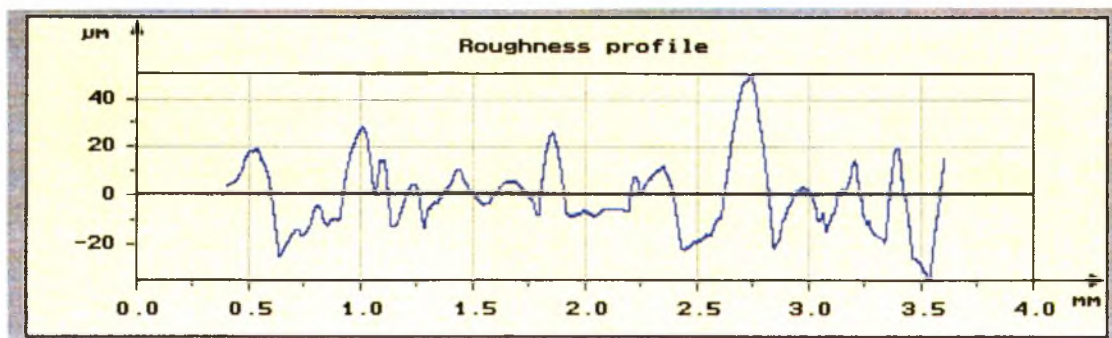




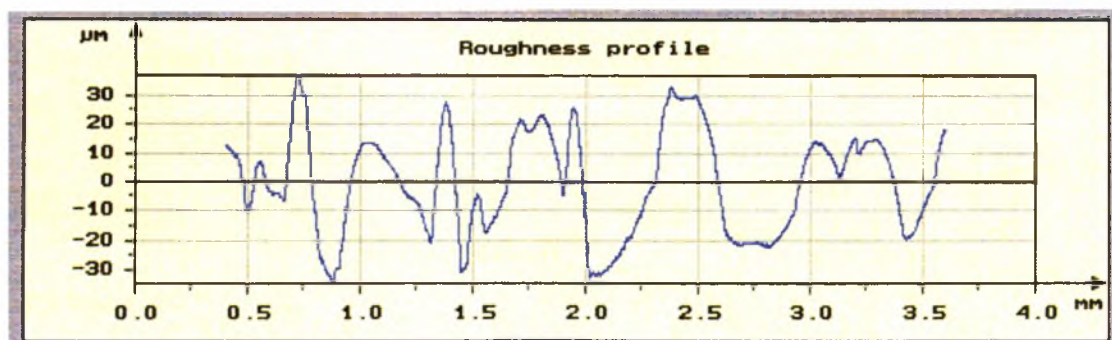
**Σχήμα 4.20:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.



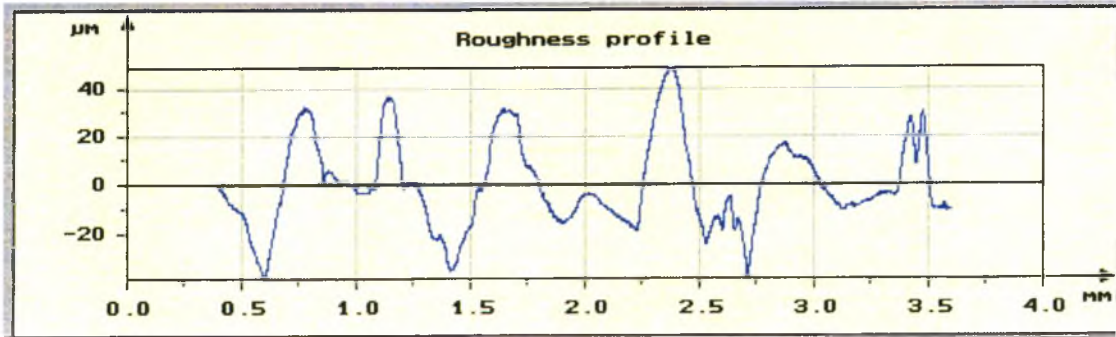
**Σχήμα 4.21:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.



**Σχήμα 4.22:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.

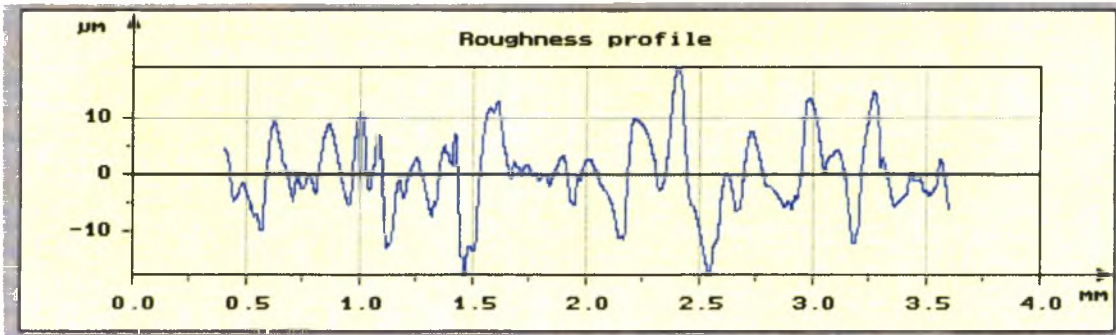


**Σχήμα 4.23:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.

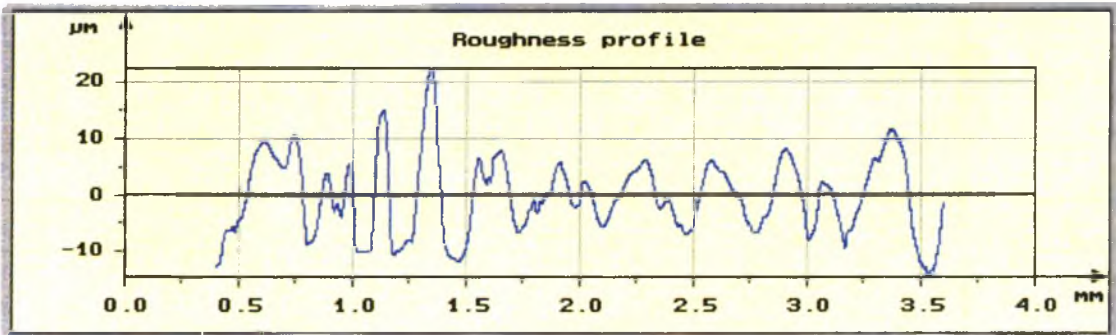


Σχήμα 4.24: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα IMPAX.

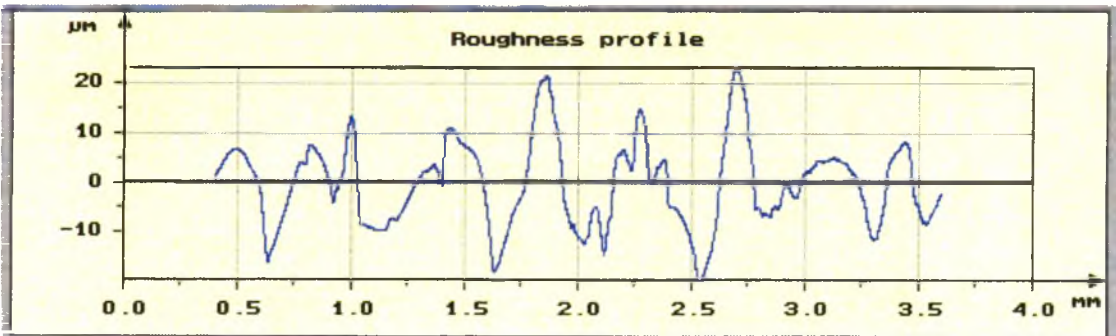
Προφίλ για το χάλυβα ORVAR :



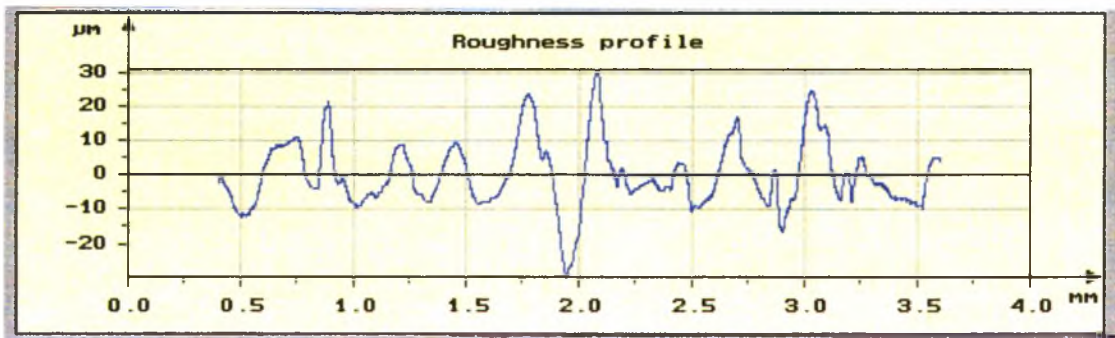
Σχήμα 4.25: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



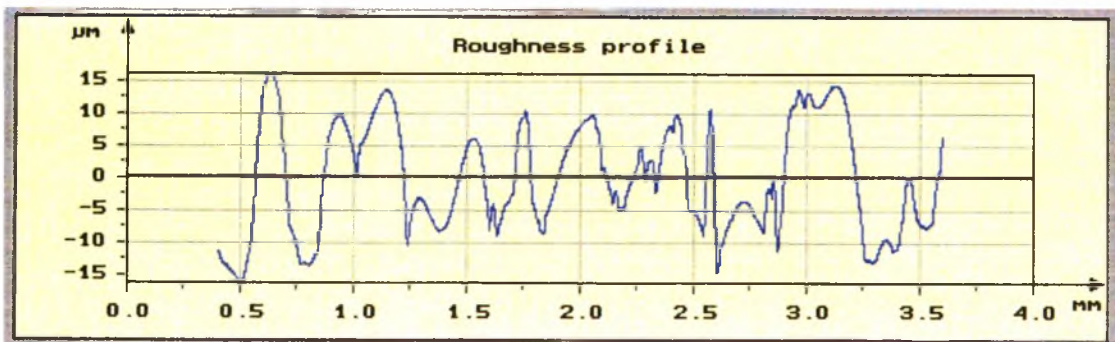
Σχήμα 4.26: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



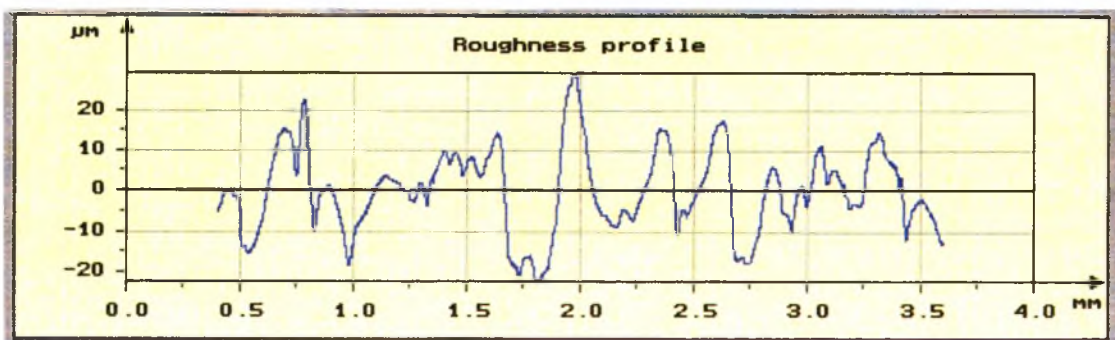
Σχήμα 4.27: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



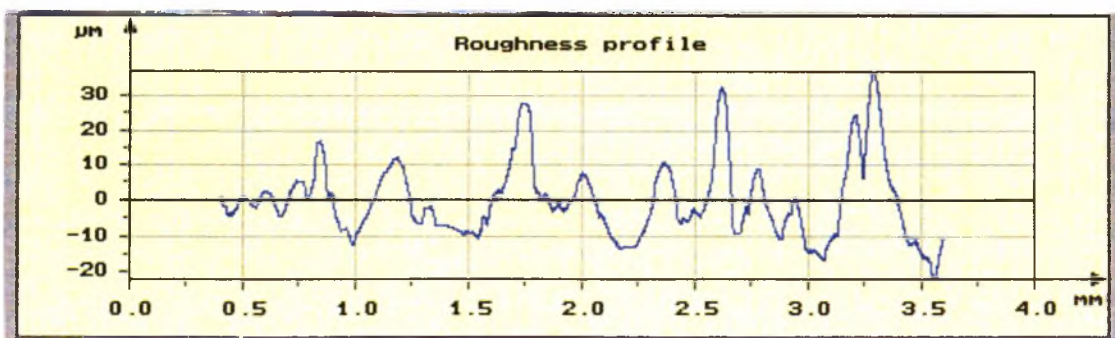
**Σχήμα 4.28:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



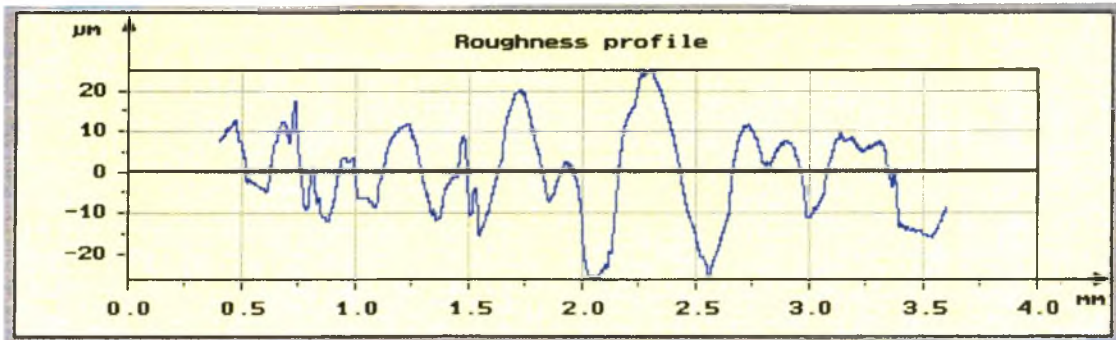
**Σχήμα 4.29:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 5 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



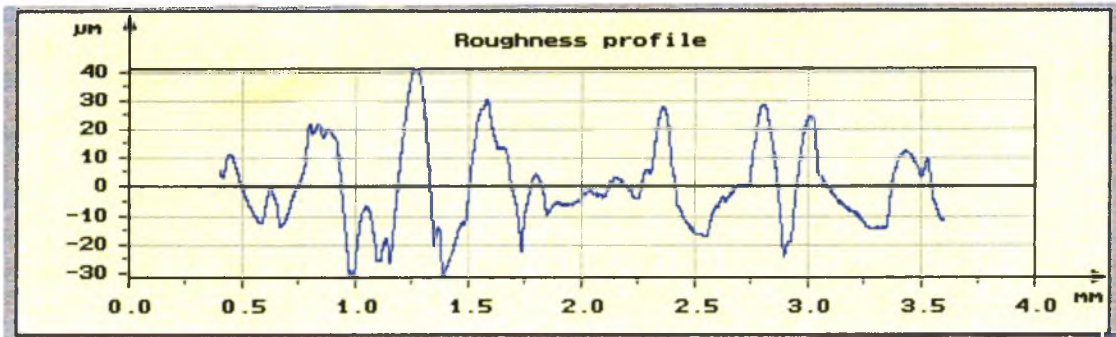
**Σχήμα 4.30:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



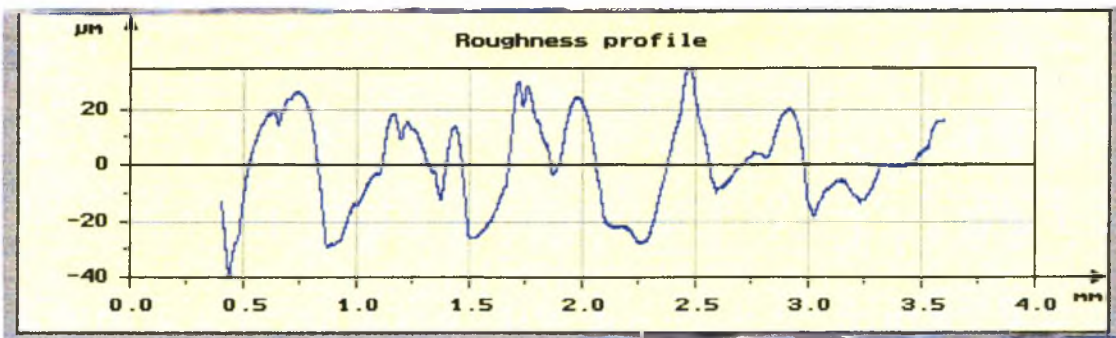
**Σχήμα 4.31:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 100 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



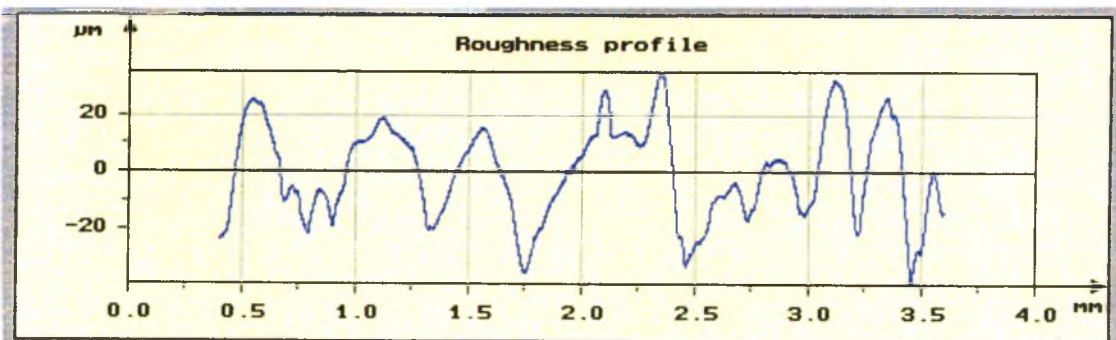
Σχήμα 4.32: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 10 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



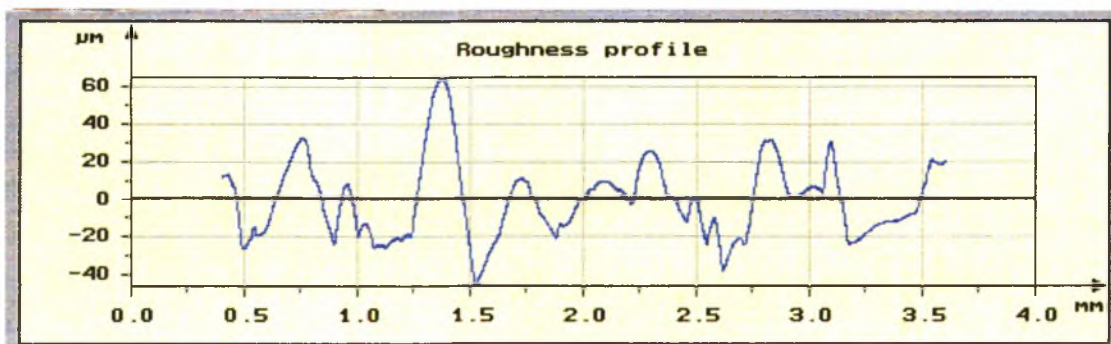
Σχήμα 4.33: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



Σχήμα 4.34: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 300 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



Σχήμα 4.35: Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 20 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ μsec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.



**Σχήμα 4.36:** Προφίλ τραχύτητας για  $I_e = 30 \text{ A}$  και  $t_e = 500 \text{ } \mu\text{sec}$  όπως προκύπτει από το Software του τραχυμέτρου για χάλυβα ORVAR.

#### 4.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων.

Από τους Πίνακες 4.2, 4.3 και 4.4, καθώς και τις Γραφικές παραστάσεις 4.1 έως 4.42 προκύπτουν ορισμένα γενικά συμπεράσματα για τη συμπεριφορά των παραμέτρων που εξετάζουμε.

Μια πρώτη σημαντική παρατήρηση που ισχύει και για τα τρία υλικά είναι ότι οι παράμετροι ύψους,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ , αυξάνονται με την αύξηση της ενέργειας. Δηλαδή όσο αυξάνεται η ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης, δηλαδή το γινόμενο της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$ , της έντασης παλμού  $I_e$  και της τάσης  $V_e$  ( $W_e = I_e t_e V_e$ ), υπάρχει μια τάση αύξησης των παραμέτρων αυτών. Από τα αντίστοιχα διαγράμματα διαπιστώνεται ότι η αύξηση τείνει να είναι γραμμική.

Για τις παραμέτρους μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$ , οι τιμές τους ακολουθούν μια ανοδική πορεία με την αύξηση της ενέργειας, χωρίς αυτό να ισχύει πάντα. Δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι η αύξηση της ενέργειας έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών των παραμέτρων αυτών.

Για τις παραμέτρους  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  δεν ισχύει το ίδιο. Το μόνο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι τιμές τους δεν επηρεάζονται από την ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης.

Αντιστοιχες παρατηρήσεις προκύπτουν από τις Γραφικές παραστάσεις 4.37 έως 4.42.

Στις Γραφικές παραστάσεις 4.37, 4.39 και 4.41 διαπιστώνονται τα εξής: Οι τιμές της μέσης αριθμητικής τραχύτητας  $R_a$  αυξάνονται με την αύξηση της έντασης του παλμού  $I_e$ . Και στις τρεις γραφικές παραστάσεις έχουμε τις τρεις καμπύλες της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  οι οποίες έχουν την ίδια συμπεριφορά και για τα τρία υλικά. Έτσι η καμπύλη με  $t_e = 500 \text{ msec}$  βρίσκεται πιο πάνω από αυτή με  $t_e = 300 \text{ msec}$  και αυτή με τη σειρά της πιο πάνω από την  $t_e = 100 \text{ msec}$ .

Παρόμοιες παρατηρήσεις ισχύουν και για τις Γραφικές παραστάσεις 4.38, 4.40 και 4.42: Οι τιμές της μέσης αριθμητικής τραχύτητας  $R_a$  αυξάνονται με την αύξηση της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$ . Επίσης οι τέσσερις καμπύλες της έντασης του παλμού  $I_e$ , και στις τρεις γραφικές παραστάσεις έχουν την ίδια συμπεριφορά. Έτσι η καμπύλη με  $I_e = 30 \text{ A}$  βρίσκεται πιο πάνω από αυτή με  $I_e = 20 \text{ A}$ , η οποία βρίσκεται πιο πάνω από την καμπύλη με  $I_e = 10 \text{ A}$  και αυτή με τη σειρά της πιο πάνω από την  $I_e = 5 \text{ A}$ .

Για τα προφίλ τραχύτητας, Σχήματα 4.1 έως 4.36 σε συνδυασμό με τις τιμές των Πινάκων 4.2, 4.3 και 4.4 επισημειώνονται τα ακόλουθα:

---

Σε κάθε προφίλ υπάρχουν κορυφές και κοιλάδες οι οποίες όμως δεν ακολουθούν μια “πορεία”. Δεν υπάρχουν δηλαδή συγκεκριμένες αποστάσεις ανάμεσα σε διαδοχικές κορυφές ή κοιλάδες. Υπάρχει συνήθως σε κάθε προφίλ τραχύτητας μια κορυφή και μια κοιλάδα, η απόσταση της οποίας ξεχωρίζει από την κεντρική γραμμή αρκετά (μέγιστη).

Η στατιστική παράμετρος της λοξότητας  $R_{sk}$  κατά τα γνωστά περιγράφει πόσο ‘άδεια’ ή ‘γεμάτη’ από υλικό είναι μια επιφάνεια, μπορεί να μας δώσει κάποια στοιχεία. Στη περίπτωση των παραπάνω τραχυμετρήσεων η τιμή της λοξότητας συνήθως είναι θετική ( $>0$ ), αυτό μας δείχνει ότι το προφίλ στις περισσότερες περιπτώσεις των επιφανειών μας είναι ‘άδειο’ από υλικό.

Η στατιστική παράμετρος της κυρτότητας  $R_{ku}$  κατά τα γνωστά περιγράφει το πόσο αιχμηρές είναι οι κορυφές και οι κοιλάδες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που παίρνουμε από το τραχύμετρο είναι γύρω στο 3, συμπεραίνουμε έτσι ότι δεν έχουμε ούτε πλατύκυρτες (κυρτότητα  $< 3$ ), αλλά ούτε και λεπτόκυρτες (κυρτότητα  $> 3$ ) κορυφές ή κοιλάδες.

Επισημαίνεται ότι οι κατεργασμένες επιφάνειες που προκύπτουν από τη μέθοδο της Η/Δς, είναι ισότροπες, έχουν δηλαδή τις ίδιες τοπογραφικές ιδιότητες ανεξαρτήτως διεύθυνσης. Συνεπώς, στα δοκίμια που τραχυμετρήθηκαν, δεν έπαιξε ρόλο η διεύθυνση στην οποία έγιναν οι τραχυμετρήσεις.

---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup> : Στατιστική ανάλυση.

---

### 5.1 Γενικά περί μοντελοποίησης.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια προσπάθεια μοντελοποίησης των πειραματικών αποτελεσμάτων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 4, βάσει της ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης. Η ανάλυση παλινδρόμησης αναλύθηκε λεπτομερώς στην παράγραφο 3.4.1. Τα αποτελέσματα τόσο της ανάλυσης μεταβλητότητας (ANOVA) όσο και της ανάλυσης παλινδρόμησης θα γίνουν με το στατιστικό πακέτο Minitab 14 το οποίο αναλύθηκε στην παράγραφο 3.4.2. Με την ανάλυση παλινδρόμησης ο βασικός στόχος είναι να διαμορφωθούν μοντέλα που χρησιμοποιούνται για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή πρόβλεψη των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών  $Y_i$ , με βάση τις εξαρτημένες μεταβλητές  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Στην περίπτωση μας ως ανεξάρτητες μεταβλητές θα χρησιμοποιηθούν οι παράμετροι της τραχύτητας των τριών υλικών που έχουμε μετρήσει, αυτές είναι οι  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{zDIN}, R_{pm}, R_y, R_{sm}$ . Ενώ ως εξαρτημένες μεταβλητές θα έχουμε τις συνθήκες κατεργασίας οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη μηχανή Η/Δς για να πάρουμε τα δοκίμια. Αυτές είναι η ένταση παλμού  $I_e$  και η χρονική διάρκεια εκκένωσης  $t_e$ .

Τα σημαντικότερα βήματα για τη διαμόρφωση ενός τέτοιου μοντέλου είναι τα εξής :

- Διαμορφώνουμε ένα μοντέλο χρησιμοποιώντας τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Κατασκευάζουμε έτσι το εκτιμώμενο μοντέλο.
- Χρησιμοποιούμε τον έλεγχο ανάλυση μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) για να προσδιορίσουμε το αν και το πόσο καλά το μοντέλο εξηγεί τα δεδομένα.
- Βρίσκουμε ποιό όροι είναι μη στατιστικά σημαντικοί. Οι όροι αυτοί δεν παίζουν κανέναν ουσιαστικό ρόλο στο μοντέλο, για το λόγο αυτό μπορούμε ακόμα και να τους διαγράψουμε.
- Αν χρειαστεί να συγκρίνουμε τα μοντέλα, χρησιμοποιούμε το  $R-Sq(adj)$ . Αυτός ο συντελεστής μας βοηθάει να συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα των μοντέλων.
- Χρησιμοποιούμε επίσης τα διαγράμματα των καταλοίπων ή υπολοίπων (residuals plots) για να ελέγξουμε το αν ισχύουν ή όχι οι υποθέσεις του μοντέλου.

Τα μοντέλα που θα χρησιμοποιηθούν είναι τέσσερα. Σκοπός είναι να δούμε πόσο σημαντικό είναι το κάθε μοντέλο, πόσο δηλαδή το κάθε μοντέλο είναι σε θέση να προβλέπει τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών. Επίσης κάτι άλλο που μας ενδιαφέρει είναι το ποιο μοντέλο είναι το καλύτερο για την κάθε παράμετρο του κάθε υλικού.

Τέλος είναι πολύ σημαντικό, εφόσον ξέρουμε την αντίδραση της κάθε παραμέτρου με την ενέργεια, δηλαδή εφόσον γνωρίζουμε ποιες παράμετροι αντιδρούν



με τη μεταβολή της ενέργειας και αυτό ισχύει και για τα τρία υλικά (έχουν την ίδια αντίδραση), αν υπάρχει κάποια σχέση των παραμέτρων με τον πίνακα μεταβλητότητας (ANOVA) και τη μοντελοποίηση. Δηλαδή αν όλες οι παράμετροι μπορούν να μοντελοποιηθούν, δίνοντάς μας μοντέλα που προβλέπουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Εκείνο που θα περιμέναμε είναι οι παράμετροι που δεν αντιδρούν με τη μεταβολή της ενέργειας, δηλαδή δεν ακολουθούν αυξητική πορεία καθώς η ενέργεια αυξάνεται, να μην δίνουν μοντέλα που ευσταθούν. Αυτό θα ισχύει και για τα τρία υλικά, τα αποτελέσματα των οποίων θα έπρεπε να είναι παρόμοια εφόσον η αντίδραση των παραμέτρων με τη μεταβολή της ενέργειας είναι ίδια.

Έτσι τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται (τα οποία έχουν αναλυθεί στη παράγραφο 3.4.1.4) είναι τα εξής :

- Το πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + E$$

- Το πρότυπο αλληλεπίδρασης

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + E$$

- Το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \beta_4 x_1^2 + \beta_5 x_2^2 + E$$

- Το λογαριθμικό πρότυπο

$$Y = C x_1^\alpha x_2^\gamma + E \Rightarrow \ln Y = \ln C + \alpha \ln x_1 + \beta \ln x_2 + E$$

Όπου  $Y$  οι ανεξάρτητες μεταβλητές  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{zDIN}, R_{pm}, R_y, R_{sm}, x_1$  και  $x_2$  οι εξαρτημένες μεταβλητές  $I_e$  και  $t_e, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, C, \alpha, \gamma$  παράμετροι των οποίων η εκτίμηση γίνεται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Η εκτίμηση των παραμέτρων αυτών γίνεται μέσω του στατιστικού πακέτου Minitab 14.  $E$  είναι το σφάλμα της παλινδρόμησης το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ότι 'περιέχει' όλους τους άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή των ανεξάρτητων μεταβλητών  $Y$  και δεν υπάρχουν στο μοντέλο. Έτσι θεωρούμε το  $E$  ίσο με μηδέν.

Μια παρατήρηση, για το λογαριθμικό πρότυπο, είναι ότι το στατιστικό πακέτο Minitab 14 δεν μας δίνει απευθείας το λογαριθμικό μοντέλο στη μορφή  $Y = C x_1^\alpha x_2^\gamma + E$ , αλλά λογαριθμίζοντας τη σχέση αυτή παίρνουμε το μοντέλο στη μορφή  $\ln Y = \ln C + \alpha \ln x_1 + \beta \ln x_2 + E$ . Αντίστροφα τώρα, εφόσον έχουμε το μοντέλο στη μορφή  $\ln Y = \ln C + \alpha \ln x_1 + \beta \ln x_2 + E$ , υψώνοντάς το στην  $e$  παίρνουμε το λογαριθμικό μοντέλο,  $Y = C x_1^\alpha x_2^\gamma + E$ , που μας ενδιαφέρει.

## 5.2 Στατιστικά αποτελέσματα.

Εδώ θα παρουσιαστούν αναλυτικά, και για τα τρία υλικά και για τα τέσσερα μοντέλα, και θα σχολιαστούν τα στατιστικά αποτελέσματα (πίνακες ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης) που πήραμε από το στατιστικό πακέτο Minitab 14. Οι πίνακες ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης, όπως τους παίρνουμε από το Minitab 14 παρουσιάζονται στα Παραρτήματα 4 έως 15. Στα Παραρτήματα 4 έως 7 παρουσιάζονται οι πίνακες για τα τέσσερα μοντέλα, για το πολυωνυμικό πρότυπο



πρώτου βαθμού, πρότυπο αλληλεπίδρασης, πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού και λογαριθμικό του χάλυβα SVERKER 21. Στα Παραρτήματα 8 έως 11 έχουμε τους αντίστοιχους πίνακες για το χάλυβα IMPAX. Και τέλος στα Παραρτήματα 12 έως 15 για το χάλυβα ORVAR.

Πρώτα απ' όλα έχει ενδιαφέρον να δούμε κατά πόσο το κάθε μοντέλο εξηγεί τα δεδομένα. Για να το δούμε αυτό θα χρησιμοποιήσουμε το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , (R-Sq). Όσο λοιπόν μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του συντελεστή προσδιορισμού, όσο δηλαδή αυτός τείνει στη μονάδα, τόσο καλύτερα το μοντέλο εξηγεί τα δεδομένα. Ο Πίνακας 5.1 μας δίνει συνοπτικά όλους τους συντελεστές προσδιορισμού όλων των μοντέλων για το χάλυβα SVERKER 21, ο Πίνακας 5.2 για το χάλυβα IMPAX και ο Πίνακας 5.3 για το χάλυβα ORVAR. Όλες οι έννοιες των πινάκων που παίρνουμε από το Minitab 14 καθώς και η σημασία τους αναλύθηκαν στην παράγραφο 3.4.2.3.

(R-Sq)	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	πρότυπο αλληλεπίδρασης	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	λογαριθμικό πρότυπο
$R_a$	0,9365	0,9427	0,9691	0,9525
$R_p$	0,9325	0,9338	0,9487	0,9574
$R_q$	0,9489	0,9537	0,9730	0,9560
$R_v$	0,9131	0,9522	0,9752	0,9692
$R_t$	0,9442	0,9474	0,9659	0,9543
$R_s$	0,8181	0,8270	0,8333	0,8248
$R_{sk}$	0,5190	0,5963	0,7297	0,6412
$R_{ku}$	0,4970	0,50,63	0,6328	0,5672
$R_{zDIN}$	0,9357	0,9390	0,9579	0,9403
$R_y$	0,9456	0,9500	0,9702	0,9753
$R_{sm}$	0,7676	0,7731	0,7898	0,7424
$R_{pm}$	0,9176	0,9187	0,9301	0,9299

**Πίνακας 5.1:** Συντελεστές προσδιορισμού (R-Sq) για τα τέσσερα πρότυπα του χάλυβα SVERKER 21.

(R-Sq)	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	πρότυπο αλληλεπίδρασης	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	λογαριθμικό πρότυπο
$R_a$	0,9232	0,9352	0,9525	0,9585
$R_p$	0,9250	0,9355	0,9409	0,9610
$R_q$	0,9100	0,9116	0,9422	0,9575
$R_v$	0,9017	0,9064	0,9131	0,9177
$R_t$	0,9152	0,9054	0,9242	0,9231
$R_s$	0,7943	0,7269	0,7990	0,7724
$R_{sk}$	0,6105	0,6282	0,6487	0,6542
$R_{ku}$	0,4822	0,4959	0,4999	0,4717
$R_{zDIN}$	0,9248	0,9249	0,9471	0,9452
$R_y$	0,9364	0,9380	0,9460	0,9337
$R_{sm}$	0,7527	0,8309	0,8657	0,8346
$R_{pm}$	0,9153	0,9224	0,9349	0,9438

**Πίνακας 5.2:** Συντελεστές προσδιορισμού (R-Sq) για τα τέσσερα πρότυπα του χάλυβα IMPAX.

(R-Sq)	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	πρότυπο αλληλεπίδρασης	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	λογαριθμικό πρότυπο
$R_a$	0,9254	0,9535	0,9758	0,9735
$R_p$	0,9268	0,9582	0,9659	0,9667
$R_q$	0,9025	0,9270	0,9333	0,9218
$R_v$	0,9016	0,9220	0,9305	0,9270
$R_t$	0,9028	0,9155	0,9248	0,9143
$R_s$	0,8059	0,7965	0,7936	0,7928
$R_{sk}$	0,5942	0,6040	0,6312	0,6779
$R_{ku}$	0,5676	0,5422	0,5635	0,5714
$R_{ZDIN}$	0,9145	0,9511	0,9818	0,9644
$R_y$	0,9092	0,9832	0,9627	0,9658
$R_{sm}$	0,7597	0,7936	0,7755	0,7784
$R_{pm}$	0,9110	0,9583	0,9744	0,9713

**Πίνακας 5.3:** Συντελεστές προσδιορισμού (R-Sq) για τα τέσσερα πρότυπα του χάλυβα **ORVAR**.

Από τους παραπάνω πίνακες μπορούμε να κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις και να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα.

Υψηλό συντελεστή συσχέτισης έχουν οι παράμετροι  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{ZDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ . Ο συντελεστής συσχέτισης στις παραμέτρους αυτές είναι μεγαλύτερος του 0,9 ξεπερνάει δηλαδή το 90% , όποιο μοντέλο και να πάρουμε. Ο συντελεστής συσχέτισης για τις παραμέτρους  $R_s$  και  $R_{sm}$  είναι γύρω στο 0,8 δηλαδή στο 80% για όλα τα μοντέλα, ενώ δεν παρουσιάζουν καλή συσχέτιση οι παράμετροι  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ .

Τα μοντέλα που θα διαμορφωθούν θα μπορούν να προβλέψουν με καλή ακρίβεια τις παραμέτρους των τιμών  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{ZDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ . Με μικρότερη ακρίβεια τις παραμέτρους  $R_s$  και  $R_{sm}$ . Και δεν θα μπορούν να προβλέψουν τις παραμέτρους  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ .

Συγκρίνοντας τα μοντέλα μεταξύ τους διαπιστώνουμε ότι καλύτερους συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζουν τα πολυωνυμικά πρότυπα δευτέρου βαθμού, ακολουθούν τα λογαριθμικά πρότυπα και τα πρότυπα αλληλεπίδρασης και τέλος τους μικρότερους συντελεστές συσχέτισης παρουσιάζουν τα πολυωνυμικά πρότυπα πρώτου βαθμού χωρίς να έχουν μεγάλες διαφορές από τα υπόλοιπα.

Επιβεβαιώνονται τα πειραματικά αποτελέσματα του κεφαλαίου 4. Δηλαδή για τις παραμέτρους ύψους,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{ZDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ , υπήρχε μια σχέση μεταξύ μεταβολής της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης και των τιμών τους. Όσο αυξανόταν η ενέργεια τόσο αυξανόταν και οι τιμές αυτών των παραμέτρων και μάλιστα σχεδόν με γραμμικό ρυθμό. Για τις παραμέτρους ύψους  $R_s$  και  $R_{sm}$ , η αύξηση της ενέργειας είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών των παραμέτρων αυτών χωρίς όμως αυτό να ισχύει πάντα. Τέλος δεν συνέβαινε το ίδιο για τις στατιστικές παραμέτρους  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ . Οι τιμές που έπαιρναν ήταν ανεξάρτητες από τη μεταβολή της ενέργειας ηλεκτρικής εκκένωσης.

Στους πίνακες ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis), παρουσιάζονται οι στατιστικοί έλεγχοι P (P-values). Οι τιμές των στατιστικών αυτών ελέγχων μας βοηθάνε να δούμε ποιό όροι είναι στατιστικά σημαντικοί. Συγκρίνουμε την τιμή P του κάθε όρου με το 0.05. Αν η τιμή P είναι μικρότερη του 0.05, τότε ο όρος είναι στατιστικά σημαντικός και παίζει ρόλο η ύπαρξή του στο μοντέλο. Αν είναι

---

μεγαλύτερος του 0.05, τότε ακόμα και αν τον παραλείψουμε δεν θα έχουμε αλλαγές στα αποτελέσματα του μοντέλου.

Παρατηρώντας τα *Παραρτήματα 4 έως 15*, διαπιστώνουμε ότι τιμές των  $P$  μεγαλύτερες του 0.05 έχουμε κυρίως σε όρους αλληλεπίδρασης των μοντέλων του προτύπου αλληλεπίδρασης και του πολυωνυμικού προτύπου δεύτερου βαθμού, αλλά και σε όρους των παραμέτρων  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  για όλα τα μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι, αφενός στην πρώτη περίπτωση κάποιοι όροι αλληλεπιδράσεων είναι περιττοί, αφετέρου στη δεύτερη περίπτωση είναι λογικό να συμβαίνει αυτό δεδομένου ότι οι παράμετροι αυτές έχουν μικρό συντελεστή συσχέτισης.

Στους πίνακες ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis) παρουσιάζονται επίσης και οι τιμές των ελεγχουσυναρτήσεων  $T$ . Η απόλυτη τιμή των ελεγχουσυναρτήσεων  $T$  μας δείχνει το πόσο στατιστικά σημαντικός είναι ένας όρος. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόλυτη τιμή  $T$ , τόσο πιο σημαντικό ρόλο παίζει ένας όρος στο μοντέλο. Αν ξέρουμε λοιπόν την τιμή  $T$ , τότε μπορούμε να συγκρίνουμε όλους τους όρους του μοντέλου και να τους κατατάξουμε με τη σειρά σημαντικότητάς τους. Αν παρατηρήσουμε τα *Παραρτήματα 4 έως 15*, θα διαπιστώσουμε ότι είναι λίγο δύσκολο να πούμε με βεβαιότητα ποιος όρος είναι πιο σημαντικός στο κάθε μοντέλο. Για το πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού, η ένταση παλμού  $I_e$  μπορούμε να πούμε ότι παίρνει σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τιμές μεγαλύτερες από τη χρονική διάρκεια εκκένωσης  $t_e$  και άρα παίζει μεγαλύτερο ρόλο στα μοντέλα. Το ίδιο ισχύει και για το λογαριθμικό πρότυπο. Για τα άλλα δύο πρότυπα, το πρότυπο αλληλεπίδρασης και το πολυωνυμικό πρότυπο δεύτερου βαθμού, πολλές φορές παίζουν ρόλο και οι αλληλεπιδράσεις  $I_e I_e$ ,  $t_e I_e$ ,  $I_e t_e$ . Για το πρότυπο αλληλεπίδρασης, η αλληλεπίδραση  $I_e t_e$  παίρνει μεγάλη τιμή σε αρκετές περιπτώσεις, ενώ για το πολυωνυμικό πρότυπο δεύτερου βαθμού, δεν μπορούμε να πούμε με σιγουριά ποιά αλληλεπίδραση παίζει το σημαντικότερο ρόλο, γιατί σε κάθε παράμετρο που εξετάζουμε παίζουν ρόλο και διαφορετικές αλληλεπιδράσεις.

Ένας άλλος τρόπος για να εκτιμήσουμε αν ένας όρος επηρεάζει την τιμή της παραμέτρου που θα πάρουμε από το μοντέλο, είναι η στήλη των στατιστικών  $F$  που βρίσκεται στον πίνακα της ανάλυσης μεταβλητότητας (analysis of variance (ANOVA)). Η στήλη των στατιστικών  $F$  αναλύθηκε στην παράγραφο 3.4.2.3. Είναι ουσιαστικά μια σύγκριση του αποτελέσματος της στήλης  $F$  με τις τιμές που παίρνουμε από τον πίνακα της κατανομής  $F$ . Όσο μεγαλύτερες είναι οι τιμές  $F$  που παίρνουμε από τον πίνακα ανάλυσης μεταβλητότητας (analysis of variance (ANOVA)), τόσο πιο σίγουροι είμαστε ότι η υπόθεση δεν απορρίπτεται, πράγμα που σημαίνει ότι οι όροι επηρεάζουν τις παραμέτρους του μοντέλου.

### 5.3 Μοντελοποίηση αποτελεσμάτων.

Από τους πίνακες ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis) των *Παραρτημάτων 4 έως 15* παίρνουμε τους συντελεστές των μεταβλητών (coefficients – (Coef)) για κάθε μοντέλο κάθε παραμέτρου του κάθε υλικού. Εδώ θα παρουσιαστούν τα μοντέλα αυτά.

