ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διδακτορική Διατριβή

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΙΝΩΔΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ-ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

υπό

ΙΩΑΝΝΗ ΝΤΖΙΑΝΤΖΙΑ

Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Βιομηχανίας Πολυτεχνικής Σχολής Π.Θ., 2001

M.Sc., Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Βιομηχανίας, Πολυτεχνική Σχολή, Π.Θ., 2005

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των

απαιτήσεων για την απόκτηση του

Διδακτορικού Διπλώματος

2014

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

© 2014 Ιωάννης Ντζιαντζιάς

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

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στη μνήμη του Καθηγητή

Γεώργιου Πετρόπουλου

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Επιβλέπων)	Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής	Δρ. Κωνσταντίνος-Διονύσιος Μπουζάκης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Βαξεβανίδης Καθηγητής, Τμήμα Εκπαιδευτικών Μηχανολογίας, Ανώτατη Σχολή Παιδαγωγικής και Τεχνολογικής Εκπαίδευσης (ΑΣΠΑΙΤΕ)
Τέταρτος Εξεταστής	Δρ. Κυριάκος Ευσταθίου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Πέμπτος Εξεταστής	Δρ. Δημήτριος Μανωλάκος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (ΕΜΠ)
Έκτος Εξεταστής	Δρ. Ιωάννης Τσιάφης Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
Έβδομος Εξεταστής	Δρ. Αλέξανδρος Κερμανίδης Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τομέα Μηχανικής, Υλικών & Κατεργασιών στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Η πραγματοποίηση της συγκεκριμένης μελέτης οφείλεται στην βούληση του αείμνηστου Καθηγητή Γεωργίου Πετρόπουλου υπό την επίβλεψη και στενή καθοδήγηση του οποίου ολοκληρώθηκε το μεγαλύτερο ερευνητικό μέρος της. Αποτέλεσε ιδιαίτερη τιμή για εμένα η συνεργασία μας, η εμπιστοσύνη που μου έδειξε, αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο ερευνητικό αντικείμενο, καθώς και η συνεχής ενασχόληση και επιστημονική στήριξή του. Δυστυχώς ο Επιβλέπων Καθηγητής Γεώργιος Πετρόπουλος αποδήμησε, προτού ολοκληρωθεί η συγγραφή της διατριβής. Η απώλειά του υπήρξε επώδυνη και σε προσωπικό επίπεδο, καθώς κατά τη διάρκεια της συνεργασίας μας είχαν αναπτυχθεί άριστες διαπροσωπικές σχέσεις, οι οποίες συμπλήρωναν το ευχάριστο περιβάλλον της επιστημονικής μας συνεργασίας. Η διατριβή αφιερώνεται στη μνήμη του.

Θερμά ευχαριστώ τον Καθηγητή του Τμήματος Εκπαιδευτικών Μηχανολογίας της ΑΣΠΑΙΤΕ Νικόλαο Βαξεβανίδη, που επιτέλεσε καθήκοντα επιβλέποντος, συμμετέχοντας στην αναμορφωμένη Τριμελή Επιτροπή, μετά την αποδημία του Καθηγητή Γεωργίου Πετρόπουλου. Μου προσέφερε αμέριστη συμπαράσταση, ενθάρρυνση και ηθική υποστήριξη για τη συνέχεια, καθώς και επιστημονική στήριξη, παρέχοντας πολύτιμες προτάσεις, συμβουλές και διορθώσεις κατά τη συγγραφή. Χωρίς την καθοριστικής σημασίας αρωγή του δεν θα ήταν δυνατή η ολοκλήρωση της διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης θερμά τον Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Π.Θ. Κωνσταντίνο-Διονύσιο Μπουζάκη, μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για τις ουσιαστικές και πολύτιμες υποδείξεις του με τις όποιες συνέβαλε καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω προς τον Καθηγητή Γρηγόριο Χαϊδεμενόπουλο ο οποίος εκπροσωπώντας τον Τομέα Μηχανικής, Υλικών & Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Π.Θ. ανέλαβε την ευθύνη της συμμετοχής στην αναμορφωμένη Τριμελή Επιτροπή ως Επιβλέπων Καθηγητής, διεκπεραιώνοντας απαραίτητα διαδικαστικά θέματα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τα υπόλοιπα μέλη της επταμελούς επιτροπής κ. Κ. Ευσταθίου και κ. Ι. Τσιάφη Καθηγητές του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Α.Π.Θ., κ. Δ. Μανωλάκο Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. και κ. Α. Κερμανίδη Επ. Καθηγητή του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Π.Θ. για τις εύστοχες και εποικοδομητικές παρατηρήσεις, διορθώσεις και επισημάνσεις τους.

Σε αυτό το σημείο επιθυμώ να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Jao Paulo Davim του Πανεπιστημίου του Aveiro της Πορτογαλίας για την ουσιαστική επιστημονική συνεργασία που είχαμε κατά το χρονικό διάστημα που διετέλεσε μέλος της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής.

Τέλος ευχαριστώ όλο το προσωπικό του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Π.Θ. για την κάθε είδους βοήθεια και εξυπηρέτηση που μου παρείχαν, ο καθένας σύμφωνα με τις αρμοδιότητές του, καθώς και το ενδιαφέρον που έδειξαν σε όλα τα στάδια διεξαγωγής της διατριβής μου.

Ιδιαίτερη ευγνωμοσύνη οφείλω στην οικογένειά μου που διακριτικά με βοηθά και στηρίζει τις προσπάθειές μου όλα αυτά τα χρόνια, καθώς και σε πρόσωπα του στενού μου περιβάλλοντος όπως η Όλγα, ο Γιώργος, ο Γιάννης, ο Κώστας και άλλοι καλοί φίλοι που είναι ευτυχία να βρίσκονται κοντά μου.

Ιωάννης Ντζιαντζιάς
Βόλος, Μάρτιος 2014

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΙΝΩΔΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ-ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΤΖΙΑΝΤΖΙΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2012

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Γρηγόριος Χαϊδεμενόπουλος, Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η παρούσα διατριβή πραγματεύεται την κατεργασία σύνθετων πολυμερών υλικών ενισχυμένων με ίνες (fiber-reinforced polymer composites), τον πειραματικό σχεδιασμό, τη στοχαστική μοντελοποίηση, τη στατιστική συμπερασματολογία και την επίλυση θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού χαρακτηριστικών της κοπής. Τα συγκεκριμένα υλικά, καταλαμβάνουν ολοένα και μεγαλύτερο μέρος στην παραγωγή προϊόντων υψηλής και εξειδικευμένης τεχνολογίας. Στόχος είναι ο έλεγχος της συμπεριφοράς του ενισχυμένου με ίνες υάλου πολυαμιδίου PA66-GF30 κατά την κατεργασία του με συμβατικές μεθόδους και η κατασκευή αξιόπιστων μοντέλων υπολογισμού των χαρακτηριστικών της κοπής, με τη δυνατότητα της μελλοντικής πρόβλεψης των τιμών τους.

Βάσει της υπάρχουσας βιβλιογραφίας, κατασκευάζονται και επιλύονται τα θεωρητικά και εμπειρικά μοντέλα των δυνάμεων κοπής, προσαρμόζοντάς τα στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ενισχυμένου πολυμερούς. Στη συνέχεια εξετάζονται βασικές παράμετροι κατεργαστικότητας στις συμβατικές κατεργασίες, ως προς τη επίδρασή τους σε μετρούμενα μεγέθη, πραγματοποιώντας ανάλογα πειράματα και συλλέγοντας δεδομένα από κατάλληλα μετρητικά όργανα. Συγκεκριμένα, με τη χρήση του παραγοντικού σχεδιασμού πειραμάτων (factorial design) και της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) πραγματοποιείται η στοχαστική μοντελοποίηση των δυνάμεων κοπής και των παραμέτρων της τραχύτητας επιφανείας, ως προς την πρόωση και την ταχύτητα κοπής στις συμβατικές κατεργασίες, την τόρνευση, το φραιζάρισμα και τη διάτρηση. Τέλος, τα στοχαστικά μοντέλα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα θεωρητικά και εμπειρικά ως προς το βαθμό συσχέτισής τους με πραγματικά δεδομένα, από όπου διαπιστώνεται ότι υπερισχύουν.

Η εξαιρετικά υψηλή συσχέτιση που επιτυγχάνουν στις περισσότερες περιπτώσεις τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα επιτρέπει την εισαγωγή τους σε βιομηχανικές τράπεζες δεδομένων (data bases), που θα αποδίδουν τις παραμέτρους κατεργαστικότητας του συγκεκριμένου υλικού στις τρεις σημαντικότερες συμβατικές κατεργασίες και σε συγκεκριμένο εύρος μεταβολής των συνθηκών κοπής, με στόχο τη βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF MACHINABILITY PARAMETERS OF FIBER POLYMER COMPOSITES

IOANNIS NTZIANTZIAS

University of Thessaly, Department of Mechanical Engineering, 2012

Supervisor Professor: Gregory Haidemenopoulos, Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

Summary

This present work is studying the treatment of fiber reinforced polymer composites, design of experiments techniques, regression modeling, statistical analysis and calculation of the cutting forces with theoretical and empirical methods. The fiber reinforced plastics (FRPs) are new composite materials rapidly introduced in the manufacturing of industrial structures. The objective of this study is to investigate the machinability of a glass fiber reinforced polyamide PA66-GF30, during machining in main conventional processes and develop predictive models with good correlation and prediction ability.

In accordance with the current literature, the theoretical values of cutting forces were calculated through the fundamental mathematical and empirical models, determined to the GFRP's characteristics. Further, the impact of cutting conditions on response cutting variables when machining in conventional processes were experimentally investigated, collecting measurements with suitable instruments. Applying factorial design and Analysis of Variance (ANOVA) to the experimental data, predictive models are developed for cutting forces and surface roughness parameters, in relative to cutting speed and feed rate, during turning, milling and drilling. The experimental models compared with the theoretical and empirical equations on the consistency with the experimental values, and found that have better correlation.

The excellent correlation that the predictive models exhibiting in most cases, allows including them to industrial data bases, and regard direct applicability to the three main conventional machining, in relevant ranges of values for the cutting conditions, permitting to optimize the applications.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ XIII

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ XVII

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ..... - 1 -
1.1 Νέες τεχνολογικές τάσεις και απαιτήσεις ..... - 1 -
1.2 Ερευνητικό αντικείμενο της διατριβής ..... - 5 -
1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση ..... - 7 -
1.4 Δομή της διατριβής ..... - 13 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ - ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ ..... - 15 -
2.1 Ορισμός του σύνθετου υλικού και γενικά χαρακτηριστικά ..... - 15 -
2.1.1 Υλικά ενίσχυσης ..... - 16 -
2.1.2 Υλικά μήτρας ..... - 17 -
2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών ..... - 20 -
2.2.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκου ..... - 21 -
2.2.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών ..... - 21 -
2.2.3 Δομικά σύνθετα υλικά ..... - 24 -
2.3 Σύνθετα υλικά με ινώδη ενίσχυση υάλου ..... - 27 -
2.4 Ιδιότητες και εφαρμογές των σύνθετων υλικών ..... - 31 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ..... - 37 -
3.1 Εισαγωγή στις κατεργασίες ..... - 37 -
3.1.1 Κατεργασίες κοπής ..... - 38 -
3.2 Μορφολογία της κατεργασμένης επιφάνειας ..... - 41 -
3.2.1 Ποιότητα και τοπογραφία της επιφάνειας ..... - 41 -
3.2.2 Αποκλίσεις από την επιπεδότητα και επιφανειακή τραχύτητα ..... - 42 -
3.2.3 Παράμετροι τραχύτητας ..... - 46 -
3.2.3.1 Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a [μm] ..... - 49 -
3.2.3.2 Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή R_p [μm] ..... - 50 -
3.2.3.3 Μέγιστο βάθος από την κεντρική γραμμή R_v [μm] ..... - 50 -
3.2.3.4 Μέγιστο ύψος R_t ή R_{max} [μm] ..... - 50 -
3.2.3.5 Το ύψος δέκα σημείων R_z [μm] ..... - 51 -
3.2.3.6 Το μέσο διάστημα κορυφών R_{sm} [mm] ..... - 51 -
3.2.3.7 Λοξότητα R_{sk} ..... - 52 -
3.2.3.8 Κυρτότητα R_{ku} ..... - 53 -
3.2.4 Μέτρηση τραχύτητας ..... - 54 -
3.2.4.1 Ηλεκτρομηχανικά τραχύμετρα ..... - 55 -
3.2.4.2 Μήκος κύματος αποκοπής ή ολοκλήρωσης ..... - 57 -
3.2.4.3 Φίλτρα διαχωρισμού του σήματος τραχυμέτρησης ..... - 58 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΜΗΚΗ ΤΟΡΝΕΥΣΗ ..... - 61 -
4.1 Θεωρητική προσέγγιση της διαμήκους τόρνευσης ..... - 61 -
4.2 Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω του συστήματος της ορθογωνικής κοπής ..... - 63 -
4.2.1 Το σύστημα της ορθογωνικής κοπής ..... - 63 -
4.2.2 Προσδιορισμός της γωνίας διάτμησης φ μέσω του συντελεστή συμπίεσης λ ..... - 68 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.2.3 Η θεωρία των Ernst και Merchant ..... - 70 -
4.2.4 Πειραματικός προσδιορισμός της διατμητικής τάσης Ts ..... - 73 -
4.2.5 Η βελτιωμένη θεωρία του Merchant ..... - 75 -
4.3 Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω της ημι-εμπειρικής μεθόδου κατά Kienzle-Victor ... - 79 -
4.4 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση ..... - 88 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ..... - 91 -
5.1 Προσδιοριστικά και Στοχαστικά συστήματα ..... - 91 -
5.2 Στατιστικές μέθοδοι ..... - 94 -
5.3 Σχεδιασμός πειράματος – Design of Experiment (DoE) ..... - 95 -
5.3.1 Παραγοντικός σχεδιασμός – Factorial Design ..... - 98 -
5.4 Περιγραφική στατιστική – Descriptive Statistics ..... - 100 -
5.5 Στατιστική συμπερασματολογία – Statistical Inference ..... - 103 -
5.5.1 Ανάλυση Παλινδρόμησης – Regression Analysis ..... - 103 -
5.5.2 Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων – Method of Least Squares ..... - 106 -
5.5.3 Τυπικό σφάλμα και διασπορά σφαλμάτων ..... - 113 -
5.5.4 Συντελεστής προσδιορισμού – Coefficient of determination ..... - 114 -
5.5.5 Ανάλυση διακύμανσης – Analysis of Variance (ANOVA) ..... - 117 -
5.5.6 Έλεγχος Καταλληλότητας του Μοντέλου – Γραφήματα καταλοίπων ..... - 121 -
5.5.7 Επιφάνεια Προσαρμογής – Response Surface ..... - 125 -
5.6 Συμπεράσματα - Ανακεφαλαίωση ..... - 127 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ..... - 128 -
6.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την τόρνευση ..... - 128 -
6.1.1 Τόρνος ..... - 128 -
6.1.2 Εργαλείο κοπής ..... - 129 -
6.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός για το φραιζάρισμα ..... - 130 -
6.2.1 Φραίζα ..... - 130 -
6.2.2 Εργαλείο κοπής ..... - 131 -
6.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την διάτρηση ..... - 132 -
6.3.1 Δράπανο ..... - 132 -
6.3.2 Εργαλείο κοπής ..... - 133 -
6.4 Δοκίμια κατεργασίας ..... - 134 -
6.5 Μετρήσεις των δυνάμεων κοπής ..... - 137 -
6.5.1 Πιεζοηλεκτρικά δυναμόμετρα - εφαρμογές ..... - 137 -
6.5.2 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο ..... - 137 -
6.5.3 3-αξονικό δυναμόμετρο Fx, Fy, Fz ..... - 138 -
6.5.4 4-αξονικό δυναμόμετρο Fx, Fy, Fz, Mz ..... - 141 -
6.5.5 Επεξεργασία σήματος των δυναμόμετρων ..... - 142 -
6.6 Μετρήσεις της ταχύτητας επιφανείας ..... - 146 -
6.6.1 Ταχύμετρο ..... - 146 -
6.6.2 Λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων του ταχυμέτρου ..... - 148 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ..... - 150 -
7.1 Πειραματική διάταξη ..... - 150 -
7.2 Πειραματικός σχεδιασμός τόρνευσης ..... - 152 -
7.2.1 Παράμετροι των πειραμάτων της τόρνευσης ..... - 152 -
7.2.2 Καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων ..... - 154 -
7.2.3 Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού ..... - 155 -
7.2.4 Πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής ..... - 157 -
7.2.5 Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας ..... - 161 -
7.3 Στατιστική ανάλυση των δυνάμεων κοπής ..... - 167 -
7.3.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους ..... - 167 -
7.3.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων ..... - 167 -
7.3.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων ..... - 169 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.3.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων των δυνάμεων κοπής ..... - 170 -
7.3.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα των δυνάμεων κοπής - 171 -
7.3.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων ..... - 174 -
7.3.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces ..... - 178 -
7.4 Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων τραχύτητας ..... - 179 -
7.4.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους ..... - 179 -
7.4.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων ..... - 179 -
7.4.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων ..... - 181 -
7.4.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων τραχύτητας ..... - 183 -
7.4.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα των παραμέτρων τραχύτητας ..... - 183 -
7.4.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων ..... - 186 -
7.4.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces ..... - 191 -
7.5 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση ..... - 193 -
7.5.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία ..... - 193 -
7.5.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας ..... - 195 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ ..... - 200 -
8.1 Πειραματική διάταξη ..... - 200 -
8.2 Πειραματικός σχεδιασμός του φραιζαρίσματος ..... - 201 -
8.2.1 Παράμετροι των πειραμάτων στη φραίζα ..... - 201 -
8.2.2 Καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων ..... - 203 -
8.2.3 Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού ..... - 205 -
8.2.4 Πειραματικές μετρήσεις ..... - 206 -
8.3 Στατιστική ανάλυση ..... - 208 -
8.3.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους ..... - 208 -
8.3.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων ..... - 208 -
8.3.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων ..... - 211 -
8.3.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων ..... - 213 -
8.3.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα ..... - 213 -
8.3.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων ..... - 217 -
8.3.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces ..... - 224 -
8.4 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση ..... - 225 -
8.4.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία ..... - 225 -
8.4.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας ..... - 227 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ ..... - 228 -
9.1 Πειραματική διάταξη ..... - 228 -
9.2 Πειραματικός σχεδιασμός διάτρησης ..... - 230 -
9.2.1 Παράμετροι των πειραμάτων της διάτρησης ..... - 230 -
9.2.2 Καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων ..... - 231 -
9.2.3 Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού ..... - 233 -
9.2.4 Πειραματικές μετρήσεις ..... - 234 -
9.3 Στατιστική ανάλυση ..... - 237 -
9.3.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους ..... - 237 -
9.3.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων ..... - 237 -
9.3.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων ..... - 239 -
9.3.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων ..... - 241 -
9.3.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα ..... - 241 -
9.3.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων ..... - 244 -
9.3.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces ..... - 249 -
9.4 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση ..... - 250 -
9.4.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία ..... - 250 -
9.4.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας ..... - 252 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΝΟΨΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ ..... - 254 -
10.1 Ανακεφαλαίωση ..... - 254 -
10.2 Μεθοδολογία και στάδια ανάπτυξης της διατριβής ..... - 254 -
10.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων ..... - 259 -
10.4 Προτάσεις πρόσθετων ερευνητικών εργασιών ..... - 263 -
10.5 Επίλογος ..... - 267 -
10.6 Δημοσιεύσεις ..... - 268 -

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ..... - 270 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών ενίσχυσης υπό τη μορφή ίνας. ..- 16 -
Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών ενίσχυσης διαφόρων υλικών και μορφών. ..- 17 -
Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες διαφόρων υλικών μήτρας. ..- 19 -
Πίνακας 2.4: Αποδοτικότητα της ενίσχυσης σύνθετων υλικών με ινώδη ενίσχυση, σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών και την κατεύθυνση της επιβαλλομένης τάσης. ..- 24 -
Πίνακας 2.5: Τα είδη των ινών υάλου και οι κυριότερες ιδιότητές τους. ..- 28 -
Πίνακας 2.6: Ενδεικτικές ιδιότητες πολυαμιδίου μη ενισχυμένου και ενισχυμένου με τυχαία προσανατολισμένες ίνες υάλου για διάφορες περιεκτικότητες του υλικού ενίσχυσης. ..- 30 -
Πίνακας 2.7: Σύγκριση βασικών ιδιοτήτων του ενισχυμένου σύνθετου PA66-GF30 με το πολυαμίδιο PA66 και διάφορα μέταλλα. ..- 30 -
Πίνακας 2.8: Ειδικές ιδιότητες σύνθετων και παραδοσιακών υλικών. ..- 31 -
Πίνακας 2.9: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών. ..- 34 -
Πίνακας 2.10: Παραδείγματα εφαρμογών σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών. ..- 35 -
Πίνακας 2.11: Παραδείγματα εφαρμογών σύνθετων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων. - 35 -
Πίνακας 2.12: Παραδείγματα εφαρμογών δομικών σύνθετων υλικών. ..- 36 -
Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των κυριότερων κατεργασιών κοπής. ..- 38 -
Πίνακας 3.2: Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας ..- 46 -
Πίνακας 3.3: Προτεινόμενα μήκη κύματος αποκοπής για διάφορες συμβατικές κατεργασίες. ..- 58 -
Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές γωνίες του εργαλείου κοπής της διαμήκους τόρνευσης ..- 61 -
Πίνακας 4.2: Πειραματικός προσδιορισμός της γωνίας διατμήσεως φ μέσω του συντελεστή συμπίεσης λ. ..- 69 -
Πίνακας 4.3: Θεωρητικός προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής. ..- 71 -
Πίνακας 4.4: Σφάλμα συσχέτισης ER και συντελεστής προσδιορισμού R^2 των F_1 και F_2. ..- 72 -
Πίνακας 4.5: Πειραματικός προσδιορισμός της διατμητικής τάσης Ts μέσω της γωνίας διατμήσεως φ και των πειραματικών μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Ft, Fr. ..- 73 -
Πίνακας 4.6: Προσδιορισμός της σταθεράς δ του ενισχυμένου πλαστικού, μέσω της γωνίας διατμήσεως φ και των πειραματικών μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Ft, Fr. ..- 76 -
Πίνακας 4.7: Τελικές τιμές υπολογισμού των δυνάμεων F_1 και F_2, μέσω των συσχετισμένων στα χαρακτηριστικά του ενισχυμένου πλαστικού, παραμέτρων της κοπής. ..- 77 -
Πίνακας 4.8: Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 200m/min. ..- 80 -
Πίνακας 4.9: Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 350m/min. ..- 81 -
Πίνακας 4.10: Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 500m/min. ..- 81 -
Πίνακας 4.11: Log(k_{st1}) και (1-z_t) για κάθε τιμή της ταχύτητας κοπής. ..- 82 -
Πίνακας 4.12: Log(k_{st1}) και Log(1-z_t) ως προς Log(V). ..- 83 -
Πίνακας 4.13: Υπολογισμός της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t μέσω του μοντέλου Kienzle-Victor και των πειραματικά προσδιορισμένων σταθερών K_{st1} και $(1 - z_t)$. ..- 84 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 4.14: Υπολογισμός της δύναμης πρόωσης F_v μέσω του μοντέλου Kienzle-Victor και των πειραματικά προσδιορισμένων σταθερών K_{sv1} και $(1 - z_v)$. - 86 -
Πίνακας 4.15: Υπολογισμός της δύναμης απώθησης του εργαλείου F_r μέσω του μοντέλου Kienzle-Victor και των πειραματικά προσδιορισμένων σταθερών K_{sr1} και $(1 - z_r)$. - 87 -
Πίνακας 5.1: Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) του γραμμικού μοντέλου με k όρους. - 117 -
Πίνακας 5.2: Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) για μοντέλο με 2 ποσοτικούς παράγοντες (A, B) και την αλληλεπίδραση αυτών (AB). - 119 -
Πίνακας 5.3: Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) για μοντέλο με ένα ποσοτικό παράγοντα (A), ένα ποιοτικό παράγοντα (B) και την αλληλεπίδραση αυτών (AB). - 119 -
Πίνακας 6.1: Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τόρνου TRIUMPH 2500 της εταιρίας COLCHESTER. - 128 -
Πίνακας 6.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου κοπής της διαμήκους τόρνευσης - 129 -
Πίνακας 6.3: Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατακόρυφου κέντρου κατεργασίας τύπου MX45-VAE της εταιρίας OKUMA. - 131 -
Πίνακας 6.4: Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δράπανου Ibarmia 1B-35-P. - 132 -
Πίνακας 6.5: Χημική σύσταση του υλικού του τρυπανιού HSS-Co (DIN 1.3243). - 133 -
Πίνακας 6.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τρυπανιού HSS-Co (DIN 338). - 133 -
Πίνακας 6.7: Μηχανικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30. - 135 -
Πίνακας 6.8: Θερμικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30. - 135 -
Πίνακας 6.9: Φυσικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30. - 136 -
Πίνακας 6.10: Ηλεκτρικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30. - 136 -
Πίνακας 6.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμομέτρου 9257B της Kistler. - 140 -
Πίνακας 6.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του τραχύμετρου Surtronic 3+. - 147 -
Πίνακας 7.1: Παράγοντες των πειραμάτων της τόρνευσης - 153 -
Πίνακας 7.2: Αποκρίσεις των πειραμάτων της τόρνευσης - 154 -
Πίνακας 7.3: Επίπεδα των παραγόντων των πειραμάτων της τόρνευσης. - 154 -
Πίνακας 7.4: Περιστροφική ταχύτητα (στροφές) των πειραμάτων τόρνευσης. - 155 -
Πίνακας 7.5: Χρόνοι κοπής σε sec για κάθε συνδυασμό πρόωσης S(mm/rev) και περιστροφικής ταχύτητας *N*(rpm) - 155 -
Πίνακας 7.6: Πειραματικός χώρος (Design Matrix) πειράματος τόρνευσης. - 156 -
Πίνακας 7.7: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής - 158 -
Πίνακας 7.8: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας. - 162 -
Πίνακας 7.9: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων - 167 -
Πίνακας 7.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του πλήρες τετραγωνικού μοντέλου, της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N). - 171 -
Πίνακας 7.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N). - 172 -
Πίνακας 7.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης πρόωσης F_v(N). - 172 -
Πίνακας 7.13: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης απώθησης εργαλείου F_r(N). - 173 -
Πίνακας 7.14: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων - 179 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.15: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Μέσης Αριθμητικής Τραχύτητας R_a(μm)..... - 183 -
Πίνακας 7.16: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του Μέγιστου Ύψους R_t(μm).. - 183 -
Πίνακας 7.17: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του Μέγιστου Ύψους Κορυφής R_p(μm). ..... - 184 -
Πίνακας 7.18: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του Μέσου Διαστήματος Κορυφών R_{sm}(μm)..... - 184 -
Πίνακας 7.19: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Λοξότητας R_{sk}..... - 184 -
Πίνακας 7.20: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Κυρτότητας R_{ku}..... - 184 -
Πίνακας 7.21: Τα στοχαστικά μοντέλα των δυνάμεων κοπής..... - 194 -
Πίνακας 7.22: Τα στοχαστικά μοντέλα των παραμέτρων της τραχύτητας επιφανείας..... - 194 -
Πίνακας 7.23: Ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων και της αλληλεπίδρασης αυτών στις αποκρίσεις. ..... - 194 -
Πίνακας 8.1: Παράγοντες των πειραμάτων. ..... - 203 -
Πίνακας 8.2: Αποκρίσεις των πειραμάτων. ..... - 203 -
Πίνακας 8.3: Επίπεδα των παραγόντων των πειραμάτων στη φραίζα. ..... - 204 -
Πίνακας 8.4: Οι συνθήκες κοπής των πειραμάτων στη φραίζα. ..... - 204 -
Πίνακας 8.5: Χρόνοι κοπής σε sec για κάθε συνδυασμό πρόωσης S(mm/rev) και περιστροφικής ταχύτητας N(rpm) ..... - 205 -
Πίνακας 8.6: Πειραματικός χώρος (Design Matrix). ..... - 205 -
Πίνακας 8.7: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων..... - 207 -
Πίνακας 8.8: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων..... - 208 -
Πίνακας 8.9: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης F_x(N). ..... - 213 -
Πίνακας 8.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης F_y(N). ..... - 213 -
Πίνακας 8.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της αξονικής δύναμης F_z(N)..... - 214 -
Πίνακας 8.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm)..... - 214 -
Πίνακας 8.13: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του ύψους δέκα σημείων R_z(μm). - 214 -
Πίνακας 8.14: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του μέγιστου ύψους R_t(μm). ... - 214 -
Πίνακας 8.15: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του μέσου διαστήματος κορυφών R_{sm}(μm)..... - 215 -
Πίνακας 8.16: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Λοξότητας R_{sk}..... - 215 -
Πίνακας 8.17: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Κυρτότητας R_{ku}..... - 215 -
Πίνακας 8.18: Τα στοχαστικά μοντέλα των αποκρίσεων..... - 226 -
Πίνακας 8.19: Ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων και της αλληλεπίδρασης αυτών στις αποκρίσεις. ..... - 226 -
Πίνακας 9.1: Παράγοντες των πειραμάτων της διάτρησης. ..... - 231 -
Πίνακας 9.2: Αποκρίσεις των πειραμάτων της διάτρησης. ..... - 231 -
Πίνακας 9.3: Ταχύτητα κοπής των πειραμάτων της διάτρησης..... - 232 -
Πίνακας 9.4: Επίπεδα των παραγόντων των πειραμάτων της διάτρησης. ..... - 232 -
Πίνακας 9.5: Χρόνοι κοπής σε sec για κάθε συνδυασμό πρόωσης S(mm/rev) και περιστροφικής ταχύτητας N(rpm). ..... - 233 -
Πίνακας 9.6: Πειραματικός χώρος (Design Matrix) των πειραμάτων της διάτρησης.. - 233 -
Πίνακας 9.7: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων..... - 236 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 9.8: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων..... - 237 -
Πίνακας 9.9: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της δύναμης πρόωσης F_v(N). ... - 241 -
Πίνακας 9.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της ροπής στρέψης M_d(Ncm). - 241 -
Πίνακας 9.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του παράγοντα αποκόλλησης F_d. ... - 242 -
Πίνακας 9.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm)..... - 242 -
Πίνακας 9.13: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του ύψους δέκα σημείων R_z(μm).... - 242 -
Πίνακας 9.14: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του μέγιστου ύψους R_t(μm). ... - 242 -
Πίνακας 9.15: Τα στοχαστικά μοντέλα των αποκρίσεων..... - 251 -
Πίνακας 9.16: Ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων και της αλληλεπίδρασης αυτών στις αποκρίσεις. ..... - 251 -
Πίνακας 10.1: Πειράματα αποτίμησης των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, κατά την τόρνευση του PA66-GF30. ..... - 256 -
Πίνακας 10.2: Πειράματα αποτίμησης των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων τραχύτητας, για την τόρνευση του PA66-GF30. ..... - 257 -
Πίνακας 10.3: Πειράματα αποτίμησης των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων κατεργαστικότητας του PA66-GF30 σε φραιζάρισμα. ..... - 257 -
Πίνακας 10.4: Πειράματα αποτίμησης των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων κατεργαστικότητας του PA66-GF30 σε διάτρηση..... - 258 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών ως προς το είδος της ενισχυτικής φάσης. ..... - 20 -
Σχήμα 2.2: Τύποι διάταξης συνεχών ινών: α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα), β) ίνες άτακτων διευθύνσεων (πίλημα), γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα) και δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα). ..... - 22 -
Σχήμα 2.3: α) Ενίσχυση με κοντές ευθυγραμμισμένες ίνες β),γ) Ενίσχυση με κοντές ίνες σε τυχαίο προσανατολισμό. ..... - 23 -
Σχήμα 2.4: Πολύστρωτο σύνθετο με διαδοχικές στρώσεις φύλλων ενισχυμένων με προσανατολισμένες ίνες. ..... - 25 -
Σχήμα 2.5: Δομικό σύνθετο τύπου «σάντουιτς» με κυψελοειδή πυρήνα. ..... - 26 -
Σχήμα 2.6: Χημική δομή γυαλιού. ..... - 27 -
Σχήμα 2.7: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού. ..... - 29 -
Σχήμα 2.8: Διάδοση ρωγμής α)Ομοιογενές υλικό, β)Ενισχυμένο σύνθετο υλικό. . - 32 -
Σχήμα 3.9: Εργαλείο κοπής σε σχήμα σφήνας και σχηματισμός του αποβλίττου κατά τις κατεργασίες κοπής (α η γωνία ελευθερίας, β η γωνία σφήνας, γ η γωνία αποβλίττου και φ η γωνία διατμήσεως). ..... - 39 -
Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστικά της νεοκατεργασμένης επιφάνειας σε κάθετη τομή της . - 41 -
Σχήμα 3.11: Μικροσκοπική παρατήρηση της τομής μιας κατεργασμένης επιφάνειας α)Τρισδιάστατη απεικόνιση, β) Δισδιάστατη απεικόνιση . ..... - 42 -
Σχήμα 3.12: Απόκλιση θεωρητικής και πραγματικής επιφάνειας (δισδιάστατη απεικόνιση)..... - 43 -
Σχήμα 3.13: Γεωμετρικές αποκλίσεις κατεργασμένης επιφάνειας. α)Μορφή πραγματικής επιφάνειας, β)Ανάλυση αποκλίσεων από την επιπεδότητα. ..... - 43 -
Σχήμα 3.14: Κατηγορίες αποκλίσεων μιας κατεργασμένης επιφάνειας από την ονομαστική επιφάνεια ..... - 45 -
Σχήμα 3.15: Κεντρική γραμμή (CL) μιας κατατομής, στο δειγματοληπτικό μήκος ℓ. . - 47 -
Σχήμα 3.16: Ορισμός της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a. ..... - 50 -
Σχήμα 3.17: Ορισμός των παραμέτρων R_p, R_v και R_t. ..... - 51 -
Σχήμα 3.18: Οι διαδοχικές κορυφές (S_i) για τον υπολογισμό του μέσου διαστήματος μέσης γραμμής (R_{sm} ή S_m). ..... - 52 -
Σχήμα 3.19: Περιγράμματα επιφανειών με θετική και αρνητική λοξότητα (R_{sk}). . - 53 -
Σχήμα 3.20: Περιγράμματα επιφανειών με κυρτότητα (R_{ku}) μεγαλύτερη ή μικρότερη του 3. ..... - 54 -
Σχήμα 3.21: Καταγραφής της κατατομής μιας επιφάνειας με ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο τύπου στυλίσκου. ..... - 55 -
Σχήμα 3.22: Σφάλματα στην καταγραφή της κατατομής που προέρχονται από τη γεωμετρία της ακίδας: α), β)Λόγω μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας γ)Λόγω μεγάλης κωνικότητας..... - 56 -
Σχήμα 3.23: Η διαδρομή της ακίδας κατά την ανίχνευση διαφόρων επιφανειακών ανωμαλιών. ..... - 56 -
Σχήμα 3.24: Επίδραση του μήκους κύματος αποκοπής στην μέτρηση της τραχύτητας (Μέγιστο ύψος Rt). ..... - 57 -
Σχήμα 4.1: α)Ορθογωνική κοπή (λ_s=0) β)Λοξή κοπή (λ_s>0) . ..... - 62 -
Σχήμα 4.2: Ορθογωνική κοπή. ..... - 63 -
Σχήμα 4.3: Το πρότυπο του επιπέδου διάτμησης ..... - 64 -
Σχήμα 4.4: Το σύστημα δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιττο (όπου ΤΕ το κατεργαζόμενο τεμάχιο και ΚΕ το κοπτικό εργαλείο) ..... - 64 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα 4.5: Το κυκλικό διάγραμμα των δυνάμεων κατά την ορθογωνική κοπή (κύκλος του Merchant) ..... - 65 -
Σχήμα 4.6: Στοιχεία κινηματικής της εξωτερικής διαμήκους τόρνευσης. ..... - 67 -
Σχήμα 4.7: Σχηματισμός του αποβλίττου κατά την ορθογωνική κοπή. ..... - 68 -
Σχήμα 4.8: Το εύρος διακύμανσης των τιμών της διατμητικής τάσης Ts για κάθε κοπή και η μέση διατμητική τάση $Ts_{mean.}$= 124,06MPa) ..... - 74 -
Σχήμα 4.9: Η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής υπολογισμένη μέσω των προσαρμοσμένων θεωρητικών σχέσεων F_1 ως προς τις πειραματικές μετρήσεις της F_t. ..... - 78 -
Σχήμα 4.10: Η δύναμη απώθησης του εργαλείου υπολογισμένη μέσω των προσαρμοσμένων θεωρητικών σχέσεων F_2 ως προς τις πειραματικές μετρήσεις F_r. ..... - 78 -
Σχήμα 4.11: Γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 200m/min ..... - 81 -
Σχήμα 4.12: Γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 350m/min ..... - 82 -
Σχήμα 4.13: Γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 500m/min ..... - 82 -
Σχήμα 4.14: Λογαριθμική συσχέτιση του Log(k_{st1}) ως προς Log(V). ..... - 83 -
Σχήμα 4.15: Γραμμική συσχέτιση του Log(1-z_t) ως προς Log(V). ..... - 83 -
Σχήμα 4.16: Η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής υπολογισμένη μέσω του ημι-εμπειρικού μοντέλου Kienzle-Victor ($Ft_{Kienzle}$) ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων ($Ft_{measured}$). ..... - 85 -
Σχήμα 4.17: Η δύναμη πρόωσης υπολογισμένη μέσω του ημι-εμπειρικού μοντέλου Kienzle-Victor ($Fv_{Kienzle}$) ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων ($Fv_{measured}$). ..... - 86 -
Σχήμα 4.18: Η δύναμη απώθησης του εργαλείου υπολογισμένη μέσω του ημι-εμπειρικού μοντέλου Kienzle-Victor ($Fr_{Kienzle}$) ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων ($Fr_{measured}$). ..... - 87 -
Σχήμα 5.1: α)Πλήρης γραμμική συσχέτιση, β)Πλήρης μη-γραμμική συσχέτιση ... - 91 -
Σχήμα 5.2: α)Ισχυρή γραμμική συσχέτιση, β)Ισχυρή μη-γραμμική συσχέτιση, γ)Ασθενής γραμμική συσχέτιση, δ)Ασθενής μη-γραμμική συσχέτιση ε)Μηδενική συσχέτιση ..... - 92 -
Σχήμα 5.3: Γραφική απεικόνιση κυρίων επιδράσεων: Ισχυρή επίδραση από τον παράγοντα X1 και ασθενής επίδραση από τον παράγοντα X2. ..... - 100 -
Σχήμα 5.4: Γραφική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης δύο παραγόντων α)Μηδενική αλληλεπίδραση β)Ισχυρή αλληλεπίδραση ..... - 102 -
Σχήμα 5.5: Οι κατανομές των y_i για κάθε x_i και η πληθυσμιακή ευθεία παλινδρόμησης. ..... - 106 -
Σχήμα 5.6: Οι αποκλίσεις των τιμών της y από τις εκτιμήσεις $\hat{y}$ της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων ..... - 107 -
Σχήμα 5.7: Γραφική συσχέτιση των πραγματικών y_i, των εκτιμήσεων $\hat{y}_i$ και του δειγματοληπτικού μέσου $\bar{y}$ ..... - 114 -
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων (Normal Probability Plot). ..... - 121 -
Σχήμα 5.9: Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram of the Residual). ... - 122 -
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (Plot of Residuals Versus Fitted Values). ..... - 122 -
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με την σειρά παρατήρησης (Plot of Residuals Versus run Order). ..... - 123 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα 5.12: Διάγραμμα κανονικοποιημένων καταλοίπων α) σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (Plot of standardized Residuals Versus Fitted Values) β) σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (Plot of standardized Residuals Versus run Order) ..... - 124 -
Σχήμα 5.13: Επιφάνεια προσαρμογής ..... - 125 -
Σχήμα 5.14: α)Επιφάνεια προσαρμογής β)Γράφημα επιφάνειας της απόκρισης με βάση τις πραγματικές τιμές. ..... - 126 -
Σχήμα 6.1: Συμβατικός οριζόντιος τόρνος τύπου TRIUMPH 2500 (COLCHESTER).... - 128 -
Σχήμα 6.2: Τυπική γεωμετρία του εργαλείου της τόρνευσης και οι κυριότερες γωνίες του κατά DIN6581 ..... - 129 -
Σχήμα 6.3: Κατακόρυφο κέντρο κατεργασίας τύπου MX45-VAE (OKUMA). ... - 130 -
Σχήμα 6.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου κοπής του φραιζαρίσματος. . - 131 -
Σχήμα 6.5: Δράπανο Ibarmia 1B-35-P (τύπου ορθοστάτη)..... - 132 -
Σχήμα 6.6: Ελικοειδές τρυπάνι HSS-Co (κατά DIN 338)..... - 133 -
Σχήμα 6.7: α)Τα δοκίμια των πειραμάτων του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30, β)Πίνακας με τις διαστάσεις των δοκιμίων ανά κατεργασία. ..... - 134 -
Σχήμα 6.8: Χημική δομή του πολυαμίδιου PA66. ..... - 134 -
Σχήμα 6.9: Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος εμφανίζει στην επιφάνεια του ηλεκτρικά φορτία αναλόγως την παραμόρφωσή του: α)Συμπίεση, β)Διάτμηση, γ)Εφελκυσμός. ..... - 137 -
Σχήμα 6.10: α)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B, β)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B με τον εργαλειοφορέα 9403 (για κατεργασία τόρνευσης). ..... - 138 -
Σχήμα 6.11: Μηχανολογικό σχέδιο α)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B β)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B με τον εργαλειοφορέα 9403. ..... - 139 -
Σχήμα 6.12: 3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B σε τομή και οι δακτύλιοι χαλαζία. . - 140 -
Σχήμα 6.13: 4-αξονικό δυναμόμετρο 9272 της kistler. ..... - 141 -
Σχήμα 6.14: Μηχανολογικό σχέδιο 4-αξονικού δυναμομέτρου 9272. ..... - 141 -
Σχήμα 6.15: 4-αξονικό δυναμόμετρο 9272 σε τομή και οι δακτύλιοι χαλαζία. ... - 142 -
Σχήμα 6.16: Διάταξη συνδεσμολογίας του δυναμομέτρου. ..... - 143 -
Σχήμα 6.17: Διάγραμμα από το λογισμικό DynoWare μετά την δυναμομέτρηση κατεργασίας διάτρησης με το δυναμόμετρο 9272 Kistler. (Δυο κανάλια μέτρησης ροπή στρέψεως M και αξονική δύναμη F). ..... - 144 -
Σχήμα 6.18: Διάγραμμα της πειραματικής μέτρησης με το φίλτρο του αριθμητικού μέσου στα σημεία των μετρήσεων. ..... - 145 -
Σχήμα 6.19: Φιλτραρισμένο διάγραμμα της δυναμομέτρησης. ..... - 145 -
Σχήμα 6.20: Τραχύμετρο τύπου στυλίσκου Surtronic 3+ (Taylor-Hobson). ..... - 146 -
Σχήμα 6.21: Μετακινούμενο στέλεχος-στυλίσκος (αισθητήρας) του τραχυμέτρου Surtronic 3+. ..... - 146 -
Σχήμα 6.22: Προφίλ της επιφάνειας χωρίς την εφαρμογή φίλτρου (Unfiltered Profile) α) προφίλ της κυμάτωσης με κόκκινο χρώμα (Waviness Profile), β)προφίλ της τραχύτητας με μπλε χρώμα (Roughness Profile) ..... - 149 -
Σχήμα 6.23: Τελικό προφίλ τραχύτητας (Roughness Profile ή Form Profile) μετά την εφαρμογή φίλτρου Gauss. ..... - 149 -
Σχήμα 7.1: Διάταξη δυναμομέτρου και εργαλείου κοπής. ..... - 150 -
Σχήμα 7.2: Οι δυνάμεις κοπής κατά τη διαμήκη τόρνευση (F η δύναμη κοπής, F_T η κύρια συνηστώσα της δύναμης κοπής, F_V η δύναμη πρόωσης και F_R η δύναμη απώθησης του εργαλείου. ..... - 153 -
Σχήμα 7.3: Κατεργασμένα δοκίμια. ..... - 157 -
Σχήμα 7.4: Οι δυνάμεις κοπής συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β) V=350m/min, γ) V=500m/min. ..... - 158 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα 7.5: Οι δυνάμεις κοπής συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V, για κάθε πρόωση S, α)S=0,05mm/rev, β)S=0,10mm/rev, γ)S=0,16mm/rev, δ) S=0,20mm/rev, ε) S=0,24mm/rev. ..... - 159 -
Σχήμα 7.6: Επιφάνειες των κατεργασμένων δοκιμίων..... - 161 -
Σχήμα 7.7: Οι παράμετροι ύψους της τραχύτητας συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β) V=350m/min, γ) V=500m/min. . - 163 -
Σχήμα 7.8: Το μέσο διάστημα μέσης γραμμής R_{sm}(mm) α)συναρτήσει της πρόωσης S(mm/rev), για κάθε ταχύτητα κοπής V(m/min), β) συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V(m/min), για κάθε πρόωση S(mm/rev)..... - 163 -
Σχήμα 7.9: Οι παράμετροι ύψους της τραχύτητας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev, β)S=0,10mm/rev, γ)S=0,16mm/rev, δ)S=0,20mm/rev, ε)S=0,24mm/rev. ..... - 164 -
Σχήμα 7.10: Οι στατιστικές παράμετροι τραχύτητας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev, β)S=0,10mm/rev, γ)S=0,16mm/rev, δ)S=0,20mm/rev, ε)S=0,24mm/rev. ..... - 165 -
Σχήμα 7.11: Οι στατιστικές παράμετροι τραχύτητας συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β)V=350m/min, γ)V=500m/min. ..... - 166 -
Σχήμα 7.12: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα, για τις δυνάμεις κοπής: α)Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N), β)Δύναμη πρόωσης F_v(N), γ)Δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N). ..... - 168 -
Σχήμα 7.13: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, για τις δυνάμεις κοπής: α)Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N), β)Δύναμη πρόωσης F_v(N), γ)Δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N). ..... - 169 -
Σχήμα 7.14: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις δυνάμεις κοπής. ..... - 173 -
Σχήμα 7.15: Διαγράμματα καταλοίπων για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).. - 174 -
Σχήμα 7.16: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη πρόωσης F_V(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 175 -
Σχήμα 7.17: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 175 -
Σχήμα 7.18: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των δυνάμεων κοπής ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N), β)Δύναμη πρόωσης F_v(N), γ)Δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N). ..... - 176 -
Σχήμα 7.19: Επιφάνειες προσαρμογής α)Της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N), β)Της δύναμης πρόωσης F_v(N), β)Της δύναμης απώθησης του εργαλείου F_r(N). ..... - 178 -
Σχήμα 7.20: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα, για τις παραμέτρους της τραχύτητας: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

β)Μέγιστο Ύψος R_t, γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, δ)Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}, ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}. ..... - 180 -
Σχήμα 7.21: Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για κάθε παράμετρο της τραχύτητας: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, β)Μέγιστο Ύψος R_t, γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, δ)Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}, ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}. ..... - 181 -
Σχήμα 7.22: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις παραμέτρους τραχύτητας. ..... - 185 -
Σχήμα 7.23: Διαγράμματα καταλοίπων για την Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 187 -
Σχήμα 7.24: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέγιστο Ύψος R_t(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 187 -
Σχήμα 7.25: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 188 -
Σχήμα 7.26: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}(mm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 188 -
Σχήμα 7.27: Διαγράμματα καταλοίπων για την Λοξότητα R_{sk}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order)..... - 189 -
Σχήμα 7.28: Διαγράμματα καταλοίπων για την Κυρτότητα R_{ku}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order)..... - 189 -
Σχήμα 7.29: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των παραμέτρων της τραχύτητας ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, β)Μέγιστο Βάθος R_t, γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, δ)Μέσο Διάστημα Μέσης Γραμμής R_{sm}, ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}. ..... - 191 -
Σχήμα 7.30: Επιφάνειες προσαρμογής των παραμέτρων της τραχύτητας: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm), β)Μέγιστο Ύψος R_t(μm), γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p(μm), δ)Μέσο Διάστημα Κορυφής R_{sm}(mm), ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}. ..... - 192 -
Σχήμα 7.31: Χαρακτηριστικές καμπύλες F_t(N)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30. ..... - 195 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα 7.32: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30. ..... - 196 -
Σχήμα 7.33: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα. ..... - 197 -
Σχήμα 7.34: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα και στον χρόνο κοπής. ..... - 197 -
Σχήμα 8.1: Στοιχεία κινηματικής και δυνάμεις κοπής του μετωπικού φραιζαρίσματος (S_z η πρόωση ανά δόντι, V η ταχύτητα κοπής, U_v η ταχύτητα πρόωσης, N η περιστροφική ταχύτητα, a το βάθος κοπής, φ η γωνία αποκοπής, κ η γωνία τοποθέτησης, b το πλάτος του αποβλίττου, h το στιγμιαίο θεωρητικό πάχος αποβλίττου, F_T η εφαπτομενική συνιστώσα, F_R η ακτινική συνιστώσα και F_A αξονική συνιστώσα, $S_s = S_z \eta\mu\varphi$). ..... - 202 -
Σχήμα 8.2: Πειραματική διάταξη και κατεργασμένο δοκίμιο. ..... - 202 -
Σχήμα 8.3: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη F_x(N), β)Δύναμη F_y(N). ..... - 209 -
Σχήμα 8.4: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη F_x(N), β)Δύναμη F_y(N). ..... - 211 -
Σχήμα 8.5: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις αποκρίσεις. ..... - 216 -
Σχήμα 8.6: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη F_X(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 217 -
Σχήμα 8.7: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη F_Y(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 218 -
Σχήμα 8.8: Διαγράμματα καταλοίπων για την αξονική δύναμη F_Z(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 218 -
Σχήμα 8.9: Διαγράμματα καταλοίπων για την μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 219 -
Σχήμα 8.10: Διαγράμματα καταλοίπων για το ύψος δέκα σημείων R_z(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 219 -
Σχήμα 8.11: Διαγράμματα καταλοίπων για το μέγιστο ύψος R_t(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 220 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα 8.12: Διαγράμματα καταλοίπων για το μέσο διάστημα κορυφών R_{sm}(mm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 220 -
Σχήμα 8.13: Διαγράμματα καταλοίπων για την Λοξότητα R_{sk}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order)..... - 221 -
Σχήμα 8.14: Διαγράμματα καταλοίπων για την Κυρτότητα R_{ku}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order)..... - 221 -
Σχήμα 8.15: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των αποκρίσεων ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Δύναμη F_X(N), β)Δύναμη F_Y(N). ..... - 222 -
Σχήμα 9.1: α)Διάταξη δραπάνου-δυναμομέτρου β)Κατεργασμένο δοκίμιο και οπές πειραμάτων (οι οπές χωρίς αρίθμηση χρησιμεύουν για την στήριξη του δοκιμίου στο δυναμόμετρο). ..... - 228 -
Σχήμα 9.2: Στοιχεία κινηματικής και δυνάμεις κοπής κατά την διάτρηση (S η πρόωση, S_z η πρόωση ανά δόντι, V η ταχύτητα κοπής, U_v η ταχύτητα πρόωσης, ω η γωνία κορυφής, F_T η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής, F_V η δύναμη προώσεως και F_R η δύναμη απώθησης του εργαλείου). ..... - 230 -
Σχήμα 9.3: Μέτρηση της μέγιστης διαμέτρου της οπής D_{max}..... - 234 -
Σχήμα 9.4: Παραδείγματα οπών με διαστρωματική αποκόλληση..... - 235 -
Σχήμα 9.5: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη πρόωσης F_v(N), β)Ροπή στρέψης M_d(Ncm), γ)Συντελεστής αποκόλλησης Fd, δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm), ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο ύψος R_t(μm). ..... - 238 -
Σχήμα 9.6: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη πρόωσης F_v(N), β)Ροπή στρέψης M_d(Ncm), γ)Συντελεστής αποκόλλησης Fd, δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm). ..... - 239 -
Σχήμα 9.7: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις αποκρίσεις..... - 243 -
Σχήμα 9.8: Διαγράμματα καταλοίπων για την Δύναμη Πρόωσης F_v(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 244 -
Σχήμα 9.9: Διαγράμματα καταλοίπων για την Ροπή Στρέψης M_d(Ncm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 245 -
Σχήμα 9.10: Διαγράμματα καταλοίπων για τον Παράγοντα Αποκόλλησης F_d: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 245 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα 9.11: Διαγράμματα καταλοίπων για την Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 246 -
Σχήμα 9.12: Διαγράμματα καταλοίπων για το Ύψος δέκα σημείων R_z(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 246 -
Σχήμα 9.13: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέγιστο ύψος R_t(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 247 -
Σχήμα 9.14: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των αποκρίσεων ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Δύναμη Πρόωσης F_v(N), β)Ροπή Στρέψης M_d(Ncm), γ)Συντελεστή Αποκόλλησης Fd, δ)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm), ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο Ύψος R_t(μm). ..... - 248 -
Σχήμα 10.1: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra*(μ*m)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα και στον χρόνο κοπής, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής. ..... - 265 -
Σχήμα 10.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra*(μ*m)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα και στον χρόνο κοπής, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής και τον περιορισμό των συνθηκών κοπής από τις χαρακτηριστικές καμπύλες Φθορά κοπτικού-Χρόνου κοπής. ..... - 265 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Νέες τεχνολογικές τάσεις και απαιτήσεις

Η εξελικτική πορεία του ανθρώπου είναι συνυφασμένη με τα υλικά που χρησιμοποιεί σε κάθε δραστηριότητά του, καθώς όσο αναπτύσσεται τόσο αυτά εξελίσσονται, ή αντίστροφα, όσο τα τεχνολογικά υλικά εξελίσσονται τόσο και ο πολιτισμός του ανθρώπου έχει τη δυνατότητα να αναπτύσσεται. Η παρατήρηση και η έρευνα, ωθούμενες από τις αυξανόμενες κατασκευαστικές ανάγκες και την ίδια την εξέλιξη, οδήγησαν στην ανακάλυψη και ανάπτυξη πληθώρας τεχνολογικά προηγμένων υλικών, που υπάγονται σε μια ξεχωριστή κατηγορία, τα σύνθετα ή ενισχυμένα σύνθετα υλικά. Τα σύνθετα υλικά εξελίχθηκαν ραγδαία τα τελευταία χρόνια, λόγω των απαιτήσεων και των αναγκών της σύγχρονης κατασκευαστικής τεχνολογίας και ιδιαίτερα των κλάδων της ναυπηγικής, της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροναυπηγικής, της αεροδιαστημικής, της ηλεκτρονικής και της προσθετικής ιατρικής. Τα υλικά αυτά προσφέρουν ένα μοναδικό συνδυασμό ιδιοτήτων, μηχανικών και φυσικοχημικών και ταυτόχρονα μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό και την κατασκευή σε σχέση με παραδοσιακά υλικά. Το γεγονός αυτό συντελεί στο να ανταγωνίζονται επάξια τα μέταλλα, τα οποία και αντικαθιστούν τα τελευταία χρόνια σε ολοένα και περισσότερες προηγμένες βιομηχανικές και δομικές κατασκευές.

Τα προϊόντα από σύνθετα υλικά, συνήθως, μορφοποιούνται με ακρίβεια σχεδόν στην τελική τους μορφή (near-net shape manufacturing), με διαδικασίες που εξαρτώνται κυρίως από τα συστατικά της μήτρας και της ενίσχυσης, κυρίως μέσω διαφόρων κατεργασιών χύτευσης, όπως χύτευση θαλάμου πίεσης (pressure bag), χύτευση σε διαιρετό καλούπι (matched die-molding) ή με έγχυση (injection molding). Οι μέθοδοι παραγωγής τους έχουν εξελιχθεί σημαντικά, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής αντικειμένων με βελτιωμένες τις επιθυμητές ιδιότητες και σε πολύπλοκα σχήματα, επιτυγχάνοντας μεγάλη ακρίβεια με ελάχιστες απώλειες πρώτων υλικών. Συχνά όμως και ιδιαίτερα σε περιπτώσεις κατασκευής βιομηχανικών εξαρτημάτων, όπου απαιτείται υψηλή διαστασιακή ακρίβεια ή ποιότητα επιφάνειας (π.χ. γρανάζια, έδρανα ολίσθησης, συνεργαζόμενα εξαρτήματα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

στενής συναρμογής κτλ), υφίσταται ανάγκη περαιτέρω κατεργασίας τους. Εκτελούνται, δηλαδή, κατεργασίες αποπεράτωσης (finishing), ώστε να αποκτήσουν τις τελικές διαστάσεις και τα ποιοτικά χαρακτηριστικά βάσει των σχεδιαστικών απαιτήσεων, όπου δεν υπάρχει δυνατότητα να επιτευχθούν από την αρχική κατεργασία μορφοποίησης. Οι κατεργασίες αποπεράτωσης αποτελούνται κυρίως από κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, τις λεγόμενες μηχανουργικές κατεργασίες.

Αν και τα σύνθετα υλικά έκαναν την εμφάνισή τους στην παραγωγή προϊόντων αρκετά χρόνια νωρίτερα, ο τομέας των μηχανουργικών κατεργασιών αντιμετωπίζει τα σύνθετα υλικά, ως πρώτη ύλη παραγωγής τεχνολογικών και βιομηχανικών προϊόντων σχετικά πρόσφατα, με την εμφάνιση, κυρίως, των σύνθετων υλικών πολυμερικής βάσης. Ενώ οι μηχανικές και φυσικοχημικές ιδιότητες των σύνθετων είναι ιδιαίτερα εντυπωσιακές, οι δυσκολίες που εμφανίζονται κατά τις μηχανικές τους κατεργασίες είναι σημαντικές. Η τεχνογνωσία της κοπής των μετάλλων δεν μπορεί να μεταφερθεί απευθείας στα ενισχυμένα σύνθετα υλικά, λόγω της ανισοτροπίας και της ανομοιογένειας που τα χαρακτηρίζουν. Εμφανίζουν, συνήθως, «ανορθόδοξη» συμπεριφορά κατά τις μηχανικές κατεργασίες, γεγονός που επηρεάζει την κατεργαστικότητά τους.

Η κατεργαστικότητα ενός τεχνολογικού υλικού δηλώνει την ικανότητα διαμόρφωσης που παρουσιάζει στις μηχανικές κατεργασίες, όπως είναι οι κατεργασίες κοπής ή αφαίρεσης υλικού (π.χ. τόρνευση, διάτρηση, φραιζάρισμα, πλάνισμα, λείανση, κλπ), χρησιμοποιώντας τα εκάστοτε κατάλληλα εργαλεία και συνθήκες κοπής. Αποδίδεται δε μέσω μετρήσιμων παραμέτρων, όπως για παράδειγμα οι δυνάμεις κοπής, η επιφανειακή τραχύτητα, η διαστασιακή ακρίβεια και η φθορά του εργαλείου. Πρωτεύοντα ρόλο στη διαμόρφωση των χαρακτηριστικών αυτών παίζουν η χημική σύσταση και η δομή του υλικού. Η γνώση, για παράδειγμα, των δυνάμεων κοπής που αναπτύσσονται στις διάφορες μηχανουργικές κατεργασίες κοπής σε σχέση με τους παράγοντες κοπής είναι μεγάλης σημασίας και αποτελεί κυρίαρχο κριτήριο της κατεργασιμότητας του κατεργαζόμενου υλικού, τόσο για το σχεδιαστή-κατασκευαστή των εργαλειομηχανών και των εργαλείων κοπής, όσο και για το χρήστη αυτών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στα ενισχυμένα σύνθετα υλικά ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής είναι πολύπλοκος, καθώς εξαρτάται από πληθώρα παραγόντων, όπως τις ιδιότητες των υλικών της μήτρας και της ενίσχυσης, το ποσοστό και τη γεωμετρία των ενισχυτικών ινών, την κατεύθυνση ή και την πλέξη τους, τη διαστρωμάτωση στην περίπτωση πολυστρωματικών σύνθετων υλικών κ.α.. Τα υλικά αυτά αποτελούνται συνήθως, από δύο φάσεις πολύ διαφορετικών μηχανικών και φυσικοχημικών ιδιοτήτων, με αποτέλεσμα, κατά τη διαδικασία της αφαίρεσης υλικού να λαμβάνουν χώρα πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ μήτρας και ενίσχυσης. Οι φορτίσεις, επίσης, κατά την κοπή δεν είναι σταθερές σε όλο το πάχος του σύνθετου υλικού όπως συμβαίνει συνήθως στα μέταλλα, αλλά μεταβάλλεται ανά στρώση και πέραν της παραμόρφωσης και της θραύσης του υλικού της μήτρας λαμβάνει χώρα κάμψη, λυγισμός, θραύση ή και αποκόλληση των ινών ενίσχυσης από αυτήν.

Η μηχανουργική κατεργασία των ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών αποτελεί μια σημαντική δραστηριότητα για την ενσωμάτωση αυτών των προηγμένων υλικών σε ολοένα και περισσότερες τεχνολογικές εφαρμογές. Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ βασικών παραμέτρων κατεργαστικότητας, όπως των δυνάμεων κοπής, της τραχύτητας επιφανείας και του διαστασιακού σφάλματος, σε σχέση με τους κυριότερους παράγοντες κοπής, την πρόωση και την ταχύτητα κοπής, αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση ένταξής τους στην παραγωγική διαδικασία μέσω των κατεργασιών κοπής. Για παράδειγμα, οι μηχανικές βλάβες που οφείλονται στην υπερβολική αύξηση των δυνάμεων κοπής, ενδέχεται να οδηγήσουν σε απόρριψη των προϊόντων από σύνθετα υλικά, ακόμα και στα τελευταία στάδια του κύκλου παραγωγής τους. Επομένως, η ικανότητα πρόβλεψης των δυνάμεων κοπής είναι απαραίτητη για την επιλογή των παραμέτρων της κατεργασίας που θα οδηγήσει στην ελάχιστη μηχανική βλάβη.

Με τις κατεργασίες κοπής, επιτυγχάνονται γεωμετρικές μορφές με διαστασιακή ακρίβεια και ποιότητα επιφάνειας, που είναι πολύ δύσκολο να επιτευχθούν από οποιαδήποτε άλλη τεχνική παραγωγής. Ωστόσο, η κοπή αναπόφευκτα αφαιρεί υλικό υπό τη μορφή αποβλίττου, για το οποίο έχουν ήδη ξοδευτεί χρήματα και είναι δύσκολο να ανακυκλωθεί. Το κόστος των κατεργασιών με αφαίρεση υλικού είναι αποδεδειγμένα αρκετά μεγαλύτερο από το αντίστοιχο των κατεργασιών διαμορφώσεως ή άλλων μεθόδων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

παρασκευής, όπως π.χ. η χύτευση. Κατά συνέπεια οι εξελίξεις στοχεύουν συχνά στη μείωση του κόστους της παραγωγής αλλά και των περιβαλλοντολογικών επιπτώσεων κατά την διεξαγωγή κατεργασιών κοπής, καθιερώνοντας ολοένα και πιο αυστηρές προδιαγραφές. Η ελαχιστοποίηση του κόστους στην κατεργασία σημαίνει οικονομικότερη κατεργασία, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διαφόρους τρόπους όπως:

- ελαχιστοποίηση του χρόνου κατεργασίας με επιλογή κατάλληλου συνδυασμού συνθηκών κοπής,
- βέλτιστη επιλογή και χρησιμοποίηση των κοπτικών εργαλείων ώστε να αυξάνεται ο χρόνος ζωής τους,
- ελαχιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας,
- κατάλληλες συνθήκες κοπής, για αξιοποίηση των δυνατοτήτων των υλικών των κοπτικών εργαλείων, σε συνδυασμό με το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και την μέθοδο κατεργασίας.

Στην μείωση του κόστους των κατεργασιών κοπής και στην διευκόλυνση γενικότερα της παραγωγικής διαδικασίας αποσκοπούν οι τεκμηριωμένες βάσεις δεδομένων κατεργαστικότητας, που έχουν αναπτυχθεί κατά τη διάρκεια των προηγούμενων δεκαετιών για την κοπή των μετάλλων και άλλων συμβατικών υλικών. Σε αντίθεση όμως με τα κοινά τεχνολογικά υλικά υπάρχει έλλειψη δεδομένων και εμπειρικών μοντέλων για τις παραμέτρους κατεργαστικότητας των ενισχυμένων σύνθετων υλικών. Η ανάπτυξη, λοιπόν, ανάλογων βάσεων δεδομένων κρίνεται αναγκαία για την βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας προϊόντων από ενισχυμένα σύνθετα υλικά.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

1.2 Ερευνητικό αντικείμενο της διατριβής

Η συγκεκριμένη διατριβή στοχεύει να πραγματοποιήσει μια ολοκληρωμένη έρευνα της κατεργαστικότητας του ενισχυμένου με ίνες γυαλιού πολυαμιδίου PA66-GF30, στις κυριότερες συμβατικές κατεργασίες κοπής, την τόρνευση, το φραιζάρισμα και την διάτρηση.

Το ενισχυμένο πολυαμίδιο PA66-GF30 είναι ένα από τα σύνθετα υλικά που προσελκύουν το ενδιαφέρον του βιομηχανικού σχεδιασμού και της παραγωγής προϊόντων σήμερα, με συνέπεια να αποτελεί συχνά αντικείμενο έρευνας. Είναι ένα θερμοπλαστικό υλικό με ινώδη ενίσχυση υάλου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεγάλης ποικιλίας εξαρτημάτων, προσφέροντας ισχυρά κατασκευαστικά και εμπορικά πλεονεκτήματα λόγω του συνδυασμού των υψηλών μηχανικών ιδιοτήτων και του χαμηλού κόστους. Σκοπός είναι να μελετηθεί αρχικά σε θεωρητική βάση ο μηχανισμός της κοπής του αξιοποιώντας τη θεωρία της κοπής των μετάλλων και τις ανάλογες σχέσεις και μοντέλα που έχουν αναπτυχθεί κατά το παρελθόν, διαμορφώνοντάς τα μέσω κατάλληλων παραδοχών από πρόσφατες θεωρίες που αφορούν πολυμερή υλικά. Επιπλέον, μια δεύτερη προσέγγιση σε θεωρητικό επίπεδο θα πραγματοποιηθεί μέσω των εμπειρικών σχέσεων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής που έχουν διαμορφωθεί για διάφορα συμβατικά υλικά τις προηγούμενες δεκαετίες. Η εμπειρική σχέση υπολογισμού των δυνάμεων κοπής των Kienzle και Victor, έχει καθιερωθεί έπειτα από εκτεταμένες πειραματικές έρευνες και θεωρείται σήμερα ως ένα διαδεδομένο, αξιόπιστο και απλό συγχρόνως μοντέλο, ειδικότερα ως προς την εφαρμογή του για την κοπή των μετάλλων [111][168][110]. Ωστόσο, η χρήση του μοντέλου αυτού στην κοπή πολυμερών και σύνθετων υλικών είναι περιορισμένη λόγω έλλειψης των απαιτούμενων δεδομένων. Στην παρούσα διατριβή επιχειρείται για πρώτη φορά η εφαρμογή της εμπειρικής αυτής μεθοδολογίας σε αυτήν την κατηγορία των υλικών, προσαρμόζοντας τις διαθέσιμες σχέσεις στα χαρακτηριστικά του εξεταζόμενου πολυμερούς, αναπτύσσοντας διορθωτικούς συντελεστές.

Στη συνέχεια της διατριβής η μελέτη της κατεργαστικότητας του σύνθετου υλικού θα περάσει σε πειραματικό επίπεδο. Διεξάγοντας πειράματα στις κυριότερες συμβατικές κατεργασίες κοπής θα εξεταστούν βασικοί παράμετροι κατεργαστικότητας και μέσω στατιστικής ανάλυσης των

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

πειραματικών δεδομένων θα αποδοθεί τεκμηριωμένα η σημαντικότητα των παραγόντων κοπής (συνθήκες κατεργασίας) ποσοτικοποιημένα. Σκοπός είναι η συσχέτιση των παραμέτρων κατεργαστικότητας με τους παράγοντες της κοπής, την πρόωση και την ταχύτητα της κοπής, μέσω της κατάρτισης στοχαστικών μοντέλων υψηλής αξιοπιστίας και ακρίβειας προσαρμογής. Τα στοχαστικά μοντέλα στη συνέχεια θα συγκριθούν με τα διαμορφωμένα θεωρητικά μοντέλα και τις προσαρμοσμένες εμπειρικές σχέσεις ως προς την ικανότητα συσχέτισής τους με πειραματικά δεδομένα και την ικανότητα μελλοντικής πρόβλεψης τιμών.

Η ολοκλήρωση της παρούσας έρευνας καθιστά δυνατή την καταχώρηση των διαμορφωμένων μοντέλων σε βιομηχανικές βάσεις δεδομένων της μηχανουργικής κατεργασίας του ενισχυμένου πολυαμιδίου PA66-GF30. Επίσης, η μεθοδολογία κατάρτισης των στοχαστικών μοντέλων που θα παρουσιαστεί φιλοδοξεί να καταδείξει μια εμπεριστατωμένη καινοτόμο μέθοδο κατασκευής βάσεων δεδομένων, η οποία θα μπορεί να εφαρμοστεί για κάθε υλικό. Απώτερος στόχος είναι η συνεισφορά στην κατασκευή και προώθηση ηλεκτρονικών-ψηφιακών και αυτοματοποιημένων βάσεων εύχρηστων και άμεσων, αξιοποιώντας καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα υψηλής ακρίβειας.

Η εν λόγω έρευνα κρίνεται αναγκαία καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί κάτι ανάλογο και σε αυτήν την έκταση στο παρελθόν για κάποιο από τα σύνθετα υλικά. Παρόλο που η χρήση των συγκεκριμένων υλικών καταλαμβάνει ολοένα και μεγαλύτερο μερίδιο στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας και γενικότερα στην κατασκευή υψηλής και εξειδικευμένης τεχνολογίας, ωστόσο η κατεργαστικότητά τους δεν έχει διερευνηθεί σημαντικά και επίσης, δεν υπάρχουν ολοκληρωμένες βάσεις δεδομένων για τις μηχανουργικές κατεργασίες αυτών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

1.3 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Οι ερευνητικές εργασίες που σχετίζονται με την κοπή ινωδών σύνθετων πολυμερών μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες. Στην πρώτη από αυτές πραγματοποιείται μια πρωταρχική απόπειρα προσέγγισης του θέματος και οι εργασίες βασίζονται στην απλή μοντελοποίηση με χρήση της μηχανικής της κοπής των μετάλλων (π.χ. [159], [50], [84], [41], [63], [62], [70], [126]). Στην δεύτερη οι εργασίες πραγματοποιούν πειραματικές έρευνες που εστιάζουν στη μακρο/μικροσκοπική συμπεριφορά των υλικών αυτών (π.χ. [113], [15], [16], [49], [171], [41], [78], [89], [123], [130], [120], [151], [107], [114], [156]) ή την στατιστική ανάλυση με πειραματικό σχεδιασμό (πχ. [61], [59], [152], [57], [69], [142], [141], [58], [143], [140], [144], [163], [161], [144], [153], [147], [66], [166], [92], [67], [82], [81], [91], [146], [124]). Στην τελευταία και πιο πρόσφατη προσέγγιση οι εργασίες βασίζονται σε υπολογιστικές προσομοιώσεις που αντιμετωπίζουν τα ινώδη πολυμερή ως ανισότροπα υλικά σε μακροσκοπική κλίμακα ή επικεντρώνονται στις μικροσκοπικές αλληλεπιδράσεις των ινών με την πολυμερή μήτρα (π.χ. [32], [121], [33]).

Ορισμένες πρωταρχικές εργασίες προήλθαν από την επέκταση της έρευνας της κατεργασίας πλαστικών υλικών (π.χ. [112]), καθώς το υλικό της μήτρας των σύνθετων είναι στις περισσότερες περιπτώσεις πολυμερές. Η πρώτη έρευνα για την κατεργασία των ενισχυμένων με ίνες πλαστικών παρουσιάστηκε από τους Everstine και Rogers το 1971 [84], οι οποίοι ανέπτυξαν μια αναλυτική θεωρία πρόβλεψης της δύναμης κοπής, που περιορίζεται όμως σε επίπεδες παραμορφώσεις και ασυμπίεστα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ισχυρές παράλληλες ίνες. Έκτοτε, το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας στον τομέα αυτό έχει βασιστεί σε πειραματικές μελέτες.

Οι Miner [130] και Mackey [120] το 1980 μελέτησαν την πολυπλοκότητα της συνύπαρξης των σκληρών ινών της ενίσχυσης με το μαλακό υλικό της μήτρας και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η κατεργασία αυτών των δύο φάσεων υλικών, απαιτεί όχι μόνο την ανάπτυξη νέων εργαλείων, αλλά παραπέμπει σε τελείως διαφορετικούς μηχανισμούς κοπής. Ο Koplev παράλληλα ανέφερε το 1980 ότι η κοπή των σύνθετων υλικών χαρακτηρίζεται από διαδοχικές συνεχείς θραύσεις που η κάθε μία δημιουργεί ένα τεμαχισμένο απόβλιττο [113]. Επίσης, σε μια μεταγενέστερη εργασία μαζί με συνεργάτες του [114] μελέτησαν τη σχέση μεταξύ των δυνάμεων κοπής και το μηχανισμό

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

σχηματισμού του αποβλίττου με τις συνθήκες κοπής και τη γεωμετρία του εργαλείου κοπής. Απέδειξαν ότι η κύρια δύναμη κοπής είναι ανάλογη προς το βάθος κοπής και την πρόωση μειώνεται ελαφρώς με αύξηση της γωνίας κοπής του εργαλείου, ενώ είναι ανεξάρτητη της φθοράς του εργαλείου.

Οι αρχικές αυτές έρευνες γύρω από τις κατεργασίες κοπής των ενισχυμένων σύνθετων υλικών αφορούσαν, κατά κύριο λόγω, υλικά εποξικής και πολυεστερικής μήτρας με ενίσχυση συνεχών ινών προσανατολισμένης διεύθυνσης, καθώς αποτελούσαν τα πρώτα ενισχυμένα σύνθετα που κατασκευάστηκαν. Από έρευνες που διεξήχθησαν σε διάφορα τέτοιου είδους υλικά διαπιστώθηκε ότι παράμετροι κατεργαστικότητας όπως οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, η φθορά του εργαλείου κοπής και η επιφανειακή τραχύτητα εξαρτώνται άμεσα από τη διεύθυνση της κοπής σε σχέση με την διεύθυνση που έχουν οι ίνες στο υλικό (π.χ. [113], [15], [16], [49], [171], [41], [107], [156], [151]). Οι βέλτιστες συνθήκες (π.χ. χαμηλότερες δυνάμεις κοπής, μικρότερη φθορά εργαλείου, καλύτερη τραχύτητα επιφάνειας κτλ), παρουσιάζονται κατά την κοπή παράλληλα στις ίνες, ενώ οι χειρότερες κάθετα σε αυτές. Παράλληλα, προτείνεται η χρήση κοπτικών εργαλείων ακριβείας από διαμάντι ή εναλλακτικά εργαλεία καρβιδίου, καθώς τα εργαλεία από ταχυχάλυβα (HSS) υφίστανται υπερβολική φθορά κατά την κοπή των συγκεκριμένων υλικών και δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται (π.χ. [78], [89], [123]). Σε παρόμοια συμπεράσματα κατέληξαν οι Byrne και Wunsch το 1986 [47] και οι Krishnamurthy et al. το 1992 [115] προσθέτοντας ότι εκτός από τον προσανατολισμό των ινών σημαντική επίδραση στις δυνάμεις κοπής, στο σχηματισμό του αποβλίττου, στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειες και στη φθορά του εργαλείου, έχει επίσης το υλικό και η γεωμετρία του εργαλείου κοπής.

Πρόσφατα το ενδιαφέρον της κατεργασίας πολυμερικών σύνθετων υλικών με συμβατικές τεχνικές έχει αυξηθεί με αποτέλεσμα να διεξάγονται συνεχώς νέες έρευνες σε νέα υλικά που κατασκευάζονται, όπως είναι τα θερμοπλαστικά με ενίσχυση κοντών ινών άνθρακα ή γυαλιού, τα οποία δείχνουν να είναι καταλληλότερα για τις κατεργασίες με αφαίρεση υλικού παρουσιάζοντας καλύτερα χαρακτηριστικά κατεργαστικότητας, π.χ. διαστατική ακρίβεια. Διάφορες έρευνες, επίσης, σε τέτοιου τύπου υλικά συνδύασαν την πραγματοποίηση πειραμάτων και την μελέτη των πειραματικών δεδομένων με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

την θεωρητική μελέτη διαφόρων χαρακτηριστικών της κοπής στοχεύοντας στη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Η θεωρητική μελέτη της κοπής των ινωδών σύνθετων πραγματοποιείται κατά κύριο λόγω υπό συνθήκες ορθογωνικής κοπής. Ο Merchant το 1945 [128] παρουσίασε τις θεμελιώδεις αρχές του μαθηματικού μοντέλου της ορθογωνικής κοπής των μετάλλων. Το μοντέλο του Merchant μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής στην τόρνευση και ορισμένες άλλες μηχανουργικές κατεργασίες ενός σημείου κοπής, εφόσον η πρόωση είναι μικρή σε σχέση με το βάθος της κοπής (π.χ. [128], [96]). Σε σχετικές έρευνες οι Bhatnagar et al (1995) [41] και ο Chang (2006) [50] πραγματοποίησαν πειράματα ορθογωνικής κοπής σε σύνθετα υλικά μονοδιευθυντικής ενίσχυσης και επέλυσαν ταυτόχρονα το μοντέλο του Merchant για τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, παρατηρώντας ότι υπήρχε ικανοποιητική συσχέτιση των τιμών για συγκεκριμένη όμως κατεύθυνση της κοπής σε σχέση με τη διεύθυνση των ινών. Σε παρόμοιες έρευνες οι Davim και Mata παρουσίασαν πειραματικές μελέτες σχετικά με την ορθογωνική κοπή των σύνθετων υλικών PEEK (Πολυαιθεροαιθεροκετόνη) και PEEK-CF30 (ενισχυμένο με 30% κοντές ίνες άνθρακα τυχαίου προσανατολισμού) το 2006 [62] και για το πολυαμίδιο PA6 και το ενισχυμένο PA66-GF30 το 2007 [63]. Τα πειραματικά αποτελέσματα που λήφθηκαν, όπως οι δυνάμεις κοπής, ο συντελεστής συμπιέσεως του αποβλίττου, η γωνία διάτμησης και ο μέσος φαινόμενος συντελεστής τριβής, συμφωνούσαν με εκείνα που διεξήχθηκαν από το μοντέλο του Merchant και τις θεμελιώδης αρχές της μηχανικής της κοπής και σχηματισμού του αποβλίττου (π.χ. [128], [96], [158], [42]), αποδεικνύοντας ότι οι αντίστοιχες σχέσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη τιμών χαρακτηριστικών της κοπής αυτών των πολυμερικών σύνθετων υλικών. Ανάλογες εργασίες έχουν πραγματοποιήσει για σύνθετα υλικά πολυαμιδίου οι Mata et.al το 2006 [126] και Silva et al το 2009 [159] και για σύνθετα υλικά μεταλλικής μήτρας οι Davim et.al το 2007 [70], όπου διεξήχθηκαν παρόμοια συμπεράσματα.

Με την εξέλιξη της διαδικασίας εκτέλεσης πειραμάτων και των στατιστικών μεθόδων επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων μέσω του πειραματικού σχεδιασμού (Experimental Design ή Design of Experiment - DoE) και των νέων τεχνικών της στατιστικής, όπως η ανάλυση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

παλινδρόμησης (Regression Analysis) και η ανάλυσης διακύμανσης (Analysis Of Variance – ANOVA), οι πειραματικές έρευνες απέκτησαν σπουδαίες δυνατότητες. Τα νέα αυτά εργαλεία έδωσαν στους ερευνητές την δυνατότητα συσχέτισης των διαφόρων υπό μελέτη παραμέτρων με τις κατά περίσταση συνθήκες της πειραματικής διαδικασίας, αποδίδοντας την εξάρτησή τους μέσω μαθηματικών σχέσεων (π.χ. [134], [135], [133], [79], [106], [127]). Η δυνατότητα αυτή στην περίπτωση των μηχανουργικών κατεργασιών συμβάλλει στην διαμόρφωση και ανάπτυξη νέου τύπου βάσης δεδομένων για την καταχώρηση στοιχείων κατεργαστικότητας των υλικών υπό τη μορφή στοχαστικών μοντέλων προσαρμογής. Χαρακτηριστικές εργασίες έχουν πραγματοποιηθεί στο παρελθόν για την μελέτη της κατεργασίας κυρίως διαφόρων μετάλλων σε συμβατικές και μη συμβατικές κατεργασίες, όπου προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ διαφόρων παραμέτρων κατεργαστικότητας με τις συνθήκες κοπής και προτείνονται ανάλογα στοχαστικά μοντέλα (π.χ. [138], [148], [109], [139], [149], [167], [145], [125]).