### 5.3.1 Μοντέλα συσχέτισης για το χάλυβα SVERKER 21.

Μοντέλα του πολυωνυμικού προτύπου πρώτου βαθμού :

$$\begin{aligned}R_a &= 0,818 + 0,258 I_e + 0,0129 t_e \\R_p &= 3,03 + 0,973 I_e + 0,0354 t_e \\R_q &= 1,11 + 0,328 I_e + 0,0152 t_e \\R_v &= 6,14 + 0,645 I_e + 0,0315 t_e \\R_t &= 8,94 + 1,62 I_e + 0,0680 t_e \\R_s &= 63,5 + 1,57 I_e + 0,0469 t_e \\R_{sk} &= -0,328 + 0,0230 I_e + 0,000224 t_e \\R_{ku} &= 3,23 + 0,00623 I_e - 0,00128 t_e \\R_{ZDIN} &= 8,59 + 1,11 I_e + 0,0496 t_e \\R_y &= 7,99 + 1,55 I_e + 0,0661 t_e \\R_{sm} &= 159 + 2,95 I_e + 0,169 t_e \\R_{pm} &= 3,35 + 0,659 I_e + 0,0251 t_e\end{aligned}$$

Μοντέλα του προτύπου αλληλεπίδρασης :

$$\begin{aligned}R_a &= 2,16 + 0,175 I_e + 0,00843 t_e + 0,000275 I_e t_e \\R_p &= 1,74 + 1,05 I_e + 0,0397 t_e - 0,000263 I_e t_e \\R_q &= 2,68 + 0,231 I_e + 0,00997 t_e + 0,000323 I_e t_e \\R_v &= 10,6 + 0,371 I_e + 0,0167 t_e + 0,000910 I_e t_e \\R_t &= 12,4 + 1,41 I_e + 0,0564 t_e + 0,00071 I_e t_e \\R_s &= 93,1 - 0,251 I_e - 0,0519 t_e + 0,00608 I_e t_e \\R_{sk} &= -0,734 + 0,0480 I_e + 0,00158 t_e - 0,000083 I_e t_e \\R_{ku} &= 2,87 + 0,0281 I_e - 0,00010 t_e - 0,000073 I_e t_e \\R_{ZDIN} &= 11,1 + 0,956 I_e + 0,0414 t_e + 0,000509 I_e t_e \\R_y &= 11,9 + 1,31 I_e + 0,0530 t_e + 0,000806 I_e t_e \\R_{sm} &= 146 + 3,70 I_e + 0,210 t_e - 0,00250 I_e t_e \\R_{pm} &= 2,53 + 0,710 I_e + 0,0279 t_e - 0,000168 I_e t_e\end{aligned}$$

Μοντέλα του πολυωνυμικού προτύπου δευτέρου βαθμού :

$$\begin{aligned}R_a &= -0,79 + 0,479 I_e + 0,0187 t_e - 0,00864 I_e I_e - 0,000017 t_e t_e + 0,000275 I_e t_e \\R_p &= -4,78 + 1,51 I_e + 0,0751 t_e - 0,0129 I_e I_e - 0,000059 t_e t_e - 0,000263 I_e t_e \\R_q &= -0,65 + 0,539 I_e + 0,0237 t_e - 0,00875 I_e I_e - 0,000023 t_e t_e + 0,000323 I_e t_e \\R_v &= 4,86 + 0,684 I_e + 0,0527 t_e - 0,00889 I_e I_e - 0,000060 t_e t_e + 0,000910 I_e t_e \\R_t &= -0,17 + 2,30 I_e + 0,124 t_e - 0,0254 I_e I_e - 0,000112 t_e t_e + 0,000710 I_e t_e \\R_s &= 87,1 - 0,19 I_e + 0,002 t_e - 0,0017 I_e I_e - 0,000090 t_e t_e + 0,00608 I_e t_e \\R_{sk} &= -0,557 + 0,05 I_e - 0,00022 t_e - 0,00006 I_e I_e + 0,000003 t_e t_e - 0,000083 I_e t_e \\R_{ku} &= 3,23 - 0,0380 I_e + 0,00034 t_e + 0,00188 I_e I_e - 0,000001 t_e t_e - 0,000073 I_e t_e \\R_{ZDIN} &= 2,16 + 1,76 I_e + 0,0792 t_e - 0,0229 I_e I_e - 0,000063 t_e t_e + 0,000509 I_e t_e \\R_y &= -0,42 + 2,07 I_e + 0,125 t_e - 0,0219 I_e I_e - 0,000121 t_e t_e + 0,000806 I_e t_e \\R_{sm} &= 63,6 + 13,6 I_e + 0,420 t_e - 0,281 I_e I_e - 0,000351 t_e t_e - 0,00250 I_e t_e \\R_{pm} &= -1,32 + 1,10 I_e + 0,0420 t_e - 0,0110 I_e I_e - 0,000024 t_e t_e - 0,000168 I_e t_e\end{aligned}$$

---

Μοντέλα του λογαριθμικού προτύπου :

$$R_a = 0,29523 I_e^{0,445} t_e^{0,394}$$

$$R_p = 0,915761 I_e^{0,518} t_e^{0,370}$$

$$R_q = 0,395344 I_e^{0,453} t_e^{0,378}$$

$$R_v = 1,616074 I_e^{0,361} t_e^{0,326}$$

$$R_t = 2,466993 I_e^{0,442} t_e^{0,346}$$

$$R_s = 34,46692 I_e^{0,201} t_e^{0,101}$$

$$R_{sk} = 0,932394 I_e^{0,452} t_e^{-0,486}$$

$$R_{ku} = 4,854956 I_e^{0,0159} t_e^{-0,0990}$$

$$R_{zDIN} = 2,241174 I_e^{0,404} t_e^{0,330}$$

$$R_y = 2,250157 I_e^{0,440} t_e^{0,354}$$

$$R_{sm} = 57,97431 I_e^{0,195} t_e^{0,175}$$

$$R_{pm} = 0,892258 I_e^{0,472} t_e^{0,343}$$

### 5.3.2 Μοντέλα συσχέτισης για το χάλυβα IMPAX.

Μοντέλα του πολυωνυμικού προτύπου πρώτου βαθμού :

$$R_a = 0,99 + 0,277 I_e + 0,0129 t_e$$

$$R_p = 4,55 + 0,966 I_e + 0,0434 t_e$$

$$R_q = 1,41 + 0,347 I_e + 0,0155 t_e$$

$$R_v = 7,83 + 0,671 I_e + 0,0322 t_e$$

$$R_t = 12,9 + 1,62 I_e + 0,0756 t_e$$

$$R_s = 44,9 + 1,12 I_e + 0,0546 t_e$$

$$R_{sk} = -0,156 + 0,0134 I_e + 0,000580 t_e$$

$$R_{ku} = 3,44 - 0,00005 I_e - 0,00105 t_e$$

$$R_{zDIN} = 10,5 + 1,15 I_e + 0,0534 t_e$$

$$R_y = 11,8 + 1,58 I_e + 0,0706 t_e$$

$$R_{sm} = 103 + 4,58 I_e + 0,181 t_e$$

$$R_{pm} = 5,39 + 0,667 I_e + 0,0274 t_e$$

Μοντέλα του προτύπου αλληλεπίδρασης :

$$R_a = 1,50 + 0,246 I_e + 0,0112 t_e + 0,000103 I_e t_e$$

$$R_p = 3,71 + 1,02 I_e + 0,0462 t_e - 0,000173 I_e t_e$$

$$R_q = 1,95 + 0,314 I_e + 0,0137 t_e + 0,000111 I_e t_e$$

$$R_v = 9,85 + 0,547 I_e + 0,0255 t_e + 0,00041 I_e t_e$$

$$R_t = 13,9 + 1,55 I_e + 0,0721 t_e + 0,00022 I_e t_e$$

$$R_s = 73,9 - 0,67 I_e - 0,0420 t_e + 0,00594 I_e t_e$$

$$R_{sk} = -0,441 + 0,0309 I_e + 0,00153 t_e - 0,000058 I_e t_e$$

$$R_{ku} = 3,49 - 0,0034 I_e - 0,00123 t_e + 0,000011 I_e t_e$$

$$R_{zDIN} = 10,1 + 1,18 I_e + 0,0548 t_e - 0,00009 I_e t_e$$

$$R_y = 14,3 + 1,42 I_e + 0,0624 t_e + 0,00051 I_e t_e$$

$$R_{sm} = 156 + 1,31 I_e + 0,004 t_e + 0,0109 I_e t_e$$

$$R_{pm} = 3,23 + 0,800 I_e + 0,0347 t_e - 0,000444 I_e t_e$$

---

Μοντέλα του πολωννμικού προτύπου δευτέρου βαθμού :

$$\begin{aligned}R_a &= -2,17 + 0,575 I_e + 0,0268 t_e - 0,00936 I_e I_e - 0,000026 t_e t_e + 0,000103 I_e t_e \\R_p &= -0,38 + 1,43 I_e + 0,0612 t_e - 0,0116 I_e I_e - 0,000025 t_e t_e - 0,000173 I_e t_e \\R_q &= -2,21 + 0,698 I_e + 0,0308 t_e - 0,0109 I_e I_e - 0,000028 t_e t_e + 0,000111 I_e t_e \\R_v &= 2,0 + 1,65 I_e + 0,0359 t_e - 0,0314 I_e I_e - 0,000017 t_e t_e + 0,00041 I_e t_e \\R_t &= 1,6 + 3,00 I_e + 0,105 t_e - 0,0410 I_e I_e - 0,000055 t_e t_e + 0,00022 I_e t_e \\R_s &= 85,8 - 2,95 I_e - 0,022 t_e + 0,0650 I_e I_e - 0,000033 t_e t_e + 0,00594 I_e t_e \\R_{sk} &= -0,428 + 0,0280 I_e + 0,00157 t_e + 0,00008 I_e I_e - 0,000 t_e t_e - 0,000058 I_e t_e \\R_{ku} &= 4,36 - 0,0700 I_e - 0,00555 t_e + 0,00189 I_e I_e + 0,000007 t_e t_e + 0,000011 I_e t_e \\R_{zDIN} &= -4,0 + 2,60 I_e + 0,106 t_e - 0,0404 I_e I_e - 0,000085 t_e t_e - 0,00009 I_e t_e \\R_y &= 3,5 + 2,84 I_e + 0,0826 t_e - 0,0402 I_e I_e - 0,000034 t_e t_e + 0,00051 I_e t_e \\R_{sm} &= 106 + 3,97 I_e + 0,332 t_e - 0,076 I_e I_e - 0,000546 t_e t_e + 0,0109 I_e t_e \\R_{pm} &= -3,64 + 1,48 I_e + 0,0605 t_e - 0,0192 I_e I_e - 0,000043 t_e t_e - 0,000444 I_e t_e\end{aligned}$$

Μοντέλα του λογαριθμικού προτύπου :

$$\begin{aligned}R_a &= 0,310367 I_e^{0,470} t_e^{0,383} \\R_p &= 1,400739 I_e^{0,446} t_e^{0,352} \\R_q &= 0,4299871 I_e^{0,468} t_e^{0,366} \\R_v &= 2,064731 I_e^{0,364} t_e^{0,295} \\R_t &= 3,525421 I_e^{0,399} t_e^{0,323} \\R_s &= 22,19795 I_e^{0,173} t_e^{0,142} \\R_{sk} &= 0,006943 I_e^{0,517} t_e^{0,410} \\R_{ku} &= 5,312168 I_e^{-0,0112} t_e^{-0,0912} \\R_{zDIN} &= 2,588297 I_e^{0,400} t_e^{0,321} \\R_y &= 3,455613 I_e^{0,412} t_e^{0,310} \\R_{sm} &= 38,47467 I_e^{0,287} t_e^{0,186} \\R_{pm} &= 1,30604 I_e^{0,438} t_e^{0,314}\end{aligned}$$

### 5.3.3 Μοντέλα συσχέτισης για το χάλυβα ORVAR.

Μοντέλα του πολωννμικού προτύπου πρώτου βαθμού :

$$\begin{aligned}R_a &= 2,24 + 0,221 I_e + 0,0113 t_e \\R_p &= 8,83 + 0,934 I_e + 0,0247 t_p \\R_q &= 3,99 + 0,237 I_e + 0,0133 t_e \\R_v &= 12,8 + 0,716 I_e + 0,0137 t_e \\R_t &= 3,6 + 1,67 I_e + 0,0926 t_e \\R_s &= 85,8 + 0,173 I_e + 0,106 t_e \\R_{sk} &= 0,164 + 0,0159 I_e - 0,000657 t_e \\R_{ku} &= 2,98 + 0,0218 I_e - 0,00131 t_e \\R_{zDIN} &= 15,2 + 1,04 I_e + 0,0368 t_e \\R_y &= 14,4 + 1,55 I_e + 0,0551 t_e \\R_{sm} &= 130 + 5,29 I_e + 0,143 t_e \\R_{pm} &= 8,24 + 0,615 I_e + 0,0157 t_e\end{aligned}$$

---

Μοντέλα του προτύπου αλληλεπίδρασης :

$$R_a = 4,66 + 0,0717 I_e + 0,00321 t_e + 0,000497 I_e t_e$$

$$R_p = 18,8 + 0,323 I_e - 0,00840 t_e + 0,00204 I_e t_e$$

$$R_q = 7,03 + 0,050 I_e + 0,00320 t_e + 0,000624 I_e t_e$$

$$R_v = 19,3 + 0,316 I_e - 0,0080 t_e + 0,00133 I_e t_e$$

$$R_t = 32,4 - 0,106 I_e - 0,0034 t_e + 0,00591 I_e t_e$$

$$R_s = 108 - 1,19 I_e + 0,0319 t_e + 0,00456 I_e t_e$$

$$R_{sk} = 0,103 + 0,0197 I_e - 0,000454 t_e - 0,000013 I_e t_e$$

$$R_{ku} = 3,05 + 0,0170 I_e - 0,00157 t_e + 0,000016 I_e t_e$$

$$R_{ZDIN} = 26,6 + 0,332 I_e - 0,0013 t_e + 0,00235 I_e t_e$$

$$R_y = 31,9 + 0,467 I_e - 0,0035 t_e + 0,00360 I_e t_e$$

$$R_{sm} = 236 - 1,24 I_e - 0,211 t_e + 0,0218 I_e t_e$$

$$R_{pm} = 13,7 + 0,276 I_e - 0,00260 t_e + 0,00113 I_e t_e$$

Μοντέλα του πολυωνυμικού προτύπου δευτέρου βαθμού :

$$R_a = 2,13 + 0,273 I_e + 0,0155 t_e - 0,00573 I_e I_e - 0,000021 t_e t_e + 0,000497 I_e t_e$$

$$R_p = 14,8 + 0,481 I_e + 0,0197 t_e - 0,0045 I_e I_e - 0,000047 t_e t_e + 0,00204 I_e t_e$$

$$R_q = 3,82 + 0,031 I_e + 0,0347 t_e + 0,00053 I_e I_e - 0,000052 t_e t_e + 0,000624 I_e t_e$$

$$R_v = 8,9 + 2,51 I_e - 0,0362 t_e - 0,0624 I_e I_e + 0,000047 t_e t_e + 0,00133 I_e t_e$$

$$R_t = 20,3 + 0,87 I_e + 0,054 t_e - 0,0278 I_e I_e - 0,000096 t_e t_e + 0,00591 I_e t_e$$

$$R_s = 110 - 4,02 I_e + 0,180 t_e + 0,0804 I_e I_e - 0,000248 t_e t_e + 0,00456 I_e t_e$$

$$R_{sk} = 0,248 + 0,0123 I_e - 0,00139 t_e + 0,00021 I_e I_e + 0,000002 t_e t_e - 0,000013 I_e t_e$$

$$R_{ku} = 3,45 - 0,0124 I_e - 0,00366 t_e + 0,00084 I_e I_e + 0,000003 t_e t_e + 0,000016 I_e t_e$$

$$R_{ZDIN} = 16,6 + 0,923 I_e + 0,0591 t_e - 0,0168 I_e I_e - 0,000101 t_e t_e + 0,00235 I_e t_e$$

$$R_y = 24,2 + 0,810 I_e + 0,0498 t_e - 0,00975 I_e I_e - 0,000089 t_e t_e + 0,00360 I_e t_e$$

$$R_{sm} = 24 + 19,4 I_e + 0,604 t_e - 0,587 I_e I_e - 0,00136 t_e t_e + 0,0218 I_e t_e$$

$$R_{pm} = 9,67 + 0,573 I_e + 0,0188 t_e - 0,00845 I_e I_e - 0,000036 t_e t_e + 0,00113 I_e t_e$$

Μοντέλα του λογαριθμικού προτύπου :

$$R_a = 0,247833 I_e^{0,336} t_e^{0,309}$$

$$R_p = 3,857426 I_e^{0,410} t_e^{0,180}$$

$$R_q = 1,044982 I_e^{0,268} t_e^{0,307}$$

$$R_v = 4,66459 I_e^{0,384} t_e^{0,138}$$

$$R_t = 2,531976 I_e^{0,357} t_e^{0,386}$$

$$R_s = 33,44827 I_e^{0,0019} t_e^{0,230}$$

$$R_{sk} = 0,360595 I_e^{1,11} t_e^{-0,656}$$

$$R_{ku} = 4,30596 I_e^{0,0918} t_e^{-0,113}$$

$$R_{ZDIN} = 5,528961 I_e^{0,333} t_e^{0,210}$$

$$R_y = 5,584528 I_e^{0,377} t_e^{0,233}$$

$$R_{sm} = 58,55696 I_e^{0,524} t_e^{0,003}$$

$$R_{pm} = 3,455613 I_e^{0,375} t_e^{0,160}$$

#### 5.4 Σύγκριση μοντέλων μέσω σφαλμάτων.

Εφόσον ξέρουμε τις τιμές που μπορεί να πάρει η ένταση παλμού  $I_e$  και η χρονική διάρκεια εκκένωσης  $t_e$  και έχουμε όλα τα μοντέλα του κάθε υλικού που πήραμε από το Minitab 14, μπορούμε να δώσουμε τους δυνατούς συνδυασμούς των τιμών στα μοντέλα, δηλαδή τους συνδυασμούς των  $I_e$  ( $I_e : 5, 10, 20, 30$  [A] ) και  $t_e$  ( $t_e = 100, 300, 500$  [msec] ) και να βρούμε τις αντίστοιχες τιμές των παραμέτρων  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{ZDIN}, R_{pm}, R_y, R_{sm}$ . Συγκρίνοντας τις τιμές αυτές με τις πειραματικές τιμές, δηλαδή αν βρούμε το απόλυτο σφάλμα, τότε θα μπορούμε να δούμε αν και πόσο τα μοντέλα που έχουν διαμορφωθεί προβλέπουν τις παραμέτρους. Μπορούμε να δούμε επίσης και ποιο μοντέλο θα έχει τα περισσότερα και τα λιγότερα σφάλματα. Ποιό δηλαδή θα είναι το 'καλύτερο'.

Ουσιαστικά αυτός είναι ένας ακόμη τρόπος, εκτός από το συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , (R-Sq), που παρουσιάστηκε στην παράγραφο 5.2, να δούμε κατά πόσο τα μοντέλα μας είναι σε θέση να προβλέψουν τις παραμέτρους. Ενδιαφέρον παρουσιάζει να δούμε αν οι δύο τρόποι μας δίνουν τα ίδια αποτελέσματα.

Πίνακες με τις τιμές που παίρνουν τα μοντέλα για κάθε παράμετρο κάθε υλικού, όταν δώσουμε τους κατάλληλους συνδυασμούς τιμών στα  $I_e$  και  $t_e$ , καθώς και τα απόλυτα σφάλματα αυτών, παρουσιάζονται στα *Παραρτήματα 16, 17 και 18*.

Παρατηρώντας λοιπόν τα παραρτήματα αυτά, μια πρώτη παρατήρηση είναι ότι και για τα τρία υλικά βγαίνουν τα ίδια συμπεράσματα. Αυτό είναι αναμενόμενο και είναι κάτι που το συναντήσαμε και στην περίπτωση του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , (R-Sq).

Συγκρίνοντας τα απόλυτα σφάλματα όλων των παραμέτρων, παρατηρούμε ότι για τις παραμέτρους ύψους  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_{ZDIN}, R_y, R_{pm}$ , τα σφάλματα είναι αρκετά μικρά και σχεδόν όλα κάτω από 10 %. Αυτό είναι άλλη μια απόδειξη ότι τα μοντέλα που έχουν διαμορφωθεί, μπορούν να προβλέψουν με αρκετά μεγάλη ακρίβεια τις παραμέτρους αυτές.

Για τις παραμέτρους μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$ , παρατηρούμε ότι και εκεί τα σφάλματα κυμαίνονται σε ικανοποιητικά επίπεδα. Υπάρχουν βέβαια αρκετά σφάλματα που η τιμή τους ξεπερνάει το 10 % όχι όμως κατά πολύ, όχι δηλαδή πάνω από 15%. Το συμπέρασμα είναι ότι τα μοντέλα αυτά, μπορούν να προβλέψουν τις παραμέτρους αυτές με μια καλή ακρίβεια, μικρότερη όμως σε σύγκριση με τα προηγούμενα μοντέλα.

Τέλος για τις στατιστικές παραμέτρους  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ , τα σφάλματα που παίρνουμε είναι αρκετά μεγάλα, πράγμα το οποίο μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να προβλέψουν τις δύο αυτές παραμέτρους.

Σχετικά με τη σύγκριση των μοντέλων μεταξύ τους προκύπτει ότι οι διαφορές των σφαλμάτων από μοντέλο σε μοντέλο δεν είναι μεγάλες. Εκείνο το οποίο συμπεραίνεται είναι ότι το πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού, έχει συγκριτικά με τα άλλα, τα μεγαλύτερα σφάλματα, ενώ το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού τα μικρότερα. Το λογαριθμικό πρότυπο και το πρότυπο αλληλεπίδρασης εμφανίζουν και αυτά αρκετά μικρά σφάλματα. Οι τιμές των σφαλμάτων των δύο αυτών μοντέλων, βρίσκονται πολύ κοντά.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η σύγκριση των μοντέλων μέσω σφαλμάτων είναι μια επιβεβαίωση όσων παρατηρήσεων έγιναν στην παράγραφο 5.2 με τη σύγκριση του συντελεστή προσδιορισμού  $R^2$ , (R-Sq). όλων των παραμέτρων των μοντέλων για κάθε υλικό.



---

Και εκεί τα μεγαλύτερα ποσοστά προσδιορισμού συγκέντρωναν οι παράμετροι ύψους  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ , λίγο μικρότερα ποσοστά οι παράμετροι μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$  και πολύ μικρά ποσοστά οι στατιστικές παράμετροι  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ . Αυτό ίσχυε για όλα τα υλικά, ενώ για τη σύγκριση μεταξύ μοντέλων οι παρατηρήσεις είναι ακριβώς οι ίδιες. Τα μεγαλύτερα ποσοστά του συντελεστή συσχέτισης, παρατηρήθηκαν στο πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού και τα μικρότερα στο πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού. Τα πρότυπα αλληλεπίδρασης και τα λογαριθμικά πρότυπα, βρισκόταν κάπου στη μέση. Οι διαφορές όμως από πρότυπο σε πρότυπο όπως και στην περίπτωση της σύγκρισης μοντέλων μέσω σφαλμάτων δεν ήταν μεγάλες.

## 5.5 Διαγράμματα υπολοίπων.

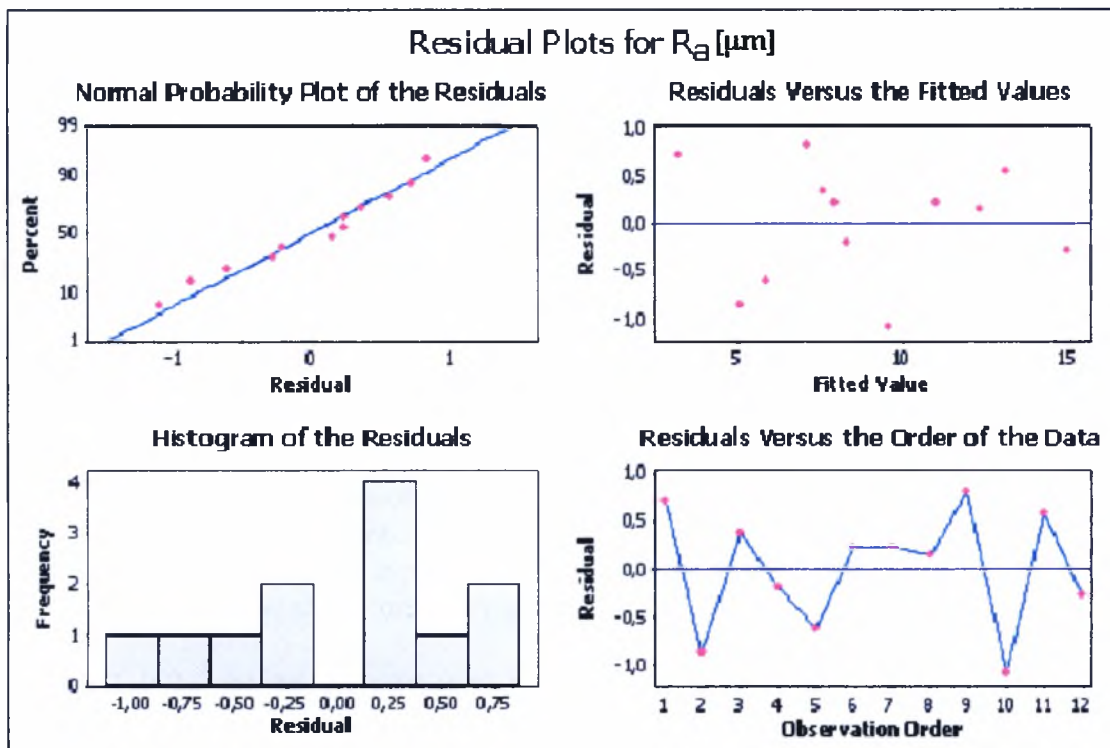
Ένας άλλος τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων αν το μοντέλο ικανοποιεί τις προϋποθέσεις εκείνες που μας επιτρέπουν τη χρήση του, είναι τα διαγράμματα υπολοίπων ή καταλοίπων. Τα διαγράμματα αυτά είναι τέσσερα, τα παίρνουμε και αυτά, όπως και τη στατιστική ανάλυση, από το Minitab 14. Τι είναι το καθένα αναλύθηκε στην παράγραφο 3.4.2.2.

Παρακάτω θα απεικονισθούν όλα τα διαγράμματα υπολοίπων για κάθε υλικό και για κάθε παράμετρο.

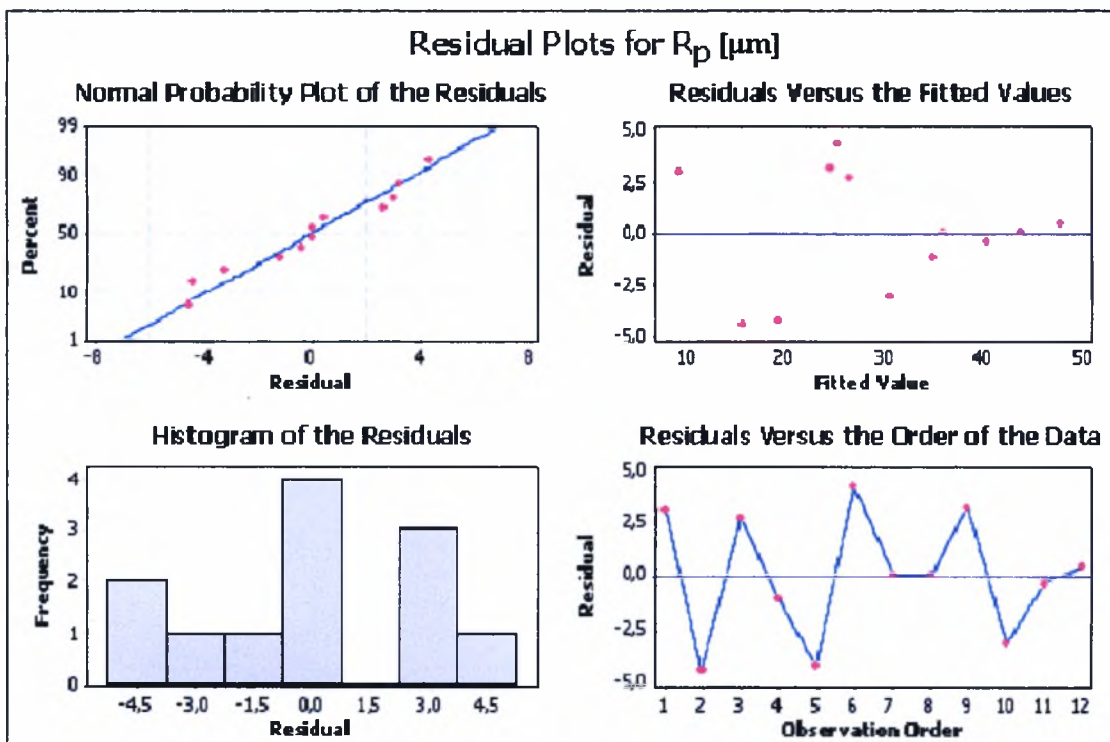
Το πρότυπο του οποίου τα διαγράμματα υπολοίπων παρουσιάζονται, είναι το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού. Επιλέχθηκε αυτό το πρότυπο μιας και οι δύο προηγούμενες παράγραφοι μας οδηγούν στο συμπέρασμα πως υπερέχει από τα άλλα. Βέβαια οι διαφορές των διαγραμμάτων υπολοίπων του προτύπου αυτού δεν είναι μεγάλες από αυτά των άλλων προτύπων.

Στα Διαγράμματα 5.1 έως 5.12 απεικονίζονται οι τέσσερις γραφικές παραστάσεις των υπολοίπων για το χάλυβα SVERKER 21, στα Διαγράμματα 5.13 έως 5.24 για το χάλυβα IMPAX και στα Διαγράμματα 5.25 έως 5.36 για το χάλυβα ORVAR.

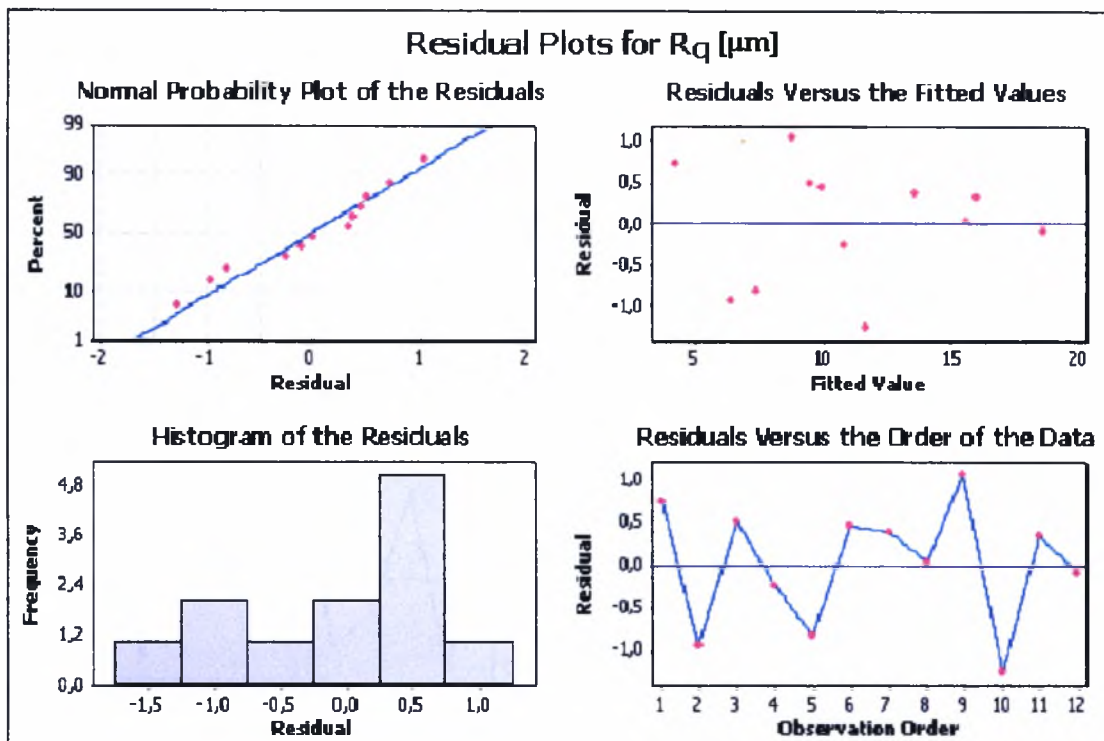
Διαγράμματα υπολοίπων για το χάλυβα SVERKER 21.



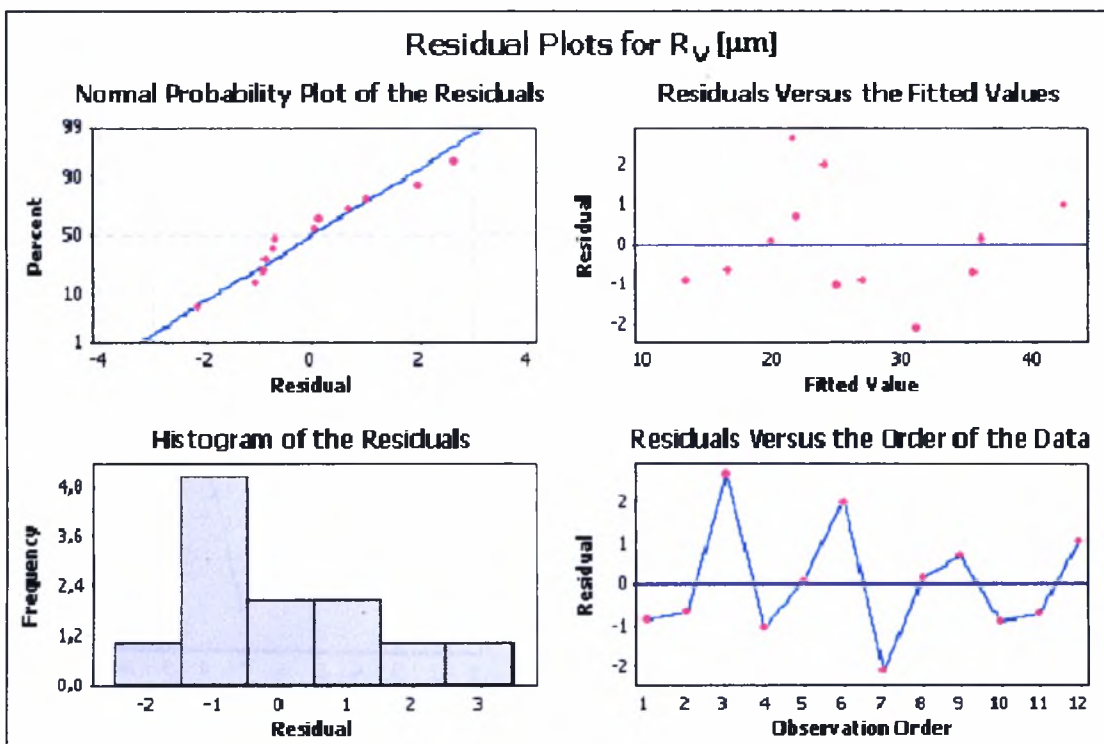
Διάγραμμα 5.1: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_a$  για το χάλυβα SVERKER 21.



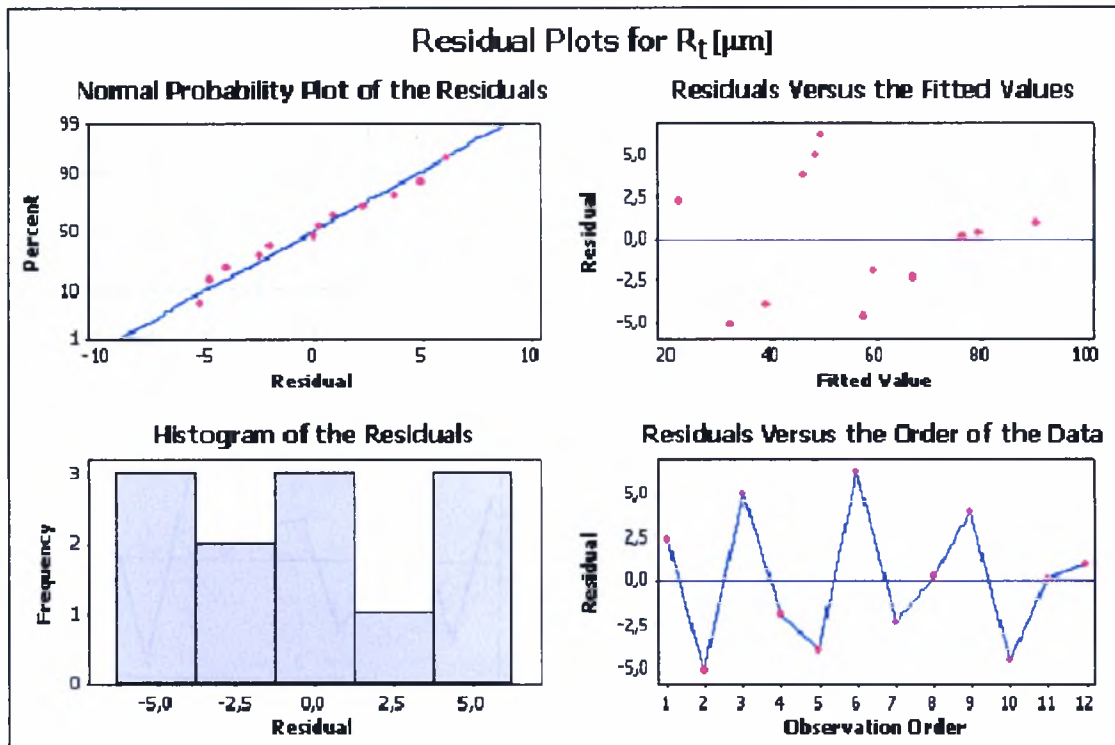
Διάγραμμα 5.2: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_p$  για το χάλυβα SVERKER 21.



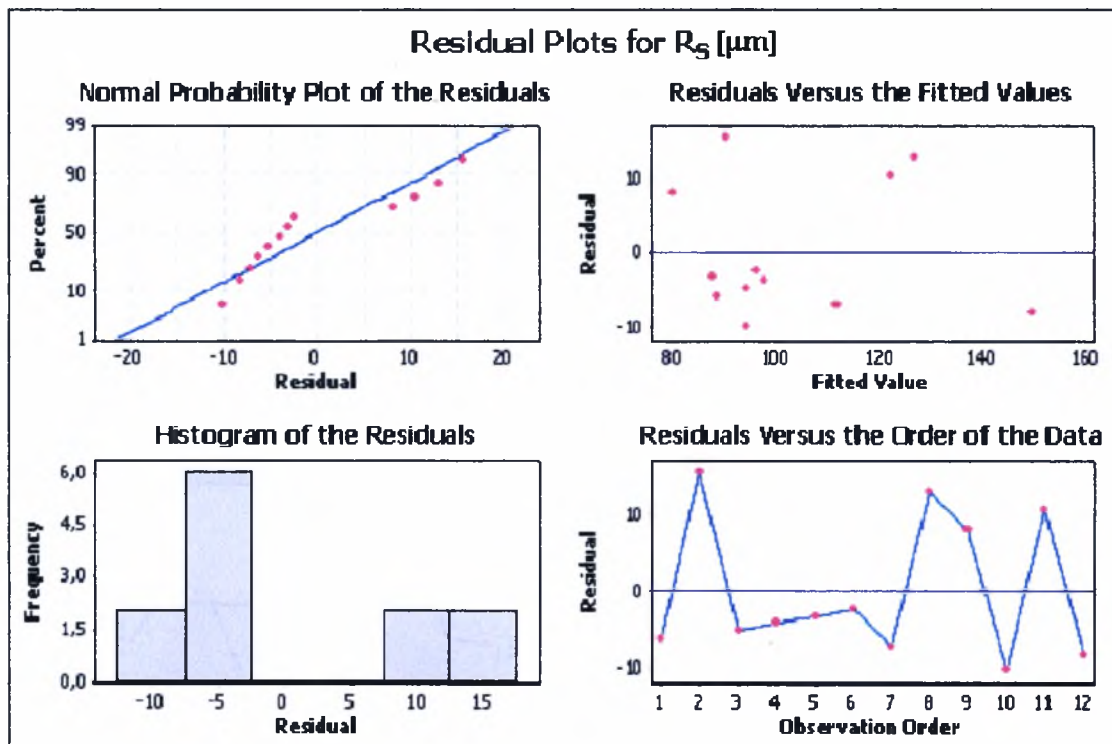
Διάγραμμα 5.3: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_q$  για το χάλυβα SVERKER 21.



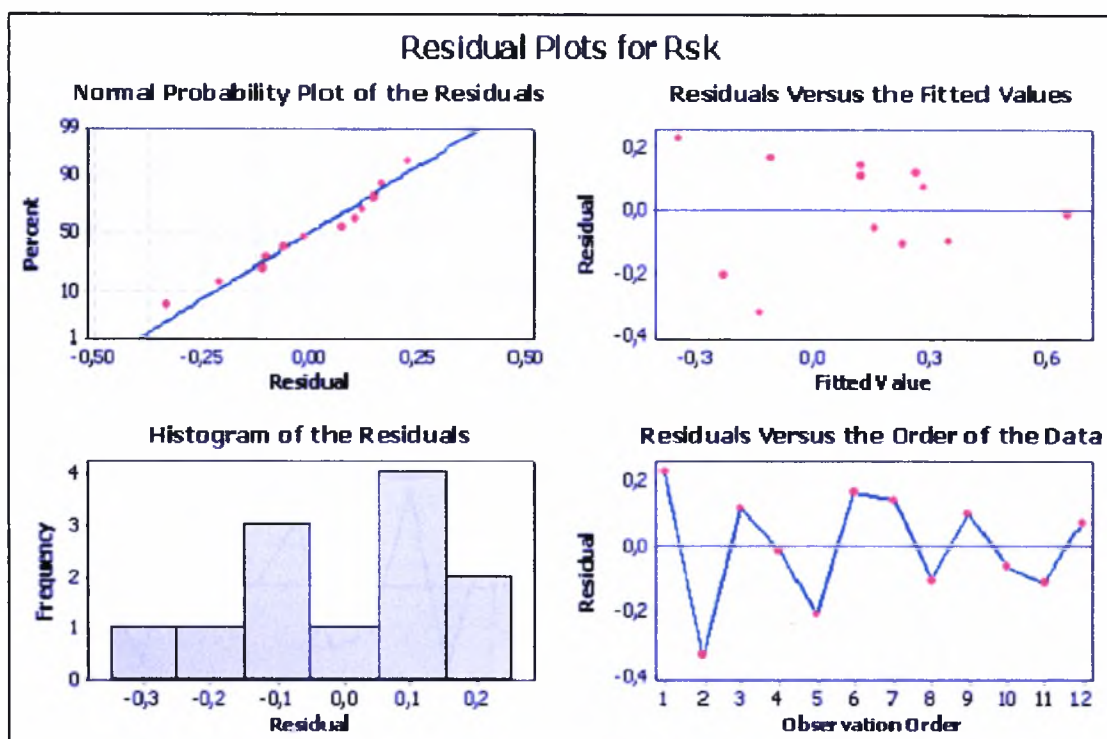
Διάγραμμα 5.4: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_v$  για το χάλυβα SVERKER 21.



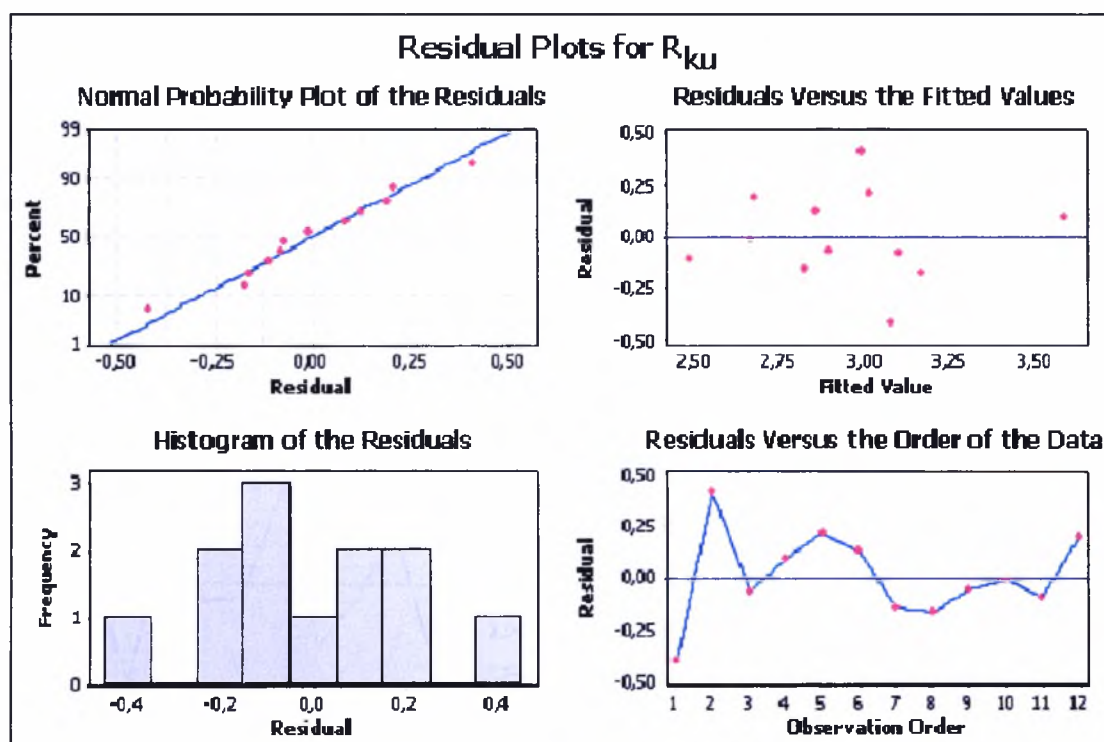
Διάγραμμα 5.5: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_t$  για το χάλυβα SVERKER 21.



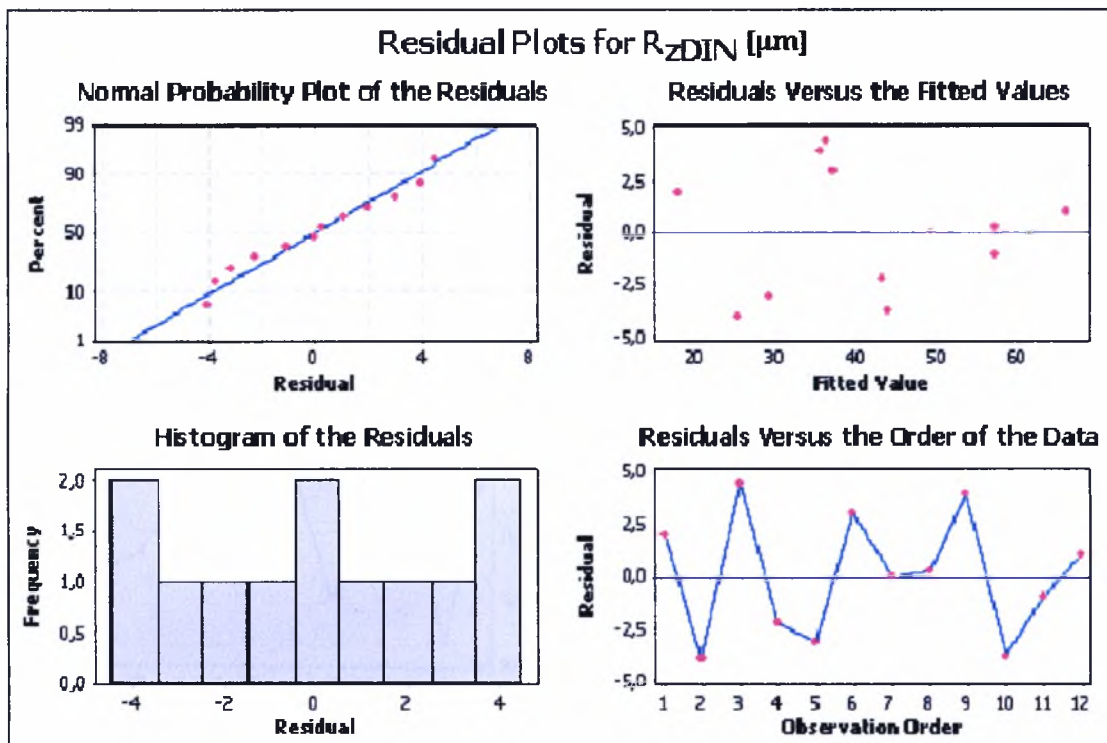
Διάγραμμα 5.6: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_5$  για το χάλυβα SVERKER 21.



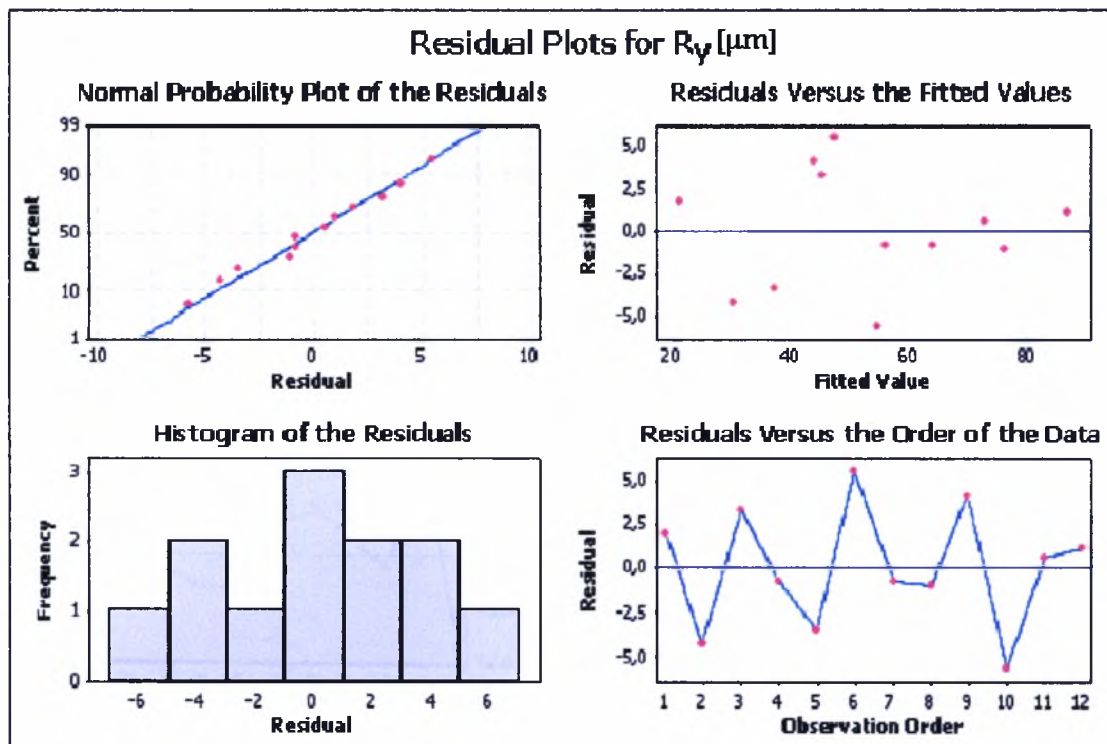
Διάγραμμα 5.7: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{sk}$  για το χάλυβα SVERKER 21.



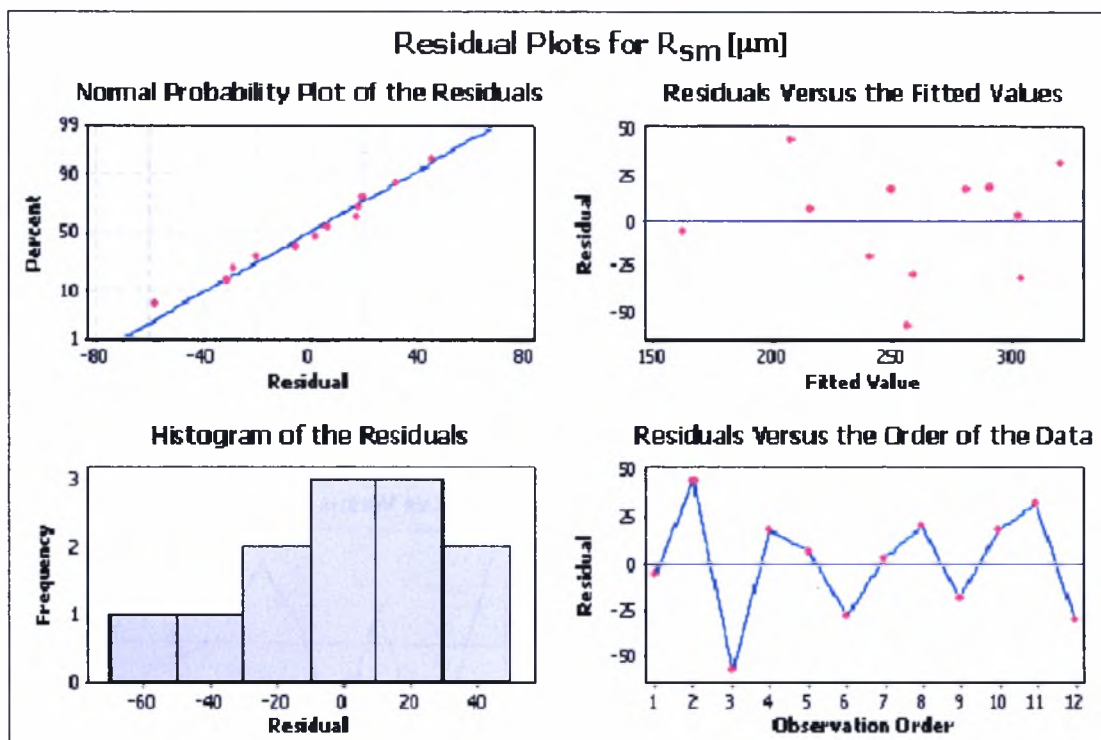
Διάγραμμα 5.8: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{ku}$  για το χάλυβα SVERKER 21.