Στην περίπτωση των σύνθετων υλικών οι Rahman et.al. το 1999 [152] πραγματοποίησαν πειράματα σε φραίζα του σύνθετου PEEK-άνθρακα και μέσω πειραματικού σχεδιασμού κατέδειξαν ποιοί από τους εξεταζόμενους παράγοντες παίζουν το σημαντικότερο ρόλο στην φθορά του εργαλείου και την επιφανειακή τραχύτητα. Σε ανάλογες έρευνες οι Davim et al το 2003 [61] και Davim και Reis 2004 [59] μελέτησαν την τόρνευση των πολυμερών PEEK και PEEK με ίνες γυαλιού εφαρμόζοντας πειραματικό σχεδιασμό με τη μεθοδολογία Taguchi (π.χ. [164], [165], [155]) και ανάλυση διακύμανσης. Παρουσίασαν τη συσχέτιση και τη σημαντικότητα των παραγόντων κοπής με ποσοτικοποίηση και υποστήριξαν ότι είναι δυνατό να επιτευχθεί υψηλή ποιότητα επιφάνειας με κατάλληλο συνδυασμό τους. Παρόμοιες έρευνες πραγματοποιήθηκαν αργότερα για την τόρνευση και τη διάτρηση ενισχυμένων με ίνες γυαλιού σύνθετων πολυεστερικής και εποξικής μήτρας (π.χ. [57], [69], [142]), αλλά και την τόρνευση του σύνθετου αλουμινίου με κόκκους καρβιδίου του πυριτίου (Al-SiC) (π.χ. [141]), στις οποίες καθορίζεται ο βέλτιστος συνδυασμός συνθηκών κοπής μέσω υπολογισμού του ποσοστού συνεισφοράς των παραγόντων κοπής αλλά και των αλληλεπιδράσεών τους, σε παραμέτρους κατεργαστικότητας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Παράλληλα με αυτές τις εργασίες αρκετές έρευνες πραγματοποιήθηκαν με στόχο την ανάπτυξη μιας βιομηχανικής βάσης δεδομένων για τα στοιχεία κατεργαστικότητας διαφόρων υλικών, με συνέπεια να κατασκευάζονται μαθηματικές σχέσεις προσδιορισμού τους μέσω κατάλληλης επεξεργασίας πειραματικών δεδομένων με μαθηματικές μεθόδους. Σε σχετικές μελέτες που αφορούν στην κοπή μετάλλων έχουν προταθεί κατά το παρελθόν μοντέλα προσαρμογής διαφόρων τύπων (π.χ. [117], [29], [108], [30], [116], [39], [122], [38], [64]). Ανάλογες έρευνες πραγματοποιήθηκαν και για τα σύνθετα υλικά αρχικά εποξικής ή πολυεστερικής μήτρας με ενίσχυση γυαλιού ή άνθρακα σε τόρνευση (π.χ. [58], [143], [140], [144], [163]), φραιζάρισμα (π.χ. [161], [144], [153]) και διάτρηση (π.χ. [147], [66], [166], [92], [67], [82], [81]). Στις συγκεκριμένες μελέτες συντελείται μοντελοποίηση παραμέτρων κατεργαστικότητας, όπως δυνάμεις κοπής, παράμετροι τραχύτητας, παράγοντας αποκόλλησης και διαστατικό σφάλμα, μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης. Επίσης, σε πιο πρόσφατες εργασίες και με παρόμοιες στατιστικές μεθόδους παρουσιάζονται στοχαστικά μοντέλα προσαρμογής των παραμέτρων κατεργαστικότητας για τα σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής μήτρας με ενίσχυση κοντές ίνες άνθρακα ή γυαλιού (π.χ. [91], [146], [124]). Οι τελευταίες αυτές έρευνες αφορούν κυρίως στην κατεργασία της τόρνευσης και τα ενισχυμένα σύνθετα πολυαμιδίου PA66 και PEEK.

Μια διαφορετική προσέγγιση αναφορικά με την μελέτη της κοπής των σύνθετων υλικών συντελείται μέσω υπολογιστικών μεθόδων με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Χαρακτηριστική είναι η εργασία των Arola και Ramulu το 1997 [32], όπου ανέπτυξαν με ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων σε δυο διαστάσεις τη διαδικασία σχηματισμού του αποβλίττου στην περίπτωση της κοπής σύνθετου υλικού μονοδιευθυντικής ενίσχυσης. Το μοντέλο ελέγχθηκε με πειραματικές μετρήσεις και ενώ οι τιμές για τη δύναμη κοπής συμφωνούσαν, η πρόβλεψη της δύναμης πρόωσης ήταν εσφαλμένη, γεγονός που αποδόθηκε σε δυσκολίες καθορισμού του επιπέδου διατμήσεως. Αργότερα οι Mahdi και Zhang το 2001 [121] παρουσίασαν ένα μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για τη μελέτη της ορθογωνικής κοπής ενισχυμένων με ίνες σύνθετων υλικών και την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής με βάση των προσανατολισμό των ινών. Ανάλογη εργασία πραγματοποίησαν οι Arola et al. το 2002 [33], όπου κατασκεύασαν ένα μοντέλο προσομοίωσης του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

μηχανισμού σχηματισμού του αποβλίττου κατά την κοπή σύνθετων υλικών μονοδιευθυντικής ενίσχυσης για την πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής. Προς αυτή την κατεύθυνση αναπτύσσονται τις τελευταίες δεκαετίες FEM λογισμικά που στοχεύουν στην προσομοίωση της κοπής των σύνθετων υλικών και τον υπολογισμό των παραμέτρων κατεργαστικότητας με υπολογιστικές μεθόδους, τα οποία βασίζονται στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Γίνονται προσπάθειες με αυτόν τον τρόπο να επιτευχθούν πιο ακριβείς υπολογισμοί για την ανάλυση περίπλοκων κατασκευών, που θα επιτρέπουν την άμεση αξιολόγηση των δεδομένων και θα συμβάλουν στην βελτιστοποίηση της μηχανουργικής παραγωγής των προϊόντων. Παρόλο που τα λογισμικά αυτά έχουν επιτύχει να παρέχουν ακριβές υπολογισμούς των δυνάμεων κοπής σε απλές γεωμετρίες αποβλίττου και κινηματικής, σε πιο πολύπλοκες περιπτώσεις όπως είναι τα απόβλιττα σύνθετης και μεταβαλλόμενης γεωμετρίας σε κατεργασίες φραιζαρίσματος, οι διαδικασίες FEM αφενός είναι ιδιαίτερα χρονοβόρες αφετέρου οδηγούν σε σημαντικές αποκλίσεις σύμφωνα με τις μετρούμενες τιμές αυτών [13][43]. Στις περιπτώσεις αυτές ο υπολογισμός των δυνάμεων μπορεί να πραγματοποιηθεί με αναλυτικές μεθόδους σύμφωνα με την κλασική θεωρία της κοπής και μέσω εμπειρικών εξισώσεων. Σχετικοί υπολογισμοί θα πραγματοποιηθούν σε επόμενο κεφάλαιο (Κεφάλαιο 4).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

1.4 Δομή της διατριβής

Η ανάπτυξη των θεμάτων που εξετάζονται στην παρούσα διατριβή αποτυπώνεται σε εννέα κεφάλαια, στα οποία πραγματεύεται η θεωρητική και πειραματική προσέγγιση του ερευνητικού αντικειμένου και διατυπώνονται συμπεράσματα και μελλοντικές ερευνητικές προοπτικές. Παρακάτω ακολουθεί μια συνοπτική παρουσίαση του κάθε κεφαλαίου.

Στο 2^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σύνθετα υλικά ως προς τα συστατικά τους, την κατασκευή τους, την ταξινόμησή τους, τις ιδιότητες και τις εφαρμογές τους. Στο 3^{ο} κεφάλαιο πραγματοποιείται μια σύντομη περιγραφή των κυριότερων συμβατικών κατεργασιών κοπής με τα βασικά κινηματικά χαρακτηριστικά τους και στη συνέχεια δίνεται μια αναλυτική παρουσίαση της μορφολογίας των τεχνολογικών επιφανειών, αναφέροντας διάφορα χαρακτηριστικά της, παραμέτρους προσδιορισμού της ποιότητά της και τη μέθοδο μέτρησης της τραχύτητας.

Στο 4^{ο} κεφάλαιο πραγματοποιείται ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω θεωρητικών σχέσεων και εμπειρικών μοντέλων που έχουν διαμορφωθεί κατά το παρελθόν για μέταλλα, εφαρμόζοντας κατάλληλες παραδοχές και αναπτύσσοντας διορθωτικούς συντελεστές βάσει των χαρακτηριστικών του εξεταζόμενου σύνθετου υλικού.

Στο 5^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία του πειραματικού σχεδιασμού, η κατασκευή στοχαστικών μοντέλων, οι τεχνικές στατιστικής επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων και η έννοια της στατιστικής συμπερασματολογίας.

Τα κεφάλαια 6, 7, 8, 9 περιλαμβάνουν την εκτέλεση των πειραμάτων. Αρχικά παρουσιάζεται ο πειραματικός εξοπλισμός (εργαλειομηχανές, δοκίμια κατεργασίας και μετρητικά όργανα) και στη συνέχεια η πειραματική διαδικασία σε κάθε περίπτωση, η συλλογή των δεδομένων και η πραγματοποίηση της στατιστικής ανάλυσης. Κατασκευάζονται στοχαστικά μοντέλα για κάθε παράμετρο κατεργαστικότητας που μελετάται, τα οποία ελέγχονται ως προς τις προϋποθέσεις ισχύος και την αξιοπιστία τους και διατυπώνονται τα σχετικά συμπεράσματα. Μέσω των στοχαστικών μοντέλων κατασκευάζονται οι αντίστοιχες επιφάνειες προσαρμογής και τα διαγράμματα των παραμέτρων κατεργαστικότητας ως προς το χρόνο κοπής και για όλο το εύρος των συνθηκών κοπής που μελετάται.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τέλος, στο κεφάλαιο 10 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της εργασίας, πραγματοποιείται επαλήθευση των στοχαστικών μοντέλων και προτείνονται περαιτέρω ερευνητικές κατευθύνσεις, με στόχο να διευρυνθεί η γνώση της κατεργαστικότητας ανάλογων υλικών.

Τη διατριβή συνοδεύουν τέσσερα παραρτήματα, στα οποία δίδονται συγκεντρωτικά τα πειραματικά στοιχεία για κάθε κατεργασία που συντελέστηκε, οι επιφάνειες προσαρμογής των στοχαστικών μοντέλων σε αντιστοιχία με τα τρισδιάστατα διαγράμματα επιφανείας των πραγματικών μετρήσεων, καθώς και τα διαγράμματα των παραμέτρων κοπής του συγκεκριμένου υλικού ως προς τις συνθήκες κοπής και το χρόνο κοπής για κάθε κατεργασία. Τα συγκεκριμένα διαγράμματα είναι πλήρως και άμεσα εφαρμόσιμα και αποτελούν πρότυπη βάση δεδομένων για τη μηχανουργική παραγωγή προϊόντων από το ενισχυμένο σύνθετο πολυαμίδιο PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 2: ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ - ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ

2.1 Ορισμός του σύνθετου υλικού και γενικά χαρακτηριστικά

«Σύνθετο υλικό» (composite material) καλείται κάθε συνδυασμός δύο ή περισσότερων υλικών, διαφορετικών ιδιοτήτων. Ειδικότερα, ο σύγχρονος ορισμός προϋποθέτει τα σύνθετα υλικά να προκύπτουν τεχνητά και όχι φυσικά και να αποτελούνται από χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη, που διαχωρίζονται από μια διακριτή διεπιφάνεια[1] (Agarwal, 1990). Τα επιμέρους υλικά, χαρακτηρίζονται από σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το παραγόμενο σύνθετο υλικό, διαθέτει σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από αυτά.

Κατά κύριο λόγο, τα σύνθετα υλικά αποτελούνται από δύο συστατικά μέρη ή φάσεις, το συστατικό ενίσχυσης και τη μήτρα. Το συστατικό ενίσχυσης αποτελεί μια διεσπαρμένη φάση που προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες ιδιότητες, κυρίως μηχανικές, ενώ η μήτρα είναι συνεχής και συνήθως χαμηλής πυκνότητας. Η μήτρα αφενός περιβάλλει και συγκρατεί την ενισχυτική φάση και αφετέρου εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της, με την μεταφορά και κατανομή των φορτίων σε αυτές.

Σκοπός της σύνθεσης διαφορετικών υλικών, είναι η απόκτηση νέων με σημαντικά βελτιωμένες ιδιότητες, που θα καλύπτουν κατασκευαστικές ανάγκες. Οι ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού, προκύπτουν ως συνάρτηση αφενός των ιδιοτήτων των συστατικών του και της μεταξύ τους συνάφειας (συμβατότητα) και αφετέρου του ποσοστού της ενισχυτικής φάσης και της μορφής της, δηλαδή το σχήμα και το μέγεθος των διεσπαρμένων σωματιδίων, την κατανομή και τον προσανατολισμό τους. Η βελτιωμένη συμπεριφορά που προκύπτει μέσω του συνδυασμού δύο ή περισσότερων υλικών διαφορετικών ιδιοτήτων, αναφέρεται ως «*αρχή της συνδυασμένης δράσης*» [48].

[1] Για το λόγο αυτό δεν θεωρούνται ως σύνθετα, υλικά όπως το ξύλο που αποτελείται από ίνες κυτταρίνης περιβαλλόμενες από τη λιγνίνη, ή τα μεταλλικά κράματα και τα περισσότερα κεραμικά, καθώς οι φάσεις τους σχηματίζονται ως συνέπεια φυσικών φαινομένων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

2.1.1 Υλικά ενίσχυσης

Προκειμένου η διεσπαρμένη φάση να προσφέρει ικανοποιητική ενίσχυση, το υλικό κατασκευής της επιλέγεται, έτσι ώστε να διαθέτει χαρακτηριστικά, όπως υψηλό μέτρο ελαστικότητας, υψηλή εφελκυστική και θλιπτική αντοχή κτλ και όσο το δυνατό μικρότερη πυκνότητα (χαμηλό ειδικό βάρος). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται ενδέχεται να είναι οργανικά ή ανόργανα. Περιπτώσεις οργανικών υλικών αποτελούν τα πολυμερή, το αραμίδιο (πολύ ελαφρύ), ο άνθρακας (υψηλή αντοχή αλλά υψηλό κόστος) κ.α., ενώ ανόργανα το γυαλί (ευρεία χρήση και υψηλές ιδιότητες με χαμηλό κόστος), το βόριο (υψηλή αντοχή), οξείδια του πυριτίου (αντοχή σε υψηλές θερμοκρασίες), οξείδιο του αλουμινίου κ.α. Στους πίνακες 2.1 και 2.2 αναφέρονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών ενίσχυσης, υπό τη μορφή ινών (κεφ.2.2.2).

Πίνακας 2.1: Χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών ενίσχυσης υπό τη μορφή ίνας. [48][97]

Τύπος Ίνας	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Ίνες Γυαλιού (*E-glass, S-glass*)	Υψηλή αντοχή Χαμηλό κόστος	Χαμηλό μέτρο ελαστικότητας Μικρή διάρκεια ζωής σε κόπωση Μεγάλη ευαισθησία σε υψηλές θερμοκρασίες
Ίνες Αραμιδίων (*Aramid - Kevlar*)	Υψηλή εφελκυστική αντοχή Μικρή πυκνότητα	Χαμηλή θλιπτική αντοχή Μεγάλη απορρόφηση υγρασίας
Ίνες Βορίου (*Boron*)	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας Υψηλή θλιπτική αντοχή	Υψηλό κόστος
Ίνες Άνθρακα (*Carbon - AS4, T300, C6000*)	Υψηλή αντοχή Υψηλό μέτρο ελαστικότητας	Σχετικά υψηλό κόστος
Ίνες Γραφίτη (*Graphite - GY-70, pitch*)	Πολύ υψηλό μέτρο ελαστικότητας	Χαμηλή αντοχή Υψηλό κόστος
Κεραμικές Ίνες (*Ceramic - silicon carbide, alumina*)	Υψηλό μέτρο ελαστικότητας Υψηλή αντοχή σε μεγάλες θερμοκρασίες	Χαμηλή αντοχή Υψηλό κόστος

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 2.2: Χαρακτηριστικές ιδιότητες υλικών ενίσχυσης διαφόρων υλικών και μορφών. [48]

Υλικό	Πυκνότητα (kg/m^3)	Αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Ειδική αντοχή σε εφελκυσμό (GPa)	Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	Ειδικό μέτρο ελαστικότητας (GPa)
Τριχοειδείς ίνες					
Γραφίτης	2.2	20	9.1	700	318
Νιτρίδιο του πυριτίου	3.2	5-7	1.56-2.2	350-380	109-118
Οξείδιο του αλουμινίου	4.0	10-20	2.5-5.0	700-1500	175-375
Καρβίδιο του άνθρακα	3.2	20	6.25	480	150
Ίνες					
Οξείδιο του αλουμινίου	3.95	1.38	0.35	379	96
Αραμίδιο (Kevlar 49)	1.44	3.6-4.1	2.5-2.85	131	91
Άνθρακας	1.78-2.15	1.5-4.8	0.7-2.7	228-724	106-407
Ύαλος τύπου Ε	2.58	3.45	1.34	72.5	28.1
Βόριον	2.57	3.6	1.40	400	156
Καρβίδιο του πυριτίου	3.0	3.9	1.30	400	133
Ειδικό πολυαιθυλένιο (UHMWPE - Spectra 900)	0.97	2.6	2.68	117	121
Μεταλλικά σύρματα					
Χάλυβας υψηλής αντοχής	7.9	20	0.30	210	26.6
Μολυβδένιο	10.2	20	0.22	324	31.8
Βολφράμιο	19.3		0.15	407	21.1

Όπου: «Ειδική» ιδιότητα είναι ο λόγος μιας μηχανικής ιδιότητας του υλικού προς την πυκνότητά του (κεφ.2.4).

2.1.2 Υλικά μήτρας

Το υλικό της μήτρας, ανάλογα με τις κατασκευαστικές απαιτήσεις (θερμοκρασία, περιβάλλον χρήσης, φορτία κτλ), μπορεί να είναι πολυμερές, μέταλλο ή κεραμικό και τα σύνθετα υλικά που προκύπτουν χαρακτηρίζονται ως PMC (Polymer Matrix Composite), MMC (Metal Matrix Composite) και CMC (Ceramic Matrix Composite) αντίστοιχα.

Οι πολυμερείς μήτρες διακρίνονται στα ελαστομερή υλικά (rubbers), στα θερμοσκληρυνόμενα (thermosets *ή* thermosetting resin) και τα θερμοπλαστικά (thermoplastics).

Οι ελαστομερείς μήτρες (π.χ. φυσικό ή τεχνητό καουτσούκ), έχουν το χαρακτηριστικό ότι είναι πολύ εύκαμπτες, με συνέπεια να μπορούν να δεχθούν πολύ μεγάλες παραμορφώσεις έχοντας τη δυνατότητα ανάκτησης της αρχικής τους μορφής (complete recoverability). Αντίθετα, η ικανότητα να φέρουν φορτίο είναι πολύ μικρή, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται σε περιορισμένο αριθμό εφαρμογών (π.χ. σε ελαστικά οχημάτων).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή αποτελούνται κυρίως από διάφορες πολυεστερικές, εποξειδικές (ή εποξικές) και φαινολικές ρητίνες και πολυιμίδια (PI). Τα περισσότερα έχουν εξαιρετικά χαμηλό κόστος, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ευρέως (π.χ. ο πολυεστέρας με ενίσχυση ινών γυαλιού στην ναυπηγική και στην κατασκευή τμημάτων αεροσκαφών). Επίσης, χαρακτηρίζονται από υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας και πολύ καλή χημική αντοχή. Σημαντικό μειονέκτημά τους αποτελεί το γεγονός ότι είναι αρκετά ψαθυρά υλικά και έχουν σχετικά μικρή αντίσταση στην διάδοση των ρωγμών, μέτρια αντίσταση σε ερπυσμό και κρουστικά φορτία. Στις θερμοσκληρυνόμενες μήτρες, το ρευστό πολυμερές μετατρέπεται σε άκαμπτο στερεό μέσω θερμικών διεργασιών (curing process) και δεν έχει τη δυνατότητα να επανέλθει σε ρευστή κατάσταση για περαιτέρω μορφοποίηση.

Τα θερμοπλαστικά περιλαμβάνουν υλικά ευρείας κατανάλωσης (conventional) όπως το χλωριούχο πολυβινύλιο, το πολυστυρένιο (PS) και οι πολυολεφίνες, αλλά και υλικά υψηλής απόδοσης (high performance) όπως το πολυαιθυλένιο (PE), το θειούχο πολυφαινυλένιο (PPS), τα πολυαμίδια (νάϋλον - PA) τα πολυφαινυλενοξείδια (PPO) και οι πολυαιθεροαιθεροκετόνες (PEEK). Τα υψηλής απόδοσης υλικά παρουσιάζουν ανώτερα χαρακτηριστικά όπως για παράδειγμα ιδιαίτερα υψηλές μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα στη θερμότητα και τα χημικά, με αποτέλεσμα να αντικαθιστούν επάξια ακόμα και μέταλλα σε κατασκευές υψηλών απαιτήσεων. Τα θερμοπλαστικά πολυμερή παρουσιάζουν μεγαλύτερη μηχανική αντοχή και ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον από τα θερμοσκληρυνόμενα, αλλά αντίθετα έχουν μικρότερη θερμοκρασία λειτουργίας. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ικανότητά τους να μεταβαίνουν σε ρευστή κατάσταση με τη θέρμανση και στη συνέχεια, κατά την ψύξη, να επαναμορφοποιούνται σε άμορφα ή ημικρυσταλλικά στερεά.

Η μέγιστη επιτρεπτή θερμοκρασία χρησιμοποίησης πολυμερικών μητρών είναι αρκετά χαμηλή (περίπου 300°C), έτσι ώστε για εφαρμογές υψηλών θερμοκρασιών επιβάλλεται η χρήση μεταλλικών ή κεραμικών. Ως υλικά μεταλλικής μήτρας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο υλικά, όπως το αλουμίνιο, το τιτάνιο, το νικέλιο και κράματα χαλκού και βολφραμίου, ενώ παραδείγματα κεραμικών μητρών αποτελούν οι μήτρες άνθρακα, η αλουμίνα

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

(Al_2O_3), το καρβίδιο του πυριτίου (SiC) και διάφορα κεραμικά γυαλιά[1]. Η κατασκευή σύνθετων υλικών με κεραμικές μήτρες, αντιμετωπίζει ένα σημαντικό πρόβλημα που αφορά στη συνάφεια των ενισχυτικών ινών με το υλικό της μήτρας και οφείλεται στη μεγάλη διαφορά μεταξύ των συντελεστών γραμμικής διαστολής τους.

Στον ακόλουθο πίνακα αναφέρονται τα κυριότερα χαρακτηριστικά διαφόρων υλικών μήτρας.

Πίνακας 2.3: Χαρακτηριστικές ιδιότητες διαφόρων υλικών μήτρας. [48][97]

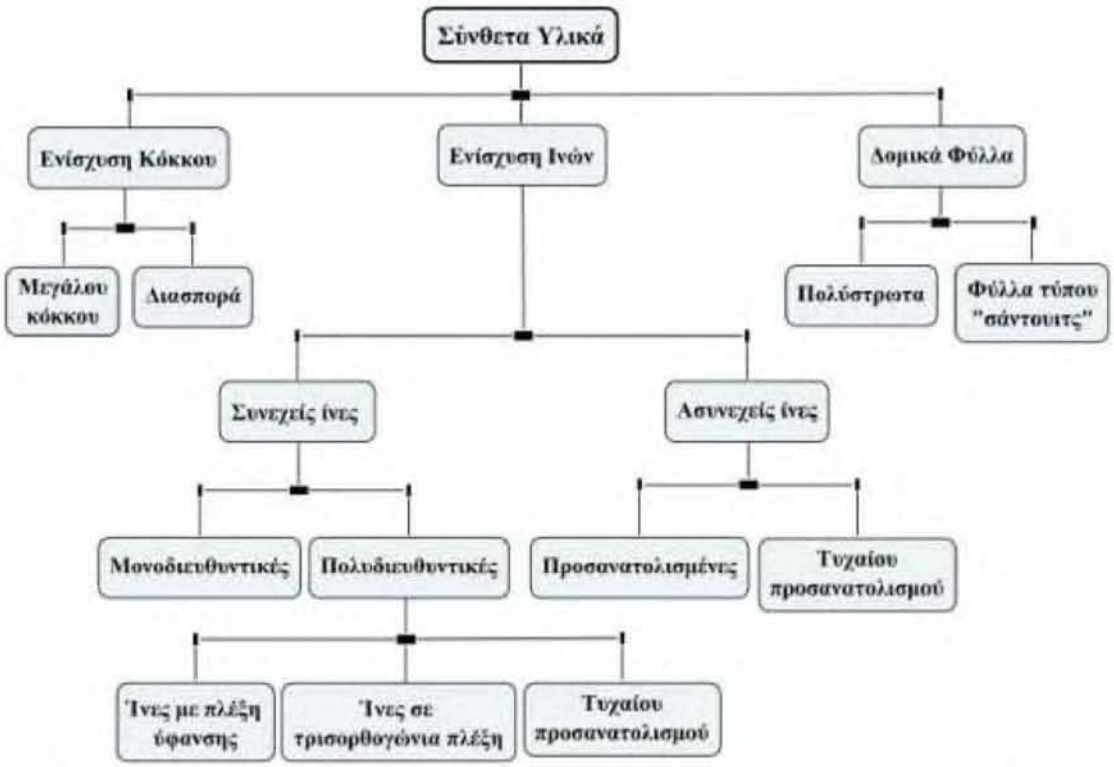
Είδος Μήτρας	Πυκνότητα (Kg/m^3)	Μέτρο ελαστικότητας Young (GPa)	Εφελκυστική αντοχή (GPa)
Πολυεστέρες	1.2-1.5	2-4	0.04-0.1
Εποξειδικές ρητίνες	1.1-1.4	3-6	0.035-0.1
Νάϋλον 6.6	1.14	1.4-1.8	0.06-0.07
Πολυπροπυλένιο	0.9	1.0-1.4	0.02-0.04
Αλουμίνα (Al_2O_3)	3.9	320-380	0.28-0.55
Αργίλιο (Al)	2.7	69	0.09
Χαλκός (Cu)	8.9	110	0.2
PSZ (partially stabilized Zn)	6.0	200	0.07

[1] Ειδικές περιπτώσεις σύνθετων υλικών κεραμικής μήτρας αποτελούν το τσιμέντο με ενίσχυση χάλυβα (οπλισμένο σκυρόδεμα), ίνες αμιάντου (αμιαντοπλάκες), ίνες υάλου κτλ, όπως και κατασκευές από γύψο με ενίσχυση ινών αμιάντου και υάλου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

2.2 Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών

Όπως προαναφέρθηκε, τα σύνθετα υλικά χαρακτηρίζονται από τη συνύπαρξη δύο τουλάχιστον, μακροσκοπικά διακριτών συστατικών, από τα οποία το ένα αποτελεί τη μήτρα και το άλλο το συστατικό ενίσχυσης. Με βάση τη μορφή της ενισχυτικής φάσης, τα σύνθετα υλικά ταξινομούνται σε τρείς γενικές κατηγορίες, που είναι τα ενισχυμένα με σωματίδια (ή κόκκους), τα ενισχυμένα με ίνες και τα δομικά ή στρωματικά. Στη συνέχεια, κάθε κατηγορία διαχωρίζεται σε επιμέρους τύπους, ανάλογα με το μέγεθος, τη γεωμετρία και την κατεύθυνση της ενισχυτικής φάσης (Σχήμα 2.1).



Σχήμα 2.1: Ταξινόμηση των σύνθετων υλικών ως προς το είδος της ενισχυτικής φάσης. **[18][17][48]**

Στα ενισχυμένα με κόκκους σύνθετα υλικά, η διεσπαρμένη φάση έχει περίπου τις ίδιες διαστάσεις σε όλες τις κατευθύνσεις, ενώ στα ενισχυμένα με ίνες έχει τη γεωμετρία ίνας (μεγάλη αναλογία λόγου του μήκους προς τη διάμετρο). Τα δομικά σύνθετα υλικά προέρχονται από τη σύνθεση φύλλων σε στρώσεις, τα οποία μπορεί να είναι κατασκευασμένα από άλλου τύπου σύνθετα υλικά ή και ομοιογενή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

2.2.1 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση κόκκου

Τα ενισχυμένα με σωματίδια σύνθετα υλικά (Particulates) διαχωρίζονται στα ενισχυμένα σύνθετα μεγάλου κόκκου και στα ενισχυμένα με διασπορά (Σχήμα 2.1). Στην πρώτη περίπτωση, η διάμετρος των κόκκων είναι μεγαλύτερη από 1μm και το ποσοστό του όγκου τους είναι μεγαλύτερο από 25%. Στα υλικά αυτής της κατηγορίας η εφαρμοζόμενη μηχανική τάση διαμοιράζεται και στη μήτρα και στα σωματίδια του υλικού.

Ένα από τα πλέον διαδεδομένα και με ευρεία κατανάλωση υλικά αυτής της κατηγορίας είναι το ενισχυμένο σκυρόδεμα, που αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα οικοδομικά υλικά εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Επίσης, στην κατηγορία της σωματιδιακής ενίσχυσης ανήκουν τα κεραμομέταλλα (cermets), που αποτελούν σύνθεση κεραμικών με μέταλλα. Τα πιο κοινά είναι τα ενισχυμένα καρβίδια, όπου σωματίδια πυρίμαχου κεραμικού καρβίδιου (π.χ. καρβίδιο του βολφραμίου ή του τιτανίου), προστίθενται σε μεταλλική μήτρα (π.χ. κοβαλτίου ή νικελίου). Τα σύνθετα αυτά διαθέτουν εξαιρετικά υψηλή σκληρότητα και χρησιμοποιούνται σαν κοπτήρες κοπτικών εργαλείων για την κατεργασία ενισχυμένων και σκληρυμένων χαλύβων. Άλλη μια περίπτωση σωματιδιακής ενίσχυσης, αποτελεί η προσθήκη μικρών σφαιρικών κόκκων γραφίτη (διαμέτρου 0.02 με 0.05μm και ποσοστό συγκέντρωσης 15 με 30% κατ' όγκο) στο βουλκανισμένο καουτσούκ για την παραγωγή ελαστικών αυτοκινήτων.

Στην περίπτωση των ενισχυμένων με διασπορά σύνθετων υλικών, η διάμετρος των κόκκων είναι μικρότερη από 0,1μm και το κατ' όγκο ποσοστό τους κυμαίνεται μεταξύ 10 και 25%. Στα υλικά αυτής της κατηγορίας η μήτρα δέχεται όλη την εφαρμοζόμενη μηχανική τάση. Παράδειγμα σύνθετου υλικού αυτής της κατηγορίας, αποτελεί η διασπορά αλουμίνας (σωματίδια Al_2O_3) σε μήτρα αλουμινίου με πυροσυσσωμάτωση, με αποτέλεσμα την σημαντική αύξηση της μηχανικής αντοχής, ιδιαίτερα σε υψηλές θερμοκρασίες.

2.2.2 Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών

Τα ινώδη σύνθετα υλικά (Fiber Reinforced Plastics – FRP) διακρίνονται περαιτέρω ανάλογα με το μέγεθος, τον προσανατολισμό και τη διάταξη των

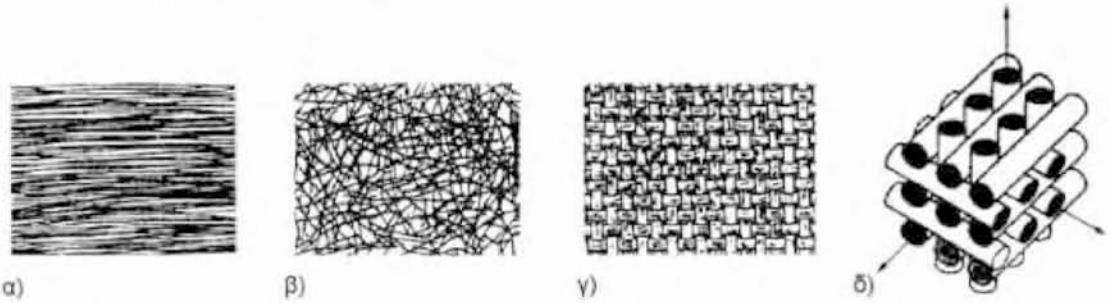
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ινών της ενισχυτικής φάσης μέσα στη μήτρα. Σύμφωνα με το μέγεθος των ινών διακρίνονται στα ακόλουθα [17]:

- Σύνθετα με συνεχείς ή μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όπου οι ίνες έχουν λόγο μήκους προς διάμετρο l / d ≥ 100.
- Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όπου οι ίνες έχουν λόγο μήκους προς διάμετρο l / d < 100.
- Τριχοειδείς ίνες ή νηματίδια ή τριχίτες (λεπτοί μονοκρύσταλλοι κεραμικού υλικού - whiskers), όπου οι ίνες έχουν διάμετρο d < 1μm και μήκος l ≅ 100μm.

Στα σύνθετα υλικά με ίνες μεγάλου μήκους, υπάρχει η δυνατότητα καθορισμού της κατεύθυνσης των ινών κατασκευάζοντας μονοδιευθυντικά σύνθετα, όπου οι ίνες έχουν όλες την ίδια διεύθυνση, ή πολυδιευθυντικά, όπου οι ίνες έχουν διαφορετικές διευθύνσεις. Επίσης, τα πολυδιευθυντικά διακρίνονται στις ακόλουθες υποομάδες (Σχήμα 2.2):

- Σύνθετα με ίνες τυχαίας διεύθυνσης.
- Σύνθετα με ίνες σε πλέξη ύφανσης.
- Σύνθετα με ίνες σε τρισορθογώνια ύφανση.



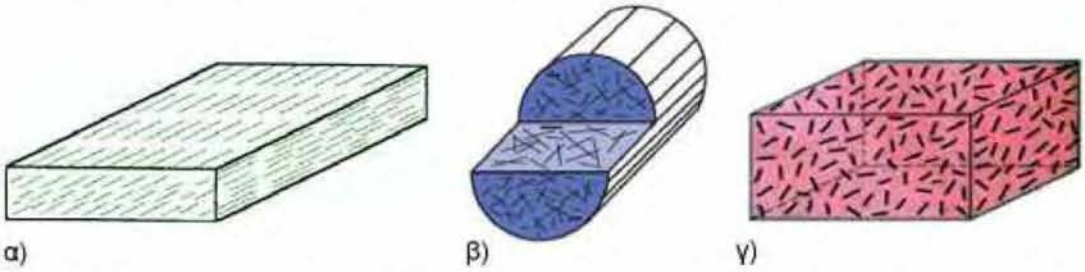
Σχήμα 2.2: Τύποι διάταξης συνεχών ινών: α) μονοδιευθυντικές ίνες (μονοαξονικό ύφασμα), β) ίνες άτακτων διευθύνσεων (πίλημα), γ) πλέξη ύφανσης (ύφασμα) και δ) ίνες σε τρισδιάστατη πλέξη (πεπλεγμένο ύφασμα). [17]

Σε σύνθετα υλικά όπου οι ίνες ενίσχυσης είναι προσανατολισμένες προς μία διεύθυνση, η μηχανική αντοχή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διεύθυνση επιβολής του φορτίου. Η υψηλότερη αντοχή επιτυγχάνεται όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι παράλληλη προς τον προσανατολισμό των ινών, ενώ η κατώτερη όταν είναι σε διεύθυνση κάθετη προς αυτές. Το συγκεκριμένο φαινόμενο ονομάζεται ανισοτροπία και τα υλικά που χαρακτηρίζονται από παρόμοιες ιδιότητες ανισότροπα. Τα πολυδιευθυντικά σύνθετα υλικά αντίθετα,

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

παρουσιάζουν κατά κάποιο τρόπο ισότροπη συμπεριφορά, καθώς διαθέτουν ίνες ενίσχυσης σε περισσότερες κατευθύνσεις με τη μορφή πλέξης.

Οι ασυνεχής ή κοντές ίνες, λόγω του μήκους τους δεν μπορούν να αποτελέσουν απόλυτα μονοδιευθυντική ενίσχυση ή να σχηματίσουν κάποια συγκεκριμένη πλέξη. Συνήθως συναντώνται σε τυχαίο προσανατολισμό και ενίοτε με κάποια προτιμώμενη ευθυγράμμιση (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: α) Ενίσχυση με κοντές ευθυγραμμισμένες ίνες β),γ) Ενίσχυση με κοντές ίνες σε τυχαίο προσανατολισμό. [**201**]

Σύνθετα υλικά με ασυνεχείς ευθυγραμμισμένες ίνες παρουσιάζουν μικρότερη ενίσχυση από αντίστοιχα με συνεχείς μονοδιευθυντικές, σε ποσοστά που πλησιάζουν ακόμα και το 50% αυτών. Παράγοντες που επηρεάζουν τις ιδιότητες των συγκεκριμένων υλικών είναι ο λόγος μήκους προς διάμετρο της ίνας, η αντοχή σε διάτμηση του δεσμού μεταξύ ίνας και μήτρας και το ποσοστό των ινών στο σύνθετο υλικό.

Στην περίπτωση σύνθετων υλικών με ασυνεχείς ίνες τυχαίου προσανατολισμού, η ενίσχυση είναι σημαντικά μικρότερη απ' ότι θα παρουσίαζαν αντίστοιχα μονοδιευθυντικά σε φορτία παράλληλα προς τις ίνες, αλλά η ενίσχυση αυτή διατίθεται προς κάθε κατεύθυνση ισόποσα (ισότροπη συμπεριφορά).

Η αποδοτικότητα της ενίσχυσης σε ένα σύνθετο υλικό, σε σχέση με τον προσανατολισμό των ενισχυτικών ινών (συνεχείς ή ασυνεχείς) και την κατεύθυνση της επιβαλλόμενης τάσης (παράλληλα ή κάθετα στον προσανατολισμό των ινών), παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 2.4: Αποδοτικότητα της ενίσχυσης σύνθετων υλικών με ινώδη ενίσχυση, σε σχέση με τον προσανατολισμό των ινών και την κατεύθυνση της επιβαλλομένης τάσης[1]. **[48]**

Προσανατολισμός Ινών	Κατεύθυνση Τάσεων	Αποδοτικότητα Ενίσχυσης
Όλες οι ίνες παράλληλες	Παράλληλη στις ίνες	1
	Κάθετη στις ίνες	0
Ίνες τυχαία και ομοιόμορφα κατανεμημένες σε ένα επίπεδο	Οποιαδήποτε κατεύθυνση στο επίπεδο των ινών	3/8
Ίνες τυχαία και ομοιόμορφα κατανεμημένες μέσα στον τρισδιάστατο χώρο	Οποιαδήποτε κατεύθυνση	1/5

Κατά την παραγωγή σύνθετων υλικών λαμβάνονται υπόψη ο τύπος και το μέγεθος των τάσεων που θα υποστεί το υλικό, καθώς και το κόστος παραγωγής του. Σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός ότι η παραγωγή σύνθετων υλικών ενισχυμένων με κοντές ίνες είτε ευθυγραμμισμένες, είτε τυχαία προσανατολισμένες είναι ταχεία και υπάρχει η δυνατότητα κατασκευής μεγάλης ποικιλίας σχημάτων. Επίσης, το κόστος παραγωγής των συγκεκριμένων σύνθετων υλικών, είναι πολύ χαμηλότερο από την περίπτωση που για την κατασκευή χρησιμοποιούνται συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες.

2.2.3 Δομικά σύνθετα υλικά

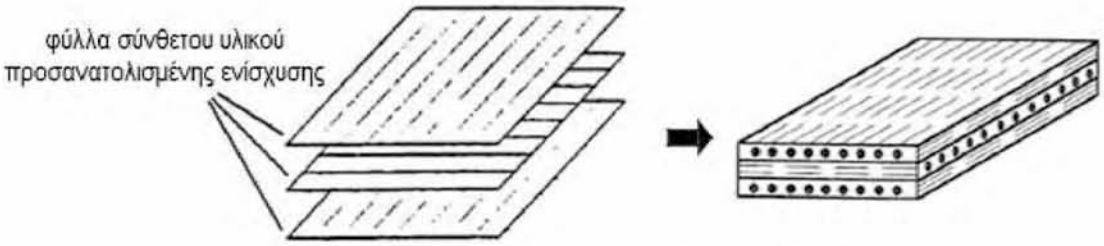
Τα δομικά ή στρωματικά σύνθετα υλικά, αποτελούνται από φύλλα ομοιογενών ή σύνθετων υλικών, τα οποία είναι τοποθετημένα κατάλληλα σε στρώσεις. Χωρίζονται κυρίως σε δύο κατηγορίες, τα πολύστρωτα και τα φύλλα τύπου σάντουιτς (Σχήμα 2.1).

Τα πολύστρωτα δομικά σύνθετα υλικά (laminated composites), κατασκευάζονται με τη διαδοχική εναπόθεση στρώσεων υλικού υπό την μορφή φύλλων και τη μετέπειτα συγκόλλησή τους, έτσι ώστε να προκύψει μια στιβαρή δομή. Η κάθε στρώση ενδέχεται να αποτελεί ένα ξεχωριστό σύνθετο υλικό, προσανατολισμένης συνήθως ενίσχυσης, με υψηλή αντοχή σε μια συγκεκριμένη διεύθυνση φόρτισης. Οι στρώσεις συνήθως τοποθετούνται με

[1] Με 1 ορίζεται ο μέγιστος βαθμός ενίσχυσης (μέγιστη αποδοτικότητα) για φόρτιση παράλληλα στις ίνες και με 0 ο ελάχιστος για κάθετη φόρτιση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

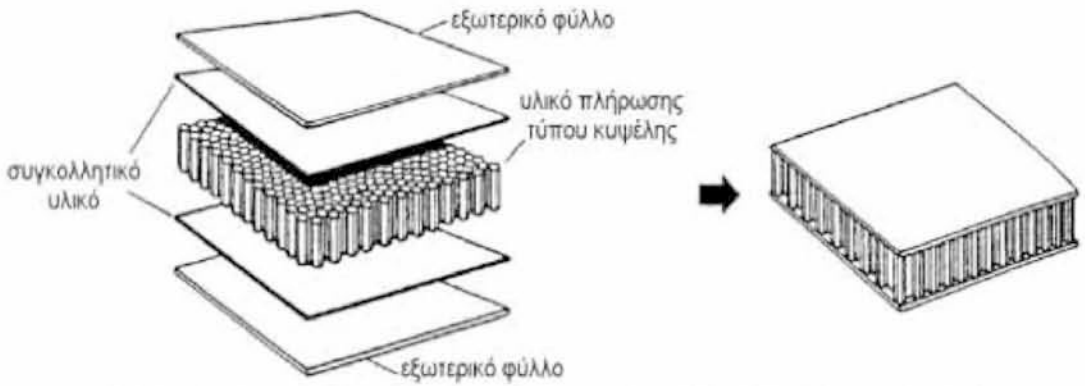
τέτοιο τρόπο, ώστε ο προσανατολισμός της ενίσχυσης να εναλλάσσεται, έτσι ώστε το τελικό προϊόν να διαθέτει ενισχυμένες μηχανικές ιδιότητες σε κάθε επιθυμητή διεύθυνση (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4: Πολύστρωτο σύνθετο με διαδοχικές στρώσεις φύλλων ενισχυμένων με προσανατολισμένες ίνες. [48]

Με τον όρο σύνθετα φύλλα τύπου σάντουιτς (sandwich panels), θεωρούμε υλικά που αποτελούνται από δύο ισχυρά εξωτερικά φύλλα ή πλευρές (skins *ή* faces), υψηλών συνήθως μηχανικών ιδιοτήτων, στις οποίες παρεμβάλλετε υλικό χαμηλών μηχανικών ιδιοτήτων και μικρότερης πυκνότητας, που καλείται υλικό πλήρωσης ή πυρήνας ή κορμός (filler material *ή* core material). Οι εξωτερικές στρώσεις που μπορεί να αποτελούνται από πλάκες ομογενών υλικών, όπως κράματα αλουμινίου, τιτάνιο, χάλυβα και ξύλο κατασκευών ή και σύνθετες δομές όπως ενισχυμένα πολυμερή, δέχονται το μεγαλύτερο τμήμα της εξωτερικής φόρτισης, προστατεύοντας παράλληλα τον πυρήνα. Ο πυρήνας αφενός διαχωρίζει τις πλευρές προσδίδοντας τον επιθυμητό όγκο σε συνδυασμό με χαμηλό βάρος, αφετέρου προσθέτει ακαμψία στις εγκάρσιες φορτίσεις και αυξάνει την διατμητική αντοχή του συνόλου. Το υλικό του πυρήνα μπορεί να είναι αφρώδες πολυμερές (συνήθως πολυουρεθάνη), ελαστικό, ξύλο (τύπου balsa), ύφασμα, αλλά και κάποιο πολύστρωτο σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας ή κάποιο ελαφρύ μέταλλο (π.χ. αλουμίνιο), το οποίο είναι διαμορφωμένο σε κυψελοειδή γεωμετρία. Η σύνδεση των εξωτερικών πλακών με τον πυρήνα γίνεται συνήθως με πολυμερική κόλλα (Σχήμα 2.5).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



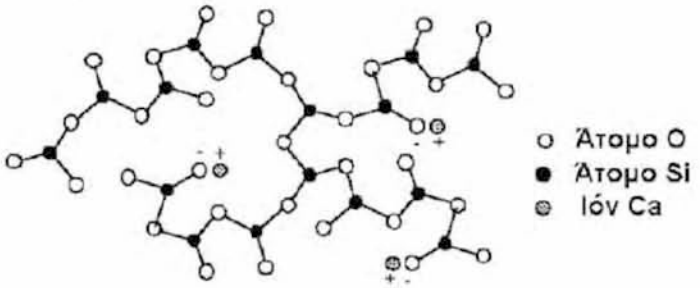
Σχήμα 2.5: Δομικό σύνθετο τύπου «σάντουιτς» με κυψελοειδή πυρήνα. [48]

Τα σύνθετα φύλλα τύπου «σάντουιτς» έχουν πολύ καλές ιδιότητες, όπως υψηλή δυσκαμψία και αντοχή, αντίσταση στη διάβρωση, στη φθορά, ακουστική ή θερμική μόνωση κ.α.. Χρησιμοποιούνται ευρέως ως δομικά υλικά κατασκευής κτιρίων (στρώση πατωμάτων και τοίχων), καθώς επίσης και σε τμήματα της εξωτερικής επιφάνειας αεροσκαφών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

2.3 Σύνθετα υλικά με ινώδη ενίσχυση υάλου

Τα πιο γνωστά σύγχρονα σύνθετα υλικά, είναι αυτά που αποτελούνται από πολυμερική μήτρα και ενισχυτικό συστατικό ινών γυαλιού. Οι ίνες γυαλιού χρησιμοποιήθηκαν στα σύνθετα πρώτης γενιάς (περίπου το 1940) και η χρήση τους συνεχίζεται με επιτυχία μέχρι σήμερα, διευρύνοντας συνεχώς τους τομείς εφαρμογής τους. Είναι από τους πλέον διαδεδομένους τύπους ενισχυτικών ινών στα σύνθετα πολυμερικής μήτρας και χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση σε υλικά ευρείας κατανάλωσης (π.χ. σε μήτρα πολυεστέρα - Fiberglass), αλλά και ως ενίσχυση σε προηγμένα υλικά βιομηχανικών κατασκευών υψηλής τεχνολογίας (π.χ. σε μήτρες πολυαμιδίου - Glass Fiber Reinforced Plastics «GFRP»), αντικαθιστώντας παραδοσιακά συμβατικά υλικά από την παραγωγή προϊόντων, ακόμα και μέταλλα. Η αντοχή και η δυσκαμψία του γυαλιού καθορίζεται από την τρισδιάστατη δομή και διάταξη των συστατικών οξειδίων του. Η δομική του βάση αποτελείται από οξείδια πυριτίου, ασβεστίου, βορίου, αλουμινίου κ.ά. και η χαρακτηριστική χημική του δομή παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα:



Σχήμα 2.6: Χημική δομή γυαλιού. [17]

Λόγω της συγκεκριμένης δομής, τα υαλονήματα είναι ισότροπα υλικά και παρουσιάζουν γραμμική ελαστική συμπεριφορά [48]. Ανάλογα με τη χημική τους σύσταση οι ίνες γυαλιού διαχωρίζονται σε διάφορους τύπους, οι κυριότεροι εκ των οποίων είναι οι E, C και S.

Τα τύπου E-glass (Electrical) υαλονήματα έχουν πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, υψηλή αντοχή και δυσκαμψία, καθώς και πολύ καλή συμπεριφορά σε μεταβολές των καιρικών συνθηκών με αποτέλεσμα να βρίσκουν ευρύτατη χρήση στην παραγωγή ηλεκτρονικών εξαρτημάτων. Μειονέκτημα τους αποτελεί η μέτρια αντοχή σε χημικά αντιδραστήρια.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τα τύπου C-glass (Corrosion) υαλονήματα παρουσιάζουν υψηλή αντίσταση στη χημική διάβρωση, και υψηλότερες μηχανικές ιδιότητες από τις ίνες τύπου E, με παράλληλη αύξηση όμως του κόστους τους.

Τέλος, τα S-glass (Stiffness) υαλονήματα είναι τα πλέον κοστοβόρα από τους τρεις τύπους και χαρακτηρίζονται από εξαιρετική δυσκαμψία και θερμική αντοχή. Σύνθετα υλικά με τη συγκεκριμένου τύπου ενίσχυση έχουν εφαρμογή κυρίως στην αεροπορική βιομηχανία.

Η αύξηση του ποσοστού οξειδίου του πυριτίου SiO_2 στη σύσταση των ινών υάλου, επιφέρει αύξηση στις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων τους και στη μέγιστη θερμοκρασία χρήσης του ενισχυμένου με αυτές σύνθετου. Σε ειδικές εφαρμογές που απαιτούνται υψηλές μηχανικές ιδιότητες και λειτουργία κάτω από υψηλή θερμοκρασία, χρησιμοποιούνται ακόμη και ίνες από 100% καθαρό οξείδιο πυριτίου (πυριτία). Η χημική σύσταση και οι βασικότερες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των κυριότερων τύπων ινών γυαλιού παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 2.5: Τα είδη των ινών υάλου και οι κυριότερες ιδιότητές τους. [17]

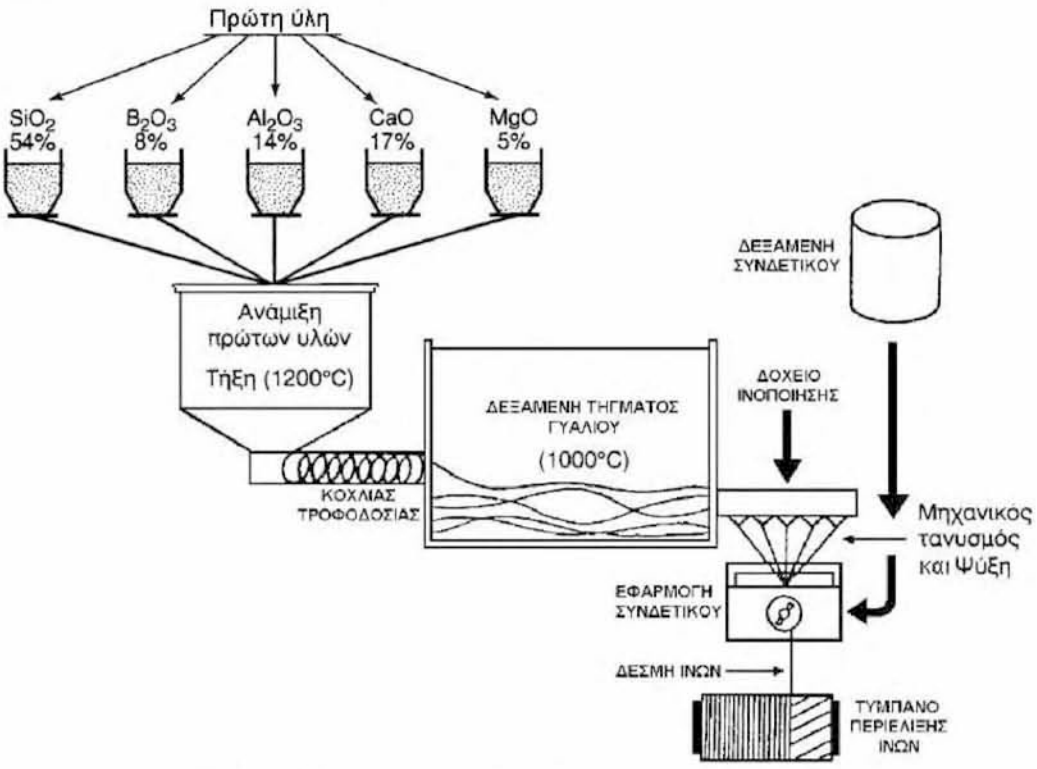
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ	ΤΥΠΟΣ			
	E	C	S	SiO_2 καθαρή
Χημική σύσταση (%)				
SiO_2	54	60	65	>99,5
Al_2O_3	16	25	25	-
B_2O_3	8	-	-	-
CaO	17	9	-	-
MgO	5	6	10	-
Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	75	80	84	72
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	2100-3400	2500-4400	2800-4800	3500-8800
Πυκνότητα (g/cm^3)	2,54	2,50	2,48	2,20
Θερμοκρασία τήξης (°C)	900-1200	1400-1600	1400-1600	1720
Μέγιστη θερμοκρασία χρήσης (°C)	550	650	650	750

Η παραγωγή των ινών ενίσχυσης υάλου, πραγματοποιείται με εκβολή τήγματος γυαλιού διαμέσου μήτρας με διάτρητο πυθμένα. Οι φάσεις που περιλαμβάνει η διαδικασία παραγωγής τους, είναι οι ακόλουθες (Σχήμα 2.7) [17]:

- Τήξη της πρώτης ύλης.
- Τροφοδοσία του τήγματος σε σειρά κυλινδρικών δοχείων με διάτρητο πυθμένα (διάμετρος οπών 1-2 mm).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

- Ροή του τηγμένου υάλου από τις οπές του πυθμένα.
- Μηχανική τάνυση των παραγόμενων ινών έως την απαιτούμενη διάμετρο (1÷15μm) και ελαφρά ψύξη με νερό.
- Εφαρμογή προστατευτικών επικαλύψεων ή συστατικών για την καλύτερη πρόσφυση ινών-μήτρας (προστατευτικό λιπαντικό συνδετικό υλικό - binder ή ειδικά κολλοειδή χημικά πρόσθετα - sizes).
- Περιέλιξη ινών ανά δέσμες σε περιστρεφόμενο τύμπανο (με υψηλή ταχύτητα, της τάξης των 50m/s).
- Ξήρανση των ρολών υαλονήματος.



Σχήμα 2.7: Παραγωγή ενισχυτικών ινών γυαλιού. [17]

Οι μηχανικές ιδιότητες ενός σύνθετου υλικού, αυξάνονται ανάλογα με την κατ' όγκο αναλογία των περιεχόμενων ινών. Στα ενισχυμένα σύνθετα υλικά με ίνες υάλου, η μέγιστη απόδοση συναρτήσει του κόστους, παρουσιάζεται όταν η κατά βάρος περιεκτικότητα των ινών είναι μεταξύ 20% και 40% (Πίνακας 2.6). Χαμηλότερη περιεκτικότητα δεν επιφέρει σημαντική βελτίωση στις ιδιότητες, ενώ υψηλότερη περιεκτικότητα μειώνει την αντοχή σε κρούση. Για ποσοστά υψηλότερα του 80%, παρουσιάζεται δυσκολία στην επεξεργασία του υλικού (αδυναμία ροής) ή ακόμα υπάρχει και η περίπτωση οι ίνες να μην μπορούν να καλυφθούν πλήρως από το υλικό της μήτρας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 2.6: Ενδεικτικές ιδιότητες πολυαμιδίου μη ενισχυμένου και ενισχυμένου με τυχαία προσανατολισμένες ίνες υάλου για διάφορες περιεκτικότητες του υλικού ενίσχυσης. **[10]**

Ιδιότητες PA66	Χωρίς ενίσχυση	Ινώδης ενίσχυση υάλου (% κ.ο.)		
		20	30	40
Πυκνότητα (kg/m^3)	1.19-1.22	1.35	1.43	1.52
Αντοχή σε εφελκυσμό (MPa)	59-62	110	131	159
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	2.24-2.345	5.93	8.62	11.6
Επιμήκυνση (%)	90-115	4-6	3-5	3-5
Αντοχή σε κρούση κατά Izod (lbf/in)	12-16	2.0	2.0	2.5

Το σύνθετο υλικό με μήτρα πολυαμίδιο και ενισχυτικό συστατικό ασυνεχείς ίνες υάλου τυχαίου προσανατολισμού σε ποσοστό αναλογίας 30% κ.ο. αποτελεί αντικείμενο έρευνας της διατριβής, καθώς και το υλικό των δοκιμίων στα πειράματα που ακολουθούν. Οι ιδιότητες του συγκεκριμένου σύνθετου υλικού αντιπαραβάλλονται με τις αντίστοιχες του πολυαμιδίου και διαφόρων μετάλλων στον Πίνακα 2.7. Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι ότι η μηχανική αντοχή του αγγίζει τις τιμές των ελαφρών μετάλλων.

Πίνακας 2.7: Σύγκριση βασικών ιδιοτήτων του ενισχυμένου σύνθετου PA66-GF30 με το πολυαμίδιο PA66 και διάφορα μέταλλα **[48][17][36][34][197][35][199][181][189][188][185][180]**.

ΥΛΙΚΟ / ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	PA66-GF30	PA66	AlMg1 (Al Alloy 5005)	AlCuMg2 (Al Alloy 2024)	AlZnMgCu1,5 (Al Alloy 7075)	St 13 (DIN 1623)	X5CrNi18-10 (AISI304)	High grade steel (DIN C60)
Αντοχή εφελκυσμού (MPa)	100-200	50-85	100-180	215-440	480-530	270-410	580-760	750-900
Μέτρο ελαστικότητας (GPa)	6-15	2-2,5	69	74	72	200	193-200	210
Παραμόρφωση θραύσης ή Ολκιμότητα (%)	3-5	90-115	4-24	13-55	4-20	28	55	14
Πυκνότητα (kg/m^3)	1,23-1,43	1,14-1.22	2,69	2,77	2,85	7,85	8	7,85
Θερμοκρασία Τήξης (°C)	260	255	620-660	500-640	480-640	1500-1540	1400-1450	1540
Σκληρότητα κατά Rockwell	M96	M88	Brinel 51 46HV	B75	B87	B71	B80	B240

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

2.4 Ιδιότητες και εφαρμογές των σύνθετων υλικών

Ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο υπερισχύουν τα ενισχυμένα σύνθετα υλικά έναντι των συμβατικών, είναι οι υψηλές ειδικές ιδιότητες (specific properties) που διαθέτουν. Ο όρος «ειδική ιδιότητα» αναφέρεται στο λόγο μιας μηχανικής ιδιότητας του υλικού προς την πυκνότητά του. Το γεγονός ότι τα σύνθετα υλικά (κυρίως πολυμερικής μήτρας) χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα χαμηλή πυκνότητα, σε συνδυασμό με την αύξηση των μηχανικών ιδιοτήτων λόγω της ενίσχυσης, συντελεί στο να βρίσκονται σε ιδιαίτερα πλεονεκτική θέση έναντι των συμβατικών υλικών. Στον πίνακα 2.8 παρουσιάζονται οι τιμές των κυριότερων ειδικών ιδιοτήτων μεταξύ σύνθετων υλικών διαφορετικών τύπων ενίσχυσης και διαφόρων μετάλλων.

Πίνακας 2.8: Ειδικές ιδιότητες σύνθετων και παραδοσιακών υλικών.[16][48][26][34][197][35]

Υλικό	Πυκνότητα ρ (kg/m^3)	Μέτρο ελαστικότητας E (GPa)	Αντοχή σε εφελκυσμό Ts (MPa)	Ειδικό μέτρο ελαστικότητας E/ρ	Ειδική αντοχή σε εφελκυσμό Ts/ρ
Κράμα Αλουμινίου υψηλής αντοχής Al-Zn-Mg	2,80	72,0	503	25,7	180
Βαμμένος χάλυβας	7,85	207	2000	26,4	255
Κράμα Ni	8,18	204	1200	24,9	147
PA66	1,14	2	70	1,8	61
PA66-GF30	1,29	8,9	186	7	144
CFE-UD60%					
-Φόρτιση παράλληλα	1,62	220	1400	135,0	864
-Φόρτιση Κάθετα	1,62	7	38	-	-
GFP-UD50%					
-Φόρτιση παράλληλα	1,93	38	750	19,7	389
-Φόρτιση Κάθετα	1,93	10	22	-	-
GFP-20%	1,55	8,5	110	5,5	71

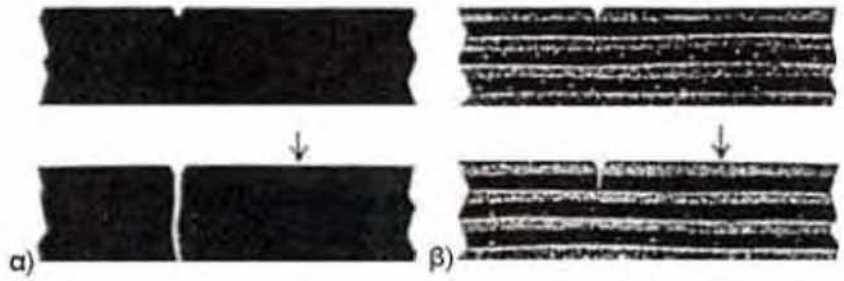
Όπου: PA66-GF30: *Πολυαμίδιο με ενίσχυση 30% κοντές ίνες γυαλιού τυχαίου προσανατολισμού*
CFE-UD60%: (carbon-fiber epoxy unidirectional*) Εποξειδική ρητίνη με ενίσχυση 60% συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες άνθρακα*
GFP-UD50%: (glass-fiber polyester unidirectional*) Πολυεστέρας με ενίσχυση 50% συνεχείς και ευθυγραμμισμένες ίνες γυαλιού*
GFP-20%: (glass-fiber polyester unidirectional*) Πολυεστέρας με ενίσχυση 20% κοντές ίνες γυαλιού τυχαίου προσανατολισμού.*

Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί η δυνατότητα ενίσχυσης συγκεκριμένων μόνο διευθύνσεων της κατασκευής, οι οποίες πρόκειται να παραλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος των εξωτερικών φορτίων ή που η

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ανάλυση τάσεων έχει δείξει ότι είναι οι πιο επικίνδυνες να αστοχήσουν. Η κατασκευαστική αυτή δυνατότητα αφενός αυξάνει σημαντικά τις μηχανικές ιδιότητες του σύνθετου προς την κατεύθυνση της ενίσχυσης και αφετέρου ελαττώνει την πυκνότητά του, καθώς μειώνεται στο ελάχιστο επιτρεπτό το ποσοστό της ενίσχυσης (σε σύνθετα με πολυμερική μήτρα η πυκνότητα του συστατικού ενίσχυσης είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη από του υλικού της μήτρας). Αποτέλεσμα αυτού είναι οι ειδικές ιδιότητες των συγκεκριμένων σύνθετων υλικών να διαφέρουν σημαντικά ως προς τις διάφορες κατευθύνσεις, ενώ είναι ιδιαίτερα αυξημένες ως προς την κατεύθυνση των ενισχυτικών ινών (Πίνακας 2.8).

Σημαντικό επίσης χαρακτηριστικό προνόμιο των σύνθετων υλικών, ιδιαίτερα στην περίπτωση της ινώδους ενίσχυσης, είναι η ικανότητα να αναλαμβάνουν φορτία ακόμη και μετά από αστοχία τους. Οι ίνες που σταδιακά αποκόπτονται, μεταβιβάζουν τις τάσεις σε πολλαπλές κατευθύνσεις μέσα στη μάζα του υλικού και κυρίως στις υπόλοιπες ίνες που δεν έχουν ακόμα αστοχήσει. Σχετικές έρευνες έχουν αποδείξει ότι σύνθετα υλικά με ίνες γυαλιού εξακολουθούν να φέρουν φορτία έως και το 85% της τάσης διαρροής τους μετά την αστοχία τους, γεγονός που σημαίνει ότι αποφεύγεται ο κίνδυνος της άμεσης κατάρρευσης [18]. Ακόμα, τα ινώδη σύνθετα υλικά εμφανίζουν περιορισμένη ευαισθησία στην ύπαρξη εγκοπών και στη διάδοση ρωγμών λόγω της δομής τους, με αποτέλεσμα να παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής έναντι των μετάλλων (Σχήμα 2.8).



Σχήμα 2.8: Διάδοση ρωγμής α)Ομοιογενές υλικό, β)Ενισχυμένο σύνθετο υλικό. **[18]**

Τέλος, η μικρή δυσκαμψία που παρουσιάζουν συνήθως τα σύνθετα υλικά (μικρό μέτρο ελαστικότητας) μπορεί να θεωρηθεί άλλοτε ως πλεονέκτημα, αν επιθυμείται από το υλικό να απορροφά μεγάλα ποσά

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ενέργειας χωρίς να αστοχεί και άλλοτε ως μειονέκτημα, αν ζητείται σε κάποια σημεία της κατασκευής μεγάλη δυσκαμψία.

Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα των σύνθετων υλικών και κυρίως των σύνθετων πολυεστερικής μήτρας είναι η έλλειψη ολκιμότητας, λόγω της μηχανικής συμπεριφοράς τους από την οποία απουσιάζει η πλαστική περιοχή. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει προειδοποίηση πριν η κατασκευή αστοχήσει. Επίσης, αρκετά σύνηθες είναι το φαινόμενο του ερπυσμού[1], ιδίως στα σύνθετα με ενίσχυση ινών γυαλιού, υπό συνθήκες συνεχούς φόρτισης σε υψηλή θερμοκρασία. Συνήθως, στα σύνθετα υλικά το υλικό της μήτρας είναι ευαίσθητο σε ερπυσμό, ενώ οι ίνες αντιστέκονται και συμβάλλουν στο να περιορίζεται η παραμόρφωση. Αποτέλεσμα είναι η τάση να μεταφέρεται προοδευτικά στις ίνες και όταν αυτές φθάσουν να φέρουν όλο το φορτίο, τότε ο ερπυσμός και κατ' επέκταση η παραμόρφωση διακόπτεται. Ο ερπυσμός σε σύνθετα υλικά με κοντές ίνες είναι πιο συνηθισμένος, καθώς ο καταμερισμός των μονοδιευθυντικών τάσεων στη μήτρα και στις ίνες εξαρτάται από το μήκος των ινών, αλλά και λόγω του ότι οι μακριές ίνες ανθίστανται πιο αποτελεσματικά στην παραμόρφωση της μήτρας. Τέλος, οι θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες υφίστανται πολύ λιγότερο ερπυσμό έναντι των θερμοπλαστικών πολυμερών, ιδίως σε υψηλές θερμοκρασίες, λόγω των φυσικών τους ιδιοτήτων.

Ένα σύνθετο υλικό δεν μπορεί να παρουσιάζει ταυτόχρονα όλες τις ιδιότητες στο βέλτιστο επίπεδο. Άλλωστε κάτι τέτοιο δεν είναι συνήθως το επιθυμητό. Εκείνο που έχει σημασία είναι η σωστή επιλογή των καταλληλότερων σύνθετων υλικών με βάση την συγκεκριμένη εφαρμογή τους. Αυτό σημαίνει ότι ένα σύνθετο υλικό που είναι κατάλληλο για την κατασκευή για παράδειγμα ενός φτερού αεροσκάφους μπορεί να είναι ακατάλληλο για άλλες εφαρμογές, όπως στην αυτοκινητοβιομηχανία. Διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των ενισχυμένων σύνθετων υλικών σχετικά με τα υλικά της μήτρας και της ενίσχυσης συνοψίζονται στον επόμενο πίνακα:

[1] Ερπυσμός είναι η μακροχρόνια (αργή) παραμόρφωση ενός υλικού, που υπόκειται σε σταθερή φόρτιση υπό υψηλή θερμοκρασία, συνήθως μεγαλύτερες του 0,4xTm (όπου Tm η θερμοκρασία τήξης του υλικού).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 2.9: Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σύνθετων υλικών. [18][17][16][48][26]

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλή πυκνότητα (σύνθετα πολυμερικής μήτρας και δομικά)	Μικρή μηχανική αντοχή (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)
Υψηλές ειδικές μηχανικές ιδιότητες (σύνθετα πολυμερικής μήτρας και δομικά)	Μικρή αντοχή σε τριβή (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)
Υψηλή αντοχή (σύνθετα κεραμικής και μεταλλικής μήτρας)	Χαμηλή θερμοκρασία τήξης (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)
Εξαιρετικά υψηλή σκληρότητα (σύνθετα κεραμικής και μεταλλικής μήτρας)	Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)
Υψηλή ακαμψία (σύνθετα κεραμικής και μεταλλικής μήτρας)	Ευπαθή σε φωτιά (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)
Υψηλή αντοχή σε τριβή (σύνθετα κεραμικής και μεταλλικής μήτρας)	Ευπαθή στην υπεριώδη ακτινοβολία του ήλιου (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)
Αντίσταση στην κόπωση (σύνθετα πολυμερικής μήτρας και δομικά)	Ευαισθησία σε ερπυσμό (κυρίως θερμοπλαστικά με κοντές ίνες ενίσχυσης)
Υψηλή αντοχή σε κρουστικά φορτία (σύνθετα πολυμερικής μήτρας και δομικά)	Έλλειψη ολκιμότητας (κεραμικά σύνθετα και ορισμένα θερμοσκληρυνόμενα)
Πολύ καλή ηλεκτρική μόνωση (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)	
Εξαιρετική αντοχή σε διάβρωση (σύνθετα πολυμερικής και κεραμικής μήτρας)	
Εξαιρετική χημική αντοχή (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)	
Δεν μαγνητίζονται (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)	
Ανθεκτικά σε υγρασία (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)	
Καλά χαρακτηριστικά απόσβεσης ήχων και κραδασμών/ταλαντώσεων (δομικά σύνθετα)	
Μηδενικός συντελεστής θερμικής διαστολής	
Πολύ χαμηλή θερμική αγωγιμότητα	
Υψηλή θερμική μόνωση (σύνθετα πολυμερικής μήτρας και δομικά)	
Υψηλή ελαστικότητα (σύνθετα ελαστομερής μήτρας)	
Χαμηλό κόστος (σύνθετα πολυμερικής μήτρας)	
Σχετικά εύκολη επισκευασιμότητα	
Μικρές απαιτήσεις συντήρησης	
Φθηνότερος μηχανολογικός εξοπλισμός για την παραγωγή τους	

Λόγω των ιδιοτήτων που προαναφέρθηκαν, τα ενισχυμένα σύνθετα υλικά χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές και σε κατασκευές υψηλής τεχνολογίας, κυρίως στην ναυπηγική και στην αυτοκινητοβιομηχανία, αλλά και στην αεροναυπηγική και αεροδιαστημική τεχνολογία. Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται ορισμένες τεχνολογικές εφαρμογές, στις οποίες τα παραδοσιακά συμβατικά υλικά αντικαθίστανται με επιτυχία από ενισχυμένα σύνθετα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 2.10: Παραδείγματα εφαρμογών σύνθετων υλικών με ενίσχυση ινών. **[18][17][16][48][26]**

ΜΗΤΡΑ		ΙΝΕΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Πολυμερική	Θερμοσκληρυνόμενα (Πολυεστερικές ρητίνες)	Άνθρακας, Γυαλί	*Ναυπηγική (κατάστρωμα, σκελετός, ιστία κ.α.), αεροναυπηγική, αυτοκινητοβιομηχανία (εξωτερικά τμήματα μικρού βάρους και υψηλής αντοχής σε διάβρωση)*
	Θερμοσκληρυνόμενα (Εποξειδικές ρητίνες, πολυιμίδια)	Αραμίδιο (Kevlar)	*Ναυπηγική, αεροναυπηγική (φτερά, άτρακτος, σύστημα προσγείωσης, πτερύγια ελικοπτέρων κ.α.), αυτοκινητοβιομηχανία (σασί, προφυλακτήρες και διάφορα εσωτερικά και εξωτερικά εξαρτήματα), αεροδιαστημική (ελαφρού βάρους εξαρτήματα υψηλής μηχανικής αντοχής και υψηλής αντοχής σε διάβρωση), στοιχεία μηχανών (οδοντωτοί τροχοί, τροχαλίες κ.α.), χημική βιομηχανία (σωλήνες, δοχεία πίεσης, δεξαμενές κ.α. υψηλής χημικής αντοχής), αθλητικός εξοπλισμός (ρακέτες τένις, μπαστούνια γκολφ, είδη τοξοβολίας, εξοπλισμός σκι, καλάμια ψαρέματος, κανό, κ.α.), ιατρικός εξοπλισμός (τμήματα τεχνητών μελών)*
	Θερμοπλαστικά (πολυαμίδια, πολυαιθυλένιο, πολυφαινυλένιο κ.α.)	Άνθρακας, Γυαλί S-glass	
	Θερμοπλαστικά (πολυαμίδια)	Γυαλί E-glass	*Ηλεκτρικά είδη (μονωτικά, στελέχη διακοπτών, κουτιά ηλεκτρικών πινάκων διανομής, κελύφη κατανεμητών κ.α.*
	Ελαστομερές	Μεταλλικές	*Ελαστικά οχημάτων*
Μεταλλική	Al	Borsic	*Πτερύγια στροβιλοκινητήρων αεροσκαφών, κεφαλές εμβόλων ΜΕΚ, έδρανα, τριβείς, πτερύγια βλημάτων, ιστο κεραιών τηλεσκοπίου Hubble, ηλεκτρικά είδη (υπεραγωγοί, νήματα για λυχνίες, ηλεκτρόδια κ.α.)*
		Al_2O_3	
		SiC	
		Άνθρακας	
	Κράματα Cu	SiC	*Υψηλής αντοχής προπέλες και πτερωτές*
	Κράματα Ti & W	SiC & B_4N	*Πτερύγια και δίσκοι στροβίλων*
Κεραμική	Άνθρακας	Γραφίτης	*Μέρη αεροσκαφών και διαστημοπλοίων υψηλών προδιαγραφών (θερμοκρασία λειτουργίας ως 3000°C), δισκόφρενα σε αγωνιστικά αυτοκίνητα, ακροφύσια ρουκετών, προστατευτικά καλύμματα από τη θερμοκρασία*
	Al_2O_3, SiC, ZrO_2, Si_3N_4, κεραμικά γυαλιά	Al_2O_3 & SiC	*Αγωγοί εναλλακτών θερμότητας, θερμομονωτικά υλικά, αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία, μηχανήματα συρματοποίησης, ιατρικός εξοπλισμός (διάφορα είδη προσθετικής)*

Πίνακας 2.11: Παραδείγματα εφαρμογών σύνθετων υλικών με ενίσχυση σωματιδίων.**[16][48][26]**

ΜΗΤΡΑ	ΕΝΙΣΧΥΣΗ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Ag	CdO	*Ηλεκτρικές επαφές υλικών*
Al	Al_2O_3	*Πυρηνικοί αντιδραστήρες*
Be	BeO	*Αεροπορικές και πυρηνικές εφαρμογές*
Co	ThO_2, Y_2O_3	*Μαγνητικό υλικό αντοχής σε ερπυσμό*
Co	WC	*Αντιτριβικές εφαρμογές, κοπτικά εργαλεία*
NiMo	TiC	
Ni-20%Cr	ThO_2	*Μέρη κινητήρων μηχανών*
Pb	PdO	*Πλέγματα μπαταριών*
Pt	ThO_2	*Νήματα, μέρη ηλεκτρικών συσκευών*
W	ThO_2, ZrO_2	*Νήματα, θερμαντικά σώματα*
Καουτσούκ	C	*Ελαστικά οχημάτων*
Πολυμερή	Si-C-H-O	*Σιλικόνες*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 2.12: Παραδείγματα εφαρμογών δομικών σύνθετων υλικών. [18][17][48]

ΠΛΕΥΡΕΣ	ΠΥΡΗΝΑΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ
Κράματα αλουμινίου, τιτάνιο, χάλυβας, ξύλο κατασκευών, ενισχυμένα σύνθετα υλικά	Πολυουρεθάνη, ελαστικό, ύφασμα ξύλο (τύπου balsa), σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας, ελαφρύ μέταλλο (π.χ. αλουμίνιο κυψελοειδής γεωμετρίας)	*Στρώση οροφών, πατωμάτων και τοίχων κτιρίων, τμήματα στην εξωτερική επιφάνεια αεροπλάνων, ύαλοι ασφαλείας, θερμομονωτικές πλάκες, φύλλα ηχομόνωσης, πτερύγια ανεμογεννήτριας αθλητικά είδη (π.χ. πέδιλα σκι, σανίδες θαλάσσιων σπορ κ.α.)*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 3: ΚΑΤΕΡΓΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΜΟΡΦΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΕΡΓΑΣΜΕΝΗΣ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή στις κατεργασίες

Κατεργασίες ονομάζονται οι διαδικασίες με τις οποίες ένα ακατέργαστο υλικό μετατρέπεται σε τελικό προϊόν συγκεκριμένης γεωμετρίας και ιδιοτήτων. Αξιοποιώντας τις φυσικοχημικές και θερμικές ιδιότητες των υλικών (π.χ. η πλαστική ή μόνιμη παραμόρφωση), προσδίδονται στο τελικό προϊόν τα απαιτούμενα βάσει σχεδιασμού και προδιαγραφών χαρακτηριστικά, όπως είναι η επιθυμητή μορφή και γεωμετρία, η ποιότητα επιφανείας, οι υψηλές μηχανικές αντοχές κτλ. Για την πραγματοποίηση των διαφόρων κατεργασιών χρησιμοποιούνται ποικίλες τεχνικές παραγωγής, καθώς και ένα ευρύ φάσμα μηχανημάτων, εξοπλισμού, εργαλείων και υλικών. Υπάρχει γενικότερα μια πληθώρα κατεργασιών, οι οποίες επιλέγονται κάθε φορά ανάλογα με τις απαιτούμενες ιδιότητες του τελικού προϊόντος, αλλά και με την ακολουθούμενη παραγωγική διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψη το κόστος παραγωγής, τον διαθέσιμο εξοπλισμό, την τεχνογνωσία κ.α. Συστηματική ταξινόμηση των διαφόρων τεχνικών μορφοποίησης πραγματοποιείται σύμφωνα με το Γερμανικό κανονισμό DIN8589 [77],[13].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

3.1.1 Κατεργασίες κοπής

Με τις κατεργασίες κοπής (ή αφαιρέσεως υλικού) προσδίδεται στο υλικό η επιθυμητή μορφή και γεωμετρία με αφαίρεση του περιττού υλικού υπό μορφή αποβλίττου, μέσω της επίδρασης του κοπτικού εργαλείου της εργαλειομηχανής. Ο σχηματισμός του αποβλίττου κατά την κοπή ποικίλλει κατά περίπτωση κατεργασίας και εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες κοπής, όπως το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου, οι συνθήκες κατεργασίας, η γεωμετρική μορφή και το υλικό του κοπτικού εργαλείου κ.α.. Τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά των κατεργασιών κοπής είναι οι κινήσεις του εργαλείου και του τεμαχίου, η γεωμετρία του εργαλείου και η διαστασιακή ακρίβεια που μπορούν να αποδώσουν. Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά διαφόρων κατεργασιών κοπής παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 3.1: Χαρακτηριστικά των κυριότερων κατεργασιών κοπής. **[22][179]**

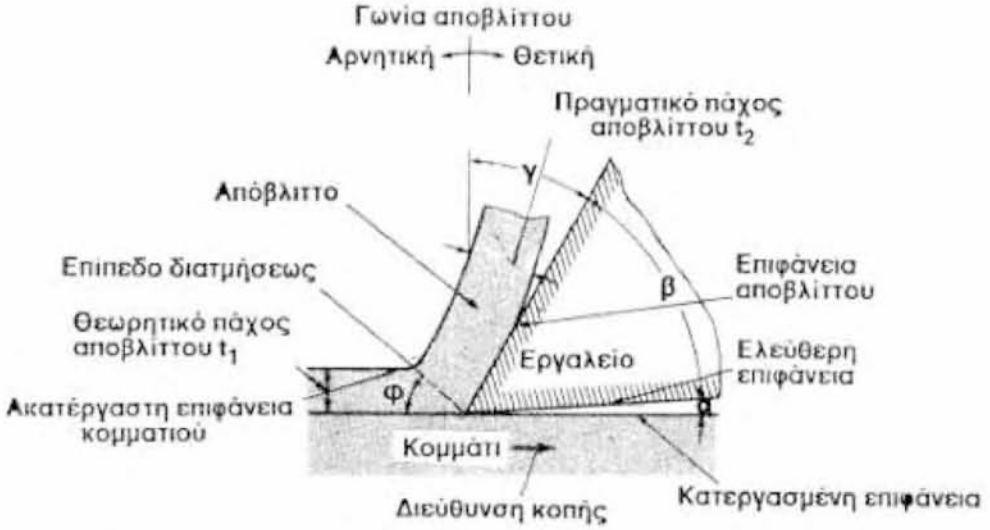
Κατεργασία		**Κίνηση εργαλείου**	**Κίνηση τεμαχίου**	**Γεωμετρία εργαλείου**	**Διαστασιακή ακρίβεια (ANSI B4.1)** [1]
Τόρνευση (Turning)		Μετατόπιση	Περιστροφή	Καθορισμένη	7-13
Φραιζάρισμα (Milling)		Περιστροφή	Μετατόπιση	Καθορισμένη	10-13
Διάτρηση (Drilling)		Περιστροφή και Μετατόπιση	-	Καθορισμένη	10-13
Πλάνισμα (Planning)		Μετατόπιση	Μετατόπιση	Καθορισμένη	10-13
Λείανση (Grinding)	Επιφανειακή	Περιστροφή	Μετατόπιση	Ακαθόριστη	4-8
	Κυλινδρική	Περιστροφή	Περιστροφή και Μετατόπιση	Ακαθόριστη	4-8

Οι βασικότερες κατεργασίες κοπής σύμφωνα με τις παραγωγικές τους δυνατότητες είναι κατά σειρά συχνότητας χρήσης η τόρνευση, το φραιζάρισμα και η διάτρηση. Στις συγκεκριμένες κατεργασίες το υλικό αφαιρείται προοδευτικά από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου τεμαχίου σε στρώσεις προκαθορισμένου βάθους (απόβλιττο ή γρέζι) μέσω πλαστικής παραμόρφωσης, με τη βοήθεια εργαλείου καθορισμένης γεωμετρικής μορφής σε σχήμα σφήνας. Η σφηνοειδής μορφή του εργαλείου σχηματίζεται από δυο επίπεδες επιφάνειες, την *επιφάνεια αποβλίττου* ή πρόσωπο ή μέτωπο του εργαλείου κατά μήκος της οποίας κινείται το απόβλιττο και την *ελευθέρα*

[1] Διαστασιακή ακρίβεια εκφρασμένη σε βαθμούς (grades) του προτύπου ANSI B4.1, που αναφέρεται στις μέγιστες επιτρεπόμενες ανοχές των διαστάσεων ως προς το μήκος μέτρησης αναφοράς. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για μήκος μέτρησης 250mm η μέγιστη ανοχή στο βαθμό 4 είναι 15μm, ενώ στο βαθμό 10 είναι 165μm.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

επιφάνεια του εργαλείου, η οποία βρίσκεται απέναντι από την νεοσχηματιζόμενη επιφάνεια του τεμαχίου (Σχήμα 3.9). Το πάχος του στρώματος υλικού που αφαιρείται με επενέργεια του κοπτικού εργαλείου είναι γνωστό ως θεωρητικό πάχος αποβλίττου t_1, ενώ το πάχος το οποίο αποκτά το απόβλιττο μετά την κοπή καλείται πραγματικό πάχος του αποβλίττου t_2.



Σχήμα 3.9: Εργαλείο κοπής σε σχήμα σφήνας και σχηματισμός του αποβλίττου κατά τις κατεργασίες κοπής (*α* η γωνία ελευθερίας, *β* η γωνία σφήνας, *γ* η γωνία αποβλίττου και *φ* η γωνία διατμήσεως). [**25**]

Η γωνία που βρίσκεται μεταξύ της ελεύθερης επιφάνειας του εργαλείου και της νεοσχηματιζόμενης επιφανείας ονομάζεται γωνία ελευθερίας *α* του εργαλείου και επηρεάζει τη φθορά του. Η γωνία που σχηματίζεται μεταξύ της επιφάνειας αποβλίττου και της ελεύθερης επιφάνειας του εργαλείου ονομάζεται γωνία σφήνας *β* του εργαλείου. Επίσης, η γωνία μεταξύ της επιφάνειας αποβλίττου και της καθέτου προς τη διεύθυνση κοπής ονομάζεται γωνία αποβλίττου *γ* και παίζει σημαντικό ρόλο στο σχηματισμό και τη ροή του αποβλίττου[1] [13],[25]. Από τη γεωμετρία του σχήματος είναι προφανές ότι οι γωνίες που χαρακτηρίζουν το κοπτικό εργαλείο συνδέονται με την ακόλουθη σχέση:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90°$$

[1] Όσο μεγαλύτερη (και θετική) είναι η γωνία αποβλίττου, τόσο μικρότερη πλαστική παραμόρφωση υπόκειται το υλικό στη ζώνη διατμήσεως, με βελτίωση παράλληλα της διαδικασίας σχηματισμού του αποβλίττου (μικρότερος δείκτης συμπιέσεως, μικρότερη ανηγμένη ενέργεια κοπής κ.α.)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

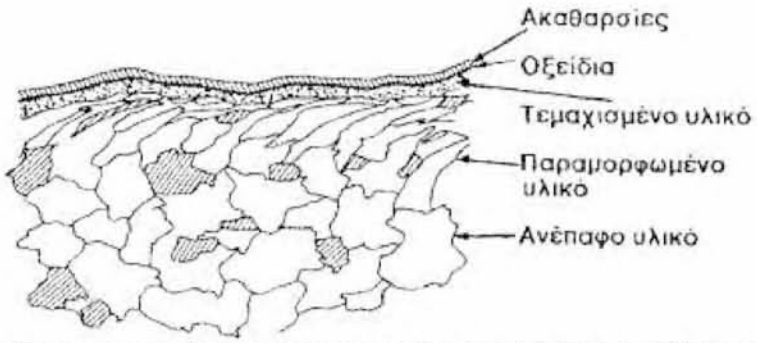
Η ενέργεια της κοπής καταναλώνεται στο μεγαλύτερο ποσοστό κατά τη διαδικασία σχηματισμού του αποβλίττου στη ζώνη διατμήσεως και κατά την κίνησή του (ζώνη τριβής). Η ζώνη διατμήσεως είναι η στενή περιοχή μεταξύ του απαραμόρφωτου υλικού του τεμαχίου και του σχηματιζόμενου αποβλίττου. Το πάχος της μικραίνει όσο αυξάνεται η ταχύτητα κοπής και συνήθως προσεγγίζεται με το επίπεδο διατμήσεως (Σχήμα 3.9). Ανάλογα με τον βαθμό παραμορφώσεως και την αντοχή σε διάτμηση του κατεργαζόμενου υλικού, το υλικό και τη μορφολογία του εργαλείου κοπής, τις συνθήκες κοπής κτλ, το παραγόμενο απόβλιττο μπορεί να είναι συνεχές, μερικά συνεχές ή ασυνεχές, λαμβάνοντας διάφορες μορφές κατά περίσταση [13],[25].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

3.2 Μορφολογία της κατεργασμένης επιφάνειας

3.2.1 Ποιότητα και τοπογραφία της επιφάνειας

Η μορφοποίηση ενός αντικειμένου λόγω των μηχανικών, θερμικών και χημικών επιδράσεων που αναπτύσσονται στο υλικό, προσδίδει στην κατεργασμένη επιφάνεια ορισμένες νέες ιδιότητες και χαρακτηριστικά, σημαντικά διαφορετικά από αυτές του υπολοίπου σώματος, που συνιστούν την ποιότητα επιφάνειας (surface integrity). Τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά δεν υπάρχουν στην ακατέργαστη επιφάνεια και είναι αποτέλεσμα της γεωμετρικής και κινηματικής αναπαραγωγής της ακίδας του εργαλείου, που ακολουθείται από ορισμένα φυσικά φαινόμενα, αλλά και από το περιβάλλον με το οποίο έρχεται σε επαφή η νεοκατεργασμένη επιφάνεια. Ο όρος ποιότητα επιφάνειας περιλαμβάνει τόσο τα φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά της (π.χ. σκληρότητα, παραμένουσες τάσεις, παραμόρφωση, χρωματισμός, οξείδωση κ.α.), όσο και τα γεωμετρικά. Τα διάφορα αυτά χαρακτηριστικά διακρίνονται σε μία κάθετη τομή της κατεργασμένης επιφάνειας ως επάλληλες κατά βάθος διαφορετικές στρώσεις, η ύπαρξη και ο συνδυασμός των οποίων προσδιορίζουν τελικά την εμφάνισή της και τη λειτουργική της συμπεριφορά (Σχήμα 3.10).



Σχήμα 3.10: Χαρακτηριστικά της νεοκατεργασμένης επιφάνειας σε κάθετη τομή της [**25**].

Οι ιδιότητες της νεοκατεργασμένης επιφάνειας (surface properties) καθορίζουν χαρακτηριστικά του τεμαχίου, όπως η συμπεριφορά του σε επαφή με άλλα σώματα (τριβή, φθορά, αντοχή σε οξείδωση ή/και διάβρωση), η εμφάνιση και τα γεωμετρικά στοιχεία του και η συναρμογή και λειτουργικότητά του, στα πλαίσια ενός ευρύτερα συναρμολογημένου συγκροτήματος. Σε μια κατεργασμένη με κοπή επιφάνεια, βασική συνιστώσα της ποιότητας επιφανείας αποτελεί το σύνολο των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της, που συνιστούν την επιφανειακή τοπογραφία της.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

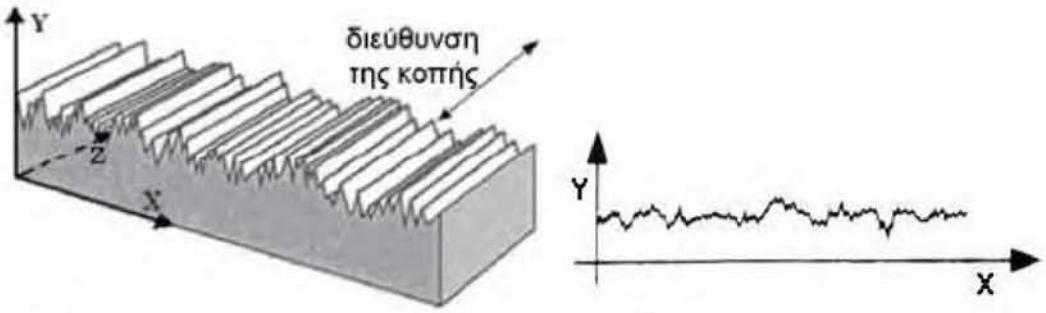
3.2.2 Αποκλίσεις από την επιπεδότητα και επιφανειακή τραχύτητα

Η μικροσκοπική παρατήρηση της τομής μιας τεχνολογικής επιφάνειας αποδεικνύει στην πραγματικότητα ότι η επιφάνεια αυτή δεν είναι απόλυτα λεία, αλλά παρουσιάζει μια συνεχή εναλλαγή εξάρσεων και βυθίσεων (κορυφών και κοιλάδων), που τα χαρακτηριστικά τους προσδιορίζονται από τη μέθοδο κατεργασίας της επιφάνειας (τόρνευση, φραιζάρισμα, διάτρηση, λείανση κλπ.) και από διάφορες άλλες παραμέτρους της κατεργασίας (υγρά κοπής, συνθήκες κοπής κ.α.). Οι γεωμετρικές αυτές ανωμαλίες της επιφάνειας αποτελούν την τοπογραφία της.

Η πλήρης ανάλυση των γεωμετρικών ανωμαλιών πρέπει να γίνεται και στις τρεις διευθύνσεις, αφού θεωρητικά το ύψος Y πάνω από τη λεία επιφάνεια θα δίνεται από μια συνάρτηση της μορφής:

$$Y = Y(x,z)$$

Όμως, επειδή οι κυριότερες μηχανουργικές κατεργασίες λειτουργούν με αφαίρεση υλικού προς συγκεκριμένη διεύθυνση, προκύπτει επιφάνεια με προσανατολισμένα χαρακτηριστικά. Δηλαδή μέγιστες ανωμαλίες στην κάθετη προς τον άξονα κατεργασίας διεύθυνση και ελάχιστες ανωμαλίες στην αντίστοιχη προς τον άξονα κατεργασίας (Σχήμα 3.11).



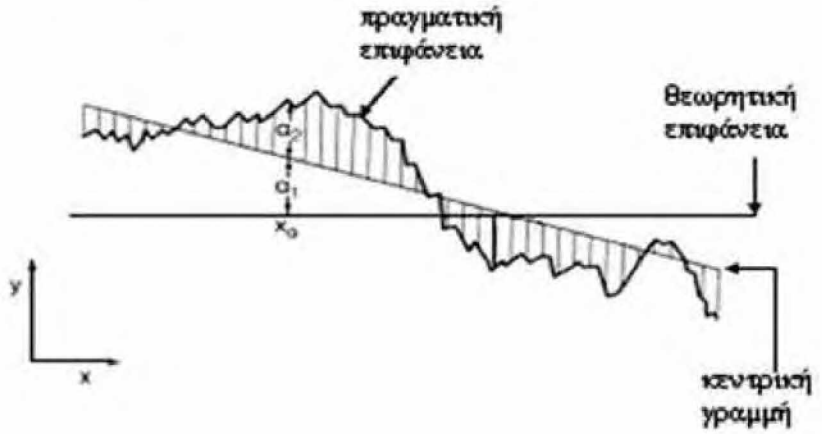
Σχήμα 3.11: Μικροσκοπική παρατήρηση της τομής μιας κατεργασμένης επιφάνειας α)Τρισδιάστατη απεικόνιση, β) Δισδιάστατη απεικόνιση **[23]**.

Στις περιπτώσεις αυτές αρκεί η δισδιάστατη απεικόνιση της επιφάνειας και επομένως αρκεί μια συνάρτηση της μορφής:

$$Y = Y(x)$$

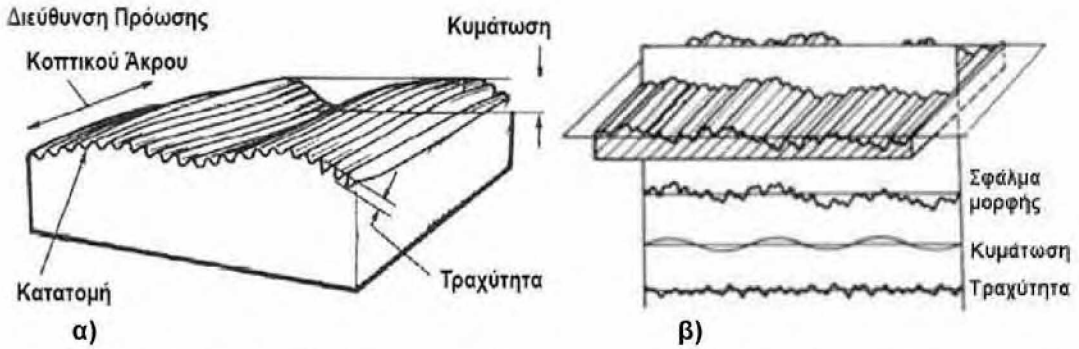
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Η ανάλυση της επιφανειακής τοπογραφίας γίνεται δισδιάστατα για λόγους απλούστευσης, ακόμα και όταν δεν συντρέχουν οι παραπάνω συνθήκες, επιλέγοντας τον άξονα *X* κατά τέτοιο τρόπο, ώστε να καταδεικνύονται οι μέγιστες ανωμαλίες. Η τομή ενός κατεργασμένου τεμαχίου κοντά στην επιφάνεια από ένα κάθετο γεωμετρικό επίπεδο, παρουσιάζει τη μορφή της ακόλουθης εικόνας:



Σχήμα 3.12: Απόκλιση θεωρητικής και πραγματικής επιφάνειας (δισδιάστατη απεικόνιση)[1].**[5]**

Σε τυχαία θέση x_α η απόκλιση της πραγματικής από τη θεωρητική επιφάνεια διαφέρει από την επιθυμητή διάσταση κατά $\alpha_1+\alpha_2$. Το α_1 ονομάζεται σφάλμα μορφής και μπορεί να προέκυψε από κακή ρύθμιση του συστήματος εργαλειομηχανής-τεμαχίου ή αδυναμία της κατεργασίας, ενώ το α_2 είναι το σφάλμα, που οφείλεται στις ανωμαλίες της επιφάνειας, όπως η κυμάτωση και η τραχύτητα (Σχήμα 3.12).



Σχήμα 3.13: Γεωμετρικές αποκλίσεις κατεργασμένης επιφάνειας. α)Μορφή πραγματικής επιφάνειας, β)Ανάλυση αποκλίσεων από την επιπεδότητα [**23**][**37**][**11**].

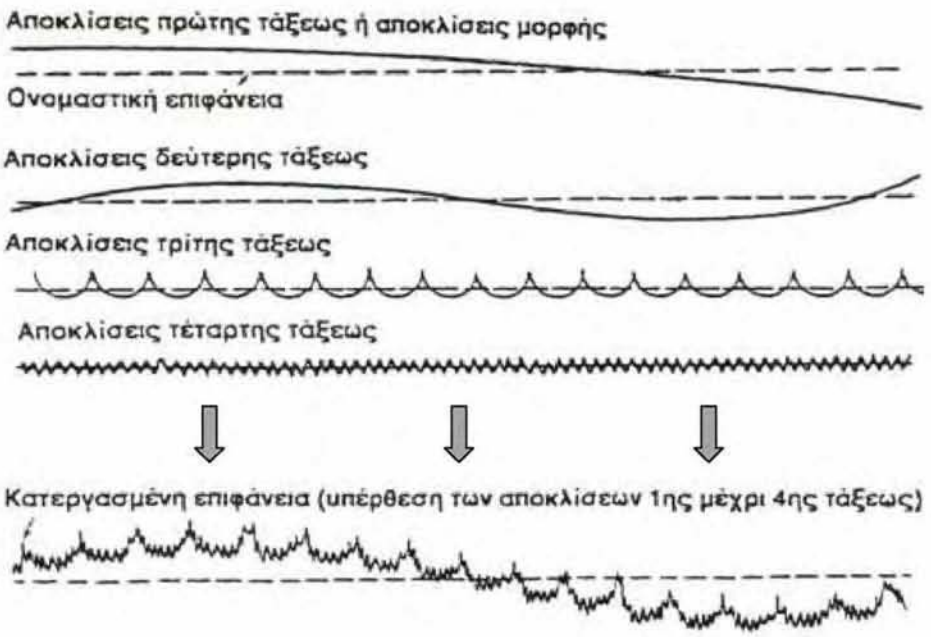
[1] Κεντρική γραμμή είναι η παράλληλη γραμμή προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας, που χωρίζει σε ίσα μέρη τα σχηματιζόμενα εμβαδά μεταξύ αυτής και του περιγράμματος πάνω και κάτω από αυτή, για προκαθορισμένο μήκος μέτρησης που ονομάζεται μήκος δειγματοληψίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Αναλυτικότερα οι γεωμετρικές αποκλίσεις χωρίζονται στις ακόλουθες κατηγορίες (Σχήμα 3.13 και Σχήμα 3.14) [25][11]:

- *Αποκλίσεις πρώτης τάξης*: Είναι μακρογεωμετρικές αποκλίσεις από την ονομαστική επιφάνεια (τάξη μεγέθους μερικών χιλιοστών [mm]), όπως για παράδειγμα αποκλίσεις από την επιπεδότητα, παραλληλότητα, καθετότητα, κυλινδρικότητα κ.τ.λ. Ονομάζονται επίσης αποκλίσεις μορφής και οφείλονται σε σφάλματα στους ολισθητήρες της εργαλειομηχανής, σε σοβαρές παραμορφώσεις της εργαλειομηχανής, του εργαλείου ή του τεμαχίου, σε κακή στήριξη τους κ.α.
- *Αποκλίσεις δεύτερης τάξης*: Αναφέρονται σε ανωμαλίες μεγάλου μήκους κύματος (τάξη μεγέθους χιλιοστού [mm]) με μεγάλη σχετικά περίοδο που μπορεί να αποδοθεί σε εκκεντρότητα του κομματιού ή του εργαλείου, σε ταλαντώσεις κ.α. και χαρακτηρίζονται ως κυμάτωση της επιφάνειας (Waviness).
- *Αποκλίσεις τρίτης τάξης*: Είναι ανωμαλίες της επιφάνειας μεσαίου μήκους κύματος (τάξη μεγέθους μικρού [μm]), συνήθως υπό μορφή αυλακώσεων που οφείλονται στη μορφή των εργαλείων και στην κινηματική των κατεργασιών και χαρακτηρίζονται ως τραχύτητα της επιφάνειας (Roughness).
- *Αποκλίσεις τέταρτης τάξης*: Είναι μικρογεωμετρικές ανωμαλίες της επιφάνειας μικρού μήκους κύματος (τάξη μεγέθους νανομέτρου [nm]), που προκύπτουν από ατέλειες στην τρόχιση του εργαλείου, στη φθορά του, στη δημιουργία ψευδόκοψης κ.α. και χαρακτηρίζονται ως μικροτραχύτητα (microroughness).
- *Αποκλίσεις πέμπτης και ανώτερης τάξης*: Είναι ανωμαλίες της επιφάνειας επίσης μικρογεωμετρικής μορφής (μικροτραχύτητα), που αποδίδονται σε φυσικές και χημικές επιδράσεις στην δομή του υλικού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 3.14: Κατηγορίες αποκλίσεων μιας κατεργασμένης επιφάνειας από την ονομαστική επιφάνεια **[25][73]**.

Οι αποκλίσεις πρώτης και δεύτερης τάξης αποτελούν τα μακρογεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας, ενώ οι αποκλίσεις τρίτης και ανώτερης τάξης αναφέρονται στη μικρομορφή της επιφάνειας και συνιστούν ότι ονομάζεται «τραχύτητα επιφάνειας» (surface roughness)[1].

Επιπλέον, η πραγματική τραχύτητα των ποικίλων κατεργασμένων με αφαίρεση υλικού επιφανειών, όπως αυτές εμφανίζονται στην πράξη, αποτελεί υπέρθεση δύο ανεξάρτητων μεταξύ τους συνιστωσών τραχύτητας:

- Της θεωρητικής τραχύτητας, που εξαρτάται από την κινηματική της κατεργασίας και από τη γεωμετρική μορφή του κοπτικού μέρους του εργαλείου και
- της φυσικής τραχύτητας, η οποία περιλαμβάνει ανωμαλίες της κατεργασμένης επιφάνειας, που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της κοπής και οφείλονται κυρίως στην ψευδόκοψη, στο μηχανισμό σχηματισμού του αποβλίττου, στη φθορά του εργαλείου, σε τυχόν ταλαντώσεις, σε επιδράσεις της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας, στα χρησιμοποιούμενα υγρά κοπής κ.α.

[1] Κατά DIN 4760 (1982).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στον ακόλουθο πίνακα συνοψίζονται οι γεωμετρικές αποκλίσεις της κατατομής μιας κατεργασμένης επιφάνειας και οι πιθανές αιτίες εμφάνισής τους.

Πίνακας 3.2: Κατάταξη επιφανειακών αποκλίσεων κατεργασμένης επιφάνειας [**73**][**25**][**5**][**8**].

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

3.2.3 Παράμετροι τραχύτητας

Η τραχύτητα αποτελεί καθοριστικό στοιχείο εκτίμησης της ποιότητας της επιφάνειας. Ωστόσο, θα πρέπει να σημειωθεί ότι η «τιμή» της είναι ένα στοχαστικό μέγεθος, καθώς δεν μετράται αλλά χαρακτηρίζεται. Ποιοτικά η τραχύτητα μιας μηχανολογικής επιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ότι εκδηλώνεται με τη μορφή κορυφών και κοιλάδων. Τα χαρακτηριστικά που εξετάζονται είναι το εύρος των κορυφών και των κοιλάδων, η μεταξύ τους απόσταση, καθώς και η μορφολογία τους. Στην πράξη υπολογίζονται συμβατικά μεγέθη με μετρήσεις που γίνονται σε ένα συγκεκριμένο μήκος της επιφάνειας και λαμβάνονται υπόψη οι μέσες τιμές. Γενικότερα, η μέτρηση ή η εκτίμηση των χαρακτηριστικών της τοπογραφίας μιας επιφάνειας, παρουσιάζει σημαντικές μετρολογικές ιδιομορφίες. Για το σκοπό αυτό έχουν

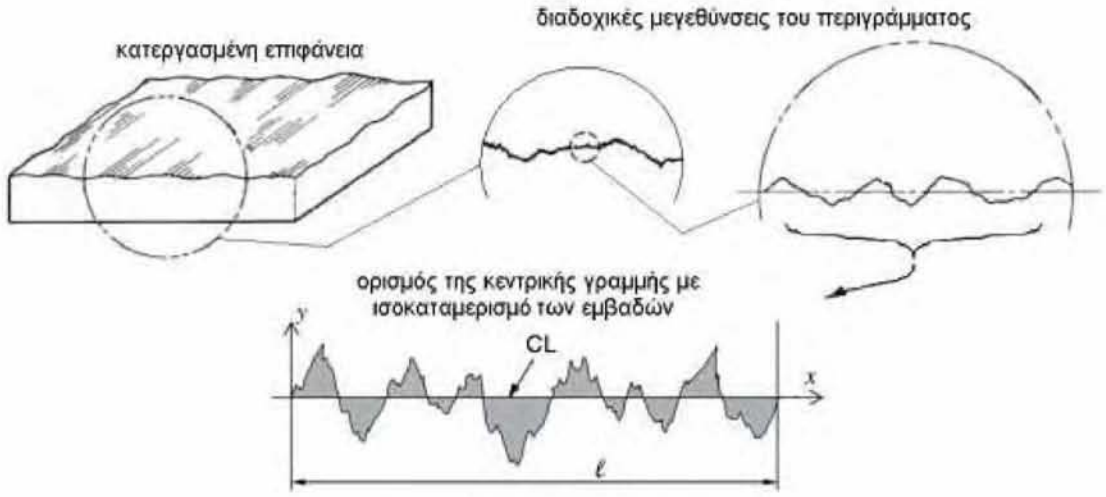
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

αναπτυχθεί δύο μετρολογικά συστήματα, ως προς τα οποία ορίζονται και τα μέτρα της τραχύτητας, με διάφορα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα το καθένα:

α) Το σύστημα Ε ή σύστημα περιβάλλουσας (Envelope system), που χρησιμοποιείται κυρίως στη Δυτική Ευρώπη.

β) Το σύστημα Μ ή σύστημα κεντρικής γραμμής (Mean line system), που χρησιμοποιείται κυρίως στις Αγγλοσαξονικές χώρες και την Ανατολική Ευρώπη.

Στην παρούσα διατριβή εξετάζεται το σύστημα της κεντρικής γραμμής Μ, καθώς βάσει αυτού του μετρολογικού συστήματος λειτουργούν τα τραχύμετρα με τα οποία πραγματοποιήθηκαν οι πειραματικές μετρήσεις (κεφ.6.6). Στο συγκεκριμένο μετρολογικό σύστημα και στα αντίστοιχα μετρητικά όργανα για την εκτίμηση της τραχύτητας ορίζεται μια γραμμή αναφοράς, η «κεντρική γραμμή» ή «μέση γραμμή» (Center Line - CL). Κεντρική γραμμή είναι η παράλληλη γραμμή προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας, τέτοια ώστε τα σχηματιζόμενα εμβαδά μεταξύ αυτής και του πραγματικού περιγράμματος, προς τα πάνω και προς τα κάτω, να είναι ίσα για προκαθορισμένο μήκος μέτρησης, που ονομάζεται μήκος δειγματοληψίας (evaluation length ή sample length, ℓ) (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Κεντρική γραμμή (CL) μιας κατατομής, στο δειγματοληπτικό μήκος ℓ. **[11]**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κατά καιρούς έχουν προταθεί διάφορα μέτρα τραχύτητας με ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Τα μέτρα αυτά ονομάζονται παράμετροι της τραχύτητας και κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, με κριτήριο τα χαρακτηριστικά του περιγράμματος που ποσοτικοποιούν:

- Παράμετροι ύψους (amplitude parameters),
- Παράμετροι μήκους (spacing parameters) και
- Υβριδικές παράμετροι (hybrid parameters).

Οι παράμετροι ύψους αποτελούν τη σημαντικότερη κατηγορία παραμέτρων χαρακτηρισμού της τοπογραφίας μιας επιφάνειας, καθώς χρησιμοποιούνται ευρέως στην εκτίμηση της ποιότητας των μηχανουργικών αντικειμένων. Περιγράφουν τις κάθετες αποκλίσεις της κατατομής, δηλαδή τις αποστάσεις μεταξύ των κορυφών και των κοιλάδων, χωρίς να λογίζεται η μεταξύ τους απόσταση.

Οι παράμετροι μήκους συντελούν στην καταμέτρηση των οριζόντιων αποκλίσεων των ανωμαλιών της επιφάνειας. Η εκτίμηση των παραμέτρων μήκους είναι απαραίτητη σε συγκεκριμένες κατασκευές, όπου πρέπει να επιτυγχάνεται καλύτερο φινίρισμα με πιο ομοιόμορφες επιφάνειες.

Οι υβριδικές παράμετροι αποτελούν συνδυασμό των παραμέτρων ύψους και μήκους, με αποτέλεσμα να επηρεάζονται από κάθε αλλαγή που συμβαίνει σε αυτές. Περιγράφουν την κλίση που έχει μια επιφάνεια, την καμπύλωσή της και την περιοχή που μπορεί να αλληλεπιδράσει με άλλα σώματα, χαρακτηριστικά που αποτελούν ερευνητικό αντικείμενο της τριβολογίας. Αν και δεν θα απασχολήσουν στη συνέχεια της διατριβής οι υβριδικές παράμετροι, ενδεικτικά αναφέρεται ότι οι σημαντικότερες είναι:

- Η κλίση του προφίλ ως προς την κεντρική γραμμή, (γ)
- Η μέση κλίση του προφίλ, (Δ_a)
- Η RMS κλίση του προφίλ, (Δ_q)
- Το σχετικό μήκος προφίλ, (l_o)

Ξεχωριστή επίσης κατηγορία παραμέτρων μπορεί να λογιστεί ότι αποτελούν οι «στατιστικές παράμετροι», αν και μπορούν να ενταχθούν στην κατηγορία των παραμέτρων ύψους. Οι στατιστικές παράμετροι αναφέρονται σε στατιστικά μεγέθη και μπορούν να χωριστούν στις εξής κατηγορίες:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

- Ροπή 1ης τάξης, όπου ανήκει η μέση τιμή (μ)
- Ροπή 2ης τάξης, όπου ανήκει η μεταβλητότητα (σ^2)
- Ροπή 3ης τάξης, όπου ανήκει η λοξότητα (R_{sk})
- Ροπή 4ης τάξης, όπου ανήκει η κυρτότητα (R_{ku})

Ενδεχόμενη απόπειρα παρουσίασης και μελέτης του συνόλου των παραμέτρων τραχύτητας στις εφαρμογές που ακολουθούν, θα ήταν ανέφικτη, καθώς έχουν προταθεί περισσότερες από εκατό, οι οποίες περιγράφουν διάφορα χαρακτηριστικά της επιφανειακής τοπογραφίας. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένες από τις σημαντικότερες, οι οποίες αφενός είναι από τις πλέον διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται διεθνώς, αφετέρου είναι αυτές που εξετάζονται στις εφαρμογές που ακολουθούν. Όλες οι παράμετροι που παρουσιάζονται αναφέρονται στην τραχύτητα και για το λόγο αυτό στον ορισμό τους χρησιμοποιείται το γράμμα R (Roughness). Κατά πλήρη αντιστοιχία ορίζονται και οι παράμετροι της κυμάτωσης, οι οποίες χρησιμοποιούν το γράμμα W (Waviness), αλλά και οι παράμετροι του αφιλτράριστου περιγράμματος (δηλαδή συνδυασμός τραχύτητας και κυμάτωσης), που ξεκινούν με το γράμμα P (Profile).

3.2.3.1 Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a [μm]

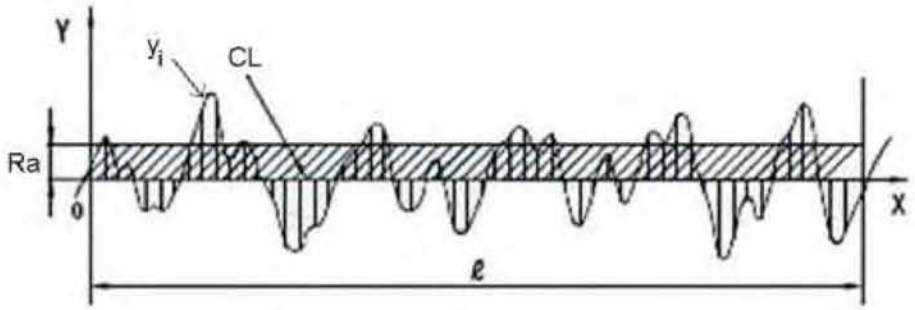
Η μέση αριθμητική τραχύτητα ή τραχύτητα κεντρικής γραμμής ορίζεται από την σχέση:

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l |y(x)|dx \text{ [μm]} \qquad (3.1)$$

Παριστάνει τη μέση τιμή των αποκλίσεων |y| όλων των σημείων της πραγματικής κατατομής από την κεντρική γραμμή CL μέσα στο δεδομένο δειγματοληπτικό μήκος l (Σχήμα 3.16). Πρόκειται για την πλέον διαδεδομένη παράμετρο ποσοτικού χαρακτηρισμού της τραχύτητας δεδομένης επιφάνειας, καθώς ορίζεται και υπολογίζεται εύκολα με άμεση ολοκλήρωση από τα τραχύμετρα. Η γνώση της παρέχει μια χρήσιμη μέση τιμή, τόσο για τον έλεγχο της συναφούς κατεργασίας παραγωγής της επιφάνειας, όσο και για τη λειτουργική της συμπεριφορά. Μειονέκτημα της αποτελεί η αδυναμία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

απόδοσης πληροφοριών για το πραγματικό ύψος των ανωμαλιών και η απουσία ιδιαίτερης φυσικής έννοιας.



Σχήμα 3.16: Ορισμός της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a. [**193**]

3.2.3.2 Μέγιστο ύψος από την κεντρική γραμμή R_p [μm]

Καλείται και μέγιστο ύψος κορυφής και αποτελεί το μέγιστο ύψος του περιγράμματος από την κεντρική γραμμή εντός του δειγματοληπτικού μήκους (Σχήμα 3.17).

3.2.3.3 Μέγιστο βάθος από την κεντρική γραμμή R_v [μm]

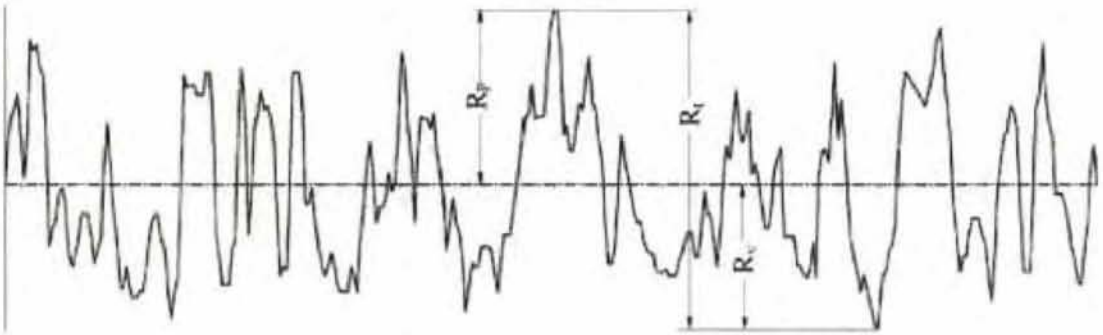
Είναι το μέγιστο βάθος του περιγράμματος από την κεντρική γραμμή εντός του δειγματοληπτικού μήκους (Σχήμα 3.17).

3.2.3.4 Μέγιστο ύψος R_t ή R_{max} [μm]

Καλείται και μέγιστη υψομετρική διαφορά του προφίλ ή μέγιστη τραχύτητα και είναι η υψομετρική διαφορά της υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών από τη βαθύτερη κοιλάδα, εντός του δειγματοληπτικού μήκους (Σχήμα 3.17). Είναι προφανές ότι ισχύει η σχέση:

$$R_t = R_p + R_v \qquad [\mu m] \qquad (3.2)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 3.17: Ορισμός των παραμέτρων R_p, R_v και R_t. **[25][8]**

Το μέγεθος R_t μετράται πολύ εύκολα, έχει όμως το μειονέκτημα ότι παρουσιάζει ευαισθησία σε τυχαίες τοπικές ανωμαλίες (π.χ. αμυχή στην επιφάνεια), που βρίσκονται συμπτωματικά μέσα στο μήκος δειγματοληψίας και δεν χαρακτηρίζουν στην πραγματικότητα την επιφάνεια.

3.2.3.5 Το ύψος δέκα σημείων R_z [μm]

Το ύψος δέκα σημείων είναι η μέση διαφορά ύψους μεταξύ των πέντε υψηλότερων κορυφών και των πέντε χαμηλότερων κοιλάδων του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας μέσα στο δεδομένο δειγματοληπτικό μήκος ℓ. Στην ουσία, αποτελεί τον αριθμητικό μέσο των πέντε μεγαλύτερων υψομετρικών διαφορών R_{ti} (*για* i=5) του μήκους δειγματοληψίας και ορίζεται με τη σχέση:

$$R_z = \sum_{i=1}^{i=5} Rt_i \qquad [\mu m] \qquad (3.3)$$

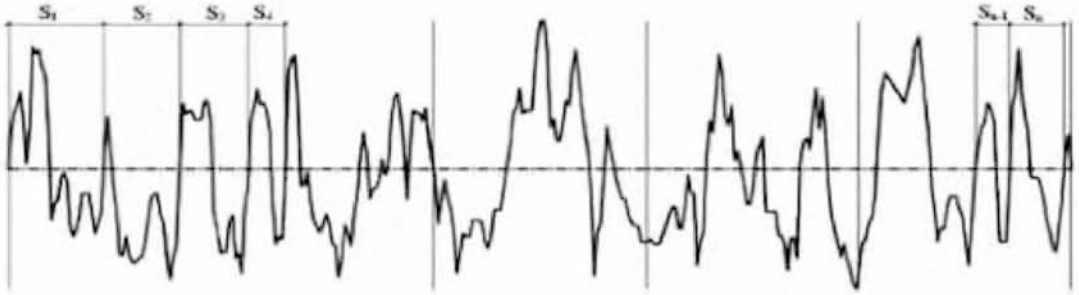
3.2.3.6 Το μέσο διάστημα κορυφών R_{sm} [mm].

Καλείται και μέσο διάστημα μέσης γραμμής και συμβολίζεται επίσης ως S_m. Ορίζεται ως η μέση οριζόντια απόσταση των διαδοχικών κορυφών (ή κοιλάδων), όταν αυτές διασταυρώνονται με την κεντρική γραμμή και η σχέση υπολογισμού της είναι η ακόλουθη:

$$R_{sm} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n} S_i \quad [mm] \qquad (3.4)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στην παραπάνω σχέση *N* είναι ο αριθμός των τοπικών κορυφών κατά μήκος του προφίλ, ενώ ο υπολογισμός των S_i αρχίζει και τελειώνει μόλις η γραμμή του προφίλ της επιφάνειας ξεπεράσει την κεντρική γραμμή (Σχήμα 3.18).



Σχήμα 3.18: Οι διαδοχικές κορυφές (S_i) για τον υπολογισμό του μέσου διαστήματος μέσης γραμμής (R_{sm} ή S_m). **[25][8]**

3.2.3.7 Λοξότητα R_{sk}

Η λοξότητα είναι η ροπή 3ης τάξης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του περιγράμματος σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος l και ορίζεται ως εξής:

$$R_{sk} = \frac{1}{R_q^3}\left[\frac{1}{l}\int_0^l y^3(x)dx\right] \qquad (3.5)$$

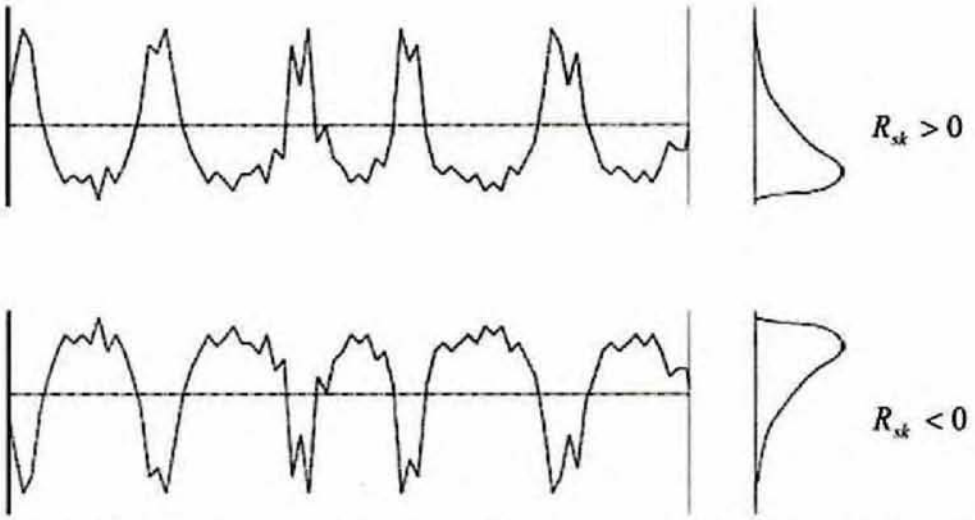
όπου R_q (*ή* RMS *ή σ*) *η τραχύτητα μέσης τετραγωνικής τιμής ή ενδεικνυόμενη τιμή τραχύτητας, η οποία είναι η τυπική απόκλιση των αποστάσεων των κορυφών από την κεντρική γραμμή και ορίζεται με την ακόλουθη σχέση:*

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l y^2(x)dx} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2} \quad [\mu m] \qquad (3.6)$$

Η λοξότητα αποδίδει το βαθμό ασυμμετρίας του περιγράμματος με βάση την κεντρική γραμμή, ενώ λαμβάνει μηδενική τιμή στην περίπτωση συμμετρίας όπου τα περιγράμματα έχουν τον ίδιο αριθμό κορυφών και κοιλάδων (κανονική κατανομή). Θετική λοξότητα εμφανίζουν επιφάνειες «άδειες από υλικό», στις οποίες υπάρχουν αιχμηρές κορυφές, ενώ αντίθετα αρνητική λοξότητα εμφανίζουν οι επιφάνειες «γεμάτες από υλικό», στις οποίες οι κορυφές δεν είναι αιχμηρές και υπάρχουν αρκετά βαθιές και απότομες

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

κοιλάδες (Σχήμα 3.19).



Σχήμα 3.19: Περιγράμματα επιφανειών με θετική και αρνητική λοξότητα (R_{sk}). **[25][8]**

Η παράμετρος της λοξότητας χρησιμοποιείται για τη διαφοροποίηση δύο επιφανειών, που μπορεί να έχουν ίδιες τιμές σε κάποιες από τις παραμέτρους ύψους ή μήκους της τραχύτητας (π.χ. R_a και R_q), αλλά διαφορετικά λοιπά χαρακτηριστικά ως προς τη μορφολογία τους. Πρόκειται για σημαντική παράμετρο όσον αφορά τριβολογικές εφαρμογές, όπως η λειτουργικότητα των επιφανειών έδρασης και ο έλεγχος φθοράς, καθώς επιφάνειες χαρακτηριζόμενες από θετική λοξότητα φθείρονται ταχύτερα κ.τ.λ.

3.2.3.8 Κυρτότητα R_{ku}

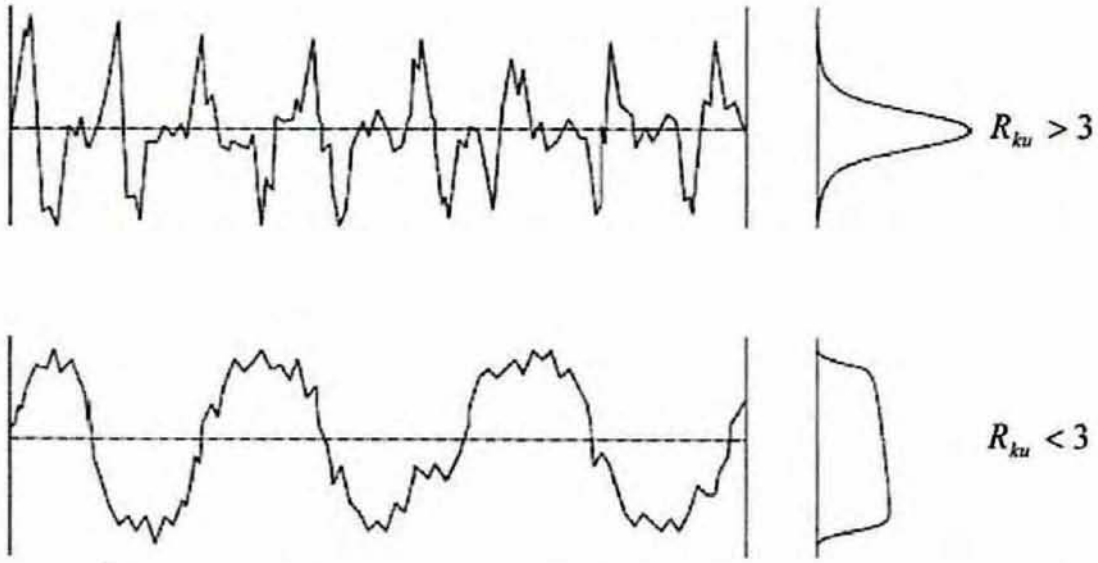
Η κυρτότητα είναι η ροπή 4ης τάξης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας του περιγράμματος σε ένα συγκεκριμένο και καθορισμένο μήκος l και ορίζεται από τη σχέση:

$$R_{ku} = \frac{1}{R_q^4}\left[\frac{1}{l}\int_0^l y^4(x)dx\right] \qquad (3.7)$$

Δίνει το βαθμό οξύτητας του περιγράμματος, δηλαδή το πόσο οξείες ή αμβλείες είναι οι κορυφές και οι κοιλάδες, και λαμβάνει τιμή ίση με 3 για περιγράμματα που ακολουθούν την κανονική κατανομή. Στην περίπτωση όπου $R_{ku}>3$ η επιφάνεια εμφανίζει οξύτητα προεξοχών και χαρακτηρίζεται ως λεπτόκυρτη (αρκετές αιχμηρές και ψηλές κορυφές και αιχμηρές και βαθιές

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

κοιλάδες), ενώ όταν $R_{ku}<3$ εμφανίζει αμβλύτητα προεξοχών και χαρακτηρίζεται ως πλατύκυρτη (ελάχιστες αιχμηρές και ψηλές κορυφές και αιχμηρές και βαθιές κοιλάδες) (Σχήμα 3.20).



Σχήμα 3.20: Περιγράμματα επιφανειών με κυρτότητα (R_{ku}) μεγαλύτερη ή μικρότερη του 3. **[25][8]**

Η κυρτότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως και η λοξότητα για τη διαφοροποίηση δύο επιφανειών, οι οποίες αν και έχουν διαφορετική μορφολογία, τυγχάνει να παρουσιάζουν όμοιες τιμές παραμέτρων ύψους ή μήκους της τραχύτητας. Επίσης, παρέχει πληροφορίες για την επιφάνεια επαφής του αντικειμένου και την αντίστασή της σε φθορά.

3.2.4 Μέτρηση τραχύτητας

Η καταγραφή της κατατομής (profile) μιας επιφάνειας, πραγματοποιείται με τη χρήση τεχνικών που στηρίζονται σε μηχανικά, ηλεκτρικά ή οπτικά φαινόμενα και λαμβάνουν χώρα κατά την ιχνηλάτησή της (σάρωση) σε μια ευθεία. Οι διατάξεις με τις οποίες επιτυγχάνεται η καταγραφή καλούνται κατατομόμετρα ή προφιλόμετρα ή τραχύμετρα και διακρίνονται σύμφωνα με τον τρόπο λειτουργία τους, κυρίως στα μηχανικά, τα ηλεκτρομηχανικά και τα οπτικά. Τα ηλεκτρομηχανικά τραχύμετρα κυριαρχούν έναντι των άλλων, καθώς επιτρέπουν την άμεση καταγραφή και αναπαραγωγή της κατατομής, ποσοτικοποιώντας την με τον υπολογισμό

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

διαφόρων παραμέτρων τραχύτητας, γεγονός που τα καθιστά πιο εύχρηστα και ικανά για την ταχεία και αξιόπιστη περιγραφή της ποιότητάς της.

3.2.4.1 Ηλεκτρομηχανικά τραχύμετρα

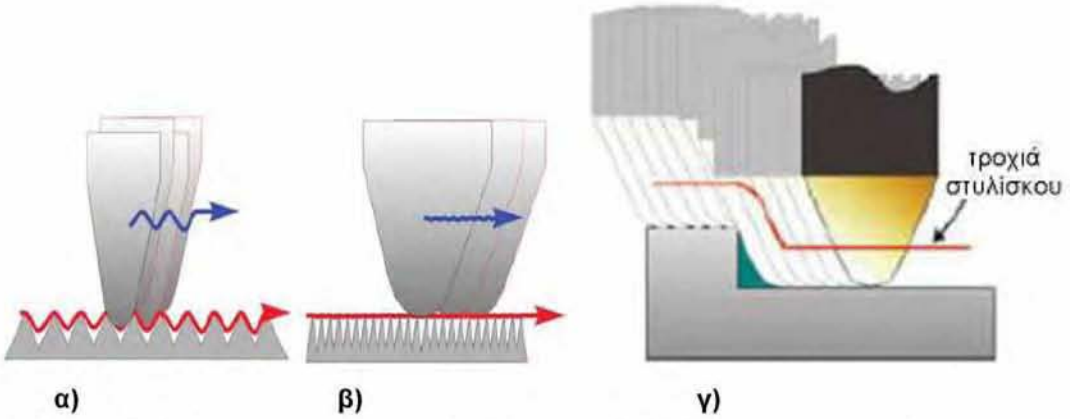
Τα ηλεκτρομηχανικά τραχύμετρα (τραχύμετρα στυλίσκου), πραγματοποιούν την ανάγνωση της επιφανειακής κατατομής με τη χρήση ειδικού μετρητικού δρομέα, ο οποίος φέρει μια αδαμάντινη ακίδα από φυσικό ή τεχνητό διαμάντι. Η συγκεκριμένη διάταξη ονομάζεται στυλίσκος ή μορφοτροπέας ή στοιχείο αντίληψης (pick-up). Ο στυλίσκος με την προσαρμοσμένη ακίδα ολισθαίνει κατά μήκος μιας προεπιλεγμένης ευθείας γραμμής, παράλληλης προς την επιφάνεια και ακολουθώντας την κατατομή της, μετατρέπει τις μηχανικές κάθετες προς την επιφάνεια μετατοπίσεις σε ηλεκτρικά σήματα (Σχήμα 3.21).



Σχήμα 3.21: Καταγραφής της κατατομής μιας επιφάνειας με ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο τύπου στυλίσκου. [**8**]

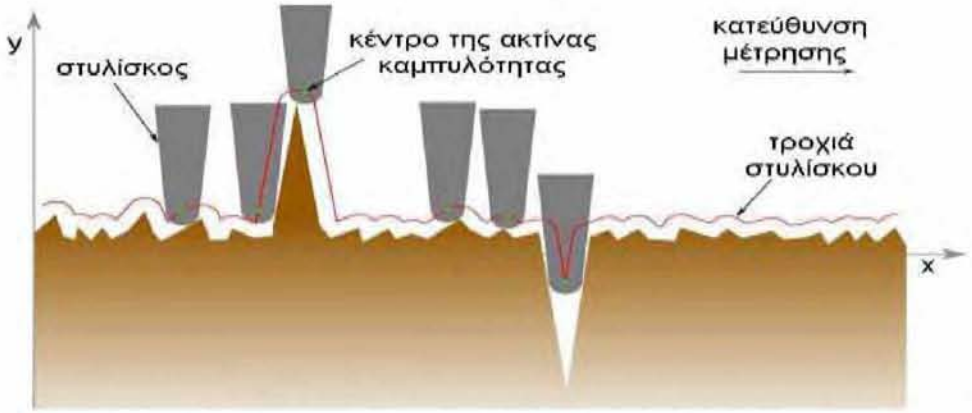
Η ακίδα του στοιχείου αντίληψης είναι τυποποιημένης γεωμετρίας και έχει την μορφή παραβολοειδούς με κατάλληλα επεξεργασμένη σφαιρική άκρη. Λόγω των πεπερασμένων διαστάσεών της, παρουσιάζονται αποκλίσεις κατά την καταγραφή των επιφανειακών ανωμαλιών, όταν αυτές είναι μικρότερες από την ακτίνα καμπυλότητάς της, με αποτέλεσμα να μην έχει τη δυνατότητα να τις αντιληφθεί, καθώς και όταν η κωνικότητά της δεν είναι κατάλληλη (Σχήμα 3.22).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 3.22: Σφάλματα στην καταγραφή της κατατομής που προέρχονται από τη γεωμετρία της ακίδας: α), β)Λόγω μεγάλης ακτίνας καμπυλότητας γ)Λόγω μεγάλης κωνικότητας. **[11][5]**

Τα στοιχεία που καταγράφονται από το όργανο μέτρησης στην πραγματικότητα δεν προέρχονται από το πραγματικό περίγραμμα της επιφάνειας, αλλά από την διαδρομή που καταγράφει το κέντρο του σφαιρικού τμήματος της ακίδας (Σχήμα 3.23).



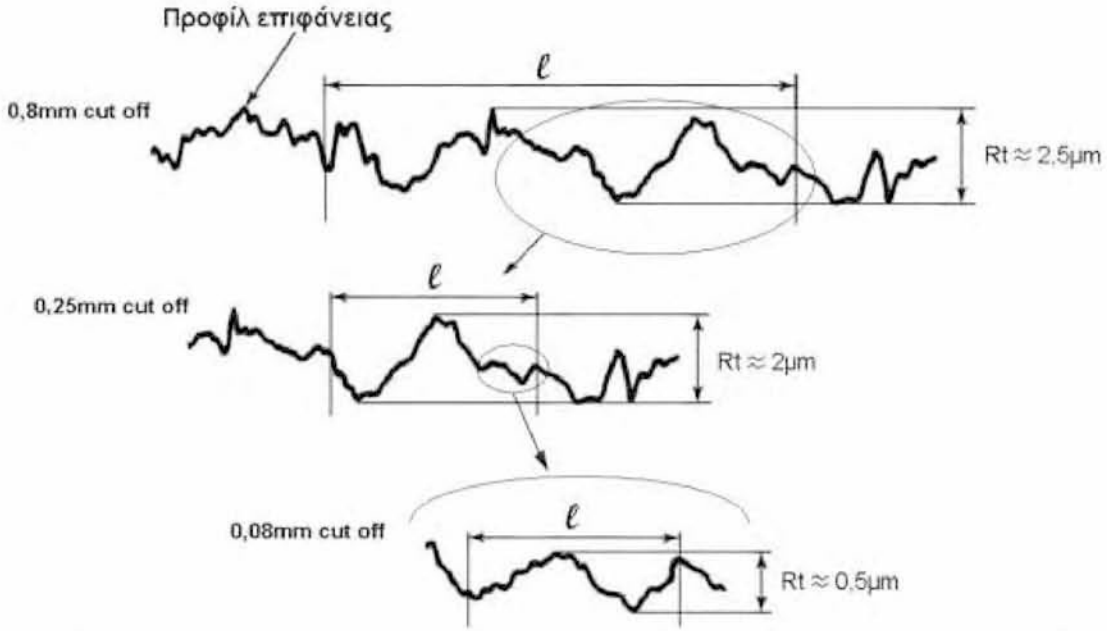
Σχήμα 3.23: Η διαδρομή της ακίδας κατά την ανίχνευση διαφόρων επιφανειακών ανωμαλιών.**[178]**

Το γενικότερο συμπέρασμα που εξάγεται παρατηρώντας τις αποκλίσεις της τροχιάς της ακίδας είναι ότι κατά κανόνα υπερεκτιμούνται οι κορυφές της κατατομής και υποεκτιμούνται οι κοιλάδες. Για να εξασφαλιστεί η ομοιομορφία των μετρήσεων τραχύτητας με τα διάφορα τραχύμετρα τύπου στυλίσκου, έχουν υιοθετηθεί διεθνή πρότυπα προτυποποίησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών αυτών των μετρητικών οργάνων (π.χ. ISO 3274 [101]).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

3.2.4.2 Μήκος κύματος αποκοπής ή ολοκλήρωσης

Μήκος κύματος αποκοπής (cut off length) ονομάζεται το ελάχιστο μήκος κατά το οποίο συλλέγονται τα δεδομένα της τραχυμέτρησης. Για την όσο το δυνατό ορθότερη μέτρηση της πραγματικής τραχύτητας μιας επιφάνειας, είναι απαραίτητη η επιλογή ενός μήκους αποκοπής ικανού, ώστε να περιλαμβάνει ένα πλήρως αντιπροσωπευτικό δείγμα του περιγράμματος, αλλά ταυτοχρόνως αρκετά μικρό, ώστε να μην αποδίδονται στην τραχύτητα μακρογεωμετρικά χαρακτηριστικά, που σχετίζονται με την κυμάτωση ή άλλα σφάλματα μορφής. Στο Σχήμα 3.24 χαρακτηριστικό είναι πώς μεταβάλλεται η μέγιστη τραχύτητα ή μέγιστο ύψος (R_{max} ή R_t κεφ.3.2.3.4), επιλέγοντας διαφορετικά μήκη κύματος αποκοπής κατά την μέτρηση της επιφανειακής τραχύτητας μιας τεχνολογικής επιφάνειας.



Σχήμα 3.24: Επίδραση του μήκους κύματος αποκοπής στην μέτρηση της τραχύτητας (Μέγιστο ύψος Rt). **[52][37]**

Το δειγματοληπτικό μήκος μέτρησης συνίσταται συνήθως σε πέντε μήκη αποκοπής και είναι αρκετά μικρότερο της συνολικής προκαθορισμένης διαδρομής που διανύει το στοιχείο αντίληψης του τραχυμέτρου στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η επιλογή του μήκους αποκοπής για την μέτρηση της τραχύτητας μηχανολογικών επιφανειών έχει συνδεθεί άμεσα με την μηχανουργική κατεργασία και την μορφή των περιγραμμάτων που αυτή

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

παράγει, στην οποία άλλωστε οφείλεται και η τάξη μεγέθους της τραχύτητας. Στον ακόλουθο πίνακα δίνονται χαρακτηριστικές τιμές του μέτρου τραχύτητας επιφανειών (μέση αριθμητική τραχύτητα R_a), που λαμβάνονται μετά από συνήθεις κατεργασίες και προτεινόμενα μήκη κύματος αποκοπής που αντιστοιχούν σε αυτές.

Πίνακας 3.3: Προτεινόμενα μήκη κύματος αποκοπής για διάφορες συμβατικές κατεργασίες. **[25][37][11]**

Κατεργασία	Αναμενόμενο εύρος τιμών R_a (μm)	Προτεινόμενο μήκος cut-off (mm)				
		0.08	*0.25*	*0.8*	*2.5*	*8*
Υπερλείανση	0.05 - 0.2	*	*	*		
Lapping	0.05 - 0.4	*	*	*		
Honing	0.1 - 0.8		*	*		
Λείανση	0.1 - 1.6		*	*	*	
Τόρνευση με διαμάντι	0.1 – 0.4		*	*		
Τόρνευση	0.4 - 6.3			*	*	
Διάτρηση	0.4 - 6.3			*	*	*
Γλύφανση	0.8 – 3.2			*	*	
Φραιζάρισμα	0.8 - 6.3			*	*	*
Πλάνισμα	1.6 – 12.5			*	*	*

Το γενικότερο συμπέρασμα που προκύπτει παρατηρώντας τον πίνακα είναι ότι το μήκος κύματος αποκοπής συνδέεται άμεσα με την τραχύτητα, καθώς όσο πιο λεία είναι μια επιφάνεια, τόσο μικρότερο μήκος αποκοπής πρέπει να επιλέγεται για την μέτρηση της τραχύτητάς της. Αντίθετα, σε τραχιές επιφάνειες το μήκος κύματος αποκοπής πρέπει να λαμβάνει αρκετά μεγαλύτερες τιμές.

3.2.4.3 Φίλτρα διαχωρισμού του σήματος τραχυμέτρησης

Τα ηλεκτρομηχανικά όργανα μέτρησης της τραχύτητας δίνουν μια αρκετά ικανοποιητική απεικόνιση της πραγματικής κατατομής. Η γεωμετρική μορφή της κατατομής μπορεί να παρασταθεί μαθηματικά από μία σειρά Fourier, δηλαδή σαν άθροισμα πολλών ημιτονοειδών ταλαντώσεων διαφόρων συχνοτήτων και ευρών. Για να διαχωριστούν οι μικρογεωμετρικές αποκλίσεις που οφείλονται στην τραχύτητα από ένα τέτοιο σύνολο σημάτων, το σήμα που λαμβάνεται από το αισθητήριο θα πρέπει να φιλτραριστεί, ώστε να αφαιρεθούν τα μεγάλα μήκη κύματος (χαμηλές συχνότητες), τα οποία

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

αντιστοιχούν σε επιφανειακές ανωμαλίες, όπως είναι η κυμάτωση και το σφάλμα μορφής (κεφ.3.2.2). Το φίλτρο αυτό μπορεί να είναι ηλεκτρονικό ή να συντελείται με μαθηματικές ή αλγοριθμικές μεθόδους και στόχος είναι να διαχωρίσει τα διάφορα μήκη κύματος, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την παρακολούθηση και εξέταση αυτών που ενδιαφέρουν. Παράλληλα, με την εφαρμογή φίλτρου μειώνεται η επίδραση των ταλαντώσεων στο περίγραμμα, χωρίς να χάνονται ουσιώδεις πληροφορίες της επιφάνειας, ενώ ελαττώνεται το σφάλμα εξαιτίας μη κατάλληλης τοποθέτησης του στυλίσκου, ο όποιος πρέπει να είναι όσο το δυνατό πιο κάθετος σε σχέση με την μετρούμενη επιφάνεια.

Η ύπαρξη φίλτρων είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική λειτουργία κάθε τραχυμέτρου και το είδος που θα χρησιμοποιηθεί κάθε φορά εξαρτάται από τη φύση του τεμαχίου και όχι από το δειγματοληπτικό μήκος που λαμβάνεται. Η άστοχη επιλογή φίλτρου σε μια μέτρηση ενέχει τον κίνδυνο να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα. Ενδεικτικά ορισμένοι τύποι φίλτρων είναι το 2RC, το Gauss (ISO 11562 [104]), τα φίλτρα R_k, τα Splines κ.α. Το φίλτρο Gauss είναι αυτό που έχει θεσπίσει ο Διεθνής Οργανισμός Προτυποποίησης (International Organization for Standardization – ISO) ως πρότυπο, καθώς διαχωρίζει την τραχύτητα από την κυμάτωση αποτελεσματικότερα. Επίσης, η εφαρμογή του συγκεκριμένου φίλτρου δίνει την δυνατότητα της αριθμητικής επανασύνδεσης των διαχωρισμένων τμημάτων, ανακατασκευάζοντας με ακρίβεια το συνολικό προφίλ του περιγράμματος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 4: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ΚΟΠΗΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΜΗΚΗ ΤΟΡΝΕΥΣΗ

4.1 Θεωρητική προσέγγιση της διαμήκους τόρνευσης

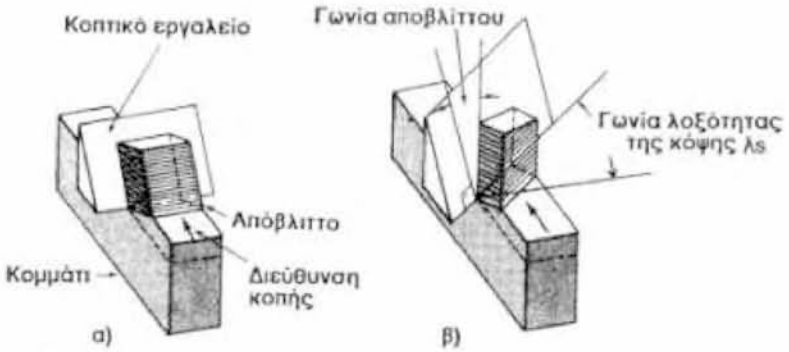
Σκοπός του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι ο μαθηματικός υπολογισμός των δυνάμεων κοπής κατά τη διαμήκη τόρνευση του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30. Ο υπολογισμός θα πραγματοποιηθεί μέσω θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων, που έχουν αναπτυχθεί κατά το παρελθόν κυρίως για την κοπή των μετάλλων, με στόχο τη διαμόρφωσή τους κατάλληλα, ώστε να ανταποκρίνονται στο συγκεκριμένο υλικό. Για να επιτευχθεί αυτό εκτελούνται πειράματα τόρνευσης σε συγκεκριμένες συνθήκες (πρόωσης, ταχύτητας κοπής) και μετριούνται με κατάλληλα μετρητικά όργανα χαρακτηριστικά στοιχεία της κοπής, τα οποία θα συντελέσουν μέσω θεωρητικών σχέσεων και μαθηματικών υπολογισμών, στη βελτίωση της προσαρμογής των θεωρητικών και εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής. Τα πειράματα της τόρνευσης παρουσιάζονται διεξοδικά στο $7^{ο}$ κεφάλαιο, όπου πραγματοποιείται εκτενής στατιστική ανάλυση των μετρούμενων με δυναμόμετρα δυνάμεων κοπής και καταρτίζονται κατάλληλα στοχαστικά μοντέλα προσαρμογής. Τα αποτελέσματα των στοχαστικών μοντέλων θα συγκριθούν με αυτά των μαθηματικών μοντέλων του παρόντος κεφαλαίου ως προς την ακρίβεια συσχέτισής τους με τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα (κεφ.10).

Οι συνθήκες της διαμήκους τόρνευσης όσον αφορά το χρησιμοποιούμενο εργαλείο κοπής και τον εργαλειοφορέα, επιλέγονται κατάλληλα, ώστε να ικανοποιούν τις προϋποθέσεις ισχύος της ορθογωνικής κοπής (Πίνακας 4.1, Σχήμα 4.1, Σχήμα 6.2). Επομένως, ο θεωρητικός υπολογισμός των δυνάμεων θα πραγματοποιηθεί μέσω των σχέσεων που έχουν αναπτυχθεί για το πρότυπο της ορθογωνικής κοπής [25][83].

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικές γωνίες του εργαλείου κοπής της διαμήκους τόρνευσης

Χαρακτηριστικές γωνίες του εργαλείου κοπής	Τιμή
Γωνία αποβλίττου, γ	6°
Γωνία ελευθερίας, α	5°
Γωνία τοποθέτησης (ή γωνία θέσεως της κύριας κόψης), κ	90°
Γωνία κλίσης (ή γωνία λοξότητας της κόψης), λs	0°

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 4.1: α)Ορθογωνική κοπή (λ_s=0) β)Λοξή κοπή (λ_s>0) [**25**].

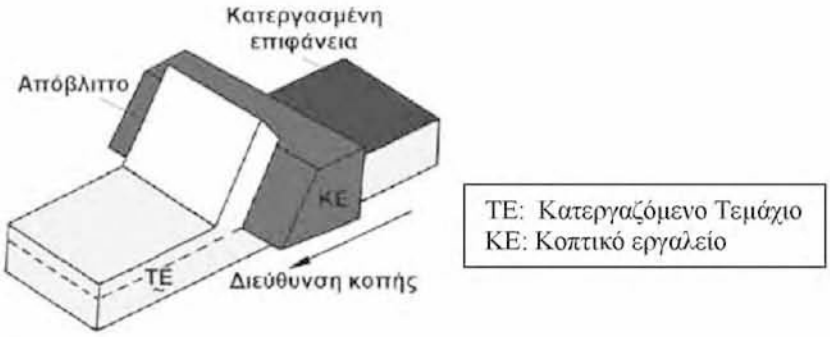
Η επιλογή της διαμήκους τόρνευσης για τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής έγκειται στην απλότητα της συγκεκριμένης κατεργασίας ως προς τη βασική της λειτουργία και τα χαρακτηριστικά της μορφολογίας εργαλείου-τεμαχίου (π.χ. μία μοναδική κόψη του εργαλείου, αρκετά ικανοποιητική προσομοίωση ως προς τις συνθήκες της ορθογωνικής κοπής κ.α.). Τα θεωρητικά μοντέλα που κατασκευάζονται με αυτή τη διαδικασία αφορούν άμεσα στην τόρνευση, αλλά μπορούν να επεκταθούν και σε άλλες κατεργασίες, όπου τα εργαλεία είναι καθορισμένης γεωμετρίας, συνυπολογίζοντας απαραίτητους διορθωτικούς συντελεστές [25].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.2 Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω του συστήματος της ορθογωνικής κοπής

4.2.1 Το σύστημα της ορθογωνικής κοπής

Η ορθογωνική κοπή αποτελεί την ιδανική και πιο απλοϊκή μορφή της διεργασίας της κοπής. Το κοπτικό εργαλείο έχει την μορφή σφήνας με ευθεία κόψη που είναι κάθετη προς την διεύθυνση κοπής και το πλάτος της είναι μεγαλύτερο από το πλάτος του κομματιού (Σχήμα 4.2) [25]. Το κοπτικό εργαλείο επίσης κινείται σχετικά ως προς το κομμάτι, με αποτέλεσμα ένα επιφανειακό στρώμα του κομματιού να αφαιρείται υπό τη μορφή αποβλίττου.



Σχήμα 4.2: Ορθογωνική κοπή. **[7]**

Ο μαθηματικός υπολογισμός των δυνάμεων και των άλλων χαρακτηριστικών μεγεθών της ορθογωνικής κοπής συντελείται υπό την προϋπόθεση ενός αριθμού παραδοχών και βασίζεται στην αναλυτική προσέγγιση μέσω θεωρητικών μοντέλων αλλά και σε πειραματικά δεδομένα. Οι τρεις βασικές παραδοχές που χρησιμοποιούνται για την επίλυση του συγκεκριμένου μοντέλου κοπής είναι οι παρακάτω [25]:

- Η περιοχή διάτμησης του κατεργαζόμενου τεμαχίου θεωρείται ένα επίπεδο, το οποίο ονομάζεται επίπεδο διάτμησης (Σχήμα 4.3).
- Το απόβλιττο θεωρείται ως σώμα στιβαρό, το οποίο βρίσκεται σε οριακή ισορροπία αλλά συγχρόνως σε αλληλεπίδραση με το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο, εξαιτίας των δυνάμεων που μεταφέρονται από το εργαλείο προς το απόβλιττο και μέσω του επιπέδου διάτμησης.
- Η τιμή της γωνίας διάτμησης φ ελαχιστοποιεί το έργο κοπής (Σχήμα 4.3).

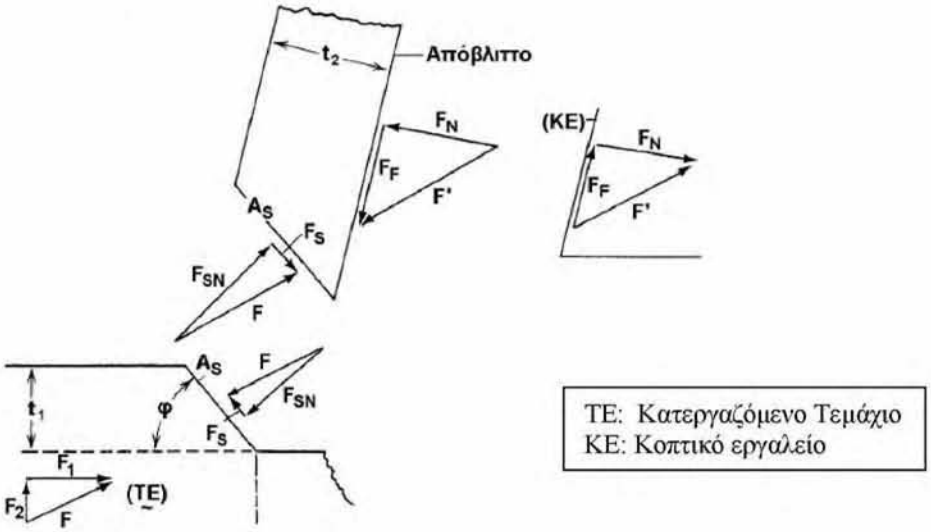
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 4.3: Το πρότυπο του επιπέδου διάτμησης [**25**]

Οι δυνάμεις που ασκούνται στο απόβλιττο από το κατεργαζόμενο τεμάχιο και το κοπτικό εργαλείο όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.4, είναι:

- F_S η αντίσταση του υλικού του τεμαχίου σε διάτμηση,
- F_{SN} η κάθετη δύναμη στο επίπεδο διάτμησης που είναι κάθετη στην F_S,
- F_F η δύναμη τριβής στη διεπιφάνεια εργαλείου/αποβλίττου που αντιτίθεται στην κίνηση του αποβλίττου και
- F_N η κάθετη δύναμη στην επιφάνεια επαφής εργαλείου-αποβλίττου που είναι κάθετη στην F_F.



Σχήμα 4.4: Το σύστημα δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιττο (όπου ΤΕ το κατεργαζόμενο τεμάχιο και ΚΕ το κοπτικό εργαλείο) [**25**][**7**].

Για την ισορροπία του αποβλίττου η δύναμη F που ονομάζεται αντίσταση κοπής είναι η συνισταμένη των F_S και F_{SN} και θα πρέπει να ισούται με την δύναμη F' που ονομάζεται *δύναμη κοπής* και είναι η συνισταμένη των F_F και F_N :

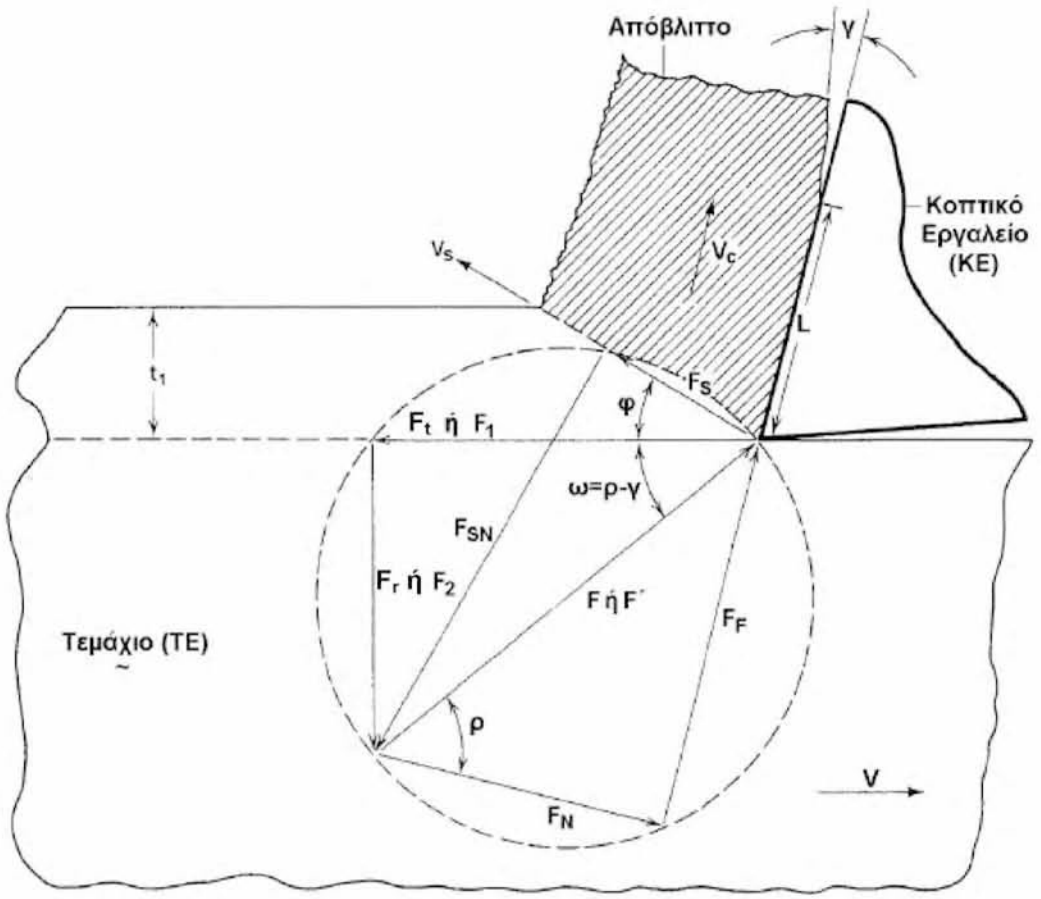
$$F = F'$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Η F' μεταφερόμενη στην ακίδα του εργαλείου αναλύεται στα ακόλουθα ζεύγη δυνάμεων:

- F_S και F_{SN}
- F_F και F_N
- F_1 (οριζόντια – ισοδύναμη με την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t) και F_2 (κάθετη στην F_1 - ισοδύναμη με την δύναμη απώθησης *του εργαλείου* F_r)

Οι δυνάμεις αυτές εγγράφονται σε κύκλο με διάμετρο ίση με F ή F', ο οποίος ονομάζεται *κύκλος του Merchant* (Σχήμα 4.5) [25][83].



Σχήμα 4.5: Το κυκλικό διάγραμμα των δυνάμεων κατά την ορθογωνική κοπή (κύκλος του Merchant) **[25][13][7]**

Από το Σχήμα 4.4 τον κύκλο του Merchant και την κινηματική της διαμήκους τόρνευσης (Σχήμα 4.6) προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις [25][13]:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

$$F_F = F_1 \sin\gamma + F_2 \cos\gamma \quad (4.1)$$

$$F_N = F_1 \cos\gamma - F_2 \sin\gamma \quad (4.2)$$

$$\mu = \tan\rho = \frac{F_F}{F_N} = \frac{F_2 + F_1 \tan\gamma}{F_1 - F_2 \tan\gamma} \quad (4.3)$$

$$\rho = \tan^{-1}\mu \quad (4.4)$$

$$F_S = F_1 \cos\varphi - F_2 \sin\varphi \quad (4.5)$$

$$F_{SN} = F_1 \sin\varphi + F_2 \cos\varphi \quad (4.6)$$

$$\tau_s = \frac{F_S}{A_S} \quad (4.7)$$

$$\sigma_s = \frac{F_{SN}}{A_S} \quad (4.8)$$

$$A_s = \frac{A_1}{\sin\varphi} = \frac{b t_1}{\sin\varphi} \quad (4.9)$$

$$F_1 = \frac{A_1 \tau_s \cos(\rho - \gamma)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (4.10)$$

$$F_2 = \frac{A_1 \tau_s \sin(\rho - \gamma)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (4.11)$$

$$t_1 = s \sin\kappa \quad (4.12)$$

$$b = \frac{\alpha}{\sin\kappa} \quad (4.13)$$

$$A_1 = t_1 b = s\alpha \quad (4.14)$$

$$A_F = bL \quad (4.15)$$

όπου: $F_1 = F_t$

$F_2 = F_r$

γ η γωνία αποβλίττου του εργαλείου κοπής

φ η γωνία διάτμησης

μ ο μέσος φαινόμενος συντελεστής τριβής

ρ η μέση φαινόμενη γωνία τριβής στην επιφάνεια επαφής αποβλίττου κοπτικού εργαλείου (ΚΕ)

τ_s *η μέση διατμητική τάση*

σ_s *η μέση ορθή τάση*

A_s *η επιφάνεια διάτμησης*

A_1 *η θεωρητική επιφάνεια αποβλίττου*

A_F *η επιφάνεια επαφής αποβλίττου/ΚΕ*

t_1 *το θεωρητικό πάχος του αποβλίττου*

b *το θεωρητικό πλάτος του αποβλίττου*

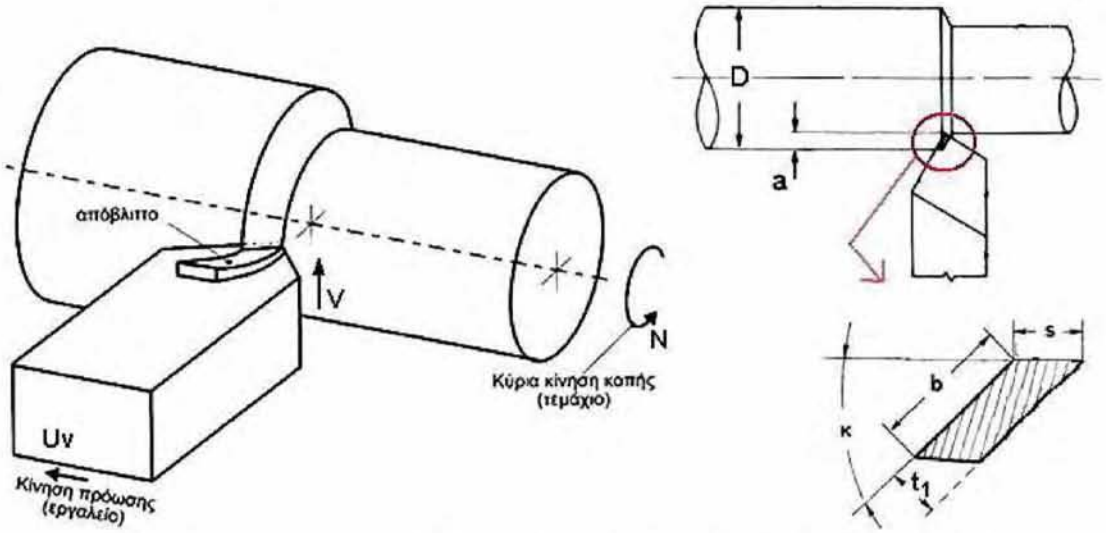
L *το μήκος επαφής αποβλίττου/ΚΕ*

s *η πρόωση*

κ *η γωνία τοποθέτησης*

α *το βάθος κοπής*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



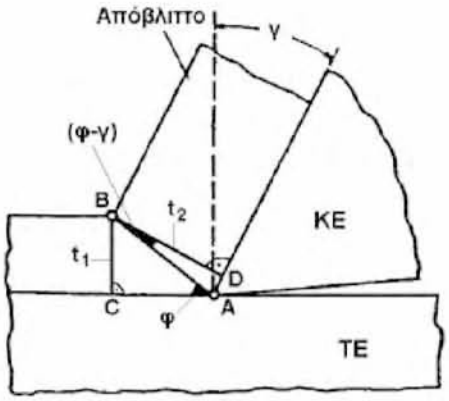
Σχήμα 4.6: Στοιχεία κινηματικής της εξωτερικής διαμήκους τόρνευσης [**13**][**25**].