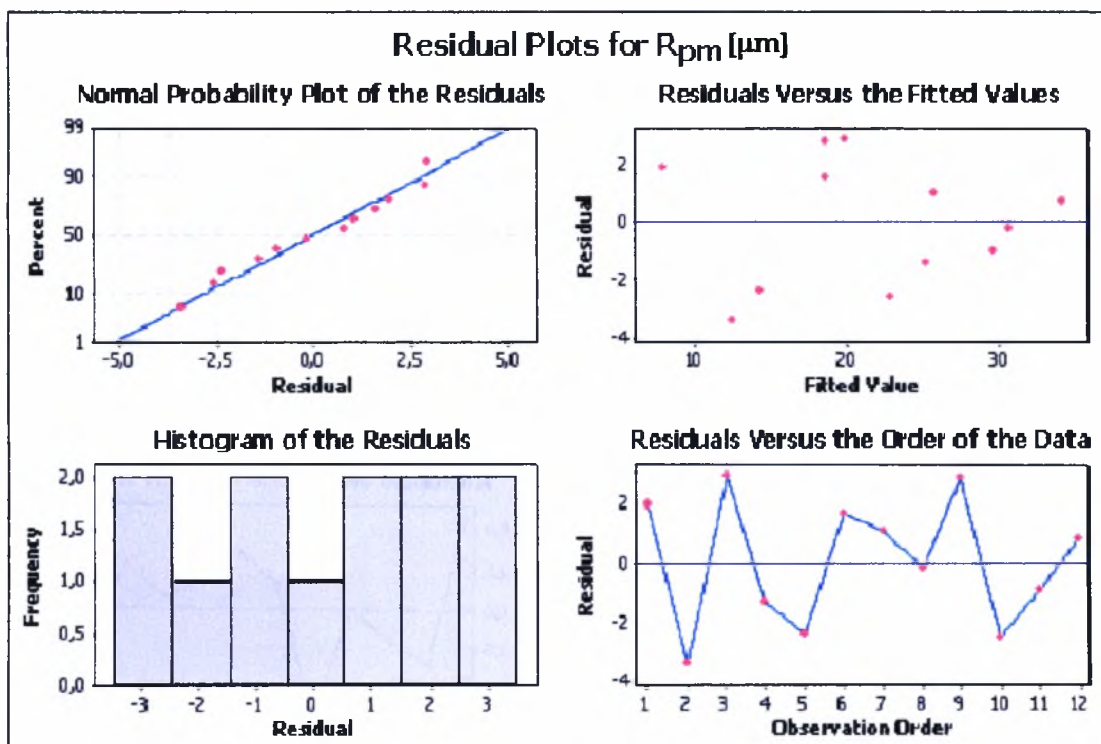
Διάγραμμα 5.9: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{zDIN}$  για το χάλυβα SVERKER 21.



Διάγραμμα 5.10: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_y$  για το χάλυβα SVERKER 21.

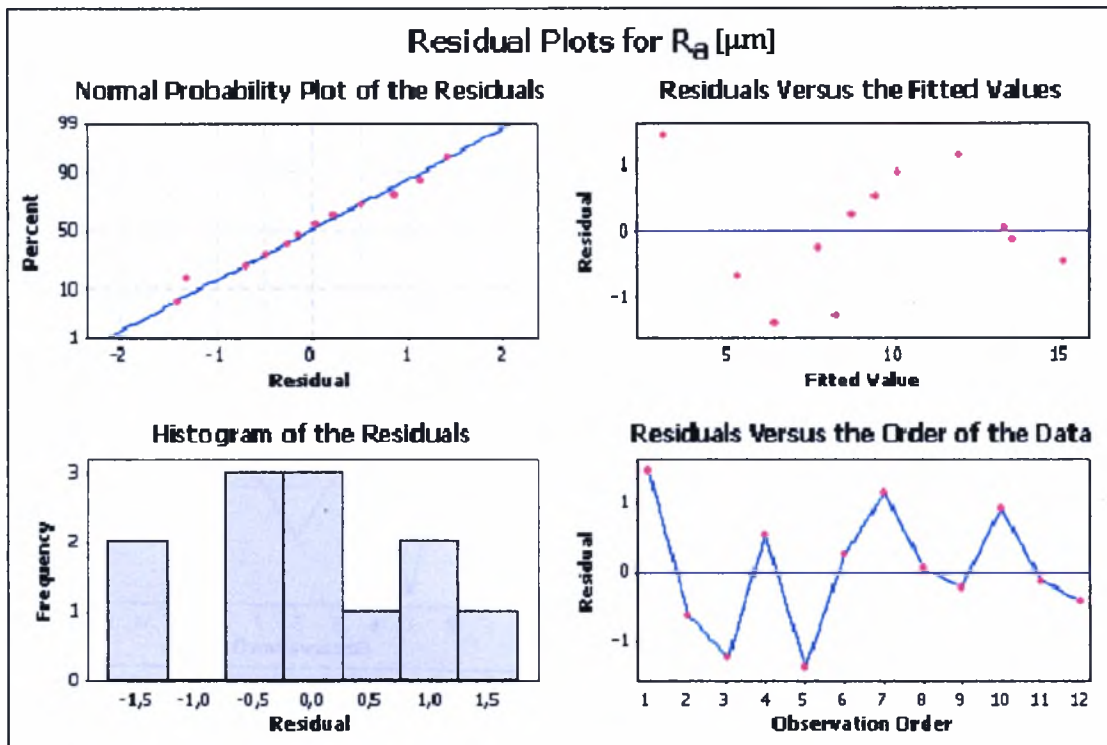


Διάγραμμα 5.11: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{sm}$  για το χάλυβα SVERKER 21.

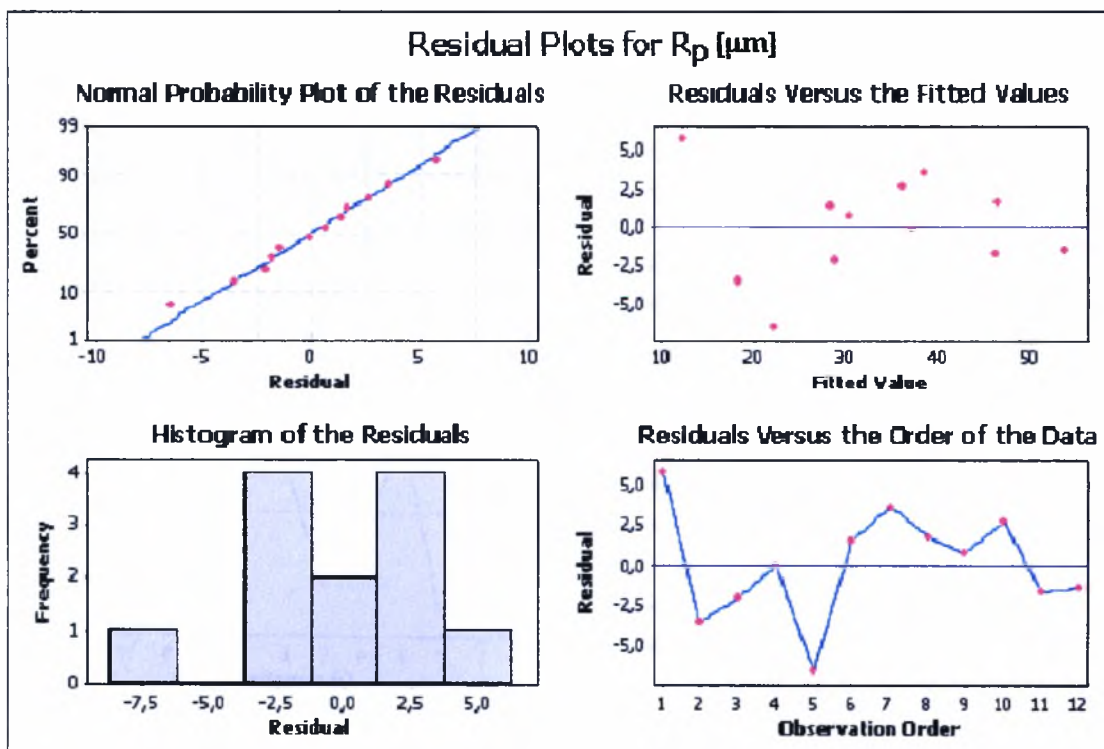


Διάγραμμα 5.12: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{pm}$  για το χάλυβα SVERKER 21.

Διαγράμματα υπολοίπων για το χάλυβα IMPAX.

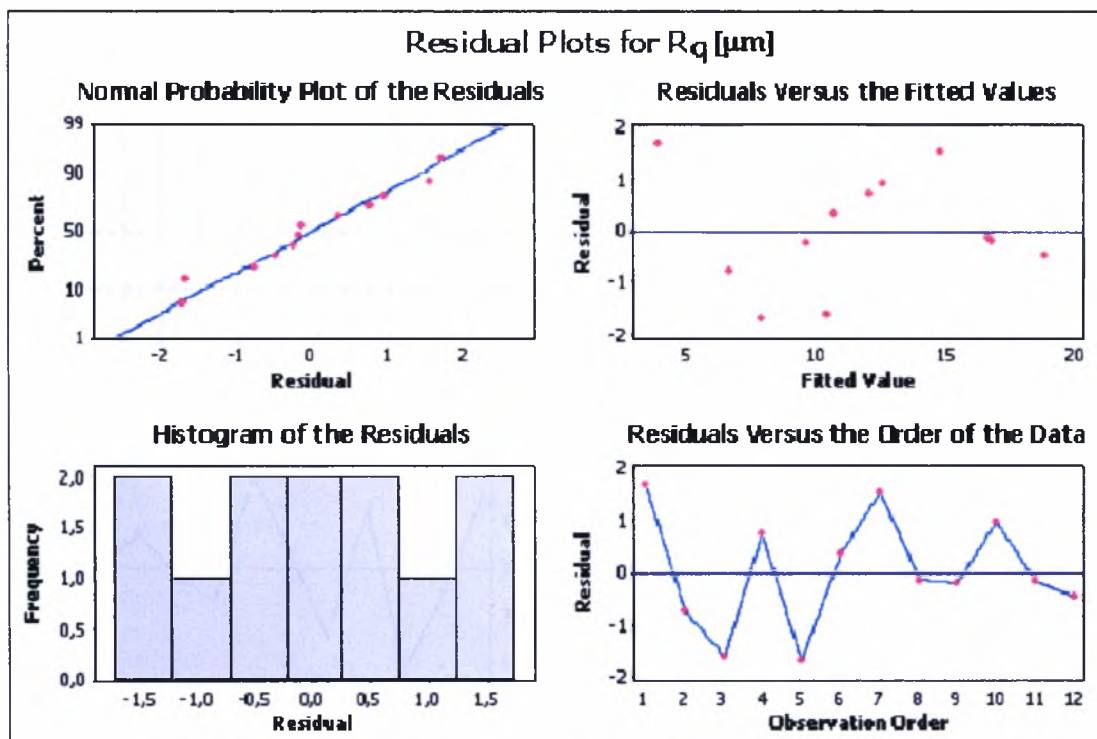


Διάγραμμα 5.13: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_a$  για το χάλυβα IMPAX.

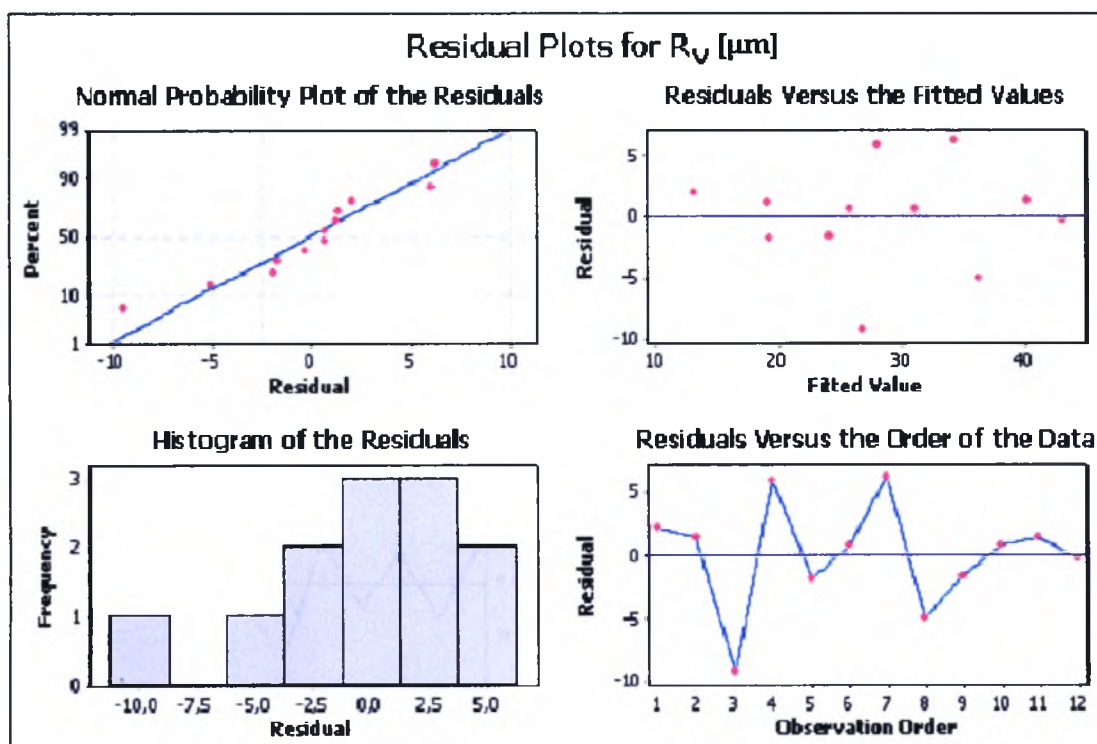


Διάγραμμα 5.14: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_p$  για το χάλυβα IMPAX.

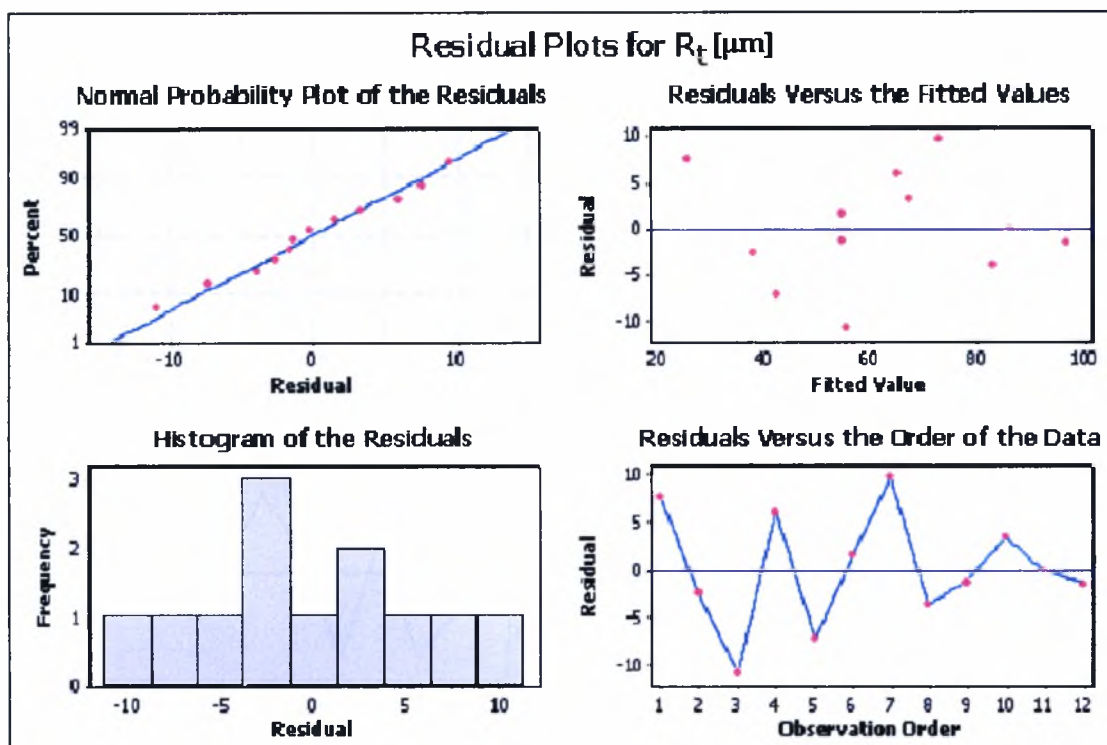




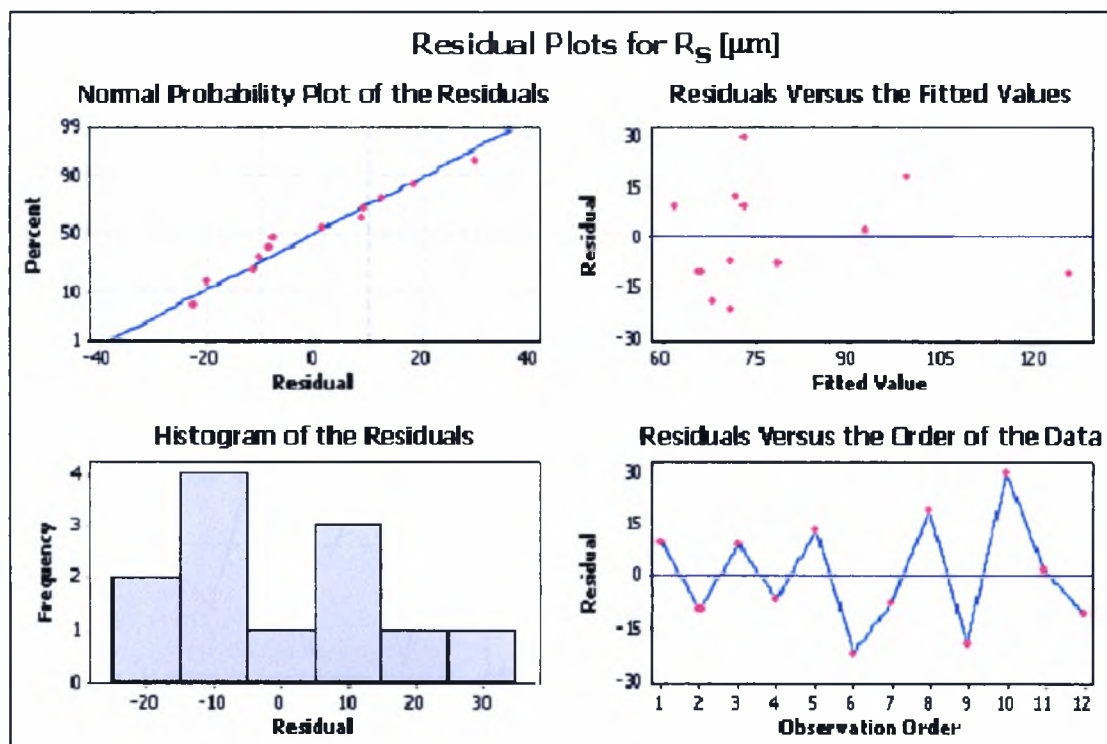
*Διάγραμμα 5.15:* Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_Q$  για το χάλυβα IMPAX.



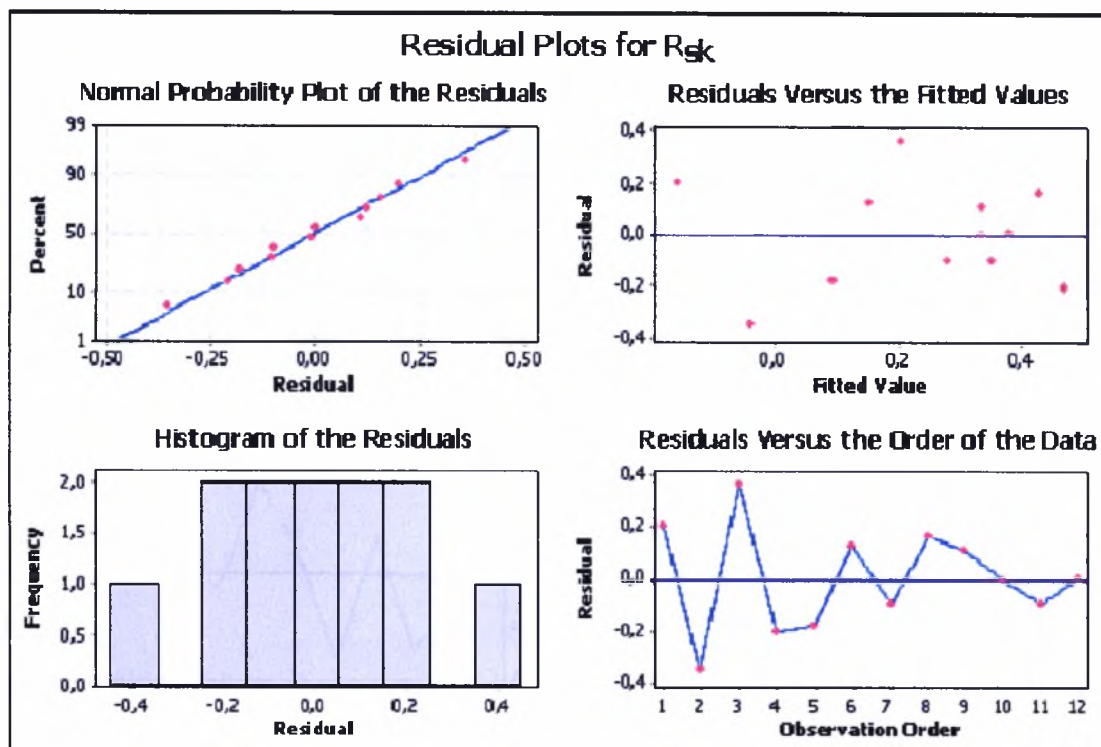
*Διάγραμμα 5.16:* Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_V$  για το χάλυβα IMPAX.



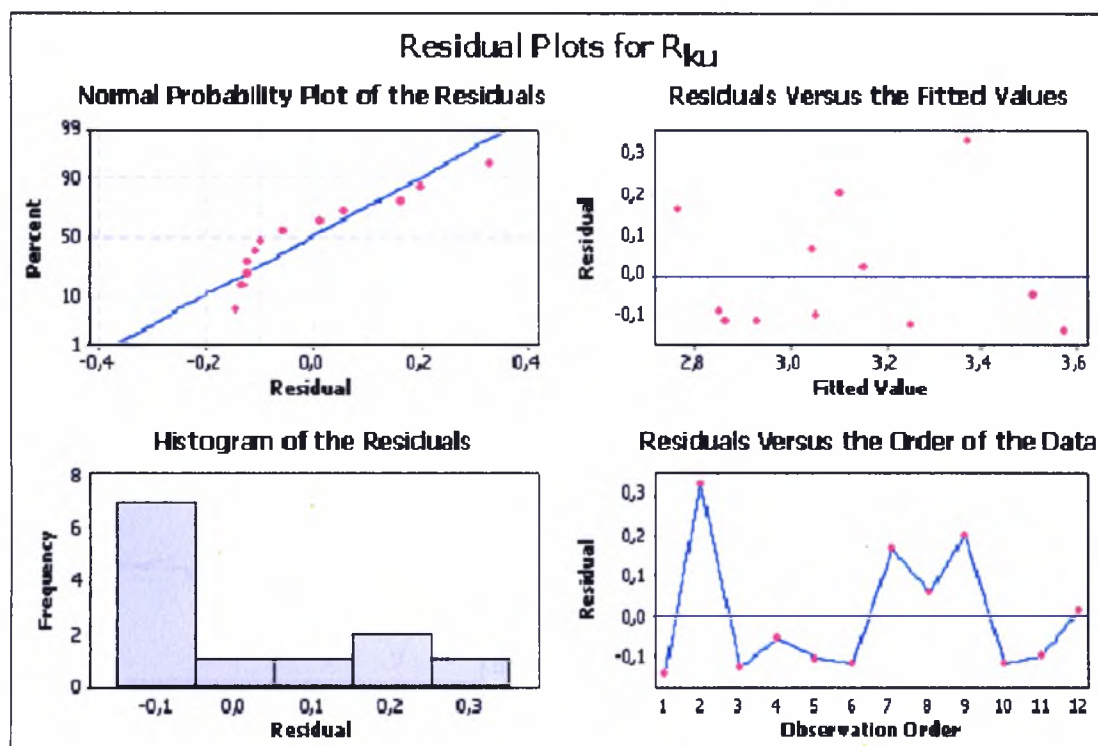
*Διάγραμμα 5.17:* Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_t$  για το χάλυβα IMPAX.



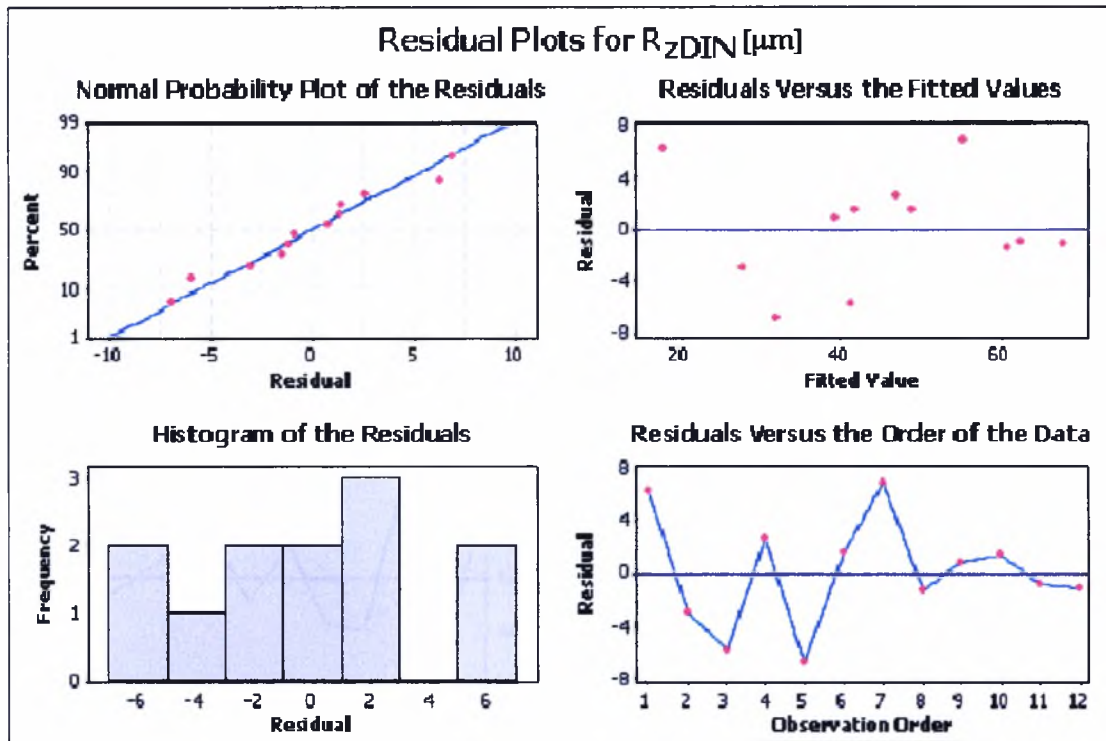
*Διάγραμμα 5.18:* Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_s$  για το χάλυβα IMPAX.



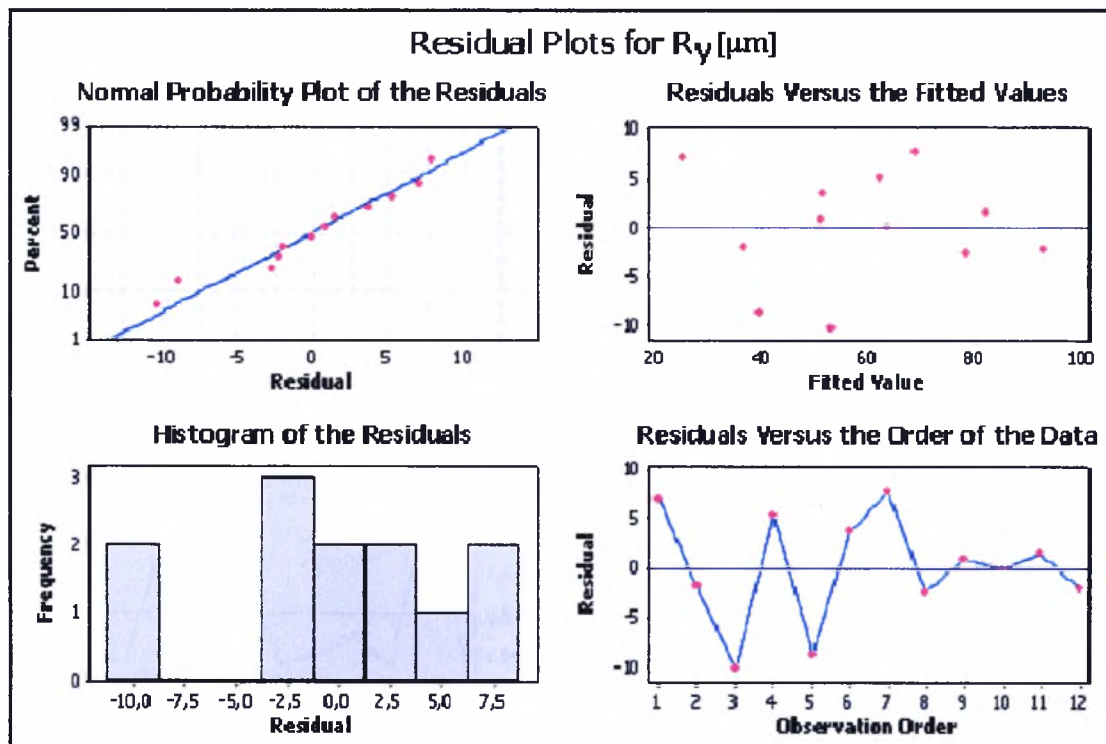
Διάγραμμα 5.19: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{sk}$  για το χάλυβα IMPAX.



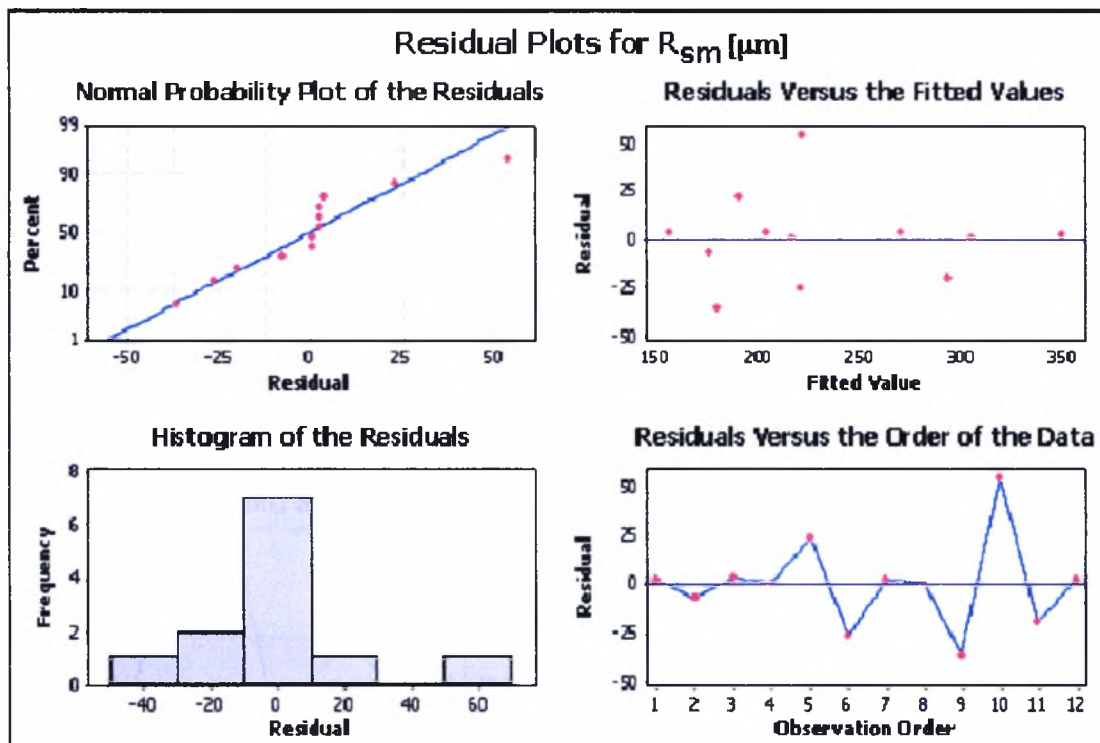
Διάγραμμα 5.20: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{ku}$  για το χάλυβα IMPAX.



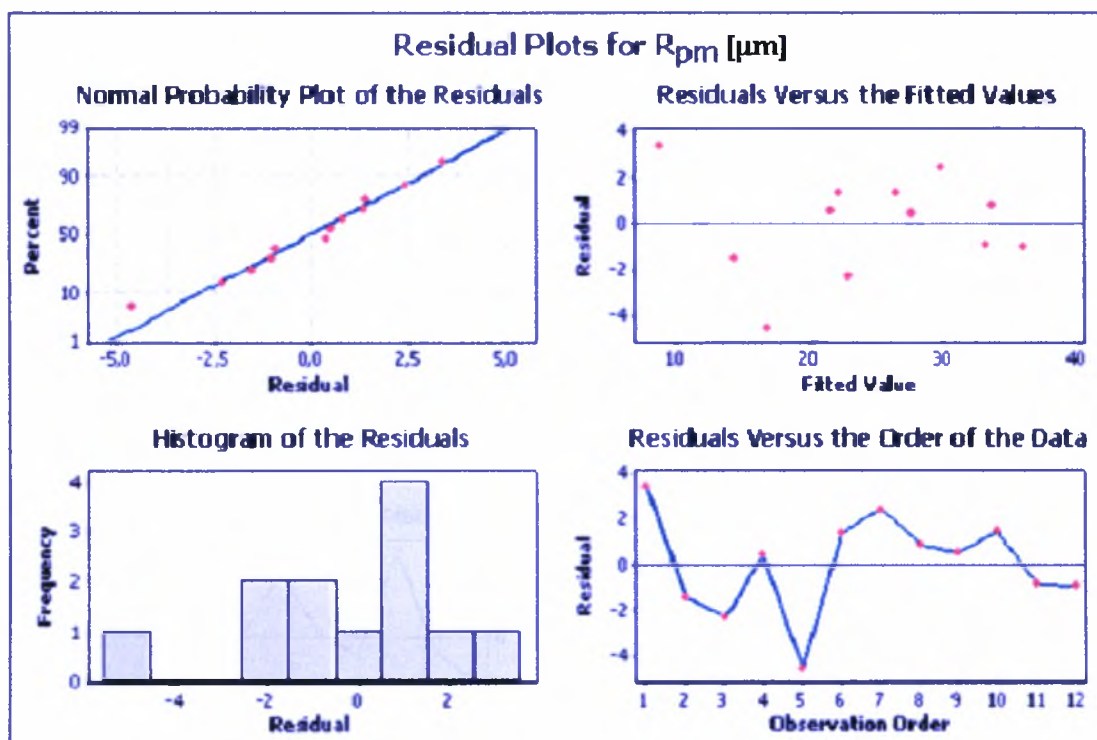
Διάγραμμα 5.21: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{ZDIN}$  για το χάλυβα IMPAX.



Διάγραμμα 5.22: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_Y$  για το χάλυβα IMPAX.

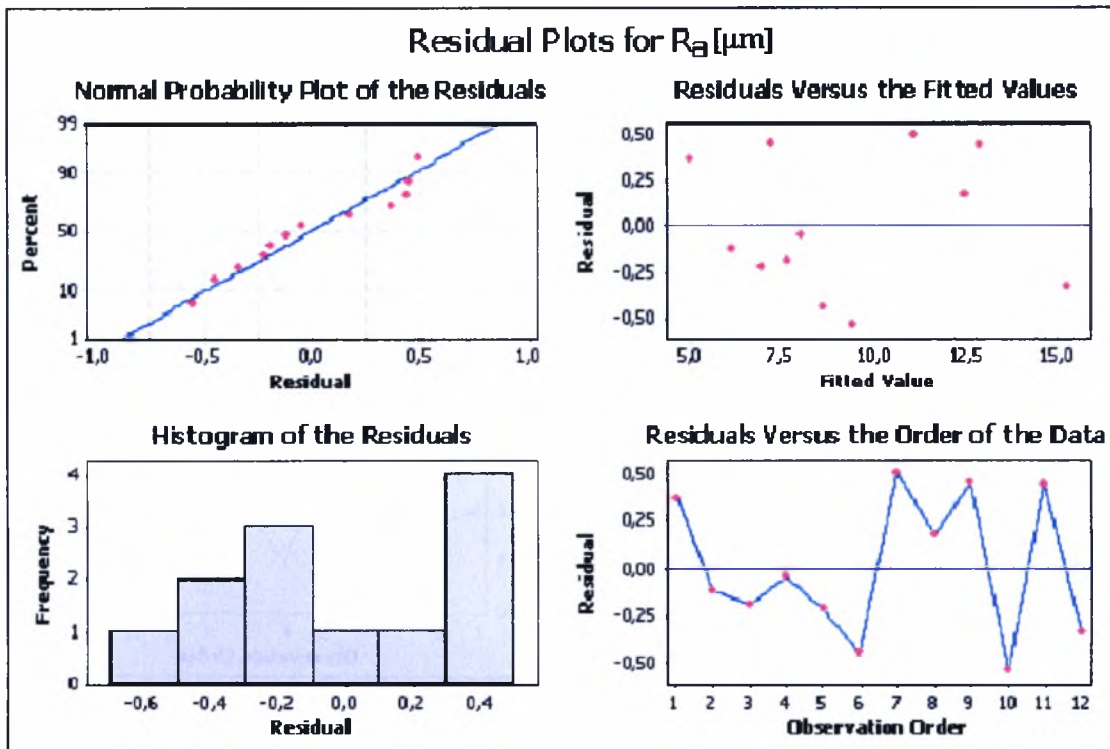


*Διάγραμμα 5.23:* Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{sm}$  για το χάλυβα IMPAX.

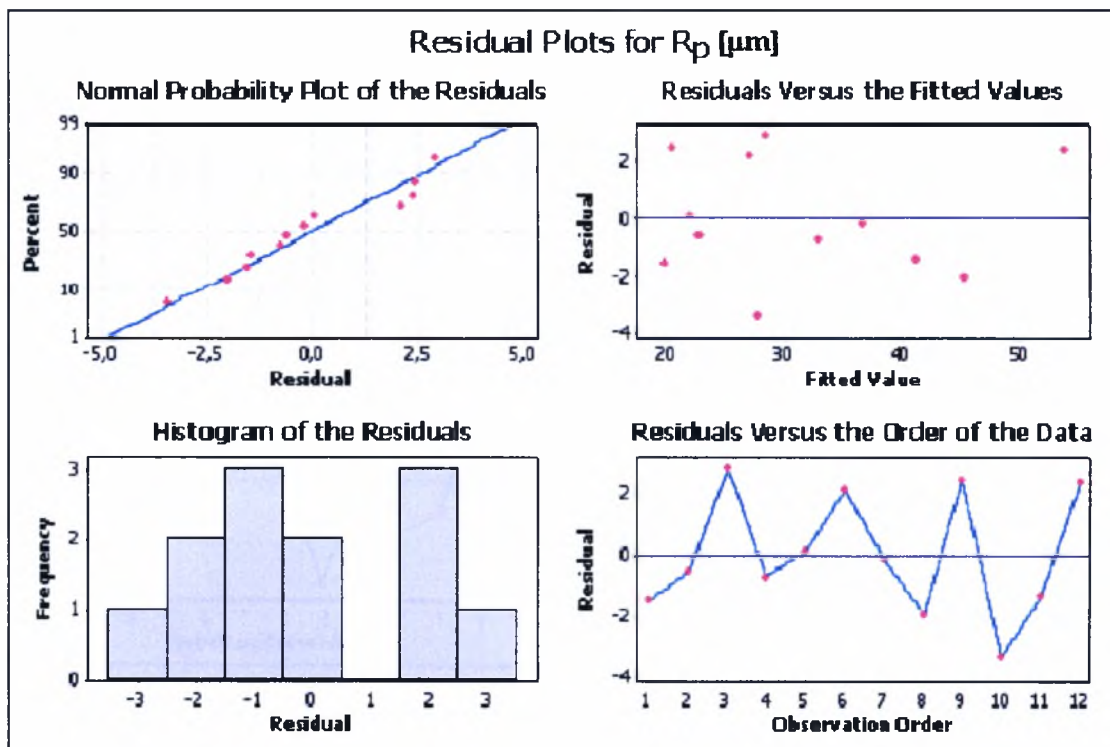


*Διάγραμμα 5.24:* Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{pm}$  για το χάλυβα IMPAX.

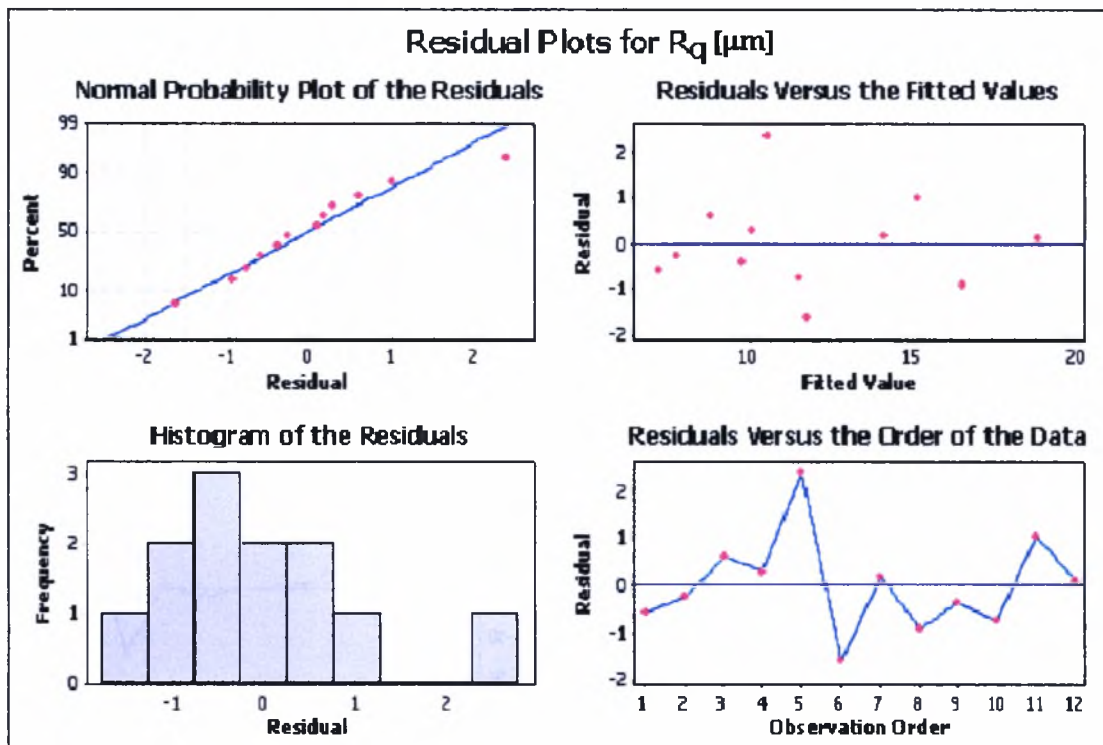
Διαγράμματα υπολοίπων για το χάλυβα **ORVAR**.



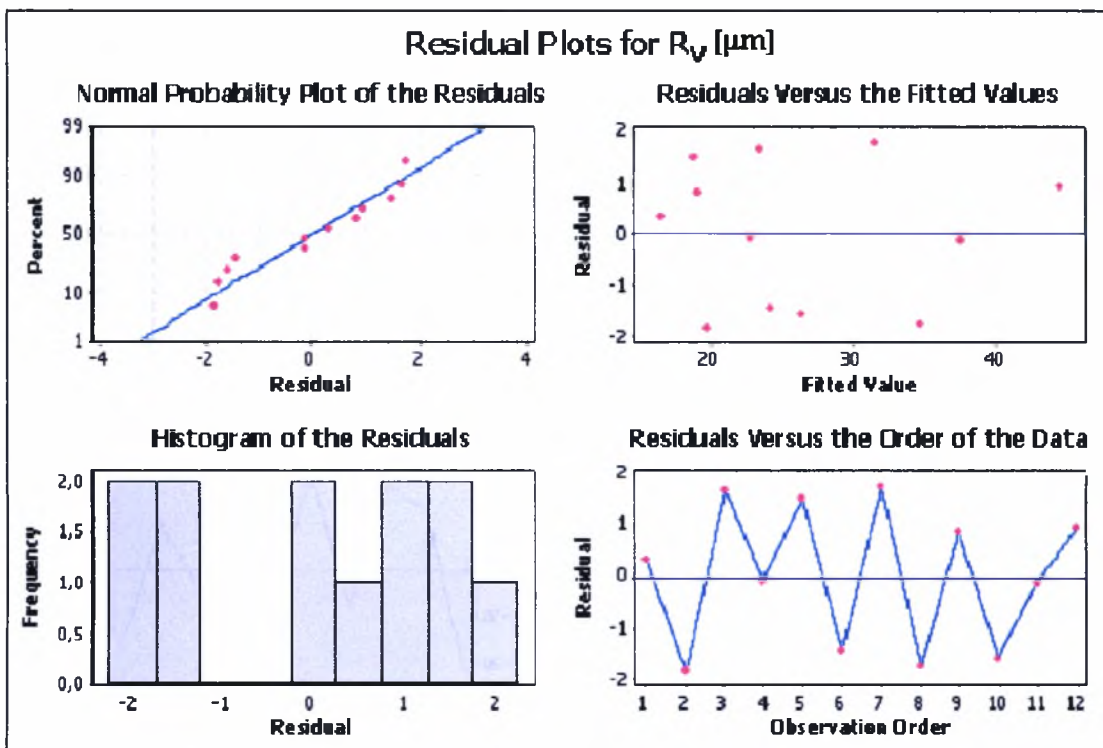
Διάγραμμα 5.25: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_a$  για το χάλυβα **ORVAR**.



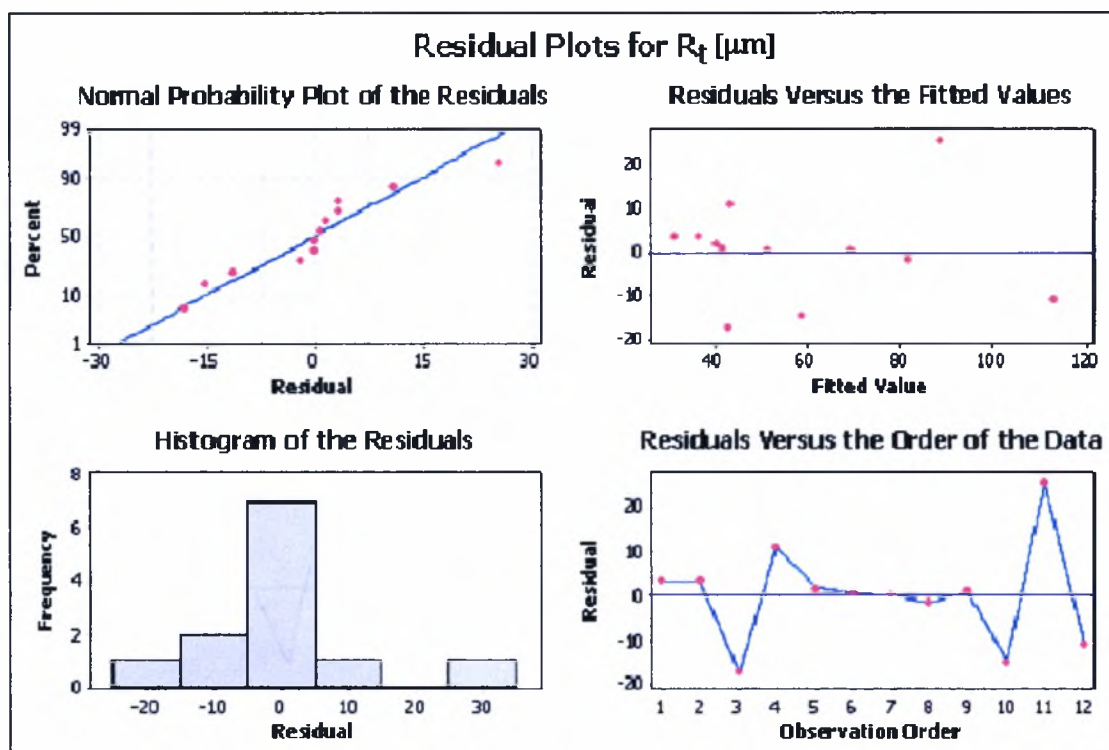
Διάγραμμα 5.26: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_p$  για το χάλυβα **ORVAR**.



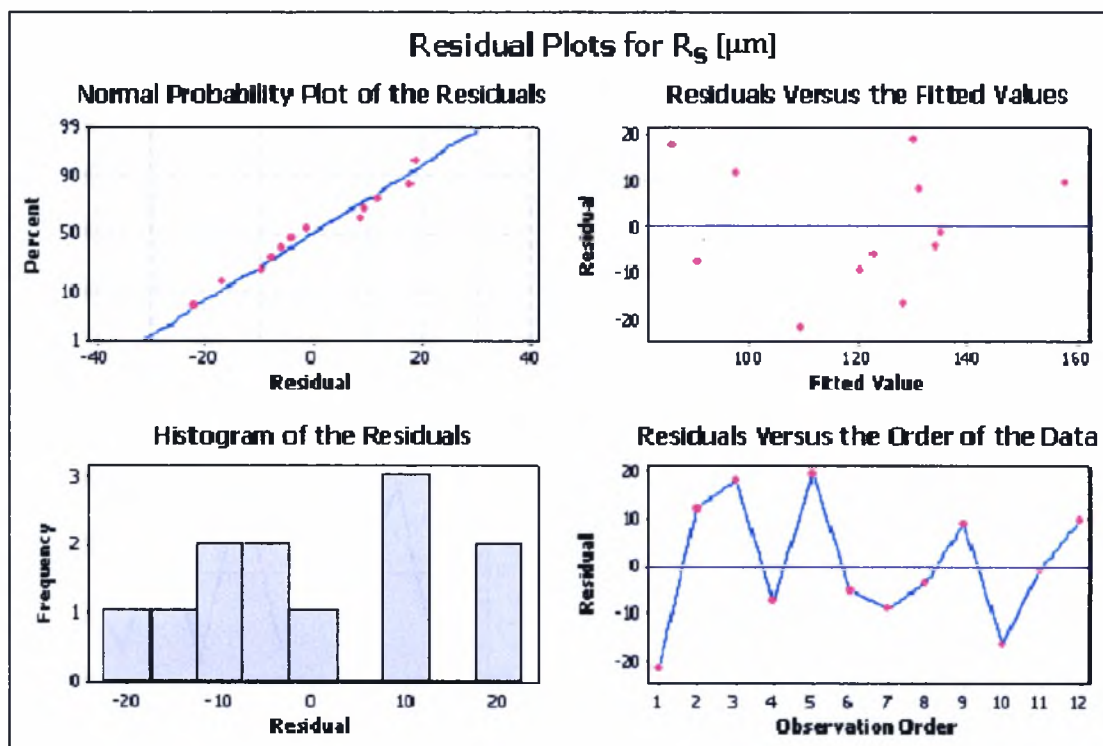
Διάγραμμα 5.27: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_q$  για το χάλυβα ORVAR.



Διάγραμμα 5.28: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_v$  για το χάλυβα ORVAR.

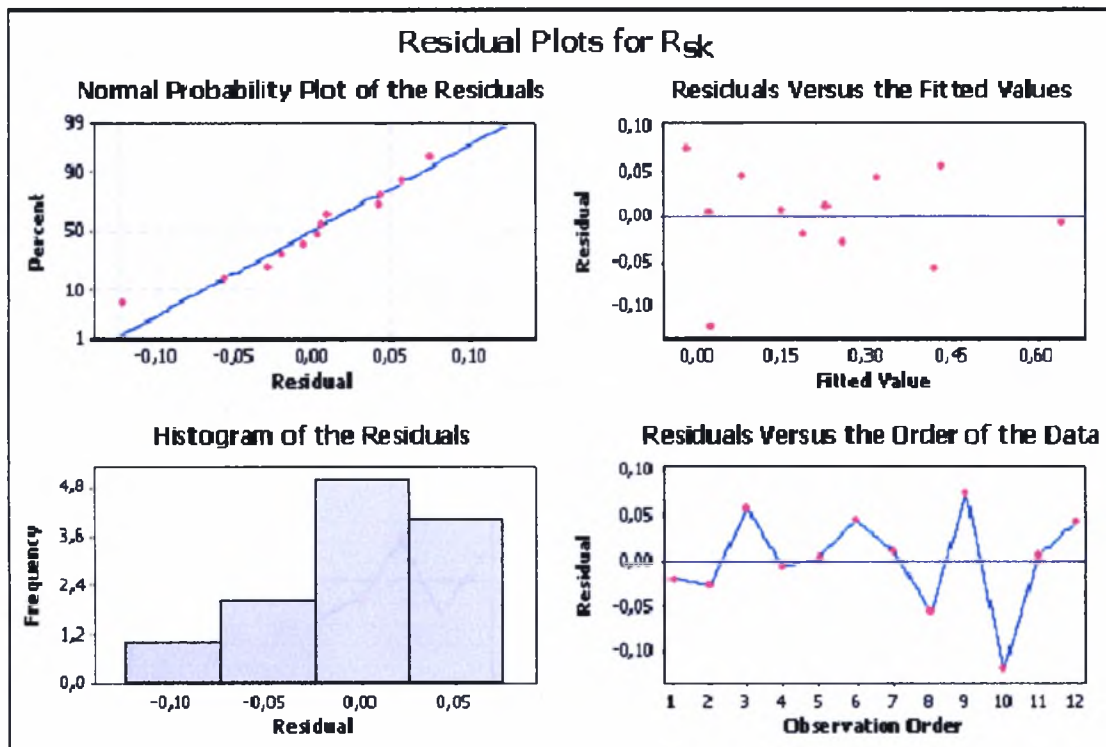


Διάγραμμα 5.29: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_t$  για το χάλυβα ORVAR.

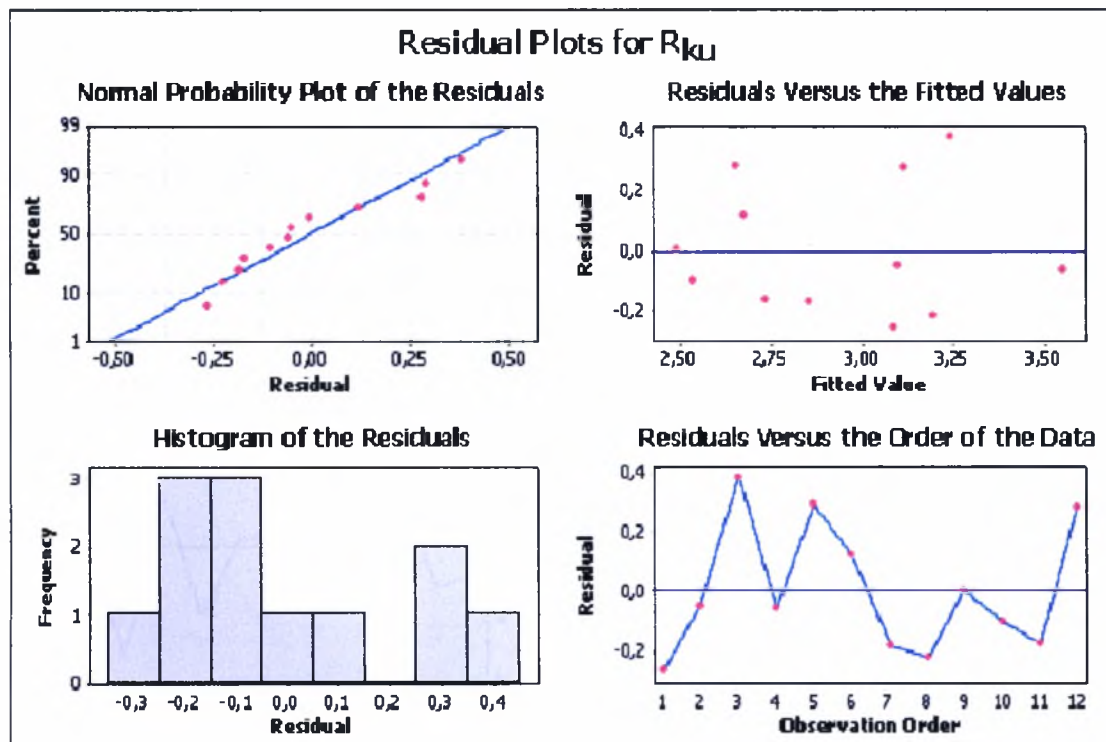


Διάγραμμα 5.30: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_s$  για το χάλυβα ORVAR.

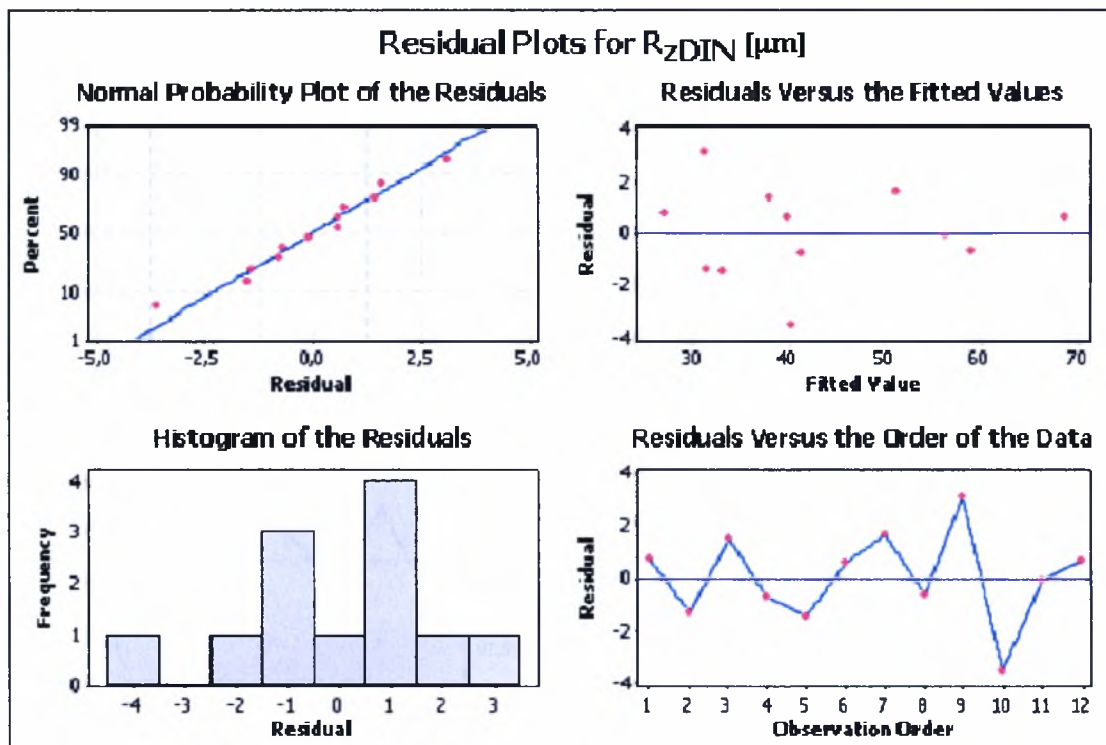




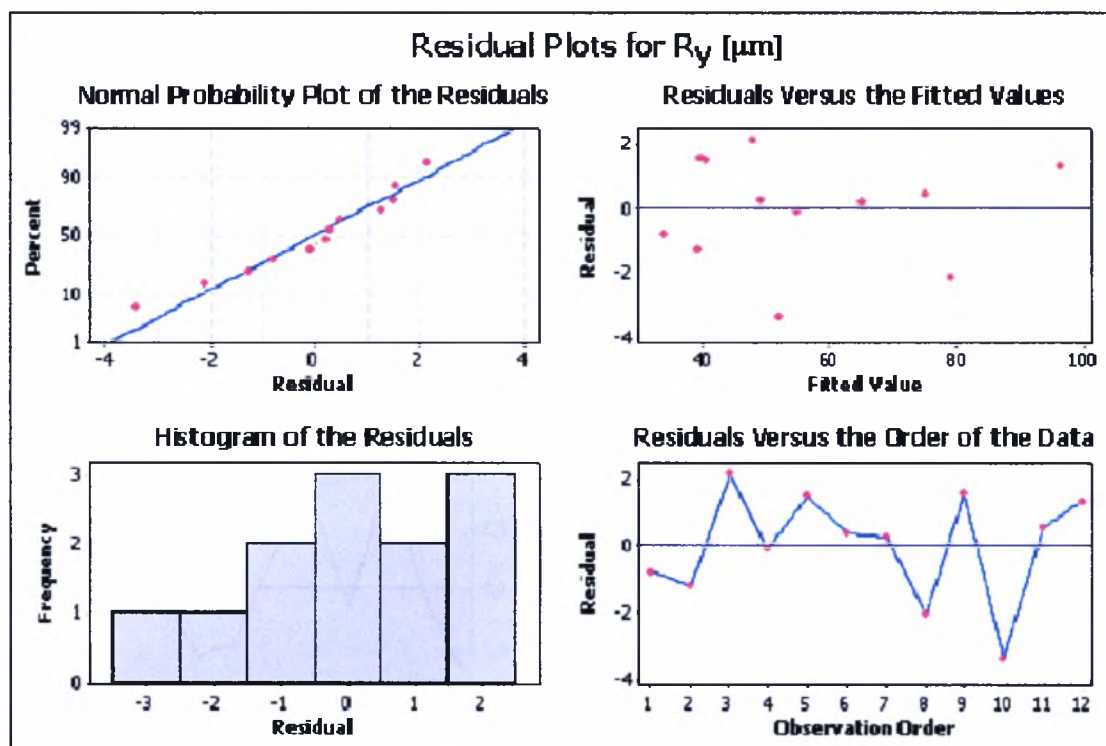
Διάγραμμα 5.31: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{\beta k}$  για το χάλυβα ORVAR.



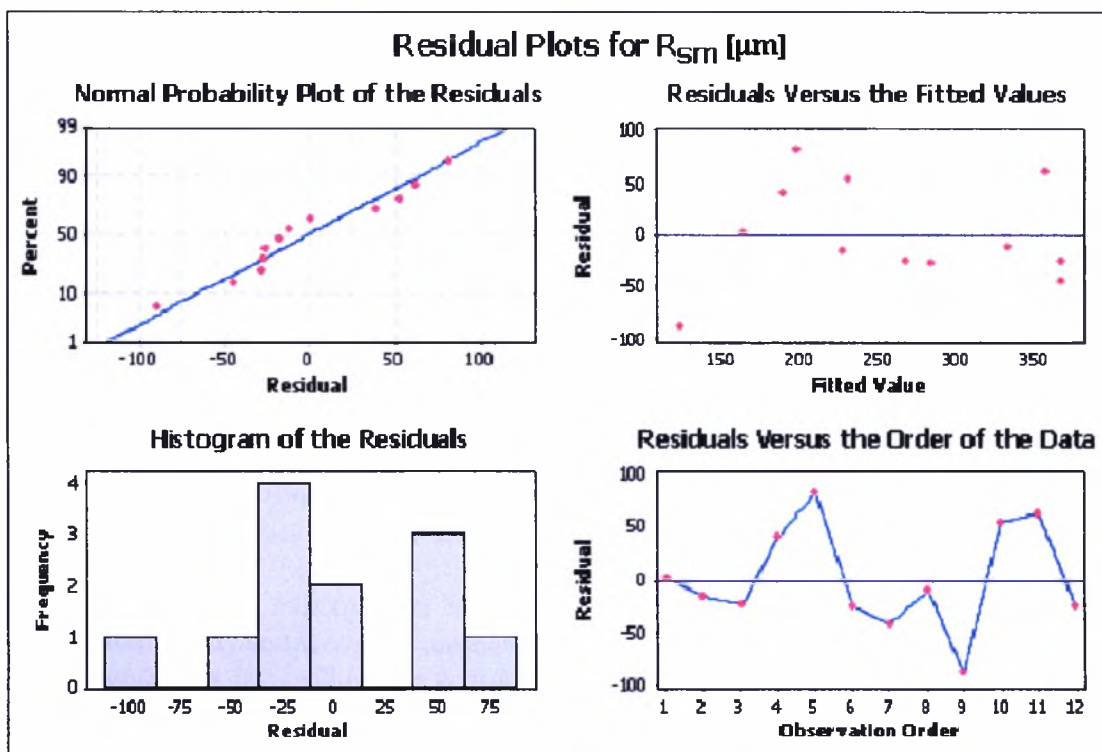
Διάγραμμα 5.32: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{\kappa \mu}$  για το χάλυβα ORVAR.



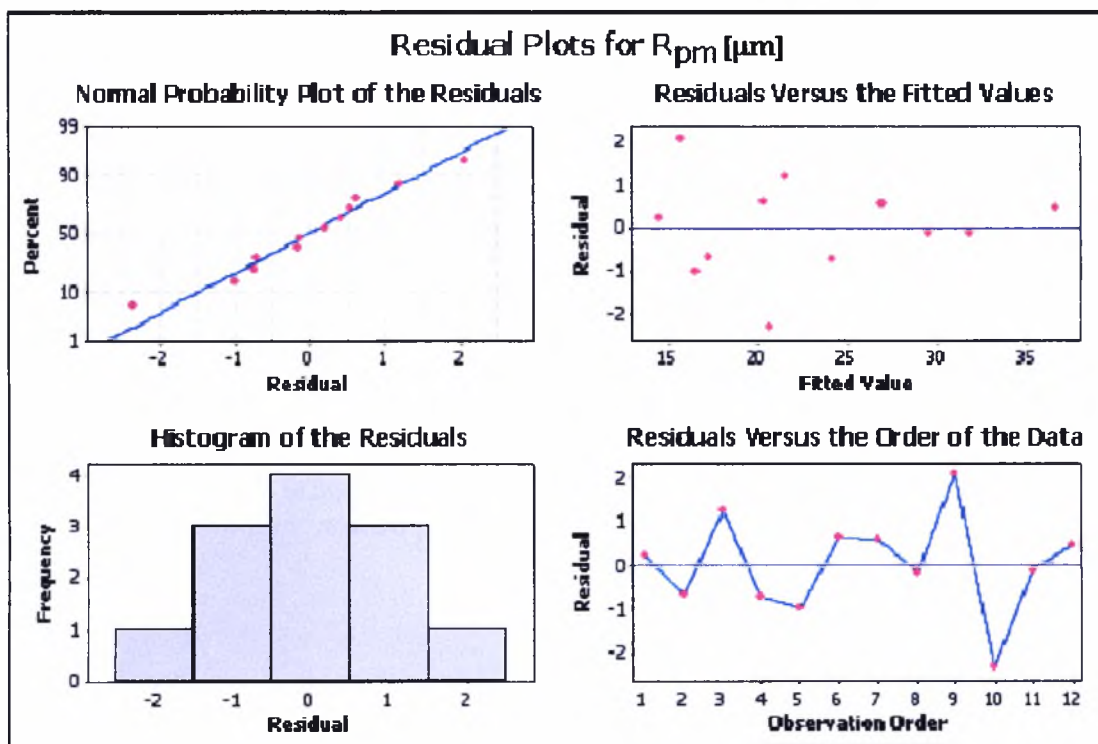
Διάγραμμα 5.33: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{ZDIN}$  για το χάλυβα ORVAR.



Διάγραμμα 5.34: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_y$  για το χάλυβα ORVAR.



Διάγραμμα 5.35: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{sm}$  για το χάλυβα ORVAR.



Διάγραμμα 5.36: Τα τέσσερα διαγράμματα υπολοίπων της παραμέτρου  $R_{pm}$  για το χάλυβα ORVAR.

### 5.5.1 Σχολιασμός των διαγραμμάτων υπολοίπων.

Η χρήση των παραπάνω διαγραμμάτων μας επιτρέπει να ελέγξουμε αν οι υποθέσεις που έγιναν για το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού, βάσει του οποίου έγινε η ανάλυση παλινδρόμησης, ισχύουν.

Για να διαπιστώσουμε αυτό πρέπει να παρατηρήσουμε καθένα από τα τέσσερα διαγράμματα της κάθε μιας παραμέτρου για όλα τα υλικά που μελετήθηκαν.

Το σημαντικότερο απ' όλα τα διαγράμματα είναι το διάγραμμα έλεγchu κανονικής κατανομής (normal probability plot) το οποίο μας δείχνει κατά πόσο τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή. Για να ακολουθούν τα υπόλοιπα (κουκκίδες) την κανονική κατανομή, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κεντρική γραμμή. Αυτό, όπως παρατηρούμε, ισχύει σχεδόν για όλες τις παραμέτρους, όλων των υλικών. Εκεί που ίσως τα υπόλοιπα «ξεφεύγουν» λίγο είναι στις παραμέτρους  $R_s$ ,  $R_{sm}$ ,  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ , χωρίς όμως να παρατηρούνται μεγάλες αποκλίσεις που να μας δείχνουν ότι τα υπόλοιπα του εκτιμούμενου προτύπου δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή.

Ένα άλλος τρόπος με τον οποίο ελέγχουμε εναλλακτικά την υπόθεση της κανονικότητας των υπολοίπων, είναι το ιστόγραμμα συχνοτήτων των υπολοίπων (histogram of the residual). Και εδώ παρατηρούμε ό,τι ακριβώς και στο διάγραμμα έλεγchu κανονικής κατανομής και η υπόθεση της κανονικότητας φαίνεται ότι δεν παραβιάζεται.

Ως αναφορά τα διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (residuals versus the fitted values) παρατηρούμε ότι τα υπόλοιπα δεν έχουν μια προκαθορισμένη σειρά σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές, αλλά είναι τοποθετημένα τυχαία. Αυτό γίνεται για όλες τις παραμέτρους, όλων των υλικών και μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα υπόλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους.

Τέλος για τον έλεγchu της σταθερότητας της διακύμανσης των υπολοίπων, χρησιμοποιούμε το διάγραμμα υπολοίπων σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (plot of residuals versus run order). Για να μην υπάρχει σχέση συσχέτισης των υπολοίπων, θα πρέπει αυτά να διασκορπίζονται το ίδιο πάνω και κάτω κατά μήκος και όσο πιο κοντά στην οριζόντια γραμμή ( $r = 0$ ). Και αυτή η υπόθεση παρατηρώντας τα διαγράμματα όλων των παραμέτρων του κάθε υλικού βλέπουμε ότι ικανοποιείται.

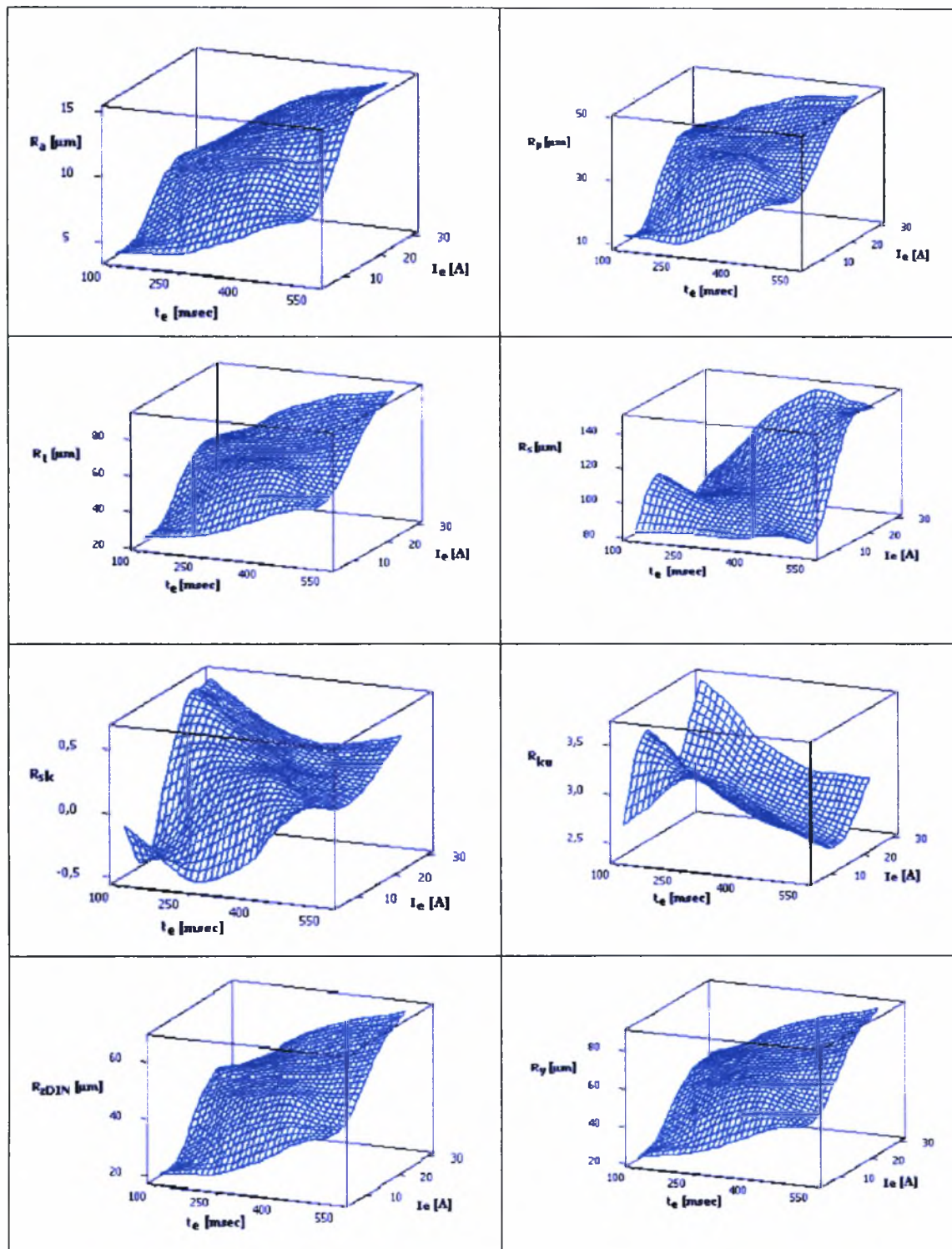
Το γενικό συμπέρασμα με την παράθεση των διαγραμμάτων υπολοίπων είναι ότι ικανοποιούνται όλες οι υποθέσεις εκείνες που μας επιτρέπουν να χρησιμοποιήσουμε το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού για τη διεξαγωγή στατιστικών συμπερασμάτων.

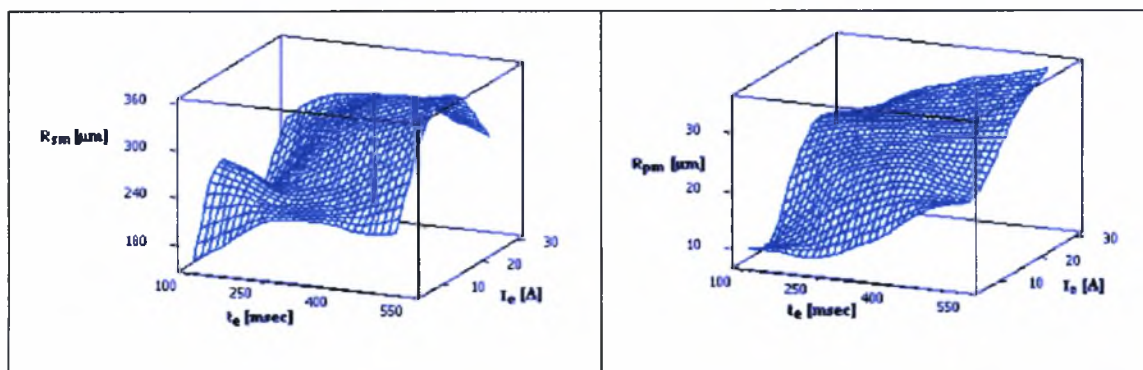
Πρέπει βέβαια να αναφέρουμε ότι στα ίδια συμπεράσματα καταλήγουμε και με τη μελέτη των διαγραμμάτων υπολοίπων των άλλων προτύπων τα οποία διαγράμματα δεν παρατίθενται στη διπλωματική αυτή εργασία.

### 5.6 Τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις.

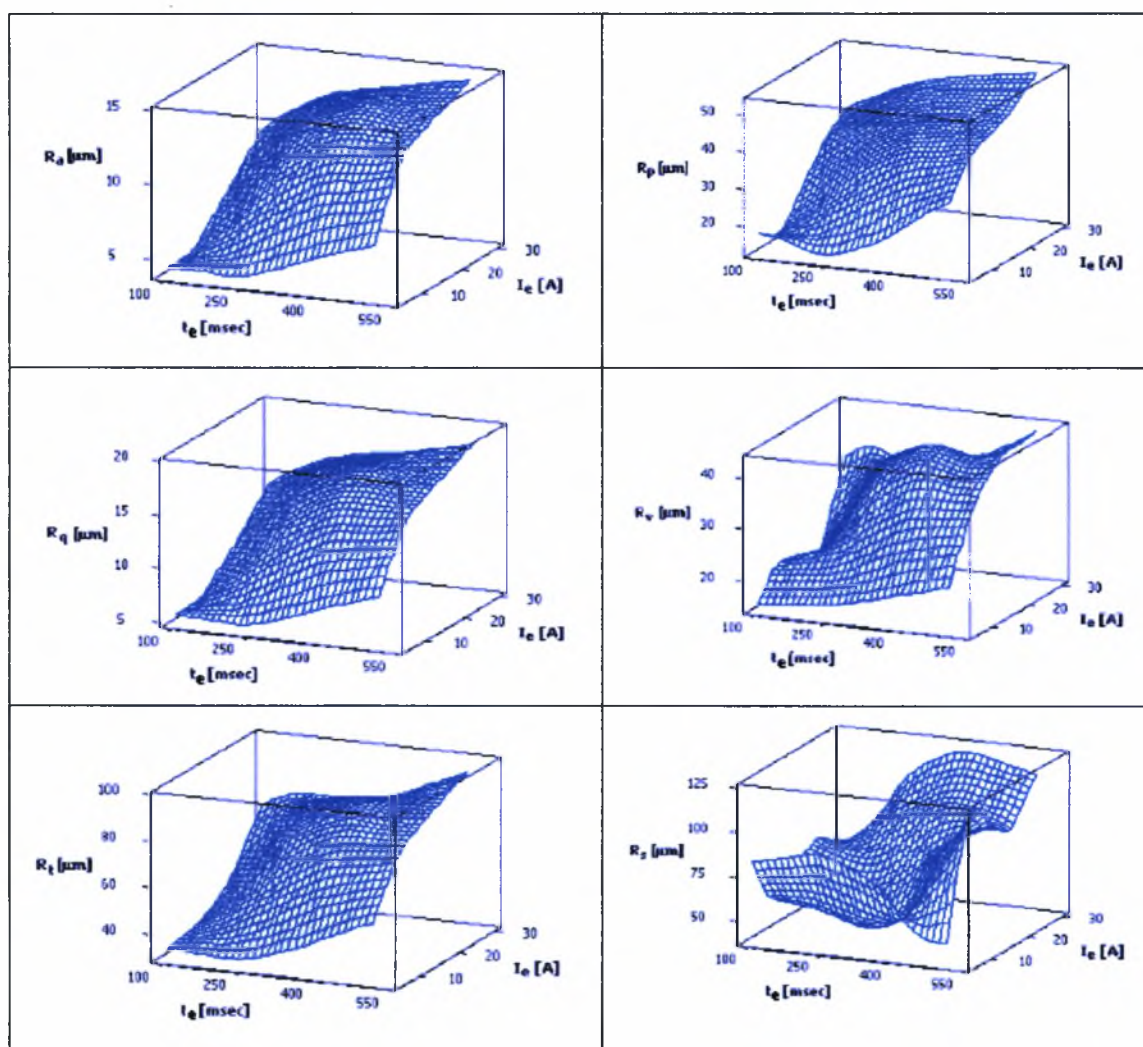
Ένα άλλος τρόπος απεικόνισης των αποτελεσμάτων μας είναι αυτός της τρισδιάστατης γραφικής παράστασης στην οποία υπάρχουν τόσο οι εξαρτημένες μεταβλητές  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_s$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_y$ ,  $R_{sm}$  (άξονας z), όσο και οι ανεξάρτητες μεταβλητές  $t_e$  και  $I_e$  (άξονες x και y αντίστοιχα). Από τα διαγράμματα αυτά εξάγουμε χρήσιμα συμπεράσματα μιας και μπορούμε να βρούμε την τιμή των  $t_e$  και  $I_e$  για μια συγκεκριμένη τιμή των μεταβλητών  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_s$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_y$ ,  $R_{sm}$  και το αντίθετο.

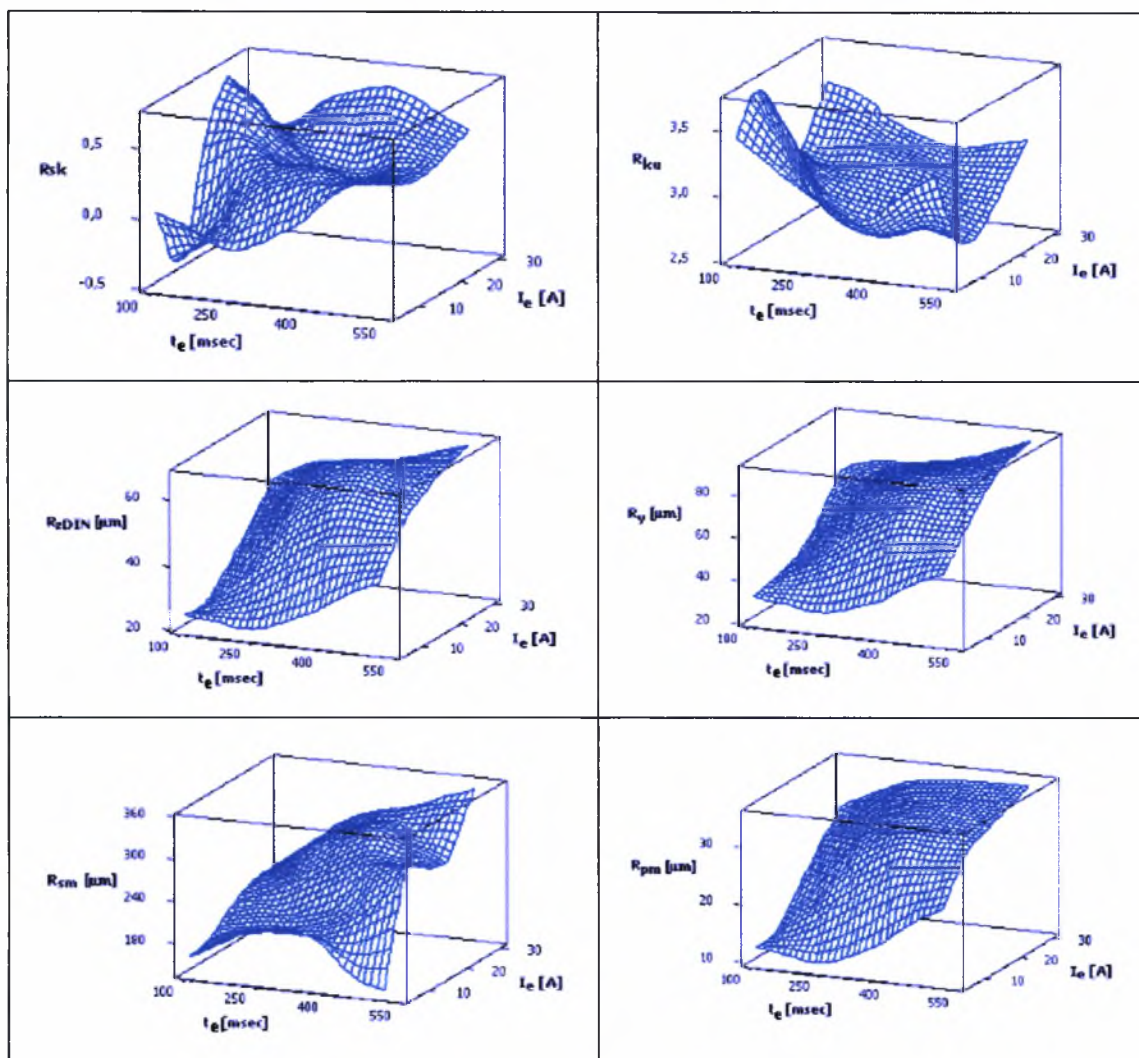
Παρακάτω παρουσιάζονται οι μορφές των τρισδιάστατων γραφικών παραστάσεων για κάθε παράμετρο κάθε υλικού.



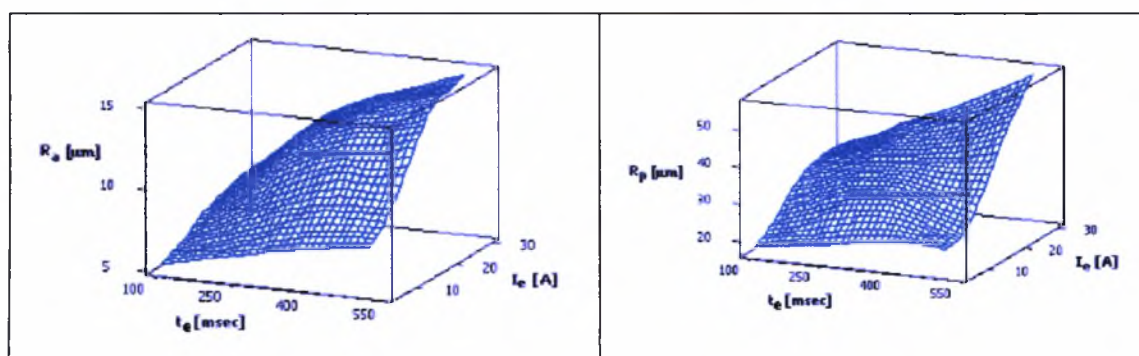


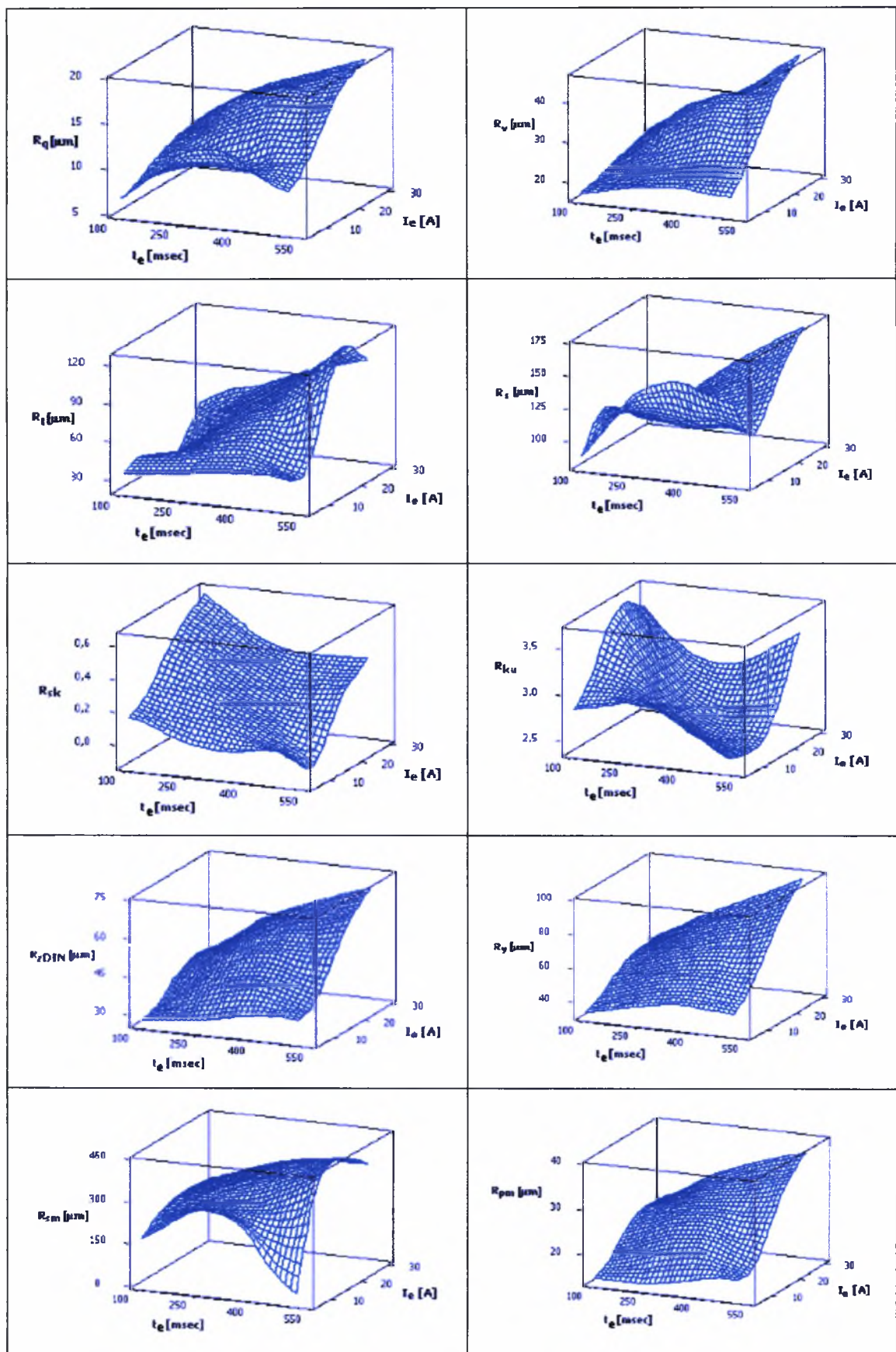
Διάγραμμα 5.37: Τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις όλων των παραμέτρων τραχύτητας για το χάλυβα SVERKER 21.





**Διάγραμμα 5.38:** Τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις όλων των παραμέτρων τραχύτητας για το χάλυβα IMPAX.





Διάγραμμα 5.39: Τρισδιάστατες γραφικές παραστάσεις όλων των παραμέτρων για το χάλυβα ORVAR.



---

Παρατηρώντας τα Διαγράμματα 5.37, 5.38 και 5.39, τα οποία αντιστοιχούν στους τρεις χάλυβες μας, SVERKER 21, IMPAX και ORVAR, μπορούμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα ως αναφορά τη μορφή τους.

Τα διαγράμματα για τις παραμέτρους  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_y$ , έχουν παρόμοια μορφή. Δηλαδή η συμπεριφορά των εξαρτημένων μεταβλητών, δηλαδή των παραπάνω παραμέτρων στη μεταβολή των ανεξάρτητων μεταβλητών, δηλαδή των  $t_e$  και  $I_e$ , είναι παρόμοια.

Αντίθετα η μορφή των παραμέτρων  $R_s$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{sm}$ , στη μεταβολή των  $t_e$  και  $I_e$ , δεν έχει συγκεκριμένη μορφή και έτσι δεν εξάγονται συμπεράσματα ως αναφορά τη μεταβολή τους για διάφορες τιμές των  $t_e$  και  $I_e$ .



---

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup> : Συμπεράσματα και μελλοντικές εργασίες.

---

### 6.1 Γενικά συμπεράσματα.

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια συνολική αποτίμηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το κέντρο βάρους είναι η πολυπαραμετρική ανάλυση των παραμέτρων της τραχύτητας που έγινε για τρεις χάλυβες (τους SVERKER 21, IMPAX και ORVAR) κατεργασμένους με τη μέθοδο της Η/Δς σε διαφορετικές συνθήκες έντασης παλμού  $I_e$  και χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$ . Τα κύρια ευρήματα μπορεί να συνοψισθούν ως εξής:

Στο 4<sup>ο</sup> Κεφάλαιο τόσο τα αριθμητικά αποτελέσματα των τραχυμετρήσεων των δοκιμίων για τις παραμέτρους  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_s$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_y$ ,  $R_{sm}$  και των τριών χάλυβων, όσο και οι γραφικές παραστάσεις της κάθε παραμέτρου συναρτήσει της ενέργειας εκκένωσης  $W_e=I_e t_e V_e$ , έδειξαν ότι άλλες παράμετροι αυξάνονται με την αύξηση της ενέργειας ενώ άλλες όχι. Οι παράμετροι που αυξάνονται είναι οι παράμετροι ύψους,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{zDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ , η αύξηση δε, τείνει να είναι γραμμική. Οι παράμετροι μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$ , ακολουθούν μια ανοδική πορεία με την αύξηση της ενέργειας, χωρίς αυτό να ισχύει πάντα. Οι στατιστικές παράμετροι  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  δεν επηρεάζονται από την ενέργεια ηλεκτρικής εκκένωσης. Κατά ένα συστηματικό τρόπο, οι τιμές των παραμέτρων για το χάλυβα SVERKER 21 είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες τιμές για το χάλυβα IMPAX και αυτές μικρότερες από αυτές του χάλυβα ORVAR.

Στο ίδιο κεφάλαιο δόθηκαν αντιπροσωπευτικά προφίλ τραχύτητας για κάθε δοκίμιο (κάθε συνδυασμό των συνθηκών κατεργασίας  $I_e$  και  $t_e$ ) κάθε υλικού. Από τον συνδυασμό των προφίλ αυτών και των στατιστικών παραμέτρων προκύπτει ότι οι κατατομές των Η/Δων επιφανειών στις περισσότερες περιπτώσεις είναι 'άδειες' από υλικό ( $R_{sk} > 0$ ), ενώ δεν έχουμε ούτε λεπτόκυρτες ούτε πλατύκυρτες κορυφές ή κοιλάδες εφόσον η κυρτότητα  $R_{ku}$  είναι περίπου ίση με τρία.

Στο 5<sup>ο</sup> Κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων με χρήση του στατιστικού πακέτου Minitab 14. Με το Minitab 14 γίνεται τόσο η ανάλυση μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) όσο και η ανάλυση παλινδρόμησης για κάθε παράμετρο του κάθε υλικού. Ο βασικός στόχος είναι η διαμόρφωση μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την όσο το δυνατόν πιο ακριβή πρόβλεψη των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών  $Y_i$ , με βάση τις εξαρτημένες μεταβλητές  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . Στην περίπτωση μας ως ανεξάρτητες μεταβλητές χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι της τραχύτητας  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_s, R_{sk}, R_{ku}, R_{zDIN}, R_{pm}, R_y$  και  $R_{sm}$ . Ως εξαρτημένες μεταβλητές ελήφθησαν οι συνθήκες κατεργασίας της Η/Δς δηλαδή, η ένταση παλμού  $I_e$  και η χρονική διάρκεια εκκένωσης  $t_e$ . Τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν είναι τέσσερα : το πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού, το πρότυπο αλληλεπίδρασης, το πολυωνυμικό πρότυπο δεύτερου βαθμού και το λογαριθμικό πρότυπο.

Από το συντελεστή συσχέτισης κάθε παραμέτρου του κάθε μοντέλου, βλέπε Πίνακες 5.1, 5.2 & 5.3, διαπιστώνονται τα ακόλουθα: Οι παράμετροι με τον μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης (σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις πάνω από 90%) είναι οι παράμετροι ύψους,  $R_a, R_p, R_q, R_v, R_t, R_{zDIN}, R_y, R_{pm}$ . Με λίγο μικρότερο συντελεστή (70-80 %) συσχετίζονται οι παραμέτρους μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$ , ενώ ο συντελεστής συσχέτισης για τις στατιστικές παραμέτρους  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  είναι αρκετά μικρός. Η παρατήρηση αυτή οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα των παραμέτρων

---

ύψους,  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{ZDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ , προβλέπουν με μεγάλη ακρίβεια τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, τα μοντέλα των παραμέτρων μήκους  $R_s$  και  $R_{sm}$  προβλέπουν ικανοποιητικά τις τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών, ενώ τα αποτελέσματα του συντελεστή συσχέτισης για τις τις στατιστικές παραμέτρους  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα μοντέλα δεν είναι σε θέση, για τα συγκεκριμένα μεγέθη, να προβλέπουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές.

Συγκρίνοντας τον συντελεστή συσχέτισης των μοντέλων διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο συντελεστή συσχέτισης παρουσιάζουν τα πολυωνμικά πρότυπα δευτέρου βαθμού, το μικρότερο συντελεστή συσχέτισης έχουν τα πολυωνμικά πρότυπα πρώτου βαθμού, ενώ τα πρότυπα αλληλεπίδρασης και τα λογαριθμικά πρότυπα «βρίσκονται στη μέση». Πρέπει όμως να επισημανθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης, από πρότυπο σε πρότυπο, δεν έχει μεγάλες διαφορές, δηλαδή ως 'καλύτερο' πρότυπο μπορούμε να θεωρηθεί το πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού χωρίς όμως να έχει μεγάλη διαφορά από τα άλλα. Αυτή η παρατήρηση ισχύει και για τους τρεις χάλυβες.

Στα ίδια συμπεράσματα, δηλαδή ότι το πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού είναι το 'καλύτερο' χωρίς να έχει μεγάλη διαφορά από τα υπόλοιπα, καταλήγουμε αν συγκρίνουμε τα μοντέλα μέσω σφαλμάτων. Δίνοντας τις δυνατές τιμές της έντασης παλμού  $I_e$  και της χρονικής διάρκειας εκκένωσης  $t_e$  σε όλα τα μοντέλα παίρνουμε τις τιμές των παραμέτρων  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_s$ ,  $R_{sk}$ ,  $R_{ku}$ ,  $R_{ZDIN}$ ,  $R_{pm}$ ,  $R_y$ ,  $R_{sm}$ . Γνωρίζοντας και τις πειραματικές τιμές, βρίσκουμε το απόλυτο σφάλμα. Πίνακες με τις τιμές που παίρνουν τα μοντέλα για κάθε παράμετρο κάθε υλικού, όταν δώσουμε τους κατάλληλους συνδυασμούς τιμών στα  $I_e$  και  $t_e$ , καθώς και τα απόλυτα σφάλματα αυτών, παρουσιάζονται στα *Παραρτήματα 16, 17 και 18*. Παρατηρώντας τα παραρτήματα αυτά προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πρότυπο με τα μικρότερα σφάλματα, το 'καλύτερο' δηλαδή πρότυπο, είναι και πάλι το πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού ενώ ακολουθούν το πρότυπο της αλληλεπίδρασης και το λογαριθμικό πρότυπο. Τα μεγαλύτερα σφάλματα υπολογίζονται για το πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού.

Στο σημείο αυτό πρέπει να γίνει αναφορά στους πίνακες ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis), *Παραρτήματα 4 έως 15*, στους οποίους παρουσιάζονται οι στατιστικοί έλεγχοι P (P-values).

Παρατηρώντας τα παραρτήματα αυτά θα διαπιστώσουμε ότι τιμές των P μεγαλύτερες του 0.05 – γεγονός που σημαίνει ότι οι όροι αυτοί δεν παίζουν σημαντικό ρόλο στο μοντέλο και μπορούν να παραλειφθούν- έχουμε κυρίως σε όρους αλληλεπίδρασης των μοντέλων του προτύπου αλληλεπίδρασης και του πολυωνμικού προτύπου δευτέρου βαθμού καθώς και σε όρους των παραμέτρων  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$  για όλα τα μοντέλα. Αυτό σημαίνει ότι αφενός στην πρώτη περίπτωση κάποιοι όροι αλληλεπιδράσεων είναι περιττοί, αφετέρου στη δεύτερη περίπτωση είναι λογικό να συμβαίνει αυτό μιας και οι παράμετροι αυτοί εμφανίζουν μικρό συντελεστή συσχέτισης.