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η μέση τάση διατμήσεως (όριο διαρροής σε διάτμηση) παραμένει κατά παραδεκτή προσέγγιση σταθερή για ευρείες μεταβολές των συνθηκών κατεργασίας και της γωνίας αποβλίττου [25][23]. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην αλληλοσυγκρουόμενη δράση της θερμοκρασίας και της ταχύτητας παραμορφώσεως που αναπτύσσονται στη ζώνη διατμήσεως. Η υψηλή θερμοκρασία μειώνει το όριο διαρροής, ενώ η υψηλή ταχύτητα παραμορφώσεως το αυξάνει, ασκώντας αντίρροπη επιρροή ίδιας περίπου τιμής [23]. Έτσι με τη διατμητική τάση ως σταθερά για το εξεταζόμενο υλικό και μέσω των σχέσεων 4.10 και 4.11 θα υπολογιστούν η κύρια συνιστώσα της δύναμη κοπής και η δύναμη απώθησης του εργαλείου αντίστοιχα. Η τιμή της διατμητικής τάσης του ενισχυμένου συνθετικού PA66-GF30 με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά που παραθέτει ο κατασκευαστής είναι 86 MPa (κεφ.1.4). Για τον υπολογισμό λοιπόν των δυνάμεων από τις σχέσεις 4.10 και 4.11, είναι απαραίτητος αρχικά ο προσδιορισμός της γωνίας διάτμησης φ και της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής ρ. Η γωνία διάτμησης θα προσδιοριστεί πειραματικά με τη μέθοδο που θα παρουσιαστεί στο επόμενο κεφάλαιο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.2.2 Προσδιορισμός της γωνίας διάτμησης φ μέσω του συντελεστή συμπίεσης λ

Κατά το σχηματισμό του αποβλίττου το θεωρητικό του πάχος t_1 μετατρέπεται σε t_2 λόγω της έντονης πλαστικής παραμορφώσεως, η οποία λαμβάνει χώρα κατά την κοπή (Σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Σχηματισμός του αποβλίττου κατά την ορθογωνική κοπή.[7]

Όπως είναι προφανές, ισχύει η ανισότητα $t_1<t_2$ ή $t_2/t_1>1$. Ο λόγος t_2/t_1 καλείται *δείκτης* ή συντελεστής *συμπιέσεως του αποβλίττου λ*:

$$\lambda = \frac{t_2}{t_1} \tag{4.16}$$

Ο δείκτης *λ* αποτελεί σημαντικό μέγεθος της κοπής και είναι δυνατό να μετρηθεί με ικανοποιητική ακρίβεια. Εκφράζει το βαθμό της πλαστικής παραμόρφωσης που έχει υποστεί το κατεργαζόμενο υλικό κατά το σχηματισμό του αποβλίττου, παρέχοντας ξεκάθαρη ένδειξη σχετικά με τις αναπτυσσόμενες δυνάμεις, την καταναλισκόμενη ισχύ της κοπής και τις εμφανιζόμενες θερμοκρασίες [23]. Ο δείκτης *λ* επηρεάζεται κυρίως από την ταχύτητα κοπής, την πρόωση, την αναπτυσσόμενη στην επιφάνεια επαφής αποβλίττου – εργαλείου θερμοκρασία, καθώς και το υγρό κοπής. Από την γεωμετρία του Σχήματος 4.7 προκύπτει:

$$t_1 = (AB)\sin\varphi \tag{4.17}$$

$$t_2 = (AB)\cos(\varphi - \gamma) \tag{4.18}$$

$$\lambda = \frac{t_2}{t_1} = \frac{\cos(\varphi - \gamma)}{\sin\varphi} \tag{4.19}$$

$$tan\,\varphi = \frac{cos\,\gamma}{\lambda - sin\,\gamma} \tag{4.20}$$

$$\varphi = tan^{-1}\frac{cos\,\gamma}{\lambda - sin\,\gamma} \tag{4.21}$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τη σχέση 4.21 συνεπάγεται ότι η γωνία διατμήσεως φ αυξάνεται με ελάττωση του δείκτη συμπιέσεως λ σε όλη την περιοχή μεταβολής της γωνίας αποβλίττου γ. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μεγάλες γωνίες διατμήσεως διευκολύνουν την κοπή.

Ο προσδιορισμός του δείκτη συμπίεσης λ συντελείται με πειραματική μέθοδο και έγκειται στη μέτρηση του πάχους t_2 του αποβλίττου. Το πραγματικό πάχος του αποβλίττου αποτελεί τον αριθμητικό μέσο όρο μιας σειράς μετρήσεων με μικρόμετρο ακριβείας [25][96]. Για το σκοπό αυτό εκτελούνται πειράματα τόρνευσης του πολυμερούς PA66-GF30, υπό κατάλληλες συνθήκες για την προσομοίωση της ορθογωνικής κοπής (κεφ.4.1 & κεφ. 7). Στόχος είναι η συσχέτιση του δείκτη λ της συγκεκριμένης κοπής ως προς τους παράγοντες της κατεργασίας, την πρόωση s και την ταχύτητα κοπής V και ο υπολογισμός μέσω αυτού της γωνίας διάτμησης φ. Από τις σχέσεις 4.16, 4.17 [1], 4.21 και τις μετρήσεις του πραγματικού πάχους του αποβλίττου t_2 με μικρόμετρο ακρίβειας 1μm [(2)] κατασκευάζεται ο παρακάτω πίνακας:

Πίνακας 4.2: Πειραματικός προσδιορισμός της γωνίας διατμήσεως φ μέσω του συντελεστή συμπίεσης λ.

V (m/min)	s (mm/rev)	t_1 (mm)	t_2 (mm) *	λ	φ (°)
200	0,05	0,05	0,078	1,55	34,34
200	0,1	0,1	0,154	1,54	34,71
200	0,16	0,16	0,246	1,54	34,71
200	0,2	0,2	0,302	1,51	35,28
200	0,24	0,24	0,358	1,49	35,67
350	0,05	0,05	0,076	1,52	35,09
350	0,1	0,1	0,151	1,51	35,28
350	0,16	0,16	0,235	1,47	36,07
350	0,2	0,2	0,292	1,46	36,27
350	0,24	0,24	0,346	1,44	36,67
500	0,05	0,05	0,075	1,5	35,48
500	0,1	0,1	0,148	1,48	35,87
500	0,16	0,16	0,234	1,46	36,27
500	0,2	0,2	0,288	1,44	36,67
500	0,24	0,24	0,341	1,42	37,09

*Μέσος όρος 3 μετρήσεων

[1] Το θεωρητικό πάχος t_1 μπορεί να βρεθεί πολύ εύκολα για τις συνθήκες κοπής του συγκεκριμένου προβλήματος από την σχέση 4.12.
[2] Στοιχεία για την μέτρηση του πάχους t_2 του αποβλίττου δίνονται στο παράρτημα Δ.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Με τον τρόπο αυτό, μέσω του δείκτη συμπίεσης λ, προσδιορίστηκε πειραματικά η γωνία διατμήσεως φ για κάθε ξεχωριστή συνθήκη της κατεργασίας.

4.2.3 Η θεωρία των Ernst και Merchant

Η θεωρία των Ernst και Merchant (1941) [25] αποτελεί μια από τις θεμελιώδης θεωρίες της κοπής των μετάλλων που βασίζονται στο πρότυπο του επιπέδου διατμήσεως (Σχήμα 4.3). Στην συγκεκριμένη θεωρία λαμβάνονται υπόψη οι εξής υποθέσεις:

- Ισχύει το πρότυπο της ορθογωνικής κοπής.
- Το κοπτικό εργαλείο είναι οξύ, δηλαδή δεν συντελείται τριβή ή διείσδυσή του στο κατεργαζόμενο τεμάχιο.
- Οι τάσεις στο επίπεδο διάτμησης κατανέμονται ομοιόμορφα.
- Το απόβλιττο θεωρείται ελεύθερο, σε ηρεμία, απόλυτα στερεό σώμα που ισορροπεί υπό την επενέργεια δύο αντίθετων δυνάμεων F (στο επίπεδο διάτμησης) και F' (στη διεπιφάνεια ΚΕ/αποβλίττου).

Κατά τη θεωρία των Ernst - Merchant η λύση του προβλήματος της κοπής βασίζεται στην ελάχιστη καταναλισκόμενη ενέργεια κοπής. Με χρήση *της αρχής ελάχιστης ενέργειας*, υποτίθεται ότι η κοπή εξελίσσεται προς την κατεύθυνση της ελάχιστης καταναλισκόμενης ενέργειας ανά μονάδα μήκους ή ισοδύναμα προς ελαχιστοποίηση της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_1 (ή F_t). Από τη σχέση 4.10, με απαίτηση $dF_1/d\varphi=0$ και θεωρώντας ότι τα μεγέθη τ_S και ρ είναι ανεξάρτητα της φ, προκύπτει ότι:

$$2\varphi + \rho - \gamma = 90^o \qquad (4.22)$$

$$\varphi = 45^o - \frac{\rho-\gamma}{2} = 45^o - \frac{\omega}{2} \qquad (4.23)$$

$$\rho = 90^o + \gamma - 2\varphi \qquad (4.24)$$

όπου ω ονομάζεται η *γωνία επενέργειας της δύναμης κοπής*.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τις σχέσεις 4.24, 4.10, 4.11 και 4.14 και σε συνέχεια του πίνακα 4.2 υπολογίζονται οι δυνάμεις κοπής (Πίνακας 4.3), με την τάση διαρροής τ_s να είναι σύμφωνα με τις ιδιότητες του υλικού 86 MPa (Πίνακας 6.7).

Πίνακας 4.3: Θεωρητικός προσδιορισμός των δυνάμεων κοπής.

V (m/min)	s (mm/rev)	λ	φ (°)	ρ (°)	A_1 (mm)	F_1 (N)	F_2 (N)
200	0,05	1,55	34,34	27,31	0,1	25,17	4,91
200	0,1	1,54	34,71	26,57	0,2	49,65	9,32
200	0,16	1,54	34,71	26,57	0,32	79,44	14,91
200	0,2	1,51	35,28	25,43	0,4	97,23	17,15
200	0,24	1,49	35,67	24,66	0,48	115,01	19,42
350	0,05	1,52	35,09	25,82	0,1	24,48	4,41
350	0,1	1,51	35,28	25,43	0,2	48,61	8,58
350	0,16	1,47	36,07	23,87	0,32	75,57	12,18
350	0,2	1,46	36,27	23,46	0,4	93,77	14,75
350	0,24	1,44	36,67	22,65	0,48	110,86	16,58
500	0,05	1,5	35,48	25,05	0,1	24,13	4,17
500	0,1	1,48	35,87	24,26	0,2	47,58	7,85
500	0,16	1,46	36,27	23,46	0,32	75,02	11,80
500	0,2	1,44	36,67	22,65	0,4	92,39	13,81
500	0,24	1,42	37,09	21,82	0,48	109,20	15,47

Όπου: F_1 *: Η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής* (F_t)
F_2 *: Η δύναμη απώθησης του εργαλείου* (F_r)

Οι τιμές των F_1 και F_2 στον Πίνακα 4.3 αποτελούν την πρώτη προσέγγιση υπολογισμού των δυνάμεων κοπής μέσω της θεωρίας των Ernst και Merchant. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο βαθμός συσχέτισής τους ως προς τα πειραματικά δεδομένα[1] (Πίνακας 4.4).

[1] Η διεξαγωγή των πειραμάτων της τόρνευσης και η συλλογή των πειραματικών δεδομένων παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 7.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 4.4: Σφάλμα συσχέτισης ER και συντελεστής προσδιορισμού R^2 των F_1 και F_2.

V (m/min)	s (mm/rev)	Ft (N)	Fr (N)	F_1 (N)	F_2 (N)	ER_{F1}	ER_{F2}	% ER_{F1}	% ER_{F2}
200	0,05	33,12	4,13	25,17	4,91	7,95	-0,78	24,00	18,89
200	0,1	60,24	7,53	49,65	9,32	10,59	-1,79	17,58	23,77
200	0,16	95,56	12,07	79,44	14,91	16,12	-2,84	16,87	23,53
200	0,2	115,08	13,84	97,23	17,15	17,85	-3,31	15,51	23,92
200	0,24	147,89	16,12	115,01	19,42	32,88	-3,30	22,23	20,47
350	0,05	30,24	3,92	24,48	4,41	5,76	-0,49	19,05	12,50
350	0,1	57,78	6,53	48,61	8,58	9,17	-2,05	15,87	31,39
350	0,16	87,78	9,5	75,57	12,18	12,21	-2,68	13,91	28,21
350	0,2	104,61	10,75	93,77	14,75	10,84	-4,00	10,36	37,21
350	0,24	135,93	13,88	110,86	16,58	25,07	-2,70	18,44	19,45
500	0,05	29,11	3,45	24,13	4,17	4,98	-0,72	17,11	20,87
500	0,1	53,07	5,12	47,58	7,85	5,49	-2,73	10,34	53,32
500	0,16	82,79	7,76	75,02	11,80	7,77	-4,04	9,39	52,06
500	0,2	99,84	8,95	92,39	13,81	7,45	-4,86	7,46	54,30
500	0,24	127,82	11,17	109,20	15,47	18,62	-4,30	14,57	38,50
			R^2:	**83,64%**	**76,82%**	***Av(%ER_{F1}):***		15,51%	30,56%

Όπου: F_t : *Πειραματικές μετρήσεις της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής*
F_r : *Πειραματικές μετρήσεις της δύναμης απώθησης του εργαλείου*
ER_{F1} *και* ER_{F2} : *Το σφάλμα υπολογισμού των* F_1 *και* F_2 *αντίστοιχα*
% ER_{F1} *και* % ER_{F2} : *Το ποσοστιαίο σφάλμα υπολογισμού των* F_1 *και* F_2 *αντίστοιχα*

Από τις τιμές των συντελεστών προσδιορισμού R^2 και το μέσο όρο του ποσοστιαίου σφάλματος %ER των υπολογισμένων δυνάμεων F_1 και F_2, προκύπτει ότι υπάρχει πρόβλημα περιορισμένης συσχέτισης ως προς τις πειραματικές μετρήσεις αυτών. Το γεγονός αυτό θέτει θέμα αμφισβήτησης και αδυναμίας των θεωρητικών σχέσεων, καθώς η ισχύς τους είναι δεδομένη και πειραματικά αποδεδειγμένη μόνο για την κοπή μετάλλων. Στη συνέχεια θα γίνει προσπάθεια βελτίωσης των θεωρητικών σχέσεων και προσαρμογή τους στο εξεταζόμενο ενισχυμένο πολυμερές μέσω μετασχηματισμού παραμέτρων και ανάπτυξης διορθωτικών συντελεστών. Επιδιωκόμενος στόχος είναι να επιτευχθεί όσο το δυνατόν υψηλότερη συσχέτιση με τα πραγματικά δεδομένα, καθιστώντας έτσι τις σχέσεις υπολογισμού των δυνάμεων κοπής της θεωρίας της κοπής των μετάλλων των Ernst και Merchant, αξιόπιστες ως προς την εφαρμογή τους και στην περίπτωση της κοπής του συγκεκριμένου υλικού.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.2.4 Πειραματικός προσδιορισμός της διατμητικής τάσης Ts

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι πειραματικά αποδεδειγμένο ότι η μέση τάση διατμήσεως στην περίπτωση της κοπής των μετάλλων παραμένει κατά παραδεκτή προσέγγιση σταθερή για ευρείες μεταβολές των συνθηκών κατεργασίας και της γωνίας αποβλίττου [25][23]. Σε ανάλογες πρόσφατες έρευνες έχει αποδειχθεί, επίσης πειραματικά, ότι η ιδιότητα αυτή ισχύει και για την περίπτωση της κοπής των ενισχυμένων πολυμερών [41]. Στην παρούσα παράγραφο θα εξεταστεί η συγκεκριμένη ιδιότητα κατά την ορθογωνική κοπή του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30, με στόχο την συσχέτιση της διατμητικής τάσης με τα χαρακτηριστικά του υλικού σε καθορισμένες συνθήκες κοπής.

Μέσω της μαθηματικής σχέσης 4.7 και με την βοήθεια των σχέσεων 4.5 και 4.9, τις τιμές της γωνίας διατμήσεως φ (Πίνακας 4.2) και τις πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής (Πίνακας 4.4), υπολογίζεται η διατμητική τάση για κάθε κοπή (Πίνακας 4.5).

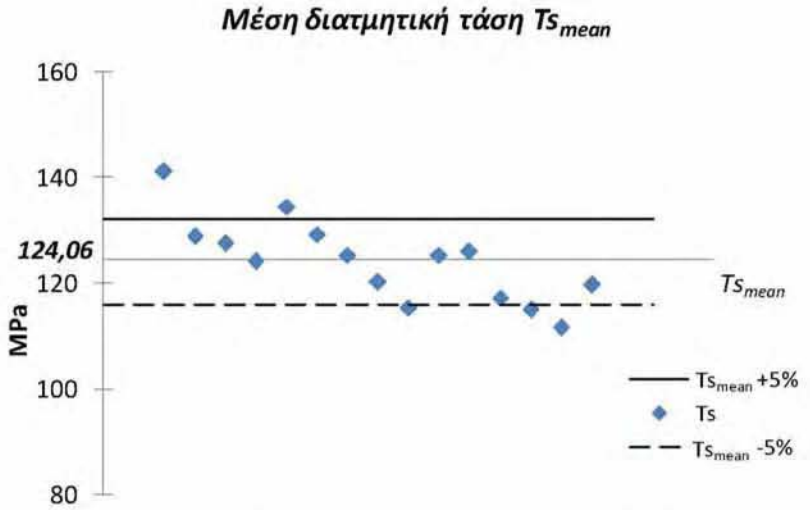
Πίνακας 4.5: Πειραματικός προσδιορισμός της διατμητικής τάσης Ts μέσω των πειραματικών μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Ft, Fr και της γωνίας διατμήσεως φ.

V (m/min)	s (mm/rev)	Ft (N)	Fr (N)	φ (°)	Ts
200	0,05	33,12	4,13	34,34	141,13
200	0,1	60,24	7,53	34,71	128,79
200	0,16	95,56	12,07	34,71	127,56
200	0,2	115,08	13,84	35,28	124,11
200	0,24	147,89	16,12	35,67	134,54
350	0,05	30,24	3,92	35,09	129,29
350	0,1	57,78	6,53	35,28	125,33
350	0,16	87,78	9,5	36,07	120,25
350	0,2	104,61	10,75	36,27	115,33
350	0,24	135,93	13,88	36,67	125,34
500	0,05	29,11	3,45	35,48	125,96
500	0,1	53,07	5,12	35,87	117,20
500	0,16	82,79	7,76	36,27	114,91
500	0,2	99,84	8,95	36,67	111,59
500	0,24	127,82	11,17	37,09	119,64
				Ts_{mean}:	***124,06***

Όπου: F_t : *Πειραματικές μετρήσεις της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής*
F_r : *Πειραματικές μετρήσεις της δύναμης απώθησης του εργαλείου*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τις τιμές της διατμητικής τάσης Ts της κάθε κοπής, προκύπτει ότι οι διάφορες τιμές της βρίσκονται μέσα σε ένα εύρος του ±5% από την μέση τιμή της Ts_{mean} = 124,06 MPa (Σχήμα 4.8), η οποία είναι ελαφρά πιο υψηλή από την τιμή που δίνει ο κατασκευαστής του ενισχυμένου πολυμερούς (86 MPa, κεφ.4.2.1).



Σχήμα 4.8: Το εύρος διακύμανσης των τιμών της διατμητικής τάσης Ts για κάθε κοπή και η μέση διατμητική τάση Ts_{mean} = 124,06MPa

Η σχετική σταθερότητα της τιμής της διατμητικής τάσης, ανεξάρτητα από τις μεταβολές των συνθηκών κοπής, αποτελεί ένδειξη ότι το συγκεκριμένο ενισχυμένο πλαστικό προσεγγίζει σε γενικές γραμμές τη συμπεριφορά των ομοιογενών και ισότροπων υλικών κατά την κοπή, καθώς όπως προαναφέρθηκε το ίδιο χαρακτηριστικό συναντάται κατά την κοπή των μετάλλων. Το γεγονός αυτό επαναφέρει σε ισχύ τις θεωρητικές σχέσεις των δυνάμεων κοπής, αλλά απαιτεί τη διαμόρφωσή τους μέσω διορθωτικών μεταβλητών. Αυτό θα επιτευχθεί εφαρμόζοντας κατάλληλα τη βελτιωμένη θεωρία του Merchant (1944) [129], η οποία θα αναπτυχθεί στην επόμενη παράγραφο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.2.5 Η βελτιωμένη θεωρία του Merchant

Για να ξεπεραστούν ορισμένες αδυναμίες του κριτηρίου Ernst-Merchant, ο δεύτερος ισχυρίστηκε ότι η διατμητική τάση τ_S μεταβάλλεται γραμμικά με την αντίστοιχη ορθή θλιπτική τάση σ_S [129], δηλ. ισχύει:

$$\tau_s = \tau_{s_0} + K\sigma_s \qquad (4.25)$$

όπου K σταθερά του κατεργαζόμενου υλικού και τ_{So} το στατικό όριο διαρροής σε διάτμηση του υλικού του τεμαχίου.

Από το κυκλικό διάγραμμα των δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιττο (κύκλος του Merchant, Σχήμα 4.5), προκύπτει:

$$F_{SN} = F_S \tan(\varphi + \rho - \gamma)$$

και μέσω των σχέσεων 4.7 και 4.8:

$$\sigma_S = \tau_S \tan(\varphi + \rho - \gamma) \qquad (4.26)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 4.25 και 4.26 διαμορφώνεται η ακόλουθη σχέση για την διατμητική τάση:

$$\tau_S = \frac{\tau_{s0}}{1 - K\tan(\varphi + \rho - \gamma)} \qquad (4.27)$$

Αντικαθιστώντας στη συνέχεια την τ_s στην σχέση 4.10, προκύπτει για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής η ακόλουθη σχέση:

$$F_1 = \frac{A_1 \tau_{s0} \cos(\rho - \gamma)}{[1 - K\tan(\varphi + \rho - \gamma)]\sin\varphi\cos(\varphi + \rho - \gamma)} \qquad (4.28)$$

Με κριτήριο την ελαχιστοποίηση της F_1 (απαίτηση $dF_1/d\varphi=0$) και με την προϋπόθεση ότι οι όροι τ_{So} και ρ είναι ανεξάρτητοι της φ, καταλήγουμε μετά την εκτέλεση των πράξεων στη σχέση:

$$\varphi = \frac{\tan^{-1} K - \rho + \gamma}{2} \qquad (4.29)$$

Θέτοντας τον όρο $(\tan^{-1}K)/2$ ως σταθερά δ, η σχέση 4.29 λαμβάνει την τελική της μορφή, η οποία είναι σε αντιστοιχία με την σχέση υπολογισμού της γωνίας διάτμησης φ των Ernst-Merchant (σχέση 4.23):

$$\varphi = \delta - \frac{\rho - \gamma}{2} \qquad (4.30)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στόχος είναι να προσδιοριστεί η σταθερά δ με βάση τα χαρακτηριστικά του ενισχυμένου πλαστικού. Αυτό θα επιτευχθεί μέσω των πειραματικών δεδομένων των δυνάμεων κοπής. Από τις σχέσεις 4.3 και 4.4 καθώς και τις πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής F_t, F_r (Πίνακας 4.4) υπολογίζεται η μέση φαινόμενη γωνίας τριβής ρ για κάθε κοπή και στη συνέχεια, μέσω της σχέσης 4.30 και τις τιμές της γωνίας διατμήσεως φ (Πίνακας 4.2) υπολογίζεται η σταθερά δ (Πίνακας 4.6).

Πίνακας 4.6: Προσδιορισμός της σταθεράς δ του ενισχυμένου πλαστικού, μέσω της γωνίας διατμήσεως φ και των πειραματικών μετρήσεων των δυνάμεων κοπής Ft, Fr.

V (m/min)	s (mm/rev)	Ft (N)	Fr (N)	φ (°)	ρ (°)	δ (°)
200	0,05	33,12	4,13	34,34	13,11	37,90
200	0,1	60,24	7,53	34,71	13,13	38,28
200	0,16	95,56	12,07	34,71	13,2	38,31
200	0,2	115,08	13,84	35,28	12,86	38,71
200	0,24	147,89	16,12	35,67	12,22	38,78
350	0,05	30,24	3,92	35,09	13,39	38,79
350	0,1	57,78	6,53	35,28	12,45	38,51
350	0,16	87,78	9,5	36,07	12,18	39,16
350	0,2	104,61	10,75	36,27	11,87	39,20
350	0,24	135,93	13,88	36,67	11,83	39,59
500	0,05	29,11	3,45	35,48	12,76	38,86
500	0,1	53,07	5,12	35,87	11,51	38,62
500	0,16	82,79	7,76	36,27	11,35	38,95
500	0,2	99,84	8,95	36,67	11,12	39,24
500	0,24	127,82	11,17	37,09	10,99	39,59
					δ_{mean}:	***38,83***

Έχοντας συσχετίσει την σταθερά δ με τα χαρακτηριστικά του κατεργαζόμενου υλικού μέσω των πειραματικών δεδομένων της τόρνευσης, διαμορφώνεται η σχέση υπολογισμού της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής ρ (Σχέση 4.30):

$$\rho = 2(\delta - \varphi) + \gamma \qquad (4.31)$$

$$\rho = 2(38.83 - \varphi) + \gamma \qquad (4.32)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τις σχέσεις 4.10, 4.11 και 4.14, τις τιμές της γωνίας διάτμησης φ (Πίνακας 4.2), την πειραματικά προσδιορισμένη διατμητική τάση[1] (Ts_{mean} = 124,06 MPa, Πίνακας 4.5) και τον υπολογισμό της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής ρ μέσω της προσαρμοσμένης στο υλικό σχέση 4.32, υπολογίζονται εκ νέου οι δυνάμεις κοπής F_1 και F_2[2] (Πίνακας 4.7).

Πίνακας 4.7: Τελικές τιμές υπολογισμού των δυνάμεων F_1 και F_2, μέσω των συσχετισμένων στα χαρακτηριστικά του ενισχυμένου πλαστικού, παραμέτρων της κοπής.

V (m/min)	s (mm/rev)	φ (°)	ρ (°)	F_1 (N)	F_2 (N)	ER_{F1}	ER_{F2}	% ER_{F1}	% ER_{F2}
200	0,05	34,34	14,97	29,86	4,71	3,26	-0,58	9,84	14,04
200	0,1	34,71	14,23	58,91	8,52	1,33	-0,99	2,21	13,15
200	0,16	34,71	14,23	94,26	13,64	1,30	-1,57	1,36	13,01
200	0,2	35,28	13,10	115,41	14,37	-0,33	-0,53	0,29	3,83
200	0,24	35,67	12,32	136,56	15,12	11,33	1,00	7,66	6,20
350	0,05	35,09	13,48	29,05	3,81	1,19	0,11	3,94	2,81
350	0,1	35,28	13,10	57,71	7,18	0,07	-0,65	0,12	9,95
350	0,16	36,07	11,53	89,75	8,69	-1,97	0,81	2,24	8,53
350	0,2	36,27	11,13	111,38	9,99	-6,77	0,76	6,47	7,07
350	0,24	36,67	10,31	131,71	9,93	4,22	3,95	3,10	28,46
500	0,05	35,48	12,71	28,65	3,37	0,46	0,08	1,58	2,32
500	0,1	35,87	11,93	56,50	5,86	-3,43	-0,74	6,46	14,45
500	0,16	36,27	11,13	89,10	8,00	-6,31	-0,24	7,62	3,09
500	0,2	36,67	10,31	109,76	8,28	-9,92	0,67	9,94	7,49
500	0,24	37,09	9,48	129,76	7,90	-1,94	3,27	1,52	29,27
			R^2:	**98,27%**	**84,28%**		***Average:***	**4,29%**	**10,91%**

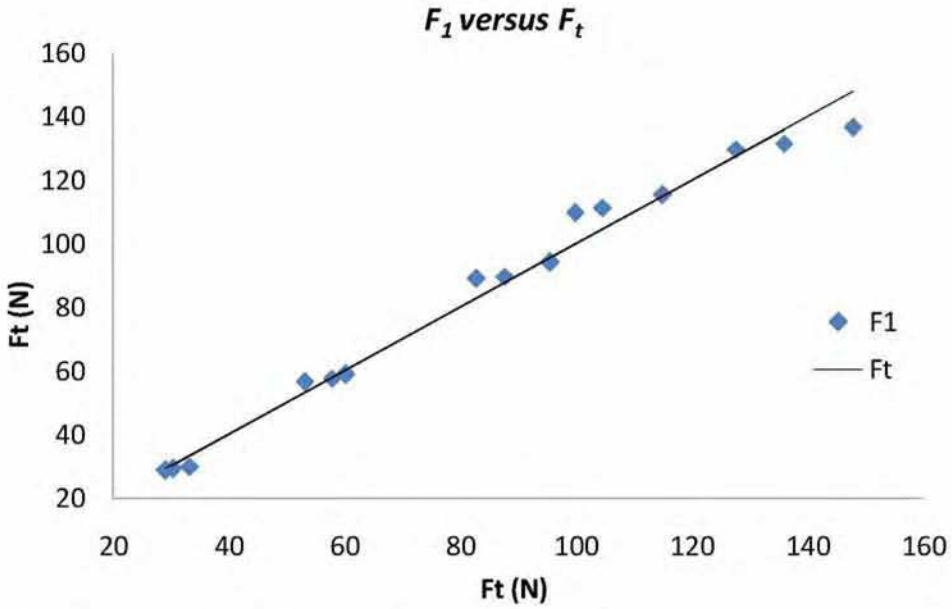
Όπου: ER_{F1} *και* ER_{F2} *: Το σφάλμα υπολογισμού των* F_1 *και* F_2 *αντίστοιχα*
% ER_{F1} *και* % ER_{F2} *: Το ποσοστιαίο σφάλμα υπολογισμού των* F_1 *και* F_2 *ως προς τις πειραματικές τιμές των* F_t *και* F_r *αντίστοιχα*
R^2 *: Συντελεστής προσδιορισμού των* F_1 *και* F_2 *ως προς τις πειραματικές τιμές των* F_t *και* F_r *αντίστοιχα*

Οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού R^2 και το ποσοστιαίο σφάλμα %ER των υπολογισμένων δυνάμεων F_1 και F_2 δηλώνουν ότι η συσχέτιση ως προς τις πειραματικές μετρήσεις αυτών είναι αρκετά υψηλή. Διαμορφώνοντας λοιπόν τα θεωρητικά μοντέλα με βάση τις φυσικές ιδιότητες

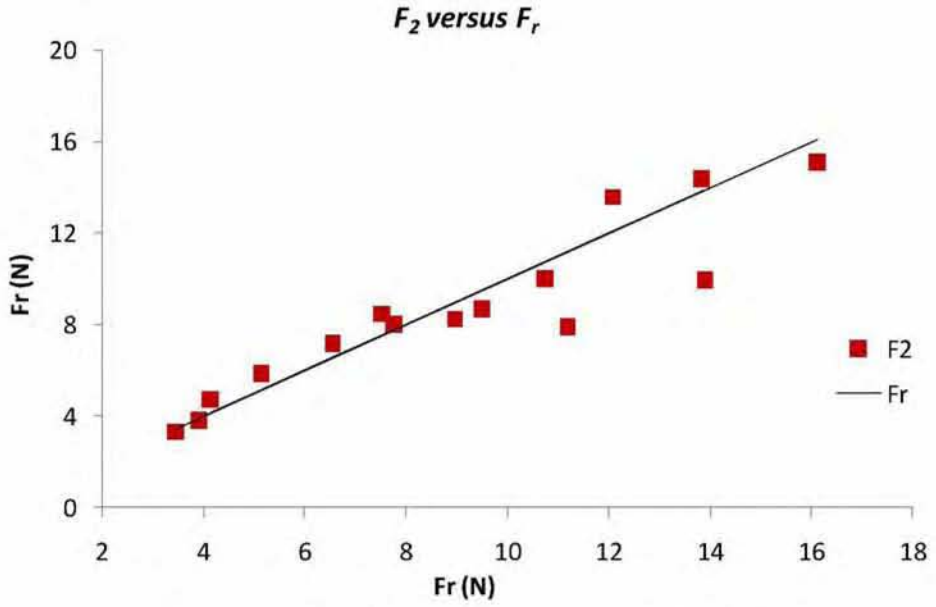
[1] Στην περίπτωση που κατά τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής χρησιμοποιηθεί η τιμή της διατμητικής τάσης που δίνει ο κατασκευαστής του υλικού (Πίνακας 6.7), αποδεικνύεται ότι η προσαρμογή των αποτελεσμάτων ως προς τις πειραματικές μετρήσεις είναι αρκετά μικρότερη.
[2] Να σημειωθεί ότι αν και κατά τον υπολογισμό των επιμέρους παραμέτρων χρησιμοποιήθηκαν οι πειραματικές τιμές των δυνάμεων κοπής (π.χ. για τον υπολογισμό της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής ρ), στον τελικό υπολογισμό των δυνάμεων καμία παράμετρος δεν εξαρτάται άμεσα από αυτές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

του υλικού, πραγματοποιήθηκε ο μαθηματικός υπολογισμός των δυνάμεων με αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης. Από τα δεδομένα των υπολογισμένων δυνάμεων κοπής (Πίνακας 4.7) σε συνάρτηση με τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 4.4) κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα, όπου διακρίνεται και γραφικά η πολύ καλή συσχέτιση των τιμών (Σχήμα 4.9 και Σχήμα 4.10).



Σχήμα 4.9: Η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής υπολογισμένη μέσω των προσαρμοσμένων θεωρητικών σχέσεων F_1 ως προς τις πειραματικές μετρήσεις της F_t.



Σχήμα 4.10: Η δύναμη απώθησης του εργαλείου υπολογισμένη μέσω των προσαρμοσμένων θεωρητικών σχέσεων F_2 ως προς τις πειραματικές μετρήσεις F_r.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.3 Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω της ημι-εμπειρικής μεθόδου κατά Kienzle-Victor

Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής στην διαμήκη τόρνευση μπορεί να πραγματοποιηθεί, κάνοντας χρήση της ημι-εμπειρικής μεθοδολογίας που ανέπτυξαν οι Kienzle και Victor, που είναι γνωστή ως το μοντέλο της ειδικής αντίστασης κοπής [25][129]. Κατά την συγκεκριμένη μεθοδολογία γίνεται η θεώρηση ότι θα πρέπει να υπάρχει κάποια σχέση μεταξύ του πάχους του αποβλίττου και του πλάτους του με τις δυνάμεις κοπής. Εισάγεται για το λόγο αυτό η παράμετρος k_{st} που καλείται ειδική αντίσταση κοπής και για την οποία ισχύει η παρακάτω σχέση μεταξύ της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής και των χαρακτηριστικών διαστάσεων του αποβλίττου [129][110]:

$$k_{st} = \frac{F_t}{A_1} = \frac{F_t}{t_1 b} \qquad (\text{daN/mm}^2) \qquad (4.33)$$

όπου: F_t *η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής σε* daN,

A_1 *η διατομή του αποβλίττου σε* mm^2,

b το πλάτος του αποβλίττου σε mm,

t_1 *το πάχος του αποβλίττου σε* mm.

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι για σταθερή διατομή αποβλίττου A_1, η ειδική αντίσταση κοπής k_{st} εξαρτάται από το πάχος αποβλίττου t_1 σύμφωνα με τη σχέση [25][129]:

$$k_{st} = k_{st1} t_1^{-z_t} \ (\text{daN/mm}^2) \qquad (4.34)$$

όπου: k_{st1} *η ειδική αντίσταση κοπής του υλικού του τεμαχίου για διατομή αποβλίττου* A_1=1mm^2, *δηλαδή για* $b = t_1$=1mm,
z_t *σταθερά που εξαρτάται κυρίως από το υλικό του τεμαχίου.*

Από τις σχέσεις 4.33 και 4.34 προκύπτει ότι η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$F_t = b k_{st1} t_1^{(1-z_t)} \qquad (\text{daN}) \qquad (4.35)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Επίσης, μέσω των σχέσεων 4.12, 4.13 και 4.14 και με τη γωνία τοποθέτησης κ να είναι 90° (κεφ.4.1), η σχέση 4.35 γίνεται:

$$F_t = ak_{st1}s^{(1-z_t)} \quad \text{(daN)} \qquad (4.36)$$

Η τιμή της σταθεράς k_{st1} καθώς και η τιμή του εκθέτη $(1-z_t)$ έχουν προσδιοριστεί πειραματικά για διάφορα υλικά, κυρίως μέταλλα. Για το ενισχυμένο πολυμερές PA66-GF30 δεν υπάρχουν δεδομένα στη βιβλιογραφία για τις τιμές των συγκεκριμένων σταθερών, καθώς βρίσκεται σε ερευνητικό στάδιο η συμπεριφορά του στις κατεργασίες κοπής. Ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής λοιπόν μέσω της σχέσης 4.36 έγκειται στον πειραματικό προσδιορισμό της ειδικής αντίστασης κοπής k_{st1} και του εκθέτη $(1-z_t)$. Για να επιτευχθεί αυτό, θα γίνει χρήση των πειραματικών μετρήσεων των δυνάμεων κοπής της διαμήκους τόρνευσης (Κεφάλαιο 7, Πίνακας 7.7 ή Πίνακας 4.4), με στόχο να συσχετιστούν οι σταθερές με τους παράγοντες της κοπής, την πρόωση s και την ταχύτητα κοπής V.

Δεδομένου ότι η ειδική αντίσταση κοπής k_{st} εξαρτάται κατά διαφορετικό τρόπο από τα χαρακτηριστικά της κοπής, όπως την ταχύτητα κοπής, την πρόωση, το βάθος κοπής, τη γεωμετρία του εργαλείου και το υγρό κοπής, αντίστοιχοι διορθωτικοί παράγοντες χρησιμοποιούνται για την βελτίωση της σχέσης 4.36. Η διόρθωση λόγω της επίδρασης της ταχύτητας κοπής είναι η πιο συνηθισμένη στην πράξη [25][110].

Μέσω της σχέσης 4.36 θα γίνει αρχικά συσχέτιση των σταθερών k_{st1} και z_t με την πρόωση s για κάθε τιμή της ταχύτητας V ξεχωριστά. Λογαριθμίζοντας κατάλληλα λαμβάνονται οι τιμές που παρατίθενται στους ακόλουθους πίνακες:

Πίνακας 4.8: Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 200m/min.

V (m/min)	s (mm/rev)	F_t/α (daN/mm)	Log(s)	Log(F_t/a)
200	0,05	1,656	-1,301	0,219
	0,1	3,012	-1,000	0,479
	0,16	4,778	-0,796	0,679
	0,2	5,754	-0,699	0,760
	0,24	7,395	-0,620	0,869

Όπου α=2mm το βάθος κοπής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 4.9: Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 350m/min.

V (m/min)	s (mm/rev)	F_t/α (daN/mm)	Log(s)	Log(F_t/a)
350	0,05	1,512	-1,301	0,180
	0,1	2,889	-1,000	0,461
	0,16	4,389	-0,796	0,642
	0,2	5,231	-0,699	0,719
	0,24	6,797	-0,620	0,832

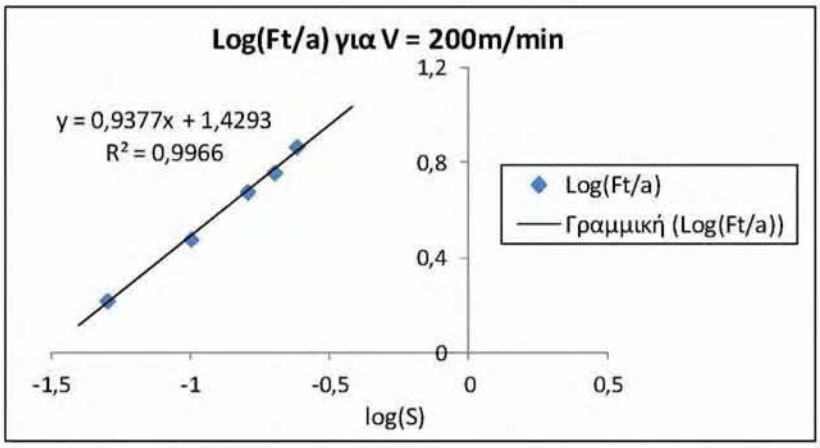
Όπου α=2mm το βάθος κοπής

Πίνακας 4.10: Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 500m/min.

V (m/min)	s (mm/rev)	F_t/α (daN/mm)	Log(s)	Log(F_t/a)
500	0,05	1,456	-1,301	0,163
	0,1	2,654	-1,000	0,424
	0,16	4,140	-0,796	0,617
	0,2	4,992	-0,699	0,698
	0,24	6,391	-0,620	0,806

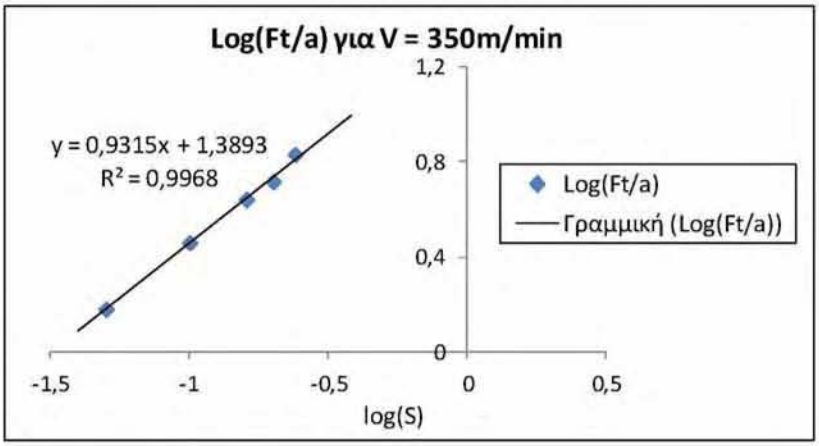
Όπου α=2mm το βάθος κοπής

Με βάση τους παραπάνω πίνακες κατασκευάζονται αντίστοιχα τα εξής διαγράμματα:

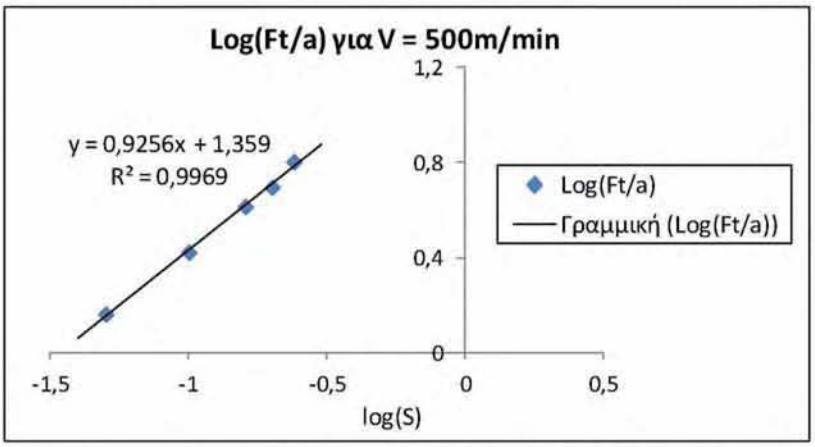


Σχήμα 4.11: Γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 200m/min

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 4.12: Γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 350m/min



Σχήμα 4.13: Γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s) για ταχύτητα κοπής 500m/min

Από τα παραπάνω διαγράμματα και τη γραμμική συσχέτιση του Log(F_t/a) ως προς Log(s), για κάθε τιμή της ταχύτητας κοπής και δεδομένου ότι ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι αρκετά υψηλός σε κάθε περίπτωση, εξάγονται οι τιμές των Log(k_{st1}) και (1-z_t) που διακρίνονται στον πίνακα:

Πίνακας 4.11: Log(k_{st1}) και (1-z_t) για κάθε τιμή της ταχύτητας κοπής.

V (m/min)	Log(k_{st1})	(1-z_t)
200	1,429	0,9377
350	1,389	0,9315
500	1,359	0,9256

Στη συνέχεια και με ανάλογο τρόπο οι σταθερές συσχετίζονται με την ταχύτητα κοπής V και εισάγονται στην σχέση 4.36 ως συνάρτηση αυτής.

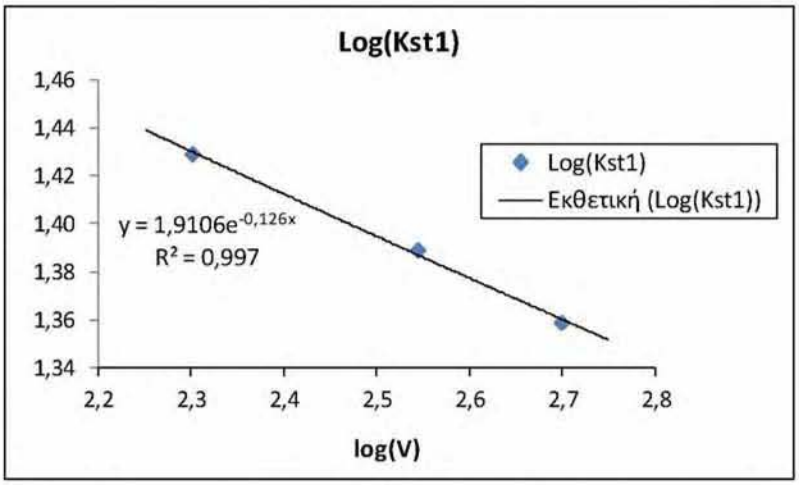
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Λογαριθμίζοντας κατάλληλα τις τιμές του πίνακα 4.11 κατασκευάζεται ο εξής πίνακας:

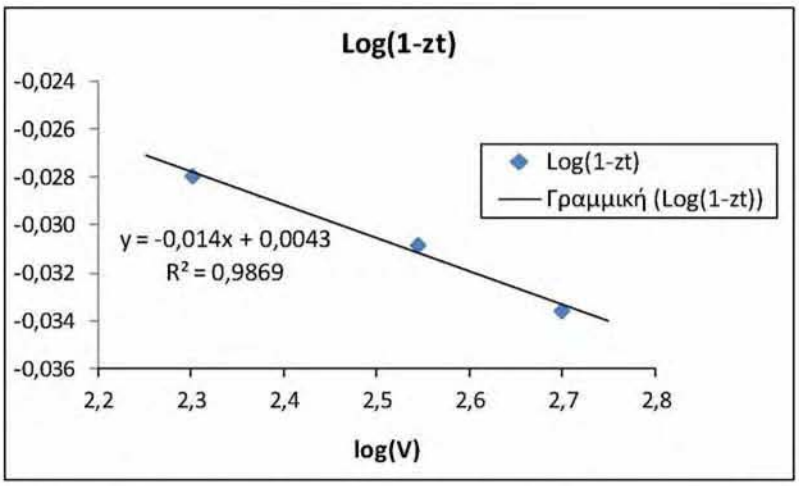
Πίνακας 4.12: Log(k_{st1}) και Log(1-z_t) ως προς Log(V).

V (m/min)	Log(V)	Log(k_{st1})	Log(1-z_t)
200	2,301	1,429	-0,028
350	2,544	1,389	-0,031
500	2,699	1,359	-0,034

Από τις τιμές του Πίνακα 4.12 κατασκευάζονται τα ακόλουθα διαγράμματα:



Σχήμα 4.14: Λογαριθμική συσχέτιση του Log(k_{st1}) ως προς Log(V).



Σχήμα 4.15: Γραμμική συσχέτιση του Log(1-z_t) ως προς Log(V).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τα παραπάνω διαγράμματα, τις συσχετίσεις των $Log(k_{st1})$ και $Log(1-z_t)$ ως προς Log(V) και δεδομένου ότι ο συντελεστής συσχέτισης R^2 είναι αρκετά ικανοποιητικός και στις δυο περιπτώσεις, εξάγονται οι τελικές τιμές της ειδικής αντίστασης κοπής k_{st1} και του όρου $(1-z_t)$, οι οποίες δίνονται συναρτήσει της ταχύτητας κοπής:

$$k_{st1} = 10^{1.9106 e^{-0.126 \log(V)}} \quad (4.37)$$

$$(1 - z_t) = V^{-0.014} 10^{0.0043} \quad (4.38)$$

Τέλος, από τη σχέση 4.36 και μέσω των σχέσεων 4.37 και 4.38 υπολογίζεται η δύναμη κοπής για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων κοπής, της πρόωσης s και της ταχύτητας κοπής V (Πίνακας 4.13).

Πίνακας 4.13: Υπολογισμός της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t μέσω του μοντέλου Kienzle-Victor και των πειραματικά προσδιορισμένων σταθερών K_{st1} και $(1 - z_t)$.

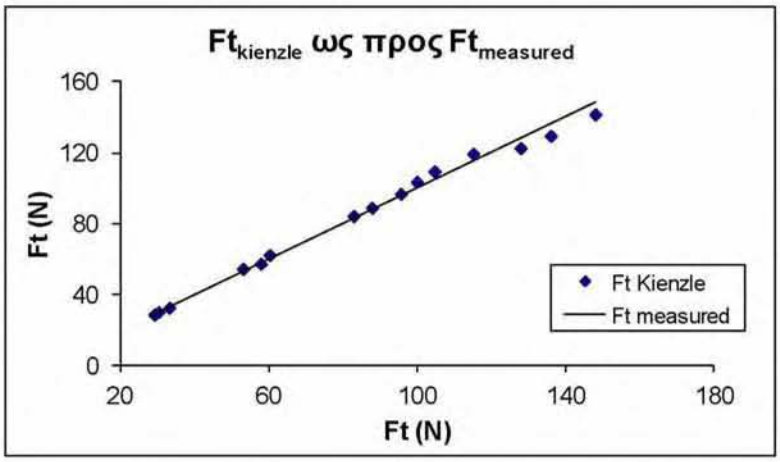
V m/min	s (mm/rev)	K_{st1} (daN/mm^2)	$(1 - z_t)$	$F_{t_Kienzle}$ (N)	ER_{Ft}	% ER_{Ft}
200	0,05	26,98	0,938	32,51	-0,61	1,84
200	0,1	26,98	0,938	62,27	2,03	3,37
200	0,16	26,98	0,938	96,76	1,20	1,26
200	0,2	26,98	0,938	119,28	4,20	3,65
200	0,24	26,98	0,938	141,52	-6,37	4,31
350	0,05	24,43	0,930	30,09	-0,15	0,50
350	0,1	24,43	0,930	57,36	-0,42	0,73
350	0,16	24,43	0,930	88,82	1,04	1,18
350	0,2	24,43	0,930	109,31	4,70	4,49
350	0,24	24,43	0,930	129,52	-6,41	4,72
500	0,05	22,97	0,926	28,69	-0,42	1,44
500	0,1	22,97	0,926	54,51	1,44	2,71
500	0,16	22,97	0,926	84,22	1,43	1,73
500	0,2	22,97	0,926	103,55	3,71	3,72
500	0,24	22,97	0,926	122,59	-5,23	4,09
			R^2:	**99,14%**	***Average:***	**2,65%**

Όπου: ER_{Ft} : *Το σφάλμα υπολογισμού της* F_t *ως προς τις πειραματικές τιμές*
% ER_{Ft} : *Το ποσοστιαίο σφάλμα υπολογισμού της* F_t *ως προς τις πειραματικές τιμές*
R^2 : *Συντελεστής προσδιορισμού της* F_t *ως προς τις πειραματικές τιμές*

Οι τιμές του συντελεστή προσδιορισμού R^2 και τα ποσοστιαία σφάλματα $\%ER_{Ft}$ των υπολογισμένων τιμών της δύναμης F_t υποδεικνύουν ότι η απόκλισή τους από τις πειραματικές μετρήσεις αυτής είναι αρκετά μικρή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τις τιμές του Πίνακα 4.13 κατασκευάζεται το ακόλουθο διάγραμμα (Σχήμα 4.16), όπου διακρίνεται γραφικά η απόκλιση των υπολογισμένων τιμών της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων.



Σχήμα 4.16: Η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής υπολογισμένη μέσω του ημι-εμπειρικού μοντέλου Kienzle-Victor ($Ft_{Kienzle}$) ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων ($Ft_{measured}$).

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζονται η δύναμη πρόωσης F_v και η δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r,. Σε αντιστοιχία με την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής, ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

- *Για την δύναμη πρόωσης*

$$F_v = \alpha k_{sv1} s^{(1-z_v)} \quad \text{(daN)} \qquad (4.39)$$

$$k_{sv1} = 10^{8.7381 e^{-0.947 \log(V)}} \qquad (4.40)$$

$$(1 - z_v) = V^{-0.2227} 10^{0.3961} \qquad (4.41)$$

- *Για την δύναμη απώθησης του εργαλείου*

$$F_r = \alpha k_{sr1} s^{(1-z_r)} \quad \text{(daN)} \qquad (4.42)$$

$$k_{sr1} = 10^{95,625 e^{-2.305 \log(V)}} \qquad (4.43)$$

$$(1 - z_r) = V^{-0.1893} 10^{0.3772} \qquad (4.44)$$

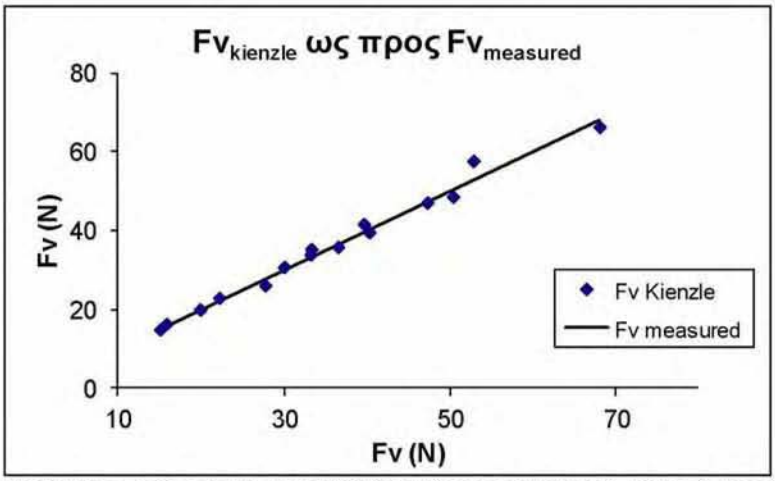
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των παραπάνω σχέσεων συνοψίζονται στους επόμενους πίνακες και στα διαγράμματα που ακολουθούν.

Πίνακας 4.14: Υπολογισμός της δύναμης πρόωσης F_v μέσω του μοντέλου Kienzle-Victor και των πειραματικά προσδιορισμένων σταθερών K_{sv1} και $(1 - z_v)$.

V m/min	s (mm/rev)	K_{sv1} (daN/mm^2)	$(1 - z_v)$	$F_{v_Kienzle}$ (N)	ER_{Fv}	% ER_{Fv}
200	0,05	9,89	0,765	20,00	0,13	0,65
200	0,1	9,89	0,765	33,99	0,84	2,53
200	0,16	9,89	0,765	48,69	1,48	3,13
200	0,2	9,89	0,765	57,76	4,99	9,46
200	0,24	9,89	0,765	66,40	-1,59	2,34
350	0,05	6,18	0,675	16,35	0,59	3,74
350	0,1	6,18	0,675	26,11	-1,57	5,67
350	0,16	6,18	0,675	35,87	-0,60	1,65
350	0,2	6,18	0,675	41,70	2,12	5,36
350	0,24	6,18	0,675	47,17	-3,15	6,26
500	0,05	4,83	0,624	14,89	-0,15	1,00
500	0,1	4,83	0,624	22,95	0,81	3,66
500	0,16	4,83	0,624	30,77	0,79	2,64
500	0,2	4,83	0,624	35,37	2,11	6,34
500	0,24	4,83	0,624	39,63	-0,59	1,47
			R^2:	**98,30%**	***Average:***	**3,73%**

Όπου: ER_{Fv} : *Το σφάλμα υπολογισμού της* F_v *ως προς τις πειραματικές τιμές*
% ER_{Fv} : *Το ποσοστιαίο σφάλμα υπολογισμού της* F_v *ως προς τις πειραματικές τιμές*
R^2 : *Συντελεστής προσδιορισμού της* F_v *ως προς τις πειραματικές τιμές*



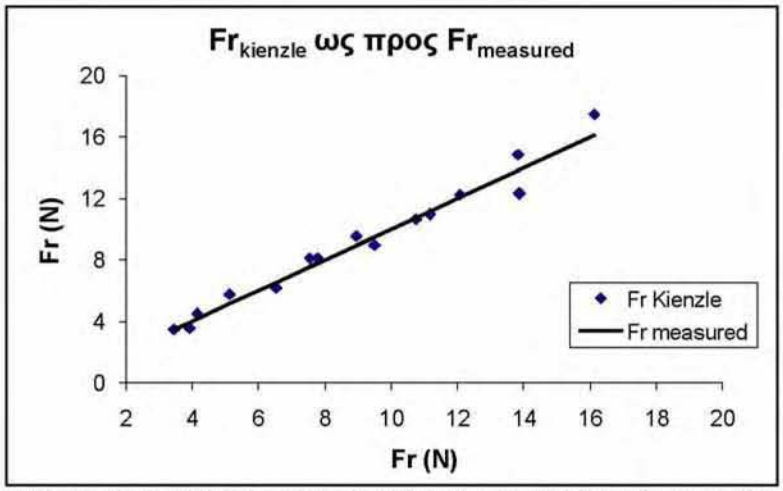
Σχήμα 4.17: Η δύναμη πρόωσης υπολογισμένη μέσω του ημι-εμπειρικού μοντέλου Kienzle-Victor ($Fv_{Kienzle}$) ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων ($Fv_{measured}$).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 4.15: Υπολογισμός της δύναμης απώθησης του εργαλείου F_r μέσω του μοντέλου Kienzle-Victor και των πειραματικά προσδιορισμένων σταθερών K_{sr1} και $(1 - z_r)$.

V m/min	s (mm/rev)	K_{sr1} (daN/mm^2)	$(1 - z_r)$	$F_{r_Kienzle}$ (N)	ER_{Fr}	% ER_{Fr}
200	0,05	3,04	0,874	4,43	0,30	7,26
200	0,1	3,04	0,874	8,13	0,60	7,97
200	0,16	3,04	0,874	12,26	0,19	1,57
200	0,2	3,04	0,874	14,90	1,06	7,66
200	0,24	3,04	0,874	17,48	1,36	8,44
350	0,05	1,89	0,786	3,58	-0,34	8,67
350	0,1	1,89	0,786	6,18	-0,35	5,36
350	0,16	1,89	0,786	8,95	-0,55	5,79
350	0,2	1,89	0,786	10,66	-0,09	0,84
350	0,24	1,89	0,786	12,31	-1,57	11,31
500	0,05	1,56	0,735	3,45	0,00	0,00
500	0,1	1,56	0,735	5,75	0,63	12,30
500	0,16	1,56	0,735	8,12	0,36	4,64
500	0,2	1,56	0,735	9,57	0,62	6,93
500	0,24	1,56	0,735	10,94	-0,23	2,06
			R^2:	**96,95%**	***Average:***	**6,05%**

Όπου: ER_{Fr} : *Το σφάλμα υπολογισμού της* F_r *ως προς τις πειραματικές τιμές*
% ER_{Fr} : *Το ποσοστιαίο σφάλμα υπολογισμού της* F_r *ως προς τις πειραματικές τιμές*
R^2 : *Συντελεστής προσδιορισμού της* F_r *ως προς τις πειραματικές τιμές*



Σχήμα 4.18: Η δύναμη απώθησης του εργαλείου υπολογισμένη μέσω του ημι-εμπειρικού μοντέλου Kienzle-Victor ($Fr_{Kienzle}$) ως προς τις πραγματικές τιμές των πειραματικών μετρήσεων ($Fr_{measured}$).

Οι τιμές των συντελεστών προσδιορισμού R^2 και τα χαμηλά ποσοστιαία σφάλματα των υπολογισμένων δυνάμεων μέσω των εμπειρικών μοντέλων Kienzle-Victor υποδεικνύουν ότι η συσχέτιση τους με τις πειραματικές μετρήσεις αυτών είναι αρκετά υψηλή.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4.4 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε ο υπολογισμός των δυνάμεων κοπής κατά την τόρνευση του PA66-GF30, μέσω των θεωρητικών και εμπειρικών σχέσεων που έχουν αναπτυχθεί για τα μέταλλα, προσμαρμόζοντάς τα στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού. Τα αποτελέσματα ως προς την αξιολόγηση αυτών των μοντέλων ήταν εξαιρετικά, καθώς επιτεύχθηκε πολύ υψηλός βαθμός συσχέτισης με τις πραγματικές μετρήσεις, με τον συντελεστή προσδιορισμού στις περισσότερες περιπτώσεις, να είναι υψηλότερος του 95% και το ποσοστιαίο σφάλμα της κάθε τιμής κάτω από 10%. Η υψηλή αυτή συσχέτιση καθιστά τα κατασκευασμένα μοντέλα ικανά για την μελλοντική πρόβλεψη των δυνάμεων κοπής σε ανάλογες συνθήκες και εύρος τιμών των παραγόντων.

Ανακεφαλαιώνοντας, για τον θεωρητικό υπολογισμό των δυνάμεων κοπής κατά την τόρνευση του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30 σε συνθήκες ορθογωνικής κοπής και σε εύρος τιμών s={0.05–0.24mm/rev} και V={200-500m/min} αποδείχθηκαν και προτείνονται οι εξής μέθοδοι:

- *Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω των προσαρμοσμένων σχέσεων της ορθογωνικής κοπής και της θεωρίας του Merchant:*

$$F_1 = \frac{A_1 \tau_s \cos(\rho - \gamma)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (4.10)$$

$$F_2 = \frac{A_1 \tau_s \sin(\rho - \gamma)}{\sin\varphi \cos(\varphi + \rho - \gamma)} \quad (4.11)$$

$$A_1 = b t_1 = s\alpha \quad (4.14)$$

$$\lambda = \frac{t_2}{t_1} \quad (4.16)$$

$$t_1 = s \sin\kappa \quad (4.12)$$

$$\varphi = tan^{-1} \frac{cos\,\gamma}{\lambda - sin\,\gamma} \quad (4.21)$$

$$\rho = 2(\delta - \varphi) + \gamma \quad (4.32)$$

$$\delta = 38{,}83° \quad (4.45)$$

$$\tau_s = 124{,}06MPa \quad (4.46)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

$$Y = -2{,}42\ 10^{-3} + 1{,}668\ S + 2\ 10^{-6}\ V - 0{,}5167\ S^2 - 2{,}5\ 10^{-4}\ S\ V \quad (4.47)^1$$

- *Υπολογισμός των δυνάμεων κοπής μέσω των προσαρμοσμένων σχέσεων της εμπειρικής μεθόδου* Kienzle-Victor:

  - *Για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής:*

$$F_t = a k_{st1} s^{(1-z_t)} \quad \text{(daN)} \qquad (4.34)$$

$$k_{st1} = 10^{1.9106 e^{-0.126 \log(V)}} \qquad (4.37)$$

$$(1 - z_t) = V^{-0.014} 10^{0.0043} \qquad (4.38)$$

  - *Για την δύναμη πρόωσης:*

$$F_v = \alpha k_{sv1} s^{(1-z_v)} \quad \text{(daN)} \qquad (4.39)$$

$$k_{sv1} = 10^{8.7381 e^{-0.947 \log(V)}} \qquad (4.40)$$

$$(1 - z_v) = V^{-0.2227} 10^{0.3961} \qquad (4.41)$$

  - *Για την δύναμη απώθησης του εργαλείου*

$$F_r = \alpha k_{sr1} s^{(1-z_r)} \quad \text{(daN)} \qquad (4.42)$$

$$k_{sr1} = 10^{95{,}625 e^{-2.305 \log(V)}} \qquad (4.43)$$

$$(1 - z_r) = V^{-0.1893} 10^{0.3772} \qquad (4.44)$$

[1] Η σχέση 4.45 διεξάγεται μέσω πειραματικού σχεδιασμού και στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων του t_2 συναρτήσει των s και V (Πίνακας 4.2) κατά αντίστοιχο τρόπο με τα στοχαστικά μοντέλα του 7ου κεφαλαίου και έχει συντελεστή συσχέτισης R^2=99.98% (Παράρτημα Δ). Η θεωρία του πειραματικού σχεδιασμού αναλύεται διεξοδικά στο 5ο κεφάλαιο.

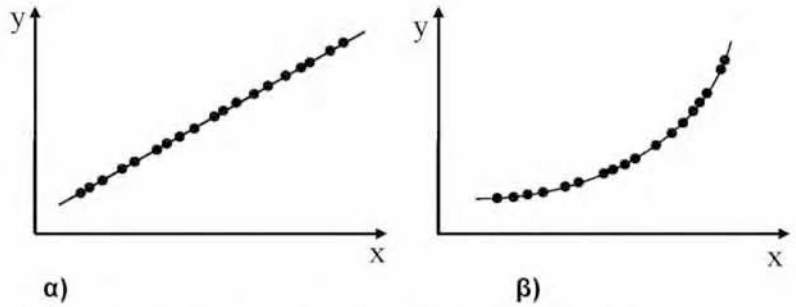
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 5: ΘΕΩΡΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

5.1 Προσδιοριστικά και Στοχαστικά συστήματα

Η μελέτη ενός φυσικού φαινομένου ή ενός τεχνικού συστήματος συνήθως επικεντρώνεται στο να προσδιοριστούν οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών[1] που το περιγράφουν, το χαρακτηρίζουν και το καθορίζουν. Όταν στο υπό μελέτη φαινόμενο ή σύστημα δεν υφίσταται αβεβαιότητα-τυχαιότητα, τότε ονομάζεται Αιτιοκρατικό ή Προσδιοριστικό[2] και δύναται να περιγραφεί από μαθηματικά καθοριστικά-προσδιοριστικά μοντέλα (deterministic models), με απόλυτη ακρίβεια. Η συναρτησιακή-προσδιοριστική σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών στην προκειμένη περίπτωση, είναι της μορφής y=f(x), μέσω της οποίας για κάθε τιμή της x μπορούμε να προβλέψουμε επακριβώς την τιμή της y. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα σημεία του διαγράμματος διασποράς βρίσκονται όλα πάνω στην καμπύλη που σχηματίζει η εξίσωση y=f(x) και όσες φορές και αν επαναληφθεί το πείραμα θέτοντας το x στο ίδιο επίπεδο (ίδια τιμή-συνθήκη), το y λαμβάνει πάντα την ίδια τιμή (Σχήμα 5.1).



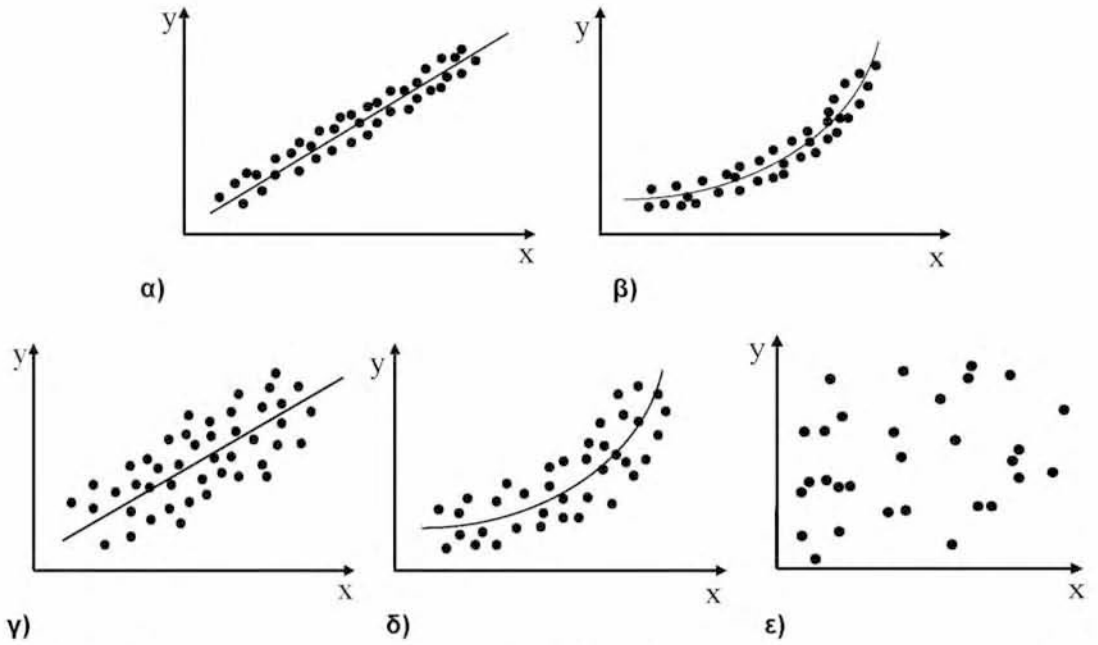
Σχήμα 5.1: α)Πλήρης γραμμική συσχέτιση, β)Πλήρης μη-γραμμική συσχέτιση

Στην πραγματικότητα όμως τα φαινόμενα και οι διαδικασίες περικλείουν σχεδόν πάντα τον παράγοντα της αβεβαιότητας-τυχαιότητας και δε μπορούν να εξηγηθούν επακριβώς με μαθηματικά καθοριστικά μοντέλα. Τα φαινόμενα αυτά ονομάζονται Τυχαία ή Στοχαστικά[3] και περιγράφονται μόνο

[1] Μεταβλητή είναι κάθε μετρήσιμο στοιχείο-παράμετρος που μεταβάλλεται ως προς το μέγεθός του κατά την διεξαγωγή-εξέλιξη μιας διεργασίας.
[2] Αιτιοκρατικό ή Προσδιοριστικό θεωρείται ένα φαινόμενο ή πείραμα όταν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εμφανίζεται ή εκτελείται καθορίζουν σύμφωνα με την αρχή της αιτιότητας το αποτέλεσμα.
[3] Τυχαίο ή Στοχαστικό θεωρείται ένα φαινόμενο ή πείραμα όταν οι συνθήκες κάτω από τις οποίες εμφανίζεται ή εκτελείται δεν καθορίζουν το αποτέλεσμα σύμφωνα με την αρχή της

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

πιθανοκρατικά (probabilistically), χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους (statistical methods). Οι μη προσδιοριστικές σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μεταβλητών κατά τη μελέτη των συγκεκριμένων συστημάτων, ονομάζονται στοχαστικές (stochastic). Στην περίπτωση αυτή αν επαναληφθεί το πείραμα πολλές φορές θέτοντας το x στο ίδιο επίπεδο, τότε η y θα λάβει ένα πλήθος διαφορετικών τιμών. Το διάγραμμα διασποράς στην προκειμένη περίπτωση, είναι ένα νέφος σημείων το οποίο πολλές φορές καθορίζει μια ιδεατή γραμμή, δίνοντας μια πρώτη ένδειξη της σχέσης που συνδέει τις δύο μεταβλητές. Η στοχαστική αυτή σχέση μεταξύ των δύο μεταβλητών είναι ισχυρή όταν τα σημεία του διαγράμματος διασποράς βρίσκονται κοντά στην ιδεατή γραμμή (Σχήμα 5.2α,β), ενώ σε αντίθετη περίπτωση η σχέση είναι ασθενής έως και μηδενική (Σχήμα 5.2γ-ε).



Σχήμα 5.2: α)Ισχυρή γραμμική συσχέτιση, β)Ισχυρή μη-γραμμική συσχέτιση, γ)Ασθενής γραμμική συσχέτιση, δ)Ασθενής μη-γραμμική συσχέτιση ε)Μηδενική συσχέτιση

αιτιότητας. Το αποτέλεσμα αποδίδεται στην «τύχη» και η έννοια του «τυχαίου» συνδέεται με το πολυσύνθετο και το περιορισμένο της γνώσης των αιτίων που προκαλούν το αποτέλεσμα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.2 Στατιστικές μέθοδοι

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στα τυχαία-στοχαστικά φαινόμενα και συστήματα το πρόβλημα της εκτίμησης και πρόβλεψης επιλύεται μόνο πιθανοκρατικά (probabilistically), χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους (statistical methods). Η θεωρία των πιθανοτήτων μελετάει τη μεταβλητότητα του αποτελέσματος ενός πειράματος (φαινομένου ή διεργασίας), για το οποίο το ακριβές αποτέλεσμα δεν είναι δυνατόν να προβλεφθεί με ακρίβεια (π.χ. με προσδιοριστική μαθηματική σχέση) (κεφ.5.1). Οι στατιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται, περιλαμβάνουν τη διαδικασία συλλογής των δεδομένων, τη συνοπτική και αποτελεσματική παρουσίασή τους και την στατιστική ανάλυσή τους με στόχο την ερμηνεία και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Έτσι, οι στατιστικές μέθοδοι ταξινομούνται στους εξής τρεις κλάδους [87]:

1. *Σχεδιασμός Πειράματος* (Design Of Experiment - DoE)

Στοχεύει στην ανάπτυξη μεθόδων για τη συλλογή δεδομένων μέσω της εκτέλεσης πειραμάτων[1].

2. *Περιγραφική Στατιστική (*Descriptive Statistics)

Ασχολείται με την ανάπτυξη μεθόδων για την παρουσίαση συνοπτικών στοιχείων και γραφημάτων με στόχο την αποτελεσματική περιγραφή των δεδομένων.

3. *Στατιστική Συμπερασματολογία (*Statistical Inference)

Στοχεύει στην ανάπτυξη μεθόδων για την ανάλυση των δεδομένων και την εξαγωγή συμπερασμάτων για τον πληθυσμό από τον οποίο προέρχονται.

[1] Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιείται επίσης και με δειγματοληψία (sampling) μέσω της παρατήρησης ενός συστήματος-φαινομένου, που αποτελεί ξεχωριστό πεδίο της στατιστικής. Η μέθοδος της δειγματοληψίας δεν θα απασχολήσει την παρούσα έρευνα, καθώς η συλλογή των δεδομένων θα γίνεται μέσω ελεγχόμενων πειραματικών διαδικασιών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.3 Σχεδιασμός πειράματος – Design of Experiment (DoE)

Τα φυσικά φαινόμενα-διεργασίες εξελίσσονται χωρίς την παρέμβαση του παρατηρητή, ο οποίος αρκείται στην καταγραφή των γεγονότων που τελούνται (παρατηρήσεις-δεδομένα). Αντίθετα, για να πραγματοποιηθεί ένα πείραμα, ο ερευνητής που θα το εκτελέσει καλείται να παρέμβει ενεργά σε αυτό, επιβάλλοντας συγκεκριμένες συνθήκες στις μεταβλητές που το καθορίζουν. Οι συνθήκες που επιλέγονται έχουν στόχο τη διαμόρφωση της πειραματικής διαδικασίας με τέτοιο τρόπο ώστε να διευκολύνεται η εξαγωγή συμπερασμάτων. Η οργανωμένη μεθοδολογία προσέγγισης μιας επιστημονικής έρευνας με την εκτέλεση των ανάλογων δοκιμών συγκροτεί τον Πειραματικό Σχεδιασμό (Experimental Design ή Design of Experiment - DoE). Ο πειραματικός σχεδιασμός περιλαμβάνει τεχνικές που συντελούν στην πραγματοποίηση ενός κατάλληλα επιλεγμένου αριθμού και συνδυασμού πειραμάτων, για τη διεξαγωγή ασφαλών στατιστικών συμπερασμάτων, που απώτερο στόχο έχουν τη βελτιστοποίηση (optimization) της υπό μελέτη διεργασίας [132][150].

Στόχος κάθε στατιστικού πειράματος είναι ο προσδιορισμός της επίδρασης των ανεξάρτητων ή ελεγχόμενων ή επεξηγηματικών μεταβλητών (independent ή input ή explanatory variable) στις εξαρτημένες μεταβλητές ή μεταβλητές απόκρισης (dependent ή response variable). Ανεξάρτητες λέγονται οι μεταβλητές των οποίων οι τιμές ελέγχονται, ώστε να προσδιοριστεί η επίδραση τους στην εξαρτημένη μεταβλητή. Οι ανεξάρτητες μεταβλητές ονομάζονται συνήθως παράγοντες (factors) και μπορεί να είναι είτε ποσοτικές[1] (quantitative) είτε ποιοτικές[2] (κατηγορηματικές – qualitative ή categorical) [137][119]. Αντίθετα, εξαρτημένες λέγονται οι μεταβλητές που εκφράζουν το αποτέλεσμα του πειράματος για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών. Να σημειωθεί εδώ, ότι ο όρος εξαρτημένη μεταβλητή αναφέρεται στην περίπτωση που η εξάρτηση οφείλεται σε σχέση αιτιότητας μεταξύ των μεταβλητών και όχι σε μια απλή συμμεταβολή

[1] Ποσοτική λέγεται η μεταβλητή της οποίας οι τιμές έχουν αριθμητικές ιδιότητες και εκφράζονται με μία μονάδα μέτρησης.
[2] Ποιοτική ή κατηγορηματική λέγεται η μεταβλητή που αναφέρεται σε κάποιο ποιοτικό χαρακτηριστικό (κατάσταση ή ιδιότητα) και οι τιμές της δεν είναι αριθμοί.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

τους, η οποία μπορεί να οφείλεται σε εξάρτηση αυτών από παράγοντες εκτός του συστήματος παρατήρησης[1].

Η χρήση του πειραματικού σχεδιασμού έχει καθιερωθεί ως μια αξιόπιστη πρακτική διεξαγωγής πειραμάτων, τόσο κατά την ανάπτυξη νέων προϊόντων, όσο και κατά την τροποποίηση των υπαρχόντων. Η ανάπτυξη επίσης των πληροφορικών συστημάτων και η ενσωμάτωση των πειραματικών σχεδιασμών σε λογισμικά στατιστικής έχει οδηγήσει στην περαιτέρω διάδοσή τους και στην διευκόλυνση της χρήσης τους. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι οι μελέτες που κάνουν χρήση πειραματικού σχεδιασμού είναι αποτελεσματικότερες, αποδοτικότερες και πιο οικονομικές από τις παραδοσιακές COST[2] μεθόδους (COST – Changing One Single variable or factor at a Time ή OFAT/OVAT – One Factor/Variable At a Time) [132][134][31].

Ο πειραματικός σχεδιασμός περιλαμβάνει μια σειρά εργασιών όπως είναι ο ορισμός του πειραματικού χώρου[3] ή σχεδιαστικός πίνακας (design matrix) [136], ο ορισμός της σειράς των δοκιμών και η κωδικοποίηση[4] (coding) των επιπέδων[5] (levels) των παραγόντων, όταν αυτοί είναι ποιοτικές μεταβλητές [136]. Σε κάθε περίπτωση όμως είναι απαραίτητο να ακολουθούνται οι εξής δύο βασικές αρχές:

• Η επανάληψη (replication).

Εξασφαλίζει την εγκυρότητα και την ορθότητα των μετρήσεων αλλά και την ανεξάρτητη εκτίμηση του πειραματικού σφάλματος.

---

[1] Η δυσκολία διάκρισης των ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών συναντάται συνήθως σε μη πειραματικές έρευνες (δειγματοληψίες), καθώς καμία μεταβλητή δεν είναι ελεγχόμενη αλλά είναι όλες τυχαίες.

[2] Παραδοσιακή μέθοδος βελτιστοποίησης μιας διεργασίας που επιτυγχάνεται με τη μελέτη της επίδρασης στο εξεταζόμενο σύστημα, ενός μόνο παράγοντα κάθε φορά, ενώ οι τιμές των υπολοίπων παραμένουν σταθερές.

[3] Πειραματικός χώρος είναι η διάταξη υπό μορφή πίνακα του συνόλου των συνδυασμών των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών, για τους οποίους θα εκτελεστούν τα πειράματα.

[4] Κωδικοποίηση ή κανονικοποίηση (normalization) είναι η διαδικασία κατά την οποία, οι τιμές μιας ποιοτικής μεταβλητής αντικαθίστανται από αριθμητικές τιμές που καθορίζονται από τον ερευνητή, ώστε να ποσοτικοποιηθούν, προκειμένου να επιτευχθεί η ανάλυση παλινδρόμησης. Η νέα αριθμητική διακριτή μεταβλητή που προκύπτει, καλείται ψευδομεταβλητή (dummy variable) και στην περίπτωση των δυο επιπέδων η κωδικοποίηση συνήθως γίνεται με τους αριθμούς (0,1), για τρία επίπεδα με τους αριθμούς (-1,0,1) κ.ο.κ.

[5] Επίπεδα λέγονται οι διάφορες τιμές που λαμβάνει ένας παράγοντας, οι οποίες είναι προκαθορισμένες κατά την πειραματική διαδικασία.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

• Η εκτέλεση των πειραμάτων σε τυχαία σειρά (randomization).
Εξασφαλίζει την κανονική και ανεξάρτητη κατανομή των πειραματικών σφαλμάτων.

Ανάλογα με τον τρόπο διεξαγωγής τους, οι πειραματικοί σχεδιασμοί διακρίνονται σε αυτούς που εφαρμόζονται σε διαδοχικά στάδια (sequential design) και σε αυτούς που εφαρμόζονται σε ένα στάδιο (simultaneous design). Οι κυριότεροι, τέλος, μέθοδοι πειραματικού σχεδιασμού είναι ο παραγοντικός σχεδιασμός (factorial design), ο σχεδιασμός simplex, ο σχεδιασμός μειγμάτων (mixture design), ο ευνοϊκός σχεδιασμός (optimal design) και ο σχεδιασμός διασταύρωσης (Cross-Over design). Στην συγκεκριμένη διατριβή, ως μέθοδος για την διεξαγωγή των πειραμάτων, επιλέγεται ο παραγοντικός σχεδιασμός, καθώς αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο με βάση τη φύση των εξεταζόμενων παραγόντων και των μετρούμενων μεγεθών, αλλά και του γενικότερου επιθυμητού στόχου, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Η ανάλυση, στη συνέχεια, των αποτελεσμάτων (δεδομένων) που προκύπτουν από τη διενέργεια του πειραματικού σχεδιασμού, πραγματοποιείται είτε με τη χρήση γραφικών μεθόδων, όταν χρησιμοποιούνται διαγράμματα και γραφικές παραστάσεις (κεφ.5.4), είτε με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων όταν χρησιμοποιούνται μαθηματικά πρότυπα (στοχαστικά μοντέλα) (κεφ.5.5).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.3.1 Παραγοντικός σχεδιασμός – Factorial Design

Ο παραγοντικός σχεδιασμός συντελεί στην πραγματοποίηση ενός μικρού αριθμού πειραμάτων ικανού ώστε, τα επίπεδα των υπό μελέτη παραγόντων να εξετάζονται σε συνδυασμό μεταξύ τους με στόχο την αναγνώριση των σημαντικών παραγόντων και των αλληλεπιδράσεων αυτών [136]. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν έναντι άλλων στατιστικών μεθόδων (π.χ. Λατινικά και Ελληνολατινικά Τετράγωνα), είναι ότι δεν χρειάζεται οι παράγοντες να κινούνται σε ίδιο αριθμό επιπέδων και επίσης, δεν επηρεάζονται από τυχόν αλληλεπίδραση (interaction) μεταξύ τους, η οποία και λαμβάνεται υπόψη στη στατιστική ανάλυση. Ο όρος αλληλεπίδραση, αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο οι ανεξάρτητες μεταβλητές συνδυάζονται για να επηρεάσουν μια εξαρτημένη μεταβλητή και όχι στην μεταξύ τους σχέση, καθώς είναι δυνατόν να αλληλεπιδρούν ανεξάρτητα από το κατά πόσο είναι μεταξύ τους στατιστικά συσχετισμένες. Τα παραγοντικά πειράματα αναλύουν την επίδραση δύο ή περισσότερων παραγόντων στην εξαρτημένη μεταβλητή, με σκοπό την εκτίμηση ενός στοχαστικού μοντέλου.

Όταν εξετάζονται όλοι οι δυνατοί συνδυασμοί παραγόντων (k) και επιπέδων (x), οι σχεδιασμοί αυτοί ονομάζονται πλήρεις παραγοντικοί σχεδιασμοί (Full Factorial Design - FD) και ο αριθμός των πειραμάτων τους είναι ίσος με x^k [1]. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου εξετάζεται μόνο ένα μέρος των δυνατών συνδυασμών, οι σχεδιασμοί ονομάζονται κλασματικοί (Fractional Factorial Design - FFD) [85][165][164]. Οι σχεδιασμοί αυτοί εφαρμόζονται στις περιπτώσεις όπου ο αριθμός των πειραμάτων για την εκτέλεση ενός πλήρη παραγοντικού σχεδιασμού θα ήταν τόσο μεγάλος ώστε να είναι απαγορευτικός από άποψη πόρων, χρόνου, προσωπικού κ.τ.λ. Ονομάζονται κλασματικοί καθώς αποτελούν πεπερασμένα κλάσματα ($1/x^r$) ενός πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού[2], γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση του αριθμού των απαιτούμενων πειραμάτων. Επιτρέπουν, δηλαδή, με μικρότερο αριθμό πειραμάτων να μελετηθούν οι ίδιοι παράγοντες ενός πλήρους παραγοντικού πειράματος. Η χρήση κλασματικού

[1] Στην περίπτωση που είναι k παράγοντες με διαφορετικό αριθμό επιπέδων x_1, x_2, x_3,..., x_k, ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων είναι το γινόμενο των επιπέδων τους: $x_1x_2x_3x_k$.
[2] Όπου r είναι ο βαθμός της κλασματοποίησης και x^{k-r} είναι ο ολικός αριθμός των απαιτούμενων δοκιμών για k εξεταζόμενους παράγοντες.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

σχεδιασμού θα πρέπει να πραγματοποιείται κατόπιν μελέτης του υπό εξέταση συστήματος-φαινομένου με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς υπάρχει ο κίνδυνος λόγω της «θυσίας» κάποιας πληροφορίας κατά τον αρχικό σχεδιασμό με την παράληψη σημαντικών παραγόντων ή συνδυασμού των επιπέδων αυτών, να οδηγηθεί η στατιστική ανάλυση σε λανθασμένα συμπεράσματα.

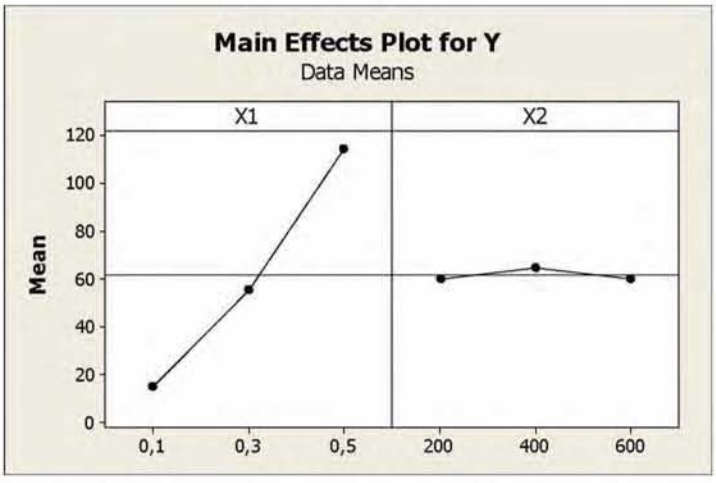
Οι πλήρεις παραγοντικοί σχεδιασμοί κατηγοριοποιούνται σε αυτούς που μελετάνε δύο μόνον επίπεδα των παραγόντων, τα οποία ονομάζονται "ακραία" και σε αυτούς που μελετάνε περισσότερα επίπεδα. Επίσης, εάν ο αριθμός των επιπέδων είναι ο ίδιος για όλους τους παράγοντες τότε ο σχεδιασμός ονομάζεται συμμετρικός (symmetric), ενώ στην αντίθετη περίπτωση καλείται ασύμμετρος (asymmetric) [160].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.4 Περιγραφική στατιστική – Descriptive Statistics

Η περιγραφή των δεδομένων που προκύπτουν από τη διενέργεια ενός πειραματικού σχεδιασμού και η εξαγωγή ανάλογων συμπερασμάτων, πραγματοποιείται μέσω της περιγραφικής στατιστικής (descriptive statistics). Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για την πραγματοποίηση αυτής της γραφικής ανάλυσης, περιλαμβάνουν τα γραφήματα των κύριων επιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων.

Το μέγεθος της αλλαγής μίας απόκρισης εξαιτίας της μεταβολής των επιπέδων των υπό μελέτη παραγόντων ονομάζεται επίδραση (effect) [119]. Ως κύρια (main) ορίζεται η επίδραση που έχει ο κάθε παράγοντας ξεχωριστά, στις τιμές των διαφόρων επίπεδων του. Μέσω των διαγραμμάτων των κύριων επιδράσεων, γίνεται διακριτός ο τρόπος με τον οποίο επιδρά κάθε επίπεδο των παραγόντων στα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή, αν επιφέρουν αύξηση ή μείωση στις τιμές αυτών και ενδεικτικά σε ποιό βαθμό. Οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα, αναφέρονται σε όλες τις δυνατές, ανά δυο, διαφορές μεταξύ των αναμενόμενων τιμών των επιπέδων του παράγοντα. Αν όλες αυτές οι διαφορές είναι ίσες με το μηδέν, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη κύριων επιδράσεων του παράγοντα. Στο διάγραμμα κυρίων επιδράσεων (Σχήμα 5.3), σε κάθε επίπεδο των παραγόντων, αντιστοιχίζεται ο μέσος όρος των παρατηρήσεων της απόκρισης που τα αναλογούν:



Σχήμα 5.3: Γραφική απεικόνιση κυρίων επιδράσεων: Ισχυρή επίδραση από τον παράγοντα X1 και ασθενής επίδραση από τον παράγοντα X2.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

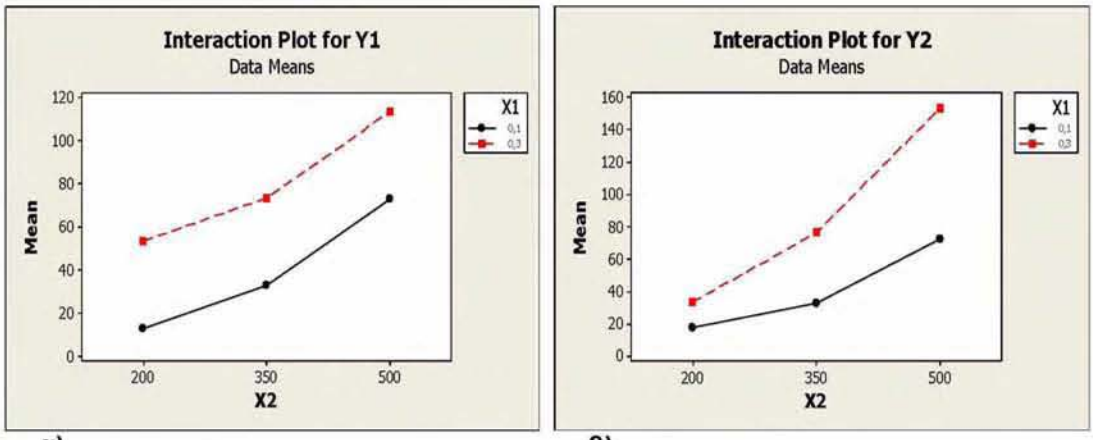
Στο παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτό από την συμπεριφορά της γραμμής των κύριων επιδράσεων του παράγοντα x_1, ότι η επίδρασή του είναι πολύ σημαντική στις τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής y. Αντίθετα, η σχεδόν παράλληλη συμπεριφορά της γραμμής των κύριων επιδράσεων του παράγοντα x_2, φανερώνει ότι η επίδρασή του στην απόκριση y δεν είναι σημαντική.

Στην περίπτωση που η επίδραση που έχει ένας παράγοντας στην απόκριση δεν είναι ίδια στα διαφορετικά επίπεδα ενός άλλου παράγοντα, τότε οι δυο αυτοί παράγοντες αλληλεπιδρούν και το φαινόμενο ονομάζεται αλληλεπίδραση (interaction) [132]. Μια αλληλεπίδραση γενικότερα, λέγεται ότι λαμβάνει χώρα όταν οι επιδράσεις δύο ή και περισσότερων παραγόντων αλληλεξαρτώνται [136][119]. Συνεπώς, η μετρούμενη επίδραση των αλληλεπιδρόμενων παραγόντων, εξαρτάται τόσο από τα βασικά τους επίπεδα, όσο και από το βαθμό της αλληλεπίδρασής τους. Ανάλογα με το κατά πόσο το αποτέλεσμα στην μεταβολή της απόκρισης θεωρείται επιθυμητό[1] ή όχι, το φαινόμενο της αλληλεπίδρασης περιγράφεται ως συνεργιστικό ή ανταγωνιστικό (synergism ή antagonism) [136][160].

Η αλληλεπίδραση μεταξύ δυο παραγόντων, αναφέρεται στο κατά πόσο οι κύριες επιδράσεις ενός παράγοντα, είναι ίδιες σε όλα τα επίπεδα ενός δεύτερου παράγοντα. Αν αυτές είναι ίδιες, τότε αναφερόμαστε σε μη ύπαρξη αλληλεπίδρασης. Στα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων στον x-άξονα βρίσκονται τα επίπεδα των παραγόντων και στον y-άξονα οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής. Αν οι ευθείες των παραγόντων είναι παράλληλες δεν υφίσταται αλληλεπίδραση, ενώ αν οι ευθείες τέμνονται σε κάποιο σημείο του σχεδιαστικού χώρου ή έχουν την τάση να τμηθούν σε προέκταση αυτού, τότε είναι βέβαιο ότι οι παράγοντες αλληλεπιδρούν [134][160]. Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται παραδείγματα αλληλεπίδρασης μεταξύ των επιδράσεων δύο παραγόντων x_1 και x_2 στις αποκρίσεις y_1 και y_2.

[1] Η επίδραση της αλληλεπίδρασης στην απόκριση μπορεί να χαρακτηρισθεί ως θετική (επιθυμητή) ή αρνητική (μη επιθυμητή).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



α) β)

Σχήμα 5.4: Γραφική απεικόνιση της αλληλεπίδρασης δύο παραγόντων α)Μηδενική αλληλεπίδραση β)Ισχυρή αλληλεπίδραση

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5 Στατιστική συμπερασματολογία – Statistical Inference

Με τον όρο «στατιστική συμπερασματολογία» (statistical inference) αναφερόμαστε στις μεθόδους που συντελούν στην ολοκληρωμένη στατιστική ανάλυση των δεδομένων ενός πειραματικού συστήματος και στην εξαγωγή συμπερασμάτων για τον ευρύτερο πληθυσμό από τον οποίο προέρχονται. Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιείται με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων χρησιμοποιώντας μαθηματικά πρότυπα. Τα μαθηματικά πρότυπα ονομάζονται στοχαστικά μοντέλα και αποτελούν αλγεβρικές εξισώσεις που καθορίζουν την εξάρτηση των αποκρίσεων από τις ανεξάρτητες μεταβλητές. Η εκτίμηση των στοχαστικών μοντέλων συντελείται μέσω μαθηματικών μεθόδων (συνήθως της μεθόδου των ελαχίστων τετραγώνων), αναλύοντας τις παρατηρήσεις της εξαρτημένης μεταβλητής y στα επιλεγμένα επίπεδα των παραγόντων. Οι στατιστικές τεχνικές που έχουν αναπτυχθεί για τον σκοπό αυτό αναφέρονται ως Ανάλυση Παλινδρόμησης (Regression Analysis). Αντίστοιχα, το στοχαστικό μοντέλο που προκύπτει ονομάζεται Μοντέλο Παλινδρόμησης (Regression Model) [135].

5.5.1 Ανάλυση Παλινδρόμησης – Regression Analysis

Τα πραγματικά φαινόμενα και οι διαδικασίες κατά κύριο λόγο, περικλείουν τον παράγοντα της αβεβαιότητας-τυχαιότητας και οι μη προσδιοριστικές σχέσεις που αναπτύσσονται μεταξύ των μεταβλητών, δε μπορούν να εξηγηθούν επακριβώς με μαθηματικά καθοριστικά μοντέλα (κεφ.5.1). Με την ανάλυση παλινδρόμησης καθορίζεται η συναρτησιακή σχέση εξάρτησης της απόκρισης με τις ανεξάρτητες μεταβλητές έτσι ώστε, να διαμορφωθεί και εκτιμηθεί το βέλτιστο στοχαστικό μοντέλο προσαρμογής. Η γενική μορφή ενός θεωρητικού μοντέλου παλινδρόμησης για μια απόκριση y με ανεξάρτητες μεταβλητές τις $x_1, x_2, \ldots, x_k$ είναι η εξής:

$$y = f(x_i) + \varepsilon \quad , \; i=1,\ldots,k \qquad (5.1)$$

όπου ε είναι το σφάλμα παλινδρόμησης (regression error).

Το σφάλμα παλινδρόμησης ε μπορεί να θεωρηθεί ότι «περιέχει» όλους τους παράγοντες που επηρεάζουν την τιμή των y και δεν συμμετέχουν στην κατασκευή του μοντέλου. Η $f(x_1,\ldots,x_k)$ ονομάζεται συνάρτηση παλινδρόμησης

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

της y επί των $x_1,...,x_k$ (regression function of y on $x_1,...,x_k$). Η απλούστερη και η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μορφή αυτής της συνάρτησης είναι η γραμμική[1], οπότε προκύπτει αντίστοιχα το γραμμικό μοντέλο παλινδρόμησης. Όταν η απόκριση y περιγράφεται από μία ανεξάρτητη μεταβλητή (δηλαδή k=1) το μοντέλο ονομάζεται απλό (simple), ενώ όταν περιγράφεται από περισσότερες (k>1) ονομάζεται πολλαπλό (multiple) ή πολυμεταβλητό (multivariable). Βάσει αυτού του διαχωρισμού διακρίνονται τα εξής γραμμικά μοντέλα παλινδρόμησης:

- Το μοντέλο της απλής γραμμικής παλινδρόμησης (linear regression)

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \qquad (5.2)$$

όπου στη γενική περίπτωση που συμπεριλαμβάνονται μη γραμμικοί όροι (δυνάμεις του x), μετατρέπεται στο μοντέλο της πολυωνυμικής γραμμικής παλινδρόμησης k βαθμού (k^{th} degree polynomial regression model):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + ... + \beta_k x^k + \varepsilon \qquad (5.3)$$

- Το μοντέλο της γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης (linear multiple regression model).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \varepsilon \qquad (5.4)$$

Το μοντέλο της πολλαπλής παλινδρόμησης δύναται να περιέχει και μη γραμμικούς όρους, όπως οι δυνάμεις των ανεξάρτητων μεταβλητών και οι όροι αλληλεπίδρασής τους. Στη γενική του μορφή, ένα τέτοιο μοντέλο λέγεται μοντέλο προσθετικής πολλαπλής παλινδρόμησης[2] (additive multiple regression model). Για την απλή περίπτωση των δύο ανεξάρτητων

[1] Όταν οι παράμετροι εμπλέκονται μη-γραμμικά, είναι ενδεχομένως δυνατόν με κατάλληλους μετασχηματισμούς να διαμορφωθεί το μοντέλο σε προσθετική μορφή. Τέτοια μοντέλα αποτελούν τη γενίκευση της εγγενής γραμμικής συνάρτησης παλινδρόμησης με περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές. Στις περιπτώσεις που η μορφή του μοντέλου δεν απλοποιείται, οι παράμετροι υπολογίζονται με μεθόδους μη-γραμμικής βελτιστοποίησης. Επίσης, υπάρχουν και άλλες κλάσεις μοντέλων που δεν έχουν κάποια γνωστή αναλυτική μορφή αλλά δίνονται ως άθροισμα διαφορετικών βασικών συναρτήσεων, όπως τα νευρωνικά δίκτυα (neural networks) ή και μη παραμετρικά μοντέλα που κάνουν εκτίμηση ή πρόβλεψη για τις δεδομένες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών χρησιμοποιώντας από τα υπάρχοντα δεδομένα αυτά που είναι γειτονικά, όπως τα μοντέλα πυρήνων (kernels).

[2] Με τον όρο «προσθετικής» παλινδρόμησης τονίζεται ότι όλοι οι όροι του μοντέλου συμπεριλαμβάνονται αθροιστικά σ' αυτό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

μεταβλητών x_1, x_2, τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα προσθετικής πολλαπλής παλινδρόμησης είναι τα εξής:

- Το *γραμμικό πρότυπο πρώτης τάξης*:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \varepsilon \qquad (5.5)$$

το οποίο ονομάζεται μοντέλο γραμμικής πολλαπλής παλινδρόμησης (linear multiple regression model) και η επίδραση των δύο παραγόντων στην εξαρτημένη μεταβλητή είναι προσθετική.

- Το *γραμμικό πρότυπο δεύτερης τάξης*

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \varepsilon \qquad (5.6)$$

το οποίο ονομάζεται πρότυπο πολυωνυμικής γραμμικής παλινδρόμησης δευτέρου βαθμού (2^{nd} degree polynomial regression model) και οι παράγοντες επηρεάζουν την απόκριση προσθετικά και τετραγωνικά.

- Το *γραμμικό πρότυπο αλληλεπίδρασης*:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1 x_2 + \varepsilon \qquad (5.7)$$

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

- Το *γραμμικό πρότυπο αλληλεπίδρασης δεύτερης τάξης*:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \varepsilon \qquad (5.8)$$

το οποίο ονομάζεται Πλήρες Τετραγωνικό (Full Quadratic) και οι παράγοντες x_1 και x_2 επιδρούν στη απόκριση y προσθετικά, πολλαπλασιαστικά και τετραγωνικά.

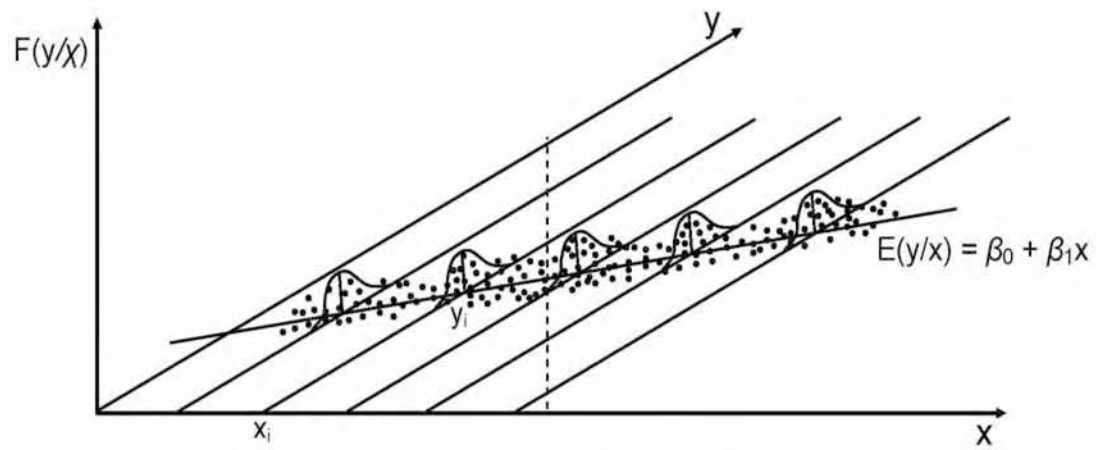
Το καταλληλότερο πρότυπο ως προς την περιγραφή της σχέσης εξάρτησης μεταξύ των εξεταζόμενων μεταβλητών, μπορεί να βρεθεί πραγματοποιώντας ελέγχους υποθέσεων. Οι παράμετροι β_0, β_1, β_2, ... , β_k των μαθηματικών μοντέλων της ανάλυσης παλινδρόμησης, εκτιμούνται κατά κύριο λόγο με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, που θα παρουσιαστεί εκτενώς στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5.2 Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων – Method of Least Squares

Η εκτίμηση των παραμέτρων ενός μαθηματικού μοντέλου παλινδρόμησης, πραγματοποιείται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, που αποτελεί την πιο γνωστή και ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο προσαρμογής [118][93]. Όταν η μέθοδος εφαρμόζεται σε γραμμικά μοντέλα ονομάζεται Απλή ή Συνήθης ή Γραμμική Μέθοδος Ελαχίστων Τετραγώνων (Linear ή Ordinary Least Squares – OLS). Η συγκεκριμένη μεθοδολογία στηρίζεται στην ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων του στοχαστικού μοντέλου παλινδρόμησης.

Κατά την στοχαστική εξάρτηση των μεταβλητών x και y μέσω της γραμμικής σχέσης $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$ (μοντέλο απλής γραμμικής παλινδρόμησης), για κάθε τιμή x_i του x, τα αντίστοιχα y_i είναι τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κάποια επίσης τυχαία κατανομή. Οι μέσες τιμές των y για κάθε x ($E(y/x=x_i)$), βρίσκονται πάνω σε μια ευθεία $E(y/x) = \beta_0 + \beta_1 x$, που ονομάζεται «πληθυσμιακή ευθεία παλινδρόμησης» (Σχήμα 5.5).

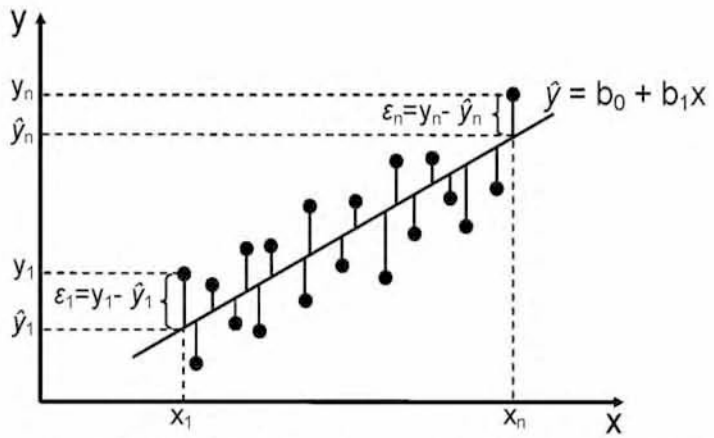


Σχήμα 5.5: Οι κατανομές των y_i για κάθε x_i και η πληθυσμιακή ευθεία παλινδρόμησης.

Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, προσδιορίζεται μια εκτίμηση $\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x$ της ευθείας $E(y/x) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x$, έτσι ώστε, η κατακόρυφη απόσταση των πραγματικών τιμών της y από την ευθεία $\hat{y} = b_0 + b_1 x$, να είναι η ελάχιστη. Η απόσταση αυτή ονομάζεται σφάλμα ελαχίστων τετραγώνων (σφάλμα παλινδρόμησης) ή απλά υπόλοιπο (residual). Οι παράμετροι b_0 και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

b_1 αποτελούν τις εκτιμήτριες των β_0 και β_1 αντίστοιχα και η εκτίμηση $\hat{y} = b_0 + b_1 \cdot x$ ονομάζεται «εκτίμηση ελαχίστων τετραγώνων» ή «ευθεία ελαχίστων τετραγώνων» από τη μέθοδο προσδιορισμού της (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6: Οι αποκλίσεις των τιμών της y από τις εκτιμήσεις $\hat{y}$ της ευθείας ελαχίστων τετραγώνων

Για την απλούστευση των υπολογισμών και την επίτευξη λύσης, γίνονται οι ακόλουθες υποθέσεις:

1) Η ανεξάρτητη μεταβλητή x και το σφάλμα ε δεν συσχετίζονται.
2) Για κάθε τιμή του x που ανήκει σε ένα συγκεκριμένο διάστημα, η μέση τιμή του ε είναι μηδέν:

$$\mathrm{E}(\varepsilon) = 0$$

3) Η διασπορά του ε είναι ανεξάρτητη από την τιμή του x, δηλαδή είναι μια σταθερή ποσότητα:

$$Var(\varepsilon) = s_e^2$$

Μέσω της σχέσης $y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$ προκύπτει ότι και η διασπορά της εξαρτημένης μεταβλητής y παραμένει σταθερή για κάθε τιμή του x, καθώς οι παράμετροι β_0 και β_1 είναι σταθερές και τα x γνωστά. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται Ομοσκεδαστικότητα ή Σταθερότητα Διασποράς (Homoscedasticity - Variance Stability)[1]:

$$Var(y \mid x) \equiv s_{y|x}^2 = s_e^2$$

[1] Στην αντίθετη περίπτωση που η διασπορά της y (ή του σφάλματος ε) μεταβάλλεται με το x, η ιδιότητα ονομάζεται ετεροσκεδαστικότητα (heteroscedasticity).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

4) Η συνδιασπορά μεταξύ δύο σφαλμάτων είναι μηδέν, δηλαδή, τα σφάλματα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους:

$$\mathrm{cov}[\varepsilon(\mathrm{i})\varepsilon(\mathrm{j})]=0$$

5) Για κάθε τιμή του x η κατανομή του y και κατά συνέπεια του σφάλματος ε είναι κανονική[1].

Η εκτίμηση των b_0 και b_1 με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων δεν προϋποθέτει σταθερή διασπορά και κανονική κατανομή της εξαρτημένης μεταβλητής y για κάθε τιμή της ανεξάρτητης μεταβλητής x. Όταν όμως ισχύουν οι δύο αυτές συνθήκες οι εκτιμήτριες ελαχίστων τετραγώνων b_0 και b_1 είναι οι εκτιμήτριες μεγίστης πιθανοφάνειας και επομένως έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες εκτιμητριών. Επίσης, η υπόθεση της κανονικής κατανομής απαιτείται για να υπολογιστούν παραμετρικά διαστήματα εμπιστοσύνης για τις παραμέτρους και για να πραγματοποιηθούν παραμετρικοί στατιστικοί έλεγχοι. Αν η κατανομή της y δεν είναι κανονική, μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος μετασχηματισμός που την κάνει κανονική (συνήθως ο λογάριθμος).

Είναι προφανές ότι η εκτίμηση των b_0 και b_1 θα πρέπει να γίνει έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι ποσότητες ε_i, που αποτελούν τη διαφορά της πραγματικής τιμής y_i από την προσαρμοσμένη τιμή (εκτίμηση) $\hat{y}_i$ [2] (σφάλμα της παλινδρόμησης), για κάθε δεδομένη τιμή του x. Για να πραγματοποιηθεί αυτό, αναζητούνται οι τιμές των b_0 και b_1 για τις οποίες ελαχιστοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων[3] $\sum \varepsilon_i^2$ (sum of squared residuals):

$$\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i \Rightarrow \varepsilon_i = y_i - b_0 - b_1 x_i \Rightarrow$$

$$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \qquad (5.9)$$

[1] Οι υποθέσεις για γραμμική σχέση και σταθερή διασπορά αποτελούν χαρακτηριστικά πληθυσμών με κανονική κατανομή.

[2] Στην πραγματικότητα η τιμή $\hat{y}_i$, είναι εκτίμηση της μέσης τιμής $E(y/x=x_i)$.

[3] Χρησιμοποιείται το άθροισμα των τετραγώνων των υπολοίπων, καθώς η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος $\Sigma\varepsilon_i$ δεν μπορεί να αποτελεί ασφαλές κριτήριο επιλογής, επειδή τα αρνητικά υπόλοιπα ε_i θα αφαιρούν αντίστοιχες θετικές ποσότητες κατά το υπολογισμό του αθροίσματος.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

$$\min_{b_0 b_1} \sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 \quad \text{ή} \quad \min_{b_0 b_1} \sum_{i=1}^{n} (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \qquad (5.10)$$

Παραγωγίζοντας την (5.9) ως προς b_0 και b_1 και θέτοντας τις μερικές παραγώγους ίσες με το μηδέν, εξάγεται ένα σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους, που ονομάζεται «σύστημα των κανονικών εξισώσεων» (system of normal equations):

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial \sum_{i=1}^{n} (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2}{\partial b_0} &= 0 \\ \frac{\partial \sum_{i=1}^{n} (y_i - b_0 - b_1 x_i)^2}{\partial b_1} &= 0 \end{aligned}\right\} \qquad \begin{aligned} \sum_{i=1}^{n} y_i &= n b_0 + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_i \\ \sum_{i=1}^{n} x_i y_i &= b_0 \sum_{i=1}^{n} x_i + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 \end{aligned} \qquad (5.11)$$

Η επίλυση του συστήματος των κανονικών εξισώσεων (5.11) δίνει:

$$b_1 = \frac{n\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)\left(\sum_{i=1}^{n} y_i\right)}{n\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} x_i\right)^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i y_i - n\bar{x}\bar{y}}{\sum_{i=1}^{n} x_i^2 - n\bar{x}^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2} \qquad (5.12)$$

$$b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x}$$

Όπου:

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i$$

Από την σχέση 5.12 λαμβάνονται οι εκτιμήσεις b_0 και b_1, μέσω των σχέσεων της δειγματικής συνδιασποράς s_{XY} και της δειγματικής διασποράς του x, s_x^2:

$$b_1 = \frac{s_{xy}}{s_x^2} \ \kappa\alpha\iota \ b_0 = \bar{y} - b_1 \bar{x} \qquad (5.13)$$

Όπου:

$$s_{xy} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

$$s_x^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$$

Επομένως, η ευθεία ελαχίστων τετράγωνων της ευθείας παλινδρόμησης μέσω του δείγματος των παρατηρήσεων είναι:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

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

$$\hat{y} = \bar{y} + \frac{s_{xy}}{s_x^2}(x - \bar{x}) \qquad (5.14)$$

Από την τελευταία σχέση είναι προφανές ότι η ευθεία ελαχίστων τετραγώνων διέρχεται από το σημείο $(\bar{x}, \bar{y})$.

Στη γενική περίπτωση όπου συμπεριλαμβάνονται μη γραμμικοί όροι, δηλαδή οι δυνάμεις του x, $y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + ... + \beta_k x^k + \varepsilon$ (μοντέλο της πολυωνυμικής γραμμικής παλινδρόμησης k βαθμού), ο υπολογισμός των εκτιμητριών $b_0, b_1, \ldots, b_k$ των $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_k$ αντίστοιχα γίνεται, επίσης, με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Αν και η πολυωνυμική συνάρτηση παλινδρόμησης είναι μη γραμμική ως προς την ανεξάρτητη μεταβλητή x, είναι γραμμική ως προς τους συντελεστές $\beta_0, \beta_1, \ldots, \beta_k$. Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων για το διμεταβλητό δείγμα μεγέθους n των (x, y) είναι:

$$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - (b_0 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + ... + b_k x_i^k))^2 \qquad (5.15)$$

Η παραγώγιση της σχέσης 5.15 ως προς κάθε παράμετρο $b_0, b_1, \ldots, b_k$ και η εξίσωση με μηδέν, δίνει ένα σύστημα k+1 εξισώσεων με k+1 αγνώστους (σύστημα κανονικών εξισώσεων - system of normal equations), από το οποίο υπολογίζονται οι εκτιμήσεις $b_0, b_1, \ldots, b_k$:

$$\sum_{i=1}^{n} y_i = n b_o + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_i + b_2 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + \ldots + b_k \sum_{i=1}^{n} x_i^k$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i y_i = b_0 \sum_{i=1}^{n} x_i + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^{n} x_i^3 + \ldots + b_k \sum_{i=1}^{n} x_i^{k+1}$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_i^k y_i = b_0 \sum_{i=1}^{n} x_i^k + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_i^{k+1} + b_2 \sum_{i=1}^{n} x_i^{k+2} + \ldots + b_k \sum_{i=1}^{n} x_i^{2k}$$

Υπολογίζοντας τις παραμέτρους $b_0, b_1, \ldots, b_k$ προκύπτει η εκτίμηση ελαχίστων τετράγωνων:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_i + b_2 x_i^2 + ... + b_k x_i^k \qquad (5.16)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στην περίπτωση, στη συνέχεια του πολλαπλού γραμμικού μοντέλου $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + ... + \beta_k x_k + \varepsilon$ (πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση με k ανεξάρτητες μεταβλητές), το μοντέλο είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους $\beta_0,\beta_1,...,\beta_k$, και ο υπολογισμός των εκτιμητριών $b_0,b_1,...,b_k$ γίνεται επίσης με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων είναι:

$$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - (b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + ... + b_k x_{ki}))^2 \qquad (5.17)$$

Το σύστημα κανονικών εξισώσεων που προκύπτει από τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης αυτής ως προς κάθε παράμετρο $b_0,b_1,...,b_k$ είναι το ακόλουθο:

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{n} y_i = n b_0 + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_{1i} + b_2 \sum_{i=1}^{n} x_{2i} + ... + b_k \sum_{i=1}^{n} x_{ki} \\
&\sum_{i=1}^{n} x_{1i} y_i = b_0 \sum_{i=1}^{n} x_{1i} + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2 + b_2 \sum_{i=1}^{n} x_{1i} x_{2i} + ... + b_k \sum_{i=1}^{n} x_{1i} x_{ki} \\
&\quad\vdots \qquad\qquad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\quad \vdots \qquad\qquad\quad \vdots \\
&\sum_{i=1}^{n} x_{ki} y_i = b_0 \sum_{i=1}^{n} x_{ki} + b_1 \sum_{i=1}^{n} x_{1i} x_{ki} + b_2 \sum_{i=1}^{n} x_{2i} x_{ki} + ... + b_k \sum_{i=1}^{n} x_{ki}^2
\end{aligned}$$

Από το παραπάνω σύστημα k+1 εξισώσεων με k+1 αγνώστους υπολογίζονται οι εκτιμήσεις $b_0,b_1,...,b_k$ και η εκτίμηση ελαχίστων τετράγωνων είναι η ακόλουθη:

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 x_{1i} + b_2 x_{2i} + ... + b_k x_{ki} \qquad (5.18)$$

Τέλος, στην περίπτωση της προσθετικής πολλαπλής παλινδρόμησης και συγκεκριμένα στο πρότυπο της γραμμικής αλληλεπίδρασης δεύτερης τάξης δυο παραγόντων με αλληλεπίδραση (full quadratic) $y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \varepsilon$, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα που ακολουθούν (κεφ.7, κεφ.8, κεφ.9), το μοντέλο είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους $\beta_0,\beta_1,...,\beta_5$, και ο υπολογισμός των εκτιμητριών $b_0,b_1,...,b_5$ γίνεται επίσης με την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Το άθροισμα των τετραγώνων των σφαλμάτων είναι:

$$\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^{n} (y_i - (b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_1^2 + b_4 x_2^2 + b_5 x_1 x_2))^2 \qquad (5.19)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Το σύστημα κανονικών εξισώσεων που προκύπτει από τις μερικές παραγώγους της συνάρτησης αυτής ως προς κάθε παράμετρο $b_0,b_1,\ldots,b_k$ είναι το ακόλουθο:

$$\sum_{i=1}^{n} y_i = nb_o + b_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i} + b_2\sum_{i=1}^{n} x_{2i} + b_3\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2 + b_4\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^2 + b_5\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{1i}y_i = b_0\sum_{i=1}^{n} x_{1i} + b_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2 + b_2\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i} + b_3\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^3 + b_4\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}^2 + b_5\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{2i}y_i = b_0\sum_{i=1}^{n} x_{2i} + b_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i} + b_2\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^2 + b_3\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i} + b_4\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^3 + b_5\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}^2$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2y_i = b_0\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2 + b_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^3 + b_2\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i} + b_3\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^4 + b_4\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i}^2 + b_5\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^3x_{2i}$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^2y_i = b_0\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^2 + b_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}^2 + b_2\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^3 + b_3\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i}^2 + b_4\sum_{i=1}^{n} x_{2i}^4 + b_5\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}^3$$

$$\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}y_i = b_0\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i} + b_1\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i} + b_2\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}^2 + b_3\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^3x_{2i} + b_4\sum_{i=1}^{n} x_{1i}x_{2i}^3 + b_5\sum_{i=1}^{n} x_{1i}^2x_{2i}^2$$

Από το σύστημα των 6 εξισώσεων με 6 αγνώστους υπολογίζονται οι εκτιμήσεις $b_0,b_1,\ldots,b_5$, έτσι ώστε η εκτίμηση ελαχίστων τετράγωνων να είναι η ακόλουθη:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1x_2 \qquad (5.20)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5.3 Τυπικό σφάλμα και διασπορά σφαλμάτων

Η μέση απόκλιση μεταξύ της πραγματικής και της εκτιμούμενης τιμής της εξαρτημένης μεταβλητής, ονομάζεται τυπικό σφάλμα της εκτίμησης (standard error of the estimate), συμβολίζεται με s και δίνεται από τον τύπο:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-k-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad (5.21)$$

Όπου: n ο αριθμός των πειραμάτων
k ο αριθμός των παραγόντων στο στατιστικό μοντέλο

Εάν το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης είναι μικρό τότε οι παρατηρούμενες και οι εκτιμούμενες τιμές δε διαφέρουν πολύ και η εκτίμηση της παλινδρόμησης δίνει μια καλή περιγραφή της σχέσης μεταξύ των x και y. Στην αντίθετη περίπτωση που το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης είναι μεγάλο τότε η προσαρμογή της παλινδρόμησης δεν θα είναι καλή. Είναι φανερό, ότι το τυπικό σφάλμα της εκτίμησης, είναι ένα μέτρο της διασποράς των (x_i ,y_i) γύρω από την εκτίμηση των ελαχίστων τετραγώνων (εκτίμηση της διασποράς των σφαλμάτων), με αποτέλεσμα να έχει ιδιότητες ανάλογες με αυτές της τυπικής απόκλισης[1]. Η διασπορά ή διακύμανση (variance) των σφαλμάτων, προσδιορίζει το βαθμό μεταβλητότητας της y γύρω από την εξίσωση της παλινδρόμησης, δίνεται από το τετράγωνο του τυπικού σφάλματος και συμβολίζεται με s^2:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{n-k-1} \qquad (5.22)$$

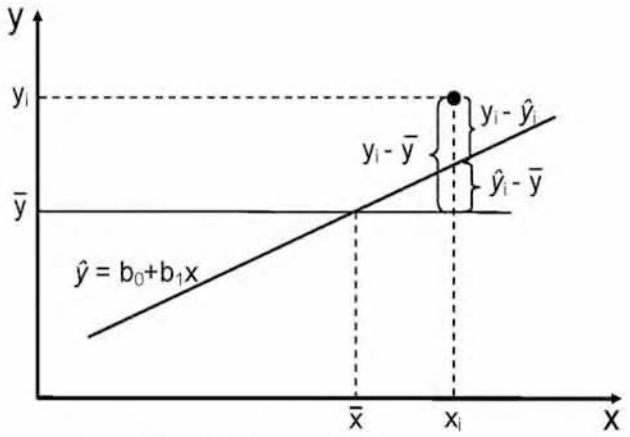
[1] Η τυπική απόκλιση εκφράζει την μεταβλητότητα ενός δείγματος γύρω από τη μέση τιμή του.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5.4 Συντελεστής προσδιορισμού – Coefficient of determination

Η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων εξασφαλίζει ότι η εκτίμηση $\hat{y}_i$ είναι η καλύτερη δυνατή, με την έννοια ότι τα πραγματικά δεδομένα y_i έχουν το μικρότερο δυνατό άθροισμα τετραγωνικών αποκλίσεων από αυτήν. Οι αποκλίσεις όμως ως απόλυτες τιμές των υπολοίπων ε_i μπορεί να είναι από μόνες τους μεγάλες ή μικρές. Είναι, επομένως, απαραίτητο να μπορεί να μετρηθεί η ακρίβεια της προσαρμογής σε κάθε περίπτωση. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να αναλυθεί η μεταβλητότητα των δεδομένων y_i. Από την προφανή σχέση $y_i - \bar{y} = (y_i - \hat{y}_i) + (\hat{y}_i - \bar{y})$ (Σχήμα 5.7), μπορεί εύκολα να προκύψει αλγεβρικά ότι:

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (5.23)$$



Σχήμα 5.7: Γραφική συσχέτιση των πραγματικών y_i, των εκτιμήσεων $\hat{y}_i$ και του δειγματοληπτικού μέσου $\bar{y}$

Η προηγούμενη σχέση 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 $\bar{y}$ (μέση τιμή των πειραματικών μετρήσεων). Το άθροισμα αυτό είναι ένα μέτρο της ολικής μεταβλητότητας των δεδομένων y_i, ονομάζεται ολικό άθροισμα τετραγώνων (Sum of Squares Total) ή ολική μεταβλητότητα (total variation) και συμβολίζεται με SST:

$$SST = \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \qquad (5.24)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης 5.23 είναι το άθροισμα των τετραγώνων των αποκλίσεων των προσαρμοσμένων τιμών $\hat{y}_i$ από τη δειγματική μέση τιμή $\bar{y}$, ονομάζεται άθροισμα τετραγώνων παλινδρόμησης (Sum of Squares due to Regression) και συμβολίζεται με SSR. Το άθροισμα SSR εκφράζει το μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων (της ολικής μεταβλητότητας - SST) που έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο, δηλαδή που οφείλεται στην παλινδρόμηση:

$$SSR = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \qquad (5.25)$$

Τέλος, ο δεύτερος όρος στο δεξιό μέλος της εξίσωσης 5.23 είναι το άθροισμα τετραγώνων των υπολοίπων $\varepsilon_i = y_i - \hat{y}_i$ και ονομάζεται άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων ή υπόλοιπο μεταβλητότητας (residual variation). Συμβολίζεται με SSE (Sum of Squares due to Error) και εκφράζει το μέρος του ολικού αθροίσματος τετραγώνων που δεν εξηγείται από την προσαρμογή της παλινδρόμησης:

$$SSE = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \qquad (5.26)$$

Με βάση τους προηγούμενους συμβολισμούς η σχέση (5.23) παίρνει τη μορφή:

$$SST = SSR + SSE \qquad (5.27)$$

Η ποιότητα της προσαρμογής της παλινδρόμησης είναι καλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσό της μεταβλητότητας των $\hat{y}_i$ που έχει ερμηνευτεί από το πρότυπο, δηλαδή όσο πλησιέστερα στη μονάδα βρίσκεται ο λόγος SSR/SST. Ο λόγος αυτός καλείται πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού (multiple coefficient of determination) ή απλά συντελεστής προσδιορισμού, συμβολίζεται με R^2 και επειδή οι τρεις ποσότητες της εξίσωσης (5.27) είναι αθροίσματα τετραγώνων, θα είναι πάντα θετικός:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \qquad (5.28)$$

Από την σχέση ορισμού του συντελεστή προσδιορισμού προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις υπολογισμού του:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (5.29)$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{SST - SSE}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \quad (5.30)$$

Επειδή στην πολλαπλή παλινδρόμηση η τιμή του συντελεστή προσδιορισμού R^2 αυξάνεται όταν προστίθεται ένας νέος όρος στο μοντέλο (π.χ. μια ανεξάρτητη μεταβλητή, ένας μη γραμμικός όρος, μια αλληλεπίδραση κ.τ.λ.), χρησιμοποιείται ένας συντελεστής προσδιορισμού που έχει "διορθωθεί" λαμβάνοντας υπόψη των συνολικό αριθμό των όρων, δηλαδή, τον αριθμό των παραμέτρων που εκτιμώνται. Η ποσότητα αυτή ονομάζεται προσαρμοσμένος πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού, R^2_{adj} (adjusted multiple coefficient of determination *ή* R^2 adjusted) και χρησιμοποιείται, κυρίως, ως μέτρο σύγκρισης δύο μοντέλων παλινδρόμησης με διαφορετικό αριθμό όρων. Συνήθως, αν σε ένα μοντέλο παλινδρόμησης προστεθεί ένας νέος όρος ή ακόμα και μια μεταβλητή που δεν συνεισφέρουν σημαντικά στην ερμηνεία της μεταβλητότητας των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής, η τιμή του R^2_{adj} ελαττώνεται. Ο διορθωμένος συντελεστής προσδιορισμού υπολογίζεται από τον τύπο:

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-k-1}\right) \cdot (1 - R^2) \quad (5.31)$$

Όπου: n ο αριθμός των παρατηρήσεων
k ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5.5 Ανάλυση διακύμανσης – Analysis of Variance (ANOVA)

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης που εξάγονται από την ανάλυση παλινδρόμησης και τη μαθηματική μέθοδο προσαρμογής (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων), συνοψίζονται σε έναν πίνακα που είναι γνωστός ως πίνακας Ανάλυσης Διασποράς ή Διακύμανσης (Analysis Of Variance – ANOVA). Στον πίνακα της ανάλυσης διακύμανσης παρατίθενται ποσότητες όπως το ολικό άθροισμα τετραγώνων SST, το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης SSR, το άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων SSE και οι βαθμοί ελευθερίας. Στο γενικό παράδειγμα που το γραμμικό μοντέλο προσαρμογής της ανάλυσης παλινδρόμησης έχει k παραμέτρους (coefficients), δηλαδή, συντελεστές των όρων του μοντέλου που περιλαμβάνουν τις ανεξάρτητες μεταβλητές (παράγοντες, αλληλεπιδράσεις αυτών κ.τ.λ.), ο πίνακας της ανάλυσης διακύμανσης είναι ο εξής (Πίνακας 2.1):

Πίνακας 5.1: Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) του γραμμικού μοντέλου με k όρους.

Πηγή Μεταβλητότητας Source	**Βαθμοί Ελευθερίας DF**	**Άθροισμα Τετραγώνων SS**	**Μέσο Τετράγωνο MS**	**F-test**
Παλινδρόμηση Regression	k	$SSR = \sum_{i=1}^{n} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$MSR = \frac{SSR}{k}$	$\frac{MSR}{MSE}$
Σφάλμα Error	n – k – 1	$SSE = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2$	$MSE = \frac{SSE}{n-k-1}$	
Σύνολο Total	n – 1	$SST = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$		

Όπου: k *ο αριθμός των παραμέτρων του μοντέλου*
n *ο αριθμός των παρατηρήσεων*

Η ανάπτυξη της μεθοδολογίας της ανάλυσης διακύμανσης οφείλεται στον θεμελιωτή της σύγχρονης στατιστικής επιστήμης, άγγλο στατιστικό Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962) και οδηγεί στον ορισμό του ελέγχου F (F-test) που ορίζεται ως εξής:

$$F = \frac{MSR}{MSE} \qquad (5.32)$$

Το MSR εκφράζει το μέσο άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης, δηλαδή το συνολικό σφάλμα παλινδρόμησης SSR διαιρεμένο με τους βαθμούς ελευθερίας του και το MSE αποτελεί το μέσο άθροισμα τετραγώνων

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

των σφαλμάτων, που υπολογίζεται με την διαίρεση του συνολικού τετραγωνικού σφάλματος SSE με τους βαθμούς ελευθερίας του[1] (Πίνακας 5.1).

Οι βαθμοί ελευθερίας (degrees of freedom - DF) γενικότερα αφορούν το ελάχιστο σύνολο μεταβλητών που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της κατάστασης ενός συστήματος. Επίσης, εξαρτώνται από τους περιορισμούς που επιβάλλονται και συγκεκριμένα ο αριθμός τους ελαττώνεται όσο περισσότεροι είναι οι περιορισμοί, καθώς σε αυτούς μεταφέρεται ένα μέρος της συνολικής πληροφορίας. Για ένα σύνολο δεδομένων με n παρατηρήσεις, κάθε παρατήρηση περιέχει και μια ξεχωριστή πληροφορία, με αποτέλεσμα να συνιστά και έναν βαθμό ελευθερίας επί συνόλου n. Περιγράφοντας το σύστημα μέσω του μοντέλου παλινδρόμησης, ένας βαθμός ελευθερίας αφορά τον σταθερό όρο της εξίσωσης με αποτέλεσμα να απομένουν (n-1) για το σύνολο (Total) (Πίνακας 5.1). Επίσης, οι βαθμοί ελευθερίας της παλινδρόμησης (Regression), αφορούν τον αριθμό k των άγνωστων παραμέτρων του μοντέλου (συντελεστές κάθε όρου) που πρέπει να υπολογιστούν για να οριστεί το μοντέλο, ο καθένας εκ των οποίων συνιστά και έναν βαθμό ελευθερίας επί συνόλου k. Αυτό που απομένει αφορά το σφάλμα (Error) της παλινδρόμησης, για το οποίο είναι προφανές ότι οι βαθμοί ελευθερίας θα είναι ότι απομένει από την αφαίρεση των βαθμών ελευθερίας της παλινδρόμησης k από τους βαθμούς ελευθερίας του συνόλου (n-1) (Πίνακας 5.1).

Συνήθως το άθροισμα τετραγώνων της παλινδρόμησης SSR υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε παράμετρο του μοντέλου, έτσι ώστε να μπορεί να υπολογιστεί για κάθε έναν ξεχωριστά ο έλεγχος F, ο οποίος απαιτείται για τον προσδιορισμό της επιρροής που έχουν στο σύστημα. Έτσι, η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) για ένα στοχαστικό μοντέλο που περιλαμβάνει δυο ποσοτικούς παράγοντες A, B και την αλληλεπίδρασή τους AB, θα έχει ως εξής:

[1] Όπως προκύπτει εξ ορισμού του, το μέσο άθροισμα τετραγώνων των σφαλμάτων MSE ισούται με την διασπορά των σφαλμάτων (κεφ.5.5.3 σχέση 5.22)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 5.2: Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) για μοντέλο με 2 ποσοτικούς παράγοντες (A, B) και την αλληλεπίδραση αυτών (AB).

Source	DF	SS	MS	F	P-value	Perc.%
Regr.	3	SSR	$MSR = \frac{SSR}{3}$	$\frac{MSR}{MSE}$		
A	1	SS_A	$MS_A = \frac{SS_A}{DF_A} = \frac{SS_A}{1}$	$\frac{MS_A}{MSE}$		$\frac{SS_A}{SST}\%$
B	1	SS_B	$MS_B = \frac{SS_B}{DF_B} = \frac{SS_B}{1}$	$\frac{MS_B}{MSE}$	(1)	$\frac{SS_B}{SST}\%$
AB	1	SS_{AB}	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{DF_{AB}} = \frac{SS_{AB}}{1}$	$\frac{MS_{AB}}{MSE}$		$\frac{SS_{AB}}{SST}\%$
Error	n-4	SSE	$MSE = \frac{SSE}{DF_{ERROR}} = \frac{SSE}{n-4}$			
Total	n-1	SST				

Όπου: SS_A, SS_B, SS_{AB} *τα επιμέρους αθροίσματα τετραγώνων κάθε παραμέτρου:* $SSR=SS_A+SS_B+SS_{AB}$
n *ο αριθμός των παρατηρήσεων*

Στην περίπτωση που η ανεξάρτητη μεταβλητή *B* θα είναι ποιοτική και επομένως διακριτή (discrete) και όχι συνεχής, στην κατασκευή του μοντέλου θα επιδρά με κάθε επίπεδο ξεχωριστά, με αποτέλεσμα να συμμετέχει στην ανάλυση διακύμανσης με b-1 βαθμούς ελευθερίας, όπου b ο αριθμός των επιπέδων της. Έτσι, για ένα στοχαστικό μοντέλο με δυο παράγοντες A, B και την αλληλεπίδρασή τους AB, όπου η μεταβλητή B είναι ποιοτική με b επίπεδα, η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) θα έχει ως εξής:

Πίνακας 5.3: Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) για μοντέλο με ένα ποσοτικό παράγοντα (A), ένα ποιοτικό παράγοντα (B) και την αλληλεπίδραση αυτών (AB).

Source	DF	SS	MS	F	P-value	Perc.%
A	1	SS_A	$MS_A = \frac{SS_A}{1}$	$\frac{MS_A}{MSE}$		$\frac{SS_A}{SST}\%$
B	b-1	SS_B	$MS_B = \frac{SS_B}{b-1}$	$\frac{MS_B}{MSE}$	(1)	$\frac{SS_B}{SST}\%$
AB	b-1 [(2)]	SS_{AB}	$MS_{AB} = \frac{SS_{AB}}{(b-1)}$	$\frac{MS_{AB}}{MSE}$		$\frac{SS_{AB}}{SST}\%$
Error	$DF_{tot}-(DF_A+DF_B+DF_{AB})$	SSE	$MS_E = \frac{SSE}{DF_{Error}}$			
Total	n-1	SST				

Όπου: b *ο αριθμός των επιπέδων του παράγοντα B*
n *ο αριθμός των παρατηρήσεων*

[1] Οι p-value κάθε όρου του μοντέλου προσδιορίζονται από τα F μέσω πινάκων.
[2] Οι βαθμοί ελευθερίας της αλληλεπίδρασης AB είναι όσο και το γινόμενο των βαθμών ελευθερίας του παράγοντα A με αυτούς του B.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Με τον τρόπο αυτό υπολογίζεται ο έλεγχος F (F-test) για κάθε όρο του στοχαστικού μοντέλου και για κάθε περίπτωση ανεξάρτητων μεταβλητών, γεγονός που αποδίδει την σημαντικότητα του καθενός. Από τον έλεγχο F υπολογίζονται οι τιμές των p-value (προσδιορίζονται από τα F μέσω πινάκων) (Πίνακας 5.2 και Πίνακας 5.3). Η τιμή του p-value παίρνει τιμές μεταξύ του 0 και 1 (alpha-levels [0-1]) και συνήθως ζητείται να είναι μικρότερη του 0.05, δηλαδή το προκαθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας (maximum acceptable level of risk) να είναι 5%. Αυτό σημαίνει ότι, οι όροι του μοντέλου που έχουν τιμή του p-value μικρότερη του 0,05, συνεισφέρουν σημαντικά στην προσαρμογή της παλινδρόμησης. Στην αντίθετη περίπτωση, οι αντίστοιχοι όροι συνηθίζεται να απορρίπτονται με αποτέλεσμα να απλοποιείται το μοντέλο και να αυξάνεται ο προσαρμοσμένος πολλαπλός συντελεστής προσδιορισμού, R^2_{adj} (κεφ.5.5.4). Τέλος, στον πίνακα ANOVA, στην στήλη Perc.% υπολογίζεται η επί τοις εκατό ποσοστιαία επίδραση του κάθε όρου του στοχαστικού μοντέλου στην απόκριση, μέσω του παρακάτω γινομένου (Πίνακας 5.2 και Πίνακας 5.3):

$$Perc.\% = \frac{SS}{SST}\% \qquad (5.33)$$

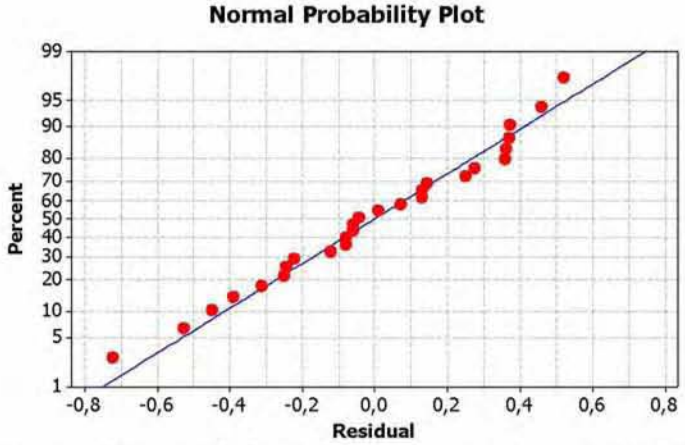
Η τιμή του Perc.% αποτελεί μια ξεκάθαρη αριθμητική απόδοση της επίδρασης του κάθε όρου του μοντέλου στην απόκριση, η οποία προσφέρεται για συγκρίσεις της σημαντικότητας μεταξύ των παραγόντων ή της αλληλεπίδρασης αυτών. Είναι προφανές ότι το άθροισμα των Perc.% του συνόλου των όρων θα ισούται με το 100%.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5.6 Έλεγχος Καταλληλότητας του Μοντέλου – Γραφήματα καταλοίπων

Σύμφωνα με την ανάλυση παλινδρόμησης, ξέρουμε ότι οι παρατηρήσεις μας περιγράφονται επαρκώς από το μοντέλο $y = f(x_i)+\varepsilon_i$, και με τις προϋποθέσεις ότι τα σφάλματα (ή κατάλοιπα) ε_i είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και κατανέμονται κανονικά με μέσο 0 και διακύμανση άγνωστη αλλά σταθερή s^2. Ο έλεγχος ισχύς αυτών των προϋποθέσεων, δηλαδή ο έλεγχος καταλληλότητας του μοντέλου, ανιχνεύεται σχετικά εύκολα από την γραφική μελέτη των διαγραμμάτων των καταλοίπων (residual plots).

Το σημαντικότερο, ίσως, από όλα τα διαγράμματα που κατασκευάζονται για τα κατάλοιπα, είναι το διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot) (Σχήμα 5.8), δηλαδή, το διάγραμμα που δείχνει κατά πόσο τα κατάλοιπα της εκτιμούμενης εξίσωσης ακολουθούν την κανονική κατανομή.



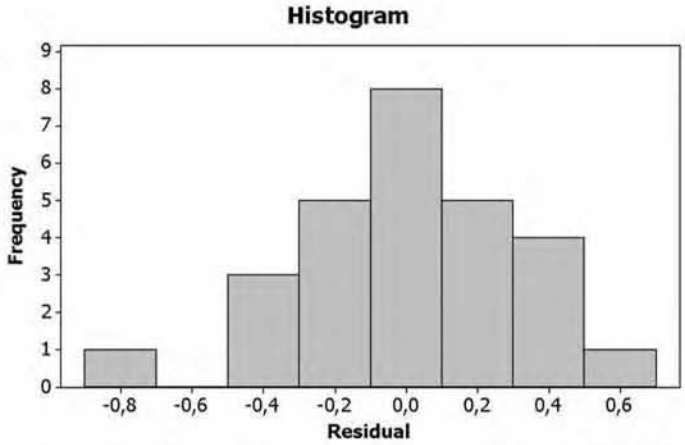
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας των καταλοίπων (Normal Probability Plot).

Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος αναγράφονται οι τιμές των καταλοίπων, ενώ στον κάθετο άξονα είναι το ποσοστό εμφάνισής τους. Σύμφωνα με το διάγραμμα, για να ακολουθούν τα κατάλοιπα (κουκκίδες) κανονική κατανομή, θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στη κεντρική γραμμή. Αν συμπίπτουν με αυτή, η κατανομή θα είναι απόλυτα κανονική.

Η υπόθεση της κανονικότητας μπορεί να ελεγχθεί εναλλακτικά, με το ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων[1] (Histogram of the Residual) (Σχήμα 5.9), που παρουσιάζεται παρακάτω, όπου διακρίνεται γραφικά η συνθήκη της κανονικότητας.

[1] Χρησιμοποιείται συνήθως σε περίπτωση που ο αριθμός των παρατηρήσεων είναι αρκετά μεγάλος (n>100).

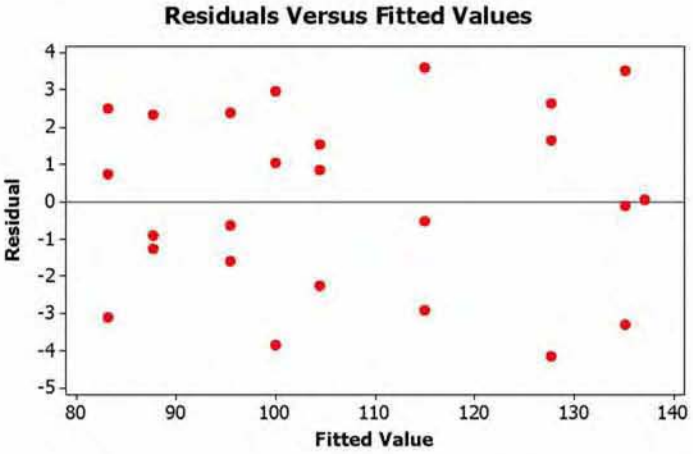
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 5.9: Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram of the Residual).

Στον οριζόντιο άξονα του διαγράμματος αναγράφονται οι τιμές των καταλοίπων, ενώ στον κάθετο άξονα είναι η συχνότητα εμφάνισής τους.

Για τον έλεγχο της ανεξαρτησίας των καταλοίπων και της σταθερότητας της διακύμανσής τους, χρησιμοποιείται το διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (Plot of Residuals Versus Fitted Values) (Σχήμα 5.10).



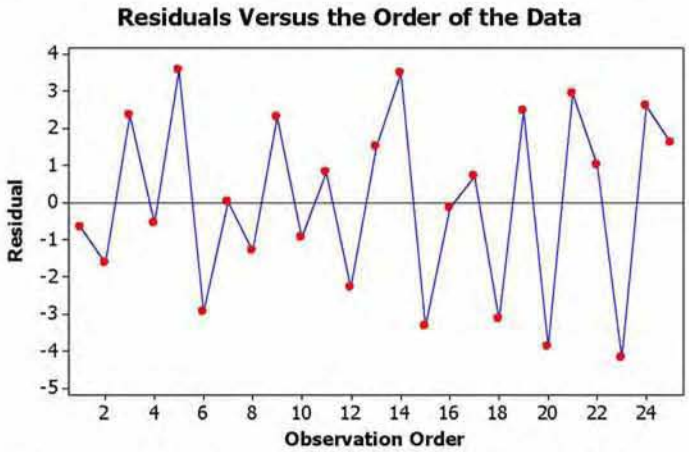
Σχήμα 5.10: Διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (Plot of Residuals Versus Fitted Values).

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, σε κάθε εκτίμηση y_i (fitted value) του οριζόντιου άξονα, αντιστοιχίζονται οι τιμές των καταλοίπων στον κάθετο άξονα. Για να είναι τα κατάλοιπα ανεξάρτητα μεταξύ τους, θα πρέπει να εμφανίζονται τυχαιοποιημένα στο διάγραμμα και να μην παρουσιάζουν κάποια τάση σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές, δηλαδή, να είναι τυχαία τοποθετημένα σχηματίζοντας ένα «σύννεφο». Στο αντίθετο συμπέρασμα θα καταλήγαμε αν τα σημεία στο χώρο του διαγράμματος, ακολουθούσαν μια

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

συγκεκριμένη πορεία ή είχαν μια προσδιορισμένη μορφή, όπως για παράδειγμα αν σχημάτιζαν μια νοητή ευθεία ή κάποια άλλη μη τυχαία καμπύλη. Επίσης, όταν τα κατάλοιπα κατανέμονται συμμετρικά γύρω από την γραμμή που βρίσκεται στο σημείο 0, η διακύμανσή τους διατηρείται σταθερή.

Ένας, επίσης σημαντικός έλεγχος, είναι αυτός της ανεξαρτησίας των καταλοίπων από την σειρά εκτέλεσης των πειραμάτων και πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (Plot of Residuals Versus run Order) (Σχήμα 5.11).



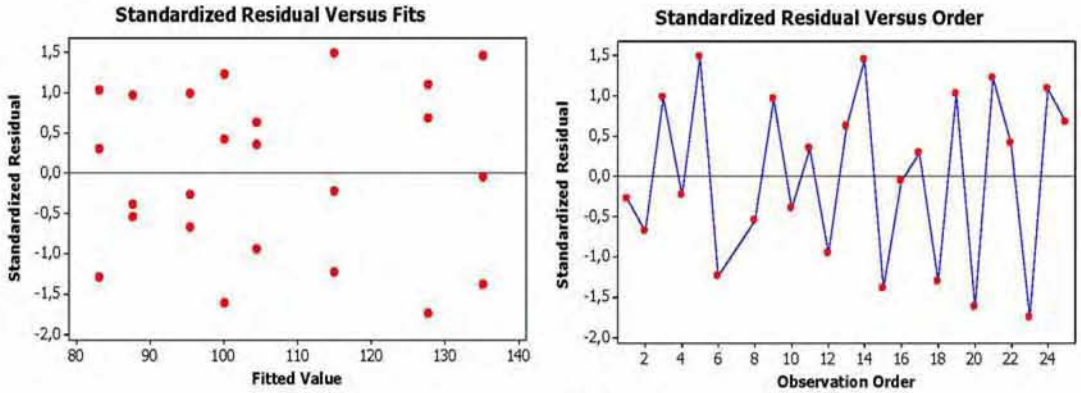
Σχήμα 5.11: Διάγραμμα καταλοίπων σε σχέση με την σειρά παρατήρησης (Plot of Residuals Versus run Order).

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα, τα κατάλοιπα που βρίσκονται στον κάθετο άξονα, αντιστοιχίζονται με την σειρά παρατήρησης του οριζόντιου άξονα (observation order). Παρόμοια με το διάγραμμα των καταλοίπων σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές, τα σημεία θα πρέπει να σκορπίζονται τυχαία εκατέρωθεν της οριζόντιας γραμμής που βρίσκεται στο σημείο 0 και αυτό να συμβαίνει κατά μήκος όλης της γραμμής, εξασφαλίζοντας τη ανεξαρτησία τους από τη σειρά εκτέλεσης των πειραμάτων και τη σταθερότητα της διακύμανσης.

Ο λόγος ενός κατάλοιπου δια την τυπική του απόκλιση ονομάζεται κανονικοποιημένο κατάλοιπο (standardized residual). Ορίζεται ως «ασυνήθιστη» παρατήρηση (Unusual Observation) εάν η απόλυτη τιμή του αντίστοιχου κανονικοποιημένου κατάλοιπου είναι μεγαλύτερη του 2 και «έκτροπη» αυτή με απόλυτη τιμή κανονικοποιημένου κατάλοιπου μεγαλύτερη του 3. Οι έκτροπες παρατηρήσεις είτε προέρχονται από λάθος καταγραφή του ερευνητή (οπότε ελέγχεται αν μια έκτροπη παρατήρηση έχει καταγραφεί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

σωστά), ή είναι πραγματικές παρατηρήσεις υποδεικνύοντας ότι το μοντέλο δεν είναι απόλυτα σωστό. Είναι προφανές ότι ένα αποδεκτό μοντέλο πρέπει να οδηγεί σε όσο το δυνατόν λιγότερες έκτροπες και ασυνήθιστες παρατηρήσεις. Για τον έλεγχο των παραπάνω κατασκευάζονται διαγράμματα κανονικοποιημένων καταλοίπων, που μπορεί να είναι σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (Plot of standardized Residuals Versus Fitted Values) ή σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (Plot of standardized Residuals Versus run Order) (Σχήμα 5.12).



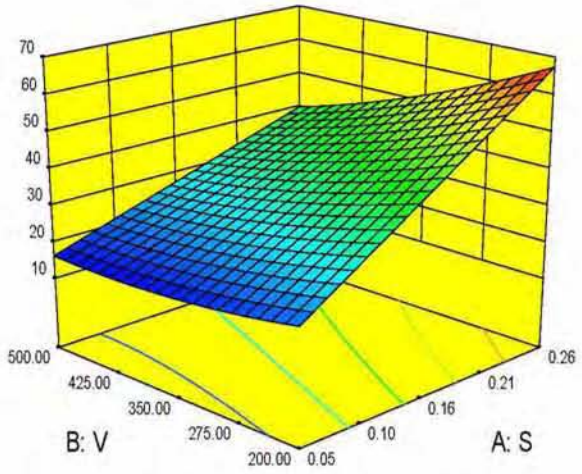
Σχήμα 5.12: Διάγραμμα κανονικοποιημένων καταλοίπων α) σε σχέση με τις εκτιμούμενες τιμές (Plot of standardized Residuals Versus Fitted Values) β) σε σχέση με τη σειρά παρατήρησης (Plot of standardized Residuals Versus run Order)

Μέσω των διαγραμμάτων των καταλοίπων, διαπιστώνεται αν ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ισχύος ενός μοντέλου, γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία του και καθορίζει τη χρησιμοποίησή του για στατιστική συμπερασματολογία και πρόβλεψη των τιμών της απόκρισης. Εάν υπάρχουν ακραίες τιμές (outliers) οι οποίες επηρεάζουν την κανονικότητα των καταλοίπων τότε πραγματοποιείται έλεγχος για να διαπιστωθεί εάν όντως είναι πραγματικές ή προήλθαν από κάποιο άλλο σφάλμα (π.χ. λάθος στην μέτρηση). Αν είναι απόρροια κάποιου σφάλματος αφαιρούνται, ενώ αν είναι πραγματικές τιμές τότε πρέπει να γίνουν δύο αναλύσεις των δεδομένων, μία λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές αυτές και μία χωρίς αυτές. Επίσης, αν παρατηρηθεί κάποια σχέση μεταξύ των καταλοίπων ή η διασπορά τους δεν διατηρείται σταθερή, επιλέγονται νέα μοντέλα προσαρμογής και πραγματοποιείται εξ αρχής στοχαστική μοντελοποίηση και στατιστική ανάλυση.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.5.7 Επιφάνεια Προσαρμογής – Response Surface

Η διεξαγωγή πειραμάτων σύμφωνα με κατάλληλο πειραματικό σχεδιασμό, παράγει ένα ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων για τις ανεξάρτητες μεταβλητές και τις αποκρίσεις. Τα δεδομένα αυτά, μέσω της στατιστικής μοντελοποίησης, μπορούν να περιγραφούν από μαθηματικές συσχετίσεις ανάμεσα στις ανεξάρτητες και τις εξαρτημένες μεταβλητές. Η γραφική απεικόνιση των μαθηματικών αυτών σχέσεων (στοχαστικά μοντέλα), είναι γνωστή ως επιφάνεια προσαρμογής ή απόκρισης (response surface) [45][137]. Οι επιφάνειες προσαρμογής, παρουσιάζουν τη συμπεριφορά των εξαρτημένων μεταβλητών για κάθε συνδυασμό ανά δύο των παραγόντων[1], με βάση τα στοχαστικά μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί. Στην ουσία, η επιφάνεια απόκρισης αποτελεί την τρισδιάστατη γραφική απεικόνιση των αποκρίσεων, συναρτήσει δύο κάθε φορά ανεξάρτητων μεταβλητών. Οι παράγοντες που δεν συμπεριλαμβάνονται κάθε φορά στο γράφημα, κρατούνται σταθεροί σε ένα επίπεδο (Σχήμα 5.13).



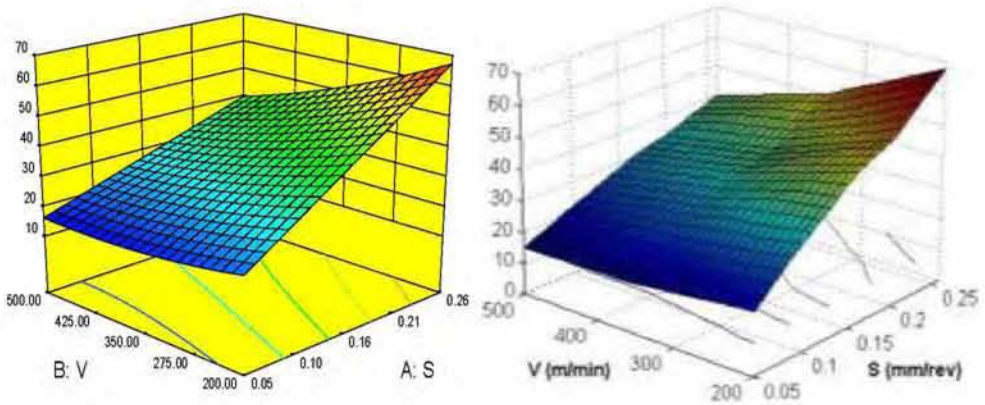
Σχήμα 5.13: Επιφάνεια προσαρμογής

Εάν η προσαρμογή ενός στοχαστικού μοντέλου είναι καλή (υψηλός συντελεστής προσδιορισμού R^2) και ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ισχύος του (κεφ.5.5.4 και κεφ.5.5.6), τότε η μορφή της επιφάνειας προσαρμογής προσεγγίζει ικανοποιητικά την γραφική απεικόνιση επιφάνειας της απόκρισης, που κατασκευάζεται με βάση τις πραγματικές τιμές. Το σημαντικό

[1] Οι επιφάνειες προσαρμογής προφανώς έχουν υπόσταση μόνο στην περίπτωση που οι ανεξάρτητες μεταβλητές είναι περισσότερες από μία.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

πλεονέκτημα της επιφάνειας προσαρμογής, είναι ότι δίνει πληροφορίες για τις αποκρίσεις σε ενδιάμεσες τιμές των επιπέδων των παραγόντων (Σχήμα 5.14).



α) β)

Σχήμα 5.14: α)Επιφάνεια προσαρμογής β)Γράφημα επιφάνειας της απόκρισης με βάση τις πραγματικές τιμές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

5.6 Συμπεράσματα - Ανακεφαλαίωση

Η ολοκληρωμένη στατιστική ανάλυση ενός πειραματικού συνόλου δεδομένων, περιλαμβάνει την περιγραφική στατιστική με τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων και αλληλεπιδράσεων, και την μοντελοποίηση και στατιστική συμπερασματολογία, που συντελείται με τον πίνακα της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA), το στοχαστικό μοντέλο προσαρμογής με τον συντελεστή προσδιορισμού R^2, και τις επιφάνειες απόκρισης. Τα πειραματικά δεδομένα συλλέγονται βάσει κατάλληλου πειραματικού σχεδιασμού και εκτελείται σε αυτά μια αρχική «οπτική» ανάλυση μέσω των διαγραμμάτων της περιγραφικής στατιστικής. Στη συνέχεια, μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης και των μαθηματικών μεθόδων προσαρμογής, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση των δεδομένων, που στοχεύει στην διεξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων και στην μελλοντική πρόβλεψη των τιμών των αποκρίσεων. Τα σημαντικότερα βήματα της μοντελοποίησης είναι τα εξής : ≈

- Διαμορφώνεται ένα μοντέλο παλινδρόμησης χρησιμοποιώντας τις ανεξάρτητες μεταβλητές και συνδυασμούς αυτών, και μέσω μαθηματικής προσαρμογής πραγματοποιείται η εκτίμηση των παραμέτρων του.
- Από την ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) προσδιορίζεται πόσο καλά το μοντέλο εξηγεί τα δεδομένα μέσω του συντελεστή προσδιορισμού R^2.
- Μέσω του ελέγχου F (F-Test) της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) (αποδίδει το p-value κάθε όρου του μοντέλου) και τις τιμές Perc.%, ελέγχεται αν κάποιοι απ' τους όρους είναι μη στατιστικά σημαντικοί και εξετάζεται το ενδεχόμενο διαγραφής τους από το μοντέλο. Αν επιλεγεί να συγκριθούν διαφορετικά μοντέλα, χρησιμοποιείτε ο διορθωμένος συντελεστής προσδιορισμού $R^2_{adj.}$
- Χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα καταλοίπων (residual plots) ελέγχεται το ενδεχόμενο παραβίασης των υποθέσεων του μοντέλου παλινδρόμησης. Στην περίπτωση που παραβιάζονται θα πρέπει να επιλεγεί διαφορετικό μοντέλο ή να μετασχηματιστεί κατάλληλα το υπάρχον.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 6: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ

6.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την τόρνευση

6.1.1 Τόρνος

Τα πειράματα της τόρνευσης συντελέστηκαν στο εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Η εργαλειομηχανή με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι κοπές, είναι ο συμβατικός τόρνος αυτόματης πρόωσης TRIUMPH 2500 της εταιρίας COLCHESTER (Σχήμα 6.), που βρισκόταν σε άψογη λειτουργική κατάσταση. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του δίνονται στον πίνακα 6.1.



Σχήμα 6.1: Συμβατικός οριζόντιος τόρνος τύπου TRIUMPH 2500 (COLCHESTER).

Πίνακας 6.1: Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τόρνου TRIUMPH 2500 της εταιρίας COLCHESTER. [175]

TRIUMPH 2500 (COLCHESTER)	
Χαρακτηριστικά	**Τιμές**
Απόσταση μεταξύ των κέντρων	1250 mm
Ύψος κέντρων	195 mm
Ονομαστική ισχύς	7,5 Kw (10HP)
Εύρος περιστροφικών ταχυτήτων (ανάλογα με την επιλεγμένη κλίμακα)	15 - 300 rpm 35 - 830 rpm 110 - 2500 rpm
Εύρος προώσεων	0,036~1,2mm/rev
Καθαρό Βάρος	1500Kg
Ύψος μηχανής (από το έδαφος ως το κέντρο της μηχανής)	1050 mm
Συνολικό μήκος	2500 mm
Συνολικό πλάτος	1100 mm
Συνολικό Ύψος	1300 mm

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

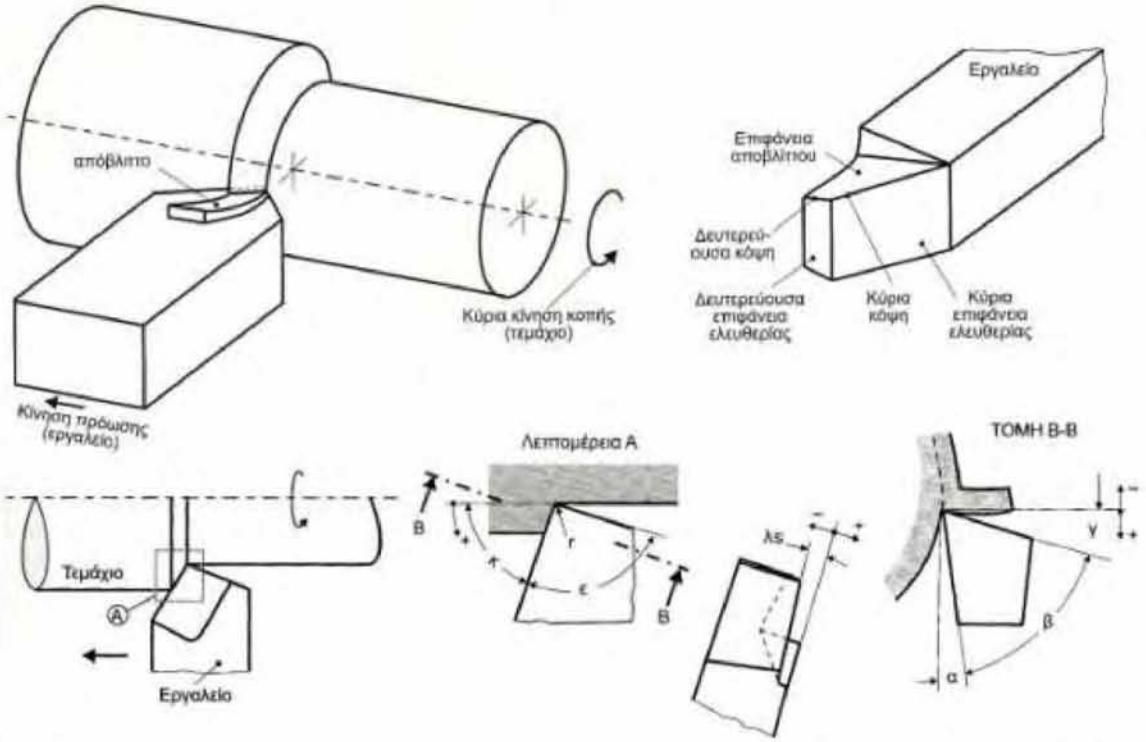
6.1.2 Εργαλείο κοπής

Το εργαλείο κοπής και ο εργαλειοφορέας επιλέχθηκαν κατάλληλα έτσι ώστε ο συνδυασμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους να προσεγγίζει τις συνθήκες της ορθογωνικής κοπής. Το εργαλείο κοπής φέρει το ένθετο πλακίδιο καρβιδίου P20 κατά την προτυποποίηση ISO513 (C5 στο C-grade system) [99], τύπου SPEA120408FN με PVD επικάλυψη TiN (grade UP20M) [13][194]. Το συγκεκριμένο πλακίδιο είναι τετραγωνικής μορφής και σε συνδυασμό με κατάλληλο στέλεχος και εργαλειοφορέα διαμορφώνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του πίνακα 6.2 κατά DIN6581 [76] (Σχήμα 6.2).

Πίνακας 6.2: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου κοπής της διαμήκους τόρνευσης

Χαρακτηριστικά του εργαλείου κοπής [DIN 6581]	Τιμή
Γωνία αποβλίττου, γ	6°
Γωνία ελευθερίας, α	5°
Γωνία σφηνός, β	79°
Γωνία τοποθέτησης, κ	90°
Γωνία κλίσης, λs	0°
Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης, r	0,8mm





Σχήμα 6.2: Τυπική γεωμετρία του εργαλείου της τόρνευσης και οι κυριότερες γωνίες του κατά DIN6581 [**13**].

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.2 Εργαστηριακός εξοπλισμός για το φραιζάρισμα

6.2.1 Φραίζα

Τα πειράματα του φραιζαρίσματος συντελέστηκαν στο μηχανουργείο «ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ Π. & Δ. ΒΑΣΙΛΕΙΑΔΗΣ Ο.Ε.» στη ΒΙ.ΠΕ. Σταυροχωρίου στο Κιλκίς, που ειδικεύεται στην κατασκευή καλουπιών[1]. Για την πραγματοποίηση των κοπών χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακά καθοδηγούμενο κατακόρυφο κέντρο κατεργασίας MX45-VAE της εταιρίας OKUMA (Σχήμα 6.3).



Σχήμα 6.3: Κατακόρυφο κέντρο κατεργασίας τύπου MX45-VAE (OKUMA).

Το συγκεκριμένο κέντρο κατεργασίας είναι τριών προγραμματιζόμενων αξόνων (XYZ), με την τράπεζα να εκτελεί κινήσεις κατά τον X άξονα ενώ ο φορέας της ατράκτου εκτελεί κινήσεις στους Y και Z. Ο προγραμματισμός των κινήσεων πραγματοποιείται μέσω του ελεγκτή της μηχανής, ο οποίος είναι εφοδιασμένος με λογισμικό για την εκτέλεση αυτοματοποιημένων εργασιών ή επικοινωνεί με υπολογιστή μέσω δικτύου για την μεταφόρτωση προγραμμάτων κοπής. Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του κέντρου κατεργασίας δίνονται στον πίνακα 6.3.