Στους ίδιους πίνακες παρουσιάζονται επίσης οι τιμές των ελεγχουσυναρτήσεων T. Η απόλυτη τιμή των ελεγχουσυναρτήσεων T μας δείχνει το πόσο στατιστικά σημαντικός είναι ένας όρος. Αν παρατηρήσουμε τους πίνακες αυτούς θα διαπιστώσουμε ότι είναι μάλλον δύσκολο να εκτιμήσουμε με βεβαιότητα ποιός όρος είναι πιο σημαντικός στο κάθε μοντέλο. Για το πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού, η ένταση παλμού  $I_e$  μπορούμε να πούμε ότι παίρνει σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις τιμές μεγαλύτερες από τη χρονική διάρκεια εκκένωσης  $t_e$  και άρα παίζει μεγαλύτερο ρόλο στα μοντέλα το ίδιο δε, ισχύει και για το λογαριθμικό πρότυπο. Για τα άλλα δύο πρότυπα, το πρότυπο αλληλεπίδρασης και το πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού,

---

πολλές φορές παίζουν ρόλο και οι αλληλεπιδράσεις  $I_e I_e$ ,  $t_e t_e$ ,  $I_e t_e$ . Για το πρότυπο αλληλεπίδρασης, η αλληλεπίδραση  $I_e t_e$ , παίρνει αρκετά μεγάλη τιμή σε αρκετές περιπτώσεις, ενώ για το πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού, δεν μπορούμε να απαφανθούμε με βεβαιότητα ποιιά αλληλεπίδραση παίζει το σημαντικότερο ρόλο, δεδομένου ότι σε κάθε παράμετρο που εξετάζουμε παίζουν ρόλο και διαφορετικές αλληλεπιδράσεις.

Τέλος ένας άλλος τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων σε ό,τι αναφορά το αν το μοντέλο ικανοποιεί τις προϋποθέσεις εκείνες που μας επιτρέπουν τη χρήση του, είναι τα διαγράμματα υπολοίπων ή καταλοίπων. Στη διπλωματική αυτή εργασία χρησιμοποιήθηκαν τα υπόλοιπα για το πολυωνυμικό πρότυπο δεύτερης τάξης. Το ίδιο βέβαια ισχύει και για τα υπόλοιπα πρότυπα. Από τα διαγράμματα αυτά καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι τα υπόλοιπα ακολουθούν την κανονική κατανομή και είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Συνεπώς ικανοποιούν τις υποθέσεις που έγιναν, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι μπορούν να εφαρμοσθούν.

## 6.2 Μελλοντικές εργασίες.

Υπάρχει μια σειρά προτάσεων που αφορούν μελλοντικές εργασίες ως συνέχεια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Η πολυπαραμετρική ανάλυση που έγινε, αφορά μια σειρά τριών χαλύβων (SVERKER 21, IMPAX και ORVAR) μπορεί να εφαρμοσθεί για οποιαδήποτε άλλο υλικό σιδηρούχο ή μη αρκεί αυτό να είναι αγωγίμο, άρα να επιδέχεται Η/Δ.

Οι παράμετροι οι οποίες μετρήθηκαν και κατόπιν μοντελοποιήθηκαν (χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές) είναι οι παράμετροι ύψους  $R_a$ ,  $R_p$ ,  $R_q$ ,  $R_v$ ,  $R_t$ ,  $R_{ZDIN}$ ,  $R_y$ ,  $R_{pm}$ , οι παράμετροι μήκους  $R_s$ ,  $R_{sm}$  και οι στατιστικές παράμετροι  $R_{sk}$  και  $R_{ku}$ . Για την πληρέστερη κατανόηση της μορφής της επιφάνειας όμως θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και άλλες παράμετροι όπως, η καμπύλη της φέρουσας επιφάνειας και οι σχετικές της παράμετροι, η ομάδα των παραμέτρων  $R_k$  και οι παράμετροι fractal.

Επίσης θα μπορούσε να προσεγγιστεί η καμπύλη της φέρουσας επιφάνειας μέσω πολυωνύμου 3<sup>ης</sup> τάξης. Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να γίνει για κατεργασίες διαφορετικού τύπου π.χ. μια συμβατική και μια μη συμβατική ή μια κατεργασία θερμικής φύσης και μια μηχανικής φύσης.

Τα προφίλ τραχύτητας που πήραμε είναι σε δύο διαστάσεις (με ένα τραχύμετρο τύπου Rank Taylor-Hobson Sutronic 3+). Με τον κατάλληλο εξοπλισμό, ένα προφιλόμετρο, θα μπορούσαμε να πάρουμε προφίλ τραχύτητας σε τρεις διαστάσεις.

Στα μοντέλα τώρα χρησιμοποιήθηκαν ως εξαρτημένες μεταβλητές οι συνθήκες κατεργασίας οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη μηχανή Η/Δς για να πάρουμε τα δοκίμια. Αυτές είναι η ένταση παλμού  $I_e$  και η χρονική διάρκεια εκκένωσης  $t_e$ . Θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως εξαρτημένες μεταβλητές και κάποιες από τις φυσικές ιδιότητες των υλικών.

Εκτός από τα τέσσερα μοντέλα που επιλέχθηκαν (πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού, πρότυπο αλληλεπίδρασης, λογαριθμικό πρότυπο και πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού) θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αρκετά άλλα πρότυπα π.χ. εκθετικά, υπερβολικά κ.α.

Τέλος ιδιαίτερο ενδιαφέρον εκτιμάται ότι έχει η εφαρμογή μοντέλων πολυπαραμετρική ανάλυσης και σε άλλες παραμέτρους της ομοιομορφίας επιφάνειας (ενδεικτικά: κατανομή μικροσκληρότητας, παραμένουσες τάσεις κ.λ.π.). Μια τέτοια επέκταση δεν απαιτεί κατάσκευή νέων δοκιμίων.



---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

---

### ΣΥΓΓΡΑΜΑΤΑ

Σ. Αντωνίου, “Τριβολογία”, Τ.Ε.Ι. Πειραιά, 2<sup>η</sup> εκδ., 1994.

Ι. Κουτρουβέλης, “Πιθανότητες και Στατιστική ΙΙ, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Πάτρα, 2000.

Α. Μάμαλης, “Τεχνολογία των Κατεργασιών των Υλικών : Μη συμβατικές Κατεργασίες”, εκδ. Άνωση, Αθήνα, 2000.

Κ.-Δ. Μπουζάκης, “Μορφοποιήσεις με αφαίρεση υλικού”, εκδ. Ζήτη, 2<sup>η</sup> εκδ., Θεσσαλονίκη, 2001.

Π.Γ. Πετρόπουλος, “Μηχανουργική τεχνολογία – Τεχνολογία κατεργασιών κοπής των μετάλλων Τόμος ΙΙ-Ι”, εκδ. Ζήτη, Θεσσαλονίκη, 1991.

G.F. Benedict, “Non traditional Manufacturing Processes”, Marcel Dekker, N. York, 1987.

D.R. Cox, N. Reid, “The Theory of the Design of Experiments”, Chapman & Hall/CRC, 2000.

H. Dagnall, “Exploring Surface Texture”, Rank Taylor Hobson, Leicester, 1980.

A. Ghosh, A.K. Mallik, “Manufacturing Science”, EWP, N. Delhi, 1991.

S. Kalpakjian, S.R. Schmid, “Manufacturing Processes for Engineering Materials”, Prentice Hall, 4<sup>th</sup> ed., N. Jersey, 2003.

A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, A.P. Karafillis, “Surface Integrity and Formability of Steel Sheets”, VDI Verlag, Düsseldorf (1990)

R.L. Mason, R.F. Gunst, J.L. Hess, “Statistical Design and Analysis of Experiments”, Wiley-Interscience, 2<sup>nd</sup> ed., 1998.

Rank Taylor Hobson, “Talyprofile Handbook -version 1.1.1”, 1995.

### ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Chang-Xue Feng, X. Wang, “Development of Empirical Models for Surface Roughness Prediction in Finish Turning”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 20(5) (2002).

- 
- E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, "Roughness parameters", *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (2002) 133-145.
- K.H. Ho, S.T. Newman, "State of the art in electrical discharge machining (EDM)", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13) (2003) 1287-1300
- K.H. Ho, S.T. Newman, S. Rahimifard, R.D. Allen "State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)", *Journal of Machine Tools and Manufacture*, 44 (12-13) (2004) 1247-1259.
- A.G. Mamalis, G.C. Vosniakos, N.M. Vaxevanidis and J. Prohaszka, "Macroscopic and microscopic phenomena of electro-discharge machined steel surfaces: An experimental investigation", *Journal of Mechanical Working Technology*, 15(8) (1987) 335-356.
- A.G. Mamalis, G.C. Vosniakos, N.M. Vaxevanidis, J.Z. Xiong, "Residual stress distribution and structural phenomena of high-strength steel surfaces due to EDM and ball-drop forming", *Annals of the CIRP*, 37(1) (1988) 531-535.
- M.N. Noordin, V.C. Venkatesh, S. Elting, A. Abdullah, "Application of response surface methodology in describing the performance of coating carbide tool when turning AISI 1045 steel", *Journal of Materials Processing Technology*, 145 (2004) 48-58.
- F. Müller, J. Monaghan, "Non-conventional machining of particle reinforced metal matrix composite", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(9) (2000) 1351-1366.
- B. Nowicki, "Multiparameter Representation of Surface Roughness", *Wear*, 102 (1985) 161-176.
- J. Peters, P. Vanherck, M. Sastrodinoto, "Assessment of Surface Topography Analysis Techniques", *Annals of the CIRP*, 28(2) (1979) 539-554.
- G.P. Petropoulos, N.M. Vaxevanidis, and C.N. Pantazaras, "Statistic al multi-parameter analysis of E.D.Machined surface textures", *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156 (2004) 1247-1251.
- J. Prohaszka, A.G. Mamalis, N.M. Vaxevanidis, "The effect of electrode material on machinability in wire electro-discharge machining, *Journal of Materials Processing Technology* 69 (1997) 233-237.
- I. Puertas, C.J. Luis, G. Villa, Spacing roughness parameters study on the EDM of silicon carbide, *Journal of Materials Processing Technology*, 164-165 (2005) 889-896.
- J. Raja, B. Muralikrishnan, S. Fu, "Recent advances in separation of roughness, waviness and form", *Journal of International Society for Engineering and Nanotechnology* 26 (2003) 222-235.



---

H. Ramasawmy, L. Blunt, Effect of EDM process parameters on 3D surface topography, *Journal of Materials Processing Technology*, 148 (2004) 155-164.

Y. Sahin, A.R. Motorcu, "Surface roughness model for machining mild steel", *Journal of Material & Design*, (in press, corrected Proof, available online 29 July 2004, www.sciencedirect.com)

G.H. Schaffer, "The Many Faces of Surface Texture", Special Report 801, *American Machinist*, (June 1988) 61-68.

R. Snoeys, F. Staelens, W. Dekeyser, "Current trends in non-conventional material removal processes", *Annals of the CIRP*, 35(2) (1986) 467-480.

H. C. Tsai, B. H. Yan, F.Y. Huang, "EDM performance of Cr/Cu-based composite electrodes", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(3) (2003) 245-252.

#### **ΑΡΘΡΑ ΑΠΟ ΣΥΝΕΔΡΙΑ**

A. Νίκας, Γ. Πετρόπουλος, Κ. Πανταζάρας, Ν.Μ. Βαξεβανίδης, "Τριβολογικός χαρακτηρισμός ηλεκτροδιαβρωμένων επιφανειών χάλυβα Ck60", 1<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Μεταλλικών Υλικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 29-30/11/2001, Βόλος, σελ. 247-253.

P. Dasic, "The choice Regression equation in fields of metal working", 3<sup>rd</sup> *International Conference "Research and development in mechanical industry" RaDMI 2003*, Herce Novi, Serbia and Montenegro, 19-23 September 2003.

G. Petropoulos, N. Vaxevanidis, A. Iakovou, K. David, "Multi-parameter model of surface texture for EDMachining of tool steel using design of experiments", *Proceedings of 1<sup>st</sup> Manufacturing Enginnering Society International Conference "SIC-CISIF"*, 19-21 September 2005, Calatayud, Spain, 2005, paper S1-046.

N.M. Vaxevanidis, P.P. Psyllaki, G.P. Petropoulos, N. Hasiotis, "Surface integrity and microstructural phenomena of Ck 60 steel due to EDM", *Steels and Materials for Power Plants- Proc. EUROMAT 99*, 7, Wiley-VCH, 1999, pp. 240-247.

N.M. Vaxevanidis, "Recent advances towards better quality and integrity of metal surfaces produced by electro-discharge machining", *Proc. Recent Advances in Mechanical Engineering - ASME Int.-Greek Section*, 17-20/9/2001, Patra, Greece, paper ANG1/P151.

---

## ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ

N.M. Βαξεβανίδης, “Εισαγωγή στη Μηχανουργική Τεχνολογία - 4: Ομοιομορφία Επιφανείας”, Σχολή Ικάρων/ΥΑΕ , 2<sup>η</sup> Έκδοση-10/2004.

N.M. Βαξεβανίδης, “12: Μη συμβατικές κατεργασίες κοπής”, Σημειώσεις για το μάθημα Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής, Τμήμα ΜΜΒ/Παν. Θεσσαλίας, 06/2005.

## ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ

<http://www.predev.com>

<http://stat-athens.aueb.gr>

<http://www.minitab.com>

<http://www.taylor-hobson.com>

<http://www.com-tal.com/scansbig/edm.jpg>

<http://www.bellkeywiredm.com/>

---

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

---

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι:** Πίνακés αναλυτικών αποτελεσμάτων, κάθε παραμέτρου και για τις 10 τραχυμετρήσεις του χάλυβα SVERKER 21.

Συνθήκες :  $I_0 = 5 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$

ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 15 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	4,05	12	5,1	16	28	95,3	-0,485	3,13	21,9	28	148	9,59
2	4,23	11,8	5,33	12,7	24,4	77,6	-0,32	2,45	20,7	23,5	174	9,16
3	3,56	15,9	4,48	13,5	29,4	80	-0,0334	3,45	20,2	25,6	148	9,76
4	3,51	7,94	4,31	12,4	20,3	75,6	-0,537	2,76	17,6	18,8	181	6,76
5	3,58	10,9	4,52	11,8	22,7	96	-0,257	2,73	20	22,7	155	9,55
6	3,84	12,5	4,73	11,3	23,8	83,4	0,271	2,57	18,4	21,1	131	10,5
7	4,1	11,5	5	9,84	21,4	69,8	0,0957	2,35	20,4	21,4	134	11
8	4,22	14,2	5,16	10,4	24,7	85,5	0,305	2,52	20,2	24,7	156	11
9	4,14	11,4	4,88	12,5	23,9	80,8	-0,126	2,3	18,2	20,7	196	8,94
10	4,27	14,2	5,15	12,5	26,9	77,1	-0,0642	2,31	20,8	23,2	143	10,8
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>3,95</b>	<b>12,234</b>	<b>4,866</b>	<b>12,294</b>	<b>24,55</b>	<b>82,11</b>	<b>-0,11509</b>	<b>2,657</b>	<b>19,84</b>	<b>22,97</b>	<b>156,6</b>	<b>9,706</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 10 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$

ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 30 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	4,78	10	6,09	17,7	27,7	97,8	-0,845	3,11	23,5	27,7	228	9,2
2	4,59	11,7	5,44	10,6	22,3	123	0,138	2,09	19,8	21,4	273	10,5
3	3,9	10,2	5,09	20,6	30,8	82,8	0,267	4,57	22,4	30	224	7,95
4	5,07	11,3	6,4	19	30,3	95,9	-0,908	3,2	24,5	29	317	9,35
5	3,76	12,2	4,8	14,7	26,9	131	-0,476	3,34	20,5	23,4	362	8,76
6	4,34	13	6	22	35	98,4	-1,2	5,18	23,2	35	195	8,89
7	3,3	6,53	4,17	14,6	21,2	119	-0,918	4,21	15,5	21	172	6,26
8	3,46	11,1	4,35	11,9	25	87,2	-0,457	3	19,5	22,1	241	8,08
9	4,79	12,4	5,72	10,7	23,1	137	0,0621	2,14	20,8	23,1	290	10,8
10	4,41	12,9	5,66	15,3	28,2	87,5	-0,377	3,16	22	27,4	222	9,04
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>4,24</b>	<b>11,133</b>	<b>5,372</b>	<b>15,71</b>	<b>27,05</b>	<b>105,96</b>	<b>-0,47139</b>	<b>3,4</b>	<b>21,17</b>	<b>26,01</b>	<b>252,4</b>	<b>8,883</b>

Συνθήκες :  $I_e = 5 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ msec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 45 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	5,58	13,9	6,88	17,2	31,2	90	-0,38	2,61	26,9	31,2	268	11,9
2	4,9	11,4	6,28	25,6	37	97,4	-0,892	4,49	25,1	35,9	186	9,53
3	5,19	12,4	6,36	17,8	30,2	91	-0,459	2,58	23,5	30,2	234	10,3
4	4,9	11,8	6,28	26	37,8	110	-0,908	4,48	24,9	36,3	186	9,45
5	5,14	17,5	6,38	13,8	31,2	67,2	-0,00746	2,76	23,5	31,2	259	12,7
6	5,17	26,5	6,49	16,8	43,3	98,9	0,146	3,48	28,5	39,8	200	15,1
7	5,28	14	6,47	18,2	32,2	99,6	-0,295	2,72	27,7	30,5	213	13,1
8	5,29	14	6,6	24	38	93,5	-0,629	3,61	27,4	36,9	208	11,5
9	5,67	14,3	7,07	20,2	34,5	63,7	-0,486	2,79	27,6	33,7	214	11,5
10	5,45	13,3	6,51	19,3	32,6	32,6	-0,469	2,7	25,4	32,6	249	11,8
<b>M.OPOI</b>	<b>5,257</b>	<b>14,91</b>	<b>6,532</b>	<b>19,89</b>	<b>34,8</b>	<b>84,39</b>	<b>-0,43795</b>	<b>3,222</b>	<b>26,05</b>	<b>33,83</b>	<b>221,7</b>	<b>11,688</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ msec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 60 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,56	33,2	10,8	28,9	62,1	96,5	-0,0173	2,99	42,4	54,1	197	22,5
2	7,1	32	8,74	19,4	51,4	82,6	0,715	3,7	36,7	44,8	211	21,6
3	8,54	34	10,6	28,3	62,3	92,8	0,357	3,01	45,5	50,7	245	25,4
4	8,34	30,3	10,4	28,1	58,4	70,3	0,319	3,01	44	50,1	212	23,9
5	8,51	35	11	23,7	58,7	95,8	0,688	3,51	44,3	53,7	185	25,8
6	7,99	22,5	9,64	21,2	43,7	84,7	0,253	2,4	37,1	43,6	179	20,7
7	7,68	23,3	9,34	22,5	45,7	91,2	0,433	2,58	38,1	43,8	180	21,8
8	7,56	27,7	9,32	24,8	52,5	74,1	0,378	2,94	41,1	47	202	22,4
9	7,13	25,3	8,98	22,9	48,2	112	0,166	2,95	39,9	46,3	185	20,3
10	8,05	29,4	10,3	21,5	50,9	88,4	0,524	3,13	40,6	50,9	192	23
<b>M.OPOI</b>	<b>7,946</b>	<b>29,27</b>	<b>9,912</b>	<b>24,13</b>	<b>53,39</b>	<b>88,84</b>	<b>0,38157</b>	<b>3,022</b>	<b>40,97</b>	<b>48,5</b>	<b>198,8</b>	<b>22,74</b>

Συνθήκες :  $I_e = 5 \text{ A}$   $t_e = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 75 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,16	27,7	9,7	22,2	49,9	66,5	0,189	2,42	39,8	49,9	258	22,1
2	7,96	31	9,85	18,7	49,7	77,5	0,438	3,01	41,5	49,7	206	24
3	8,04	22,3	9,89	24,8	47,1	85,1	0,137	2,56	39,2	47,1	199	20,8
4	8,02	40	10,2	23,8	63,8	81,4	0,676	4,27	39,9	59,6	288	22,3
5	7,88	28,4	9,78	17,9	46,3	74,2	0,383	2,77	37,5	44,8	206	21,1
6	7,19	21,5	8,79	19,3	40,8	82,8	0,157	2,51	36,1	40,5	178	18,7
7	8,64	23,6	10,6	26,5	50,1	91,6	-0,0865	2,53	41,5	47,1	213	20,8
8	8,39	25,7	10,6	27,4	53,1	112	-0,0625	2,71	41,4	46,3	174	21
9	7,14	29,6	8,68	17,9	47,5	91,9	0,47	2,85	36,2	42,1	236	21
10	8,29	28,1	10	24,8	52,8	116	-0,0376	2,59	41	52,8	255	22,1
<b>M.OPOI</b>	<b>7,971</b>	<b>27,79</b>	<b>9,809</b>	<b>22,33</b>	<b>50,11</b>	<b>87,9</b>	<b>0,22634</b>	<b>2,822</b>	<b>39,41</b>	<b>47,99</b>	<b>221,3</b>	<b>21,39</b>

Συνθήκες :  $I_e = 10 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 90 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7,88	23,3	9,68	23,8	47,1	92,3	-0,346	2,49	38,1	43,5	236	16,6
2	8,87	27,4	10,8	24,5	51,9	105	-0,102	2,49	41,7	48,3	272	21,2
3	8,33	22,3	10	23,5	45,8	66,5	0,122	2,19	37,8	40,9	220	20,1
4	8,69	36,9	11,1	24,5	61,4	84,7	0,264	3,16	45,3	61,4	170	23,8
5	7,76	27,5	9,52	19,9	47,4	80,3	0,325	2,74	36,7	46,3	202	18,7
6	8,01	31,4	10,7	32,2	63,6	104	0,164	3,87	42,3	63,6	223	21,2
7	7,92	32	10,6	31,6	63,6	97,3	0,159	3,91	42,2	63,6	223	21,6
8	8,12	25,6	9,83	21,6	47,2	90,3	-0,314	2,44	34,9	47,2	257	16,6
9	8,94	36,6	10,8	24,4	61	110	0,405	3,04	39,7	61	277	21,9
10	8,16	34,2	10,2	33,3	67,5	102	-0,107	3,44	41,8	52	219	19,6
<b>M.OPOI</b>	<b>8,268</b>	<b>29,72</b>	<b>10,323</b>	<b>25,93</b>	<b>55,65</b>	<b>93,24</b>	<b>0,057</b>	<b>2,977</b>	<b>40,05</b>	<b>52,78</b>	<b>229,9</b>	<b>20,13</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 90 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,6	34,3	10,8	26	60,3	71,1	0,141	3,21	39,9	57,6	214	20,5
2	8	35,5	10,5	21,2	56,8	87,4	0,931	4,04	40,9	53,3	239	25
3	7,88	36,3	10,5	21,6	58	122	0,777	4,1	39,9	56,4	217	23,8
4	8,17	34,5	10,8	22,4	56,9	122	0,505	3,92	41,6	56,9	234	24,3
5	9,17	33,7	11,4	25,5	59,2	109	0,71	2,92	43,7	54,3	307	25
6	8,13	33	10,6	22,5	55,5	134	0,824	3,78	42,4	55,5	254	25,1
7	7,56	36,7	9,98	22	58,7	78,4	0,516	4,4	43,3	52,8	211	25,7
8	7,55	27	9,34	29,3	56,3	60	0,572	3,12	37,5	56,3	477	20,4
9	7,58	31	9,72	18,5	49,5	77,9	0,744	3,31	37,6	43,6	278	24,1
10	8,56	35,7	11,3	28,2	63,9	70,8	0,625	3,95	42,5	63,9	242	23,8
<b>M.OPOI</b>	<b>8,12</b>	<b>33,77</b>	<b>10,494</b>	<b>23,72</b>	<b>57,51</b>	<b>93,26</b>	<b>0,6345</b>	<b>3,675</b>	<b>40,93</b>	<b>55,06</b>	<b>267,3</b>	<b>23,77</b>

Συνθήκες :  $I_e = 10 \text{ A}$   $t_e = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 150 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,53	21,4	10,5	24,5	45,8	76	-0,249	2,38	39,4	42	203	18,3
2	8,23	30,3	9,91	29,6	59,2	96,7	-0,178	2,73	39,4	59,9	259	19,6
3	8,38	19,1	9,84	24,6	43,7	67,7	-0,0232	2,13	38,1	41,3	370	17,5
4	9,3	29,5	11,3	30,1	59,5	93,8	-0,136	2,58	42,7	47,2	247	21
5	7,71	25,5	9,62	23,1	48,7	123	0,249	2,94	33,8	45,5	304	17,7
6	7,8	33,5	10	26,2	59,7	90,7	0,305	3,19	43,7	59,7	220	23,7
7	9,25	27,5	11,1	26,8	54,4	85,4	0,0836	2,45	42,4	50,2	384	20,6
8	8,04	29,3	9,74	19,1	48,4	62,4	0,703	2,86	38,3	46,5	396	22,6
9	8,84	30,7	10,8	21,6	52,3	66,8	0,336	2,56	40,7	50,3	352	22,5
10	8,73	25,9	10,6	32,2	58,1	74,4	-0,121	2,67	41,8	47,1	254	18,5
<b>M.OPOI</b>	<b>8,481</b>	<b>27,27</b>	<b>10,341</b>	<b>25,78</b>	<b>52,98</b>	<b>83,69</b>	<b>0,09694</b>	<b>2,649</b>	<b>40,03</b>	<b>48,97</b>	<b>298,9</b>	<b>20,2</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 300 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 180 \text{ mJ}$

A/A	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	10,7	41,1	13,9	37,9	79	138	0,43	3,81	50,3	77,5	323	28,1
2	10,8	42,8	15,7	26,6	69,4	148	0,508	3,4	53,3	68,4	293	28,2
3	12,2	34,3	15,1	28,6	62,8	115	0,105	2,49	53,5	62,8	295	27,5
4	11,3	29,8	13,3	31,4	61,3	88,3	0,0269	2,13	47,5	61,3	226	23,9
5	11,9	37,4	14,6	31,4	68,9	83,1	0,177	2,41	53,7	61	331	28,4
6	10,2	33	13	32,1	65,1	76,1	-0,0158	3,14	45,4	65,1	270	24,1
7	12,7	39,6	15	26,8	66,4	118	0,376	2,31	53,5	66	316	28,5
8	10,5	30,4	12,6	19,7	50,1	76,6	0,449	2,14	43,1	50,1	350	24,8
9	11,7	41,3	14	25,6	66,9	118	0,542	2,6	48,3	62,7	333	27,8
10	10,9	29,1	12,7	26,9	56	82,8	0,0838	2,19	44,5	56	314	25,5
<b>M.OPOI</b>	<b>11,29</b>	<b>35,88</b>	<b>13,99</b>	<b>28,7</b>	<b>64,59</b>	<b>104,39</b>	<b>0,26819</b>	<b>2,662</b>	<b>49,31</b>	<b>63,09</b>	<b>305,1</b>	<b>26,68</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 300 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 270 \text{ mJ}$

A/A	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	11,3	50,8	14,9	35,2	85,9	151	0,737	4,16	55,5	73,3	289	31,4
2	12,7	35,3	15,7	35,8	71,1	101	0,0684	2,33	58,6	67,3	333	30,8
3	12,3	35,7	15	29,1	64,8	69,9	0,285	2,44	49,8	64,8	351	25,3
4	12,7	40,8	15,2	30	70,9	157	0,266	2,32	56,3	70,9	364	30,6
5	12,1	45,1	15,5	48,1	93,2	242	0,211	3,49	61,4	93,2	395	31
6	13,2	52,1	16,8	31,7	83,8	159	0,392	2,97	64,1	83,8	273	35,2
7	12,1	41	15,5	39	80	114	-0,134	2,88	60,2	72,2	209	29,6
8	11,8	31,2	14,9	44,2	75,3	93,8	-0,561	3,11	54,3	67,8	249	23,6
9	13	46,5	15,2	30,2	76,7	145	0,374	2,5	53,7	74,5	385	29,5
10	13,8	58,4	17,5	37,9	96,3	168	0,778	3,66	59,2	82,2	250	33,4
<b>M.OPOI</b>	<b>12,5</b>	<b>43,69</b>	<b>15,62</b>	<b>36,12</b>	<b>79,8</b>	<b>140,07</b>	<b>0,24164</b>	<b>2,986</b>	<b>57,31</b>	<b>75</b>	<b>309,8</b>	<b>30,04</b>



Συνθήκες :  $I_0 = 20 \text{ A}$   $t_0 = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 300 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	14,9	37,3	17,4	34,5	71,8	157	-0,0245	2,03	59	71,8	350	29,1
2	13	42,2	15,7	34,5	76,7	99,3	0,105	2,39	59,5	76,7	320	32
3	13,5	51,1	16,6	38,7	89,8	150	0,595	3,08	61,2	89,8	371	33,9
4	13,3	41,9	15,6	31,1	73	158	0,205	2,37	52,5	68,2	362	26,5
5	13,4	42	15,7	30,3	72,3	165	0,244	2,47	53,6	68,3	495	26,1
6	13,8	35,7	16,4	30,9	66,6	102	0,115	2,18	52	63,4	364	26,7
7	14,6	49,8	17,8	37,1	86,9	142	0,107	2,71	60,4	86,9	318	32
8	13,8	30,5	16,2	41,6	72	109	-0,239	2,14	55,9	72	261	26,6
9	13,9	30,1	16,3	42	72,1	117	-0,248	2,12	56,4	72,1	261	26,8
10	13	39,1	15,5	26,4	65,5	125	0,278	2,19	49,8	65,5	425	26,6
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>13,72</b>	<b>39,97</b>	<b>16,32</b>	<b>34,71</b>	<b>74,67</b>	<b>132,43</b>	<b>0,11375</b>	<b>2,368</b>	<b>56,03</b>	<b>73,47</b>	<b>352,7</b>	<b>28,63</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 30 \text{ A}$   $t_0 = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 450 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	15,6	46,8	19,6	46,2	93,1	76,5	0,426	2,67	65,7	93,1	290	35,2
2	14,3	48,7	18,1	38,6	87,3	151	0,508	2,87	67,4	87,3	449	36,6
3	14	51,6	17,6	41,1	92,7	148	0,809	3,24	66,7	77,8	511	39,3
4	15,2	43,4	18,3	47,7	91,1	110	0,161	2,36	65,4	91,1	359	33,4
5	13,5	40,8	16,5	44,7	85,5	121	0,085	2,67	60,2	69,1	391	29,4
6	14,8	51,7	19,9	48	99,6	167	0,328	3,38	68,5	99,4	340	33
7	14,7	52,6	19,6	44,8	97,5	143	0,472	3,47	66,7	97,5	307	35,6
8	14,8	54,1	18,1	33,9	87,9	197	0,522	2,81	65,6	83,4	294	35,4
9	15,2	45,1	18,8	45,2	90,3	152	0,0817	2,6	70,2	90,3	418	35,1
10	15	46,1	18,6	43,7	89,8	147	0,122	2,59	72,3	89	367	37
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>14,71</b>	<b>48,09</b>	<b>18,51</b>	<b>43,39</b>	<b>91,48</b>	<b>141,25</b>	<b>0,35147</b>	<b>2,866</b>	<b>66,87</b>	<b>87,8</b>	<b>372,6</b>	<b>35</b>

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 2:** Πίνακές αναλυτικών αποτελεσμάτων, κάθε παραμέτρου και για τις 10 τραχομετρήσεις του χάλυβα IMPAX.

Συνθήκες :  $I_0 = 5 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$

ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 15 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	4,46	16,4	5,62	13,4	29,8	84	0,137	2,8	23,4	29,3	134	11,9
2	4,32	15	5,39	13,7	28,7	83,9	-0,0617	2,74	23,2	28,2	140	11
3	3,82	10,8	4,83	22,1	32,9	92,6	-0,67	4,13	21,4	26,9	196	8,33
4	4,06	17,1	5,32	15,1	32,3	81,2	-0,098	3,62	23,2	32,3	183	12
5	4,04	17,1	5,3	15,2	32,3	83,1	-0,0938	3,69	23,2	32,3	184	11,8
6	3,96	16,9	5,15	14,6	31,5	85,3	-0,133	3,56	21,9	31,5	164	10,8
7	5,12	28,2	6,57	15,4	43,6	83,8	0,692	4,69	27,3	43,6	144	15
8	4,7	17	5,59	11,9	28,9	62,2	0,286	2,53	23	26	168	12,2
9	4,75	20,5	5,95	14,8	35,3	78,1	0,114	3,2	26,2	33,1	142	13
10	4,65	20,4	5,96	15,8	36,1	87,8	0,25	3,37	26,8	36,1	140	14,8
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>4,388</b>	<b>17,94</b>	<b>5,568</b>	<b>15,2</b>	<b>33,14</b>	<b>82,2</b>	<b>0,04225</b>	<b>3,433</b>	<b>23,96</b>	<b>31,93</b>	<b>159,5</b>	<b>12,083</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 10 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$

ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 30 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	4,76	9,7	5,94	20	31,8	83,9	-0,102	2,8	21,03	31,8	234	8,47
2	4,68	13,5	6,21	16	47,4	74,2	-0,54	4,37	20,8	47,4	289	9,1
3	4,89	15	6,18	19	34,2	83,5	-0,0657	2,97	27,2	34,2	221	12,6
4	4,3	15,1	5,77	17,6	47,8	56,6	-1,16	6,92	24,1	47,8	148	10,7
5	4,24	16,7	5,57	16,7	30,2	39,1	-0,685	3,89	24,3	30,2	127	12,4
6	4,76	12,6	6,07	17,6	33,5	64	0,136	2,93	21,4	33,5	211	9,6
7	4,4	11,9	5,64	35,9	32,6	70,1	-0,0767	3,02	25,2	29,6	189	9,08
8	4,98	18,1	6,24	16,1	34	26,7	-0,256	2,89	27,5	30,3	79,4	13,1
9	3,84	20,5	5,12	29,9	29,6	29,4	-0,829	4,08	29,1	28,9	57,6	11,7
10	4,17	15,6	5,35	16,2	29,5	30,6	-0,371	3,15	25,3	29,5	133	31,8
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>4,502</b>	<b>14,87</b>	<b>5,809</b>	<b>20,5</b>	<b>35,06</b>	<b>55,81</b>	<b>-0,39494</b>	<b>3,702</b>	<b>24,593</b>	<b>34,32</b>	<b>168,9</b>	<b>12,855</b>

Συνθήκες :  $I_e = 5 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 45 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	6,34	13,8	7,84	14,3	42	110	-0,239	2,79	21,4	33,4	204	11,3
2	5,17	13,8	6,43	15	38,9	114	-0,532	3,42	22,1	38,9	208	11,1
3	5,98	15,1	7,15	16,8	35,4	88,1	-0,481	2,5	24,4	32,1	209	12,4
4	4,09	15,9	5,35	15,5	36,8	103	0,298	3,93	22,8	32,9	219	11
5	4,87	12,4	6,44	16,1	30,5	78,7	0,415	3,03	22,5	29,6	196	10,7
6	4,72	16,3	5,91	14,3	28,5	88,4	-0,391	2,93	27,4	27,2	185	15,1
7	4,3	20,3	5,32	16,5	51,4	85	-0,101	2,87	23,8	31,4	228	13,2
8	4,38	14,1	6,12	21,3	31,9	8	0,0525	2,48	26,6	28,8	235	11,6
9	4,22	16,4	5,48	22,4	28,7	90,9	-0,0209	2,81	26,6	26,5	234	11,5
10	5,11	19,7	5,27	22,3	28	78,8	0,106	2,75	32,4	23,5	215	14,7
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>4,918</b>	<b>15,78</b>	<b>6,131</b>	<b>17,45</b>	<b>35,21</b>	<b>84,49</b>	<b>-0,08934</b>	<b>2,951</b>	<b>25</b>	<b>30,43</b>	<b>213,3</b>	<b>12,26</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 60 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7	22,9	8,58	14,3	37,2	72,5	0,463	2,49	33,8	37,2	222	20,4
2	7,2	30,9	9,37	17,7	48,6	71,8	0,742	3,87	37,8	48,6	220	23,1
3	6,46	20,6	7,95	15,2	35,9	66,2	0,306	2,47	30,5	35	208	17,6
4	6,92	23,7	8,53	13,8	37,5	70,7	0,478	2,53	32,9	37,5	209	14,7
5	7,23	31,7	8,94	20,3	55,2	48,7	0,479	3,14	36,1	49,4	188	21,4
6	7,5	26,8	9,36	21	47,8	95,7	0,466	2,73	36,9	47,8	205	20,6
7	7,49	31,7	9,48	19,9	51,6	74	0,53	3,25	41,4	47,9	199	24,6
8	6,23	23,2	7,83	16,9	40,1	50,4	0,417	2,97	32,5	39	189	18,4
9	6,9	28,6	8,8	16	44,6	72	0,923	3,43	37,1	40,5	193	24,6
10	6,42	29,2	8,52	18	47,3	87,6	0,862	4,37	36	44,6	247	20,8
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>6,935</b>	<b>26,93</b>	<b>8,736</b>	<b>17,31</b>	<b>44,58</b>	<b>70,96</b>	<b>0,5666</b>	<b>3,125</b>	<b>35,5</b>	<b>42,75</b>	<b>208</b>	<b>20,62</b>

Συνθήκες :  $I_e = 5 \text{ A}$   $t_e = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 75 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7,49	31,2	9,38	19,9	51,1	45,5	0,547	3,16	40	47,5	198	22,1
2	7,54	31,4	9,4	18,8	50,2	47,5	0,558	3,15	38,8	47	157	21,8
3	8,88	43,5	11,2	22	65,5	112	0,681	4,44	42,1	65,5	243	23,1
4	7,84	27,6	9,64	21,7	49,3	36,2	0,382	2,79	40,9	49,3	113	23
5	6,33	25,9	8,28	22,3	48,2	33,8	0,183	3,4	36,3	48,2	79,7	19,5
6	6,79	27,1	8,47	23,6	50,6	34	0,378	2,87	39,1	43,4	89,1	22
7	7,07	25,2	8,75	18,6	43,8	43,2	0,592	3,12	35,7	43,1	178	19
8	8,33	42	10,5	40,5	82,5	38,7	0,249	3,46	51,2	82,5	79,5	25,4
9	7,28	31,6	9,38	19,3	50,9	39,4	0,51	3,44	42,3	48,7	121	24,8
10	6,31	24,5	8,09	17,7	42,2	51,2	0,358	3,25	35,8	41,7	176	21
<b>M.OPOI</b>	<b>7,386</b>	<b>31</b>	<b>9,309</b>	<b>22,44</b>	<b>53,43</b>	<b>48,15</b>	<b>0,4438</b>	<b>3,308</b>	<b>40,22</b>	<b>51,69</b>	<b>143,43</b>	<b>22,17</b>

Συνθήκες :  $I_e = 10 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 90 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7,72	33,1	10,4	27,1	60,2	52,6	0,566	3,96	41,5	60,2	167	22,7
2	9,16	24,9	11,1	24,8	49,8	59,3	0,214	2,33	41,9	49,5	177	21,8
3	9,27	26,6	11,4	26,4	53	59	0,333	2,38	43,6	50,1	255	24,3
4	7,61	27,6	9,46	18,8	46,3	53,1	0,542	2,9	38,4	42	184	23
5	9,53	32	11,8	26,2	58,3	48,9	0,42	2,5	47,8	58,3	155	26,3
6	8,83	28	11,3	41,3	69,3	35,9	-0,0375	3,08	49,2	69,3	112	24,2
7	8,56	25,6	10,6	28,2	53,8	44,9	0,16	2,56	41,8	53,8	232	22,1
8	9,68	37,4	11,7	22,6	60	55,9	0,298	2,71	43,7	53,2	263	24,4
9	9,59	29,4	11,5	27,5	56,9	34,2	-0,0449	2,38	42	56,9	186	21,4
10	9,02	31,9	11	22,2	54,1	41,4	0,286	2,65	43,2	54,1	211	24,7
<b>M.OPOI</b>	<b>8,897</b>	<b>29,65</b>	<b>11,026</b>	<b>26,51</b>	<b>56,17</b>	<b>48,52</b>	<b>0,27366</b>	<b>2,745</b>	<b>43,31</b>	<b>54,74</b>	<b>194,2</b>	<b>23,49</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 100 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 90 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,09	23,6	9,98	26,7	50,3	43,7	-0,319	2,76	39,8	50,3	189	18,8
2	11,8	34,8	14,6	30,8	65,6	57,2	0,174	2,54	42,1	65	265	32,2
3	11,5	43,8	15,3	72,4	116	65,8	-0,311	5,05	67,5	109	156	33,7
4	7,4	32	9,86	31	63	76,5	-0,0853	4,03	42,3	55,3	200	21,2
5	8,69	32,9	11	22	54,9	46,7	0,46	2,93	44,2	54,9	172	25,6
6	9,84	39,1	12,2	32,2	71,2	47,7	0,331	3,57	54,2	71,2	246	29,9
7	11,3	42,3	14	26,1	68,4	71,2	0,659	3,03	53,2	66,2	237	33
8	7,66	32,9	9,62	20,7	53,7	55,9	0,372	3,25	37,9	53,7	214	20,8
9	11,9	54,9	15,8	26,1	81,1	73,8	1,25	4,52	63,4	75,7	231	40,4
10	11	36,2	15,4	51	87,2	95	0,0839	2,89	52,8	69,7	266	24,9
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>9,918</b>	<b>37,25</b>	<b>12,776</b>	<b>33,9</b>	<b>71,14</b>	<b>63,35</b>	<b>0,26146</b>	<b>3,457</b>	<b>49,74</b>	<b>67,1</b>	<b>217,6</b>	<b>28,05</b>

Συνθήκες :  $I_e = 10 \text{ A}$   $t_e = 500 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 150 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	11	35,7	13,5	24,1	59,9	106	0,554	2,48	49,5	57,9	251	28,7
2	12,5	38,6	14,4	20,7	59,3	91	0,415	2,05	51,1	55,5	338	32
3	11,8	48,8	15,1	48,2	97	150	0,288	3,69	57,5	72,7	269	28,8
4	10,1	55	12,7	33,2	88,2	49,3	0,145	3,18	59	82,5	135	31,7
5	11,1	35,7	13,9	48,9	84,6	105	-0,0684	3,02	52,1	72,8	315	25,2
6	10,7	32,3	12,6	24,7	57,1	86,3	0,509	2,41	45,8	49	284	27,7
7	10,3	33,1	12,5	24,1	57,2	99,6	0,321	2,55	42,7	57,2	312	21,5
8	11,1	34,8	13,1	22,4	57,2	93,9	0,413	2,31	44,4	53,5	284	25
9	9,98	31,2	12,6	32,2	63,5	96,4	0,131	3	48,4	61,5	325	26,3
10	10,9	43,2	14,1	38,8	82	151	0,585	3,4	55,1	68,9	244	31,7
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>10,948</b>	<b>38,84</b>	<b>13,45</b>	<b>31,73</b>	<b>70,6</b>	<b>102,85</b>	<b>0,32926</b>	<b>2,809</b>	<b>50,56</b>	<b>63,15</b>	<b>275,7</b>	<b>27,86</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 180 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	13,1	47,3	17,6	58,2	106	116	-0,557	4,49	64,8	86,1	261	31,3
2	12	52,4	15,6	41,1	93,5	105	0,673	3,91	60,7	93,5	290	31,6
3	11,9	29,8	14,2	36,9	66,7	59,7	0,238	2,24	53,4	66,7	266	27,5
4	15,4	42,1	17,8	33,4	75,5	77,4	0,349	2,11	61,9	67,2	500	34
5	12,2	44,9	15,2	33,4	78,3	53,1	0,399	2,94	58,7	76,6	208	32,5
6	12	40,8	15	30,4	71,2	44,5	0,555	2,88	59,7	67,6	225	32,6
7	15,2	40,4	18,2	43,8	84,3	53,8	0,171	2,3	70	79,9	205	35,1
8	13,6	42,7	17,3	54,7	97,4	77,2	-0,15	3,35	69,4	84,8	274	33,6
9	13	38,4	16,3	36,5	74,9	57	-0,135	2,5	63,9	73,8	228	30,5
10	12,2	42,9	15,4	35,5	78,4	59,8	0,25	2,57	60,8	71,6	276	33,7
<b>M.OPOI</b>	<b>13,06</b>	<b>42,17</b>	<b>16,26</b>	<b>40,39</b>	<b>82,62</b>	<b>70,35</b>	<b>0,1793</b>	<b>2,929</b>	<b>62,33</b>	<b>76,78</b>	<b>273,3</b>	<b>32,24</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 270 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	13,6	53,8	16,9	28,9	82,8	136	0,823	3,33	59,4	75,5	295	34,9
2	13,8	57,3	16,9	26,7	84	115	0,838	3,67	55,6	79,8	413	33,2
3	13,7	46	16,5	37,7	83,7	113	0,0894	2,59	58,1	74,9	326	30
4	12,9	44,5	15,9	30,6	75,1	126	0,695	2,99	60,6	68,6	335	34,8
5	12,3	47,6	15,2	21,9	69,5	112	0,892	3,19	52,4	68,3	344	34,6
6	12,7	48,8	16,3	31,6	80,4	112	0,643	3,38	62,5	80	243	34,7
7	14,2	56,5	18,6	31,9	88,4	109	0,828	3,41	72,7	85	286	45,1
8	13,5	45,1	16,6	27,3	72,3	90,6	0,714	2,83	59,7	72,3	251	36,7
9	13,2	40	15,4	43,4	83,4	152	-0,0836	3,25	54,7	83,4	282	27,6
10	13,5	41,5	16	31,3	72,8	114	0,433	2,39	59,1	72,8	281	32,9
<b>M.OPOI</b>	<b>13,34</b>	<b>48,11</b>	<b>16,43</b>	<b>31,13</b>	<b>79,24</b>	<b>117,96</b>	<b>0,58718</b>	<b>3,103</b>	<b>59,48</b>	<b>76,06</b>	<b>305,6</b>	<b>34,45</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 20 \text{ A}$   $t_0 = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 300 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	12	36	15	28,8	64,8	56,8	0,359	2,68	55,1	64,4	227	28,2
2	15,1	63,1	19,9	43,2	106	62,1	0,758	3,54	69,8	88,3	297	39,5
3	12,9	55,2	16,4	61,7	117	51,8	0,186	3,19	68,4	117	314	35
4	10,8	28,2	13,2	33	61,2	44,7	-0,138	2,42	50,5	57,6	152	23,3
5	10,7	38,2	13,5	38,3	76,6	83,4	-0,235	3,15	54,1	75,7	281	25,3
6	14,7	48,2	18	42,5	90,7	166	0,38	2,55	64,5	90,7	270	35,2
7	13	33	15,2	29,7	62,7	89,7	0,344	2,1	56,7	62,3	252	31,2
8	14	53,8	17,5	35,8	89,6	107	0,458	3,04	63,2	89,6	294	35,7
9	16,7	43,7	20	57,4	101	127	0,13	2,33	72,1	101	298	37,8
10	14	43,9	17	45,4	89,3	156	0,254	2,57	62,2	89,3	344	31,9
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>13,39</b>	<b>44,33</b>	<b>16,57</b>	<b>41,58</b>	<b>85,89</b>	<b>94,45</b>	<b>0,2496</b>	<b>2,757</b>	<b>61,66</b>	<b>83,59</b>	<b>272,9</b>	<b>32,31</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 30 \text{ A}$   $t_0 = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 450 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	15,2	69,3	19,9	47,9	117	153	0,999	4,55	71,8	117	499	39,2
2	13,4	47,4	17,2	37,6	85	49,1	0,661	3,13	69,2	75,9	342	39
3	15,5	37,2	19	53,5	90,8	118	-0,472	2,78	68,3	86,6	266	31,2
4	12,3	46,8	16	37,7	84,5	166	0,288	3,38	52,4	84,5	334	27,2
5	13,9	54,5	17,5	41,1	95,6	145	0,189	2,93	68,3	83,7	327	35,3
6	16,9	63	20,7	41,2	104	108	0,65	3,17	73,9	99,8	407	37,9
7	17,4	62	21,1	40,1	102	151	0,678	2,83	69,7	102	470	42,2
8	13,4	43,7	16,7	37,3	81	106	0,374	2,82	62	81	333	33,2
9	11,3	39,2	13,7	37,3	76,6	46,5	0,335	2,86	54,9	67,4	250	29,4
10	17,2	59,2	21,8	53,8	113	99,5	0,0978	3,25	76,9	109	294	37,1
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>14,65</b>	<b>52,23</b>	<b>18,36</b>	<b>42,75</b>	<b>94,95</b>	<b>114,21</b>	<b>0,37998</b>	<b>3,17</b>	<b>66,74</b>	<b>90,69</b>	<b>352,2</b>	<b>35,17</b>

**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 3:** Πίνακες αναλυτικών αποτελεσμάτων, κάθε παραμέτρου και για τις 10 τραχυμετρήσεις του χάλυβα **ORVAR**.

Συνθήκες :  $I_e = 5 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 15 \text{ mJ}$

A/A	R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>p</sub> [μm]	R <sub>q</sub> [μm]	R <sub>v</sub> [μm]	R <sub>t</sub> [μm]	R <sub>s</sub> [μm]	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>zDIN</sub> [μm]	R <sub>y</sub> [μm]	R <sub>sm</sub> [μm]	R <sub>pm</sub> [μm]
1	5,32	15,5	6,52	14,5	30	80,1	0,188	2,52	26,6	27,6	186	14,4
2	5,05	16,9	6,11	12,3	29,2	88,4	0,436	2,65	24,3	28	187	14,4
3	5,74	17	7,14	20,3	37,3	92,3	-0,135	2,79	28,6	37,9	188	14,3
4	5,01	19	6,55	17,5	36,6	88	0,087	3,24	29,2	30,6	188	14,4
5	5,17	19,3	6,74	17,8	37,1	93,9	0,0343	3,24	29,5	37,1	185	16,2
6	5,21	20,8	6,71	16,3	37,1	81	0,363	3,07	28,8	32,7	149	14,2
7	5,65	15,3	6,74	16,5	31,8	90	0,076	2,16	26,3	31,8	157	12,5
8	5,19	15,1	6,36	19	34,1	87,5	-0,118	2,76	25,1	34,1	154	16,1
9	5,45	21,2	6,92	16,4	37,6	88,1	0,338	2,92	29,3	33	172	16,5
10	5,36	21,1	6,86	16,4	37,5	85,3	0,362	3,01	29,9	33,2	155	16,5
<b>M.OPOI</b>	<b>5,315</b>	<b>18,12</b>	<b>6,665</b>	<b>16,7</b>	<b>34,82</b>	<b>87,46</b>	<b>0,16403</b>	<b>2,826</b>	<b>27,65</b>	<b>33,12</b>	<b>165,7</b>	<b>14,63</b>

Συνθήκες :  $I_e = 10 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 30 \text{ mJ}$

A/A	R <sub>a</sub> [μm]	R <sub>p</sub> [μm]	R <sub>q</sub> [μm]	R <sub>v</sub> [μm]	R <sub>t</sub> [μm]	R <sub>s</sub> [μm]	R <sub>sk</sub>	R <sub>ku</sub>	R <sub>zDIN</sub> [μm]	R <sub>y</sub> [μm]	R <sub>sm</sub> [μm]	R <sub>pm</sub> [μm]
1	6,35	31,6	8,42	20,4	52	96,3	0,603	4,46	39,6	49,3	178	23,1
2	6,21	20,4	7,62	18,3	38,8	110	-0,0768	2,69	28,3	34,7	257	14,9
3	6,2	26,8	7,7	18	44,7	90,5	0,562	3,42	32,8	39,9	192	19,5
4	5,8	24,8	7,38	19	43,8	101	0,35	3,25	31,2	43,8	168	17,5
5	6,58	21,4	8,27	19,7	41,2	90,7	0,196	2,81	33,1	39,7	189	18
6	5,96	17,3	7,25	17,9	35,2	93,6	0,157	2,57	30	34,7	247	15,7
7	6,16	19	7,44	17,3	36,4	138	-0,0867	2,5	28,1	34,4	245	14,7
8	5,78	15,3	7,19	19,3	34,6	95,8	-0,0409	2,75	26,9	32,4	171	13,8
9	5,51	22,4	6,74	14,5	37	144	0,301	3,02	25,3	34,5	236	13,9
10	5,56	22,3	6,77	14,6	36,9	133	0,299	2,98	25,3	34,1	226	14
<b>M.OPOI</b>	<b>6,011</b>	<b>22,13</b>	<b>7,478</b>	<b>17,9</b>	<b>40,06</b>	<b>109,29</b>	<b>0,22636</b>	<b>3,045</b>	<b>30,06</b>	<b>37,75</b>	<b>210,9</b>	<b>16,51</b>



Συνθήκες :  $I_e = 5 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 45 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	6,52	26,7	8,47	22,5	49,2	154	-0,0418	3,44	32,3	49,2	261	16,2
2	6,76	21,7	8,32	17,7	39,5	121	0,345	2,73	31,5	38,8	287	15,7
3	6,86	22,6	8,47	19,8	42,4	154	0,261	2,9	32,6	42,4	290	16,3
4	6,99	23,2	8,6	19,6	42,7	160	0,265	2,93	32,9	42,7	269	16,8
5	7,14	23,4	8,77	19,9	43,2	144	0,194	2,92	33,4	43,2	327	16,7
6	7,19	23,3	8,82	20,1	43,4	132	0,172	2,91	33,5	43,4	295	16,8
7	6,69	20,4	20,4	21,6	42	123	-0,135	2,78	30,2	39,6	265	15,2
8	6,25	16,6	16,6	22,6	39,2	198	-0,543	2,87	27,9	39,1	295	12,1
9	6,13	16	16	20,8	36,8	176	-0,612	2,83	28,2	36,8	270	11,5
10	6,36	25,5	25,5	18,3	43,8	130	0,313	3,08	32,7	43,8	249	17,2
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>6,689</b>	<b>21,94</b>	<b>12,995</b>	<b>20,29</b>	<b>42,22</b>	<b>149,2</b>	<b>0,02182</b>	<b>2,939</b>	<b>31,52</b>	<b>41,9</b>	<b>280,8</b>	<b>15,45</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 100 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 60 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7,34	44,4	10,4	30,4	74,8	116	1,26	6,53	43,2	74,8	212	25,7
2	7,37	29,9	9,56	29,8	59,8	117	0,423	3,9	43,5	53,4	227	24,5
3	7,53	28,1	9,01	23,6	51,7	113	0,321	2,67	35,1	40,4	285	19,5
4	7,74	28,1	9,39	18,4	46,4	82,1	0,23	2,61	36,2	41,2	250	21,2
5	7,88	30,5	9,49	18,4	48,9	93,1	0,361	2,72	35,9	46,1	286	20,5
6	7,58	29	9,06	23,6	52,6	103	0,332	2,7	36,7	45,2	262	20,7
7	7,1	28,1	8,94	18,6	46,7	85	0,637	3,27	36,2	40,1	228	20,9
8	7,23	30,9	9,34	28,8	59,7	116	0,388	3,96	41,4	52,5	226	24,3
9	7,37	31	9,56	29	60	108	0,459	3,93	42,1	52,7	226	25,1
10	7,38	31	9,58	29,6	60,5	105	0,449	3,92	43,8	53,3	227	25,1
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>7,452</b>	<b>31,1</b>	<b>9,433</b>	<b>25,02</b>	<b>56,11</b>	<b>103,82</b>	<b>0,486</b>	<b>3,621</b>	<b>39,41</b>	<b>49,97</b>	<b>242,9</b>	<b>22,75</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 5 \text{ A}$   $t_0 = 500 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 75 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7,89	29	9,83	24,3	53,4	152	-0,0527	2,89	40,5	48,8	264	20,4
2	7,8	28	9,85	24,4	52,3	155	-0,128	2,94	40,6	48,4	266	20,3
3	7,38	19,2	9,58	23,1	42,2	143	-0,4	2,75	30,5	42,2	380	13,2
4	7,27	16,1	8,37	16,3	32,4	125	0,0976	1,89	26,5	32,4	301	13
5	7,51	18,5	8,97	18,2	36,7	99,7	0,0662	2,17	32,3	36,7	352	16,5
6	7,87	24,5	9,62	17,1	41,6	153	0,294	2,36	34,1	37,2	318	20
7	7,88	18,6	9,44	17,3	35,9	145	0,123	2,17	34	35,9	379	18,3
8	7,98	33,6	10,2	22,3	55,9	188	0,291	3,33	38,6	55,9	276	21,2
9	7,55	21,2	9	16,3	37,5	125	0,215	2,16	32,3	36,5	388	17,6
10	7,63	19,4	9,15	19,5	38,9	112	0,022	2,25	32,6	38,9	393	16,6
<b>M.OPOI</b>	<b>7,676</b>	<b>22,81</b>	<b>9,401</b>	<b>19,88</b>	<b>42,68</b>	<b>139,77</b>	<b>0,05281</b>	<b>2,491</b>	<b>34,2</b>	<b>41,29</b>	<b>331,7</b>	<b>17,71</b>

Συνθήκες :  $I_0 = 10 \text{ A}$   $t_0 = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_0 = 90 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,47	26,2	10,9	27,9	54,1	105	0,0122	2,89	41,2	50,6	225	21
2	8,11	30,2	10,2	22,9	53,1	116	0,0899	2,94	39,8	53,1	235	22
3	8,23	30,8	10,2	22,3	53,1	133	-0,0478	2,74	40,9	50,3	259	19,7
4	8,36	30,4	10,3	23,1	53,5	128	-0,0754	2,68	40,8	49	262	19,5
5	8,45	30,6	10,4	22,5	53,2	135	-0,0226	2,61	40,8	49,8	263	17,7
6	8,51	31	10,5	23,1	54,1	147	-0,0446	2,6	41,3	49,8	263	19,8
7	7,92	29,4	9,66	19,9	49,3	87,8	0,566	3,04	42,3	49,3	290	25,1
8	7,94	29,5	9,69	20,6	50,1	95,7	0,55	3,05	42,3	50,1	290	24,9
9	7,29	23,6	8,94	21,7	45,3	109	0,0765	2,55	35,6	40	241	18,4
10	8,16	29,6	10,3	22,5	52,1	116	0,106	2,84	39,9	52,1	239	21,8
<b>M.OPOI</b>	<b>8,144</b>	<b>29,13</b>	<b>10,109</b>	<b>22,65</b>	<b>51,79</b>	<b>117,25</b>	<b>0,12102</b>	<b>2,794</b>	<b>40,49</b>	<b>49,41</b>	<b>256,7</b>	<b>20,99</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 100 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 90 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	7,54	35,3	9,9	23	58,3	83	0,598	3,85	41,4	58,3	263	23,4
2	7,59	36,1	10	22,1	58,2	76	0,571	3,77	41,3	58,2	226	23,6
3	8,04	27	10,6	22,9	50	73,4	0,389	3	41,7	50	183	23,3
4	7,89	29,8	10,3	18,3	48,1	75,3	0,756	3,31	35,1	48,1	208	19,6
5	8,22	37,4	10,9	22,1	59,5	87,9	1,04	4,16	44,2	59,5	222	29,5
6	8,15	37	10,8	21,9	58,9	88,8	1,05	4,21	43,1	58,9	249	28,6
7	8,25	29,4	10,3	25,3	54,7	101	0,379	2,96	40,8	54,7	238	22,1
8	8,12	30	10,1	32,9	63	93,9	0,222	3,16	41,8	63	284	21,3
9	8,26	30,9	10,6	19,7	50,5	87,9	0,603	2,98	41,6	49,3	187	24,8
10	7,54	27,8	9,82	17,6	45,4	61,6	0,767	3,48	32,9	45,4	240	18,3
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>7,96</b>	<b>32,07</b>	<b>10,332</b>	<b>22,58</b>	<b>54,66</b>	<b>82,88</b>	<b>0,6375</b>	<b>3,488</b>	<b>40,39</b>	<b>54,54</b>	<b>230</b>	<b>23,45</b>

Συνθήκες :  $I_e = 10 \text{ A}$   $t_e = 500 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 150 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	8,94	26,8	11	23,6	50,4	128	0,0451	2,41	40,8	50,4	308	20,6
2	8,41	20,9	10	22,7	43,6	158	-0,175	2,11	32,3	43,6	332	15,7
3	9,27	25,2	11,2	25,6	50,8	93,9	-0,139	2,55	35,2	50,8	267	18
4	8,92	26,3	11	23,8	50,1	141	0,0407	2,39	40,9	50,1	308	20,5
5	9,07	25,9	11,3	26,1	52	110	-0,118	2,59	42,5	50,8	266	21,7
6	9,09	24,6	11,1	26,2	50,8	86,3	-0,133	2,58	36,7	50,8	242	17,2
7	9,23	25,1	11,2	25,6	50,6	88,7	-0,15	2,54	34,3	50,6	268	17,1
8	9,27	25	11,3	26	51	93,9	-0,144	2,55	35,4	51	267	18,2
9	8,34	20,9	9,93	23,6	44,5	117	-0,174	2,13	32,5	44,5	333	15,7
10	8,08	20,2	9,78	23,8	43,9	101	-0,0375	2,43	36,2	43,9	254	18,7
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>8,862</b>	<b>24,09</b>	<b>10,781</b>	<b>24,7</b>	<b>43,9</b>	<b>111,78</b>	<b>-0,09847</b>	<b>2,428</b>	<b>36,68</b>	<b>48,65</b>	<b>284,5</b>	<b>18,34</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 180 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	11,9	37,6	14,7	32,8	70,4	136	0,0544	2,7	54,5	62,3	308	26,3
2	11,6	37	14,2	27,4	64,4	81	0,633	2,73	56,4	61,5	259	33
3	10,5	32	12,6	26,6	58,6	99,6	0,299	2,4	46,8	50,5	330	24,8
4	12,6	50	15,7	34,7	84,7	113	0,402	3,1	60,9	79,2	243	34,3
5	10,5	24,9	12,9	36,7	61,6	110	-0,23	2,67	45,7	59	294	22,6
6	10,3	31,7	12,7	26,5	58,2	98,9	0,262	2,48	48,9	54,1	310	26,2
7	11,7	35,6	15	44,7	80,3	127	-0,00166	2,95	54,6	74,2	348	25,9
8	12,4	37,5	14,5	29,9	67,5	112	0,346	2,28	48,1	60,9	397	24,7
9	12,9	36,2	15,9	42,5	78,8	116	0,121	2,51	55,9	78,8	410	27,5
10	11,5	41,1	14,5	31,4	72,5	118	0,468	2,9	55,7	72,5	330	29,9
<b>M.OPOI</b>	<b>11,59</b>	<b>36,36</b>	<b>14,27</b>	<b>33,32</b>	<b>69,7</b>	<b>111,15</b>	<b>0,235374</b>	<b>2,672</b>	<b>52,75</b>	<b>65,3</b>	<b>322,9</b>	<b>27,52</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 300 \text{ } \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 270 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	13,2	32,3	16	42,1	74,4	136	0,0961	2,45	55,9	73	298	28,7
2	12,2	58,1	16,1	31,5	89,7	144	0,968	4,47	63,3	89,7	251	36,1
3	13,4	39,2	16,1	40,3	79,5	114	0,284	2,52	55,9	79,5	334	29,3
4	12,3	41	15,1	35,9	76,9	103	0,294	2,91	55,2	76,9	406	32,6
5	12	47,2	15,6	4,1	91,3	152	0,386	3,46	64,8	77,6	266	33,7
6	12,4	43,9	15,3	39	82,9	117	0,487	3,06	65,1	78,2	366	37,2
7	12,7	44,7	15,4	34,5	79,3	141	0,26	2,68	56,9	79,2	283	29,7
8	12,2	44,1	15	33,3	77,3	109	0,351	2,76	57,8	73,3	264	32,2
9	12,4	46,9	15,4	29,2	76,1	138	0,568	3,24	51,9	76,1	378	29,2
10	13,4	34,9	16,1	40,1	75	148	-0,101	2,15	56,1	66,6	364	28,1
<b>M.OPOI</b>	<b>12,62</b>	<b>43,23</b>	<b>15,61</b>	<b>33</b>	<b>80,24</b>	<b>130,2</b>	<b>0,35931</b>	<b>2,97</b>	<b>58,29</b>	<b>77,01</b>	<b>321</b>	<b>31,68</b>

Συνθήκες :  $I_e = 20 \text{ A}$   $t_e = 500 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 300 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	13,2	48,1	15,6	34	82,2	148	0,407	2,58	60,3	79,4	374	32,8
2	12,8	39,2	15,7	41,2	80,3	146	0,267	2,58	63,6	80	273	31,9
3	13,6	34,9	16	39,3	74,2	139	-0,0368	2,23	58,6	71,2	466	27
4	13,3	34,6	15,6	37,1	145	145	0,0465	2,19	56,7	70,3	464	27
5	13,6	35,2	16,1	38,8	127	127	-0,0577	2,23	59,8	71,1	465	27,2
6	14,4	44,4	17,6	41,3	159	159	0,228	2,74	58,1	81,1	406	29,7
7	13,3	44,8	16,4	37,9	117	117	0,225	2,88	61,1	82,8	389	31,4
8	13,5	45,1	16,5	36,5	127	127	0,24	2,8	60,2	81,6	392	31,5
9	12,7	24,8	14,8	33,8	79,8	79,8	-0,418	2,11	49	58,5	606	21,7
10	13	46,3	17,1	35,1	151	151	0,628	3,34	33,6	81,4	363	33,6
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>13,34</b>	<b>39,74</b>	<b>16,14</b>	<b>37,5</b>	<b>114,25</b>	<b>133,88</b>	<b>0,1529</b>	<b>2,568</b>	<b>56,1</b>	<b>75,74</b>	<b>419,8</b>	<b>29,38</b>

Συνθήκες :  $I_e = 30 \text{ A}$   $t_e = 500 \mu\text{sec}$   
 ΕΝΕΡΓΕΙΑ :  $W_e = 450 \text{ mJ}$

A/A Πειράματος	$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_t$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_s$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sk}$	$R_{ku}$	$R_{zDIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	$R_{pm}$ [ $\mu\text{m}$ ]
1	15,3	62,9	19,4	46,8	110	199	0,544	3,32	69,3	92,5	320	39,5
2	15,5	63,8	19,7	47,9	112	198	0,561	3,31	72,6	94,4	346	40,4
3	14,6	48,9	17,9	43,7	92,5	146	0,084	2,71	63,2	92,5	439	33
4	14,1	48,4	17,3	41,7	90,1	155	0,128	2,73	59,5	90,1	369	33,5
5	14	64,7	19,2	31,8	96,5	187	1,31	5,12	66,7	96,5	363	42
6	15,3	46	19	43,9	90	161	0,144	2,69	66	90	305	31,9
7	15,2	58,2	19,8	56,1	114	167	-0,00751	3,63	77,4	114	334	39,7
8	15,9	65,3	20,1	46	111	166	0,716	3,73	73,8	111	343	40,8
9	15,1	53,2	19,6	58,9	112	175	-0,125	3,7	76,6	112	334	37,9
10	14,1	51,5	17,4	39,5	91	121	0,201	3	68,6	84,9	256	32,3
<b>Μ.ΟΡΟΙ</b>	<b>14,91</b>	<b>56,29</b>	<b>18,94</b>	<b>45,63</b>	<b>101,91</b>	<b>167,5</b>	<b>0,355549</b>	<b>3,394</b>	<b>69,37</b>	<b>97,79</b>	<b>340,9</b>	<b>37,1</b>

**Παράρτημα 4:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) πολυωνυμικού προτύπου πρώτου βαθμού για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **SVERKER 21** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	73,392	73,392	73,392	57,31	0,000
te	1	53,179	53,179	53,179	41,53	0,000
Error	9	11,525	11,525	1,281		
Total	11	138,097				

S = 1,13164    R-Sq = 93,65%    R-Sq(adj) = 92,80%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,8182	0,8790	0,93	0,006
Ie	0,25757	0,03402	7,57	0,000
te	0,012891	0,002000	6,44	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1048,01	1048,01	1048,01	77,46	0,000
te	1	402,05	402,05	402,05	29,72	0,000
Error	9	121,77	121,77	13,53		
Total	11	1571,82				

S = 3,67829    R-Sq = 93,25%    R-Sq(adj) = 92,53%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,027	2,857	1,06	0,007
Ie	0,9733	0,1106	8,80	0,000
te	0,035446	0,006502	5,45	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	119,185	119,185	119,185	72,55	0,000
te	1	74,030	74,030	74,030	45,06	0,000
Error	9	14,786	14,786	1,643		
Total	11	208,001				

S = 1,28175    R-Sq = 94,89%    R-Sq(adj) = 93,31%

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,1106	0,9955	1,12	0,004
Ie	0,32823	0,03854	8,52	0,000
te	0,015210	0,002266	6,71	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	459,58	459,58	459,58	63,95	0,000
te	1	316,97	316,97	316,97	44,10	0,000
Error	9	64,68	64,68	7,19		
Total	11	841,23				

---

S = 2,68080 R-Sq = 91,31% R-Sq(adj) = 90,60%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	6,143	2,082	2,95	0,016
Ie	0,64455	0,08060	8,00	0,000
te	0,031473	0,004739	6,64	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2917,0	2917,0	2917,0	101,00	0,000
te	1	1478,0	1478,0	1478,0	51,18	0,000
Error	9	259,9	259,9	28,9		
Total	11	4655,0				

S = 5,37409 R-Sq = 94,42% R-Sq(adj) = 93,18%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,939	4,174	2,14	0,031
Ie	1,6238	0,1616	10,05	0,000
te	0,067963	0,009500	7,15	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2742,0	2742,0	2742,0	12,09	0,007
te	1	705,0	705,0	705,0	3,11	0,012
Error	9	2041,1	2041,1	226,8		
Total	11	5488,1				

S = 15,0597 R-Sq = 81,81% R-Sq(adj) = 79,54%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	63,46	11,70	5,43	0,000
Ie	1,5744	0,4528	3,48	0,007
te	0,04694	0,02662	1,76	0,012

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,58330	0,58330	0,58330	9,45	0,013
te	1	0,01610	0,01610	0,01610	0,26	0,622
Error	9	0,55551	0,55551	0,06172		
Total	11	1,15491				

S = 0,248441 R-Sq = 51,90% R-Sq(adj) = 59,21%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,3282	0,1930	-1,70	0,123
Ie	0,022962	0,007470	3,07	0,013
te	0,000224	0,000439	0,51	0,622

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,04294	0,04294	0,04294	0,45	0,520
te	1	0,52480	0,52480	0,52480	5,48	0,044
Error	9	0,86240	0,86240	0,09582		

---

---

Total 11 1,43014

S = 0,309551 R-Sq = 49,70% R-Sq(adj) = 47,30%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,2251	0,2404	13,41	0,000
Ie	0,006231	0,009307	0,67	0,520
te	-0,001281	0,000547	-2,34	0,044

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1359,8	1359,8	1359,8	82,87	0,000
te	1	788,6	788,6	788,6	48,06	0,000
Error	9	147,7	147,7	16,4		
Total	11	2296,1				

S = 4,05079 R-Sq = 93,57% R-Sq(adj) = 92,14%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,588	3,146	2,73	0,023
Ie	1,1087	0,1218	9,10	0,000
te	0,049644	0,007161	6,93	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2649,6	2649,6	2649,6	102,35	0,000
te	1	1396,3	1396,3	1396,3	53,94	0,000
Error	9	233,0	233,0	25,9		
Total	11	4278,9				

S = 5,08788 R-Sq = 94,56% R-Sq(adj) = 93,35%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	7,988	3,952	2,02	0,008
Ie	1,5476	0,1530	10,12	0,000
te	0,066056	0,008994	7,34	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	9652	9652	9652	6,07	0,036
te	1	9140	9140	9140	5,75	0,040
Error	9	14316	14316	1591		
Total	11	33108				

S = 39,8837 R-Sq = 76,76% R-Sq(adj) = 74,15%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	158,56	30,98	5,12	0,001
Ie	2,954	1,199	2,46	0,036
te	0,16900	0,07051	2,40	0,040

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	480,46	480,46	480,46	70,54	0,000

---



---

te	1	201,81	201,81	201,81	29,63	0,000
Error	9	61,30	61,30	6,81		
Total	11	743,58				

S = 2,60989    R-Sq = 91,76%    R-Sq(adj) = 90,92%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,353	2,027	1,65	0,132
Ie	0,65903	0,07847	8,40	0,000
te	0,025113	0,004614	5,44	0,000

---

**Παράρτημα 5:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του προτύπου αλληλεπίδρασης για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **SVERKER 21** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	73,392	7,757	73,392	63,14	0,000
te	1	53,179	5,880	53,179	45,75	0,000
Ie*te	1	2,227	2,227	2,227	1,92	0,004
Error	8	9,299	9,299	1,162		
Total	11	138,097				

S = 1,07813    R-Sq = 94,27%    R-Sq(adj) = 93,74%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,157	1,280	1,69	0,030
Ie	0,17515	0,06780	2,58	0,000
te	0,008427	0,003747	2,25	0,000
Ie*te	0,000275	0,000199	1,38	0,004

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1048,01	280,00	1048,01	70,03	0,000
te	1	402,05	130,67	402,05	26,86	0,001
Ie*te	1	2,05	2,05	2,05	0,14	0,721
Error	8	119,72	119,72	14,97		
Total	11	1571,82				

S = 3,86852    R-Sq = 93,38%    R-Sq(adj) = 91,53%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,744	4,592	0,38	0,014
Ie	1,0523	0,2433	4,33	0,000
te	0,03972	0,01344	2,95	0,001
Ie*te	-0,000263	0,000712	-0,37	0,027

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	119,185	13,545	119,185	81,39	0,000
te	1	74,030	8,227	74,030	50,55	0,000
Ie*te	1	3,070	3,070	3,070	2,10	0,006
Error	8	11,716	11,716	1,464		
Total	11	208,001				

S = 1,21014    R-Sq = 95,37%    R-Sq(adj) = 94,26%

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,683	1,436	1,87	0,009
Ie	0,23145	0,07610	3,04	0,000
te	0,009968	0,004205	2,37	0,000
Ie*te	0,000323	0,000223	1,45	0,006

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	459,58	34,88	459,58	91,40	0,000
te	1	316,97	23,03	316,97	63,04	0,000
Ie*te	1	24,45	24,45	24,45	4,86	0,009
Error	8	40,23	40,23	5,03		
Total	11	841,23				

S = 2,24237 R-Sq = 95,22% R-Sq(adj) = 93,43%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	10,582	2,662	3,98	0,004
Ie	0,3714	0,1410	2,63	0,000
te	0,016677	0,007792	2,14	0,000
Ie*te	0,000910	0,000413	2,21	0,009

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2917,0	503,2	2917,0	95,23	0,000
te	1	1478,0	263,6	1478,0	48,25	0,000
Ie*te	1	14,9	14,9	14,9	0,49	0,005
Error	8	245,0	245,0	30,6		
Total	11	4655,0				

S = 5,53447 R-Sq = 94,74% R-Sq(adj) = 93,76%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,402	6,569	1,89	0,096
Ie	1,4107	0,3480	4,05	0,000
te	0,05642	0,01923	2,93	0,000
Ie*te	0,000710	0,001019	0,70	0,005

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2742,0	15,9	2742,0	23,11	0,001
te	1	705,0	223,3	705,0	5,94	0,041
Ie*te	1	1091,9	1091,9	1091,9	9,20	0,016
Error	8	949,2	949,2	118,7		
Total	11	5488,1				

S = 10,8929 R-Sq = 82,70% R-Sq(adj) = 80,22%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	93,12	12,93	7,20	0,000
Ie	-0,2508	0,6850	-0,37	0,001
te	-0,05193	0,03785	-1,37	0,041
Ie*te	0,006084	0,002006	3,03	0,016

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,58330	0,58155	0,58330	13,30	0,007
te	1	0,01610	0,20625	0,01610	0,37	0,061
Ie*te	1	0,20478	0,20478	0,20478	4,67	0,003
Error	8	0,35073	0,35073	0,04384		
Total	11	1,15491				

---

---

S = 0,209383 R-Sq = 59,63% R-Sq(adj) = 68,24%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,7344	0,2485	-2,95	0,007
Ie	0,04796	0,01317	3,64	0,007
te	0,001578	0,000728	2,17	0,061
Ie*te	-0,000083	0,000039	-2,16	0,003

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,04294	0,19926	0,04294	0,49	0,005
te	1	0,52480	0,00079	0,52480	5,95	0,041
Ie*te	1	0,15637	0,15637	0,15637	1,77	0,020
Error	8	0,70603	0,70603	0,08825		
Total	11	1,43014				

S = 0,297075 R-Sq = 50,63% R-Sq(adj) = 47,12%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,8702	0,3526	8,14	0,000
Ie	0,02807	0,01868	1,50	0,005
te	-0,000098	0,001032	-0,09	0,041
Ie*te	-0,000073	0,000055	-1,33	0,020

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1359,79	231,06	1359,79	77,69	0,000
te	1	788,64	141,71	788,64	45,06	0,000
Ie*te	1	7,65	7,65	7,65	0,44	0,027
Error	8	140,03	140,03	17,50		
Total	11	2296,11				

S = 4,18375 R-Sq = 93,90% R-Sq(adj) = 92,61%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,071	4,966	2,23	0,050
Ie	0,9559	0,2631	3,63	0,000
te	0,04137	0,01454	2,85	0,000
Ie*te	0,000509	0,000770	0,66	0,027

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2649,6	431,2	2649,6	99,13	0,000
te	1	1396,3	232,3	1396,3	52,24	0,000
Ie*te	1	19,1	19,1	19,1	0,72	0,002
Error	8	213,8	213,8	26,7		
Total	11	4278,9				

S = 5,16998 R-Sq = 95,00% R-Sq(adj) = 93,13%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,915	6,137	1,94	0,088
Ie	1,3059	0,3251	4,02	0,000
te	0,05296	0,01797	2,95	0,000
Ie*te	0,000806	0,000952	0,85	0,002

---

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	9652	3468	9652	5,46	0,048
te	1	9140	3638	9140	5,17	0,053
Ie*te	1	184	184	184	0,10	0,005
Error	8	14132	14132	1767		
Total	11	33108				

S = 42,0301    R-Sq = 77,31%    R-Sq(adj) = 75,31%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	146,38	49,89	2,93	0,019
Ie	3,703	2,643	1,40	0,048
te	0,2096	0,1461	1,44	0,053
Ie*te	-0,002498	0,007738	-0,32	0,005

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	480,46	127,31	480,46	63,57	0,000
te	1	201,81	64,23	201,81	26,70	0,001
Ie*te	1	0,84	0,84	0,84	0,11	0,048
Error	8	60,47	60,47	7,56		
Total	11	743,58				

S = 2,74924    R-Sq = 91,87%    R-Sq(adj) = 90,82%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,532	3,263	0,78	0,460
Ie	0,7096	0,1729	4,10	0,000
te	0,027851	0,009554	2,92	0,001
Ie*te	-0,000168	0,000506	-0,33	0,048

---

**Παράρτημα 6:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του πολυωνυμικού προτύπου δευτέρου βαθμού για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **SVERKER 21** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	73,392	8,082	73,392	103,30	0,000
te	1	53,179	3,635	53,179	74,85	0,000
Ie*Ie	1	3,779	3,779	3,779	5,32	0,041
te*te	1	1,257	1,257	1,257	1,77	0,032
Ie*te	1	2,227	2,227	2,227	3,13	0,027
Error	6	4,263	4,263	0,710		
Total	11	138,097				

S = 0,842885    R-Sq = 96,91%    R-Sq(adj) = 94,34%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,790	1,523	-0,52	0,023
Ie	0,4791	0,1421	3,37	0,000
te	0,018724	0,008278	2,26	0,000
Ie*Ie	-0,008643	0,003747	-2,31	0,041
te*te	-0,000017	0,000013	-1,33	0,032
Ie*te	0,000275	0,000155	1,77	0,027

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1048,01	80,02	1048,01	65,22	0,000
te	1	402,05	58,49	402,05	25,02	0,002
Ie*Ie	1	8,48	8,48	8,48	0,53	0,095
te*te	1	14,84	14,84	14,84	0,92	0,074
Ie*te	1	2,05	2,05	2,05	0,13	0,033
Error	6	96,41	96,41	16,07		
Total	11	1571,82				

S = 4,00845    R-Sq = 94,87%    R-Sq(adj) = 93,76%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4,778	7,243	-0,66	0,034
Ie	1,5075	0,6755	2,23	0,000
te	0,07511	0,03937	1,91	0,002
Ie*Ie	-0,01294	0,01782	-0,73	0,095
te*te	-0,000059	0,000061	-0,96	0,074
Ie*te	-0,000263	0,000738	-0,36	0,033

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	119,185	10,241	119,185	127,36	0,000
te	1	74,030	5,807	74,030	79,11	0,000
Ie*Ie	1	3,877	3,877	3,877	4,14	0,088
te*te	1	2,224	2,224	2,224	2,38	0,074
Ie*te	1	3,070	3,070	3,070	3,28	0,020
Error	6	5,615	5,615	0,936		
Total	11	208,001				

S = 0,967353    R-Sq = 97,30%    R-Sq(adj) = 96,05%

---

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,647	1,748	-0,37	0,024
Ie	0,5393	0,1630	3,31	0,000
te	0,023666	0,009500	2,49	0,000
Ie*Ie	-0,008754	0,004301	-2,04	0,088
te*te	-0,000023	0,000015	-1,54	0,074
Ie*te	0,000323	0,000178	1,81	0,020

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	459,58	16,48	459,58	132,31	0,000
te	1	316,97	28,80	316,97	91,26	0,000
Ie*Ie	1	4,00	4,00	4,00	1,15	0,024
te*te	1	15,39	15,39	15,39	4,43	0,080
Ie*te	1	24,45	24,45	24,45	7,04	0,038
Error	6	20,84	20,84	3,47		
Total	11	841,23				

S = 1,86371 R-Sq = 97,52% R-Sq(adj) = 95,46%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,864	3,367	1,44	0,078
Ie	0,6841	0,3141	2,18	0,000
te	0,05271	0,01830	2,88	0,000
Ie*Ie	-0,008892	0,008286	-1,07	0,024
te*te	-0,000060	0,000029	-2,10	0,080
Ie*te	0,000910	0,000343	2,65	0,038

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2917,03	186,75	2917,03	110,32	0,000
te	1	1478,05	158,92	1478,05	55,90	0,000
Ie*Ie	1	32,57	32,57	32,57	1,23	0,010
te*te	1	53,82	53,82	53,82	2,04	0,004
Ie*te	1	14,89	14,89	14,89	0,56	0,481
Error	6	158,65	158,65	26,44		
Total	11	4655,00				

S = 5,14215 R-Sq = 96,59% R-Sq(adj) = 94,75%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,173	9,291	-0,02	0,086
Ie	2,3031	0,8666	2,66	0,000
te	0,12381	0,05050	2,45	0,000
Ie*Ie	-0,02537	0,02286	-1,11	0,010
te*te	-0,000112	0,000079	-1,43	0,004
Ie*te	0,000710	0,000947	0,75	0,481

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2742,0	1,3	2742,0	17,99	0,005
te	1	705,0	0,0	705,0	4,62	0,045
Ie*Ie	1	0,2	0,2	0,2	0,00	0,076
te*te	1	34,4	34,4	34,4	0,23	0,051
Ie*te	1	1091,9	1091,9	1091,9	7,16	0,037
Error	6	914,7	914,7	152,4		
Total	11	5488,1				

---

S = 12,3469 R-Sq = 83,33% R-Sq(adj) = 81,45%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	87,06	22,31	3,90	0,008
Ie	-0,190	2,081	-0,09	0,005
te	0,0020	0,1213	0,02	0,045
Ie*Ie	-0,00173	0,05489	-0,03	0,076
te*te	-0,000090	0,000189	-0,48	0,051
Ie*te	0,006084	0,002273	2,68	0,037

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,58330	0,08793	0,58330	11,21	0,015
te	1	0,01610	0,00051	0,01610	0,31	0,098
Ie*Ie	1	0,00017	0,00017	0,00017	0,00	0,057
te*te	1	0,03843	0,03843	0,03843	0,74	0,023
Ie*te	1	0,20478	0,20478	0,20478	3,94	0,094
Error	6	0,31214	0,31214	0,05202		
Total	11	1,15491				

S = 0,228086 R-Sq = 72,97% R-Sq(adj) = 69,45%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,5566	0,4121	-1,35	0,026
Ie	0,04997	0,03844	1,30	0,015
te	-0,000222	0,002240	-0,10	0,057
Ie*Ie	-0,000057	0,001014	-0,06	0,057
te*te	0,000003	0,000003	0,86	0,023
Ie*te	-0,000083	0,000042	-1,98	0,094

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,04294	0,05086	0,04294	0,49	0,010
te	1	0,52480	0,00122	0,52480	6,00	0,050
Ie*Ie	1	0,17860	0,17860	0,17860	2,04	0,003
te*te	1	0,00230	0,00230	0,00230	0,03	0,077
Ie*te	1	0,15637	0,15637	0,15637	1,79	0,030
Error	6	0,52513	0,52513	0,08752		
Total	11	1,43014				

S = 0,295841 R-Sq = 63,28% R-Sq(adj) = 60,68%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,2281	0,5345	6,04	0,001
Ie	-0,03801	0,04986	-0,76	0,010
te	0,000343	0,002905	0,12	0,050
Ie*Ie	0,001879	0,001315	1,43	0,003
te*te	-0,000001	0,000005	-0,16	0,077
Ie*te	-0,000073	0,000054	-1,34	0,030

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1359,79	109,02	1359,79	84,44	0,000
te	1	788,64	65,08	788,64	48,97	0,000
Ie*Ie	1	26,42	26,42	26,42	1,64	0,047
te*te	1	16,98	16,98	16,98	1,05	0,044
Ie*te	1	7,65	7,65	7,65	0,48	0,016



---

Error 6 96,62 96,62 16,10  
 Total 11 2296,11  
 S = 4,01290 R-Sq = 95,79% R-Sq(adj) = 92,29%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,155	7,251	0,30	0,076
Ie	1,7597	0,6763	2,60	0,000
te	0,07922	0,03941	2,01	0,000
Ie*Ie	-0,02285	0,01784	-1,28	0,047
te*te	-0,000063	0,000061	-1,03	0,044
Ie*te	0,000509	0,000739	0,69	0,016

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2649,60	151,52	2649,60	124,51	0,000
te	1	1396,30	162,73	1396,30	65,62	0,000
Ie*Ie	1	24,16	24,16	24,16	1,14	0,028
te*te	1	61,99	61,99	61,99	2,91	0,039
Ie*te	1	19,15	19,15	19,15	0,90	0,079
Error	6	127,68	127,68	21,28		
Total	11	4278,87				

S = 4,61304 R-Sq = 97,02% R-Sq(adj) = 95,53%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,422	8,335	-0,05	0,061
Ie	2,0745	0,7774	2,67	0,000
te	0,12528	0,04530	2,77	0,000
Ie*Ie	-0,02185	0,02051	-1,07	0,028
te*te	-0,000121	0,000071	-1,71	0,039
Ie*te	0,000806	0,000849	0,95	0,079

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	9652	6501	9652	6,03	0,049
te	1	9140	1832	9140	5,71	0,054
Ie*Ie	1	3997	3997	3997	2,50	0,065
te*te	1	526	526	526	0,33	0,087
Ie*te	1	184	184	184	0,11	0,046
Error	6	9609	9609	1602		
Total	11	33108				

S = 40,0188 R-Sq = 78,98% R-Sq(adj) = 75,79%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	63,63	72,31	0,88	0,013
Ie	13,588	6,744	2,01	0,049
te	0,4203	0,3930	1,07	0,054
Ie*Ie	-0,2811	0,1779	-1,58	0,065
te*te	-0,000351	0,000613	-0,57	0,087
Ie*te	-0,002498	0,007368	-0,34	0,046

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	480,46	42,25	480,46	55,43	0,000
te	1	201,81	18,27	201,81	23,28	0,003
Ie*Ie	1	6,09	6,09	6,09	0,70	0,034

---

---

te*te	1	2,37	2,37	2,37	0,27	0,020
Ie*te	1	0,84	0,84	0,84	0,10	0,066
Error	6	52,01	52,01	8,67		
Total	11	743,58				

S = 2,94421    R-Sq = 93,01%    R-Sq(adj) = 92,18%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1,321	5,320	-0,25	0,012
Ie	1,0954	0,4962	2,21	0,000
te	0,04198	0,02891	1,45	0,003
Ie*Ie	-0,01097	0,01309	-0,84	0,034
te*te	-0,000024	0,000045	-0,52	0,020
Ie*te	-0,000168	0,000542	-0,31	0,066

---

**Παράρτημα 7:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του λογαριθμικού μοντέλου για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **SVERKER 21** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRa, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,17038	0,36500	0,17038	25,16	0,002
Lnte	1	0,31337	0,31337	0,31337	46,27	0,000
Error	6	0,04063	0,04063	0,00677		
Total	8	0,52439				

S = 0,0822948 R-Sq = 95,25% R-Sq(adj) = 93,67%

**Regression Analysis for LnRa**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,6259	0,3599	-1,74	0,033
LnIe	0,37489	0,05107	7,34	0,002
Lnte	0,32940	0,04842	6,80	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,19707	0,28886	0,19707	30,81	0,001
Lnte	1	0,10552	0,10552	0,10552	16,50	0,007
Error	6	0,03838	0,03838	0,00640		
Total	8	0,34097				

S = 0,0799789 R-Sq = 95,74% R-Sq(adj) = 92,99%

**Regression Analysis for LnRp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,5090	0,3498	4,31	0,005
LnIe	0,33351	0,04963	6,72	0,001
Lnte	0,19114	0,04706	4,06	0,007

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,19212	0,37636	0,19212	32,71	0,001
Lnte	1	0,27582	0,27582	0,27582	46,96	0,000
Error	6	0,03524	0,03524	0,00587		
Total	8	0,50318				

S = 0,0766377 R-Sq = 95,60% R-Sq(adj) = 92,66%

**Regression Analysis for LnRq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,3102	0,3352	-0,93	0,030
LnIe	0,38068	0,04756	8,00	0,001
Lnte	0,30903	0,04510	6,85	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,14790	0,29795	0,14790	26,70	0,002
Lnte	1	0,22993	0,22993	0,22993	41,51	0,001
Error	6	0,03323	0,03323	0,00554		
Total	8	0,41106				

S = 0,0744217 R-Sq = 96,92% R-Sq(adj) = 94,22%

---

**Regression Analysis for LnRv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,7973	0,3255	2,45	0,050
LnIe	0,33871	0,04618	7,33	0,002
Lnte	0,28216	0,04379	6,44	0,001

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,17710	0,30037	0,17710	38,21	0,001
Lnte	1	0,16252	0,16252	0,16252	35,06	0,001
Error	6	0,02781	0,02781	0,00463		
Total	8	0,36743				

S = 0,0680801 R-Sq = 95,43% R-Sq(adj) = 93,91%

**Regression Analysis for LnRt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,8394	0,2977	6,18	0,001
LnIe	0,34009	0,04225	8,05	0,001
Lnte	0,23722	0,04006	5,92	0,001

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,14681	0,25908	0,14681	13,81	0,010
Lnte	1	0,15347	0,15347	0,15347	14,44	0,009
Error	6	0,06378	0,06378	0,01063		
Total	8	0,36406				

S = 0,103100 R-Sq = 82,48% R-Sq(adj) = 79,64%

**Regression Analysis for LnRs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,4517	0,4509	5,44	0,002
LnIe	0,31585	0,06398	4,94	0,010
Lnte	0,23052	0,06067	3,80	0,009

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	1,3497	0,5296	1,3497	3,15	0,026
Lnte	1	0,6816	0,6816	0,6816	1,59	0,054
Error	6	2,5724	2,5724	0,4287		
Total	8	4,6036				

S = 0,654774 R-Sq = 64,12% R-Sq(adj) = 61,50%

**Regression Analysis for LnRsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,074	2,863	-0,03	0,080
LnIe	0,4516	0,4063	1,11	0,026
Lnte	-0,4858	0,3853	-1,26	0,054

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,009399	0,000057	0,009399	1,12	0,030
Lnte	1	0,056412	0,056412	0,056412	6,74	0,041
Error	6	0,050214	0,050214	0,008369		
Total	8	0,116026				

---

S = 0,0914827 R-Sq = 56,72% R-Sq(adj) = 51,29%

**Regression Analysis for LnRku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,8634	0,4001	4,66	0,003
LnIe	-0,00470	0,05677	-0,08	0,030
Lnte	-0,13976	0,05383	-2,60	0,041

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,12941	0,23910	0,12941	24,54	0,003
Lnte	1	0,15617	0,15617	0,15617	29,62	0,002
Error	6	0,03164	0,03164	0,00527		
Total	8	0,31722				

S = 0,0726165 R-Sq = 94,03% R-Sq(adj) = 93,70%

**Regression Analysis for LnRzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,6715	0,3176	5,26	0,002
LnIe	0,30342	0,04506	6,73	0,003
Lnte	0,23254	0,04273	5,44	0,002

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRy, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,18095	0,31650	0,18095	32,18	0,001
Lnte	1	0,18380	0,18380	0,18380	32,69	0,001
Error	6	0,03374	0,03374	0,00562		
Total	8	0,39848				

S = 0,0749840 R-Sq = 97,53% R-Sq(adj) = 94,71%

**Regression Analysis for LnRy**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,6746	0,3279	5,11	0,002
LnIe	0,34910	0,04653	7,50	0,001
Lnte	0,25227	0,04412	5,72	0,001

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,04306	0,10987	0,04306	2,37	0,075
Lnte	1	0,12245	0,12245	0,12245	6,73	0,041
Error	6	0,10923	0,10923	0,01821		
Total	8	0,27474				

S = 0,134928 R-Sq = 74,24% R-Sq(adj) = 75,99%

**Regression Analysis for LnRsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,8427	0,5901	6,51	0,001
LnIe	0,20568	0,08373	2,46	0,075
Lnte	0,20590	0,07940	2,59	0,041

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,16145	0,24078	0,16145	20,00	0,004
Lnte	1	0,09269	0,09269	0,09269	11,48	0,015
Error	6	0,04843	0,04843	0,00807		

---

Total 8 0,30257

S = 0,0898436 R-Sq = 92,99% R-Sq(adj) = 90,66%

**Regression Analysis for LnRpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,3405	0,3929	3,41	0,014
LnIe	0,30449	0,05575	5,46	0,004
Lnte	0,17915	0,05287	3,39	0,015

---

**Παράρτημα 8:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) πολυωνυμικού προτύπου πρώτου βαθμού για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **IMPAX** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance for (ANOVA) Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	84,906	84,906	84,906	46,25	0,000
te	1	53,205	53,205	53,205	28,98	0,000
Error	9	16,522	16,522	1,836		
Total	11	154,632				

S = 1,35491 R-Sq = 92,32% R-Sq(adj) = 91,94%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,991	1,052	0,94	0,051
Ie	0,27704	0,04074	6,80	0,000
te	0,012894	0,002395	5,38	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1031,31	1031,31	1031,31	70,05	0,000
te	1	602,22	602,22	602,22	40,91	0,000
Error	9	132,49	132,49	14,72		
Total	11	1766,03				

S = 3,83687 R-Sq = 92,50% R-Sq(adj) = 91,83%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,554	2,980	1,53	0,061
Ie	0,9655	0,1154	8,37	0,000
te	0,043381	0,006783	6,40	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	133,49	133,49	133,49	51,42	0,000
te	1	76,88	76,88	76,88	29,61	0,000
Error	9	23,36	23,36	2,60		
Total	11	233,73				

S = 1,61121 R-Sq = 91,00% R-Sq(adj) = 90,78%

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,407	1,251	1,12	0,020
Ie	0,34738	0,04844	7,17	0,000
te	0,015500	0,002848	5,44	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	498,20	498,20	498,20	17,25	0,002
te	1	332,69	332,69	332,69	11,52	0,008
Error	9	259,92	259,92	28,88		
Total	11	1090,82				

S = 5,37406 R-Sq = 90,17% R-Sq(adj) = 89,88%

---

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	7,829	4,174	1,88	0,093
Ie	0,6711	0,1616	4,15	0,002
te	0,032244	0,009500	3,39	0,008

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2899,3	2899,3	2899,3	52,68	0,000
te	1	1828,6	1828,6	1828,6	33,22	0,000
Error	9	495,3	495,3	55,0		
Total	11	5223,3				

S = 7,41876 R-Sq = 91,52% R-Sq(adj) = 90,41%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,851	5,762	2,23	0,053
Ie	1,6189	0,2231	7,26	0,000
te	0,07559	0,01311	5,76	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1380,2	1380,2	1380,2	3,05	0,015
te	1	953,5	953,5	953,5	2,11	0,081
Error	9	4072,3	4072,3	452,5		
Total	11	6406,1				

S = 21,2716 R-Sq = 79,43% R-Sq(adj) = 75,30%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	44,91	16,52	2,72	0,024
Ie	1,1170	0,6395	1,75	0,015
te	0,05459	0,03760	1,45	0,081

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,19971	0,19971	0,19971	3,30	0,053
te	1	0,10748	0,10748	0,10748	1,77	0,016
Error	9	0,54498	0,54498	0,06055		
Total	11	0,85217				

S = 0,246075 R-Sq = 61,05% R-Sq(adj) = 58,84%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,1565	0,1911	-0,82	0,034
Ie	0,013436	0,007398	1,82	0,053
te	0,000580	0,000435	1,33	0,016

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,00000	0,00000	0,00000	0,00	0,095
te	1	0,34987	0,34987	0,34987	4,68	0,050
Error	9	0,67251	0,67251	0,07472		
Total	11	1,02238				

---



---

S = 0,273355 R-Sq = 48,22% R-Sq(adj) = 45,60%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,4386	0,2123	16,20	0,000
Ie	-0,000051	0,008219	-0,01	0,095
te	-0,001046	0,000483	-2,16	0,050

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1466,9	1466,9	1466,9	42,64	0,000
te	1	911,4	911,4	911,4	26,49	0,001
Error	9	309,6	309,6	34,4		
Total	11	2687,8				

S = 5,86511 R-Sq = 92,48% R-Sq(adj) = 90,92%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	10,535	4,556	2,31	0,046
Ie	1,1515	0,1763	6,53	0,000
te	0,05337	0,01037	5,15	0,001

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2745,5	2745,5	2745,5	55,08	0,000
te	1	1596,7	1596,7	1596,7	32,03	0,000
Error	9	448,6	448,6	49,8		
Total	11	4790,8				

S = 7,06014 R-Sq = 93,64% R-Sq(adj) = 92,56%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	11,811	5,484	2,15	0,060
Ie	1,5754	0,2123	7,42	0,000
te	0,07064	0,01248	5,66	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	23189	23189	23189	18,84	0,002
te	1	10529	10529	10529	8,55	0,017
Error	9	11079	11079	1231		
Total	11	44798				

S = 35,0855 R-Sq = 75,27% R-Sq(adj) = 73,77%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	103,23	27,25	3,79	0,004
Ie	4,578	1,055	4,34	0,002
te	0,18139	0,06202	2,92	0,017

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	492,06	492,06	492,06	51,64	0,000
te	1	240,92	240,92	240,92	25,29	0,001
Error	9	85,75	85,75	9,53		

---

Total 11 818,74

S = 3,08677 R-Sq = 91,53% R-Sq(adj) = 90,20%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	5,394	2,398	2,25	0,051
Ie	0,66694	0,09281	7,19	0,000
te	0,027439	0,005457	5,03	0,001