[1] Οι κατεργασίες στη φραίζα στο συγκεκριμένο μηχανουργείο πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του Βασιλειάδη Γεώργιου «Διερεύνηση κατεργαστικότητας σε μετωπικό φραιζάρισμα του σύνθετου υλικού PA66-GF30»

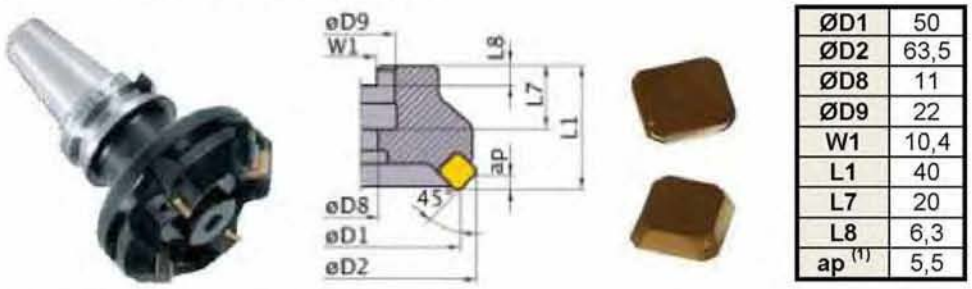
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 6.3: Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του κατακόρυφου κέντρου κατεργασίας τύπου MX45-VAE της εταιρίας OKUMA. [196]

MX45-VAE (OKUMA)			
Χαρακτηριστικά		**Μονάδες**	**Τιμές**
Διαδρομές	Χ Άξονας	mm	762
	Υ Άξονας	mm	460
	Ζ Άξονας	mm	450
	Διαδρομή ατράκτου σε σχέση με την κλίνη	mm	160-610
Κλίνη	Επιφάνεια εργασίας	mm	460x1000
	Ύψος από το έδαφος	mm	750
	Μέγιστο βάρος τεμαχίου	kg	500
Άτρακτος	Εύρος στροφών	rpm	0-12000
	Μετάδοση		Απεριόριστα μεταβαλλόμενη
	Υποδοχή εργαλειοδέτη		7/24, Κλίση No.40
Πρόωση	Ταχείες κινήσεις τοποθέτησης (X/Y/Z άξονας)	mm/min	20/20/15
	Κινήσεις κοπής (X/Y/Z άξονας)	mm/min	10
Εργαλειοφορέας	Τύπος εργαλειοδέτη		MAS BT40
	Τύπος εξολκέα εργαλειοδέτη		MAS 2
	Χωρητικότητα εργαλειοφορέα		32 εργαλεία
Κινητήρες	Ατράκτου	kW	10
	Πρόωσης X/Y/Z	kW	01/02/00
Άλλα χαρακτηριστικά	Εξωτερικές διαστάσεις X/Y/Z	mm	2200/2380/2650
	Βάρος	kg	5500

6.2.2 Εργαλείο κοπής

Το εργαλείο κοπής είναι η φραιζοκεφαλή LSE445-A050 της εταιρείας Mitsubishi, διαμέτρου 50mm, με τέσσερις κοπτικές ακμές που φέρουν ένθετα πλακίδια. Τα πλακίδια είναι καρβίδια τετραγωνικού σχήματος και θετικής γωνίας 20°, του τύπου SEEN1203AFSN1 κατά DIN4987 [75] και ISO1832 [100], κατηγορίας P20 κατά ISO513 [99] και CVD επικάλυψη TiCN-Al_2O_3-TiN (grade F7030) [13][194]. Οι σημαντικότερες διαστάσεις του εργαλείου κοπής δίνονται στο σχήμα που ακολουθεί.



ØD1	50
ØD2	63,5
ØD8	11
ØD9	22
W1	10,4
L1	40
L7	20
L8	6,3
ap (1)	5,5

Σχήμα 6.4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του εργαλείου κοπής του φραιζαρίσματος. [194]

[1] Μέγιστο βάθος κοπής

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.3 Εργαστηριακός εξοπλισμός για την διάτρηση

6.3.1 Δράπανο

Η διάτρηση των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το δράπανο που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου ορθοστάτη και είναι το μοντέλο 1B-35-P της Ισπανικής εταιρίας Ibarmia (Σχήμα 6.5), το οποίο και βρισκόταν σε άψογη λειτουργική κατάσταση. Τα κυριότερα τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δράπανου δίνονται στον πίνακα 6.4:



Σχήμα 6.5: Δράπανο Ibarmia 1B-35-P (τύπου ορθοστάτη).

Πίνακας 6.4: Τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του δράπανου Ibarmia 1B-35-P. [184]

IBARMIA 1B-35-P	
Χαρακτηριστικά	**Τιμές**
Ονομαστική Ισχύς HP(Kw)	2 (1,5)
Περιστροφικές ταχύτητες (rev/min)	81, 115, 162, 226, 321, 452, 637, 904, 1274
Πρόωση	Αυτόματη με ηλεκτρομαγνητικό συμπλέκτη
Αυτόματες προώσεις (mm/rev)	0.1 , 0.2 , 0.3
Μέγιστη διάμετρος τρυπανιού (για χάλυβα St 60) (mm)	Ø 27
Μέγιστη διαδρομή τρυπανιού (mm)	300
Μέγιστο ύψος ατράκτου από την τράπεζα (mm)	450
Διαστάσεις τράπεζας (LxW) (mm)	560x480
Συνολικό ύψος (mm)	2480
Συνολικό πλάτος (mm)	1400
Συνολικό μήκος (mm)	1000
Καθαρό βάρος (Kg)	490

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.3.2 Εργαλείο κοπής

Το εργαλείο κοπής που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων, είναι το ελικοειδές τρυπάνι τύπου N, κυλινδρικού στελέχους από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5%, διεθνής προτυποποίησης κατά DIN 338 HSS-Co (High Speed Steel Cobalt alloyed) [72][103].



Σχήμα 6.6: Ελικοειδές τρυπάνι HSS-Co (κατά DIN 338).

Ο ταχυχάλυβας κατασκευής του είναι κατά τη Γερμανική προτυποποίηση DIN 1.3243 ή κατά την Αμερικάνικη AISI M35, είναι μέγιστης σκληρότητας υψηλότερης του 64 HRC (Rockwell C Scale) και η χημική του σύσταση δίδεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.5: Χημική σύσταση του υλικού του τρυπανιού HSS-Co (DIN 1.3243).

Χημική σύσταση ταχυχάλυβα DIN 1.3243, %κ.β.							
C	**Si**	**Mn**	**Co**	**Cr**	**Mo**	**V**	**W**
0,80-0,85	0,10-0,40	0,10-0,40	4,75-5,25	3,90-4,40	4,75-5,25	1,75-2,15	6,15-6,65

Η διάμετρός του είναι 12,5mm και οι επιμέρους διαστάσεις του κατά DIN338 δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 6.6: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τρυπανιού HSS-Co (DIN 338).

Διάμετρος (mm)	**Συνολικό μήκος (mm)**	**Μήκος αυλακώσεων (mm)**	**Γωνία κορυφής (°)**
12.5	151	101	135

Τα τρυπάνια αυτού του τύπου είναι κατάλληλα για κατεργασία υλικών με αυξημένη μέγιστη αντοχή και σκληρότητα όπως για παράδειγμα χάλυβες αντοχής μέχρι και 1000N/mm^2 (με ή χωρίς κραματικά στοιχεία), χάλυβες υψηλής αντοχής σε διάβρωση και θερμοκρασία και χυτούς χάλυβες. Χαρακτηρίζονται από άκρως υψηλή αντοχή σε φθορά και εξαιρετική συμπεριφορά σε υψηλές θερμοκρασίες (άριστη αντοχή σε επαναφορά).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.4 Δοκίμια κατεργασίας

Τα δοκίμια των πειραμάτων είναι κατασκευασμένα από το ενισχυμένο πολυμερές PA66-GF30 (εμπορική ονομασία Ertalon66-GF30). Πρόκειται για το πολυαμίδιο 66 (γνωστό ως Νάυλον 66) ενισχυμένο με 30% ίνες υάλου, ασυνεχείς τυχαίου προσανατολισμού (κεφ.2.2.2 και κεφ.2.3). Τα δοκίμια προμηθεύτηκαν σε κυλινδρικά τεμάχια διαμέτρου 150mm και μήκους 1m, χρώματος μαύρου. Για τις ανάγκες τις κάθε κατεργασίας τα δοκίμια κοπήκαν σε επιμέρους διαστάσεις, ώστε να διευκολύνεται η εκτέλεση της κατεργασίας και να επιτυγχάνεται η καλύτερη στήριξη σε κάθε περίπτωση (Σχήμα 6.7).



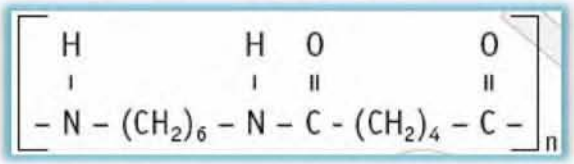
α)

	Διάμετρος (mm)	Μήκος (mm)
Τόρνευση	150	500
Φραιζάρισμα	150	40
Διάτρηση	150	50

β)

Σχήμα 6.7: α)Τα δοκίμια των πειραμάτων του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30, β)Πίνακας με τις διαστάσεις των δοκιμίων ανά κατεργασία.

Η χημική δομή του πολυμερούς PA66 είναι η ακόλουθη:



Σχήμα 6.8: Χημική δομή του πολυαμίδιου PA66.

Σε σύγκριση με το απλό πολυαμίδιο PA 66, το ενισχυμένο PA66-GF30 έχει υποστεί θερμική επεξεργασία σταθεροποίησης και προσφέρει υψηλή αντοχή και σκληρότητα, ακαμψία, χαμηλή παραμορφωσιμότητα, αντίσταση σε ερπυσμό, άριστη αντοχή σε φθορά και υψηλότερες θερμοκρασίες λειτουργίας. Τα υψηλών προδιαγραφών χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου ενισχυμένου πολυμερές, συντελούν στο να βρίσκει εφαρμογή ολοένα και περισσότερο, στην παραγωγή κατασκευών υψηλής τεχνολογίας, όπως είναι η αεροπορική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

βιομηχανία. Στους πίνακες που ακολουθούν δίνονται κατηγοριοποιημένα οι βασικότερες ιδιότητές του [185][199][180][197][188][189].

Πίνακας 6.7: Μηχανικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (στους 23 °C για ξηρό υλικό)	Τιμές	Μέθοδοι δοκιμής
Αντοχή εφελκυσμού	186 MPa	ASTM D638
Παραμόρφωση θραύσης ή Ολκιμότητα, ε_f (1)	5%	ISO 527
Μέτρο Ελαστικότητας, E (2)	8,9 GPa	ISO 527
Διατμητική τάση	86 MPa	ASTM D732
Σκληρότητα κατά Rockwell (3)	M96	ASTM D 785
Σκληρότητα – μέθοδος διείσδυσης (Ball indentation hardness) (3)	165 N/mm^2	ISO 2039-1

*(1) Ταχύτητα διεξαγωγής πειράματος εφελκυσμού: 5*mm/min
*(2) Ταχύτητα διεξαγωγής πειράματος εφελκυσμού: 1*mm/min
*(3) Δοκίμιο πειράματος σκληρότητας: δοκίμιο πάχους 10*mm

Πίνακας 6.8: Θερμικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30.

ΘΕΡΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Τιμές	Τυποποίηση κατά ISO
Θερμοκρασία τήξης, $T_{melting}$	260 °C	11357-1/-3
Θερμική αγωγιμότητα στους 23 °C	0,30 W/(K.m)	-
Συντελεστής γραμμικής θερμικής διαστολής από 23 σε 100 °C	60x10^6 m/(m.K)	-
Θερμοκρασία παραμόρφωσης υπό φορτίο 1,8 MPa	150 °C	75
Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία για συνεχή περίοδο λειτουργίας 5000/ 20000h, T_{max}	120/ 110 °C	-
Μέγιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία για σύντομη περίοδο μερικών ωρών	240 °C	-
Ελάχιστη επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας (διεξαγωγή ελέγχου σε δύναμη κρούσης), T_{min}	-20 °C	-
Αναφλεξιμότητα σύμφωνα με το UL 94 (3/ 6 mm)	HB/ HB	-
Θερμοκρασία αυτανάφλεξης	>450 °C	ASTM D1929
Θερμοκρασία αποσύνθεσης	>350 °C	

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 6.9: Φυσικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30.

ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	Τιμές	Μέθοδοι δοκιμής ISO(IEC)
Χρώμα	Μαύρο	
Πυκνότητα	1,29 kg/m^3	1183-1
Υδατοαπορροφητικότητα **-24/ 96h σε νερό 23°C** **-κορεσμός σε αέρα 23°C/50% RH** **-κορεσμός σε νερό 23°C**	0,39/ 0,74 % 1,7 % 5,5 %	62

Πίνακας 6.10: Ηλεκτρικές ιδιότητες του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30.

ΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ (στους 23 °C για ξηρό υλικό)	Τιμές	Τυποποίηση κατά IEC
Ηλεκτρική αντίσταση	30 KVolt/mm	60243
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση όγκου	> 10^{14} Ωcm	60093
Ειδική ηλεκτρική αντίσταση επιφάνειας	> 10^{13} Ω	60093
Σχετική διαπερατότητα σε 100Hz	3,9	60250
Δείκτης διηλεκτρικής απώλειας tan δ σε 100Hz	0,012	60250
Συγκριτικός δείκτης ανίχνευσης (CTI)	475	60112

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.5 Μετρήσεις των δυνάμεων κοπής

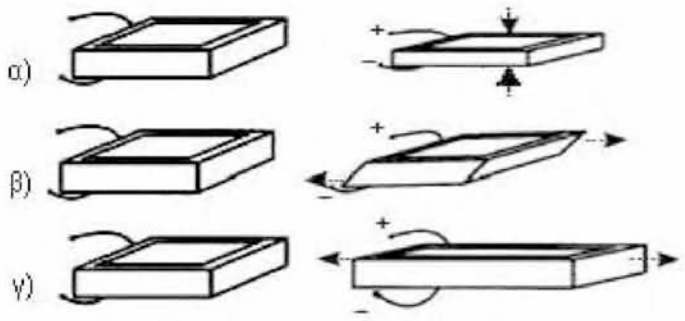
6.5.1 Πιεζοηλεκτρικά δυναμόμετρα - εφαρμογές

Οι μετρήσεις των δυνάμεων κοπής συντελούνται κατά την διάρκεια εκτέλεσης των κοπών μέσω των πιεζοηλεκτρικών δυναμόμετρων. Τα δυναμόμετρα είναι μετρητικά όργανα με τα οποία δύναται να μετρηθούν θλιπτικές, εφελκυστικές και διατμητικές δυνάμεις και ροπή στρέψης. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών των δυναμόμετρων είναι:

- Μετρήσεις δυνάμεων κοπής σε τόρνο
- Μετρήσεις δυνάμεων κοπής σε φραιζάρισμα
- Μέτρηση δύναμης πρόωσης, διατμητικής δύναμης και ροπής κατά τη διάτρηση, την διάνοιξη σπειρώματος κ.λπ.
- Δοκιμές δυναμόκλειδων
- Δοκιμές ελατηρίων (στρέψη)
- Μετρήσεις σε έδρανα κύλισης, συμπλέκτες τριβής
- Μέτρηση της ροπής εκκίνησης κινητήρων μικρής ιπποδύναμης και βηματικών κινητήρων
- Εργονομικές μετρήσεις

6.5.2 Το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο

Η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων δυναμόμετρων βασίζεται στο πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, που αποτελεί ιδιότητα ορισμένων κρυστάλλων. Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος έχει την ιδιότητα όταν συμπιέζεται να εμφανίζονται στην επιφάνειά του ηλεκτρικά φορτία, αλλά και αντίστροφα, όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση στα άκρα του να μεταβάλει το σχήμα του (Σχήμα 6.9).



Σχήμα 6.9: Ο πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος εμφανίζει στην επιφάνεια του ηλεκτρικά φορτία αναλόγως την παραμόρφωσή του: α)Συμπίεση, β)Διάτμηση, γ)Εφελκυσμός.

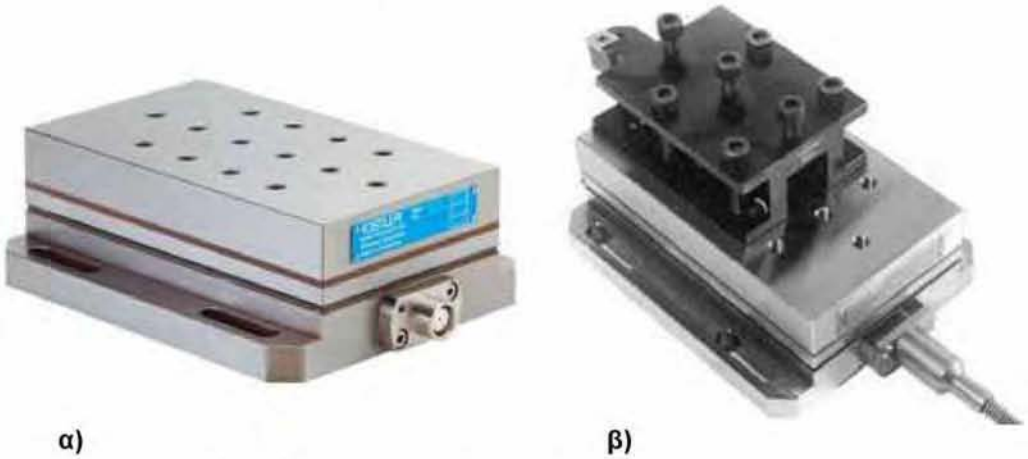
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Ένας φυσικός πιεζοηλεκτρικός κρύσταλλος είναι ο χαλαζίας ΄΄Quartz΄΄ (SiO_2). Ιδιότητες του Χαλαζία είναι η ακραία σκληρότητα, η εξαιρετική σταθερότητα και η υψηλή απόδοση. Η βασισμένη στον Χαλαζία τεχνολογία των αισθητήρων έχει οδηγήσει σε προϊόντα που είναι πρωτοποριακά σε δεδομένα ασφάλειας, έρευνας και παραγωγικότητας. Τα πιεζοηλεκτρικά συστήματα μετρήσεων εξασφάλισαν υψηλή χωρητικότητα σε δυναμικά φορτία και γραμμικότητα των μετρήσεων.

Η πιεζοηλεκτρική μέθοδος μέτρησης δυνάμεων κοπής, διαφέρει ριζικά από άλλες μεθόδους. Οι δυνάμεις που ενεργούν στα στοιχεία του πιεζοηλεκτρικού κρυστάλλου (συνήθως κρύσταλλος χαλαζία) μετατρέπονται άμεσα σε ανάλογα ηλεκτρικά σήματα και μέσω της υψηλής συχνότητας απόκρισης του δυναμομέτρου (φυσική συχνότητα απόκρισης του κρυστάλλου) πραγματοποιούνται ακριβείς μετρήσεις ταχύτατων γεγονότων.

6.5.3 3-αξονικό δυναμόμετρο Fx, Fy, Fz

Οι μετρήσεις των δυνάμεων κοπής στα πειράματα της τόρνευσης και του φραιζαρίσματος πραγματοποιήθηκαν με το 3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B της εταιρίας Kistler (Σχήμα 6.10).

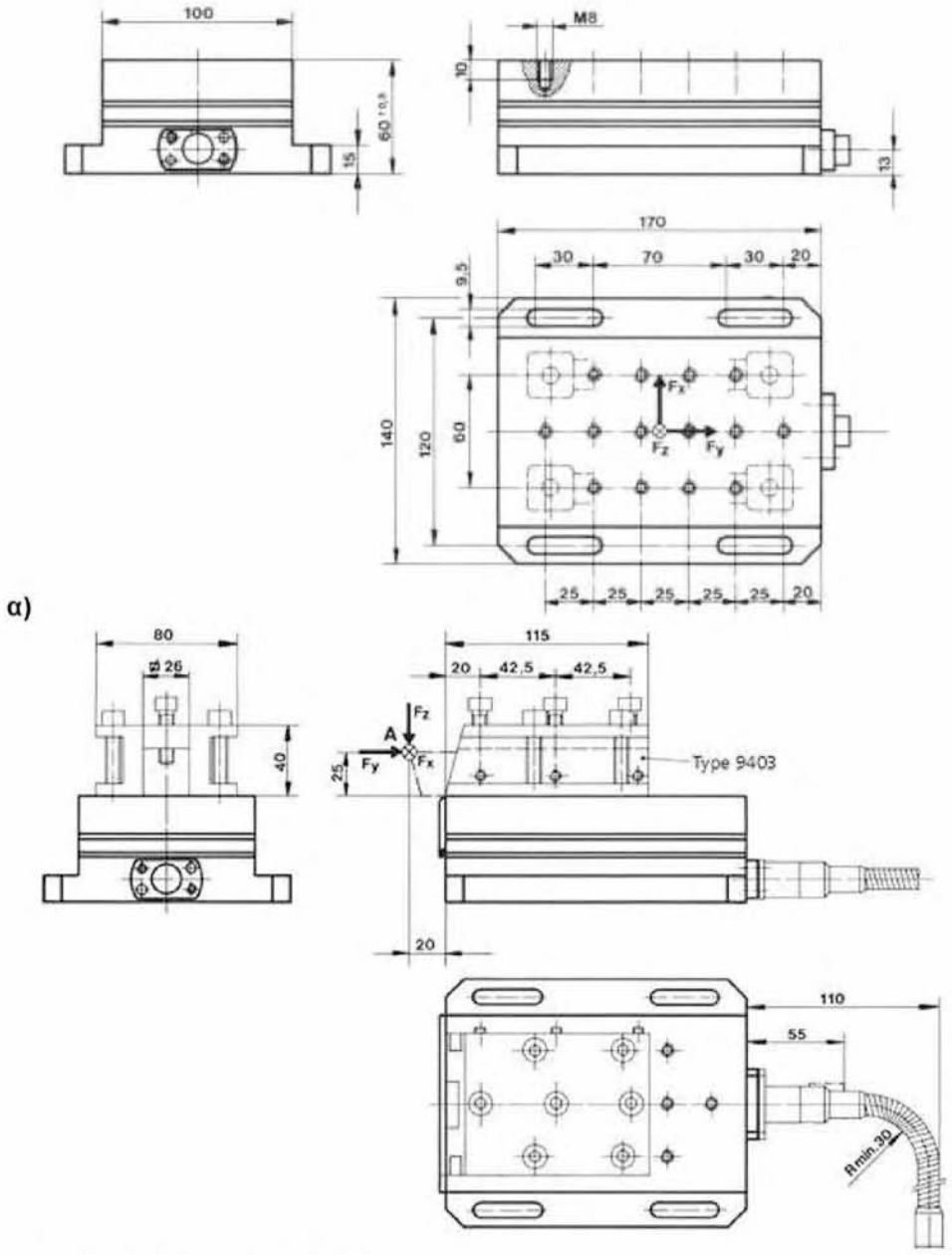


α) β)

Σχήμα 6.10: α)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B, β)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B με τον εργαλειοφορέα 9403 (για κατεργασία τόρνευσης).

Αναλυτικότερα οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δυναμομέτρου φαίνονται παρακάτω (Σχήμα 6.11):

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



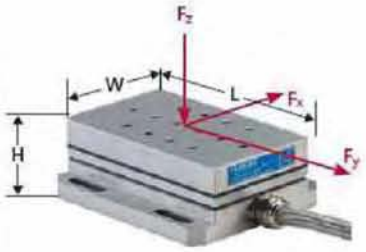
Σχήμα 6.11: Μηχανολογικό σχέδιο α)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B β)3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B με τον εργαλειοφορέα 9403. [187]

Το δυναμόμετρο 9257B της Kistler, αποδίδει τις δυνάμεις F_x, F_y και F_z που αντιστοιχούν στους άξονες X, Y, Z (Σχήμα 6.12). Κατά την τόρνευση, η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_T, η δύναμη πρόωσης F_v και η δύναμη απώθησης του εργαλείου F_R συμπίπτουν απόλυτα με τις δυνάμεις F_z, F_x και F_y αντίστοιχα, που αποδίδει το δυναμόμετρο και έτσι πραγματοποιείται άμεσα η καταμέτρησή τους. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δυναμομέτρου δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

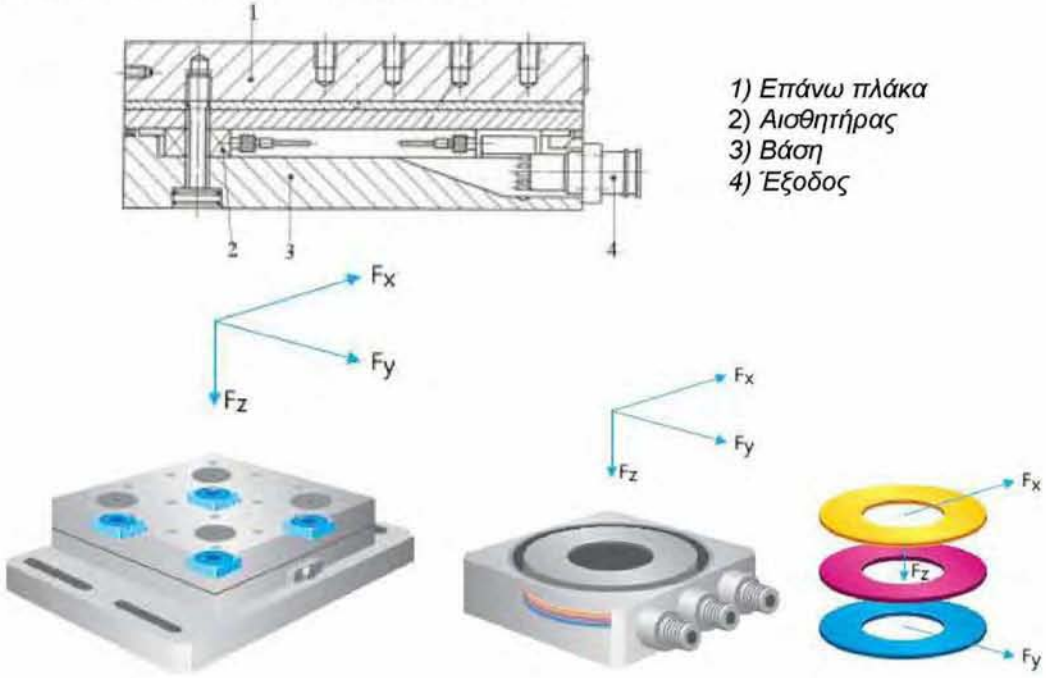
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 6.11: Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμομέτρου 9257B της Kistler. [187]

Δυναμόμετρο 9257B (KISTLER)			
Χαρακτηριστικά	**Σύμβολα**	**Μονάδες**	**Τιμές**
Όρια φορτίου	F_x,F_y,F_z	kN	-5...5
Ευαισθησία	F_x,F_y	pC/N	≈ -7,5
	F_z	pC/N	≈ -3,7
Φυσική συχνότητα	f_nx, f_ny	kHz	≈ 2,3
	f_nz	kHz	≈ 3,5
Θερμοκρασία λειτουργίας		°C	0...70
Διαστάσεις LxWxH		mm	170x100x60
Βάρος		kg	7,3



Οι δυνάμεις που επιδρούν στο δυναμόμετρο μεταδίδονται, μέσω της επάνω πλάκας, στους τέσσερεις αισθητήρες, στους οποίους περιλαμβάνεται χαλαζίας σε μορφή δακτυλίων (Σχήμα 6.12).



Σχήμα 6.12: 3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B σε τομή και οι δακτύλιοι χαλαζία. [187]

Οι δακτύλιοι του κρυστάλλου χαλαζία που είναι ευαίσθητοι σε συμπίεση καταμετρούν την αξονική δύναμη F_z. Επίσης, δακτύλιοι χαλαζία που είναι ευαίσθητοι σε διάτμηση κατά την x και y διεύθυνση αποδίδουν τις δυνάμεις F_x και F_y αντίστοιχα. Τα φορτία που παράγονται από τις πλάκες χαλαζία συλλέγονται με κατάλληλα ηλεκτρόδια συνδεδεμένα στην έξοδο του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

δυναμομέτρου και ανάλογα με την διεύθυνση των δυνάμεων εμφανίζονται αντίστοιχα θετικά ή αρνητικά φορτία.

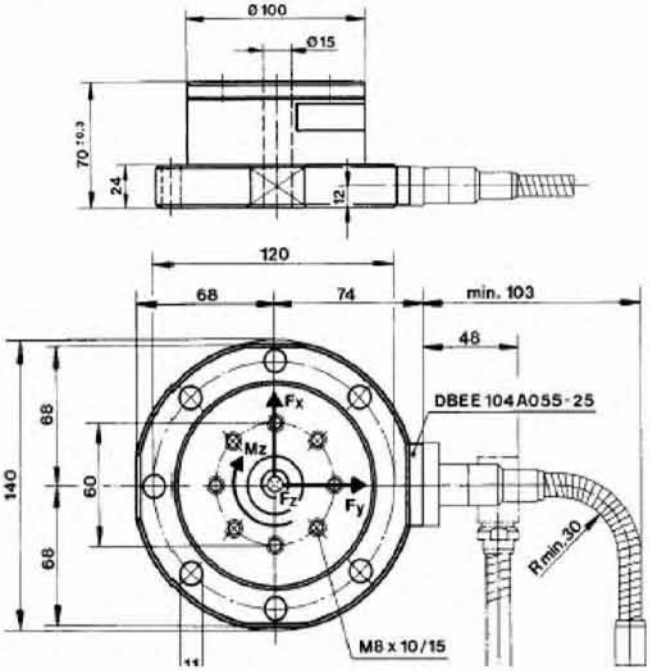
6.5.4 4-αξονικό δυναμόμετρο Fx, Fy, Fz, Mz

Το δυναμόμετρο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της διάτρησης, είναι το 4-αξονικό δυναμόμετρο 9272 της kistler (Σχήμα 6.13).



Σχήμα 6.13: 4-αξονικό δυναμόμετρο 9272 της kistler.

Αναλυτικότερα οι διαστάσεις του συγκεκριμένου δυναμομέτρου φαίνονται στο Σχήμα 6.14. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου δυναμομέτρου δίνονται στον πίνακα 6.12:



Σχήμα 6.14: Μηχανολογικό σχέδιο 4-αξονικού δυναμομέτρου 9272. [187]

Οι δυνάμεις και η ροπή που επιδρούν στο δυναμόμετρο, μεταδίδονται μέσω της επάνω πλάκας στο κυρίως τμήμα του, στο οποίο βρίσκεται ο χαλαζίας σε μορφή δακτυλίων (Σχήμα 6.15).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 6.15: 4-αξονικό δυναμόμετρο 9272 σε τομή και οι δακτύλιοι χαλαζία. [187]

Ένας δακτύλιος κρυστάλλου χαλαζία είναι ευαίσθητος σε συμπίεση καταμετρώντας την αξονική δύναμη F_z. Άλλοι δυο δακτύλιοι είναι ευαίσθητοι σε διάτμηση, ένας κατά την x διεύθυνση και ο άλλος κατά την y, αποδίδοντας τις δυνάμεις F_x και F_y αντίστοιχα. Τέλος, ένα σετ από δακτυλιοειδείς αισθητήρες κρυστάλλου χαλαζία ευαίσθητους σε διάτμηση, παράγει ηλεκτρικό φορτίο ανάλογο με την ροπή Mz που ασκείται κατά τον κεντρικό άξονα του δυναμομέτρου. Τα φορτία που παράγονται από τις πλάκες χαλαζία συλλέγονται με ηλεκτρόδια που είναι συνδεδεμένα στην έξοδο του δυναμομέτρου και ανάλογα με την διεύθυνση της δύναμης και της ροπής εμφανίζονται αντίστοιχα θετικά ή αρνητικά φορτία.

6.5.5 Επεξεργασία σήματος των δυναμόμετρων

Το πιεζοηλεκτρικό δυναμόμετρο επικοινωνεί με τον ενισχυτή φορτίου (charge amplifier) με ειδικά καλώδια σύνδεσης (π.χ. το 8-κάναλο καλώδιο 1677A5), που είναι θωρακισμένα, γειωμένα και αδιάβροχα. Στη συνέχεια, ο ενισχυτής φορτίου συνδέεται με Η/Υ ή με παλμογράφο ώστε να αποδοθεί

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

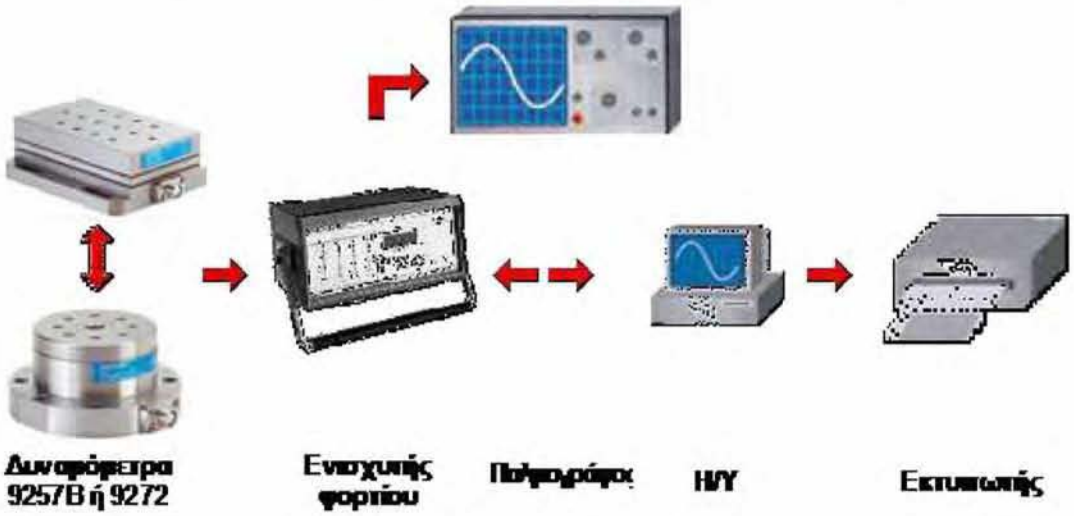
γραφικά το σήμα που λαμβάνεται από τις κοπές. Στην περίπτωση που διατίθεται Η/Υ, η επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνει το δυναμόμετρο, πραγματοποιείται από το λογισμικό DynoWare, της εταιρείας Kistler επίσης. Συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού DynoWare είναι τα εξής:



Λογισμικό DynoWare™

- Μετρητικά κανάλια: 8
- Εύρος μέτρησης ανά κανάλι: ±10 V.
- Διάρκεια μέτρησης: Περιορίζεται από την μνήμη RAM
- Εισαγωγή / εξαγωγή δεδομένων: ASCII, Labview, Dia Dago, Excel
- Συντάκτης βάσης δεδομένων
- Εκκίνηση: Πληκτρολόγιο, αναλογική, ψηφιακή
- Συνεργαζόμενα όργανα: βολτόμετρο, παλμογράφος
- Ανάλυση: Ψηφιακά φίλτρα
- Δυνατότητα εκτύπωσης

Η διάταξη συνδεσμολογίας των δυναμόμετρων είναι η ακόλουθη:

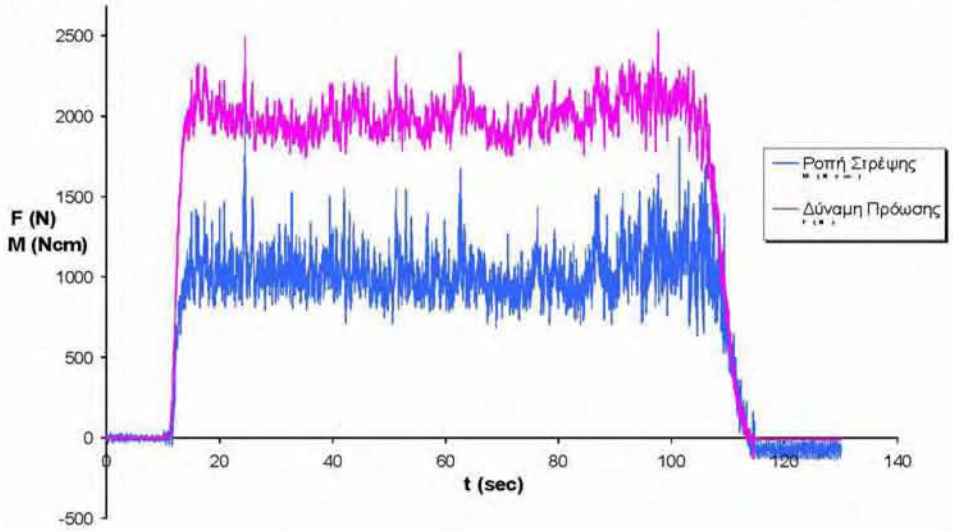


Σχήμα 6.16: Διάταξη συνδεσμολογίας του δυναμομέτρου. [187]

Η κάθε μέτρηση πραγματοποιείται με κάποια προεπιλεγμένη συχνότητα, η οποία περιορίζεται από τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε δυναμόμετρου. Για συχνότητα 100Hz, όπου είναι και μια σύνηθες συχνότητα για τα πειράματα κοπής στις συμβατικές κατεργασίες, λαμβάνονται από το

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

δυναμόμετρο 100 σημεία ανά δευτερόλεπτο. Το πλήθος, επομένως, των σημείων μιας μέτρησης θα είναι όσο ο χρόνος κοπής (σε sec) του συγκεκριμένου πειράματος επί την προκαθορισμένη συχνότητα. Τα διαγράμματα που εξάγονται από το software επεξεργασίας σήματος "DynoWare" του δυναμομέτρου έχουν την παρακάτω μορφή (Σχήμα 6.17):

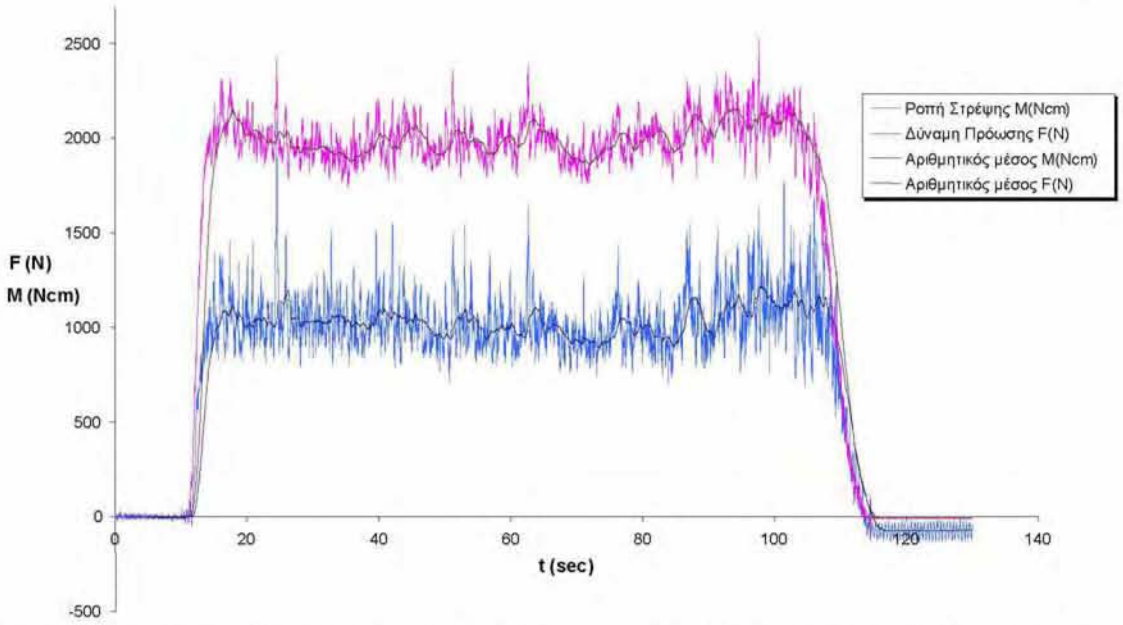


Σχήμα 6.17: Διάγραμμα από το λογισμικό DynoWare μετά την δυναμομέτρηση κατεργασίας διάτρησης με το δυναμόμετρο 9272 Kistler. (Δυο κανάλια μέτρησης ροπή στρέψεως M και αξονική δύναμη F).

Στο διάγραμμα αυτό διακρίνουμε την ροπή στρέψεως M και τη αξονική δύναμη F συναρτήσει του χρόνου κοπής για δεδομένες συνθήκες κατεργασίας. Οι μονάδες των δυο μετρούμενων μεγεθών στο συγκεκριμένο διάγραμμα είναι για τη ροπή στρέψεως Ncm και για την αξονική δύναμη N.

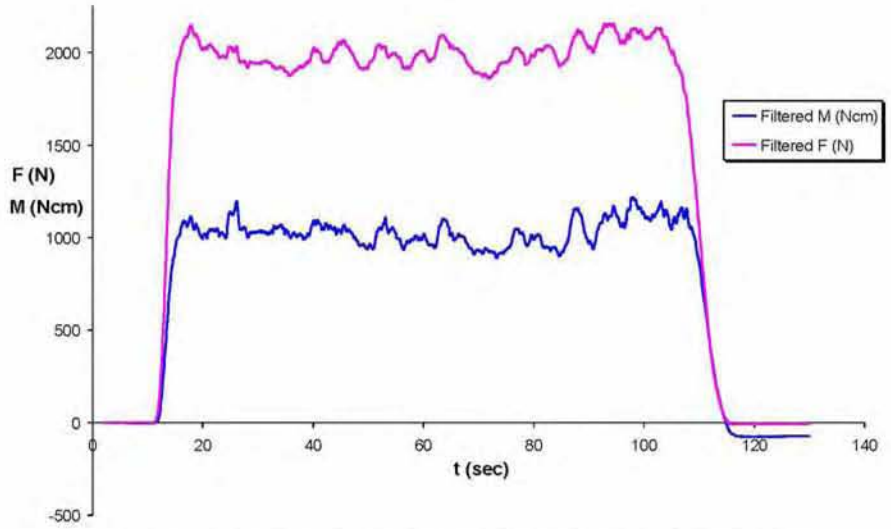
Είναι προφανές από το παραπάνω διάγραμμα ότι στη μέτρηση υπεισέρχονται εξωτερικές επιδράσεις με τη μορφή θορύβου (έντονες διακυμάνσεις του σήματος). Αυτές ενδεχομένως οφείλονται σε εξωτερικούς παράγοντες που επηρεάζουν το σύστημα διάτρησης-δυναμομέτρου (οποιεσδήποτε εξωτερικές αναταράξεις) αλλά και σε ταλαντώσεις της ιδίας εργαλειομηχανής και του συστήματος γενικότερα, που οφείλονται σε πιθανή έλλειψη εκκεντρότητας, στην άτακτη αποκοπή του αποβλίττου κ.α. Για το λόγο αυτό το λογισμικό DynoWare παρέχει τη δυνατότητα εφαρμογής φίλτρου στα διεξαγόμενα σημεία της δυναμομέτρησης, πραγματοποιώντας τη μέθοδο του αριθμητικού μέσου (μέσος όρος τιμών ανά ένα προεπιλεγμένο πλήθος σημείων)(Σχήμα 6.18).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 6.18: Διάγραμμα της πειραματικής μέτρησης με το φίλτρο του αριθμητικού μέσου στα σημεία των μετρήσεων.

Έτσι, το φιλτραρισμένο διάγραμμα που προκύπτει από την παραπάνω διαδικασία είναι το εξής:



Σχήμα 6.19: Φιλτραρισμένο διάγραμμα της δυναμομέτρησης.

Από τα φιλτραρισμένα διαγράμματα που αποδίδει το λογισμικό και για περιοχή των σημείων που ενδιαφέρουν και συνάγουν στην διεξαγωγή όσο το δυνατό ακριβέστερων αποτελεσμάτων, λαμβάνεται ο μέσος όρος αυτών, που αποτελεί τις ζητούμενες τιμές των εκάστοτε μετρούμενων επιθυμητών μεγεθών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.6 Μετρήσεις της τραχύτητας επιφανείας

6.6.1 Τραχύμετρο

Οι μετρήσεις τραχύτητας πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας, με το ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο τύπου στυλίσκου, Surtronic 3+ της εταιρείας Taylor-Hobson (Σχήμα 6.20).



Σχήμα 6.20: Τραχύμετρο τύπου στυλίσκου Surtronic 3+ (Taylor-Hobson).

Το συγκεκριμένο τραχύμετρο (ή προφιλόμετρο) είναι προηγμένης τεχνολογίας και αποδίδει μετρήσεις υψηλής ακρίβειας. Χρησιμοποιείται τόσο σε εργαστηριακές όσο και σε βιομηχανικές εφαρμογές κυρίως λόγω του μικρού μεγέθους του, της φορητότητάς του και της δυνατότητας να παίρνει μετρήσεις από κεκλιμένες ή κάθετες επιφάνειες.

Η αρχή λειτουργίας του όπως και όλων των ηλεκτρομηχανικών τραχυμέτρων (κεφ.3.2.4), είναι η σάρωση και ανάγνωση των ανωμαλιών της επιφάνειας από το στυλίσκο (Stylus) που ολισθαίνει επάνω στη μετρούμενη επιφάνεια (Σχήμα 6.21).



Σχήμα 6.21: Μετακινούμενο στέλεχος-στυλίσκος (αισθητήρας) του τραχυμέτρου Surtronic 3+.

Ο στυλίσκος του τραχυμέτρου, διαθέτει μια διαμαντένια ακίδα και είναι προσαρμοσμένος στο στέλεχος (βραχίονας ή μορφοτροπέας ή στοιχείο αντίληψης - Pick up), το οποίο πραγματοποιεί εγκάρσιες κινήσεις μέσω μετακινούμενου άξονα. Το μετακινούμενο στέλεχος του οργάνου σαρώνει

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

κατά μήκος και με σταθερή ταχύτητα την προς μέτρηση επιφάνεια και οι κατακόρυφες κινήσεις του συστήματος ακίδας-στυλίσκου, μετατρέπονται σε ηλεκτρικό ρεύμα. Το σήμα που λαμβάνεται, διέρχεται από αναλογικό ενισχυτή - καταγραφέα, όπου ενισχύεται και καταγράφεται. Η δυνατότητα της σύνδεσης του αναλογικού οργάνου με Η/Υ επιτρέπει την ψηφιοποίηση του σήματος, τη γραφική αναπαραγωγή του και τον υπολογισμό μέσω ενσωματωμένων αλγορίθμων, χαρακτηριστικών παραμέτρων τραχύτητας της γεωμετρίας της επιφάνειας.

Χαρακτηριστικό των οργάνων τύπου στυλίσκου, είναι η πολύ μικρή δύναμη με την οποία πιέζεται η ακίδα επάνω στη εξεταζόμενη επιφάνεια, η οποία είναι περί της τάξης του 1mN. Αποφεύγεται, έτσι, η χάραξη της επιφάνειας, που θα συνεργούσε στην αλλοίωση των μετρούμενων μεγεθών[1]. Με εφαρμογή διαφόρων τύπων στυλίσκων είναι δυνατό να γίνει μέτρηση της τραχύτητας περίπλοκων επιφανειών, όπως για παράδειγμα κυρτών με σχετικά μεγάλο βάθος και άλλων. Οι ακτίνες καμπυλότητας των στυλίσκων του εμπορίου κυμαίνονται από 2μm έως 10μm.

Συνοψίζοντας, τα κυριότερα τεχνικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του τραχυμέτρου Surtronic 3+ είναι τα ακόλουθα:

Πίνακας 6.12: Τεχνικά χαρακτηριστικά του τραχύμετρου Surtronic 3+. [200]

Τραχύμετρο Surtronic 3+ (Taylor Hobson)		
Χαρακτηριστικά	**Μονάδες**	**Τιμές**
Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας (στέλεχος 112/1502)	μm	5
Διαδρομή της ακίδας	mm	0.25-25
Εγκάρσια ταχύτητα	mm/sec	1
Μήκη αποκοπής	mm	0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8 (*)
Μονάδες μέτρησης		mm / inch
Φίλτρα		Ψηφιακό Gauss, 2RC Phase Corrected, 2CR (ISO), Sliding average (*)
Παράμετροι τραχύτητας		ISO 4287, DIN 4776, ISO 12085
Διαστάσεις LxWxH	mm	170x100x60
Βάρος	kg	7,3

(*) Ορισμένα από τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά επιτυγχάνονται μόνο μέσω του λογισμικού υποστήριξης του τραχυμέτρου Talyprofile (*κεφ.*6.6.2).

[1] Στην πραγματικότητα, η ακίδα χαράσσει την επιφάνεια αλλά σε τέτοιο βαθμό που η επίδρασή της να μην αλλοιώνει τα μετρούμενα μεγέθη και να θεωρείται αμελητέα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

6.6.2 Λογισμικό επεξεργασίας των μετρήσεων του τραχυμέτρου

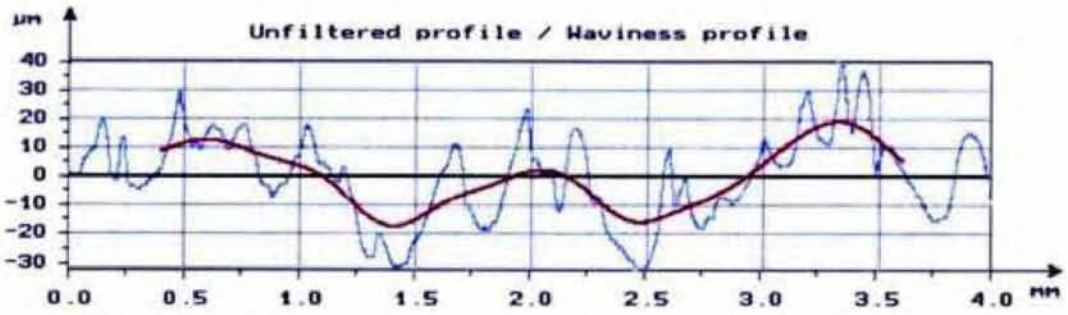
Το μηχανικό τραχύμετρο Surtronic 3+ έχει τη δυνατότητα επικοινωνίας και λειτουργίας με Η/Υ, μέσω του λογισμικού Talyprofile της ίδιας εταιρείας Taylor-Hobson. Με το συγκεκριμένο λογισμικό παρέχεται η δυνατότητα χειρισμού του τραχυμέτρου μέσω του Η/Υ, η επεξεργασία των μετρήσεων με την εφαρμογή ψηφιακών φίλτρων, ο υπολογισμός εξειδικευμένων παραμέτρων τραχύτητας μέσω αλγορίθμων και η γραφική απεικόνιση των μετρούμενων προφίλ επιφανείας. Συνοπτικά τα βασικότερα χαρακτηριστικά του λογισμικού Talyprofile είναι τα εξής [200]:

- Απεικόνιση τόσο του φιλτραρισμένου, όσο και του αφιλτράριστου περιγράμματος της επιφάνειας, με δυνατότητες επιλογής εναλλακτικών φίλτρων, αλλά και διαφόρων τιμών όσον αφορά το μήκος κύματος αποκοπής (Πίνακας 6.12)
- Φασματική ανάλυση του περιγράμματος.
- Παρουσίαση της καμπύλης κατανομής των εύρων (amplitude distribution) και της καμπύλης φέρουσας επιφάνειας (bearing area curve ή material ratio curve ή Abbott-Firestone curve).
- Μέτρηση απόστασης μεταξύ δύο σημείων του περιγράμματος.
- Εμβαδομέτρηση σε επιλεγμένη περιοχή του περιγράμματος.
- Υπολογισμός πληθώρας παραμέτρων της τραχύτητας (ύψους, μήκους, υβριδικές και στατιστικές) κατά τα διεθνή πρότυπα ISO4287 [102] (παράμετροι τραχύτητας R_a, R_z, R_t, R_p, R_{sk}, κ.α. ή παράμετροι κυμάτωσης W_a, W_z, W_t, W_p, W_{sk} κ.α.), αλλά και παραμέτρων κατά DIN4776 [74] (R_k, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2 κ.α.) και κατά ISO12085 [105] (παράμετροι Motif: R, AR, Rx, κ.α.).

Μέσω των διαθέσιμων φίλτρων, το λογισμικό Talyprofile παρέχει τη δυνατότητα διαχωρισμού του προφίλ της μετρούμενης επιφάνειας στην τραχύτητα (Roughness) και την κυμάτωση (Waviness) (κεφ.3.2.2). Η τραχύτητα είναι η πραγματική επιφάνεια που προκύπτει μετά την επεξεργασία που έχει υποστεί το δοκίμιο, ενώ η κυμάτωση συνήθως προέρχεται από αστάθεια του συστήματος κοπής (τεμάχιο - εργαλειομηχανή) που πιθανόν υφίσταται κατά τη διάρκεια της μηχανουργικής κατεργασίας. Το μήκος κύματος της κυμάτωσης είναι μεγαλύτερο από αυτό της τραχύτητας και

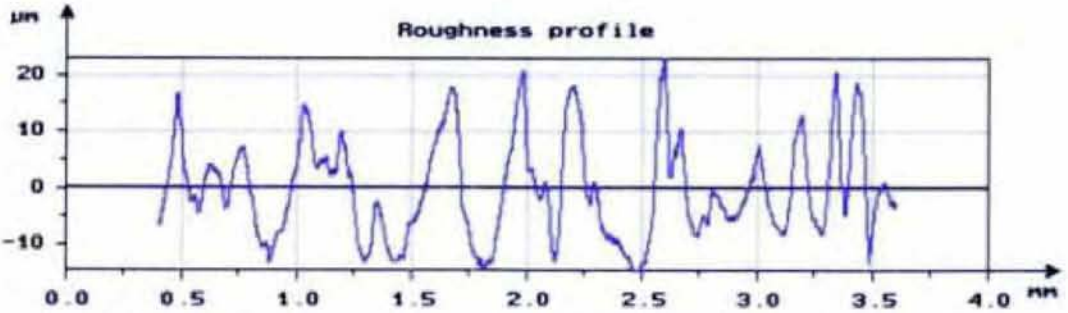
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

σχηματικά "τοποθετείται" πάνω από αυτό. Στην εικόνα 6.18 με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται η κυμάτωση και με μπλε χρώμα η τραχύτητα, από όπου γίνεται ξεκάθαρο ότι το μήκος κύματος της κυμάτωσης είναι αρκετά μεγαλύτερο.



Σχήμα 6.22: Προφίλ της επιφάνειας χωρίς την εφαρμογή φίλτρου (Unfiltered Profile) α) προφίλ της κυμάτωσης με κόκκινο χρώμα (Waviness Profile), β)προφίλ της τραχύτητας με μπλε χρώμα (Roughness Profile)

Με την εφαρμογή κατάλληλου φίλτρου λαμβάνεται το τελικό προφίλ της τραχύτητας (form-profile), όπου τα χαρακτηριστικά του εξαρτώνται αποκλειστικά από το είδος και τις συνθήκες κατεργασίας (Σχήμα 6.23).



Σχήμα 6.23: Τελικό προφίλ τραχύτητας (Roughness Profile ή Form Profile) μετά την εφαρμογή φίλτρου Gauss.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 7: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ

7.1 Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα της τόρνευσης πραγματοποιήθηκαν στον συμβατικό τόρνο αυτόματης πρόωσης, τύπου TRIUMPH 2500 της εταιρίας COLCHESTER (κεφ.6.1). Το είδος της τόρνευσης που εξετάστηκε, ήταν η εξωτερική διαμήκης (ή περιφερειακή), η οποία αποτελεί την πιο συνηθισμένη παραγωγική διαδικασία μορφοποίησης των τεμαχίων σε τόρνο [25]. Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της τόρνευσης χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30, διαμέτρου 150mm και μήκους 500mm (κεφ.6.4). Τα δοκίμια προσδένονταν προσεκτικά στο σιαγωνοτό σφιγκτήρα (τσοκ) του τόρνου και για το κεντράρισμα και την σταθεροποίησή τους χρησιμοποιήθηκε κεντροφορέας, αποφεύγοντας έτσι το βέλος κάμψης και όλες τις αρνητικές επιπτώσεις που θα είχε αυτό στις μετρήσεις των δυνάμεων και κυρίως στην τραχύτητα της επιφάνειας. Η συγκράτηση, επίσης, του κοπτικού εργαλείου έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε, το ελεύθερο μήκος του να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ελαχιστοποιώντας φαινόμενα λυγισμού και αναπήδησής του κατά την διάρκεια της κοπής. Το εργαλείο κοπής στερεώνεται στον εργαλειοφορέα 9403, που είναι κατάλληλα διαμορφωμένος για χρήση με το δυναμόμετρο 9257B της Kistler (κεφ.6.5.3) και προσαρτάται ακλόνητα επάνω σε αυτό. Το δυναμόμετρο στερεώνεται ακολούθως, σε κατάλληλα διαμορφωμένη ενδιάμεση βάση, η οποία προσαρμόζεται και προσδένεται σταθερά στην περιστρεφόμενη βάση του εργαλειοδέτη του τόρνου (κεφ.6.1.1). Όλες οι συνδέσεις πραγματοποιούνται με κατάλληλους κοχλίες (Σχήμα 7.1).



Σχήμα 7.1: Διάταξη δυναμομέτρου και εργαλείου κοπής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Το εργαλείο κοπής (ένθετο πλακίδιο) και ο εργαλειοφορέας (φορέας πλακιδίου κοπής ή στέλεχος) επιλέχθηκαν κατάλληλα, ώστε ο συνδυασμός των γεωμετρικών χαρακτηριστικών τους να προσεγγίζει τις συνθήκες ορθογωνικής κοπής (κεφ.4.1, κεφ.4.2.1, [25][13]). Το εργαλείο κοπής είναι επικαλυμμένο καρβίδιο τετραγωνικής μορφής τύπου P20 κατά το ISO513 (κεφ.6.1.2) και μέσω του εργαλειοφορέα επιτυγχάνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του Πίνακα 6.2. Όλες οι κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν με άφθαρτο εργαλείο, γεγονός που απαιτούσε την αντικατάστασή του όταν κρινόταν αναγκαίο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.2 Πειραματικός σχεδιασμός τόρνευσης

7.2.1 Παράμετροι των πειραμάτων της τόρνευσης

Παράγοντες που επηρεάζουν γενικότερα την κατεργασία της τόρνευσης είναι η πρόωση, η περιστροφική ταχύτητα, η ταχύτητα κοπής, το βάθος κοπής, η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες του κατεργαζόμενου υλικού, η γεωμετρία και οι μηχανικές ιδιότητες του εργαλείου κοπής, το υγρό κοπής, οι ταλαντώσεις της εργαλειομηχανής κ.α.. Αντίθετα, εξαρτημένες μεταβλητές (μετρούμενα μεγέθη) ενός πειράματος τόρνευσης, αποτελούν οι δυνάμεις κοπής, οι παράμετροι της τραχύτητας επιφανείας (παράμετροι τραχύτητας αξονικά, παράμετροι τραχύτητας περιφερειακά και παράμετροι κυμάτωσης), η διαστατική ακρίβεια, η φθορά του εργαλείου, η αναπτυσσόμενη θερμοκρασία κ.α. Ένας πλήρης πειραματικός σχεδιασμός θα περιλάμβανε όλους τις παραπάνω παραμέτρους κατεργαστικότητας. Για λόγους όμως απλούστευσης της στατιστικής ανάλυσης, αλλά και για λόγους πολλές φορές αδυναμίας παρακολούθησης και καταμέτρησης των τιμών τους, οι παράγοντες περιορίζονται σε όσους θεωρούνται σημαντικότεροι για το εξεταζόμενο σύστημα κατά περίσταση. Καθώς, η συγκεκριμένη διατριβή στοχεύει στο να επικεντρωθεί στη συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού ως προς την κατεργαστικότητά του και στον έλεγχο της σημαντικότητας και αξιοπιστίας των στοχαστικών μοντέλων που προκύπτουν με πειραματικό σχεδιασμό, επιλέχθηκαν ως παράγοντες των πειραμάτων οι βασικοί παράμετροι της κατεργασίας της τόρνευσης (συνθήκες κατεργασίας) η πρόωση και η ταχύτητα κοπής. Επίσης, ως αποκρίσεις επιλέχθηκαν οι δυνάμεις κοπής και έξι παράμετροι τραχύτητας (κεφ.3.2.3) που θα συντελέσουν στην περιγραφή των χαρακτηριστικών της προκύπτουσας κατεργασμένης επιφάνειας.

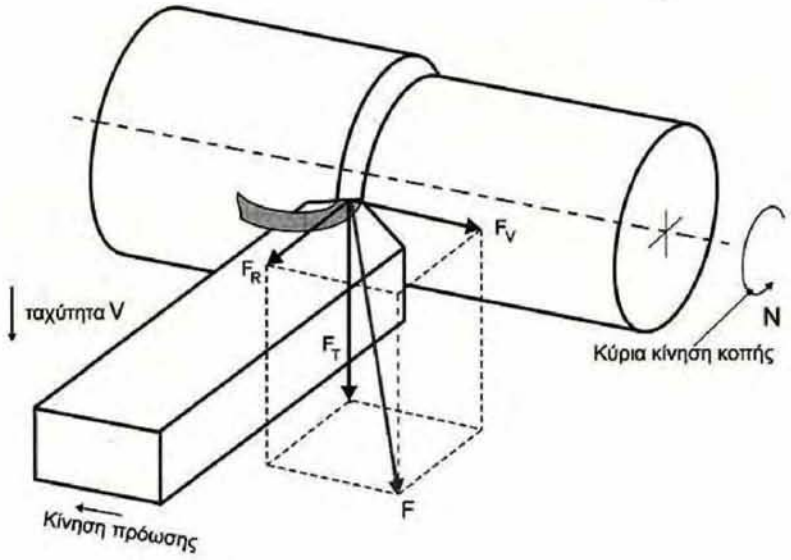
Κατά τη διαμήκη τόρνευση η δύναμη κοπής F αναλύεται στην κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_T, στην δύναμη πρόωσης F_v και στην δύναμη απώθησης του εργαλείου F_R (Σχήμα 7.2 [13][25]). Οι συνιστώσες της δύναμης κοπής μετρώνται κατά την εκτέλεση της κατεργασίας από το 3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B της εταιρίας Kistler (κεφ.6.5.3). Με βάση τα γεωμετρικά στοιχεία στο Σχήμα 7.2 είναι προφανές ότι ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$F = \sqrt{F_T^2 + F_V^2 + F_R^2} \qquad (7.1)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Επίσης, μέσω της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής υπολογίζεται η ισχύς της κοπής P_C ως εξής [25]:

$$P_c = \frac{F_T U}{6120} \quad [kW] \qquad (7.2)$$



Σχήμα 7.2: Οι δυνάμεις κοπής κατά τη διαμήκη τόρνευση (F η δύναμη κοπής, F_T η κύρια συνηστώσα της δύναμης κοπής, F_V η δύναμη πρόωσης και F_R η δύναμη απώθησης του εργαλείου.**[13][25]**

Συνοψίζοντας, οι μεταβλητές που συγκροτούν τον πειραματικό σχεδιασμό των πειραμάτων της τόρνευσης είναι:

➢ Ως παράγοντες του στοχαστικού μοντέλου (ανεξάρτητες μεταβλητές, X_i), ορίζονται η πρόωση S και η ταχύτητα κοπής V (Πίνακας 7.1).

➢ Ως αποκρίσεις του στοχαστικού μοντέλου (εξαρτημένες μεταβλητές, Y_i), ορίζονται οι τρεις δυνάμεις κοπής, οι οποίες δηλαδή, η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_T, η δύναμη πρόωσης F_V και η δύναμη απώθησης εργαλείου F_R, και έξι παράμετροι τραχύτητας, τρεις παράμετροι ύψους που είναι η Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, το Μέγιστο Ύψος R_t, και το Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, μία παράμετρος μήκους που είναι το Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}, και δύο στατιστικές παράμετροι, η Λοξότητα R_{sk} και η Κυρτότητα R_{ku} (Πίνακας 7.2).

Πίνακας 7.1: Παράγοντες των πειραμάτων της τόρνευσης

Παράγοντες	
Πρόωση S (mm/rev)	Ταχύτητα κοπής V (m/min)
X_1	**X_2**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.2: Αποκρίσεις των πειραμάτων της τόρνευσης

Αποκρίσεις Δυνάμεων			Αποκρίσεις Παραμέτρων Τραχύτητας					
Κύρια συνιστώσα της Δύναμης Κοπής F_T (N)	Δύναμη Πρόωσης F_V (N)	Δύναμη Απώθησης Εργαλείου F_R (N)	Μέση αριθμητική Τραχύτητα R_a (μm)	Μέγιστο ύψος R_t (μm)	Μέγιστο ύψος κορυφής R_p (μm)	Μέσο διάστημα κορυφών R_{sm} (mm)	Λοξότητα R_{sk}	Κυρτότητα R_{ku}
Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9

Το βάθος κοπής διατηρήθηκε σταθερό στα 2mm και δεν χρησιμοποιήθηκε υγρό κοπής (στεγνή κοπή). Έτσι, εξασφαλίστηκε όσο το δυνατόν περισσότερο η εξάρτηση των μετρούμενων μεγεθών από την πρόωση και την ταχύτητα κοπής.

7.2.2 Καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων

Η κατεργασία συντελέστηκε σε πέντε διαφορετικές προώσεις (0.05, 0.10, 0.16, 0.20, 0.24 mm/rev) και τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής (200, 350, 500 m/min), και το μήκος της κάθε κοπής διατηρήθηκε στα 30mm. Συνοπτικά, τα επίπεδα των παραγόντων του πειραματικού σχεδιασμού, δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 7.3: Επίπεδα των παραγόντων των πειραμάτων της τόρνευσης.

Επίπεδα Παραγόντων	
Πρόωση S (mm/rev)	**Ταχύτητα κοπής V (m/min)**
0,05	200
0,10	350
0,16	500
0,20	
0,24	

Από τις τιμές της ταχύτητας κοπής υπολογίζονται οι τιμές της περιστροφικής ταχύτητας των πειραμάτων (στροφές του τόρνου), μέσω της παρακάτω σχέσης που προκύπτει από την κινηματική της τόρνευσης (Σχήμα 4.6, Σχήμα 4.6 Σχήμα 7.2, [13][25]):

$$V = \frac{\pi N D}{1000} [m/\min] \qquad (7.1)$$

όπου *N* (rev/min) η περιστροφική ταχύτητα και D (mm) η διάμετρος του τεμαχίου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Επιλύοντας ως προς την περιστροφική ταχύτητα και με βάση τις τιμές του πίνακα 7.3, υπολογίζονται οι αντίστοιχες στροφές του τόρνου με τις οποίες θα πραγματοποιηθούν τα πειράματα:

Πίνακας 7.4: Περιστροφική ταχύτητα (στροφές) των πειραμάτων τόρνευσης.

Ταχύτητα κοπής V (m/min)	Περιστροφική ταχύτητα N (rpm)
200	425
350	743
500	1062

Επίσης, από την Σχέση 7.2 ([13][25]) και για σταθερό μήκος κοπής L ίσο με 30mm υπολογίζονται οι χρόνοι κοπής για κάθε συνδυασμό των παραγόντων S και V (Πίνακας 7.5).

$$t = 60\frac{L}{SN} \quad \text{[sec]} \qquad (7.2)$$

όπου L (mm) το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Πίνακας 7.5: Χρόνοι κοπής σε sec για κάθε συνδυασμό πρόωσης S(mm/rev) και περιστροφικής ταχύτητας *N*(rpm)

t (sec)		S (mm/rev)				
		0,05	0,1	0,16	0,2	0,24
N (rpm)	425	85	42	27	21	18
	743	48	24	15	12	10
	1062	34	17	11	8	7

7.2.3 Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού

Επιλέγοντας τον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό (Full Factorial Design), ο αριθμός των πειραμάτων (κοπές για κάθε συνδυασμό των παραγόντων) που απαιτούνται στις επιλεγμένες συνθήκες κοπής, δίνεται από τον πολλαπλασιασμό των επιπέδων των παραγόντων (κεφ.5.3.1), δηλαδή:

Συνδυασμοί** = **5** (επίπεδα πρόωσης) **x 3** (επίπεδα ταχύτητας κοπής) = **15

Επίσης, για να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των μετρήσεων πραγματοποιούνται τρεις επαναλήψεις για κάθε κοπή, γεγονός που αυξάνει

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

τον αριθμό των απαιτούμενων δοκιμών στις 45 (κεφ.5.3). Ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων, όπως προκύπτει παραπάνω, δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλος και επομένως, δεν υφίσταται λόγος να εφαρμοστεί κάποιος κλασματικός πειραματικός σχεδιασμός (Fractional Factorial Design), ο οποίος μειώνει αφενός τον αριθμό των δοκιμών, με τον κίνδυνο όμως απώλειας πληροφοριών που ενδεχομένως να καθόριζαν διαφορετικά τα στατιστικά συμπεράσματα (κεφ.5.3.1). Με βάση, λοιπόν, τη μέθοδο του πλήρη παραγοντικού σχεδιασμού και μέσω στατιστικού πακέτου που αποδίδει τυχαιότητα στην σειρά εκτέλεσης των πειραμάτων πραγματοποιείται ο πίνακας σχεδιασμού του πειράματος ή πειραματικός χώρος (Design Matrix) (κεφ.5.3):

Πίνακας 7.6: Πειραματικός χώρος (Design Matrix) πειράματος τόρνευσης.

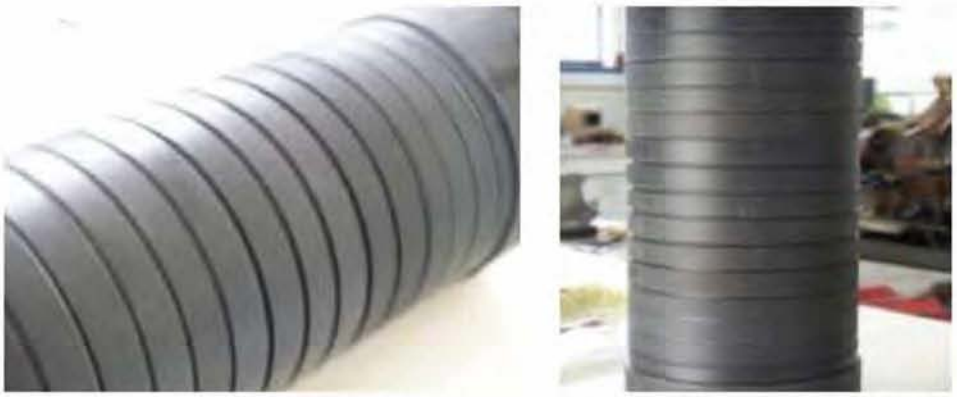
Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)
1	5	0,05	200
2	11	0,1	200
3	1	0,16	200
4	10	0,2	200
5	15	0,24	200
6	6	0,05	350
7	4	0,1	350
8	8	0,16	350
9	14	0,2	350
10	12	0,24	350
11	3	0,05	500
12	13	0,1	500
13	2	0,16	500
14	9	0,2	500
15	7	0,24	500

Στον παραπάνω πίνακα, η στήλη Std (Standard Order) είναι η κανονική σειρά των δοκιμών και αποτελεί την συμβατική ακολουθία εκτέλεσης των πειραμάτων. Το στατιστικό πρόγραμμα παραθέτει τη στήλη Run (Run Order), όπου προτείνει την πραγματοποίηση των δοκιμών με κάποια τυχαιότητα (randomization), η οποία προκύπτει μέσω αλγόριθμου τυχαίων αριθμών. Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με βάση τη σειρά Run, εξασφαλίζοντας έτσι, την κανονική και ανεξάρτητη κατανομή των πειραματικών σφαλμάτων (κεφ.5.3) .

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.2.4 Πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής

Κατά τη διάρκεια της τόρνευσης των δοκιμίων στους προαναφερθέντες συνδυασμούς, πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις των τριών δυνάμεων κοπής, της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής (F_t), της δύναμης πρόωσης (F_v) και της δύναμης απώθησης του εργαλείου (F_r), μέσω του 3-αξονικού δυναμόμετρου 9257B της Kistler (κεφ.6.5.3). Για την κάθε κοπή πραγματοποιήθηκαν τρεις επαναλήψεις, με αποτέλεσμα οι τιμές των αποκρίσεων να αποτελούν το μέσο όρο αυτών. Η καταμέτρηση των δυνάμεων από το δυναμόμετρο πραγματοποιήθηκε με συχνότητα 100Hz, δηλαδή, λαμβάνοντας 100 σημεία ανά δευτερόλεπτο (sec). Το πλήθος, επομένως, των σημείων των μετρήσεων διαφέρει για κάθε πείραμα και είναι, όσο ο χρόνος κοπής της εκάστοτε δοκιμής σε sec (Πίνακας 7.5), πολλαπλασιαζόμενος επί τη συχνότητα (x100).



Σχήμα 7.3: Κατεργασμένα δοκίμια.

Με την κατάλληλη επεξεργασία των διαγραμμάτων που εξάγονται από το συνεργαζόμενο με το δυναμόμετρο λογισμικό επεξεργασίας των σημείων, προκύπτουν οι τιμές των δυνάμεων κοπής για κάθε δοκιμή (κεφ.6.5.5). Παραθέτοντας τις πειραματικές μετρήσεις στον πίνακα 7.6 συντελείται ο συγκεντρωτικός πειραματικός χώρος για τις δυνάμεις κοπής (Πίνακας 7.7). Οι τιμές των αποκρίσεων, αποτελούν τον μέσο όρο τριών επαναλήψεων. Στον πίνακα Α1 του παραρτήματος Α, δίνεται ο πλήρης πίνακας δεδομένων των δυνάμεων για κάθε επανάληψη.

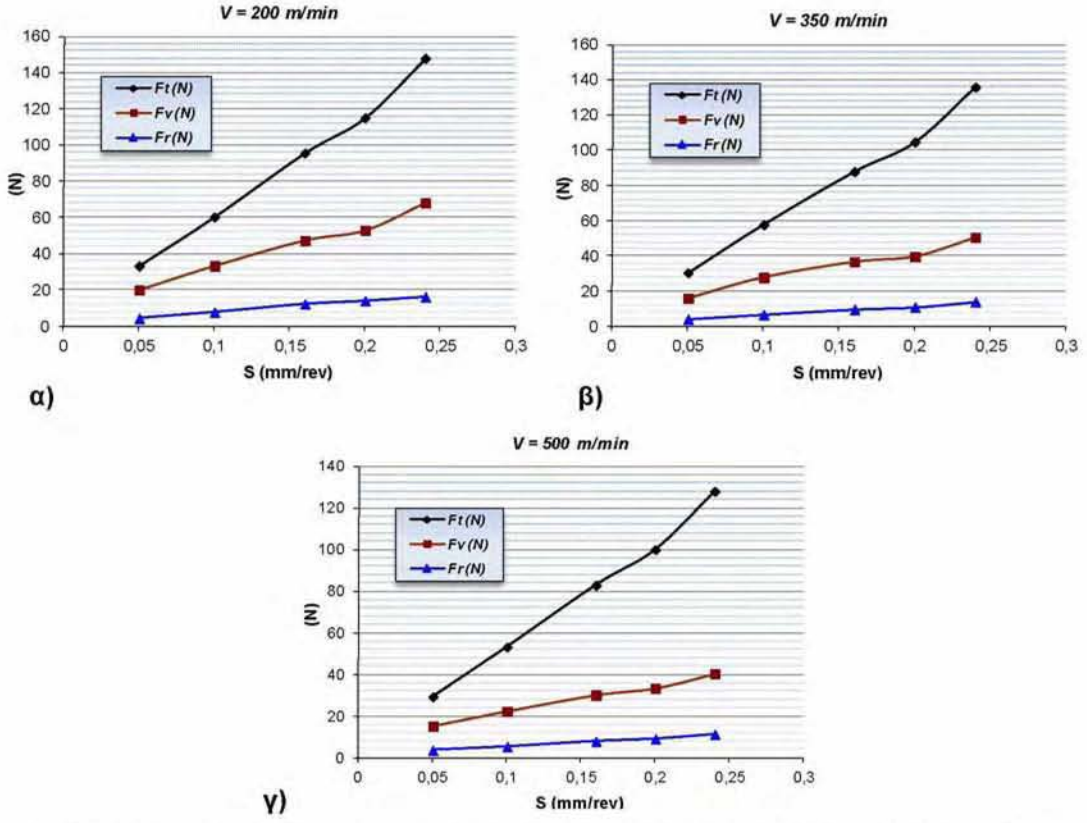
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.7: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής.

Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)	F_t (N) *	F_v (N) *	F_r (N) *
1	5	0,05	200	33,12	19,87	4,13
2	11	0,1	200	60,24	33,15	7,53
3	1	0,16	200	95,56	47,21	12,07
4	10	0,2	200	115,08	52,77	13,84
5	15	0,24	200	147,89	67,99	16,12
6	6	0,05	350	30,24	15,76	3,92
7	4	0,1	350	57,78	27,68	6,53
8	8	0,16	350	87,78	36,47	9,5
9	14	0,2	350	104,61	39,58	10,75
10	12	0,24	350	135,93	50,32	13,88
11	3	0,05	500	29,11	15,04	3,45
12	13	0,1	500	53,07	22,14	5,12
13	2	0,16	500	82,79	29,98	7,76
14	9	0,2	500	99,84	33,26	8,95
15	7	0,24	500	127,82	40,22	11,17

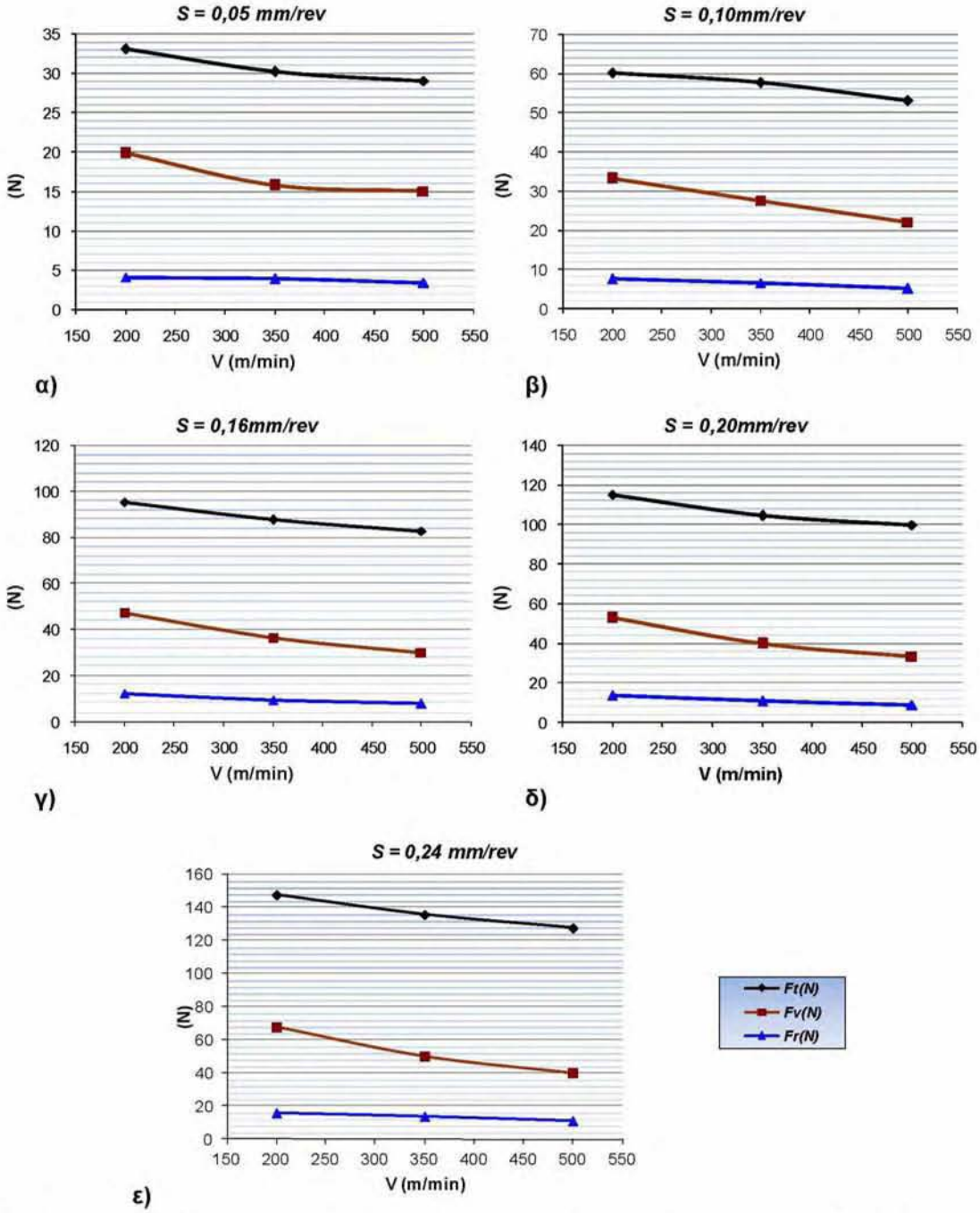
*Μέσος όρος τριών επαναλήψεων

Με βάση τις τιμές των μετρήσεων του πίνακα 7.7 κατασκευάζονται τα επόμενα διαγράμματα, από τα οποία μπορεί να γίνει μια πρώτη εκτίμηση της συμπεριφοράς των δυνάμεων σε σχέση με τους παράγοντες κοπής.



Σχήμα 7.4: Οι δυνάμεις κοπής συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β) V=350m/min, γ) V=500m/min.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 7.5: Οι δυνάμεις κοπής συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V, για κάθε πρόωση S, α)S=0,05mm/rev, β)S=0,10mm/rev, γ)S=0,16mm/rev, δ) S=0,20mm/rev, ε) S=0,24mm/rev.

Γίνεται εύκολα αντιληπτό από τα παραπάνω διαγράμματα, ότι η αύξηση της πρόωσης οδηγεί, γενικότερα, σε αύξηση και των τριών δυνάμεων, σε όλο το εύρος τιμών της ταχύτητας κοπής των πειραμάτων. Εντονότερη φαίνεται να είναι η επιρροή που ασκεί στην κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής (F_t). Αντίθετα, η αύξηση της ταχύτητας κοπής επηρεάζει αρνητικά τις δυνάμεις για κάθε τιμή της πρόωσης και η επιρροή της φαίνεται να είναι πιο

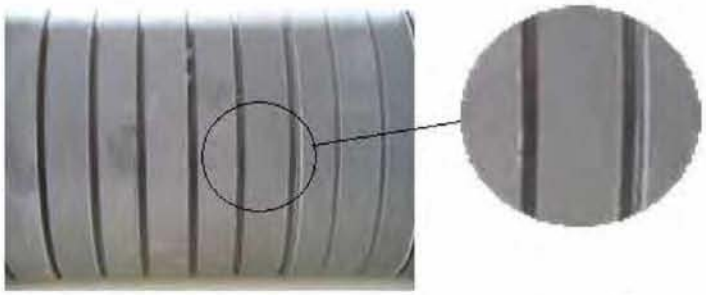
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ασθενής. Η συμπεριφορά της κάθε δύναμης βάσει των πειραματικών μετρήσεων, ως προς κάθε συνδυασμό τιμών των παραγόντων, αποδίδεται πλήρως γραφικά, στα τρισδιάστατα διαγράμματα επιφανείας του παραρτήματος Α (κεφ.Α3, διαγράμματα Α2, Α4, Α6).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.2.5 Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας

Οι προκύπτουσες κατεργαζόμενες επιφάνειες των πειραμάτων της τόρνευσης, αποτελούν τα δοκίμια για τις μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας (Σχήμα 7.6).



Σχήμα 7.6: Επιφάνειες των κατεργασμένων δοκιμίων.

Τα κατεργασμένα στον τόρνο δοκίμια, οδηγήθηκαν στο τραχύμετρο, όπου πραγματοποιήθηκε η μέτρηση των παραμέτρων της τραχύτητας, μέσω του τραχυμέτρου Sutronic 3+ της εταιρίας Taylor-Hobson (κεφ.6.6.1). Οι μετρήσεις της τραχύτητας πραγματοποιήθηκαν κατά την αξονική διεύθυνση της κοπής (διεύθυνση πρόωσης) και διεκπεραιώθηκαν μέσω τριών επαναλήψεων σε διαφορετικά σημεία της κάθε επιφάνειας. Ως μήκος κύματος αποκοπής (cut-off length) επιλέχθηκε η τιμή 0.8mm, που συνίσταται για την κατεργασία σε τόρνο (κεφ.3.2.4.2) και εφαρμόστηκε το φίλτρο ''Gaussian'' (κεφ.3.2.4.3). Επίσης, το δειγματοληπτικό μήκος (L_n) σε κάθε περίπτωση ήταν 4mm[(1)]. Οι παράμετροι που συλλέγονται και μελετώνται μέσω αυτών είναι η Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, το Μέγιστο Ύψος R_t, το Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, το Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}, η Λοξότητα R_{sk} και η Κυρτότητα R_{ku} (κεφ.3.2.3). Παραβάλλοντας τις πειραματικές μετρήσεις στον πειραματικό χώρο (Πίνακας 7.6), κατασκευάζεται ο συγκεντρωτικός πίνακας πειραματικού σχεδιασμού για τις εξεταζόμενες παραμέτρους τραχύτητας (Πίνακας 7.8).

[1] Το δειγματοληπτικό μήκος είναι πέντε μήκη αποκοπής, δηλαδή 5x0.8=4mm (κεφ.3.5.4.2)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.8: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας.

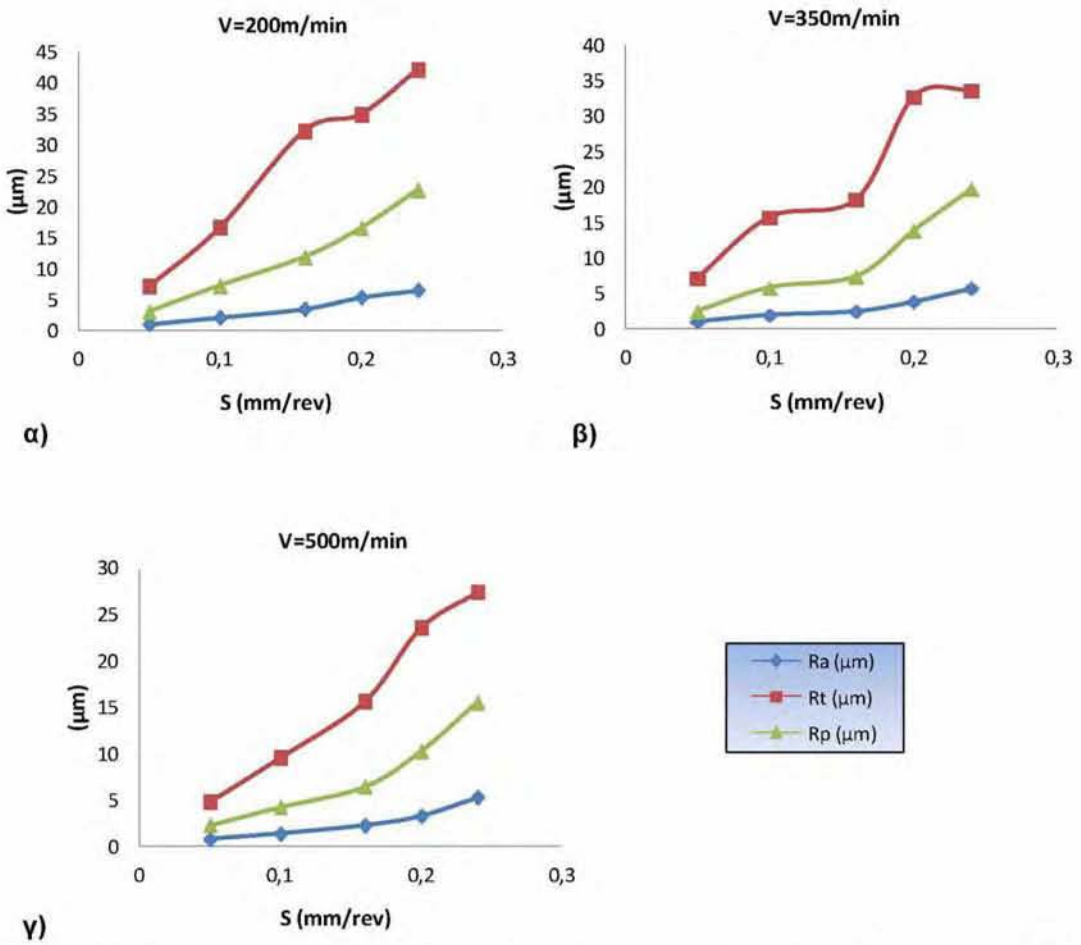
Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)	R_a * (μm)	R_t * (μm)	R_p * (μm)	R_{sm} * (mm)	R_{sk} *	R_{ku} *
1	5	0,05	200	1,02	7,15	2,99	0,12	0,04	2,98
2	11	0,1	200	2,11	16,67	7,20	0,22	0,06	3,57
3	1	0,16	200	3,49	32,30	11,87	0,34	0,38	2,85
4	10	0,2	200	5,39	35,00	16,57	0,52	0,73	3,16
5	15	0,24	200	6,52	42,20	22,77	0,63	0,72	3,22
6	6	0,05	350	0,99	7,14	2,40	0,09	-0,54	3,30
7	4	0,1	350	1,92	15,73	5,73	0,19	-0,34	3,63
8	8	0,16	350	2,45	18,30	7,34	0,31	-0,12	3,05
9	14	0,2	350	3,83	32,77	13,83	0,41	0,87	3,35
10	12	0,24	350	5,71	33,70	19,73	0,50	0,72	2,80
11	3	0,05	500	0,74	4,81	2,27	0,10	-0,25	2,96
12	13	0,1	500	1,34	9,58	4,22	0,13	0,29	3,06
13	2	0,16	500	2,24	15,63	6,42	0,21	-0,09	2,90
14	9	0,2	500	3,26	23,57	10,24	0,31	0,44	3,04
15	7	0,24	500	5,28	27,43	15,50	0,39	0,53	2,48

*Μέσος όρος τριών επαναλήψεων

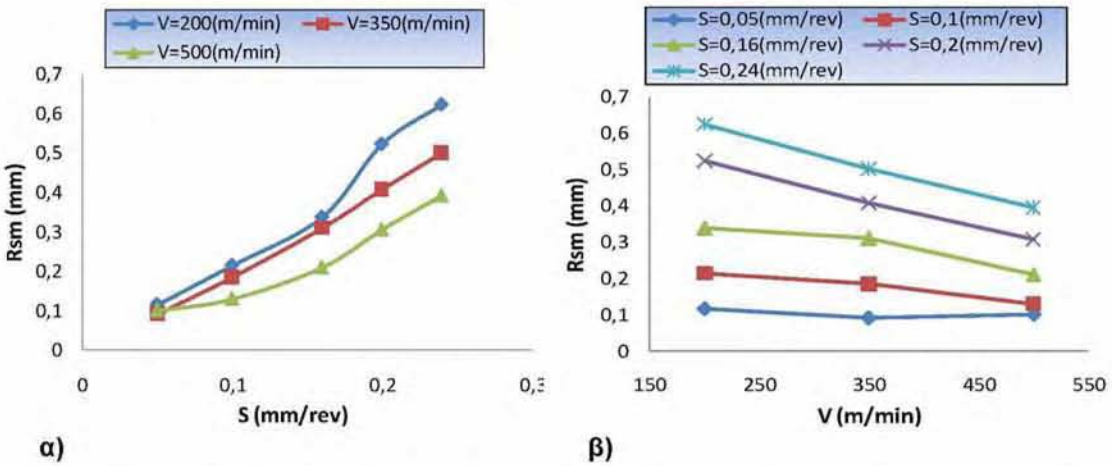
Οι τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας στον πίνακα 7.9 αποτελούν τον μέσο όρο τριών επαναλήψεων. Στους πίνακες Α3 και Α4 του παραρτήματος Α. παρατίθεται ο πλήρης πίνακας των μετρήσεων της κάθε εξεταζόμενης παραμέτρου τραχύτητας, για κάθε επανάληψη.

Με τα δεδομένα του πίνακα 7.9 κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα, όπου οι παράμετροι της τραχύτητας δίνονται σε συνάρτηση με την πρόωση S(mm/rev) για κάθε ταχύτητα κοπής V(m/min) και το αντίστροφο, από τα οποία αποτυπώνονται τα χαρακτηριστικά και η ιδιομορφία της κάθε κατεργασμένης επιφάνειας. Οι παράμετροι ύψους όπως και οι στατιστικές παράμετροι δίνονται σε κοινά διαγράμματα, από όπου διακρίνεται εύκολα η υψηλή ομοιομορφία στη συμπεριφορά τους:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

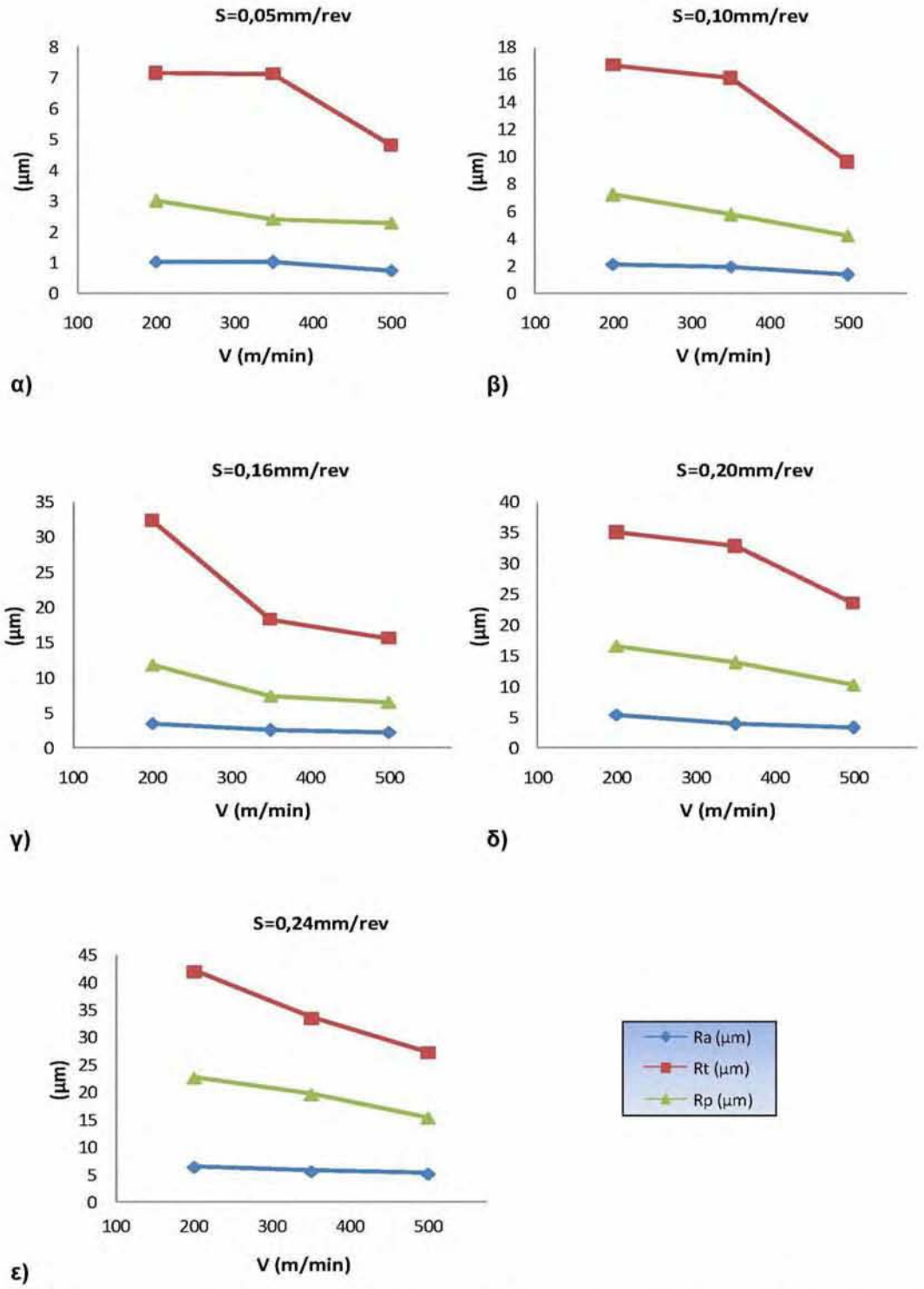


Σχήμα 7.7: Οι παράμετροι ύψους της τραχύτητας συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β) V=350m/min, γ) V=500m/min.



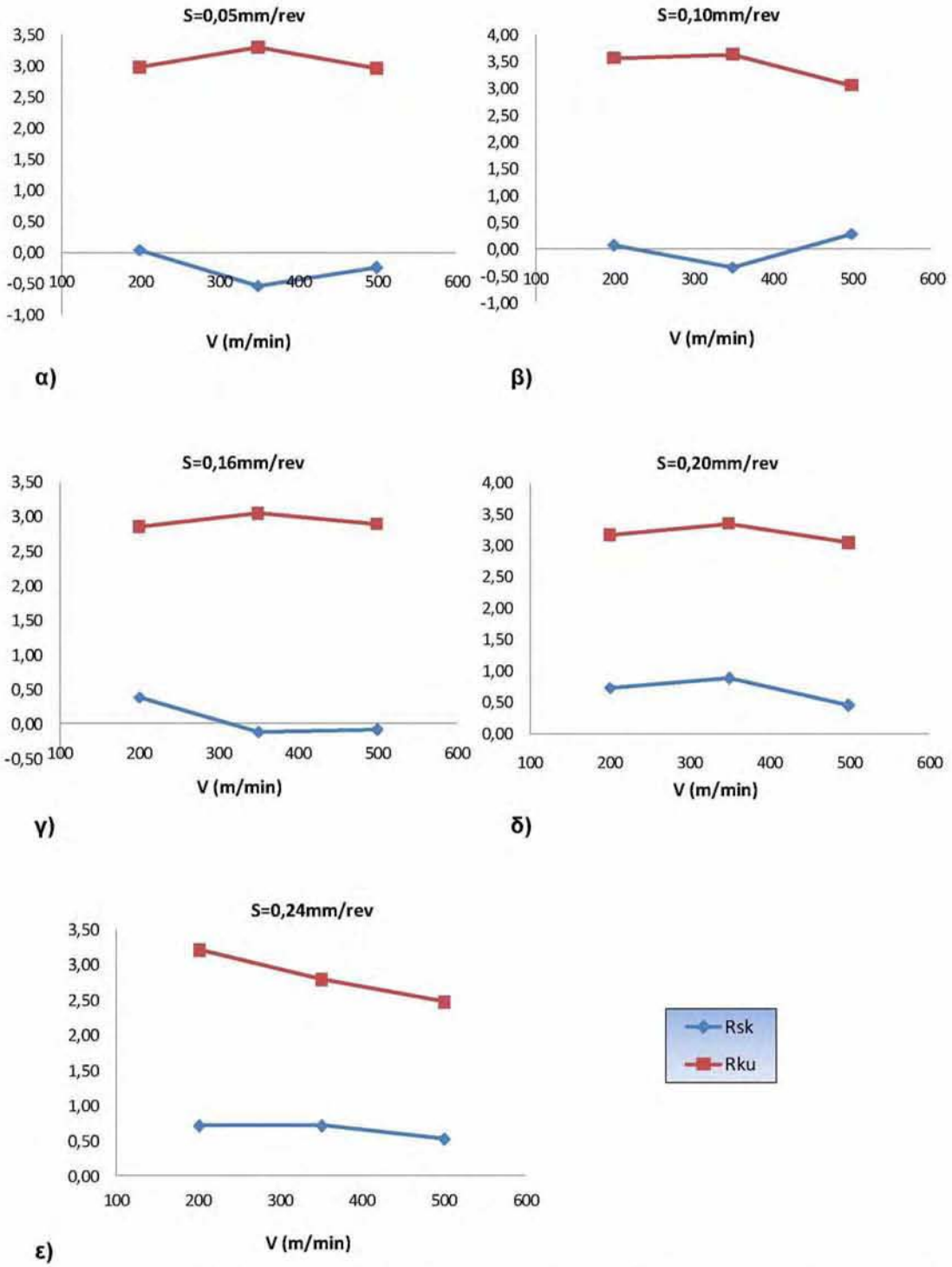
Σχήμα 7.8: Το μέσο διάστημα μέσης γραμμής R_{sm}(mm) α)συναρτήσει της πρόωσης S(mm/rev), για κάθε ταχύτητα κοπής V(m/min), β) συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V(m/min), για κάθε πρόωση S(mm/rev).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



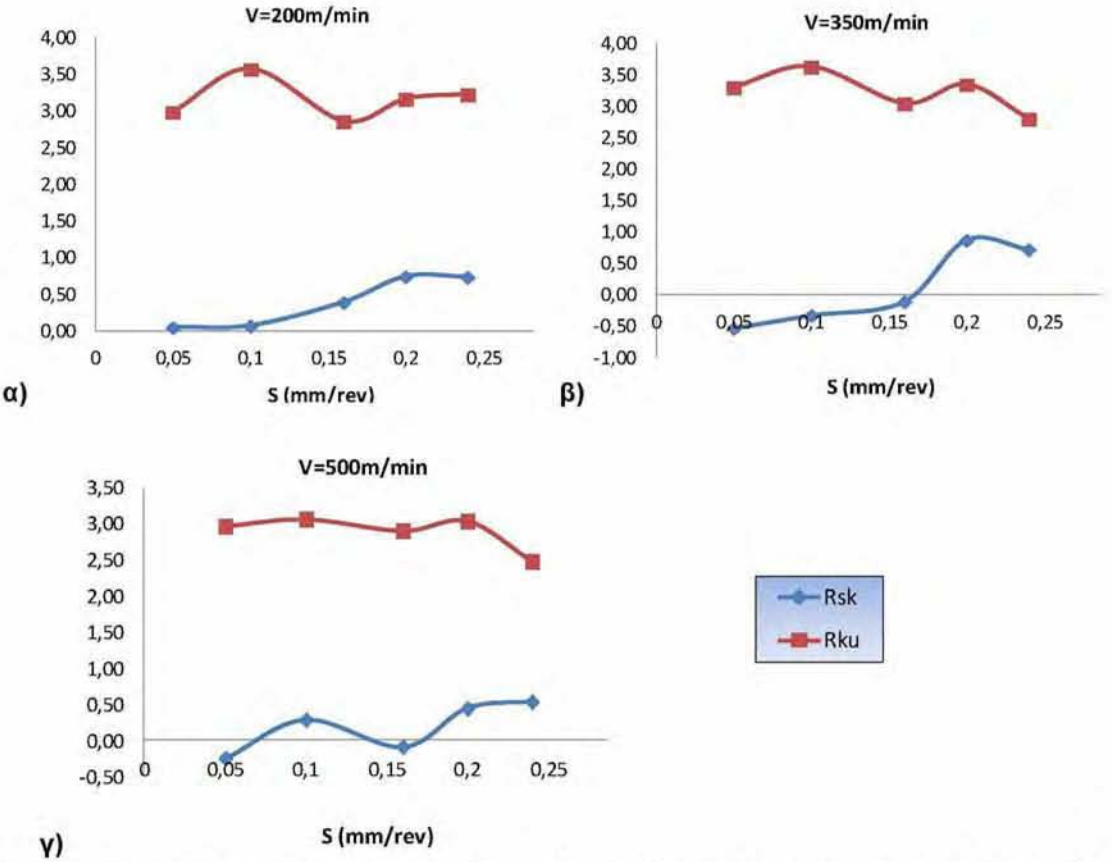
Σχήμα 7.9: Οι παράμετροι ύψους της τραχύτητας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev, β)S=0,10mm/rev, γ)S=0,16mm/rev, δ)S=0,20mm/rev, ε)S=0,24mm/rev.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 7.10: Οι στατιστικές παράμετροι τραχύτητας συναρτήσει της ταχύτητας κοπής V, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev, β)S=0,10mm/rev, γ)S=0,16mm/rev, δ)S=0,20mm/rev, ε)S=0,24mm/rev.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 7.11: Οι στατιστικές παράμετροι τραχύτητας συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β)V=350m/min, γ)V=500m/min.

Το γενικό συμπέρασμα από τα παραπάνω διαγράμματα, είναι ότι η αύξηση της πρόωσης οδηγεί αναμφισβήτητα σε σημαντική αύξηση όλων των μεγεθών ενώ, η επιρροή της ταχύτητας κοπής, φαίνεται να είναι πιο ασθενής και επιφέρει συνήθως ελαφριά πτώση. Όσον αφορά την λοξότητα R_{sk}, η αύξηση της πρόωσης, επιφέρει μια σχετική αύξηση στις τιμές της ενώ, η επιρροή της ταχύτητας κοπής είναι αδιευκρίνιστη. Το βασικό συμπέρασμα όμως είναι ότι η τιμή της είναι συνήθως θετική (>0), γεγονός που αποδεικνύει ότι, το προφίλ των κατεργασμένων επιφανειών στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι «άδειο» από υλικό (κεφ.3.2.3.7). Χαρακτηριστικό είναι, επίσης, το γεγονός ότι για την κυρτότητα R_{ku} δεν είναι ξεκάθαρο πως επιδρούν οι παράγοντες κοπής καθώς, άλλοτε αυξάνουν και άλλοτε μειώνουν της τιμές της, χωρίς κάποια συγκεκριμένη τάση. Το κυριότερο συμπέρασμα είναι ότι οι τιμές της, εκτός από ελάχιστες περιπτώσεις, είναι μεγαλύτερες του 3, γεγονός που αποδεικνύει ότι η κυρτότητα είναι λεπτόκυρτη (R_{ku}>3), δηλαδή, οι κορυφές και οι κοιλάδες είναι αιχμηρές στις περισσότερες περιπτώσεις των κατεργασμένων επιφανειών (κεφ.3.2.3.8).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.3 Στατιστική ανάλυση των δυνάμεων κοπής

7.3.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους

Η στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους περιλαμβάνει τις γραφικές παραστάσεις των κύριων επιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων (κεφ.5.4). Με τη συγκεκριμένη τεχνική, ανιχνεύεται γραφικά η επίδραση που έχουν οι παράγοντες και η αλληλεπίδρασή τους στις αποκρίσεις, πραγματοποιώντας στατιστική επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων (κεφ.5.4).

7.3.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων

Μέσω των διαγραμμάτων των κύριων επιδράσεων, γίνεται διακριτός ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν οι παράγοντες στα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή, αν επιφέρουν αύξηση ή μείωση στις τιμές αυτών και ενδεικτικά σε ποιό βαθμό (κεφ.5.4). Για να επιτευχθεί αυτό, υπολογίζονται από τα δεδομένα του πειραματικού χώρου (Πίνακας 7.7) οι μέσοι όροι των δυνάμεων κοπής για κάθε επίπεδο των παραγόντων. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μέσοι όροι των δυνάμεων όλων των επιπέδων του ενός παράγοντα ανά επίπεδο του δεύτερου:

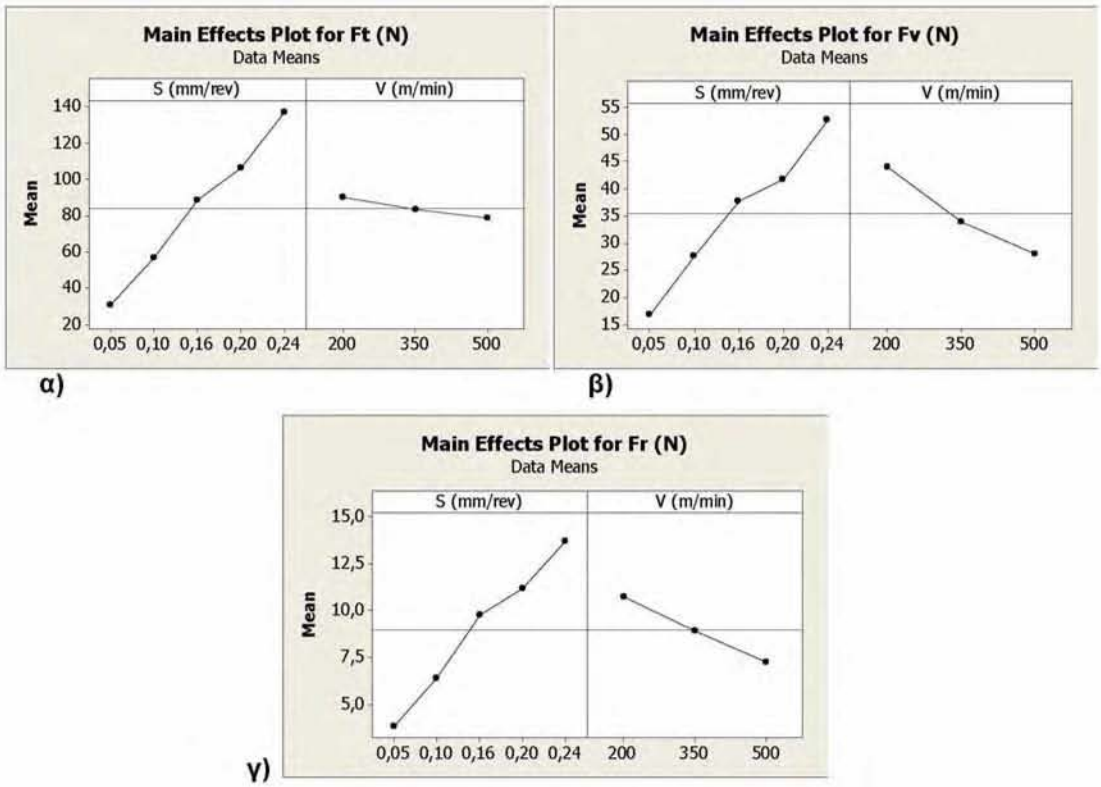
Πίνακας 7.9: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων

		S (mm/rev)				
		0,05	**0,1**	**0,16**	**0,2**	**0,24**
		V (m/min)				
		200	***350***	***500***		
F_t (N)	m_{Vi} (N)	30,82	57,03	88,71	106,51	137,21
	m_{Si} (N)	*90,38*	*83,27*	*78,53*		
F_v (N)	m_{Vi} (N)	16,89	27,66	37,89	41,87	52,84
	m_{Si} (N)	*44,20*	*33,96*	*28,13*		
F_r (N)	m_{Vi} (N)	3,83	6,39	9,78	11,18	13,72
	m_{Si} (N)	*10,74*	*8,92*	*7,29*		

Όπου: m_{Vi} *ο μέσος όρος των δυνάμεων στα επίπεδα της ταχύτητας κοπής*
m_{Si} *ο μέσος όρος των δυνάμεων στα επίπεδα της πρόωσης*

Μέσω των δεδομένων του πίνακα των μέσων όρων (Πίνακας 7.9) κατασκευάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων των παραγόντων για τις δυνάμεις κοπής που παρουσιάζονται ακολούθως.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



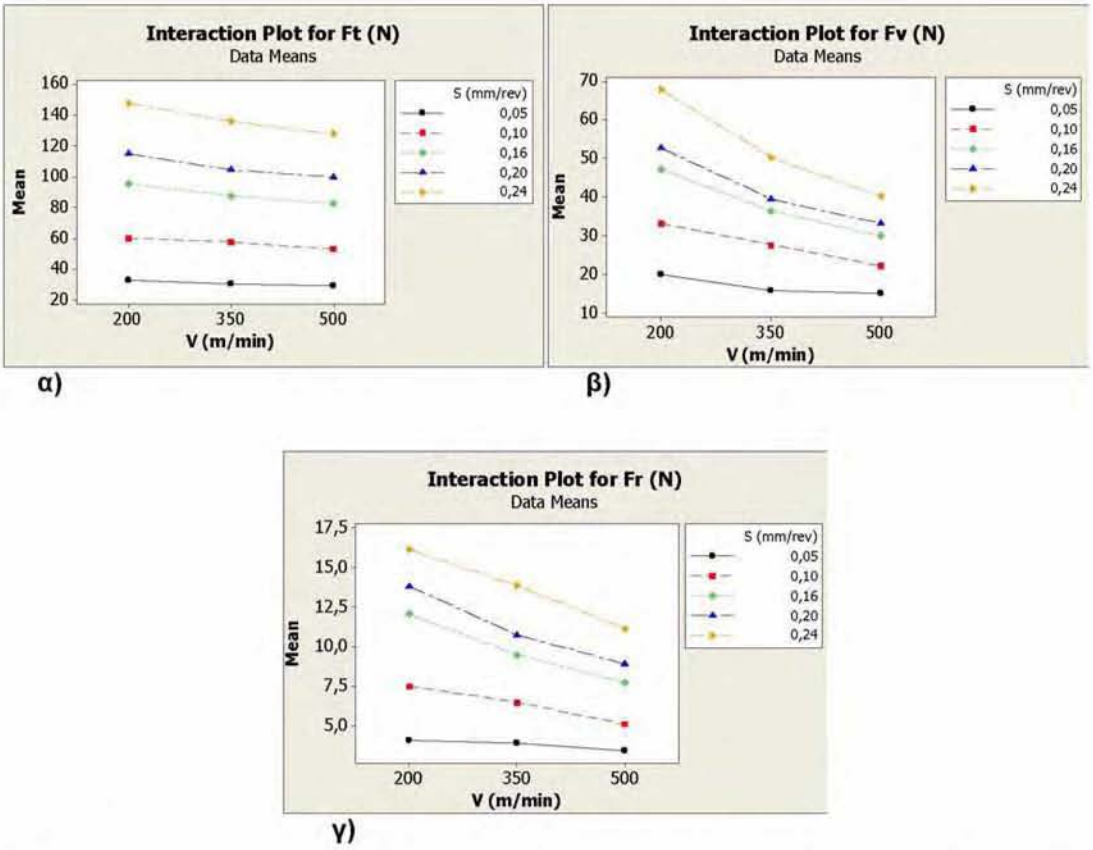
Σχήμα 7.12: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα, για τις δυνάμεις κοπής: α)Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N), β)Δύναμη πρόωσης F_v(N), γ)Δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N).

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι η αύξηση της πρόωσης S(mm/rev) επιφέρει σημαντική αύξηση στις τιμές και των τριών δυνάμεων κοπής. Αντίθετα, ο παράγοντας της ταχύτητας κοπής V(m/min) οδηγεί σε πτώση τις τιμές τους αλλά με σημαντικά μικρότερη ένταση. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι κατά τη διενέργεια μιας κατεργασίας είναι επιθυμητή η ελαχιστοποίηση των δυνάμεων κοπής (ελαχιστοποίηση της καταναλισκόμενης ισχύος), ευνοϊκές συνθήκες για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης διεργασίας και στο υπό εξέταση εύρος τιμών των παραγόντων θα σημειώνονται για τιμή της πρόωσης 0,05mm/rev. Ιδανική συνθήκη κοπής με βάση πάντα τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων συντελείται όταν η ταχύτητα κοπής λάβει ταυτόχρονα την τιμή 500m/min.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.3.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι παράγοντες συνδυάζονται για να επηρεάσουν τις εξαρτημένες μεταβλητές (κεφ.5.4). Τα διαγράμματα κατασκευάζονται από τις τιμές του πίνακα του πειραματικού σχεδιασμού (Πίνακας 7.7).



Σχήμα 7.13: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, για τις δυνάμεις κοπής: α)Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N), β)Δύναμη πρόωσης F_v(N), γ)Δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N).

Είναι εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα ότι, οι γραμμές δεν είναι απόλυτα παράλληλες και επομένως απορρίπτεται το ενδεχόμενο μηδενικής αλληλεπίδρασης. Αντιθέτως, σε αρκετές περιπτώσεις οι γραμμές έχουν έντονη τάση να διασταυρωθούν σε προέκτασή τους, επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη σημαντικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων, η οποία επηρεάζει ανάλογα τις τιμές των δυνάμεων κοπής και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη κατά την διαμόρφωση των μοντέλων προσαρμογής (κεφ.5.5.1).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.3.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων των δυνάμεων κοπής

Ως αρχικό μαθηματικό μοντέλο προσαρμογής επιλέγεται το πλήρες τετραγωνικό (Full Quadratic), δηλαδή, η μαθηματική σχέση που περιλαμβάνει όλους τους παράγοντες του πειράματος, τα τετράγωνα αυτών και τις ανά δύο αλληλεπιδράσεις τους (κεφ.5.5.1). Για τα συγκεκριμένα πειράματα της τόρνευσης με τους δύο παράγοντες κοπής, το αρχικό μοντέλο θα είναι το ακόλουθο (σχέση 5.8):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_1^2 + \beta_4 x_2^2 + \beta_5 x_1 x_2 + \varepsilon$$

όπου x_1 και x_2 οι παράγοντες κοπής (πρόωση και ταχύτητα κοπής) και y οι αποκρίσεις (δυνάμεις κοπής).

Με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων (κεφ.5.5.2) και μέσω του πίνακα των πειραματικών δεδομένων (Πίνακας 7.7), εκτιμάται μια εξίσωση με αντίστοιχες παραμέτρους b_i τέτοια ώστε, το άθροισμα των τετραγώνων των κατακόρυφων αποστάσεων των σημείων (πειραματικές μετρήσεις) από την καμπύλη της εξίσωσης, να είναι το ελάχιστο (ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των σφαλμάτων) (κεφ.5.5.2). Στην συνέχεια, διεξάγεται ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 για να δειχθεί πόσο καλά η εκτιμούμενη εξίσωση περιγράφει τα δεδομένα και ο πίνακας ανάλυσης διακύμανσης (Analysis Of Variance, ANOVA), ώστε να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος της στατιστικής σημαντικότητας των όρων που συμμετέχουν στο μοντέλο (κεφ.5.5.5). Από την ανάλυση διακύμανσης θα καθοριστεί αν θα γίνει επαναπροσδιορισμός του μοντέλου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.3.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα των δυνάμεων κοπής

Η ανάλυση διακύμανσης για το τετραγωνικό μοντέλο της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N) παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 7.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του πλήρες τετραγωνικού μοντέλου, της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N).

Analysis of Variance for Ft (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S (mm/rev)	1	20620,5	451,2	20620,5	2292,00	0,000	97,68%
V (m/min)	1	351,2	3,8	351,2	39,03	0,000	1,66%
S (mm/rev)*S (mm/rev)	1	52,2	52,2	52,2	5,80	0,039	0,25%
V (m/min)*V (m/min)	1	4,7	4,7	4,7	0,52	0,489	0,02%
S (mm/rev)*V (m/min)	1	80,8	80,8	80,8	8,98	0,015	0,38%
Error	9	81,0	81,0	9,0			
Total	14	21190,3					

S = 2,99946 R-Sq = 99,62% R-Sq(adj) = 99,41%

Το αντίστοιχο στοχαστικό μοντέλο για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N) είναι:

$$F_t = 15{,}48 + 495{,}15\,S - 3{,}461\,10^{-2}\,V + 508{,}2\,S^2 + 5.3\,10^{-5}\,V^2 - 27{,}823\,10^{-2}\,S\,V \quad (7.3)$$

Η τιμή του πολλαπλού συντελεστή προσδιορισμού R^2 (multiple coefficient of determination) που παρατίθεται στον πίνακα ανάλυσης διακύμανσης, είναι 99,62%, γεγονός που αποδεικνύει ότι το μοντέλο έχει πολλή υψηλή ακρίβεια προσέγγισης (κεφ.5.5.4).

Στον πίνακα ανάλυσης διακύμανσης, επίσης, παρουσιάζονται οι στατιστικοί έλεγχοι F και p-value για κάθε παράγοντα του μοντέλου, ώστε να διαπιστωθεί η σημαντικότητά τους. Ο p-value του όρου V(m/min)*V(m/min) είναι αρκετά υψηλός (0,489) σε σχέση με το προκαθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας (5% ή 0,05), δηλαδή, ο συγκεκριμένος όρος δεν επηρεάζει σημαντικά την εξίσωση, με αποτέλεσμα να μπορεί να διαγραφεί για την απλοποίηση του μοντέλου προσαρμογής (κεφ.5.5.5).

Η διαγραφή αυτού του όρου, οδηγεί στον τελικό πίνακα ανάλυσης διακύμανσης και στο αντίστοιχο στοχαστικό μοντέλο:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής $F_t(N)$.

Analysis of Variance for Ft (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S (mm/rev)	1	20620,5	451,2	20620,5	2407,72	0,000	97,71%
V (m/min)	1	351,2	0,2	351,2	41,00	0,000	1,66%
S (mm/rev)*S (mm/rev)	1	52,2	52,2	52,2	6,09	0,033	0,25%
S (mm/rev)*V (m/min)	1	80,8	80,8	80,8	9,44	0,012	0,38%
Error	10	85,6	85,6	8,6			
Total	14	21190,3					

S = 2,92649 R-Sq = 99,60% R-Sq(adj) = 99,43%

Αντιστοίχως, το απλοποιημένο στοχαστικό μοντέλο για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής $F_t(N)$ είναι:

$$F_t = 9,82 + 495,15\ S + 2,23\ 10^{-3}\ V + 508,2\ S^2 - 27,823\ 10^{-2}\ S\ V \qquad (7.4)$$

Παρατηρώντας το νέο πίνακα ανάλυσης διακύμανσης συμπεραίνουμε ότι, η τιμή του πολλαπλού συντελεστή προσδιορισμού R^2 έχει μειωθεί ελάχιστα στο 99,60%. Η τιμή του προσαρμοσμένου συντελεστή R^2_{adj} (R^2 adjusted) που δεν επηρεάζεται από τον αριθμό των όρων του κάθε μοντέλου, έχει αυξηθεί στο 99,43%, γεγονός που αποδεικνύει ότι το νέο μοντέλο είναι καλύτερο από το προηγούμενο (κεφ.5.5.4).

Ομοίως κατασκευάζονται τα στοχαστικά μοντέλα της δύναμης πρόωσης $F_v(N)$ και της δύναμης απώθησης εργαλείου $F_r(N)$. Παρακάτω παρατίθενται οι τελικές αναλύσεις διακύμανσης και τα αντίστοιχα απλοποιημένα στοχαστικά μοντέλα.

Πίνακας 7.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης πρόωσης $F_v(N)$.

Analysis of Variance for Fv (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S (mm/rev)	1	2234,0	732,4	2234,0	432,32	0,000	73,81%
V (m/min)	1	645,6	0,3	645,6	124,94	0,000	21,33%
S (mm/rev)*V (m/min)	1	147,2	147,2	147,2	28,49	0,000	4,86%
Error	11	56,8	56,8	5,2			
Total	14	3083,6					

S = 2,27319 R-Sq = 98,16% R-Sq(adj) = 97,65%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.13: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης απώθησης εργαλείου F_r(N).

Analysis of Variance for Fr (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S (mm/rev)	1	182,768	46,944	182,768	1199,51	0,000	83,50%
V (m/min)	1	29,722	0,002	29,722	195,07	0,000	13,58%
S (mm/rev)*V (m/min)	1	6,392	6,392	6,392	41,95	0,000	2,92%
Error	11	1,676	1,676	0,152			
Total	14	220,558					

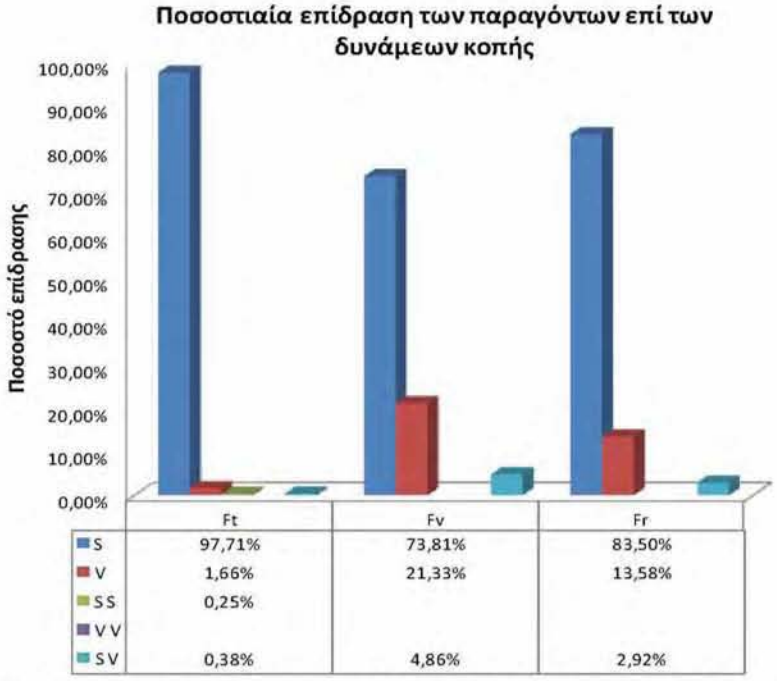
S = 0,390344 R-Sq = 99,24% R-Sq(adj) = 99,03%

Τα αντίστοιχα στοχαστικά μοντέλα της δύναμης πρόωσης F_v(N) και της δύναμης απώθησης του εργαλείου F_r(N) είναι:

$$F_v = 7,59 + 310,59\ S + 2,76\ 10^{-3}\ V - 37,552\ 10^{-2}\ S\ V \qquad (7.5)$$

$$F_r = 1,209 + 78,631\ S + 2,44\ 10^{-4}\ V - 7,825\ 10^{-2}\ S\ V \qquad (7.6)$$

Στους πίνακες ANOVA στην στήλη Perc.% υπολογίζεται η επί τοις εκατό ποσοστιαία επίδραση του κάθε παράγοντα του στοχαστικού μοντέλου, στην απόκριση (κεφ.5.5.5). Λαμβάνετε, έτσι, η ποσοστιαία ένδειξη της επίδρασης των παραγόντων ως προς τις δυνάμεις κοπής, η οποία είναι ταυτόχρονα υψηλής πιστότητας καθώς, σε κάθε περίπτωση, ο συντελεστής προσδιορισμού R^2 είναι άνω του 98%. Η επί τοις εκατό ποσοστιαίες επιδράσεις των παραγόντων κάθε στοχαστικού μοντέλου και για κάθε δύναμη κοπής, δίνονται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα-διάγραμμα:



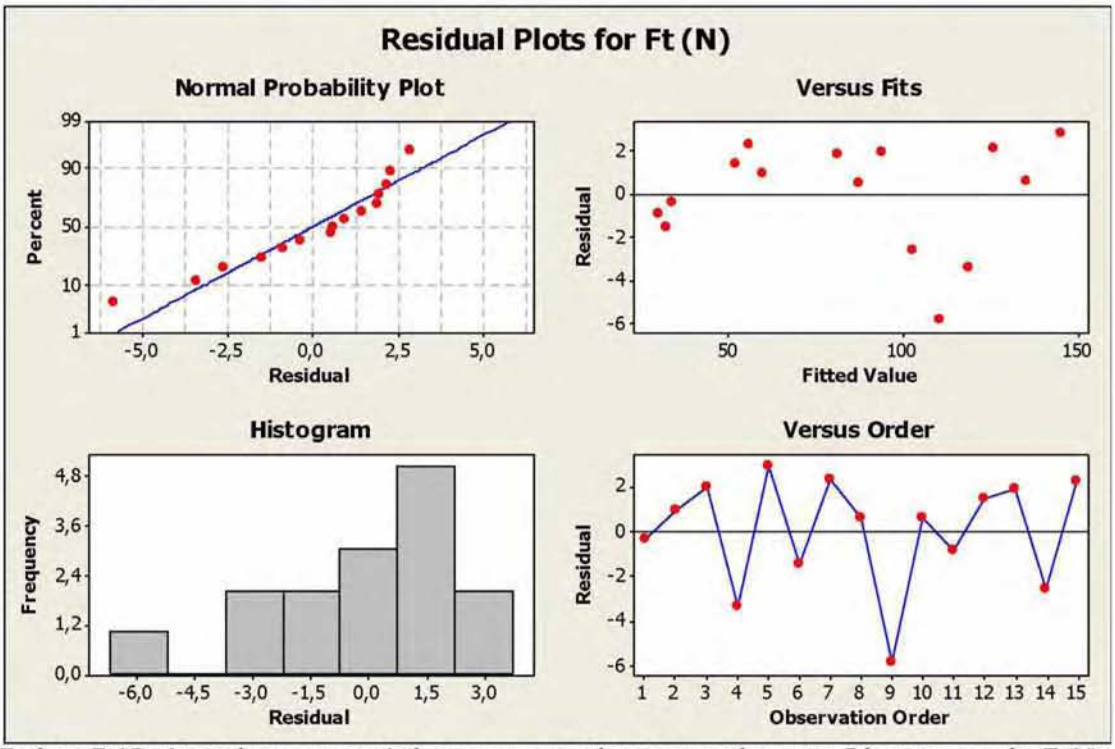
Σχήμα 7.14: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις δυνάμεις κοπής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από το Σχήμα 7.14 γίνεται αντιληπτό ότι σημαντικότερος παράγοντας για κάθε δύναμη κοπής είναι η πρόωση S(mm/rev) και ιδιαίτερα για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t, όπου η επίδρασή της ανέρχεται στο ποσοστό του 97,71%. Λιγότερη σημαντική είναι η επίδραση της ταχύτητας κοπής V(m/min), με το υψηλότερο ποσοστό να διαμορφώνεται για την δύναμη πρόωσης F_v(N) στο 21,33%. Τέλος, αξιόλογη φαίνεται να είναι η αλληλεπίδραση των παραγόντων, με το υψηλότερο ποσοστό της να διαμορφώνεται επίσης για την δύναμη πρόωσης στο 4,86%.

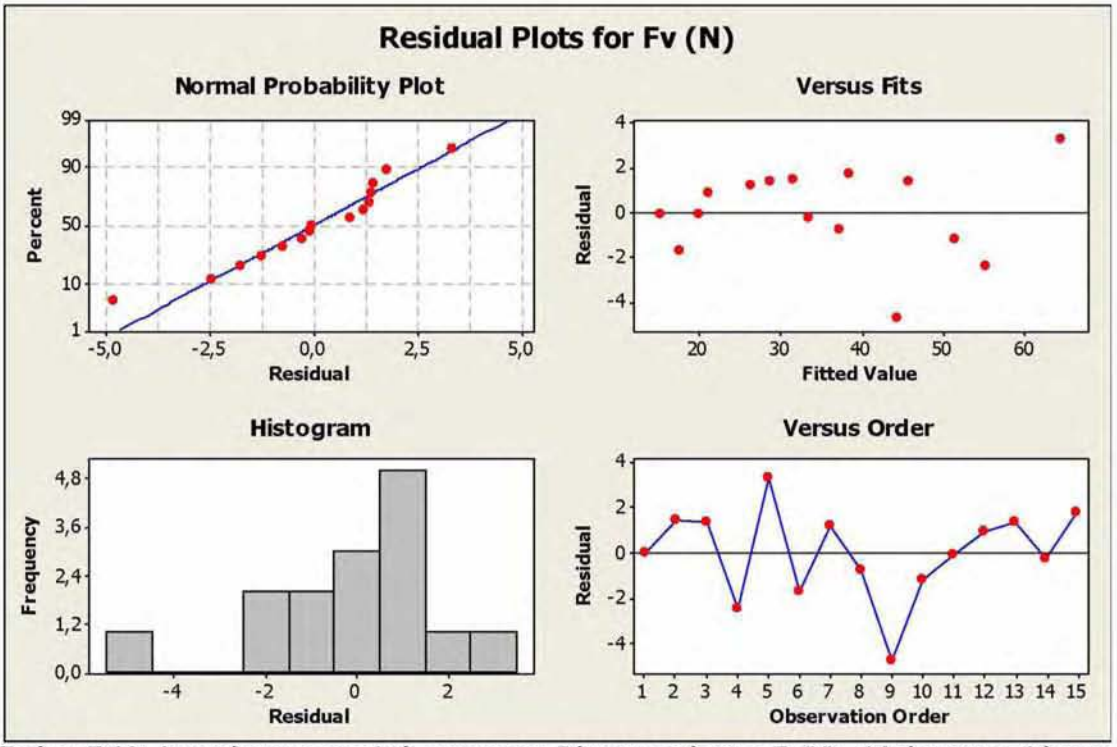
7.3.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων

Μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων θα γίνει ο έλεγχος των υποθέσεων ισχύς των μοντέλων, δηλαδή, αν ικανοποιούνται οι απαραίτητες συνθήκες έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατιστική συμπερασματολογία (κεφ.5.5.6). Όλα τα κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τις δυνάμεις κοπής, δίνονται στους πίνακες Α5-Α7 του παραρτήματος Α, από τα οποία, κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

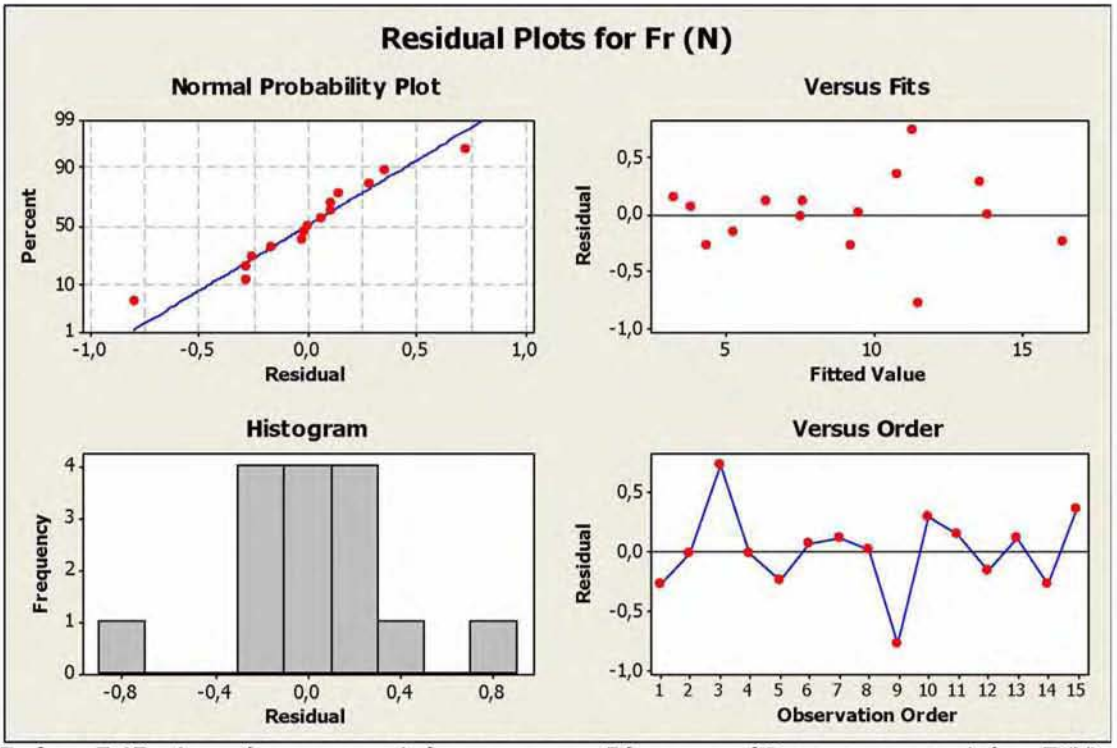


Σχήμα 7.15: Διαγράμματα καταλοίπων για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



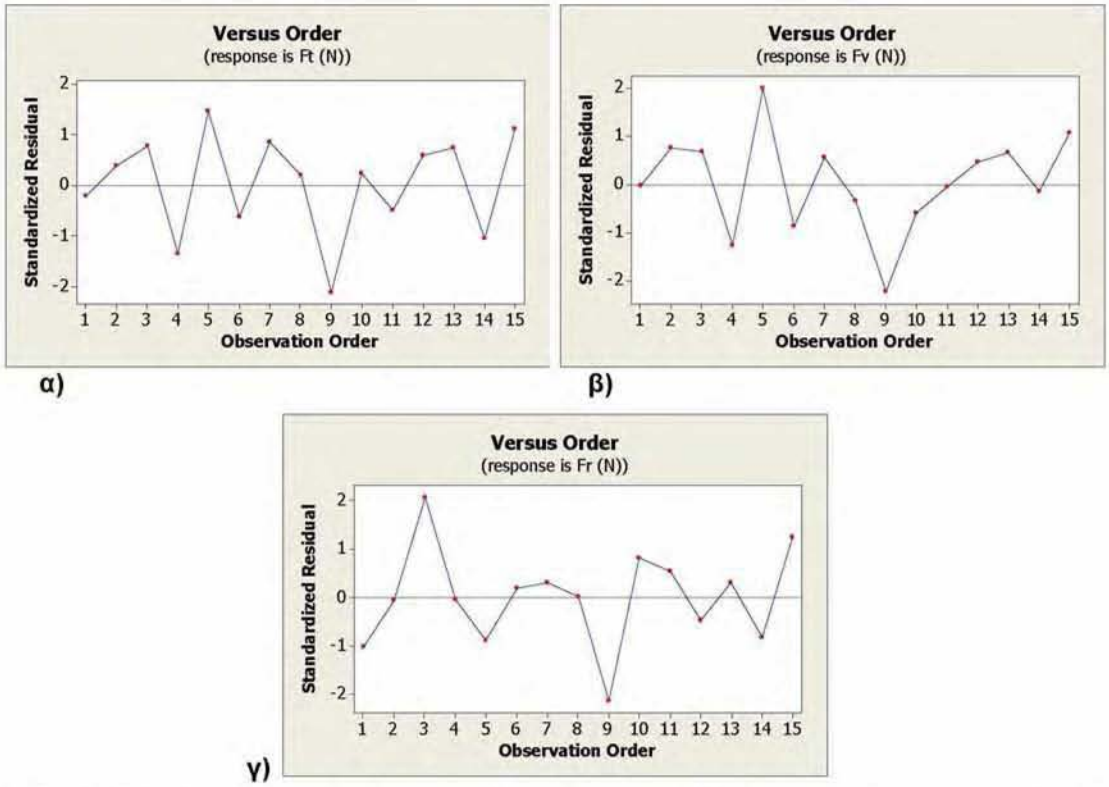
Σχήμα 7.16: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη πρόωσης F_V(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).



Σχήμα 7.17: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Από τα διαγράμματα ελέγχου κανονικότητας 7.14α, 7.15α και 7.16α διακρίνεται ότι, και για τα τρία μοντέλα, τα κατάλοιπα κινούνται πολύ κοντά στη κεντρική γραμμή, γεγονός που εξασφαλίζει ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή (κεφ.5.5.6). Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγούν και τα ιστογράμματα των συχνοτήτων των καταλοίπων 7.14γ, 7.15γ και 7.16γ, όπου διακρίνεται γραφικά η κανονικότητα της κατανομής τους. Επίσης, παρατηρώντας τα διαγράμματα των καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές 7.14β, 7.15β και 7.16β και ως προς τη σειρά παρατήρησης 7.14δ, 7.15δ και 7.16δ, γίνεται αντιληπτό ότι τα κατάλοιπα δεν έχουν κάποια καθορισμένη τάση, δηλαδή, εμφανίζονται τυχαιοποιημένα σε όλο το εύρος τιμών σε κάθε περίπτωση, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους για κάθε καταρτισμένο μοντέλο (κεφ.5.5.6). Επίσης, τα σημεία γενικότερα διασκορπίζονται συμμετρικά εκατέρωθεν της κεντρικής γραμμής στο σημείο 0 και σε όλο το μήκος της, γεγονός που φανερώνει ότι η διασπορά τους παραμένει σταθερή.



Σχήμα 7.18: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των δυνάμεων κοπής ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N), β)Δύναμη πρόωσης F_v(N), γ)Δύναμη απώθησης του εργαλείου F_r(N).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

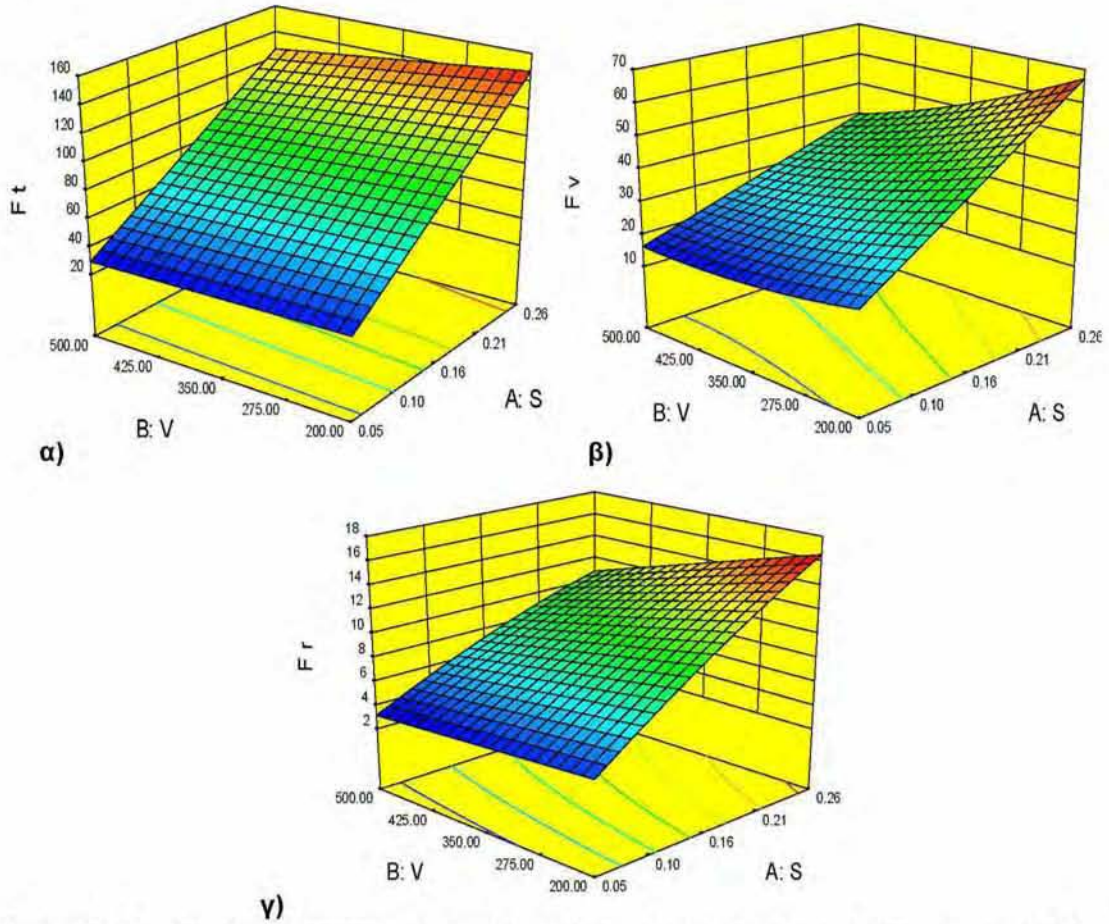
Εξετάζοντας, τέλος, τους πίνακες Α5-Α7 του παραρτήματος Α και τα διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 7.18), διακρίνεται ότι υπάρχει μία «ασυνήθιστη» τιμή για τα κατάλοιπα των δυνάμεων F_t και F_v (θέση 9 σχήμα 7.17(α) και θέση 9 σχήμα 7.17(β) αντίστοιχα), και δύο για τα κατάλοιπα της F_r (θέση 3 και 9, σχήμα 7.17(γ)). Το γεγονός ότι δεν υπάρχουν πολλές «ασυνήθιστες» παρατηρήσεις και καθόλου έκτροπες, διασφαλίζει την εγκυρότητα των πειραματικών μετρήσεων και τη σταθερότητα της διακύμανσης των καταλοίπων σε κάθε περίπτωση.

Με τα διαγράμματα των καταλοίπων αποδείχθηκε ότι, ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ισχύς των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων των δυνάμεων κοπής (7.2), (7.3) και (7.4), γεγονός που τα καθιστά αξιόπιστα για στατιστική συμπερασματολογία και πρόβλεψη τιμών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.3.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces

Μέσω των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων και καθώς διασφαλίστηκε η αξιοπιστία τους μέσω των διαγραμμάτων των καταλοίπων, κατασκευάζονται οι επιφάνειες προσαρμογής αυτών. Με τις επιφάνειες προσαρμογής απεικονίζεται γραφικά και σε τρισδιάστατο γράφημα, η συμπεριφορά των εξαρτημένων μεταβλητών $F_t(N)$, $F_v(N)$ και $F_r(N)$ ως προς τους δυο παράγοντες ταυτόχρονα (κεφ.5.5.7). Οι επιφάνειες προσαρμογής των στοχαστικών μοντέλων των δυνάμεων κοπής (σχέσεις 7.2, 7.3, 7.4) είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 7.19: Επιφάνειες προσαρμογής α)Της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής $F_t(N)$, β)Της δύναμης πρόωσης $F_v(N)$, β)Της δύναμης απώθησης του εργαλείου $F_r(N)$.

Οι επιφάνειες προσαρμογής τίθενται στο παράρτημα Α (διαγράμματα Α1, Α3, Α5) σε αντιπαραβολή με τα τρισδιάστατα διαγράμματα των δεδομένων των πειραματικών μετρήσεων, όπου διακρίνεται η χαρακτηριστική ομοιότητα στην συμπεριφορά τους συναρτήσει των παραγόντων κοπής. Το γεγονός αυτό αποτελεί ακόμα μία απόδειξη τις υψηλής συσχέτισης και προσεγγιστικής ικανότητας των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.4 Στατιστική ανάλυση των παραμέτρων τραχύτητας

7.4.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους

Η στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους των παραμέτρων επιφανειακής τραχύτητας, πραγματοποιείται με τις γραφικές παραστάσεις των κύριων επιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων (κεφ.5.4).

7.4.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων

Από τα δεδομένα του πειραματικού χώρου (Πίνακας 7.8) υπολογίζονται οι μέσοι όροι των παραμέτρων της τραχύτητας για κάθε επίπεδο των παραγόντων. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μέσοι όροι των παραμέτρων όλων των επιπέδων του ενός παράγοντα ανά επίπεδο του δεύτερου:

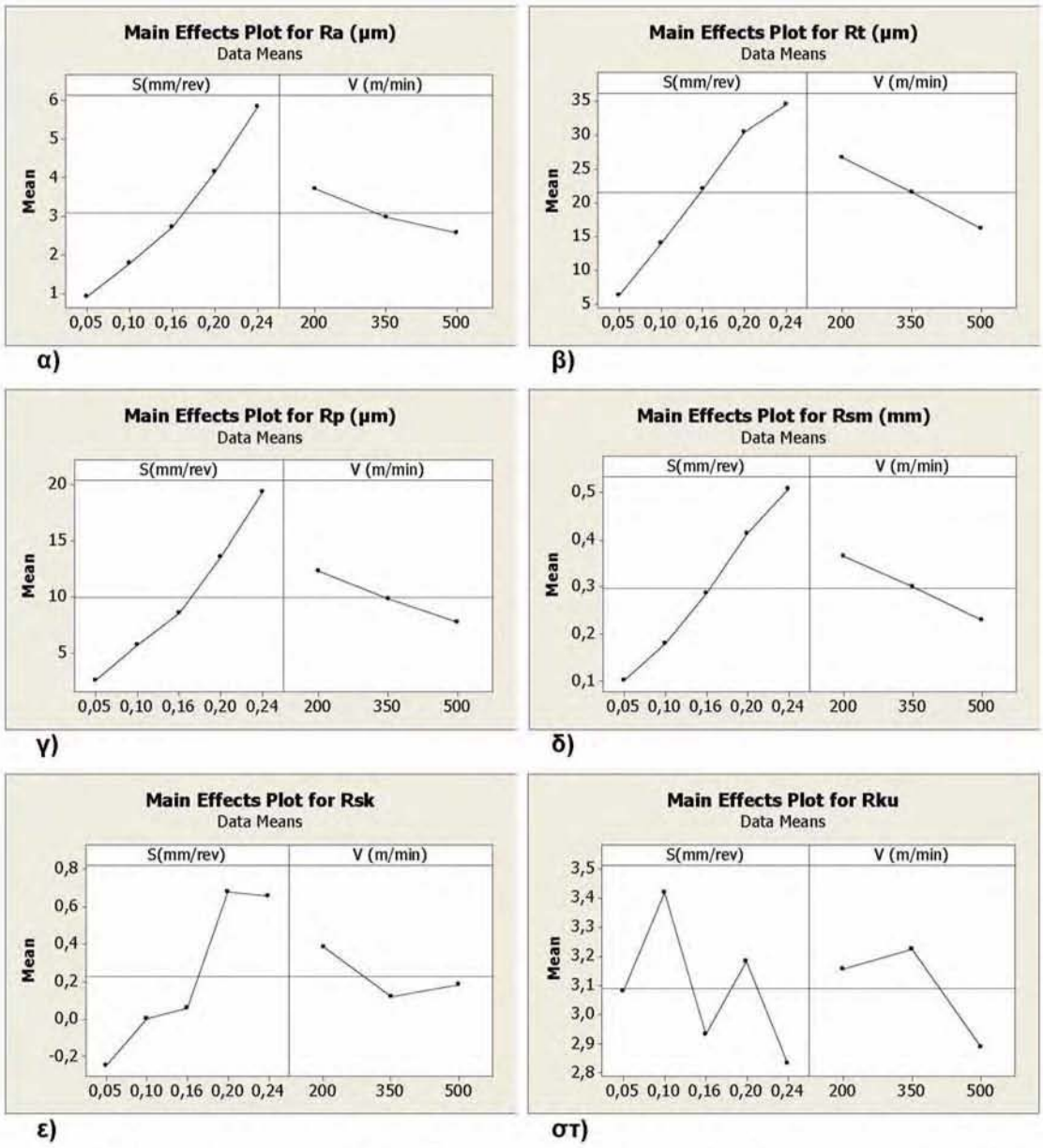
Πίνακας 7.14: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων

		S (mm/rev)				
		0,05	**0,1**	**0,16**	**0,2**	**0,24**
		V (m/min)				
		200	***350***	***500***		
R_a (μm)	m_s (μm)	0,92	1,79	2,73	4,16	5,84
	m_v (μm)	*3,71*	*2,98*	*2,57*		
R_t (μm)	m_s (μm)	6,37	13,99	22,08	30,45	34,44
	m_v (μm)	*26,66*	*21,53*	*16,20*		
R_p (μm)	m_s (μm)	2,55	5,72	8,54	13,55	19,33
	m_v (μm)	*12,28*	*9,81*	*7,73*		
R_{sm} (mm)	m_s (mm)	0,10	0,18	0,29	0,41	0,51
	m_v (mm)	*0,37*	*0,30*	*0,23*		
R_{sk}	m_s	-0,25	0,00	0,06	0,68	0,66
	m_v	*0,39*	*0,12*	*0,18*		
R_{ku}	m_s	3,08	3,42	2,93	3,18	2,83
	m_v	*3,16*	*3,23*	*2,89*		

Όπου: m_{Vi} *ο μέσος όρος των παραμέτρων τραχύτητας στα επίπεδα της ταχύτητας κοπής*
m_{Si} *ο μέσος όρος των παραμέτρων τραχύτητας στα επίπεδα της πρόωσης*

Μέσω του πίνακα των μέσων όρων (Πίνακας 7.14), κατασκευάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων των παραγόντων για τις παραμέτρους της τραχύτητας που παρουσιάζονται ακολούθως.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 7.20: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα, για τις παραμέτρους της τραχύτητας: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, β)Μέγιστο Ύψος R_t, γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, δ)Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}, ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}.

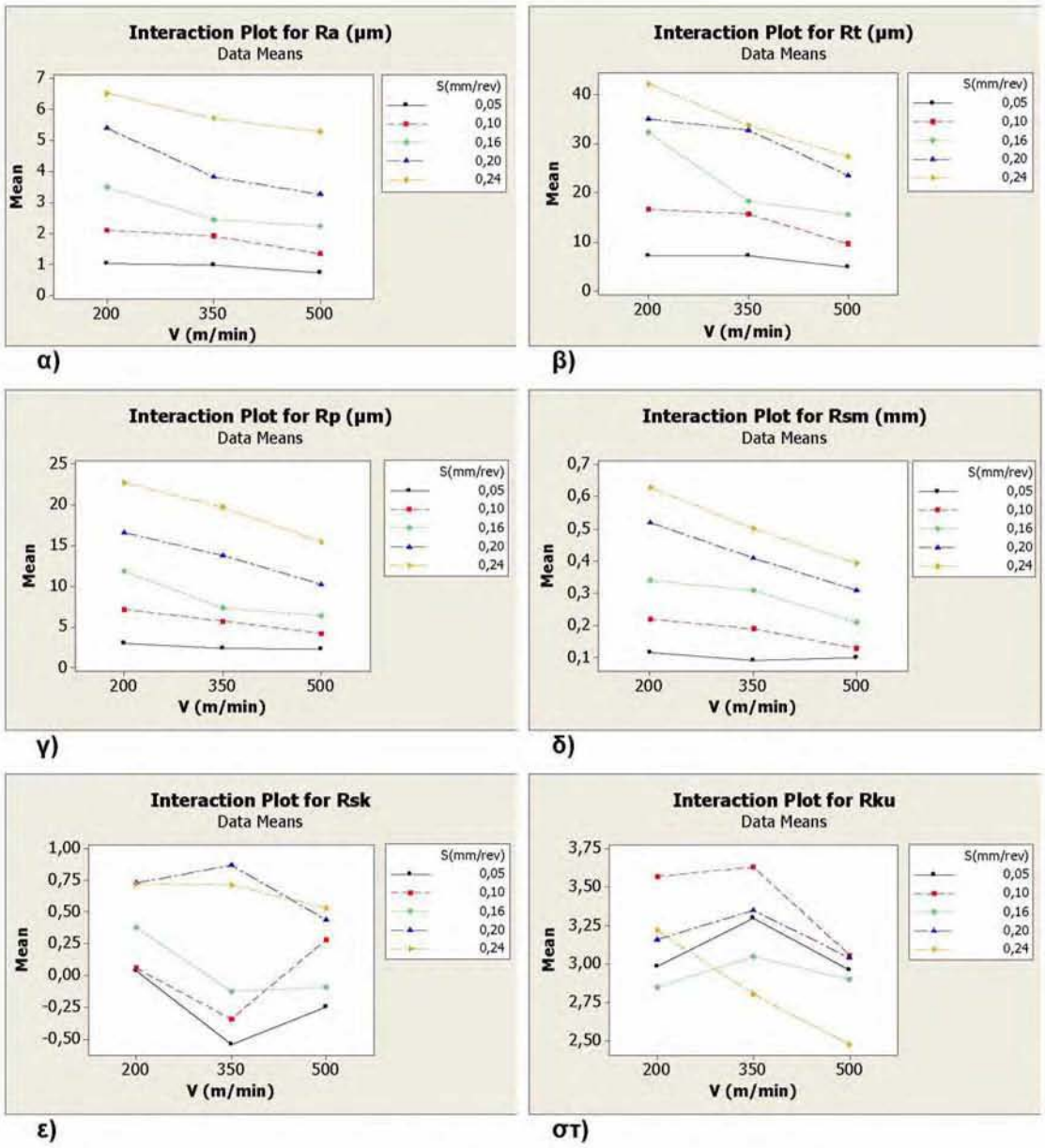
Από τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, η αύξηση της πρόωσης S(mm/rev) επιφέρει σημαντική αύξηση στις τιμές των παραμέτρων R_a, R_t, R_p, και R_{sm} ενώ αντίθετα, η αύξηση της ταχύτητας κοπής V(m/min), επιφέρει πτώση στις τιμές αυτών, αλλά με αισθητά μικρότερη ένταση. Το ίδιο συμπέρασμα διεξάγετε και για την λοξότητα R_{sk} αν και διακρίνονται κάποιες επιμέρους διαφοροποιήσεις σε ενδιάμεσες τιμές των παραγόντων. Αντιθέτως, ακανόνιστη φαίνεται να είναι η συμπεριφορά της κυρτότητας R_{ku}, η οποία εναλλάσσει αρνητικά και θετικά την

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

τάση της, ανεξάρτητα από τη διαδοχική μείωση ή αύξηση του κάθε παράγοντα.

7.4.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων

Τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων κατασκευάζονται από τις τιμές του πίνακα του πειραματικού σχεδιασμού (Πίνακας 7.8).



Σχήμα 7.21: Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για κάθε παράμετρο της τραχύτητας: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, β)Μέγιστο Ύψος R_t, γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, δ)Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}, ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι οι γραμμές έχουν έντονη τάση να διασταυρωθούν σε προέκτασή τους στο χώρο, κυρίως για το μέγιστο ύψος R_t, το μέγιστο ύψος κορυφής R_p, το μέσο διάστημα κορυφών R_{sm} και την κυρτότητα R_{ku}. Μικρότερη τάση να διασταυρωθούν έχουν στην περίπτωση της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a, ενώ το φαινόμενο είναι συγκεχυμένο για την λοξότητα R_{sk}, όπου η τάση των γραμμών εναλλάσσεται αρχικά σε έντονη απόκλιση και έπειτα σε σύγκλιση μεταξύ τους. Σε κάθε περίπτωση, η αλληλεπίδραση των παραγόντων φαίνεται να είναι αρκετά σημαντική για τις περισσότερες παραμέτρους, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητο να συμπεριληφθεί στη συνέχεια, στην διαμόρφωση των μοντέλων προσαρμογής (κεφ.5.5.1).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.4.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων τραχύτητας

7.4.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα των παραμέτρων τραχύτητας

Από τα πειραματικά δεδομένα (Πίνακας 7.8) ακλουθώντας ανάλογη στατιστική ανάλυση με αυτήν που πραγματοποιήθηκε για τις δυνάμεις κοπής (κεφ.7.3) και σύμφωνα με την θεωρία του πειραματικού σχεδιασμού (Κεφάλαιο 5), κατασκευάζονται τα στοχαστικά μοντέλα των παραμέτρων τραχύτητας. Στην συνέχεια και μέσω της ανάλυσης διακύμανσης ANOVA, πραγματοποιείται ο έλεγχος των μοντέλων ως προς τη στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών τους και επαναπροσδιορίζονται στις περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαίο (διαγραφή όρων όταν το p-value είναι μικρότερο του 0,05) (κεφ.5.5.5). Σκοπός είναι η απλοποίηση των στοχαστικών μοντέλων χωρίς την μείωση της προσεγγιστικής τους ικανότητας, διατηρώντας τους συντελεστές προσαρμογής R^2 και R^2(adj) σε υψηλά επίπεδα. Οι τελικές αναλύσεις διακύμανσης *ANOVA* και τα αντίστοιχα απλοποιημένα στοχαστικά μοντέλα για τις παραμέτρους της τραχύτητας παρουσιάζονται ακολούθως:

Πίνακας 7.15: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Μέσης Αριθμητικής Τραχύτητας R_a(μm).

Analysis of Variance for Ra (μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	43,399	0,034	43,399	449,08	0,000	88,18%
V (m/min)	1	3,208	0,002	3,208	33,20	0,000	6,52%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	2,031	2,031	2,031	21,01	0,001	4,13%
S(mm/rev)*V (m/min)	1	0,581	0,581	0,581	6,01	0,034	1,18%
Error	10	0,966	0,966	0,097			
Total	14	50,184					

S = 0,310869 R-Sq = 98,07% R-Sq(adj) = 97,30%

Πίνακας 7.16: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του Μέγιστου Ύψους R_t(μm).

Analysis of Variance for Rt (μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	1590,08	386,18	1590,08	265,02	0,000	83,22%
V (m/min)	1	273,47	0,34	273,47	45,58	0,000	14,31%
S(mm/rev)*V (m/min)	1	47,15	47,15	47,15	7,86	0,017	2,47%
Error	11	66,00	66,00	6,00			
Total	14	1976,69					

S = 2,44948 R-Sq = 96,66% R-Sq(adj) = 95,75%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.17: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του Μέγιστου Ύψους Κορυφής R_p(μm).

Analysis of Variance for Rp (μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	497,72	1,13	497,72	646,16	0,000	84,68%
V (m/min)	1	51,74	0,18	51,74	67,17	0,000	8,80%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	24,39	24,39	24,39	31,66	0,000	4,15%
S(mm/rev)*V (m/min)	1	13,95	13,95	13,95	18,11	0,002	2,37%
Error	10	7,70	7,70	0,77			
Total	14	595,50					

S = 0,877652 R-Sq = 98,71% R-Sq(adj) = 98,19%

Πίνακας 7.18: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του Μέσου Διαστήματος Κορυφών R_{sm}(μm).

Analysis of Variance for Rsm (mm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,324354	0,008586	0,324354	1152,23	0,000	82,96%
V (m/min)	1	0,046376	0,000638	0,046376	164,75	0,000	11,86%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,004484	0,004484	0,004484	15,93	0,003	1,15%
S(mm/rev)*V (m/min)	1	0,015758	0,015758	0,015758	55,98	0,000	4,03%
Error	10	0,002815	0,002815	0,000282			
Total	14	0,393787					

S = 0,0167780 R-Sq = 99,29% R-Sq(adj) = 99,00%

Πίνακας 7.19: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Λοξότητας R_{sk}.

Analysis of Variance for Rsk, using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	1,81826	1,81826	1,81826	27,71	0,000	90,32%
V (m/min)	1	0,10120	0,11747	0,10120	1,54	0,240	5,02%
V (m/min)*V (m/min)	1	0,09363	0,09363	0,09363	1,43	0,257	4,66%
Error	11	0,72179	0,72179	0,06562			
Total	14	2,73489					

S = 0,256160 R-Sq = 73,61% R-Sq(adj) = 66,41%

Πίνακας 7.20: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Κυρτότητας R_{ku}.