---

**Παράρτημα 9:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του προτύπου αλληλεπίδρασης για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα IMPAX όπως τα παίρνουμε από το Minitab 14.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	84,906	15,303	84,906	41,91	0,000
te	1	53,205	10,413	53,205	26,26	0,001
Ie*te	1	0,316	0,316	0,316	0,16	0,003
Error	8	16,206	16,206	2,026		
Total	11	154,632				

S = 1,42331 R-Sq = 93,52% R-Sq(adj) = 92,59%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,495	1,689	0,88	0,002
Ie	0,24601	0,08951	2,75	0,000
te	0,011214	0,004946	2,27	0,001
Ie*te	0,000103	0,000262	0,39	0,003

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1031,31	261,75	1031,31	62,69	0,000
te	1	602,22	176,69	602,22	36,61	0,000
Ie*te	1	0,88	0,88	0,88	0,05	0,023
Error	8	131,61	131,61	16,45		
Total	11	1766,03				

S = 4,05604 R-Sq = 93,55% R-Sq(adj) = 92,75%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,711	4,814	0,77	0,063
Ie	1,0174	0,2551	3,99	0,000
te	0,04619	0,01410	3,28	0,000
Ie*te	-0,000173	0,000747	-0,23	0,023

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	133,491	24,961	133,491	46,43	0,000
te	1	76,880	15,548	76,880	26,74	0,001
Ie*te	1	0,361	0,361	0,361	0,13	0,032
Error	8	23,003	23,003	2,875		
Total	11	233,735				

S = 1,69570 R-Sq = 91,16% R-Sq(adj) = 90,47%

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,946	2,013	0,97	0,062
Ie	0,3142	0,1066	2,95	0,000
te	0,013703	0,005893	2,33	0,001
Ie*te	0,000111	0,000312	0,35	0,032

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	498,20	75,63	498,20	15,64	0,004
te	1	332,69	53,92	332,69	10,44	0,012
Ie*te	1	5,06	5,06	5,06	0,16	0,001
Error	8	254,87	254,87	31,86		
Total	11	1090,82				

S = 5,64434 R-Sq = 90,64% R-Sq(adj) = 89,87%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	9,847	6,700	1,47	0,080
Ie	0,5469	0,3550	1,54	0,004
te	0,02552	0,01961	1,30	0,012
Ie*te	0,000414	0,001039	0,40	0,001

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2899,3	610,6	2899,3	46,96	0,000
te	1	1828,6	430,2	1828,6	29,62	0,001
Ie*te	1	1,4	1,4	1,4	0,02	0,045
Error	8	494,0	494,0	61,7		
Total	11	5223,3				

S = 7,85781 R-Sq = 90,54% R-Sq(adj) = 89,10%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	13,905	9,327	1,49	0,074
Ie	1,5540	0,4942	3,14	0,000
te	0,07208	0,02731	2,64	0,001
Ie*te	0,000216	0,001447	0,15	0,045

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1380,2	112,0	1380,2	3,64	0,053
te	1	953,5	145,9	953,5	2,52	0,051
Ie*te	1	1041,6	1041,6	1041,6	2,75	0,036
Error	8	3030,7	3030,7	378,8		
Total	11	6406,1				

S = 19,4637 R-Sq = 72,69% R-Sq(adj) = 69,95%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	73,88	23,10	3,20	0,013
Ie	-0,666	1,224	-0,54	0,053
te	-0,04197	0,06764	-0,62	0,051
Ie*te	0,005942	0,003584	1,66	0,036

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,19971	0,24195	0,19971	3,59	0,095
te	1	0,10748	0,19316	0,10748	1,93	0,042
Ie*te	1	0,10035	0,10035	0,10035	1,81	0,016
Error	8	0,44463	0,44463	0,05558		
Total	11	0,85217				

---

S = 0,235751 R-Sq = 62,82% R-Sq(adj) = 60,26%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,4408	0,2798	-1,58	0,054
Ie	0,03093	0,01483	2,09	0,095
te	0,001527	0,000819	1,86	0,042
Ie*te	-0,000058	0,000043	-1,34	0,016

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,00000	0,00297	0,00000	0,00	0,005
te	1	0,34987	0,12500	0,34987	4,19	0,075
Ie*te	1	0,00374	0,00374	0,00374	0,04	0,038
Error	8	0,66877	0,66877	0,08360		
Total	11	1,02238				

S = 0,289129 R-Sq = 49,59% R-Sq(adj) = 45,06%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,4935	0,3432	10,18	0,000
Ie	-0,00343	0,01818	-0,19	0,055
te	-0,001229	0,001005	-1,22	0,075
Ie*te	0,000011	0,000053	0,21	0,038

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1466,89	351,31	1466,89	37,93	0,000
te	1	911,37	249,03	911,37	23,57	0,001
Ie*te	1	0,24	0,24	0,24	0,01	0,039
Error	8	309,35	309,35	38,67		
Total	11	2687,85				

S = 6,21845 R-Sq = 92,49% R-Sq(adj) = 91,17%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	10,094	7,381	1,37	0,009
Ie	1,1787	0,3911	3,01	0,000
te	0,05484	0,02161	2,54	0,001
Ie*te	-0,000091	0,001145	-0,08	0,039

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2745,5	511,9	2745,5	49,81	0,000
te	1	1596,7	322,1	1596,7	28,97	0,001
Ie*te	1	7,6	7,6	7,6	0,14	0,019
Error	8	441,0	441,0	55,1		
Total	11	4790,8				

S = 7,42444 R-Sq = 93,80% R-Sq(adj) = 92,34%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	14,291	8,813	1,62	0,044
Ie	1,4228	0,4669	3,05	0,000
te	0,06237	0,02580	2,42	0,001
Ie*te	0,000509	0,001367	0,37	0,019

---

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	23189	433	23189	24,49	0,001
te	1	10529	2	10529	11,12	0,010
Ie*te	1	3503	3503	3503	3,70	0,091
Error	8	7575	7575	947		
Total	11	44798				

S = 30,7723    R-Sq = 83,09%    R-Sq(adj) = 82,75%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	156,36	36,53	4,28	0,003
Ie	1,309	1,935	0,68	0,001
te	0,0043	0,1069	0,04	0,010
Ie*te	0,010898	0,005666	1,92	0,091

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	492,06	161,91	492,06	49,25	0,000
te	1	240,92	99,46	240,92	24,11	0,001
Ie*te	1	5,82	5,82	5,82	0,58	0,047
Error	8	79,93	79,93	9,99		
Total	11	818,74				

S = 3,16093    R-Sq = 92,24%    R-Sq(adj) = 91,58%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,228	3,752	0,86	0,015
Ie	0,8002	0,1988	4,03	0,000
te	0,03466	0,01098	3,16	0,001
Ie*te	-0,000444	0,000582	-0,76	0,047

---

**Παράρτημα 10:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του πολυωνυμικού προτύπου δευτέρου βαθμού για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **IMPAX** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	84,906	11,651	84,906	57,29	0,000
te	1	53,205	7,447	53,205	35,90	0,001
Ie*Ie	1	4,434	4,434	4,434	2,99	0,034
te*te	1	2,879	2,879	2,879	1,94	0,013
Ie*te	1	0,316	0,316	0,316	0,21	0,061
Error	6	8,893	8,893	1,482		
Total	11	154,632				

S = 1,21743 R-Sq = 95,25% R-Sq(adj) = 94,46%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-2,165	2,200	-0,98	0,063
Ie	0,5753	0,2052	2,80	0,000
te	0,02680	0,01196	2,24	0,001
Ie*Ie	-0,009362	0,005413	-1,73	0,034
te*te	-0,000026	0,000019	-1,39	0,013
Ie*te	0,000103	0,000224	0,46	0,061

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1031,31	71,60	1031,31	50,68	0,000
te	1	602,22	38,89	602,22	29,59	0,002
Ie*Ie	1	6,83	6,83	6,83	0,34	0,083
te*te	1	2,69	2,69	2,69	0,13	0,029
Ie*te	1	0,88	0,88	0,88	0,04	0,042
Error	6	122,10	122,10	20,35		
Total	11	1766,03				

S = 4,51102 R-Sq = 94,09% R-Sq(adj) = 93,33%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,379	8,151	-0,05	0,064
Ie	1,4260	0,7602	1,88	0,000
te	0,06125	0,04430	1,38	0,002
Ie*Ie	-0,01162	0,02006	-0,58	0,083
te*te	-0,000025	0,000069	-0,36	0,029
Ie*te	-0,000173	0,000831	-0,21	0,042

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	133,491	17,148	133,491	59,25	0,000
te	1	76,880	9,832	76,880	34,12	0,001
Ie*Ie	1	6,022	6,022	6,022	2,67	0,053
te*te	1	3,463	3,463	3,463	1,54	0,061
Ie*te	1	0,361	0,361	0,361	0,16	0,003
Error	6	13,519	13,519	2,253		
Total	11	233,735				

S = 1,50104 R-Sq = 94,22% R-Sq(adj) = 93,40%

---

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-2,206	2,712	-0,81	0,447
Ie	0,6979	0,2530	2,76	0,000
te	0,03080	0,01474	2,09	0,001
Ie*Ie	-0,010910	0,006673	-1,63	0,053
te*te	-0,000028	0,000023	-1,24	0,061
Ie*te	0,000111	0,000276	0,40	0,003

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	498,20	95,80	498,20	14,66	0,009
te	1	332,69	13,38	332,69	9,79	0,020
Ie*Ie	1	49,73	49,73	49,73	1,46	0,072
te*te	1	1,28	1,28	1,28	0,04	0,052
Ie*te	1	5,06	5,06	5,06	0,15	0,013
Error	6	203,85	203,85	33,98		
Total	11	1090,82				

S = 5,82887 R-Sq = 91,31% R-Sq(adj) = 90,74%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,00	10,53	0,19	0,056
Ie	1,6495	0,9823	1,68	0,009
te	0,03592	0,05725	0,63	0,020
Ie*Ie	-0,03135	0,02591	-1,21	0,072
te*te	-0,000017	0,000089	-0,19	0,052
Ie*te	0,000414	0,001073	0,39	0,013

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2899,32	315,85	2899,32	43,93	0,001
te	1	1828,61	114,84	1828,61	27,71	0,002
Ie*Ie	1	84,95	84,95	84,95	1,29	0,050
te*te	1	13,04	13,04	13,04	0,20	0,072
Ie*te	1	1,38	1,38	1,38	0,02	0,090
Error	6	395,97	395,97	65,99		
Total	11	5223,27				

S = 8,12373 R-Sq = 92,42% R-Sq(adj) = 90,10%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,58	14,68	0,11	0,018
Ie	2,995	1,369	2,19	0,001
te	0,10525	0,07978	1,32	0,002
Ie*Ie	-0,04098	0,03612	-1,13	0,050
te*te	-0,000055	0,000124	-0,44	0,072
Ie*te	0,000216	0,001496	0,14	0,090

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1380,2	306,9	1380,2	2,95	0,009
te	1	953,5	5,0	953,5	2,03	0,004
Ie*Ie	1	213,9	213,9	213,9	0,46	0,024
te*te	1	4,7	4,7	4,7	0,01	0,053
Ie*te	1	1041,6	1041,6	1041,6	2,22	0,087
Error	6	2812,0	2812,0	468,7		
Total	11	6406,1				

---



S = 21,6489 R-Sq = 79,90% R-Sq(adj) = 75,52%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	85,77	39,12	2,19	0,071
Ie	-2,953	3,648	-0,81	0,009
te	-0,0220	0,2126	-0,10	0,004
Ie*Ie	0,06502	0,09625	0,68	0,024
te*te	-0,000033	0,000331	-0,10	0,053
Ie*te	0,005942	0,003986	1,49	0,087

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,19971	0,02769	0,19971	2,70	0,063
te	1	0,10748	0,02561	0,10748	1,45	0,058
Ie*Ie	1	0,00034	0,00034	0,00034	0,00	0,048
te*te	1	0,00002	0,00002	0,00002	0,00	0,086
Ie*te	1	0,10035	0,10035	0,10035	1,36	0,089
Error	6	0,44426	0,44426	0,07404		
Total	11	0,85217				

S = 0,272110 R-Sq = 64,87% R-Sq(adj) = 59,42%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,4278	0,4917	-0,87	0,058
Ie	0,02804	0,04586	0,61	0,063
te	0,001572	0,002672	0,59	0,058
Ie*Ie	0,000082	0,001210	0,07	0,048
te*te	-0,000000	0,000004	-0,02	0,086
Ie*te	-0,000058	0,000050	-1,16	0,089

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,00000	0,17271	0,00000	0,00	0,055
te	1	0,34987	0,31942	0,34987	7,89	0,036
Ie*Ie	1	0,18148	0,18148	0,18148	4,10	0,089
te*te	1	0,22138	0,22138	0,22138	5,00	0,067
Ie*te	1	0,00374	0,00374	0,00374	0,08	0,051
Error	6	0,26591	0,26591	0,0443		
Total	11	1,02238				

S = 0,210518 R-Sq = 49,99% R-Sq(adj) = 46,32%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,3574	0,3804	11,46	0,000
Ie	-0,07004	0,03548	-1,97	0,052
te	-0,005551	0,002067	-2,68	0,036
Ie*Ie	0,001894	0,000936	2,02	0,089
te*te	0,000007	0,000003	2,23	0,067
Ie*te	0,000011	0,000039	0,29	0,051

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1466,89	237,73	1466,89	44,92	0,001
te	1	911,37	116,42	911,37	27,91	0,002
Ie*Ie	1	82,45	82,45	82,45	2,52	0,063
te*te	1	30,98	30,98	30,98	0,95	0,068
Ie*te	1	0,24	0,24	0,24	0,01	0,034

---

Error	6	195,93	195,93	32,65
Total	11	2687,85		

S = 5,71438    R-Sq = 94,71%    R-Sq(adj) = 93,64%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-3,99	10,33	-0,39	0,012
Ie	2,5985	0,9630	2,70	0,001
te	0,10597	0,05612	1,89	0,002
Ie*Ie	-0,04037	0,02541	-1,59	0,063
te*te	-0,000085	0,000087	-0,97	0,068
Ie*te	-0,000091	0,001052	-0,09	0,034

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2745,51	283,11	2745,51	46,47	0,000
te	1	1596,69	70,78	1596,69	27,03	0,002
Ie*Ie	1	81,65	81,65	81,65	1,38	0,052
te*te	1	4,86	4,86	4,86	0,08	0,084
Ie*te	1	7,63	7,63	7,63	0,13	0,032
Error	6	354,47	354,47	59,08		
Total	11	4790,81				

S = 7,68619    R-Sq = 94,60%    R-Sq(adj) = 93,44%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,51	13,89	0,25	0,009
Ie	2,836	1,295	2,19	0,000
te	0,08262	0,07549	1,09	0,002
Ie*Ie	-0,04017	0,03417	-1,18	0,052
te*te	-0,000034	0,000118	-0,29	0,084
Ie*te	0,000509	0,001415	0,36	0,032

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	23189	555	23189	23,13	0,003
te	1	10529	1140	10529	10,50	0,018
Ie*Ie	1	290	290	290	0,29	0,010
te*te	1	1270	1270	1270	1,27	0,053
Ie*te	1	3503	3503	3503	3,49	0,011
Error	6	6016	6016	1003		
Total	11	44798				

S = 31,6647    R-Sq = 86,57%    R-Sq(adj) = 84,38%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	105,52	57,21	1,84	0,015
Ie	3,971	5,336	0,74	0,003
te	0,3316	0,3110	1,07	0,018
Ie*Ie	-0,0757	0,1408	-0,54	0,010
te*te	-0,000546	0,000485	-1,13	0,053
Ie*te	0,010898	0,005830	1,87	0,011

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	492,06	76,81	492,06	55,39	0,000
te	1	240,92	37,90	240,92	27,12	0,002

---

Ie*Ie	1	18,74	18,74	18,74	2,11	0,097
te*te	1	7,89	7,89	7,89	0,89	0,082
Ie*te	1	5,82	5,82	5,82	0,66	0,049
Error	6	53,30	53,30	8,88		
Total	11	818,74				

S = 2,98055    R-Sq = 93,49%    R-Sq(adj) = 92,06%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-3,638	5,386	-0,68	0,025
Ie	1,4770	0,5023	2,94	0,000
Te	0,06046	0,02927	2,07	0,002
Ie*Ie	-0,01925	0,01325	-1,45	0,097
te*te	-0,000043	0,000046	-0,94	0,082
Ie*te	-0,000444	0,000549	-0,81	0,049

---

**Παράρτημα 11: Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του λογαριθμικού μοντέλου για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα IMPAX όπως τα παίρνουμε από το Minitab 14.**

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRa, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,69952	0,73986	0,69952	90,62	0,000
Lnte	1	0,54910	0,54910	0,54910	71,14	0,000
Error	7	0,05403	0,05403	0,00772		
Total	9	1,30265				

S = 0,0878576 R-Sq = 95,85% R-Sq(adj) = 94,67%

**Regression Analysis for LnRa**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,7797	0,2618	-2,98	0,021
LnIe	0,40880	0,04176	9,79	0,000
Lnte	0,34920	0,04140	8,43	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,49461	0,52331	0,49461	96,20	0,000
Lnte	1	0,39294	0,39294	0,39294	76,42	0,000
Error	7	0,03599	0,03599	0,00514		
Total	9	0,92354				

S = 0,0717051 R-Sq = 96,10% R-Sq(adj) = 94,99%

**Regression Analysis for LnRp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,9876	0,2137	4,62	0,002
LnIe	0,34381	0,03408	10,09	0,000
Lnte	0,29540	0,03379	8,74	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,69600	0,73451	0,69600	91,46	0,000
Lnte	1	0,50430	0,50430	0,50430	66,27	0,000
Error	7	0,05327	0,05327	0,00761		
Total	9	1,25357				

S = 0,0872349 R-Sq = 95,75% R-Sq(adj) = 94,54%

**Regression Analysis for LnRq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,4705	0,2600	-1,81	0,013
LnIe	0,40732	0,04146	9,82	0,000
Lnte	0,33466	0,04111	8,14	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,48591	0,51672	0,48591	14,20	0,007
Lnte	1	0,45842	0,45842	0,45842	13,40	0,008
Error	7	0,23951	0,23951	0,03422		
Total	9	1,18384				

S = 0,184975 R-Sq = 91,77% R-Sq(adj) = 90,99%

---

**Regression Analysis for LnRv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,6533	0,5512	1,19	0,055
LnIe	0,34164	0,08791	3,89	0,007
Lnte	0,31907	0,08717	3,66	0,008

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,49660	0,52617	0,49660	45,80	0,000
Lnte	1	0,41474	0,41474	0,41474	38,25	0,000
Error	7	0,07589	0,07589	0,01084		
Total	9	0,98723				

S = 0,104124    R-Sq = 92,31%    R-Sq(adj) = 91,12%

**Regression Analysis for LnRt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,5376	0,3103	4,96	0,002
LnIe	0,34475	0,04949	6,97	0,000
Lnte	0,30349	0,04907	6,18	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,20680	0,21347	0,20680	2,09	0,056
Lnte	1	0,05285	0,05285	0,05285	0,53	0,049
Error	7	0,69343	0,69343	0,09906		
Total	9	0,95309				

S = 0,314741    R-Sq = 77,24%    R-Sq(adj) = 74,46%

**Regression Analysis for LnRs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,1544	0,9379	3,36	0,012
LnIe	0,2196	0,1496	1,47	0,056
Lnte	0,1083	0,1483	0,73	0,049

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	1,1252	1,1851	1,1252	2,40	0,065
Lnte	1	0,7570	0,7570	0,7570	1,61	0,045
Error	7	3,2855	3,2855	0,4694		
Total	9	5,1677				

S = 0,685098    R-Sq = 65,42%    R-Sq(adj) = 64,26%

**Regression Analysis for LnRsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-4,975	2,042	-2,44	0,045
LnIe	0,5174	0,3256	1,59	0,065
Lnte	0,4100	0,3229	1,27	0,045

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,000582	0,000842	0,000582	0,09	0,071
Lnte	1	0,022584	0,022584	0,022584	3,54	0,042
Error	7	0,044630	0,044630	0,006376		
Total	9	0,067795				

---

S = 0,0798477 R-Sq = 47,17% R-Sq(adj) = 42,36%

**Regression Analysis for LnRku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,5550	0,2379	6,54	0,000
LnIe	-0,01379	0,03795	-0,36	0,027
Lnte	-0,07082	0,03763	-1,88	0,042

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,46759	0,49528	0,46759	66,16	0,000
Lnte	1	0,38634	0,38634	0,38634	54,66	0,000
Error	7	0,04948	0,04948	0,00707		
Total	9	0,90340				

S = 0,0840715 R-Sq = 94,52% R-Sq(adj) = 93,96%

**Regression Analysis for LnRzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,3203	0,2505	5,27	0,001
LnIe	0,33447	0,03996	8,37	0,000
Lnte	0,29291	0,03962	7,39	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRy, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,48857	0,51741	0,48857	54,12	0,000
Lnte	1	0,40120	0,40120	0,40120	44,44	0,000
Error	7	0,06320	0,06320	0,00903		
Total	9	0,95297				

S = 0,0950153 R-Sq = 93,37% R-Sq(adj) = 91,47%

**Regression Analysis for LnRy**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,5237	0,2831	5,38	0,001
LnIe	0,34187	0,04516	7,57	0,000
Lnte	0,29849	0,04478	6,67	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,46811	0,48433	0,46811	22,28	0,002
Lnte	1	0,13731	0,13731	0,13731	6,54	0,038
Error	7	0,14705	0,14705	0,02101		
Total	9	0,75247				

S = 0,144938 R-Sq = 83,46% R-Sq(adj) = 82,87%

**Regression Analysis for LnRsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,5776	0,4319	8,28	0,000
LnIe	0,33075	0,06888	4,80	0,002
Lnte	0,17463	0,06830	2,56	0,038

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,53804	0,56656	0,53804	70,57	0,000
Lnte	1	0,35876	0,35876	0,35876	47,05	0,000
Error	7	0,05337	0,05337	0,00762		

---

Total 9 0,95017

S = 0,0873185 R-Sq = 94,38% R-Sq(adj) = 92,78%

**Regression Analysis for LnRpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,7073	0,2602	2,72	0,030
LnIe	0,35773	0,04150	8,62	0,000
Lnte	0,28226	0,04115	6,86	0,000

**Παράρτημα 12:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) πολυωνυμικού προτύπου πρώτου βαθμού για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **ORVAR** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	53,890	53,890	53,890	39,60	0,000
te	1	40,725	40,725	40,725	29,93	0,000
Error	9	12,248	12,248	1,361		
Total	11	106,863				

S = 1,16655    R-Sq = 92,54%    R-Sq(adj) = 91,99%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,2431	0,9061	2,48	0,035
Ie	0,22071	0,03507	6,29	0,000
te	0,011281	0,002062	5,47	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	964,86	964,86	964,86	48,70	0,000
te	1	195,13	195,13	195,13	9,85	0,012
Error	9	178,33	178,33	19,81		
Total	11	1338,31				

S = 4,45130    R-Sq = 92,68%    R-Sq(adj) = 90,71%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,833	3,457	2,55	0,031
Ie	0,9339	0,1338	6,98	0,000
te	0,024694	0,007869	3,14	0,012

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	62,194	62,194	62,194	15,95	0,003
te	1	56,999	56,999	56,999	14,62	0,004
Error	9	35,100	35,100	3,900		
Total	11	154,293				

S = 1,97483    R-Sq = 90,25%    R-Sq(adj) = 89,20%

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,989	1,534	2,60	0,029
Ie	0,23711	0,05938	3,99	0,003
te	0,013346	0,003491	3,82	0,004

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	567,20	567,20	567,20	7,57	0,022
te	1	59,73	59,73	59,73	0,80	0,045
Error	9	674,78	674,78	74,98		
Total	11	1301,71				

S = 8,65884    R-Sq = 90,16%    R-Sq(adj) = 89,64%



---

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	12,834	6,725	1,91	0,049
Ie	0,7160	0,2603	2,75	0,022
te	0,01366	0,01531	0,89	0,045

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	3075,4	3075,4	3075,4	10,73	0,010
te	1	2744,7	2744,7	2744,7	9,57	0,013
Error	9	2580,4	2580,4	286,7		
Total	11	8400,4				

S = 16,9325    R-Sq = 90,28%    R-Sq(adj) = 89,46%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,56	13,15	0,27	0,053
Ie	1,6673	0,5091	3,28	0,010
te	0,09261	0,02993	3,09	0,013

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	33,3	33,3	33,3	0,10	0,044
te	1	3590,4	3590,4	3590,4	10,30	0,011
Error	9	3138,0	3138,0	348,7		
Total	11	6761,7				

S = 18,6726    R-Sq = 80,59%    R-Sq(adj) = 79,28%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	85,75	14,50	5,91	0,000
Ie	0,1734	0,5614	0,31	0,044
te	0,10593	0,03301	3,21	0,011

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,28106	0,28106	0,28106	51,01	0,040
te	1	0,13810	0,13810	0,13810	25,07	0,001
Error	9	0,04959	0,04959	0,00551		
Total	11	0,46874				

S = 0,0742272    R-Sq = 59,42%    R-Sq(adj) = 64,07%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,16425	0,05765	2,85	0,049
Ie	0,015939	0,002232	7,14	0,040
te	-0,000657	0,000131	-5,01	0,001

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,52699	0,52699	0,52699	7,74	0,021
te	1	0,55073	0,55073	0,55073	8,09	0,019
Error	9	0,61250	0,61250	0,06806		
Total	11	1,69021				

---

S = 0,260874 R-Sq = 56,76% R-Sq(adj) = 55,71%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,9752	0,2026	14,68	0,042
Ie	0,021826	0,007843	2,78	0,021
te	-0,001312	0,000461	-2,84	0,019

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1187,31	1187,31	1187,31	42,08	0,000
te	1	432,77	432,77	432,77	15,34	0,004
Error	9	253,93	253,93	28,21		
Total	11	1874,00				

S = 5,31170 R-Sq = 91,45% R-Sq(adj) = 90,44%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	15,209	4,126	3,69	0,005
Ie	1,0360	0,1597	6,49	0,000
te	0,036775	0,009390	3,92	0,004

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2650,7	2650,7	2650,7	52,90	0,000
te	1	970,0	970,0	970,0	19,36	0,002
Error	9	451,0	451,0	50,1		
Total	11	4071,7				

S = 7,07860 R-Sq = 90,92% R-Sq(adj) = 89,46%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	14,368	5,498	2,61	0,028
Ie	1,5479	0,2128	7,27	0,000
te	0,05506	0,01251	4,40	0,002

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	31007	31007	31007	4,17	0,042
te	1	6578	6578	6578	0,88	0,051
Error	9	66916	66916	7435		
Total	11	104501				

S = 86,2269 R-Sq = 75,97% R-Sq(adj) = 72,74%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	130,11	66,97	1,94	0,084
Ie	5,294	2,592	2,04	0,042
te	0,1434	0,1524	0,94	0,051

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	418,25	418,25	418,25	61,83	0,000
te	1	79,32	79,32	79,32	11,72	0,008
Error	9	60,88	60,88	6,76		

---

---

Total 11 558,45

S = 2,60095 R-Sq = 91,10% R-Sq(adj) = 90,67%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,244	2,020	4,08	0,003
Ie	0,61488	0,07820	7,86	0,000
te	0,015744	0,004598	3,42	0,008

**Παράρτημα 13:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του προτύπου αλληλεπίδρασης για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **ORVAR** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	53,890	1,300	53,890	86,75	0,000
te	1	40,725	0,853	40,725	65,56	0,000
Ie*te	1	7,278	7,278	7,278	11,72	0,009
Error	8	4,970	4,970	0,621		
Total	11	106,863				

S = 0,788170 R-Sq = 95,35% R-Sq(adj) = 93,61%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,6645	0,9355	4,99	0,001
Ie	0,07170	0,04957	1,45	0,000
te	0,003210	0,002739	1,17	0,000
Ie*te	0,000497	0,000145	3,42	0,009

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	964,86	26,36	964,86	137,94	0,000
te	1	195,13	5,85	195,13	27,90	0,001
Ie*te	1	122,37	122,37	122,37	17,49	0,003
Error	8	55,96	55,96	6,99		
Total	11	1338,31				

S = 2,64473 R-Sq = 95,82% R-Sq(adj) = 94,25%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	18,762	3,139	5,98	0,000
Ie	0,3229	0,1663	1,94	0,000
te	-0,008403	0,009191	-0,91	0,001
Ie*te	0,002037	0,000487	4,18	0,003

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	62,194	0,627	62,194	21,08	0,002
te	1	56,999	0,848	56,999	19,32	0,002
Ie*te	1	11,498	11,498	11,498	3,90	0,044
Error	8	23,601	23,601	2,950		
Total	11	154,293				

S = 1,71760 R-Sq = 92,70% R-Sq(adj) = 90,97%

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	7,033	2,039	3,45	0,009
Ie	0,0498	0,1080	0,46	0,002
te	0,003201	0,005969	0,54	0,002
Ie*te	0,000624	0,000316	1,97	0,044

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	567,20	25,22	567,20	7,29	0,027
te	1	59,73	5,32	59,73	0,77	0,046
Ie*te	1	52,50	52,50	52,50	0,67	0,035
Error	8	622,28	622,28	77,78		
Total	11	1301,71				

S = 8,81956    R-Sq = 92,20%    R-Sq(adj) = 90,27%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	19,34	10,47	1,85	0,012
Ie	0,3158	0,5546	0,57	0,027
te	-0,00802	0,03065	-0,26	0,046
Ie*te	0,001334	0,001624	0,82	0,035

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	3075,4	2,8	3075,4	15,88	0,004
te	1	2744,7	1,0	2744,7	14,17	0,006
Ie*te	1	1030,7	1030,7	1030,7	5,32	0,050
Error	8	1549,7	1549,7	193,7		
Total	11	8400,4				

S = 13,9179    R-Sq = 91,55%    R-Sq(adj) = 90,63%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	32,38	16,52	1,96	0,086
Ie	-0,1060	0,8753	-0,12	0,004
te	-0,00344	0,04837	-0,07	0,006
Ie*te	0,005911	0,002562	2,31	0,050

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	33,3	360,4	33,3	0,11	0,044
te	1	3590,4	84,1	3590,4	11,37	0,020
Ie*te	1	612,7	612,7	612,7	1,94	0,021
Error	8	2525,3	2525,3	315,7		
Total	11	6761,7				

S = 17,7669    R-Sq = 79,65%    R-Sq(adj) = 78,65%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	107,97	21,09	5,12	0,001
Ie	-1,194	1,117	-1,07	0,044
te	0,03187	0,06174	0,52	0,020
Ie*te	0,004557	0,003271	1,39	0,021

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,28106	0,09804	0,28106	49,99	0,043
te	1	0,13810	0,01705	0,13810	24,57	0,055
Ie*te	1	0,00461	0,00461	0,00461	0,82	0,091
Error	8	0,04497	0,04497	0,00562		
Total	11	0,46874				

---

S = 0,0749781 R-Sq = 60,41% R-Sq(adj) = 76,81%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,10329	0,08900	1,16	0,049
Ie	0,019691	0,004715	4,18	0,043
te	-0,000454	0,000261	-1,74	0,055
Ie*te	-0,000013	0,000014	-0,91	0,091

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,52699	0,07288	0,52699	6,97	0,030
te	1	0,55073	0,20528	0,55073	7,28	0,027
Ie*te	1	0,00770	0,00770	0,00770	0,10	0,051
Error	8	0,60479	0,60479	0,07560		
Total	11	1,69021				

S = 0,274953 R-Sq = 54,22% R-Sq(adj) = 50,80%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,0540	0,3264	9,36	0,000
Ie	0,01698	0,01729	0,98	0,030
te	-0,001574	0,000955	-1,65	0,027
Ie*te	0,000016	0,000051	0,32	0,051

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1187,31	27,91	1187,31	103,69	0,000
te	1	432,77	0,15	432,77	37,80	0,000
Ie*te	1	162,33	162,33	162,33	14,18	0,006
Error	8	91,60	91,60	11,45		
Total	11	1874,00				

S = 3,38380 R-Sq = 95,11% R-Sq(adj) = 93,28%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	26,644	4,016	6,63	0,000
Ie	0,3323	0,2128	1,56	0,000
te	-0,00134	0,01176	-0,11	0,000
Ie*te	0,002346	0,000623	3,77	0,006

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2650,7	55,2	2650,7	310,82	0,000
te	1	970,0	1,0	970,0	113,74	0,000
Ie*te	1	382,7	382,7	382,7	44,88	0,000
Error	8	68,2	68,2	8,5		
Total	11	4071,7				

S = 2,92029 R-Sq = 98,32% R-Sq(adj) = 97,70%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	31,928	3,466	9,21	0,000
Ie	0,4674	0,1836	2,54	0,000
te	-0,00348	0,01015	-0,34	0,000
Ie*te	0,003602	0,000538	6,70	0,000

---

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	31007	390	31007	4,69	0,040
te	1	6578	3674	6578	0,99	0,057
Ie*te	1	14000	14000	14000	2,12	0,044
Error	8	52916	52916	6614		
Total	11	104501				

S = 81,3294    R-Sq = 79,36%    R-Sq(adj) = 70,37%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	236,31	96,54	2,45	0,047
Ie	-1,241	5,115	-0,24	0,040
te	-0,2106	0,2826	-0,75	0,057
Ie*te	0,02178	0,01497	1,45	0,044

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	418,25	19,31	418,25	143,53	0,000
te	1	79,32	0,56	79,32	27,22	0,001
Ie*te	1	37,57	37,57	37,57	12,89	0,007
Error	8	23,31	23,31	2,91		
Total	11	558,45				

S = 1,70704    R-Sq = 95,83%    R-Sq(adj) = 94,26%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	13,746	2,026	6,78	0,000
Ie	0,2763	0,1074	2,57	0,000
te	-0,002595	0,005932	-0,44	0,001
Ie*te	0,001129	0,000314	3,59	0,007

---

**Παράρτημα 14:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του πολυωνμικού προτύπου δευτέρου βαθμού για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **ORVAR** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ra, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	53,890	2,627	53,890	213,23	0,000
te	1	40,725	2,494	40,725	161,14	0,000
Ie*Ie	1	1,660	1,660	1,660	6,57	0,043
te*te	1	1,793	1,793	1,793	7,09	0,037
Ie*te	1	7,278	7,278	7,278	28,80	0,002
Error	6	1,516	1,516	0,253		
Total	11	106,863				

S = 0,502727    R-Sq = 97,58%    R-Sq(adj) = 96,40%

**Regression Analysis for Ra**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	2,1331	0,9084	2,35	0,050
Ie	0,27317	0,08472	3,22	0,000
te	0,015510	0,004937	3,14	0,000
Ie*Ie	-0,005728	0,002235	-2,56	0,043
te*te	-0,000020	0,000008	-2,66	0,037
Ie*te	0,000497	0,000093	5,37	0,002

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	964,86	8,14	964,86	126,95	0,000
te	1	195,13	4,01	195,13	25,67	0,002
Ie*Ie	1	1,02	1,02	1,02	0,13	0,027
te*te	1	9,34	9,34	9,34	1,23	0,010
Ie*te	1	122,37	122,37	122,37	16,10	0,007
Error	6	45,60	45,60	7,60		
Total	11	1338,31				

S = 2,75683    R-Sq = 96,59%    R-Sq(adj) = 94,75%

**Regression Analysis for Rp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	14,834	4,981	2,98	0,025
Ie	0,4807	0,4646	1,03	0,000
te	0,01967	0,02707	0,73	0,002
Ie*Ie	-0,00449	0,01226	-0,37	0,027
te*te	-0,000047	0,000042	-1,11	0,010
Ie*te	0,002037	0,000508	4,01	0,007

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	62,194	0,034	62,194	31,54	0,001
te	1	56,999	12,482	56,999	28,91	0,002
Ie*Ie	1	0,014	0,014	0,014	0,01	0,035
te*te	1	11,757	11,757	11,757	5,96	0,050
Ie*te	1	11,498	11,498	11,498	5,83	0,052
Error	6	11,830	11,830	1,972		
Total	11	154,293				

S = 1,40414    R-Sq = 93,33%    R-Sq(adj) = 92,94%



---

**Regression Analysis for Rq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,823	2,537	1,51	0,053
Ie	0,0311	0,2366	0,13	0,001
te	0,03470	0,01379	2,52	0,002
Ie*Ie	0,000532	0,006243	0,09	0,035
te*te	-0,000052	0,000021	-2,44	0,050
Ie*te	0,000624	0,000259	2,41	0,052

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	567,20	221,82	567,20	8,18	0,024
te	1	59,73	13,60	59,73	0,86	0,053
Ie*Ie	1	196,93	196,93	196,93	2,84	0,043
te*te	1	9,43	9,43	9,43	0,14	0,025
Ie*te	1	52,50	52,50	52,50	0,76	0,058
Error	6	415,92	415,92	69,32		
Total	11	1301,71				

S = 8,32584 R-Sq = 93,05% R-Sq(adj) = 92,42%

**Regression Analysis for Rv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	8,88	15,04	0,59	0,056
Ie	2,510	1,403	1,79	0,024
te	-0,03622	0,08177	-0,44	0,003
Ie*Ie	-0,06239	0,03702	-1,69	0,043
te*te	0,000047	0,000127	0,37	0,025
Ie*te	0,001334	0,001533	0,87	0,058

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	3075,4	26,7	3075,4	12,54	0,012
te	1	2744,7	30,2	2744,7	11,19	0,016
Ie*Ie	1	39,0	39,0	39,0	0,16	0,044
te*te	1	39,0	39,0	39,0	0,16	0,044
Ie*te	1	1030,7	1030,7	1030,7	4,20	0,086
Error	6	1471,6	1471,6	245,3		
Total	11	8400,4				

S = 15,6612 R-Sq = 92,48% R-Sq(adj) = 91,88%

**Regression Analysis for Rt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	20,34	28,30	0,72	0,059
Ie	0,871	2,639	0,33	0,012
te	0,0539	0,1538	0,35	0,016
Ie*Ie	-0,02777	0,06963	-0,40	0,044
te*te	-0,000096	0,000240	-0,40	0,044
Ie*te	0,005911	0,002883	2,05	0,086

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	33,3	569,7	33,3	0,10	0,032
te	1	3590,4	337,4	3590,4	11,12	0,046
Ie*Ie	1	327,3	327,3	327,3	1,01	0,053
te*te	1	261,5	261,5	261,5	0,81	0,043
Ie*te	1	612,7	612,7	612,7	1,90	0,067
Error	6	1936,5	1936,5	322,8		
Total	11	6761,7				

---

S = 17,9653 R-Sq = 79,36% R-Sq(adj) = 75,49%

**Regression Analysis for Rs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	109,60	32,46	3,38	0,015
Ie	-4,022	3,028	-1,33	0,032
te	0,1804	0,1764	1,02	0,046
Ie*Ie	0,08043	0,07987	1,01	0,053
te*te	-0,000248	0,000275	-0,90	0,043
Ie*te	0,004557	0,003308	1,38	0,067

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,281055	0,005336	0,281055	52,27	0,058
te	1	0,138102	0,020156	0,138102	25,68	0,042
Ie*Ie	1	0,002228	0,002228	0,002228	0,41	0,044
te*te	1	0,010485	0,010485	0,010485	1,95	0,012
Ie*te	1	0,004613	0,004613	0,004613	0,86	0,090
Error	6	0,032261	0,032261	0,005377		
Total	11	0,468744				

S = 0,0733270 R-Sq = 63,12% R-Sq(adj) = 61,38%

**Regression Analysis for Rsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,2477	0,1325	1,87	0,041
Ie	0,01231	0,01236	1,00	0,058
te	-0,001394	0,000720	-1,94	0,042
Ie*Ie	0,000210	0,000326	0,64	0,044
te*te	0,000002	0,000001	1,40	0,012
Ie*te	-0,000013	0,000014	-0,93	0,090

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	0,52699	0,00544	0,52699	6,10	0,048
te	1	0,55073	0,13870	0,55073	6,38	0,045
Ie*Ie	1	0,03538	0,03538	0,03538	0,41	0,046
te*te	1	0,05143	0,05143	0,05143	0,60	0,070
Ie*te	1	0,00770	0,00770	0,00770	0,09	0,075
Error	6	0,51798	0,51798	0,08633		
Total	11	1,69021				

S = 0,293821 R-Sq = 56,35% R-Sq(adj) = 53,82%

**Regression Analysis for Rku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,4539	0,5309	6,51	0,001
Ie	-0,01243	0,04952	-0,25	0,048
te	-0,003658	0,002886	-1,27	0,045
Ie*Ie	0,000836	0,001306	0,64	0,046
te*te	0,000003	0,000004	0,77	0,070
Ie*te	0,000016	0,000054	0,30	0,075

**Analysis of Variance (ANOVA) for RzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	1187,31	29,97	1187,31	209,33	0,011
te	1	432,77	36,22	432,77	76,30	0,010
Ie*Ie	1	14,26	14,26	14,26	2,51	0,064
te*te	1	43,31	43,31	43,31	7,64	0,033

---

Ie*te	1	162,33	162,33	162,33	28,62	0,002
Error	6	34,03	34,03	5,67		
Total	11	1874,00				

S = 2,38161 R-Sq = 98,18% R-Sq(adj) = 96,67%

**Regression Analysis for RzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	16,650	4,303	3,87	0,008
Ie	0,9227	0,4014	2,30	0,011
te	0,05911	0,02339	2,53	0,010
Ie*Ie	-0,01679	0,01059	-1,59	0,064
te*te	-0,000101	0,000036	-2,76	0,033
Ie*te	0,002346	0,000438	5,35	0,002

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Ry, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	2650,72	23,12	2650,72	533,16	0,004
te	1	969,98	25,67	969,98	195,10	0,008
Ie*Ie	1	4,81	4,81	4,81	0,97	0,063
te*te	1	33,58	33,58	33,58	6,75	0,041
Ie*te	1	382,73	382,73	382,73	76,98	0,000
Error	6	29,83	29,83	4,97		
Total	11	4071,66				

S = 2,22974 R-Sq = 96,27% R-Sq(adj) = 95,66%

**Regression Analysis for Ry**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	24,210	4,029	6,01	0,001
Ie	0,8103	0,3758	2,16	0,004
te	0,04976	0,02190	2,27	0,008
Ie*Ie	-0,009752	0,009913	-0,98	0,063
te*te	-0,000089	0,000034	-2,60	0,041
Ie*te	0,003602	0,000411	8,77	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	31007	13238	31007	6,73	0,041
te	1	6578	3781	6578	1,43	0,047
Ie*Ie	1	17412	17412	17412	3,78	0,040
te*te	1	7863	7863	7863	1,71	0,079
Ie*te	1	14000	14000	14000	3,04	0,032
Error	6	27641	27641	4607		
Total	11	104501				

S = 67,8742 R-Sq = 77,55% R-Sq(adj) = 71,51%

**Regression Analysis for Rsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	24,1	122,6	0,20	0,051
Ie	19,39	11,44	1,70	0,041
te	0,6039	0,6666	0,91	0,047
Ie*Ie	-0,5866	0,3018	-1,94	0,040
te*te	-0,001357	0,001039	-1,31	0,079
Ie*te	0,02178	0,01250	1,74	0,032

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for Rpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
Ie	1	418,25	11,58	418,25	175,78	0,000

---

---

te	1	79,32	3,66	79,32	33,33	0,001
Ie*Ie	1	3,61	3,61	3,61	1,52	0,064
te*te	1	5,42	5,42	5,42	2,28	0,082
Ie*te	1	37,57	37,57	37,57	15,79	0,007
Error	6	14,28	14,28	2,38		
Total	11	558,45				

S = 1,54254    R-Sq = 97,44%    R-Sq(adj) = 95,31%

**Regression Analysis for Rpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	9,669	2,787	3,47	0,013
Ie	0,5734	0,2600	2,21	0,000
te	0,01880	0,01515	1,24	0,001
Ie*Ie	-0,008448	0,006858	-1,23	0,064
te*te	-0,000036	0,000024	-1,51	0,082
Ie*te	0,001129	0,000284	3,97	0,007

---

**Παράρτημα 15:** Αποτελέσματα ανάλυσης μεταβλητότητας ή διακύμανσης (ANOVA) και ανάλυσης παλινδρόμησης (Regression Analysis) του λογαριθμικού μοντέλου για όλες τις παραμέτρους του χάλυβα **ORVAR** όπως τα παίρνουμε από το **Minitab 14**.

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRa, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,64198	0,59458	0,64198	162,17	0,000
Lnte	1	0,52007	0,52007	0,52007	131,38	0,000
Error	8	0,03167	0,03167	0,00396		
Total	10	1,19372				

S = 0,0629178 R-Sq = 97,35% R-Sq(adj) = 96,68%

**Regression Analysis for LnRa**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,4670	0,1688	-2,77	0,024
LnIe	0,32859	0,02681	12,26	0,000
Lnte	0,32720	0,02855	11,46	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRp, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,90288	0,86468	0,90288	185,54	0,000
Lnte	1	0,22815	0,22815	0,22815	46,88	0,000
Error	8	0,03893	0,03893	0,00487		
Total	10	1,16996				

S = 0,0697584 R-Sq = 96,67% R-Sq(adj) = 95,84%

**Regression Analysis for LnRp**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,2036	0,1871	6,43	0,000
LnIe	0,39626	0,02973	13,33	0,000
Lnte	0,21671	0,03165	6,85	0,000

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRq, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,40000	0,36178	0,40000	20,90	0,002
Lnte	1	0,55476	0,55476	0,55476	28,98	0,001
Error	8	0,15314	0,15314	0,01914		
Total	10	1,10790				

S = 0,138355 R-Sq = 92,18% R-Sq(adj) = 91,72%

**Regression Analysis for LnRq**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-0,0760	0,3712	-0,20	0,043
LnIe	0,25631	0,05896	4,35	0,002
Lnte	0,33793	0,06277	5,38	0,001

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRv, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,81553	0,78990	0,81553	12,37	0,008
Lnte	1	0,10988	0,10988	0,10988	1,67	0,033
Error	8	0,52745	0,52745	0,06593		
Total	10	1,45285				

S = 0,256771 R-Sq = 92,70% R-Sq(adj) = 90,62%

---

**Regression Analysis for LnRv**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,4930	0,6888	2,17	0,042
LnIe	0,3787	0,1094	3,46	0,009
Lnte	0,1504	0,1165	1,29	0,033

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRt, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,68346	0,61778	0,68346	10,22	0,013
Lnte	1	0,95968	0,95968	0,95968	14,35	0,005
Error	8	0,53510	0,53510	0,06689		
Total	10	2,17825				

S = 0,258627 R-Sq = 91,43% R-Sq(adj) = 90,29%

**Regression Analysis for LnRt**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0,6995	0,6938	1,01	0,043
LnIe	0,3349	0,1102	3,04	0,013
Lnte	0,4445	0,1173	3,79	0,005

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRs, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,00013	0,00124	0,00013	0,01	0,031
Lnte	1	0,34117	0,34117	0,34117	20,86	0,002
Error	8	0,13087	0,13087	0,01636		
Total	10	0,47217				

S = 0,127901 R-Sq = 79,28% R-Sq(adj) = 75,35%

**Regression Analysis for LnRs**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	3,3722	0,3431	9,83	0,000
LnIe	-0,01503	0,05450	-0,28	0,031
Lnte	0,26501	0,05803	4,57	0,002

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRsk, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	6,5124	6,8063	6,5124	43,55	0,000
Lnte	1	2,0902	2,0902	2,0902	13,98	0,006
Error	8	1,1963	1,1963	0,1495		
Total	10	9,7989				

S = 0,386704 R-Sq = 67,79% R-Sq(adj) = 65,74%

**Regression Analysis for LnRsk**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-1,025	1,037	-0,99	0,052
LnIe	1,1117	0,1648	6,75	0,000
Lnte	-0,6559	0,1755	-3,74	0,006

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRku, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,038265	0,041827	0,038265	4,67	0,054
Lnte	1	0,049186	0,049186	0,049186	6,00	0,040
Error	8	0,065593	0,065593	0,008199		
Total	10	0,153045				

---

S = 0,0905490 R-Sq = 57,14% R-Sq(adj) = 52,43%

**Regression Analysis for LnRku**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,4067	0,2429	5,79	0,000
LnIe	0,08715	0,03859	2,26	0,054
Lnte	-0,10062	0,04108	-2,45	0,040

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRzDIN, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,60396	0,57004	0,60396	148,80	0,000
Lntp	1	0,27653	0,27653	0,27653	68,13	0,000
Error	8	0,03247	0,03247	0,00406		
Total	10	0,91296				

S = 0,0637088 R-Sq = 96,44% R-Sq(adj) = 95,55%

**Regression Analysis for LnRzDIN**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,5983	0,1709	9,35	0,000
LnIe	0,32174	0,02715	11,85	0,000
Lnte	0,23859	0,02891	8,25	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRy, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,78499	0,74314	0,78499	160,18	0,000
Lntp	1	0,32231	0,32231	0,32231	65,77	0,000
Error	8	0,03921	0,03921	0,00490		
Total	10	1,14650				

S = 0,0700051 R-Sq = 96,58% R-Sq(adj) = 95,73%

**Regression Analysis for LnRy**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,6265	0,1878	8,66	0,000
LnIe	0,36735	0,02983	12,31	0,000
Lnte	0,25758	0,03176	8,11	0,000

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRsm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	1,6313	1,6414	1,6313	4,43	0,030
Lnte	1	0,0151	0,0151	0,0151	0,04	0,044
Error	8	2,9469	2,9469	0,3684		
Total	10	4,5933				

S = 0,606924 R-Sq = 77,84% R-Sq(adj) = 74,81%

**Regression Analysis for LnRsm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	4,294	1,628	2,64	0,050
LnIe	0,5460	0,2586	2,11	0,030
Lnte	-0,0558	0,2754	-0,20	0,044

---

**Analysis of Variance (ANOVA) for LnRpm, using Sequential SS for Tests**

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P
LnIe	1	0,75915	0,72815	0,75915	219,40	0,000
Lnte	1	0,17812	0,17812	0,17812	51,48	0,000
Error	8	0,02768	0,02768	0,00346		

---

---

Total 10 0,96495

S = 0,0588229 R-Sq = 97,13% R-Sq(adj) = 96,41%

**Regression Analysis for LnRpm**

Term	Coef	SE Coef	T	P
Constant	1,1193	0,1578	7,09	0,000
LnIe	0,36363	0,02507	14,51	0,000
Lnte	0,19148	0,02669	7,17	0,000



**Παράρτημα 16:** Πίνακες για το χάλυβα SVERKR 21 με τις τιμές των μοντέλων όλων των παραμέτρων, όταν δώσουμε τις αντίστοιχες τιμές στα  $I_e$  και  $t_e$ , καθώς και τα σφάλματα αυτών.

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό δεύτερου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	3,95	3,698	6,81%	3,8265	3,22%	3,708532919	6,51%	4,0155	1,63%
30	4,24	4,688	9,56%	4,111	3,13%	4,048478215	4,74%	4,028	5,26%
45	5,257	5,778	9,01%	5,3815	0,94%	5,717259606	8,05%	5,5765	5,72%
60	7,946	7,268	9,33%	7,584	4,77%	7,372564661	8,21%	7,353	8,02%
75	7,971	8,558	6,86%	7,5765	4,49%	7,791917901	2,26%	7,6375	4,45%
90	8,268	7,968	3,79%	8,041	2,82%	7,782986209	6,23%	7,864	5,51%
90	8,12	8,848	7,72%	8,129	0,11%	8,231508763	1,35%	8,778	7,41%
150	8,481	9,248	8,69%	8,611	1,50%	8,71819654	3,44%	8,81	3,74%
180	11,29	10,848	4,53%	11,064	2,04%	10,59508899	6,56%	10,639	6,50%
270	12,5	12,228	2,45%	12,469	0,32%	12,69010511	1,50%	12,114	3,30%
300	13,72	12,928	6,35%	13,184	4,07%	12,95725531	5,89%	12,625	8,67%
450	14,71	15,308	3,85%	15,029	2,12%	15,11935354	2,58%	15,75	6,60%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_b$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό δεύτερου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	12,234	11,435	6,99%	12,236	0,16%	11,5837348	5,61%	11,8285	3,50%
30	11,133	12,3	9,48%	11,787	5,12%	12,08754615	7,50%	11,947	7,03%
45	14,91	15,715	5,09%	14,273	4,48%	14,29335939	4,89%	15,6055	4,48%
60	29,27	27,03	8,28%	28,654	2,33%	28,69284757	2,02%	28,684	2,34%
75	27,79	25,595	8,58%	26,59	4,51%	26,0120056	6,88%	26,1825	6,14%
90	29,72	27,38	8,54%	28,461	3,36%	28,2674694	5,16%	28,361	4,79%
90	33,77	35,76	5,56%	35,041	3,63%	36,30427316	6,96%	36,421	7,28%
150	27,27	29,46	7,43%	28,515	4,36%	29,08853521	5,96%	28,995	5,93%
180	35,88	33,11	8,37%	35,902	0,06%	35,66568307	0,60%	34,072	5,52%
270	43,69	41,84	4,42%	43,763	0,17%	44,00133146	0,71%	42,783	2,12%
300	39,97	43,19	7,45%	40,43	1,14%	42,08584189	4,83%	39,96	0,03%
450	48,09	50,92	5,73%	47,765	0,68%	46,1557017	4,20%	49,145	2,15%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>a</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	4,866	4,57	6,47%	4,72775	2,92%	4,673137547	4,13%	4,9935	2,55%
30	5,372	5,91	9,10%	5,428	1,03%	5,896982344	8,79%	5,71	5,91%
45	6,532	7,01	6,68%	6,35075	2,85%	6,978812324	6,28%	7,0105	6,68%
60	9,912	9,19	7,86%	9,416	5,27%	9,556725583	3,79%	9,443	5,01%
75	9,809	10,35	5,23%	9,73375	0,77%	10,28656033	3,83%	9,6275	1,89%
90	10,323	9,65	6,97%	9,874	4,55%	9,690071606	6,53%	9,75	5,87%
90	10,494	11,47	8,50%	10,754	2,42%	10,72230971	2,21%	11,476	8,55%
150	10,341	11,39	9,20%	10,58	2,25%	11,25400345	8,35%	11,19	6,97%
180	13,99	12,93	8,19%	13,608	2,81%	13,26458217	5,47%	13,229	5,75%
270	15,62	15,51	0,71%	15,592	0,18%	15,93906768	2,00%	15,508	0,72%
300	16,32	15,27	6,88%	15,96	2,26%	16,08986506	1,43%	15,515	5,19%
450	18,51	19,05	2,57%	18,59	0,43%	19,33400124	4,26%	18,24	1,48%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>v</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	12,294	13,182	6,74%	12,18275	0,91%	12,96550434	5,18%	13,08	5,46%
30	15,71	16,391	4,15%	15,391	2,05%	16,65180219	5,66%	16,89	6,99%
45	19,89	18,815	5,71%	19,83275	0,29%	18,99944602	4,73%	18,83	5,63%
60	24,13	22,19	8,74%	23,474	2,79%	22,5861728	6,86%	22,51	7,19%
75	22,33	23,115	3,37%	21,68275	2,99%	21,510568	3,86%	23,08	3,25%
90	25,93	23,74	9,22%	23,951	8,26%	23,82334677	8,84%	23,75	9,17%
90	23,72	25,64	7,48%	24,779	4,27%	24,75722799	4,19%	25,13	5,61%
150	25,78	28,34	9,03%	26,711	3,49%	28,14008887	8,39%	27,21	5,26%
180	28,7	30,854	6,98%	28,854	0,51%	30,59670088	6,20%	30,49	5,87%
270	36,12	34,94	3,38%	35,979	0,39%	35,41959127	1,98%	34,93	3,41%
300	34,71	35,79	3,01%	35,434	2,04%	36,140761	3,96%	35,47	2,14%
450	43,39	41,24	5,21%	42,379	2,39%	41,83754935	3,71%	42,73	1,54%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>i</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	24,55	23,84	2,98%	24,49	0,24%	24,72365411	0,70%	25,445	3,52%
30	27,05	29,94	9,65%	26,28	2,92%	26,98674502	2,25%	28,85	6,23%
45	34,8	37,44	7,05%	35,88	3,01%	36,15735167	3,75%	37,435	7,04%
60	53,39	48,14	10,91%	50,37	5,99%	50,62713245	5,47%	49,66	7,51%
75	50,11	51,04	1,82%	50,47	0,71%	46,975639	6,68%	49,425	1,39%
90	55,65	49,54	12,23%	53,54	3,94%	54,11926633	2,84%	56,55	1,78%
90	57,51	64,34	10,62%	59,38	3,15%	54,58276246	5,36%	62,47	7,94%
150	52,98	59,14	10,42%	57,84	8,40%	58,61537377	9,61%	58,25	9,05%
180	64,59	61,74	4,62%	67,05	3,67%	66,72784961	3,20%	61,78	4,55%
270	79,8	77,94	2,39%	79,48	0,40%	79,82509902	0,03%	78,01	2,29%
300	76,67	75,34	1,77%	76,77	0,13%	79,62818133	3,71%	75,9	1,01%
450	91,25	93,54	2,44%	90,62	0,70%	95,25748988	4,21%	93,55	2,46%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>s</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	82,11	76	8,04%	88,4475	7,17%	75,83949754	8,27%	89,695	10,00%
30	105,96	93,85	12,90%	100,41	5,52%	94,1771117	12,60%	99,48	6,51%
45	84,39	87,38	3,42%	87,7275	3,80%	87,73926519	3,77%	85,395	1,19%
60	88,84	99,55	10,76%	94,08	5,57%	100,2096408	11,35%	95,05	6,20%
75	87,9	94,76	7,24%	85,8075	2,44%	89,22599865	1,49%	81,095	7,63%
90	93,24	93,23	0,01%	95,77	2,64%	97,40734876	4,28%	93,26	0,02%
90	93,26	105,25	11,39%	97,41	4,26%	101,7185993	8,29%	98,62	4,93%
150	83,69	95,61	9,71%	90,93	7,96%	90,5648258	7,52%	95,04	11,07%
180	104,39	108,93	4,17%	101,6	0,35%	111,9692456	6,77%	108,99	4,11%
270	140,07	124,63	12,39%	127,09	10,21%	125,4767306	11,69%	124,72	12,64%
300	132,43	118,31	11,93%	121,92	8,62%	120,8977388	9,54%	122,93	8,06%
450	141,25	134,01	5,40%	144,57	2,29%	146,9086216	3,84%	150,82	7,48%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{sk}$	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	-0,11509	-0,1906	39,62%	-0,342	66,35%	0,205841962	155,91%	1,0905	110,55%
30	-0,47139	-0,0756	523,53%	-0,138	241,59%	0,281578486	267,41%	1,289	136,57%
45	-0,43795	-0,1458	200,38%	-0,229	91,24%	0,120684913	462,89%	1,3235	133,09%
60	0,38157	0,1544	147,13%	0,261	46,20%	0,385181152	0,94%	1,686	77,37%
75	0,22634	-0,101	324,10%	0,124	82,53%	0,094153071	140,40%	1,5565	85,46%
90	0,057	-0,0308	285,06%	-0,108	152,78%	0,165089153	65,47%	1,439	96,04%
90	0,6345	0,3844	65,06%	0,648	2,08%	0,462656084	37,14%	2,083	69,54%
150	0,09694	0,014	592,43%	0,162	40,16%	0,12879531	24,73%	1,589	93,90%
180	0,268164	0,1992	34,62%	0,125	114,53%	0,225831281	18,75%	1,67	83,94%
270	0,24164	0,4292	43,70%	0,346	30,16%	0,271254747	10,92%	1,901	87,29%
300	0,11375	0,244	53,38%	0,229	50,33%	0,176183651	35,44%	1,654	93,12%
450	0,35147	0,474	25,85%	0,284	23,76%	0,211621045	66,08%	1,719	79,55%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{ku}$	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	2,657	3,13315	15,20%	3,0535	12,99%	3,157176935	15,84%	2,964	10,36%
30	3,4	3,1643	7,45%	2,759	23,23%	3,192164756	6,51%	3,068	10,82%
45	3,222	2,87715	11,99%	3,1145	3,45%	2,831808736	13,78%	2,871	12,23%
60	3,022	3,2266	6,34%	1,888	60,06%	3,227540311	6,37%	3,276	7,75%
75	2,822	2,62115	7,66%	3,0955	8,84%	2,692160147	4,82%	2,778	1,58%
90	2,977	2,9083	2,36%	2,893	2,90%	2,863190827	3,97%	2,902	2,58%
90	3,675	3,2889	11,74%	0,641	473,32%	3,248415142	13,13%	3,484	5,48%
150	2,649	2,6523	0,12%	2,947	10,11%	2,721994654	2,68%	2,736	3,18%
180	2,662	2,9706	10,39%	2,168	22,79%	2,894920895	8,05%	2,964	10,19%
270	2,986	3,0329	1,55%	1,067	179,85%	2,913644235	2,48%	3,026	1,32%
300	2,368	2,7146	12,77%	2,368	0,00%	2,752159786	13,96%	2,652	10,71%
450	2,866	2,7769	3,21%	1,413	102,83%	2,769959988	3,47%	2,568	11,60%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{z01}$ [μm]	πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	19,84	19,1	3,87%	19,932	0,46%	19,62725014	1,08%	20,2745	2,14%
30	21,17	23,15	8,55%	22,269	4,63%	22,97021682	7,55%	23,309	9,14%
45	26,05	28,02	7,03%	27,241	4,36%	28,20391982	7,64%	29,0635	10,37%
60	40,97	37,75	8,52%	38,508	6,39%	37,36304919	9,66%	37,378	9,63%
75	39,41	38,94	1,21%	39,51	0,25%	36,38255389	8,32%	37,8525	4,11%
90	40,05	36,57	9,51%	37,087	7,99%	37,3186212	7,32%	37,607	8,83%
90	40,93	43,85	8,73%	43,167	5,18%	40,4792598	1,11%	45,447	9,94%
150	40,03	43,49	7,95%	41,865	4,37%	44,1708419	9,37%	43,905	8,83%
180	49,31	45,67	7,97%	49,344	0,07%	49,37893375	0,14%	45,694	7,91%
270	57,31	56,77	0,95%	57,021	0,51%	58,16779171	1,47%	56,781	0,93%
300	56,03	58,59	4,36%	57,14	1,94%	58,44559647	4,13%	57,01	1,71%
450	66,87	63,69	4,99%	65,835	1,57%	68,84821166	2,87%	68,115	1,83%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_v$ [μm]	πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	22,97	24,35	5,66%	22,0755	4,052%	23,64610551	2,86%	24,153	4,90%
30	26,01	28,1	7,43%	27,186	4,32%	28,07840906	7,10%	27,106	4,02%
45	33,83	37,57	9,95%	37,2015	9,06%	35,00192348	3,35%	35,559	4,86%
60	48,5	45,6	6,36%	45,122	7,49%	45,51770855	6,59%	45,012	7,75%
75	47,99	48,79	1,64%	47,6475	0,73%	49,00412233	2,06%	46,965	2,18%
90	52,78	47,32	11,53%	49,118	7,45%	47,48376086	11,15%	48,318	7,74%
90	55,06	61,1	9,89%	55,678	1,11%	52,01710443	5,85%	58,918	6,55%
150	48,97	55,54	11,82%	54,37	9,93%	54,98297412	10,93%	55,53	11,81%
180	63,09	58,82	7,26%	63,666	0,90%	64,41667546	2,06%	58,836	7,23%
270	75	74,32	0,91%	75,034	0,45%	76,99782563	2,59%	77,354	3,04%
300	73,47	72,04	1,99%	72,53	1,30%	77,30334929	4,96%	72,66	1,11%
450	87,8	89,54	2,05%	86,31	1,73%	92,40138157	4,98%	89,79	2,22%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{sm}$ [μm]	πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	156,6	172,65	9,64%	161,815	3,22%	165,6375355	3,64%	164,25	4,65%
30	252,4	231,4	9,07%	237,49	6,27%	233,3459787	7,74%	235,5	7,17%
45	221,7	224,45	1,23%	220,235	0,68%	215,2935202	2,98%	223,75	0,92%
60	198,8	224,9	11,60%	216,69	8,25%	217,7750548	8,68%	218	8,80%
75	221,3	251,25	11,92%	240,575	8,01%	235,4260359	6,00%	233,25	5,12%
90	229,9	249,2	7,74%	238,41	3,94%	246,4516942	6,72%	238,5	3,61%
90	267,3	254,4	5,07%	265,69	0,60%	251,9267205	6,10%	270,5	1,18%
150	298,9	273	9,49%	281,25	6,28%	269,4978713	10,91%	275,5	8,49%
180	305,1	268,7	13,55%	302,61	0,82%	282,1192088	8,15%	288	5,93%
270	309,8	298,2	3,89%	290,61	6,60%	305,3306855	1,46%	297,5	4,13%
300	352,7	325,5	8,35%	346,45	1,80%	326,5007245	8,02%	328	7,53%
450	372,6	332	12,23%	354,45	5,12%	333,8827515	11,60%	329,5	13,08%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{pm}$ [μm]	πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	9,706	9,155	6,02%	9,711	0,51%	9,25559393	4,87%	8,986	8,98%
30	8,883	9,45	6,03%	8,372	6,10%	9,83779542	9,38%	9,252	3,98%
45	11,688	12,175	3,96%	12,093	3,34%	12,49139578	5,74%	12,198	4,18%
60	22,74	20,94	8,59%	22,904	0,69%	20,80641982	9,32%	20,784	9,41%
75	21,39	20,195	5,91%	20,485	3,14%	20,07500083	6,57%	19,61	9,08%
90	20,13	21,47	6,24%	20,516	1,80%	18,71298377	7,57%	18,496	8,83%
90	23,71	25,63	7,49%	25,236	6,05%	22,56213112	5,09%	26,116	9,21%
150	20,2	21,49	6,01%	20,74	2,60%	21,29652398	5,11%	21,74	7,08%
180	26,68	25,06	6,46%	25,712	3,76%	25,95548801	2,79%	25,092	6,72%
270	30,4	30,65	0,82%	30,708	1,00%	31,42999219	3,28%	30,688	0,94%
300	28,63	29,08	1,55%	28,6	0,10%	30,92596927	7,42%	29	1,28%
450	35	35,67	1,88%	35,26	0,73%	37,44884212	6,54%	35,26	0,74%

**Παράρτημα 17:** Πίνακες για το χάλυβα IMPAX με τις τιμές των μοντέλων όλων των παραμέτρων, όταν δώσουμε τις αντίστοιχες τιμές στα  $I_e$  και  $t_e$ , καθώς και τα σφάλματα αυτών.

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	4,388	4,665	5,93%	4,4425	1,22%	4,258259555	1,17%	4,2015	4,37%
30	4,502	4,75	5,22%	4,367	3,09%	4,3441184	3,50%	4,683	3,86%
45	4,918	5,245	6,23%	5,1255	4,04%	4,576637214	7,22%	4,6445	5,88%
60	6,935	7,42	6,60%	7,212	3,84%	7,402179908	6,31%	7,446	6,78%
75	7,386	8,125	9,87%	7,6285	3,18%	7,246558483	3,35%	7,55875	2,17%
90	8,897	8,43	6,53%	8,653	2,82%	8,139785845	9,30%	9,529	6,61%
90	9,918	10,59	6,35%	9,385	5,68%	9,256174116	7,60%	10,309	3,79%
150	10,948	10,21	7,23%	10,959	0,18%	10,298765819	6,86%	10,075	8,67%
180	13,06	12,4	5,32%	12,904	1,24%	12,27449444	6,43%	12,398	5,09%
270	13,34	14,17	5,85%	13,283	0,43%	13,64143219	2,21%	13,167	1,31%
300	13,39	12,98	3,16%	13,516	0,93%	13,71087426	2,34%	13,05	2,61%
450	14,65	15,75	6,98%	15,101	2,99%	15,58929919	5,96%	16,025	8,58%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	17,94	16,32	9,92%	16,9635	5,77%	16,52438802	8,56%	16,3435	9,79%
30	14,87	16,05	9,35%	15,457	3,79%	15,78596428	5,80%	15,357	3,17%
45	15,78	17,4	9,31%	17,3305	8,08%	17,38181286	9,20%	17,4105	9,53%
60	26,93	28,21	4,54%	29,104	7,47%	26,95358881	0,09%	28,384	5,12%
75	31	31,08	0,26%	30,3975	1,98%	30,59383019	1,34%	31,4775	1,52%
90	29,65	27,23	8,89%	28,351	4,58%	29,12754637	1,79%	27,251	8,80%
90	37,25	37,87	1,64%	37,431	0,48%	37,59633939	0,90%	38,411	3,02%
150	38,84	35,91	8,16%	36,245	7,16%	35,86540081	8,31%	36,145	7,46%
180	42,17	37,89	11,56%	38,652	9,10%	39,67923407	6,28%	39,932	5,60%
270	48,11	46,55	3,35%	46,633	3,17%	47,54446687	1,19%	46,613	3,21%
300	44,33	45,57	2,72%	46,2	4,05%	47,49567238	6,67%	45,48	2,53%
450	52,23	55,23	5,43%	53,835	2,98%	56,91028254	8,22%	54,815	4,72%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>a</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	5,568	5,995	7,17%	5,863	5,03%	5,926895927	5,62%	5,1455	8,32%
30	5,809	6,43	9,66%	5,591	3,89%	5,514836276	5,35%	5,471	6,19%
45	6,131	6,795	9,51%	6,594	7,02%	6,765458177	9,37%	6,7965	9,79%
60	8,736	9,6	9,37%	8,512	2,77%	9,426217676	7,32%	8,522	2,51%
75	9,309	10,095	7,02%	9,685	3,88%	8,879661495	4,84%	9,6475	3,52%
90	11,026	10,53	4,65%	10,733	2,73%	10,18783273	8,23%	10,533	4,51%
90	12,776	13,37	4,44%	12,053	6,00%	12,39588804	9,52%	13,073	2,27%
150	13,45	12,63	6,49%	12,635	6,45%	12,28226457	9,51%	12,495	7,64%
180	16,26	15	8,40%	15,776	3,06%	15,09171476	8,40%	15,006	8,35%
270	16,43	16,47	0,24%	16,539	0,62%	17,03627151	3,56%	16,479	0,30%
300	16,57	16,1	2,92%	16,9	1,95%	16,98871325	2,46%	16,19	2,35%
450	18,36	19,57	6,18%	18,985	3,29%	19,53861695	5,99%	19,885	7,67%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>v</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	15,2	14,405	5,52%	15,09	0,72%	14,9307386	2,01%	15,34	0,91%
30	20,5	18,76	9,27%	19,19	6,83%	19,57220541	5,12%	19,28	6,32%
45	17,45	18,845	7,18%	17,32	0,74%	17,85443016	1,96%	17,85	2,24%
60	17,31	18,77	7,77%	18,68	7,33%	18,90222866	8,41%	18,16	4,68%
75	22,44	24,285	7,57%	24,19	7,23%	23,19982512	3,28%	23,36	3,93%
90	26,51	24,2	9,55%	25,83	2,63%	25,68113705	3,23%	24,2	9,55%
90	33,9	31,18	8,72%	32,89	3,07%	31,70356218	6,94%	27,04	1,96%
150	31,73	30,64	3,56%	31,11	1,99%	30,85792547	3,01%	30,12	5,35%
180	40,39	38,91	3,83%	39,14	3,19%	38,05134724	6,28%	38,9	3,83%
270	31,13	33,62	7,40%	30,17	3,18%	30,30772713	2,73%	32,6	4,50%
300	41,58	39,35	5,66%	40,24	3,33%	40,42682903	2,86%	40,64	2,31%
450	42,75	44,06	2,97%	43,09	0,79%	44,53810824	4,01%	45,16	5,34%



ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>z</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	33,14	30,86	7,38%	31,675	4,64%	30,65514275	8,12%	30,97	7,00%
30	35,06	36,66	4,36%	35,75	1,93%	36,10308186	2,88%	36,83	4,81%
45	35,21	32,68	7,18%	35,495	0,78%	32,4732214	8,43%	33,61	4,76%
60	44,58	48,86	8,75%	47,75	6,63%	48,56107405	8,19%	47,55	6,24%
75	53,43	58,8	9,13%	54,915	2,70%	49,87321099	7,13%	58,25	8,27%
90	56,17	51,78	8,48%	56,79	1,91%	57,75979295	2,65%	51,69	8,67%
90	71,14	69,06	3,01%	71,55	0,57%	72,61531519	2,02%	68,27	4,20%
150	70,6	66,9	5,53%	67,43	4,70%	65,76249754	7,36%	66,55	6,09%
180	82,62	75,98	8,73%	78,23	5,61%	76,52450693	7,97%	77,82	6,16%
270	79,24	84,18	5,87%	83,47	5,07%	86,43557652	8,32%	84,01	5,68%
300	85,89	83,1	3,36%	86,31	0,49%	86,71400933	0,95%	83,15	3,30%
450	94,95	99,3	4,38%	96,99	2,10%	98,9411854	6,86%	99,75	4,81%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>z</sub> [μm]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	82,2	73,96	11,14%	80,121	2,59%	76,39423108	7,60%	77,32	6,31%
30	55,81	61,56	9,34%	60,226	7,33%	60,57887937	7,85%	60,94	5,64%
45	84,49	76,88	9,84%	78,029	8,28%	77,91524911	8,92%	77,86	8,51%
60	70,96	72,76	2,47%	69,198	2,54%	72,6788548	2,35%	68,18	3,88%
75	48,15	52,18	7,72%	54,297	5,79%	51,87424087	7,04%	52,4	8,11%
90	48,52	52,48	7,54%	51,082	5,01%	50,31287902	3,55%	50,42	3,76%
90	63,35	69,96	9,44%	67,186	5,70%	68,8873417	8,02%	67,42	5,29%
150	102,85	92,4	11,30%	98,298	4,63%	93,5364836	9,96%	95,9	7,24%
180	70,35	79,68	11,70%	75,95	7,37%	79,78037043	11,08%	78,54	10,42%
270	63,35	58,88	7,59%	68,834	7,96%	67,86820433	6,56%	67,66	6,37%
300	117,96	109,6	7,62%	111,062	6,21%	110,0834061	7,23%	111,9	5,41%
450	114,21	105,8	7,95%	117,842	3,04%	110,62924506	3,26%	121,9	7,96%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές R <sub>sk</sub>	πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	0,04225	-0,031	236,29%	-0,158	126,74%	0,105417972	59,92%	-0,1625	126,00%
30	-0,39494	0,036	1197,06%	-0,041	863,27%	0,150850643	361,81%	-0,037	967,41%
45	-0,08934	0,085	205,11%	0,098	191,16%	0,165399568	154,01%	0,0855	204,49%
60	0,5666	0,17	233,29%	0,205	176,39%	0,215863728	162,48%	0,214	164,77%
75	0,4438	0,201	120,80%	0,354	25,37%	0,203935278	117,62%	0,3335	33,07%
90	0,27366	0,152	80,04%	0,157	74,31%	0,236682899	15,62%	0,153	78,86%
90	0,26146	0,304	13,99%	0,467	44,01%	0,266206622	1,78%	0,465	43,77%
150	0,32926	0,268	22,86%	0,355	7,25%	0,291826594	12,83%	0,343	4,01%
180	0,1793	0,286	37,31%	0,287	37,53%	0,338687671	47,06%	0,288	37,74%
270	0,58718	0,42	39,80%	0,433	35,61%	0,417675084	40,58%	0,423	38,81%
300	0,2496	0,402	37,91%	0,369	32,36%	0,417597005	40,23%	0,362	31,05%
450	0,37998	0,536	29,11%	0,399	4,77%	0,514987343	26,22%	0,381	0,27%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές R <sub>ku</sub>	πολυωνμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	3,433	3,33475	2,95%	3,57775	4,05%	3,428019923	0,15%	3,3555	2,31%
30	3,702	3,3345	11,02%	3,375	9,69%	3,401510386	8,83%	3,344	10,71%
45	2,951	3,12475	5,56%	3,03875	2,89%	3,10120074	4,84%	3,1205	5,43%
60	3,125	3,334	6,27%	3,253	3,93%	3,375205852	7,41%	3,321	5,90%
75	3,308	2,91475	13,49%	3,05975	8,11%	2,960037908	11,76%	2,8855	14,64%
90	2,745	3,1245	12,15%	2,847	3,58%	3,077218558	10,80%	3,12	12,02%
90	3,457	3,3335	3,70%	3,509	1,48%	3,359913087	2,89%	3,298	4,82%
150	2,809	2,9145	3,62%	2,879	2,43%	2,937147366	4,36%	2,896	3,00%
180	2,929	3,124	6,24%	2,747	6,63%	3,053421836	4,07%	3,119	6,09%
270	3,103	3,1235	0,66%	3,025	2,58%	3,039587045	2,09%	3,118	0,48%
300	2,757	2,914	5,39%	2,801	1,57%	2,914433841	5,40%	2,917	5,49%
450	3,17	2,9135	8,80%	3,101	2,23%	2,901228793	9,26%	2,938	7,90%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{zDIN}$ [ $\mu m$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	23,96	22,59	6,06%	22,695	5,57%	22,90738005	4,62%	23,035	4,01%
30	24,593	26,34	6,63%	25,62	4,01%	25,9111089	5,04%	26,29	6,45%
45	25	27,27	8,32%	26,005	3,86%	26,74383449	6,36%	26,305	4,96%
60	43,44	40,84	6,37%	41,41	4,49%	42,32063374	4,96%	40	8,60%
75	40,22	42,95	6,36%	39,515	1,78%	42,22192125	4,74%	43,175	6,84%
90	43,31	41,02	5,58%	41,84	3,51%	41,56673282	4,19%	42,07	2,92%
90	49,74	50,34	1,19%	49,12	1,26%	49,14483816	1,21%	50,71	1,91%
150	50,56	48,7	3,82%	49,26	2,64%	47,79511164	5,78%	48,85	3,50%
180	62,33	60,52	2,99%	61,45	1,43%	61,52812487	1,31%	57,6	8,21%
270	59,48	61,02	2,52%	61,78	1,23%	61,95330477	3,98%	61,13	2,70%
300	61,66	60,2	2,43%	61,14	0,85%	63,0660279	2,23%	60,2	2,43%
450	66,74	71,7	6,92%	68,04	1,91%	72,01063245	7,31%	71,55	6,72%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_y$ [ $\mu m$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	31,93	29,76	7,29%	30,87	3,43%	29,95765497	6,78%	29,895	6,80%
30	34,32	35,66	4,59%	35,31	2,80%	37,19847186	7,74%	35,25	2,64%
45	30,43	32,88	7,45%	32,18	5,43%	32,90142794	7,50%	32,885	7,46%
60	42,75	46,46	7,98%	43,16	0,94%	43,1136471	0,83%	44,96	4,91%
75	51,69	55	6,02%	50,77	1,81%	54,04489026	4,27%	53,875	4,06%
90	54,74	50,78	7,79%	51,13	7,06%	52,29169123	4,68%	53,75	1,84%
90	67,1	65,26	2,81%	67,97	1,27%	66,49234813	0,91%	64,67	3,76%
150	63,15	62,9	0,40%	63,23	0,13%	61,26406369	3,08%	62,25	1,45%
180	76,78	72,58	5,78%	77	0,28%	74,57561379	2,96%	75,48	1,72%
270	76,06	80,38	5,37%	78,83	3,51%	80,2255231	5,18%	80,21	5,17%
300	83,59	78,7	6,21%	82,12	1,79%	81,51361591	2,55%	79	5,81%
450	90,69	94,5	4,03%	92,97	2,45%	96,33403636	5,86%	93,75	3,26%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό δεύτερου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	159,5	144	10,76%	157,14	1,50%	152,8067577	4,38%	168,4	5,29%
30	168,9	156,9	7,64%	176,74	4,44%	175,4586985	3,74%	180,4	6,37%
45	213,3	196,2	8,71%	201,76	5,72%	198,4102633	7,50%	197,1	8,21%
60	208	212,7	2,21%	204,54	1,69%	214,0772476	2,84%	204,4	1,76%
75	143,43	164,4	12,75%	150,7	4,82%	153,9937399	6,85%	152,8	6,13%
90	194,2	221,26	12,23%	202,26	3,98%	215,2382523	9,77%	203	4,33%
90	217,6	238,5	8,76%	217,14	0,21%	240,4964686	9,52%	228,4	4,73%
150	275,7	249,3	10,58%	252,1	9,36%	250,691861	10,01%	248,6	10,90%
180	273,3	248,9	9,80%	270,86	0,90%	262,6123014	4,07%	248,8	9,85%
270	305,6	294,7	3,70%	305,26	0,11%	295,0212216	3,59%	294,6	3,73%
300	272,9	285,1	4,28%	293,5	7,02%	288,7878604	5,50%	293,2	6,92%
450	352,2	330,9	6,44%	349,7	0,71%	324,4271	8,56%	360,8	2,38%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{qm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό δεύτερου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	12,083	11,465	5,39%	12,678	4,69%	11,22290638	7,66%	11,478	5,27%
30	12,855	13,8	6,84%	13,416	4,18%	13,50395159	4,77%	14,256	9,83%
45	12,26	13,445	8,77%	12,894	3,02%	12,84606431	4,51%	12,974	5,50%
60	20,62	21,47	3,96%	21,012	1,86%	20,59717298	0,11%	21,812	5,46%
75	22,17	22,425	1,14%	21,67	2,31%	20,6029544	7,62%	23,47	5,54%
90	23,49	22,28	5,43%	23,188	1,30%	22,46705912	4,58%	24,308	3,33%
90	28,05	28,14	0,32%	27,768	1,02%	27,60002723	1,63%	29,368	4,49%
150	27,86	25,76	8,15%	26,52	5,05%	26,20188698	6,33%	26,36	5,69%
180	32,24	29,95	7,64%	29,896	7,84%	30,08196118	7,18%	29,376	9,77%
270	34,45	33,62	2,47%	33,764	2,03%	34,73374902	0,82%	33,644	2,40%
300	32,31	32,43	0,37%	33,04	2,20%	34,14162577	5,36%	32,14	0,53%
450	35,17	39,1	10,05%	36,32	3,17%	39,77670875	11,75%	37,92	7,25%

**Παράρτημα 18:** Πίνακες για το χάλυβα **ORVAR** με τις τιμές των μοντέλων όλων των παραμέτρων, όταν δόσουμε τις αντίστοιχες τιμές στα  $I_e$  και  $t_e$ , καθώς και τα σφάλματα αυτών.

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό δευτέρου βαθμού	πολυωνυμικό πρότυπο	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	5,315	5,47	2,81%	5,31025	5,329157393	0,89%	5,329157393	0,27%	5,588	4,89%
30	6,011	5,57	7,92%	6,124	6,66739749	1,85%	6,66739749	9,74%	6,195	2,97%
45	6,689	6,73	0,61%	6,85725	7,08322864	2,45%	7,08322864	5,52%	6,727	0,56%
60	7,452	7,77	4,09%	7,632	7,790840918	2,36%	7,790840918	4,33%	7,409	0,58%
75	7,676	8,59	10,64%	7,59425	8,22747112	2,34%	8,22747112	6,69%	7,866	2,42%
90	7,96	7,83	1,66%	8,238	8,445720558	2,92%	8,445720558	5,80%	7,831	1,65%
90	8,144	7,97	2,18%	7,994	8,500101422	1,88%	8,500101422	4,18%	8,623	5,55%
150	8,862	9,49	6,61%	9,272	9,46079535	4,42%	9,46079535	6,32%	9,467	6,39%
180	11,59	11,03	5,07%	11,74	11,92287997	1,30%	11,92287997	2,79%	11,839	2,10%
270	12,62	12,23	3,19%	12,396	13,66305558	1,81%	13,66305558	7,63%	12,247	3,05%
300	13,34	12,29	8,54%	12,768	13,96151141	4,48%	13,96151141	4,45%	12,669	5,30%
450	14,91	14,49	2,90%	15,118	15,99923062	1,38%	15,99923062	6,81%	15,871	6,06%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_p$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό δευτέρου βαθμού	πολυωνυμικό πρότυπο	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	18,12	16,97	6,77%	19,6125	20,09524405	7,61%	20,09524405	9,80%	19,595	7,52%
30	22,13	20,64	7,22%	22,7	22,71420826	2,51%	22,71420826	2,57%	23,23	4,74%
45	21,94	20,91	4,93%	21,8325	20,83325507	0,49%	20,83325507	5,31%	20,955	4,70%
60	31,1	29,98	3,74%	30,2	30,18004629	2,98%	30,18004629	3,05%	28,5	9,12%
75	22,81	25,85	11,76%	21,2925	22,83967427	7,13%	22,83967427	0,13%	21,315	7,01%
90	29,13	25,58	13,88%	26,96	27,68085047	8,05%	27,68085047	5,24%	26,93	8,16%
90	37,07	39,32	5,72%	35,8	35,63832778	3,54%	35,63832778	4,02%	33,77	9,77%
150	24,09	26,52	9,16%	25,46	26,34675121	5,38%	26,34675121	8,54%	26,03	7,45%
180	36,36	34,92	4,12%	36,54	36,77915334	0,49%	36,77915334	1,14%	35,98	1,05%
270	43,23	44,26	2,33%	45,22	43,43093145	4,40%	43,43093145	0,46%	44,33	2,48%
300	39,72	39,86	0,35%	41,12	40,32129783	3,40%	40,32129783	1,49%	41,46	4,20%
450	56,29	52,2	7,83%	53,88	54,61369861	4,47%	54,61369861	3,07%	54,89	2,55%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_d$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	6,665	6,505	2,46%	6,55025	0,76%	6,813521517	2,10%	7,012	4,94%
30	7,478	7,69	2,76%	7,557	1,04%	7,963588481	6,10%	8,274	9,62%
45	12,995	11,965	8,60%	12,65425	2,72%	11,999356318	8,30%	12,376	5,00%
60	9,433	10,06	6,23%	8,85	6,59%	9,589254578	1,63%	9,598	1,72%
75	9,401	10,425	9,82%	9,89825	5,02%	10,13968251	7,27%	10,44	9,95%
90	10,109	10,35	2,33%	10,785	6,28%	11,15796603	9,40%	10,362	2,44%
90	10,332	11,43	9,60%	10,049	2,82%	10,68999017	3,35%	10,722	3,64%
150	10,781	12,01	10,23%	11,653	7,48%	11,85246691	9,02%	11,25	4,16%
180	14,27	13,12	9,48%	14,126	1,02%	13,435724	6,21%	12,934	10,62%
270	15,61	15,09	3,45%	16,573	5,81%	14,97798982	4,22%	15,106	3,34%
300	16,14	15,38	4,94%	15,242	5,89%	15,71696333	2,69%	15,87	1,70%
450	18,94	17,75	6,70%	18,937	0,02%	17,52108907	8,10%	19,49	2,82%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_v$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	16,7	17,75	5,92%	17,405	4,05%	16,3387173	2,21%	17,745	5,88%
30	17,9	19,33	7,39%	18,94	5,54%	19,32128998	7,34%	19,99	10,45%
45	20,29	20,49	0,98%	20,275	0,073%	19,0134397	6,71%	20,475	0,90%
60	25,02	28,49	12,18%	27,65	9,51%	27,82332286	10,08%	27,48	8,95%
75	19,88	22,23	10,57%	18,865	5,38%	20,4021445	2,56%	20,205	1,61%
90	22,58	24,07	6,19%	23,12	2,03%	24,81168221	8,99%	24,05	6,11%
90	22,65	25,25	10,31%	23,88	5,15%	23,51082862	3,65%	23,97	5,50%
150	24,7	26,81	7,87%	25,06	1,43%	26,62387941	7,23%	25,11	1,63%
180	33,32	31,23	6,69%	35,49	6,11%	32,37812746	2,91%	31,2	6,79%
270	33	38,39	14,04%	33,38	1,14%	35,83299926	7,89%	35,35	6,64%
300	37,5	33,97	10,39%	41,09	8,74%	34,74296316	7,94%	34,92	7,39%
450	42,63	41,13	3,65%	41,64	2,38%	40,59624822	5,01%	44,73	4,69%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_1$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	34,82	32,21	8,10%	33,35	4,40%	32,6067529	6,80%	34,485	0,97%
30	40,06	36,56	9,57%	36,57	9,54%	37,07686116	8,27%	36,91	8,53%
45	42,29	39,73	6,44%	40,38	4,73%	40,65937333	4,01%	39,715	6,48%
60	25,02	28,26	11,46%	26,84	6,78%	26,64427597	6,08%	26,76	6,50%
75	42,68	47,25	9,67%	41,73	2,28%	45,52155782	6,23%	44,945	5,04%
90	51,79	48,08	7,72%	51,51	0,54%	52,07489334	0,55%	48,05	7,78%
90	54,66	60,96	10,33%	53,55	2,72%	50,44195063	8,36%	50,61	8,00%
150	43,9	47,6	7,77%	45,77	4,08%	49,42522353	11,16%	48,19	8,90%
180	69,7	64,78	7,59%	69,6	0,14%	66,69543318	4,50%	64,72	7,69%
270	80,24	81,48	1,52%	82,13	2,30%	77,08336712	4,10%	81,39	1,41%
300	114,25	104,3	9,53%	105,68	8,10%	104,23248049	9,61%	105,68	8,10%
450	101,91	100	1,91%	101,03	0,60%	93,88458576	8,55%	106,17	4,01%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_2$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	87,46	97,265	10,08%	92,71	5,66%	96,76130195	9,61%	96,52	9,38%
30	109,29	98,13	11,37%	101,92	7,23%	100,88881856	8,32%	103,85	5,61%
45	149,2	138,465	7,80%	140,43	6,24%	134,5774944	10,92%	134,46	10,96%
60	103,82	99,86	3,97%	98,4	5,50%	97,01650322	7,01%	96,51	7,53%
75	139,77	135,665	3,02%	131,31	6,44%	140,1086035	0,24%	129,4	7,40%
90	82,88	92,33	10,23%	90,2	8,11%	95,7416685	13,3%	90,35	8,26%
90	117,25	107,59	8,97%	110,96	5,66%	109,09127195	6,84%	109,17	7,40%
150	111,78	126,53	11,65%	121,64	8,10%	120,2932452	6,83%	124,85	10,97%
180	111,15	121,06	8,19%	120,8	7,99%	124,906059	11,01%	121,13	7,99%
270	130,2	122,79	6,03%	134,48	3,18%	125,0023217	4,16%	122,91	5,83%
300	133,88	142,26	5,89%	135,36	1,09%	140,4781303	4,70%	145,75	8,45%
450	167,5	153,99	8,77%	158,16	5,91%	157,586394	6,34%	156,65	7,72%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{sk}$	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	0,16403	0,1778	7,74%	0,18925	13,33%	0,104924378	56,33%	0,1496	9,65%
30	0,22636	0,2573	12,02%	0,26	12,94%	0,226474704	0,05%	0,2416	6,31%
45	0,02182	0,0464	52,97%	0,05825	62,54%	0,051036968	57,25%	0,0458	52,36%
60	0,486	0,4163	16,74%	0,433	12,24%	0,488835791	0,58%	0,4256	14,19%
75	0,05281	-0,085	162,13%	0,08725	39,47%	0,036504977	44,67%	-0,058	191,05%
90	0,12102	0,1259	3,88%	0,116	4,33%	0,110161073	9,86%	0,1248	3,03%
90	0,6375	0,5753	10,81%	0,648	1,62%	0,766697934	16,85%	0,6096	4,58%
150	-0,09847	-0,0055	1690,36%	0,132	174,60%	0,078794405	224,97%	0,008	1330,88%
180	0,235374	0,2849	17,38%	0,263	10,50%	0,237777881	1,01%	0,2828	16,77%
270	0,35931	0,4439	19,06%	0,452	20,51%	0,372934662	3,65%	0,4408	18,49%
300	0,1529	0,1535	0,39%	0,253	39,57%	0,170074292	10,10%	0,14	9,21%
450	0,355549	0,3125	13,78%	0,416	14,53%	0,266747262	33,29%	0,272	30,72%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{ku}$	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	2,826	2,958	4,46%	2,523	12,01%	2,966439105	4,73%	2,986	5,36%
30	3,045	3,067	0,72%	1,974	54,26%	3,161331154	3,68%	3,079	1,10%
45	2,939	2,696	9,01%	2,047	43,58%	2,620117307	12,17%	2,688	9,34%
60	3,621	3,285	10,23%	1,002	261,38%	3,369027413	7,48%	3,265	10,90%
75	2,491	2,434	2,34%	1,811	37,55%	2,473157798	0,72%	2,39	4,23%
90	2,794	2,805	0,39%	1,514	84,54%	2,792256364	0,06%	2,797	0,11%
90	3,488	3,503	0,43%	0,198	1661,62%	3,496791375	0,25%	3,451	1,07%
150	2,428	2,543	4,52%	1,294	87,64%	2,635641764	7,88%	2,515	3,46%
180	2,672	3,023	11,61%	0,574	365,51%	2,975704782	10,21%	3,015	11,38%
270	2,97	3,241	8,36%	-0,198	1600,00%	3,088552732	3,84%	3,233	8,13%
300	2,568	2,761	6,99%	0,386	565,28%	2,808800762	8,57%	2,765	7,12%
450	3,394	2,979	13,93%	-0,354	1058,76%	2,915319193	16,42%	3,015	12,57%



ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{z-DIN}$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	27,65	25,08	10,24%	26,87	2,90%	25,85424288	6,96%	28,13	1,71%
30	30,06	29,28	2,66%	31,4	4,27%	31,30714946	3,98%	29,79	0,91%
45	31,52	32,44	2,83%	31,66	0,44%	31,30372369	0,69%	31,87	1,09%
60	39,41	38,68	1,88%	39,94	1,32%	39,43542404	0,06%	36,11	9,13%
75	34,2	38,8	11,86%	33,97	0,67%	34,848512	1,86%	35,61	3,95%
90	40,39	36,64	10,23%	39,84	1,38%	39,43110884	2,43%	39,53	2,17%
90	40,49	45,08	10,18%	41,12	1,53%	45,13619077	10,29%	36,43	11,14%
150	36,68	40,55	9,54%	40,2	8,76%	40,89623048	10,29%	41,27	11,12%
180	52,75	50,04	5,41%	51,08	3,27%	49,66860684	6,20%	49,85	5,81%
270	58,29	57,44	1,48%	58,96	1,14%	56,84867775	2,54%	56,17	3,77%
300	56,1	54,4	3,13%	56,14	0,07%	55,29300791	1,46%	55,59	9,17%
450	69,37	64,8	7,05%	68,72	0,95%	63,28613965	9,61%	63,91	9,52%

ΕΝΕΡΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	33,11	30,66	7,99%	33,89625	2,32%	31,95698931	3,63%	35,685	7,22%
30	37,75	35,41	6,61%	39,015	3,24%	38,90330274	2,96%	39,82	5,20%
45	41,9	38,68	8,32%	40,33625	3,88%	38,69611961	8,28%	38,585	8,59%
60	49,97	50,91	1,85%	47,79	4,56%	50,52133071	1,09%	48,09	3,91%
75	41,29	43,7	5,55%	39,65625	4,12%	43,58712013	5,27%	43,485	4,86%
90	49,41	46,43	6,42%	49,055	0,72%	50,2522747	1,68%	46,32	6,67%
90	54,54	59,41	8,19%	54,615	0,14%	58,86554724	7,35%	56,36	3,23%
150	48,65	52,45	7,24%	51,975	6,40%	52,10391678	6,62%	52,82	7,89%
180	65,3	61,93	5,44%	65,03	0,42%	67,2595438	2,89%	61,79	5,68%
270	77,01	77,43	0,54%	77,055	0,05%	76,03795674	1,28%	77,26	0,32%
300	75,74	72,95	3,82%	75,15	0,79%	73,50803139	3,04%	73,49	3,06%
450	97,79	90,45	8,11%	96,375	1,47%	90,64878309	7,93%	93,16	4,96%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{sm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	Λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	165,7	177,75	6,77%	164,025	1,02%	171,9872007	3,60%	172,6	3,99%
30	210,9	197,2	6,95%	221,9	4,95%	198,416837	6,29%	224,3	5,97%
45	280,8	250,35	12,16%	258,825	8,50%	259,4427343	8,23%	260,2	7,91%
60	242,9	259,1	6,25%	250,6	3,07%	251,3108186	3,34%	233,7	3,94%
75	331,7	310,95	6,67%	315,825	5,03%	311,9550572	6,34%	310,8	6,72%
90	256,7	225,8	13,68%	283,5	9,45%	285,0718653	9,92%	284,7	9,83%
90	230	270	14,81%	261,9	12,18%	250,8499495	8,29%	254,1	9,48%
150	284,5	254,4	11,83%	263,3	8,05%	255,3771722	11,43%	257,1	10,65%
180	322,9	284,7	13,41%	366,8	11,97%	299,2527078	7,90%	297,7	8,46%
270	312	339,6	8,12%	332,7	6,22%	333,0148039	6,30%	331,7	5,94%
300	419,8	380,3	10,38%	387,2	8,41%	386,6917198	8,58%	387,7	8,27%
450	340,9	381,2	10,57%	366,7	7,04%	379,5577393	10,17%	382,3	10,82%

ENERΓΕΙΑ [mJ]	Πειραματικές τιμές $R_{gm}$ [ $\mu\text{m}$ ]	πολυωνυμικό πρότυπο πρώτου βαθμού	σφάλμα %	πολυωνυμικό πρότυπο δευτέρου βαθμού	σφάλμα %	Λογαριθμικό πρότυπο	σφάλμα %	μοντέλο αλληλεπίδρασης	σφάλμα %
15	14,63	13,885	6,01%	14,40875	1,54%	14,20197332	3,02%	15,385	4,91%
30	16,51	15,96	3,45%	16,205	1,91%	17,1208412	3,57%	17,33	4,73%
45	15,45	16,025	3,59%	16,01875	3,49%	16,43904045	5,96%	16,795	7,48%
60	22,75	22,11	2,89%	22,53	0,97%	22,20298408	2,46%	21,22	7,21%
75	17,71	19,165	7,59%	18,54875	4,47%	18,97945669	6,29%	16,605	6,65%
90	20,99	19,1	9,90%	20,345	3,17%	20,11101021	4,37%	20,07	4,58%
90	23,45	25,26	7,16%	24,165	2,96%	25,84910851	9,28%	25,11	6,61%
150	18,34	20,24	9,38%	19,605	6,45%	20,14931501	9,03%	20,21	9,25%
180	27,52	25,25	8,99%	26,93	2,19%	26,46980539	3,97%	25,22	9,12%
270	31,68	31,4	0,89%	31,825	0,46%	30,81661768	2,80%	31,37	0,99%
300	29,38	28,39	3,49%	29,45	0,24%	28,72410782	2,28%	29,22	0,55%
450	37,1	34,54	7,41%	36,605	1,35%	35,44111662	4,68%	37,63	1,41%