Analysis of Variance for Rku, using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,16388	0,09915	0,16388	2,43	0,153	25,91%
V (m/min)	1	0,18036	0,12984	0,18036	2,68	0,136	28,57%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,10640	0,10640	0,10640	1,58	0,240	16,84%
V (m/min)*V (m/min)	1	0,13831	0,13831	0,13831	2,05	0,186	21,86
S(mm/rev)*V (m/min)	1	0,04339	0,04339	0,04339	0,64	0,443	6,82
Error	9	0,60632	0,60632	0,06737			
Total	14	1,23866					

S = 0,259554 R-Sq = 51,05% R-Sq(adj) = 23,86%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τα αντίστοιχα στοχαστικά μοντέλα των παραμέτρων τραχύτητας είναι τα ακόλουθα:

$$R_a = 104{,}01\ 10^{-2} + 4{,}313\ S - 2{,}39\ 10^{-4}\ V + 100{,}26\ S^2 - 23{,}582\ 10^{-3}\ S\ V \quad (7.7)$$

$$R_t = -0{,}161 + 225{,}53\ S - 2{,}99\ 10^{-3}\ V - 21{,}25\ 10^{-2}\ S\ V \quad (7.8)$$

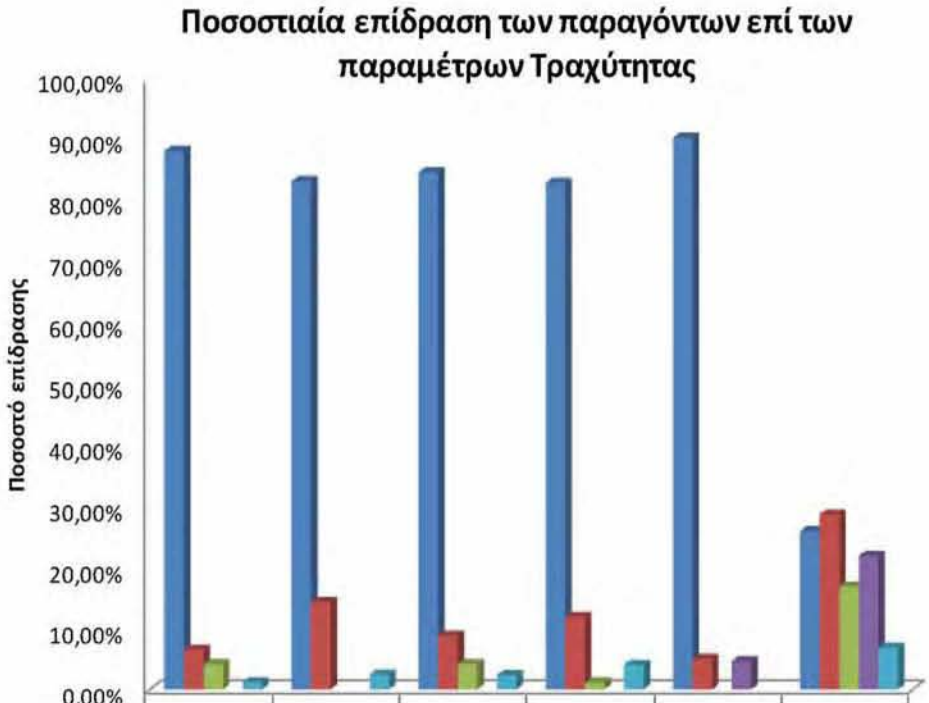
$$R_p = 2{,}091 + 24{,}83\ S + 21{,}76\ 10^{-4}\ V + 347{,}45\ S^2 - 11{,}56\ 10^{-2}\ S\ V \quad (7.9)$$

$$R_{sm} = 5{,}11\ 10^{-3} + 2{,}16\ S + 1{,}29\ 10^{-4}\ V + 4{,}711\ S^2 - 38{,}85\ 10^{-4}\ S\ V \quad (7.10)$$

$$R_{sk} = 44{,}79\ 10^{-2} + 5{,}111\ S - 58.85\ 10^{-4}\ V + 0.7\ 10^{-5}\ V^2 \quad (7.11)$$

$$R_{ku} = 1{,}952 + 7{,}34\ S + 6{,}41\ 10^{-3}\ V - 22{,}95\ S^2 - 0.9\ 10^{-5}\ V^2 - 6{,}447\ 10^{-3}\ S\ V \quad (7.12)$$

Η επί τοις εκατό ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων κάθε στοχαστικού μοντέλου και για κάθε παράμετρο τραχύτητας, δίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα-διάγραμμα:



	Ra	Rt	Rp	Rsm	Rsk	Rku
S	88,18%	83,22%	84,68%	82,96%	90,32%	25,91%
V	6,52%	14,31%	8,80%	11,86%	5,02%	28,57%
SS	4,13%		4,15%	1,15%		16,84%
VV					4,66%	21,86%
SV	1,18%	2,47%	2,37%	4,03%		6,82%

Σχήμα 7.22: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις παραμέτρους τραχύτητας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

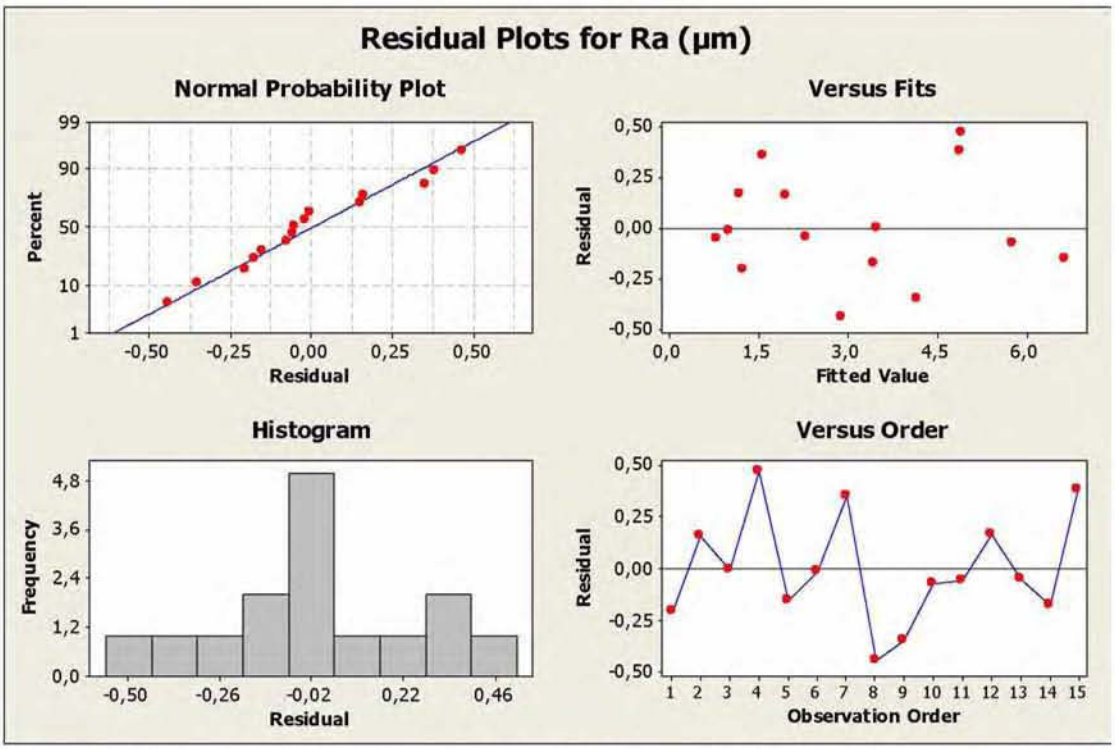
Από το Σχήμα 7.22 γίνεται αντιληπτό ότι σημαντικότερος παράγοντας για κάθε παράμετρο της τραχύτητας είναι η πρόωση S(mm/rev) με ποσοστά άνω του 80% και ειδικότερα για την τραχύτητα R_a και την λοξότητα R_{sk} όπου τα αντίστοιχα ποσοστά διαμορφώνονται σε 88,18% και 90,32%. Ασθενέστερη είναι η επίδραση της ταχύτητας κοπής V(m/min), με υψηλότερο ποσοστό το 28,57% για την κυρτότητα R_{ku} και στις υπόλοιπες περιπτώσεις να κυμαίνεται μεταξύ 5 και 15%. Τέλος, αξιόλογη φαίνεται να είναι η αλληλεπίδραση των παραγόντων για το μέσο διάστημα μέσης γραμμής και την κυρτότητα, όπου τα ποσοστά τους διαμορφώνονται σε 4,03% και 6,82% αντίστοιχα.

Ειδικά για την κυρτότητα R_{ku}, κατά την κατασκευή του στοχαστικού μοντέλου προσαρμογής, επιλέχτηκαν όλοι οι όροι του πλήρη ορθογωνικού μοντέλου, παρόλο που οι p-value τους είναι αρκετά υψηλότερες από το προκαθορισμένο επίπεδο σημαντικότητας 5% (0.05) (Πίνακας 7.20). Όπως προκύπτει από την στατιστική ανάλυση ANOVA, η επίδραση όλων των όρων είναι υψηλή χωρίς να ξεχωρίζει κάποιος ιδιαίτερα και με την μικρότερη να είναι 6,82% για την αλληλεπίδραση. Η διαγραφή επομένως, οποιουδήποτε όρου από το στοχαστικό μοντέλο, θα συντελεί σε σημαντική μείωση της ικανότητας προσαρμογής του. Παρόλα αυτά, ο συντελεστής προσδιορισμού του καταρτισμένου μοντέλου ακόμα και με όλους τους όρους, παρέμεινε σε ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα (R^2=51,05%). Ιδιαίτερη προσοχή, επίσης, θα δοθεί στον έλεγχο καταλληλότητας του συγκεκριμένου μοντέλου.

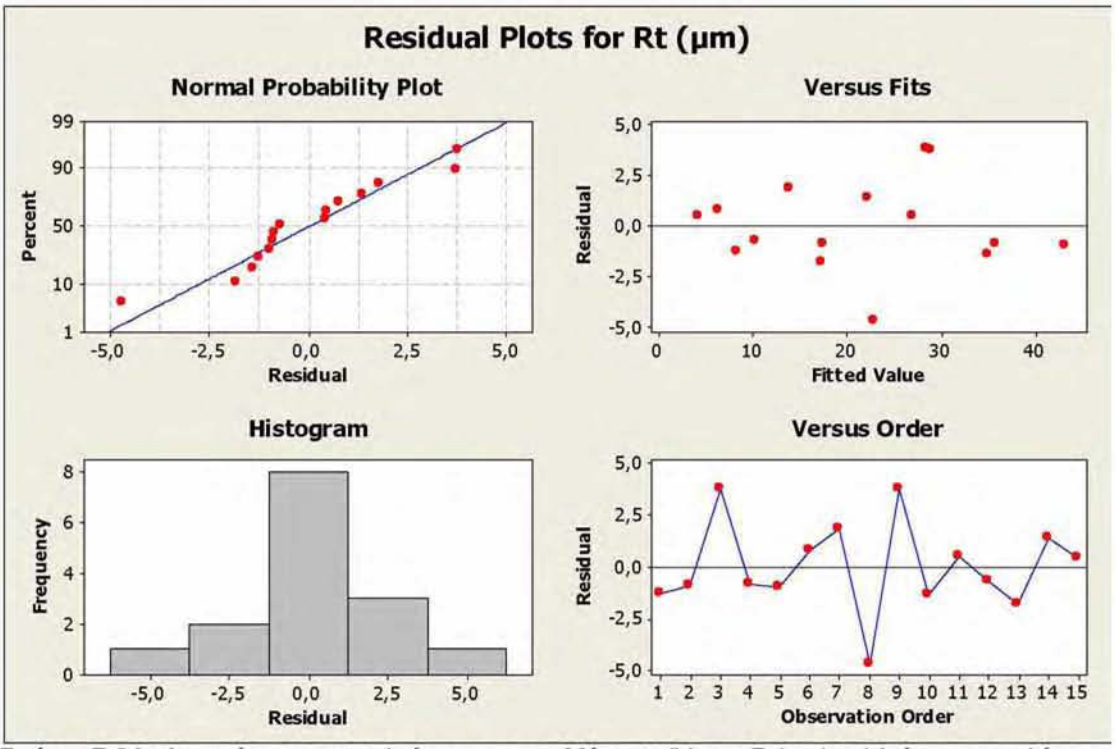
7.4.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων

Για τον έλεγχο των υποθέσεων ισχύς των μοντέλων χρησιμοποιούνται τα γραφήματα των καταλοίπων (κεφ.5.5.6). Όλα τα κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τις παραμέτρους τραχύτητας, δίνονται στο παράρτημα Α (πίνακες Α8-Α13) και μέσω αυτών κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

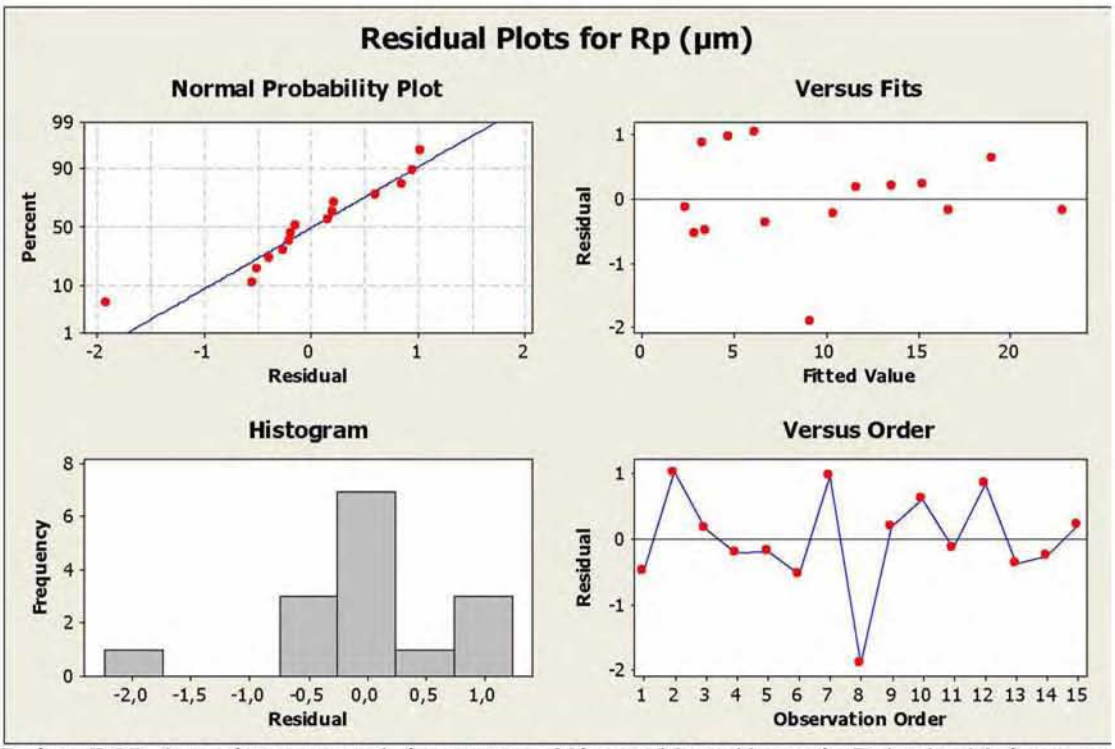


Σχήμα 7.23: Διαγράμματα καταλοίπων για την Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

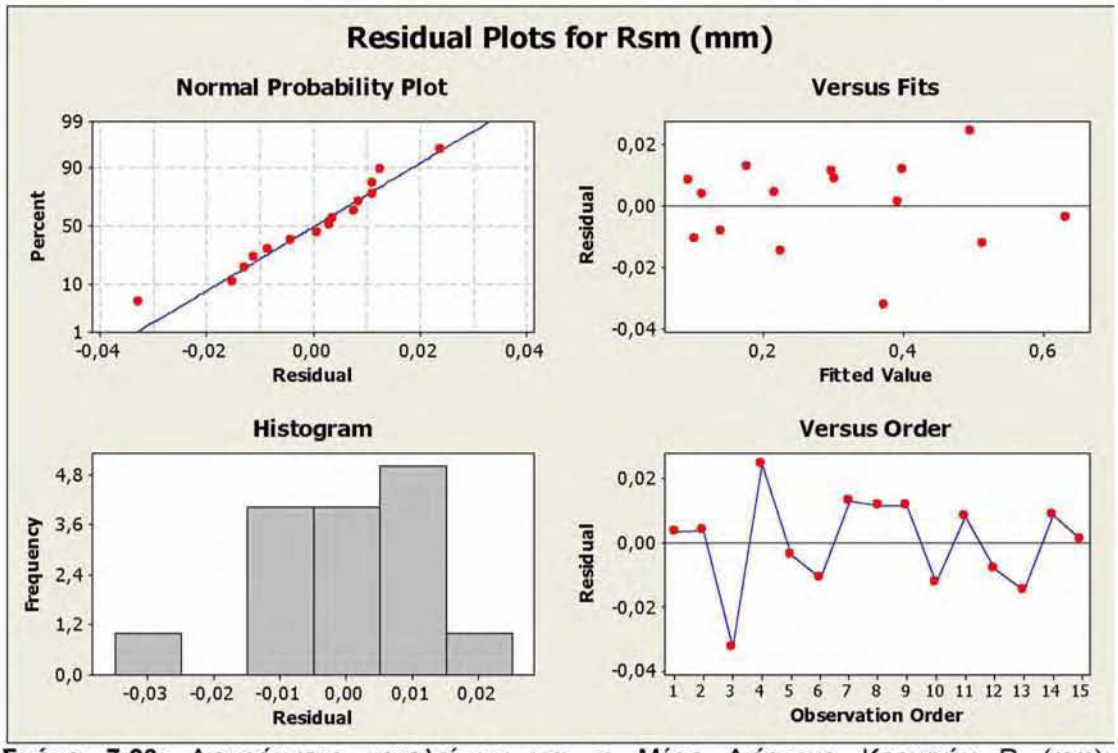


Σχήμα 7.24: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέγιστο Ύψος R_t(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

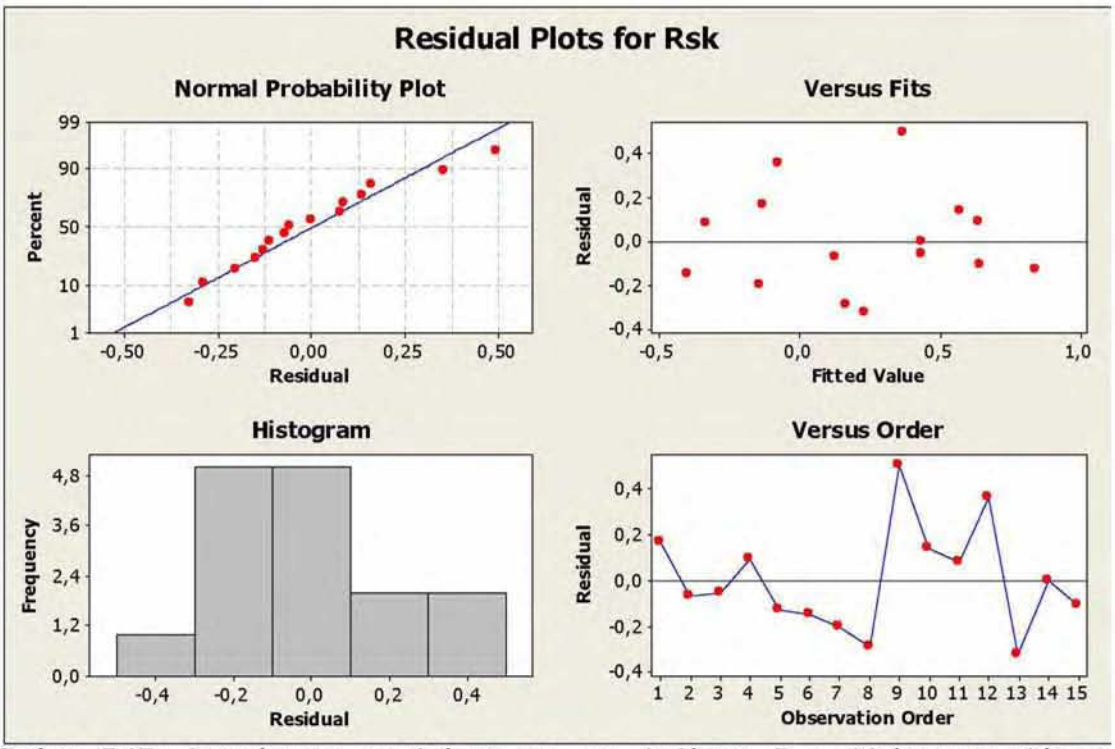


Σχήμα 7.25: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

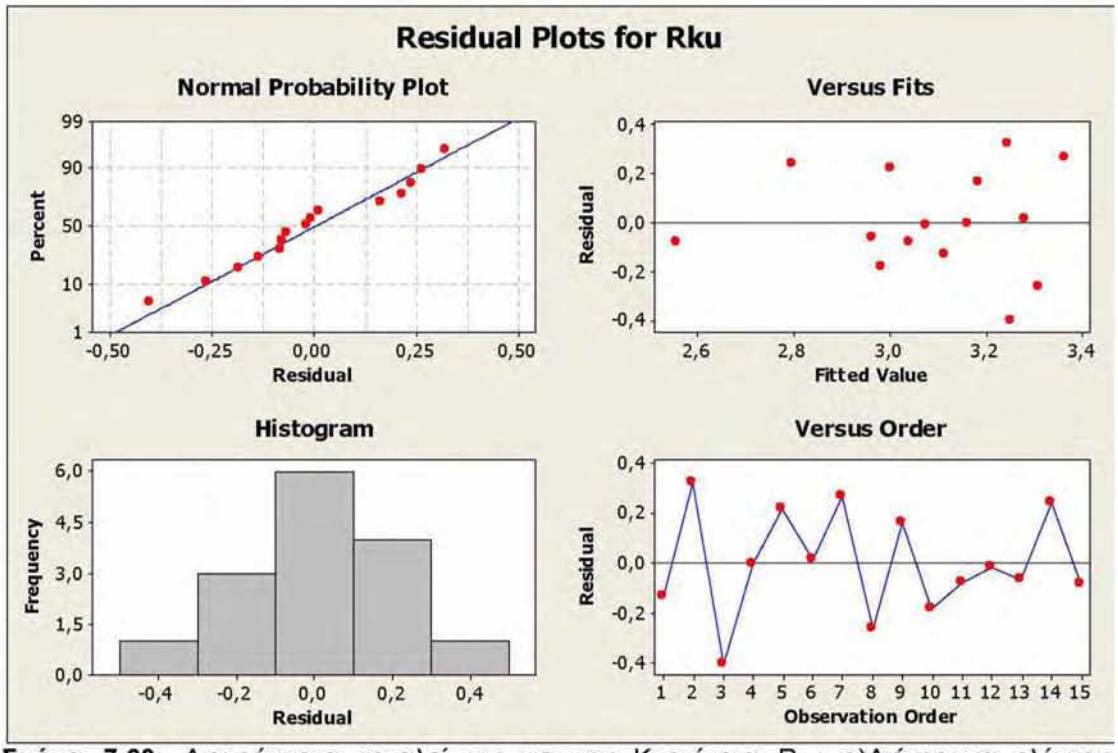


Σχήμα 7.26: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέσο Διάστημα Κορυφών R_{sm}(mm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 7.27: Διαγράμματα καταλοίπων για την Λοξότητα R_{sk}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).



Σχήμα 7.28: Διαγράμματα καταλοίπων για την Κυρτότητα R_{ku}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

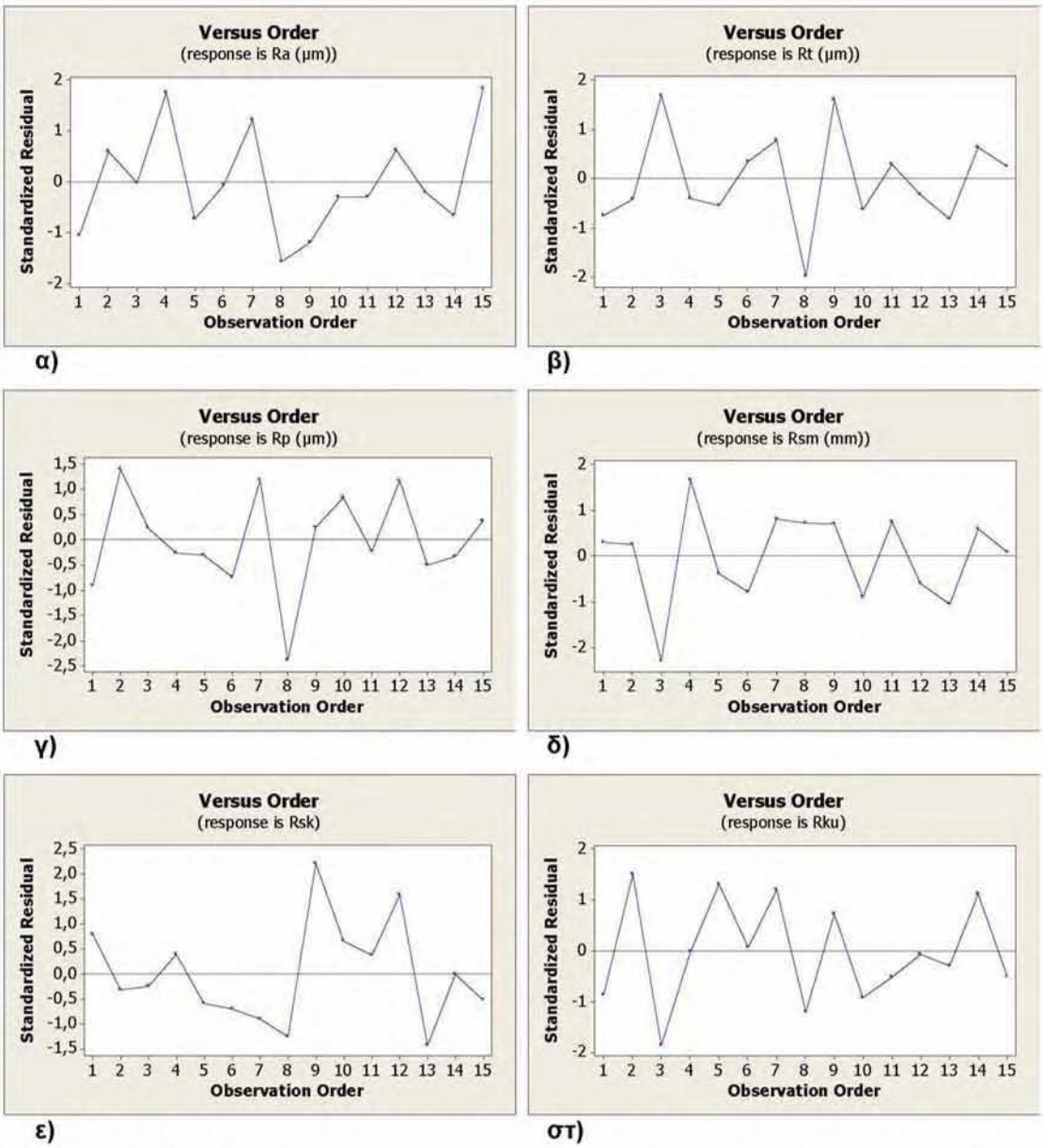
Από τα διαγράμματα ελέγχου κανονικότητας 7.22α-7.27α, διασφαλίζεται πως τα κατάλοιπα και των έξι μοντέλων ακολουθούν την κανονική κατανομή, καθώς, εκτός από λίγες τιμές αυτών, κινούνται πολύ κοντά στη κεντρική γραμμή σε κάθε περίπτωση (κεφ.5.5.6). Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγούν και τα ιστογράμματα των συχνοτήτων των καταλοίπων 7.22γ-7.27γ, από όπου διακρίνεται γραφικά η κανονικότητα αυτών.

Επίσης, παρατηρώντας τα διαγράμματα των καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές 7.22β-7.27β και ως προς τη σειρά παρατήρησης 7.22δ-7.27δ, γίνεται αντιληπτό ότι, τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους για κάθε καταρτισμένο μοντέλο καθώς, δεν διακρίνεται να ακολουθούν κάποια καθορισμένη τάση και εμφανίζονται τυχαιοποιημένα σε όλο το εύρος των τιμών (κεφ.5.5.6). Τα σημεία γενικότερα ισαπέχουν εκατέρωθεν και κατά μήκος της κεντρικής γραμμής στο σημείο 0 σε κάθε περίπτωση, εξασφαλίζοντας ότι η διασπορά τους παραμένει σταθερή.

Τέλος, από τους πίνακες Α8-Α13 του παραρτήματος Α και τα διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 7.29), διακρίνεται να υπάρχει μία «ασυνήθιστη» τιμή για κάθε μία από τις παραμέτρους R_p, R_{sm} και R_{sk} (θέση 8 στο σχήμα 7.28(γ), θέση 3 στο σχήμα 7.28(δ) και θέση 9 στο σχήμα 7.28(ε) αντίστοιχα). Με την ένδειξη ότι δεν υπάρχουν πολλές «ασυνήθιστες» παρατηρήσεις και καθόλου έκτροπες, διασφαλίζεται η εγκυρότητα των μοντέλων και των πειραματικών μετρήσεων και η σταθερότητα της διακύμανσης των καταλοίπων σε κάθε περίπτωση.

Μέσω των διαγραμμάτων των καταλοίπων, αποδείχθηκε ότι ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ισχύς των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων της τραχύτητας (σχέσεις 7.5-7.10), γεγονός που τα καθιστά αξιόπιστα για στατιστική συμπερασματολογία και πρόβλεψη τιμών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



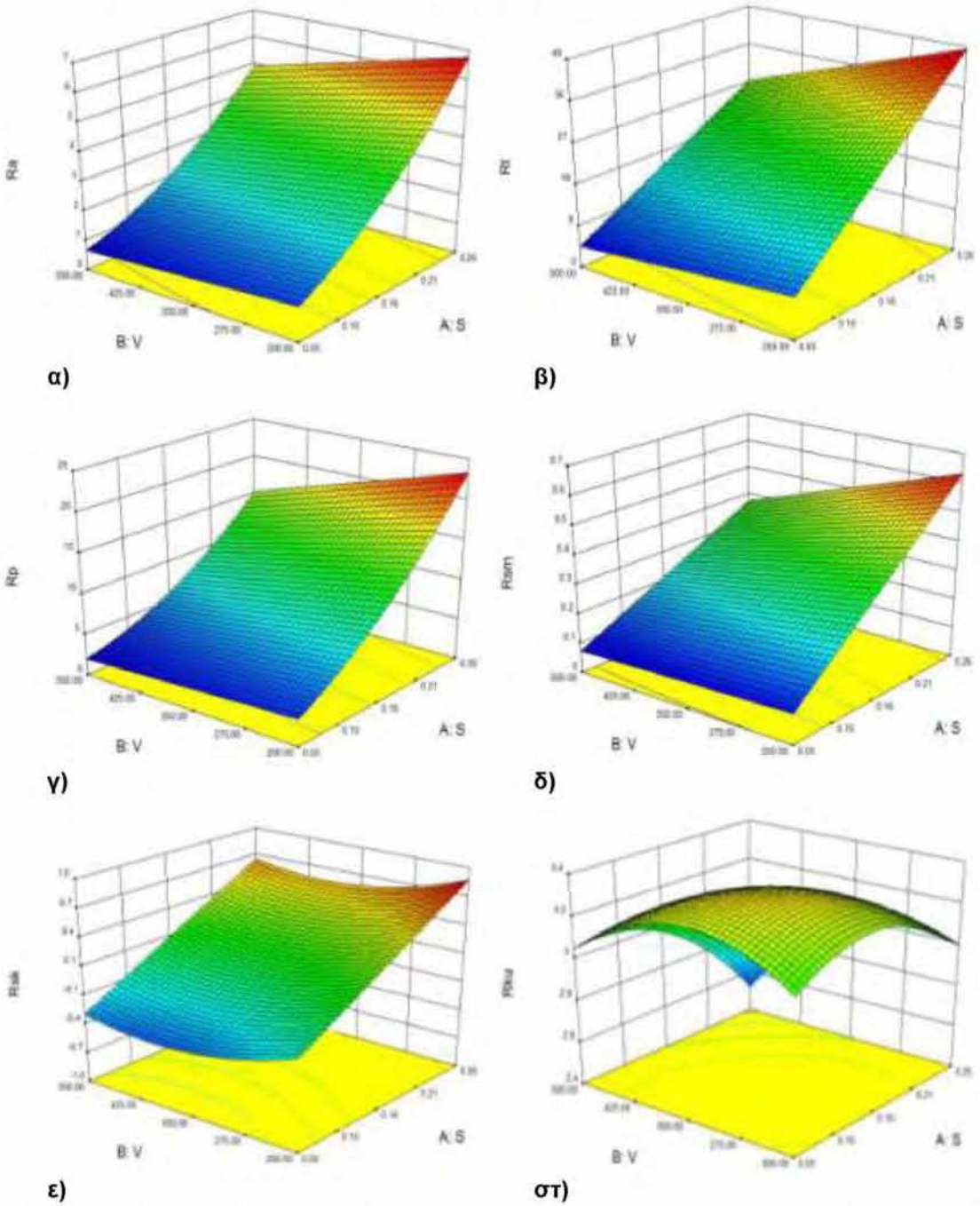
Σχήμα 7.29: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των παραμέτρων της τραχύτητας ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a, β)Μέγιστο Βάθος R_t, γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p, δ)Μέσο Διάστημα Μέσης Γραμμής R_{sm}, ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}.

7.4.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces

Οι επιφάνειες προσαρμογής απεικονίζουν γραφικά και σε τρισδιάστατη μορφή, τις εξαρτημένες μεταβλητές $R_a(\mu m)$, $R_t(\mu m)$, $R_p(\mu m)$, $R_{sm}(mm)$, R_{sk} και R_{ku} ως προς τους δυο ανεξάρτητους παράγοντες ταυτόχρονα, την πρόωση S(mm/rev) και την ταχύτητα κοπής V(m/min). Κατασκευάζονται σύμφωνα με τα στοχαστικά μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί και αποδίδουν γραφικά τις τιμές των αποκρίσεων σε κάθε συνδυασμό των παραγόντων (κεφ.5.5.7). Οι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

επιφάνειες προσαρμογής των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων της τραχύτητας επιφανείας (σχέσεις 7.2 - 7.3) είναι οι ακόλουθες:



Σχήμα 7.30: Επιφάνειες προσαρμογής των παραμέτρων της τραχύτητας: α)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm), β)Μέγιστο Ύψος R_t(μm), γ)Μέγιστο Ύψος Κορυφής R_p(μm), δ)Μέσο Διάστημα Κορυφής R_{sm}(mm), ε)Λοξότητα R_{sk}, στ)Κυρτότητα R_{ku}.

Στο παράρτημα Α οι επιφάνειες προσαρμογής αντιπαραβάλλονται με τα τρισδιάστατα διαγράμματα των δεδομένων των πειραματικών μετρήσεων (Σχήματα Α1 - Α18), από όπου διακρίνεται και οπτικά ο υψηλός βαθμός προσαρμογής των στοχαστικών μοντέλων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.5 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση

7.5.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση με μαθηματικά μοντέλα (στοχαστικά), των βασικών παραγόντων κοπής (πρόωση και ταχύτητα κοπής), με βασικές αποκρίσεις (δυνάμεις κοπής, παράμετροι τραχύτητας) κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30, μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης και των μαθηματικών μεθόδων προσαρμογής (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Η προσαρμογή που επιτεύχθηκε για τα καταρτισμένα μοντέλα είναι αρκετά υψηλή (ο συντελεστής προσδιορισμού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι υψηλότερος του 98%), γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα ως προς την χρησιμοποίησή τους για μελλοντική πρόβλεψη τιμών των αποκρίσεων, στο εύρος τιμών των παραγόντων κατά το οποίο έχουν ισχύ (εύρος τιμών των παραγόντων όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της τόρνευσης).

Επίσης, αποδείχτηκε μέσω στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων (πίνακες ανάλυσης διακύμανσης), ότι σημαντικότερος παράγοντας για την συγκεκριμένη κατεργασία είναι η πρόωση, με τα ποσοστά επιρροής στα μετρούμενα μεγέθη να υπερβαίνουν στις περισσότερες περιπτώσεις το 80%. Η αύξησή της επιφέρει αύξηση στις τιμές των αποκρίσεων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την εκτέλεση της κοπής, σε όσο το δυνατό χαμηλότερες τιμές αυτής. Η ταχύτητα κοπής υπολείπεται σημαντικά στα ποσοστά επιρροής, ενώ αντίθετα από την πρόωση, η αύξησή της επιφέρει μείωση στις τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Παρόλο που η ταχύτητα κοπής δεν κατέχει τον σημαντικότερο ρόλο στην διαμόρφωση των τιμών των αποκρίσεων, λαμβάνοντας υψηλές τιμές εξιδανικεύει τις συνθήκες κοπής βελτιώνοντας το αποτέλεσμα της διεργασίας. Τέλος, μέσω της στατιστικής ανάλυσης, αποδείχτηκε ότι οι εξεταζόμενοι παράγοντες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν τις τιμές των αποκρίσεων σε ποσοστά που ανέρχονται σε κάποιες περιπτώσεις ακόμα και άνω του 4%.

Συνοψίζοντας, παρατίθενται σε πίνακα τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα και ο συντελεστής προσδιορισμού του καθενός, για τις δυνάμεις κοπής και τις παραμέτρους της τραχύτητας:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 7.21: Τα στοχαστικά μοντέλα των δυνάμεων κοπής

Δύναμη κοπής	Στοχαστικό μοντέλο	Συντελεστής Προσδιορισμού
F_t (N)	$Y = 9,820 + 495,15\ X_1 + 2,23\ 10^{-3}\ X_2 + 508,2\ X_1^2 - 27,823\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	99,60%
F_v (N)	$Y = 7,59 + 310,59\ X_1 + 2,76\ 10^{-3}\ X_2 - 37,552\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	98,16%
F_r (N)	$Y = 1,209 + 78,631\ X_1 + 2,44\ 10^{-4}\ X_2 - 7,825\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	99,24%

Όπου: *Υ η δύναμη κοπής*
X_1 *η πρόωση σε* mm/rev
X_2 *η ταχύτητα κοπής* m/min

Πίνακας 7.22: Τα στοχαστικά μοντέλα των παραμέτρων της τραχύτητας επιφανείας

Παράμετρος τραχύτητας	Στοχαστικό μοντέλο	Συντελεστής Προσδιορισμού
R_a (μm)	$Y = 104,01\ 10^{-2} + 4,313\ X_1 - 2,39\ 10^{-4}\ X_2 + 100,26\ X_1^2 - 23,582\ 10^{-3}\ X_1\ X_2$	98,07%
R_t (μm)	$Y = -0,161 + 225,53\ X_1 - 2,99\ 10^{-3}\ X_2 - 21,25\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	96,66%
R_p (μm)	$Y = 5,11\ 10^{-3} + 2,16\ X_1 + 1,29\ 10^{-4}\ X_2 + 4,711\ X_1^2 - 38,85\ 10^{-4}\ X_1\ X_2$	98,71%
R_{sm} (mm)	$Y = -4.367\ 10^{-2} + 3.25\ X_1 + 0.96\ 10^{-4}\ X_2 - 35.69\ 10^{-4}\ X_1\ X_2$	99,29%
R_{sk}	$Y = 44,79\ 10^{-2} + 5,111\ X_1 - 58.85\ 10^{-4}\ X_2 + 0.7\ 10^{-5}\ X_2^2$	73,61%
R_{ku}	$Y = 1,952 + 7,34\ X_1 + 6,41\ 10^{-3}\ X_2 - 22,95\ X_1^2 - 0.9\ 10^{-5}\ X_2^2 - 6,447\ 10^{-3}\ X_1\ X_2$	51,05%

Όπου: *Υ η παράμετρος τραχύτητας*
X_1 *η πρόωση σε* mm/rev
X_2 *η ταχύτητα κοπής* m/min

Επίσης, στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα ποσοστά επιρροής του κάθε παράγοντα και της αλληλεπίδρασης αυτών στις εξαρτημένες μεταβλητές:

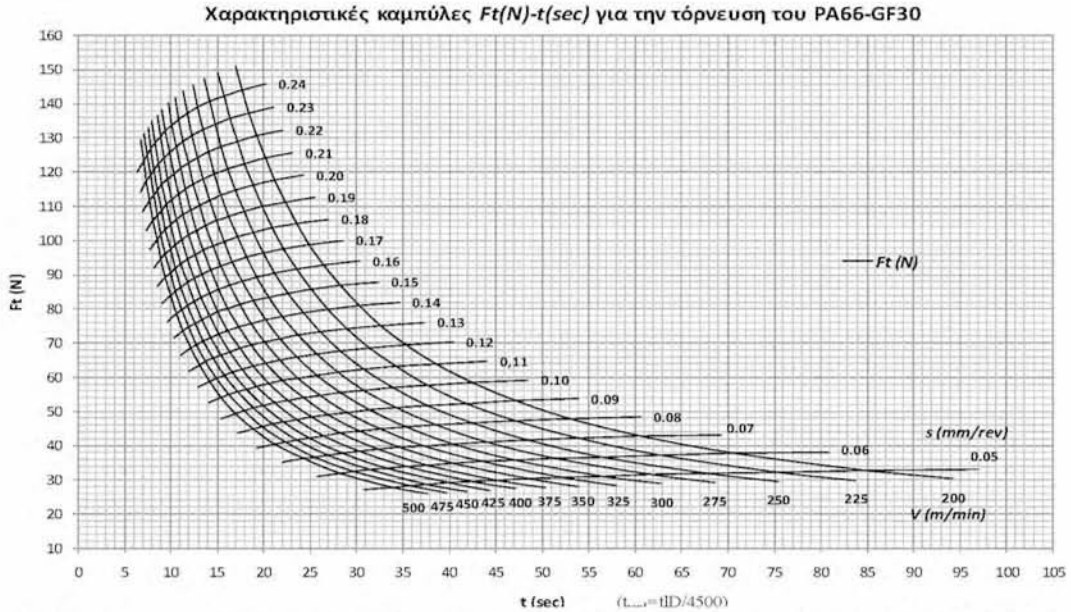
Πίνακας 7.23: Ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων και της αλληλεπίδρασης αυτών στις αποκρίσεις.

Απόκριση	Επίδραση S (%)	Επίδραση V (%)	Επίδραση SV (%)
F_t (N)	97,71%	1,66%	0,25%
F_v (N)	73,81%	21,33%	4,86%
F_r (N)	83,50%	13,58%	2,92%
R_a (μm)	88,18%	6,52%	1,18%
R_t (μm)	83,22%	14,31%	2,47%
R_p (μm)	84,68%	8,8%	2,37%
R_{sm} (mm)	82,96%	11,86%	4,03%
R_{sk}	90,32%	5,02%	-
R_{ku}	25,91%	28,57%	6,82%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

7.5.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας

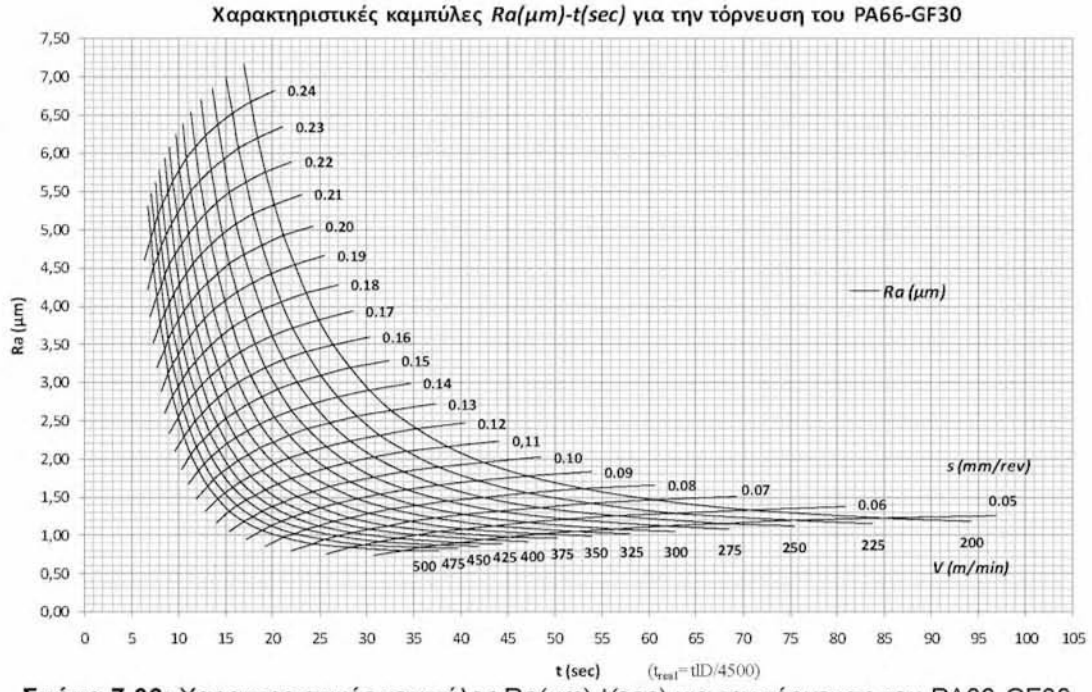
Ο ιδανικός συνδυασμός των συνθηκών κοπής, επιφέρει στο σύστημα της κατεργασίας τις επιθυμητές κατά περίσταση τιμές των αποκρίσεων (π.χ. τις χαμηλότερες τιμές για τις δυνάμεις κοπής ή την επιφανειακή τραχύτητα[1]). Το κατά πόσο μπορούμε να αποκλίνουμε από το συγκεκριμένο συνδυασμό τιμών των παραγόντων, εξαρτάται από την αποδεκτή σε κάθε περίπτωση ανοχή στις τιμές των αποκρίσεων, με βάση τις λειτουργικές και σχεδιαστικές απαιτήσεις του παραγόμενου προϊόντος. Από τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα και με δεδομένη την αξιοπιστία και την εγκυρότητά τους μέσω των ελέγχων καταλληλότητας, (κεφ.7.3.2.3 και κεφ.7.4.2.2), κατασκευάζονται οι «χαρακτηριστικές καμπύλες» των παραμέτρων κατεργαστικότητας του ενισχυμένου πολυμερούς PA66-GF30. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αποτελούν διαγράμματα των αποκρίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο κοπής του τεμαχίου (Σχέση 7.2, Πίνακας 7.5) και κατασκευάζονται αναπτύσσοντας τα στοχαστικά μοντέλα σε ενδιάμεσες τιμές των επιπέδων των παραγόντων, μέσα πάντα στο εύρος τιμών ισχύς των μοντέλων (εύρος τιμών των παραγόντων των πειραμάτων τόρνευσης, Πίνακας 7.3). Για παράδειγμα, για την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής F_t(N) και την μέση αριθμητική τραχύτητα $R_a(\mu m)$, σύμφωνα με τις σχέσεις 7.4 και 7.7 αντίστοιχα, τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων είναι τα ακόλουθα:



Σχήμα 7.31: Χαρακτηριστικές καμπύλες F_t(N)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30.

[1], Η επιφανειακή τραχύτητα ενδέχεται να περιορίζεται, για λειτουργικούς λόγους, από κάποια προκαθορισμένη ελάχιστη τιμή, για παράδειγμα σε περιπτώσεις συναρμογής εξαρτημάτων.

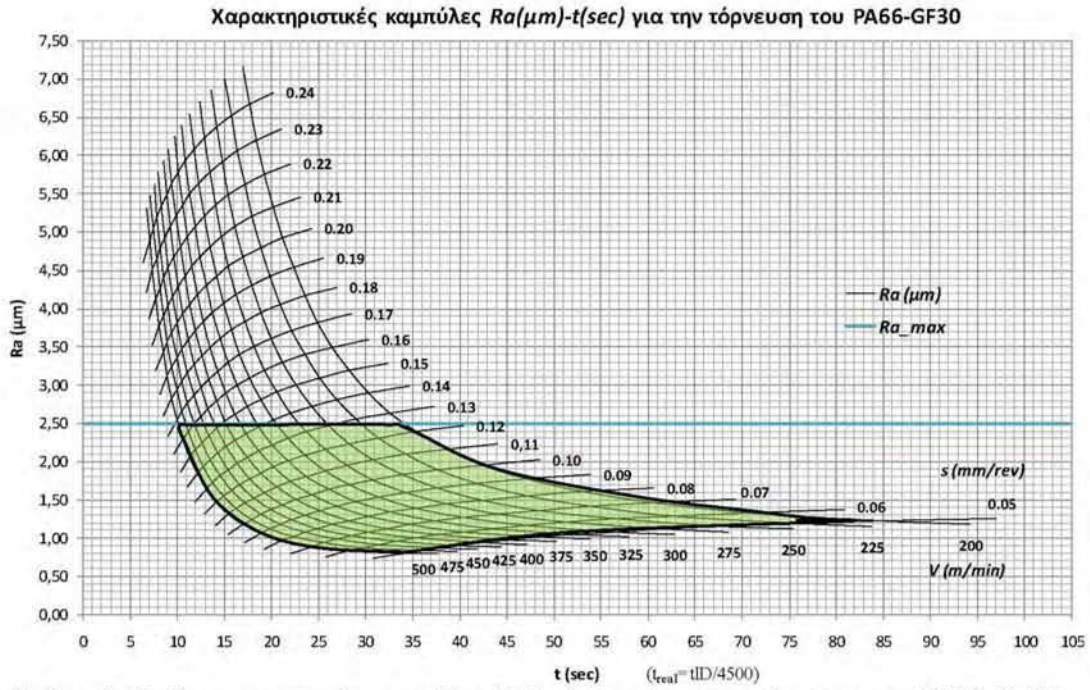
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



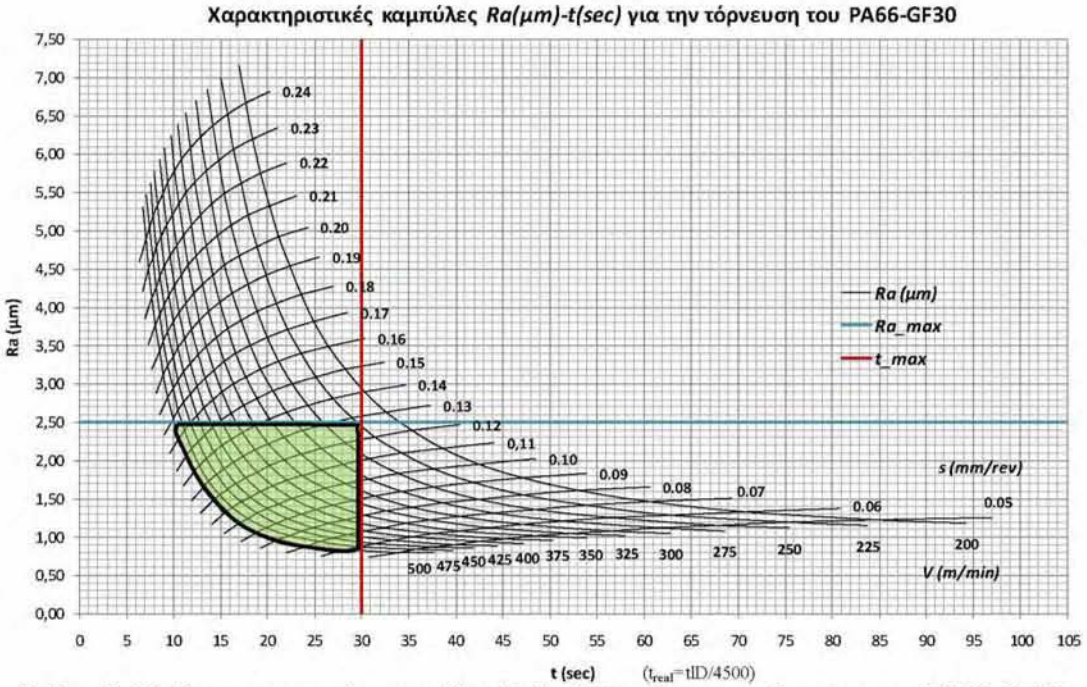
Σχήμα 7.32: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30.

Τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων, συντελούν στην βέλτιστη επιλογή του συνδυασμού τιμών των παραγόντων για την πραγματοποίηση μιας κατεργασίας, βάσει του συνολικού χρόνου κοπής και τις επιθυμητές τιμές των αποκρίσεων. Για παράδειγμα, αν υποτεθεί ότι κατά την κατασκευή ενός προϊόντος από το ενισχυμένο πολυμερές PA66-GF30, υπάρχει περιορισμός στην επιφανειακή τραχύτητα της τελικής επιφάνειας, βάσει των σχεδιαστικών απαιτήσεων, σε Ra_{max}=*2,5μ*m, διακρίνεται από το διάγραμμα ότι οι παράγοντες περιορίζονται στις τιμές της περιοχής κάτω από την γραμμή της μέγιστης τιμής Ra_{max}, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.33. Στην περίπτωση που είναι αναγκαίο να περιοριστεί και ο χρόνος κοπής για θέματα κόστους και ταχύτητας της παραγωγικής διαδικασίας (γραμμή παραγωγής), σε μια μέγιστη τιμή π.χ. t_{max}=30sec, οι συνδυασμοί των παραγόντων περιορίζονται σε αυτούς που ορίζονται από την περιοχή μεταξύ των γραμμών Ra_{max} και t_{max} (Σχήμα 7.34):

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 7.33: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα.



Σχήμα 7.34: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα και στον χρόνο κοπής.

Σε κάθε περίπτωση οι επιλογές του κατασκευαστή δεν περιορίζονται σε σημειακές τιμές των παραγόντων, αλλά σε ένα ευρύ σύνολο εναλλακτικών επιλογών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Παρότι όπως αποδείχτηκε με την μέχρι τώρα στατιστική ανάλυση, οι ευνοϊκότερες συνθήκες κοπής υφίστανται για μικρές τιμές τις πρόωσης και υψηλές της ταχύτητας κοπής (με ιδανικό συνδυασμό των S και V, τα 0.05mm/sec και 500m/min αντίστοιχα), από τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων, μπορεί να επιλεγεί πλήθος συνδυασμού τιμών των παραγόντων για την πραγματοποίηση της κοπής, με βάση τις επιθυμητές και απαιτούμενες κατά περίσταση τιμές των μετρούμενων μεγεθών και του χρόνου κοπής. Οι επιλογές δηλαδή του κατασκευαστή ως προς τις συνθήκες κοπής αυξάνονται σημαντικά προσφέροντας ευελιξία στην παραγωγική διαδικασία και ελαχιστοποιούν το ενδεχόμενο να παρεκκλίνουν τα χαρακτηριστικά των τελικών προϊόντων ή ο συνδυασμός χρόνου και κόστους της παραγωγής.

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αποτελούν στην ουσία την χαρτογράφηση της εκάστοτε κατεργασίας του συγκεκριμένου υλικού (PA66-GF30) και σε συγκεκριμένο εύρος τιμών των παραγόντων, συνδέοντας έτσι, την στατιστική ανάλυση και συμπερασματολογία με την παραγωγική διαδικασία. Στο παράρτημα Α (Σχήματα Α19-Α26) δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες όλων των αποκρίσεων που έχουν μελετηθεί για τα πειράματα τις τόρνευσης του ενισχυμένου πλαστικού PA66-GF30 και για τις οποίες έχουν κατασκευαστεί στοχαστικά μοντέλα, έπειτα από ανάλογη στατιστική ανάλυση[1].

[1] Στην περίπτωση που για τα καταρτισμένα μοντέλα δεν ήταν δυνατό να επιτευχθεί υψηλός συντελεστής συσχέτισης, οι αντίστοιχες χαρακτηριστικές καμπύλες παραλείφτηκαν.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 8: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑΤΟΣ

8.1 Πειραματική διάταξη

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων του φραιζαρίσματος χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακά καθοδηγούμενο κατακόρυφο κέντρο κατεργασίας MX45-VAE της εταιρίας OKUMA (κεφ.6.2.1). Τα δοκίμια του ενισχυμένου πολυαμιδίου PA66-GF30 ήταν κυλινδρικά, διαμέτρου 150mm και μήκους 40mm. Η συγκράτηση των δοκιμίων έγινε με σφιγκτήρα τριών σιαγόνων που είναι ο πλέον ενδεδειγμένος για σύσφιξη κυλινδρικών τεμαχίων, και ο οποίος ήταν προσαρμοσμένος σε κατάλληλα διαμορφωμένη ενδιάμεση βάση. Η εν λόγω βάση προσδένονταν σταθερά με κοχλίες στο 3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B της εταιρίας Kistler (κεφ.6.5.3), το οποίο στερεώνεται ακολούθως, ακλόνητα στις αυλακώσεις της τράπεζας της φραίζας, με κατάλληλους κοχλίες και σφιγκτήρες.

Ως εργαλείο κοπής χρησιμοποιήθηκε η φραιζοκεφαλή LSE445-A050A04R της εταιρείας Mitsubishi. Η συγκεκριμένη φραιζοκεφαλή είναι διαμέτρου 50mm, έχει τέσσερις κοπτικές ακμές και φέρει τα ένθετα πλακίδια καρβιδίου SEEN1203AFTN1-F7030 (κεφ.6.2.2, Σχήμα 6.4). Τα πλακίδια είναι τετραγωνικού σχήματος με τέσσερις κόψεις, οι οποίες εναλλάσσονταν όταν κρινόταν απαραίτητο λόγω φθοράς κατά τις κοπές. Με το συγκεκριμένο κοπτικό εργαλείο η κοπή πραγματοποιείται τόσο από την μικρή πλευρά του πλακιδίου παράλληλα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια (πεπλατυσμένη κόψη πλακιδίου), όσο και από την πλαϊνή πλευρά του υπό γωνία 45° και το φραιζάρισμα χαρακτηρίζεται ως μετωπικό[1] [25].

[1] Στην πραγματικότητα αποτελεί κατεργασία φραιζαρίσματος με μετωπικό κοπτήρα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

8.2 Πειραματικός σχεδιασμός του φραιζαρίσματος

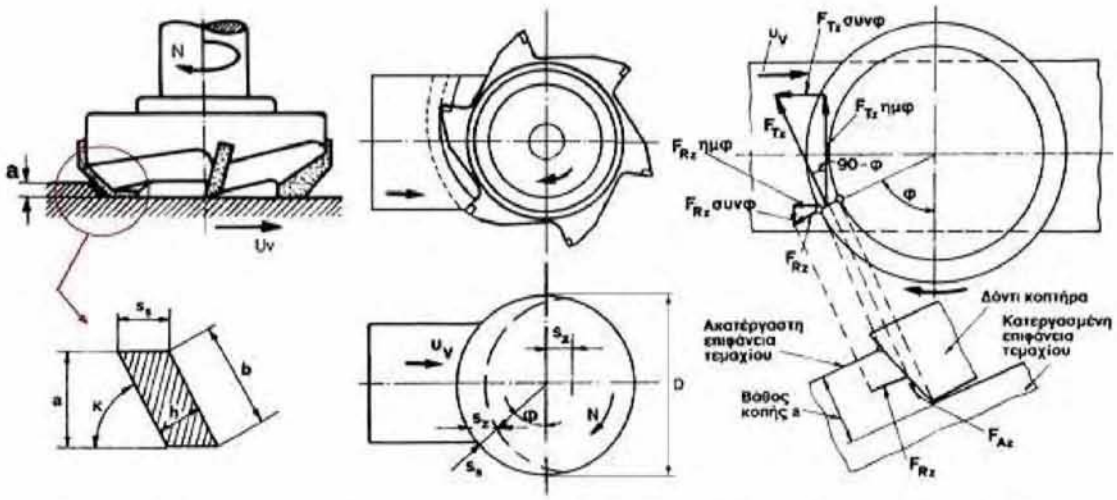
8.2.1 Παράμετροι των πειραμάτων στη φραίζα

Τα πειράματα στη φραίζα επικεντρώθηκαν στην έρευνα της επίδρασης της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής ως συνθηκών κοπής (ανεξάρτητες μεταβλητές, X_i), σε βασικές παραμέτρους κατεργασιμότητας. Οι παράμετροι που μελετώνται (εξαρτημένες μεταβλητές, Y_i), είναι οι δυνάμεις κοπής που αναπτύσσονται κατά το φραιζάρισμα και η επιφανειακή τραχύτητα εκφρασμένη από τις παραμέτρους R_a, R_z, R_t, R_{sm}, R_{sk}, και R_{ku} (κεφ.3.2.3).

Κατά το μετωπικό φραιζάρισμα η δύναμη κοπής ανά δόντι Fz αναλύεται στην κύρια ή εφαπτομενική συνιστώσα F_{Tz}, στην ακτινική συνιστώσα F_{Rz} και στην αξονική συνιστώσα ή δύναμη απώθησης του κοπτικού εργαλείου F_{Az} (Σχήμα 8.1). Οι δυνάμεις κοπής που αποδίδει το στατικό 3-αξονικό δυναμόμετρο 9257B της εταιρίας Kistler (κεφ.6.5.3), αποκρίνονται στο ορθογώνιο σύστημα τριών αξόνων *X, Y* και *Z* και είναι αντίστοιχα οι F_X, F_Y και F_Z. Η δύναμη F_Z συμπίπτει με την δύναμη απώθησης του κοπτικού εργαλείου (ή αξονική συνιστώσα) F_A, η οποία έχει σταθερή διεύθυνση σε όλη τη διάρκεια της κοπής κατά τον *Z* άξονα (Σχήμα 8.1). Οι δυνάμεις F_X και F_Y στην πραγματικότητα αποτελούν συνδυασμό της εφαπτομενικής και ακτινικής συνιστώσας της δύναμης κοπής (F_T και F_R αντίστοιχα), που αναπτύσσονται κατά την κοπή σε κάθε δόντι του κοπτικού εργαλείου. Τα ποσοστά των F_T και F_R που αναλογούν συνδυαστικά στις F_X και F_Y μεταβάλλονται διαρκώς κατά την διεξαγωγή της κοπής και εξαρτώνται τόσο από τον αριθμό των κοπτικών που συμμετέχουν ενεργά όσο και από την θέση που αυτά έχουν (γωνία αποκοπής φ[1] Σχήμα 8.1) την κάθε χρονική στιγμή στο σύστημα της κοπής [30][25].

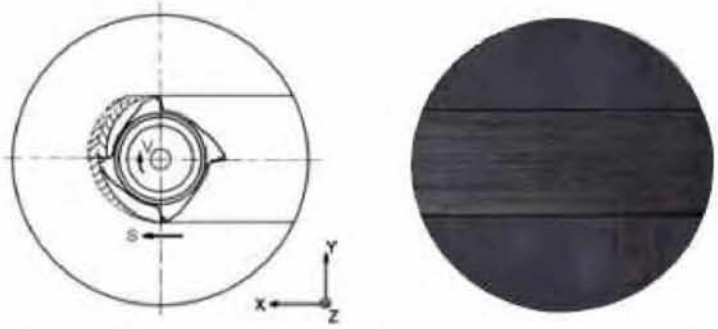
[1] Γωνία αποκοπής φ ενός δοντιού του κοπτήρα ονομάζεται η γωνία που προσδιορίζει την θέση του δοντιού την κάθε χρονική στιγμή. Μετράται από τον κάθετο στη διεύθυνση της κοπής άξονα μέχρι τη θέση του δοντιού με θετική φορά την κατεύθυνση της περιστροφικής ταχύτητας. Οι τιμές που μπορεί να πάρει είναι από 0 μέχρι 180° (Σχήμα 8., [25])

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 8.1: Στοιχεία κινηματικής και δυνάμεις κοπής του μετωπικού φραιζαρίσματος (S_z η πρόωση ανά δόντι, V η ταχύτητα κοπής, U_v η ταχύτητα πρόωσης, N η περιστροφική ταχύτητα, a το βάθος κοπής, *φ* η γωνία αποκοπής, *κ* η γωνία τοποθέτησης, b το πλάτος του αποβλίττου, h το στιγμιαίο θεωρητικό πάχος αποβλίττου, F_T η εφαπτομενική συνιστώσα, F_R η ακτινική συνιστώσα και F_A αξονική συνιστώσα, $S_s = S_z$ *ημφ*). **[25]**

Σύμφωνα με την διάταξη που πραγματοποιήθηκαν οι κοπές των πειραμάτων (Σχήμα 8.2) η διεύθυνση της δύναμης F_X συμπίπτει με την διεύθυνση της πρόωσης της κοπής (X-άξονας). Επίσης, για τη συγκεκριμένη φραιζοκεφαλή με τα τέσσερα κοπτικά άκρα όταν η γωνία αποκοπής του κοπτικού είναι 90º, η δύναμη F_Y συμπίπτει με την εφαπτομενική συνιστώσα της δύναμης κοπής F_T και η δύναμη F_X με την ακτινική συνιστώσα F_R (Σχήμα 8.1). Γνωρίζοντας τη θέση του κοπτικού την κάθε χρονική στιγμή είναι δυνατό οι δυνάμεις F_X και F_Y να αναλυθούν στις συνιστώσες δυνάμεις F_T και F_R της δύναμης κοπής, αλλά μόνο κατά τη διάρκεια που στην κοπή συμμετέχει ένα μόνο κοπτικό άκρο [30].



Σχήμα 8.2: Πειραματική διάταξη και κατεργασμένο δοκίμιο.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Συνοψίζοντας, οι παράγοντες και οι αποκρίσεις των πειραμάτων στη φραίζα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες 8.1 και 8.2 αντίστοιχα.

Πίνακας 8.1: Παράγοντες των πειραμάτων.

Παράγοντες	
Πρόωση S (mm/rev)	Ταχύτητα Κοπής V (m/min)
X_1	X_2

Πίνακας 8.2: Αποκρίσεις των πειραμάτων.

Αποκρίσεις Δυνάμεων			**Αποκρίσεις Παραμέτρων Τραχύτητας**					
Δύναμη F_X (N)	Δύναμη F_Y (N)	Αξονική δύναμη F_Z (N)	Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a (μm)	Ύψος δέκα σημείων R_z (μm)	Μέγιστο ύψος R_t (μm)	Μέσο διάστημα κορυφών R_{sm} (mm)	Λοξότητα R_{sk}	Κυρτότητα R_{ku}
Y_1	Y_2	Y_3	Y_4	Y_5	Y_6	Y_7	Y_8	Y_9

Όλες οι κοπές πραγματοποιήθηκαν με ένα πέρασμα του κοπτικού εργαλείου (φραιζοκεφαλής) στο κέντρο του δοκιμίου, δημιουργώντας συνθήκες μικτής κοπής αντίρροπου και ομόρροπου φραιζαρίσματος (Σχήμα 8.2 [13][25]). Επίσης, δεν έγινε χρήση υγρού κοπής (στεγνή κοπή). Στα αποτελέσματα των μετρήσεων διεξήχθη στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους και ανάλυση διακύμανσης (Analysis of Variance - ANOVA), με σκοπό την κατάρτιση αξιόπιστων προβλεπτικών εμπειρικών μοντέλων (στοχαστικά μοντέλα προσαρμογής) (κεφ.5.5).

8.2.2 Καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων

Οι κοπές συντελέστηκαν σε τρεις διαφορετικές προώσεις 0,2, 0,32, 0,4 mm/rev και τρεις διαφορετικές ταχύτητες κοπής 50, 200, 500 m/min, ενώ το βάθος κοπής και το πλάτος κοπής διατηρήθηκαν σταθερά, 1mm και 50mm αντίστοιχα. Συνοπτικά, τα επίπεδα των παραγόντων του πειραματικού σχεδιασμού, δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 8.3: Επίπεδα των παραγόντων των πειραμάτων στη φραίζα.

Επίπεδα Παραγόντων	
Πρόωση S (mm/rev)	**Ταχύτητα κοπής V (m/min)**
0,2	50
0,32	200
0,4	500

Από τις τιμές της ταχύτητας κοπής υπολογίζονται οι απαιτούμενες τιμές της περιστροφικής ταχύτητας μέσω της Σχέσης 3.1, που προκύπτει από την κινηματική της κατεργασίας (Σχήμα 8.1, [25]).

$$V = \frac{\pi DN}{1000} \quad \text{[m/min]} \qquad (3.1)$$

όπου D (mm) η διάμετρος του κοπτικού εργαλείου (η ενεργός διάμετρός του) και *N* (rev/min) η ταχύτητα περιστροφής του.

Επίσης από τις τιμές της πρόωσης μπορεί να υπολογιστεί η πρόωση ανά δόντι S_z μέσω της ακόλουθης Σχέσης [25]:

$$S_z = S/z \quad \text{[mm/δόντι]} \qquad (3.2)$$

όπου z ο αριθμός των δοντιών.

Συγκεντρωτικά, οι πειραματικές συνθήκες των πειραμάτων στη φραίζα δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 8.4: Οι συνθήκες κοπής των πειραμάτων στη φραίζα.

Συνθήκες κοπής			
Πρόωση S (mm/rev)	**Πρόωση ανά δόντι S_N (mm/rev δόντι)**	**Ταχύτητα κοπής V (m/min)**	**Περιστροφική ταχύτητα N (rpm)**
0,2	0,05	50	318
0,32	0,08	200	1273
0,4	0,1	500	3183

Οι χρόνοι κοπής υπολογίζονται από την Σχέση 3.3 [25], από την οποία για κάθε συνδυασμό των παραγόντων και για μήκος κοπής 150mm (διάμετρος των κυλινδρικών δοκιμίων) προκύπτουν οι τιμές του πίνακα που ακολουθεί:

$$t = 60\frac{L}{U_V} = 60\frac{L}{SN} \quad \text{[sec]} \qquad (3.3)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

όπου Uv (mm/min) η ταχύτητα πρόωσης και L (mm) είναι το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Πίνακας 8.5: Χρόνοι κοπής σε sec για κάθε συνδυασμό πρόωσης S(mm/rev) και περιστροφικής ταχύτητας N(rpm)

t (sec)		S (mm/rev)		
		0,2	0,32	0,4
N (rpm)	318	141	88	71
	1273	35	22	18
	3183	14	9	7

8.2.3 Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού

Επιλέγοντας τον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό (Full Factorial Design), ο αριθμός των πειραμάτων (κοπές για κάθε συνδυασμό των παραγόντων) που απαιτούνται στις επιλεγμένες συνθήκες κοπής, δίνεται από τον πολλαπλασιασμό των επιπέδων των παραγόντων (κεφ.5.3.1), δηλαδή:

Συνδυασμοί** = **3** (επίπεδα πρόωσης) **x 3** (επίπεδα ταχύτητας κοπής) = **9

Για να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των μετρήσεων και να αποφευχθούν συστηματικά πειραματικά σφάλματα, κάθε κοπή επαναλαμβάνεται τρεις φορές αυξάνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων στα 27. Με βάση τη μέθοδο του πλήρη παραγοντικού σχεδιασμού και μέσω στατιστικού πακέτου που αποδίδει τυχαιότητα στην σειρά εκτέλεσης των πειραμάτων, πραγματοποιείται ο πίνακας σχεδιασμού του πειράματος ή πειραματικός χώρος (Design Matrix) (κεφ.5.3):

Πίνακας 8.6: Πειραματικός χώρος (Design Matrix).

Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)
1	4	0,2	50
2	3	0,32	50
3	8	0,4	50
4	1	0,2	200
5	7	0,32	200
6	2	0,4	200
7	6	0,2	500
8	9	0,32	500
9	5	0,4	500

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με βάση τη σειρά Run που παραθέτει το στατιστικό πρόγραμμα, εξασφαλίζοντας έτσι, την κανονική και ανεξάρτητη κατανομή των πειραματικών σφαλμάτων (κεφ.5.3).

8.2.4 Πειραματικές μετρήσεις

Κατά το φραιζάρισμα των δοκιμίων στους συνδυασμούς των συνθηκών κοπής του πειραματικού χώρου (Πίνακας 8.6), καταμετρήθηκαν οι δυνάμεις κοπής μέσω του 3-αξονικού δυναμόμετρου 9257B της Kistler (κεφ.6.5.3). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με συχνότητα 100Hz (100 σημεία ανά δευτερόλεπτο) γεγονός όπου με βάση το χρόνο κοπής της εκάστοτε κατεργασίας (Πίνακας 8.5), καθορίζεται το συνολικό πλήθος των σημείων που λαμβάνει το δυναμόμετρο για κάθε μέτρηση (tx100). Με κατάλληλη επεξεργασία των διαγραμμάτων που εξάγονται από το συνεργαζόμενο με το δυναμόμετρο λογισμικό επεξεργασίας των σημείων, προκύπτουν οι μέσες τιμές των δυνάμεων κοπής για κάθε δοκιμή (κεφ.6.5.5).

Μετά την ολοκλήρωση των κοπών, τα τεμάχια μεταφέρθηκαν στο τραχύμετρο Surtronic 3+ της εταιρίας Taylor-Hobson (κεφ.6.6), όπου έγινε η καταγραφή των προφίλ επιφανείας των κατεργασμένων επιφανειών και η μέτρηση των παραμέτρων της τραχύτητας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την διεύθυνση της κοπής (διεύθυνση πρόωσης). Το φίλτρο αποκοπής ήταν το "Gaussian", ενώ σαν μήκος κύματος αποκοπής (cut-off length) επιλέχθηκε η τιμή 0.8mm, που συνίσταται για κατεργασίες φραιζαρίσματος (κεφ.3.2.4.2, Πίνακας 3.3). Επίσης, το δειγματοληπτικό μήκος (L_n) ήταν σε κάθε περίπτωση 4mm, καθώς είναι πέντε μήκη αποκοπής (5x0.8=4mm) (κεφ.3.2.4.2). Οι παράμετροι που συλλέγονται και μελετώνται είναι η μέση αριθμητική τραχύτητα R_a, το ύψος δέκα σημείων R_z, το μέγιστο ύψος R_t, το μέσο διάστημα κορυφών R_{sm}, η λοξότητα R_{sk} και η κυρτότητα R_{ku} (κεφ.3.2).

Μεταφέροντας τις πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων στον πίνακα 8.6, συντελείται ο συγκεντρωτικός πειραματικός χώρος των μετρήσεων:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 8.7: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων.

Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)	F_X * (N)	F_Y * (N)	F_Z * (N)	R_a * (μm)	R_z * (μm)	R_t * (μm)	R_{sm} * (mm)	R_{sk} *	R_{ku} *
1	4	0,2	50	57,46	78,75	12,72	0,89	6,02	7,33	0,081	-0,09	3,23
2	3	0,32	50	72,06	99,57	22,16	0,99	6,21	8,25	0,085	-0,61	3,74
3	8	0,4	50	105,36	138,62	36,12	1,09	7,37	9,60	0,108	-0,04	3,47
4	1	0,2	200	56,03	74,66	10,99	0,81	5,67	7,20	0,085	-0,20	3,63
5	7	0,32	200	65,91	89,21	17,84	0,90	6,06	7,59	0,091	-0,56	3,19
6	2	0,4	200	83,93	116,59	30,24	0,96	7,28	8,50	0,118	-0,38	3,69
7	6	0,2	500	52,74	69,37	8,32	0,76	5,34	6,79	0,070	0,30	4,49
8	9	0,32	500	56,32	79,79	14,96	0,82	5,47	7,01	0,076	-0,11	3,23
9	5	0,4	500	71,82	100,06	24,18	0,88	6,81	7,51	0,090	0,16	4,57

* Μέσος όρος τριών επαναλήψεων

Στους πίνακες Β1, Β3 και Β4 του παραρτήματος Β, δίνονται οι πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων για κάθε επανάληψη.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

8.3 Στατιστική ανάλυση

8.3.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους

Η στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους περιλαμβάνει τις γραφικές παραστάσεις των κύριων επιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων (κεφ.5.4). Με τη συγκεκριμένη τεχνική ανιχνεύεται γραφικά η επίδραση που έχουν οι παράγοντες και η αλληλεπίδρασή τους στις αποκρίσεις, πραγματοποιώντας στατιστική επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων.

8.3.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων

Μέσω των διαγραμμάτων των κύριων επιδράσεων, εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν οι παράγοντες στα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή, αν επιφέρουν αύξηση ή μείωση στις τιμές αυτών και ενδεικτικά σε ποιό βαθμό (κεφ.5.4). Για να επιτευχθεί αυτό, υπολογίζονται από τα δεδομένα του πειραματικού χώρου (Πίνακας 8.7) οι μέσοι όροι των αποκρίσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων.

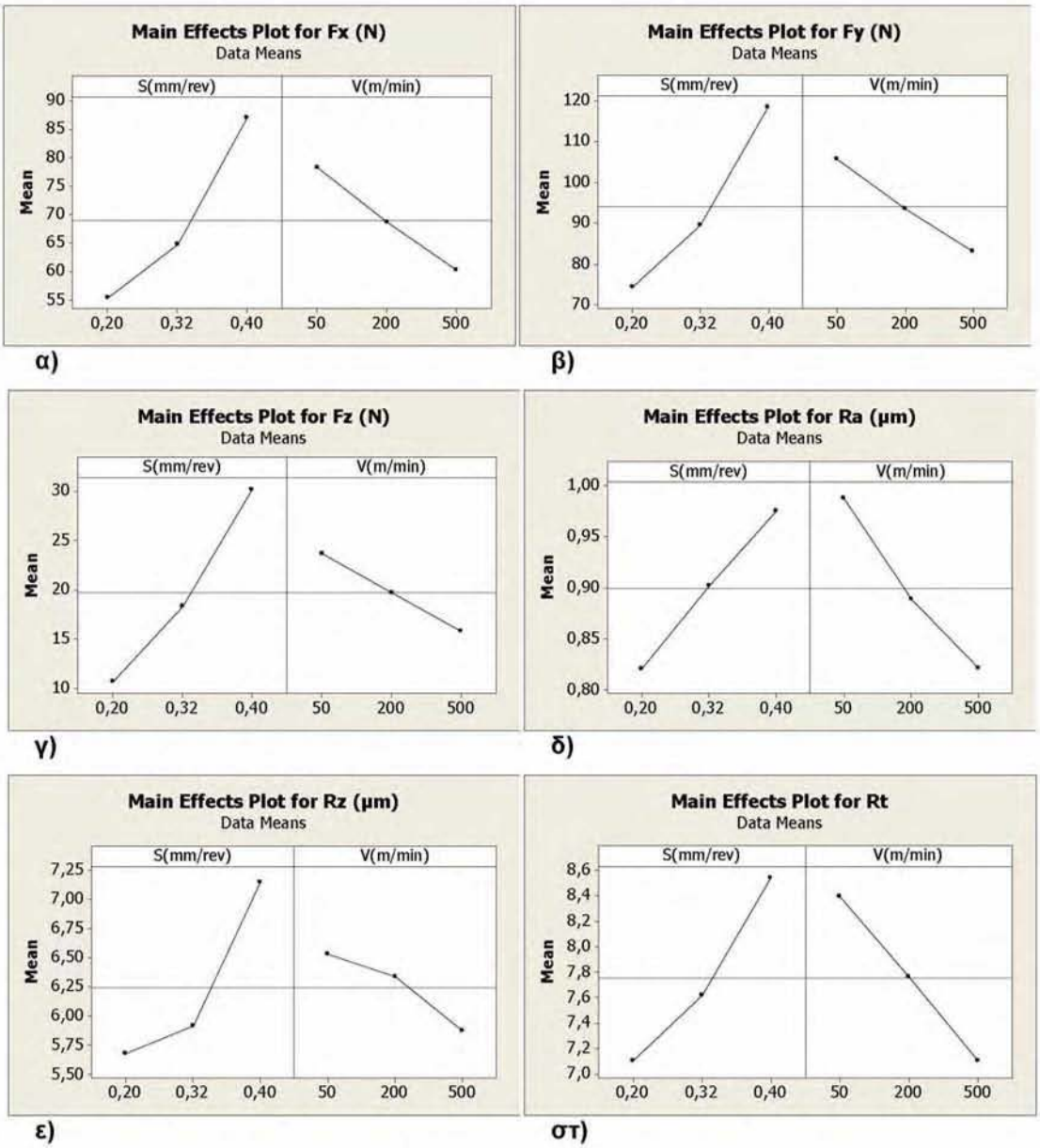
Πίνακας 8.8: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων

		S (mm/rev)		
		0,2	**0,32**	**0,4**
		V (m/min)		
		50	***200***	***500***
F_x (N)	m_s (N)	55,41	64,76	87,04
	m_v *(N)*	*78,29*	*68,62*	*60,29*
F_y (N)	m_s (N)	74,26	89,52	118,42
	m_v *(N)*	*105,65*	*93,49*	*83,07*
F_z (N)	m_s (N)	10,676	18,320	30,180
	m_v *(N)*	*23,667*	*19,689*	*15,820*
R_a (μm)	m_s (μm)	0,820	0,902	0,985
	m_v *(μm)*	*0,988*	*0,899*	*0,821*
R_z (μm)	m_s (μm)	5,675	5,914	7,149
	m_v *(μm)*	*6,532*	*6,335*	*5,872*
R_t (μm)	m_s (μm)	7,140	8,007	8,460
	m_v *(μm)*	*8,483*	*7,855*	*7,269*
R_{sm} (mm)	m_s (μm)	0,079	0,087	0,105
	m_v *(μm)*	*0,091*	*0,098*	*0,082*
R_{sk} (μm)	m_s (μm)	0,002	-0,428	-0,088
	m_v *(μm)*	*-0,249*	*-0,381*	*0,116*
R_{ku} (μm)	m_s (μm)	3,780	3,384	3,910
	m_v *(μm)*	*3,478*	*3,502*	*4,094*

Όπου: m_{Vi} *ο μέσος όρος των αποκρίσεων στα επίπεδα της ταχύτητας κοπής*
m_{Si} *ο μέσος όρος των αποκρίσεων στα επίπεδα της πρόωσης*

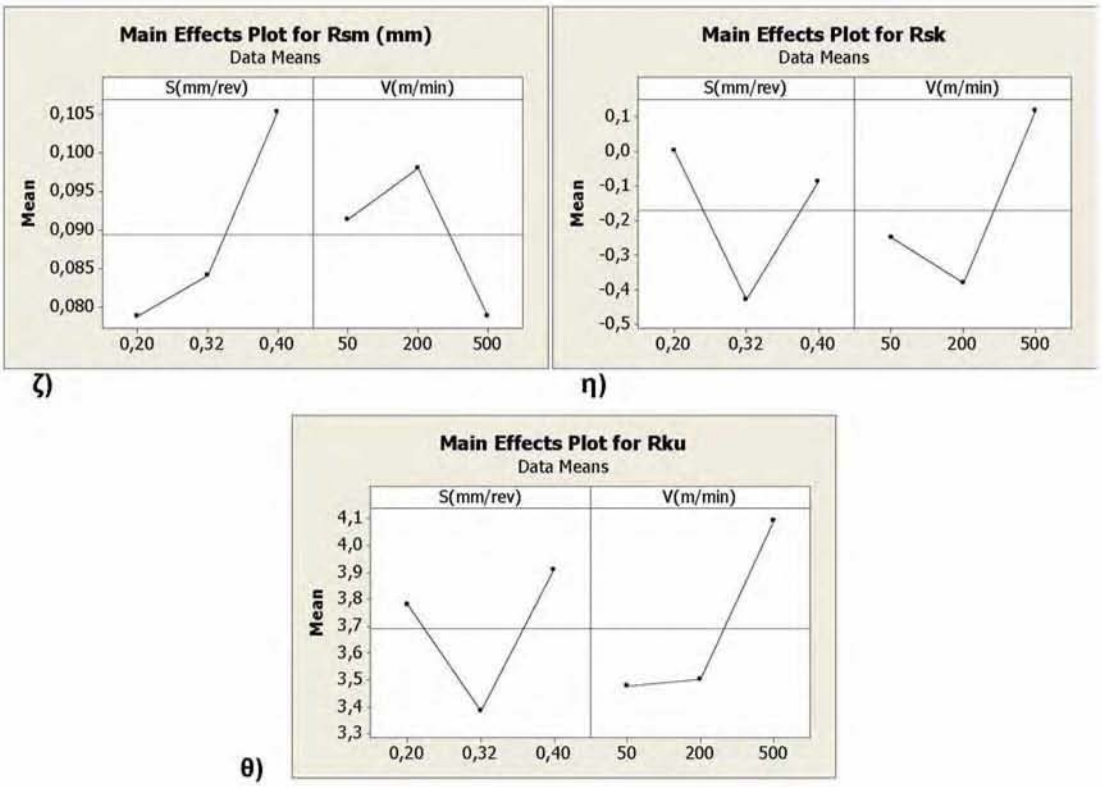
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στον Πίνακα 8.8 έχουν υπολογιστεί οι μέσοι όροι των αποκρίσεων όλων των επιπέδων του ενός παράγοντα ανά επίπεδο του δεύτερου. Μέσω των δεδομένων αυτού του πίνακα κατασκευάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων των παραγόντων που παρουσιάζονται ακολούθως (Σχήμα 8.3).



Σχήμα 8.3: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη F_x(N), β)Δύναμη F_y(N).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



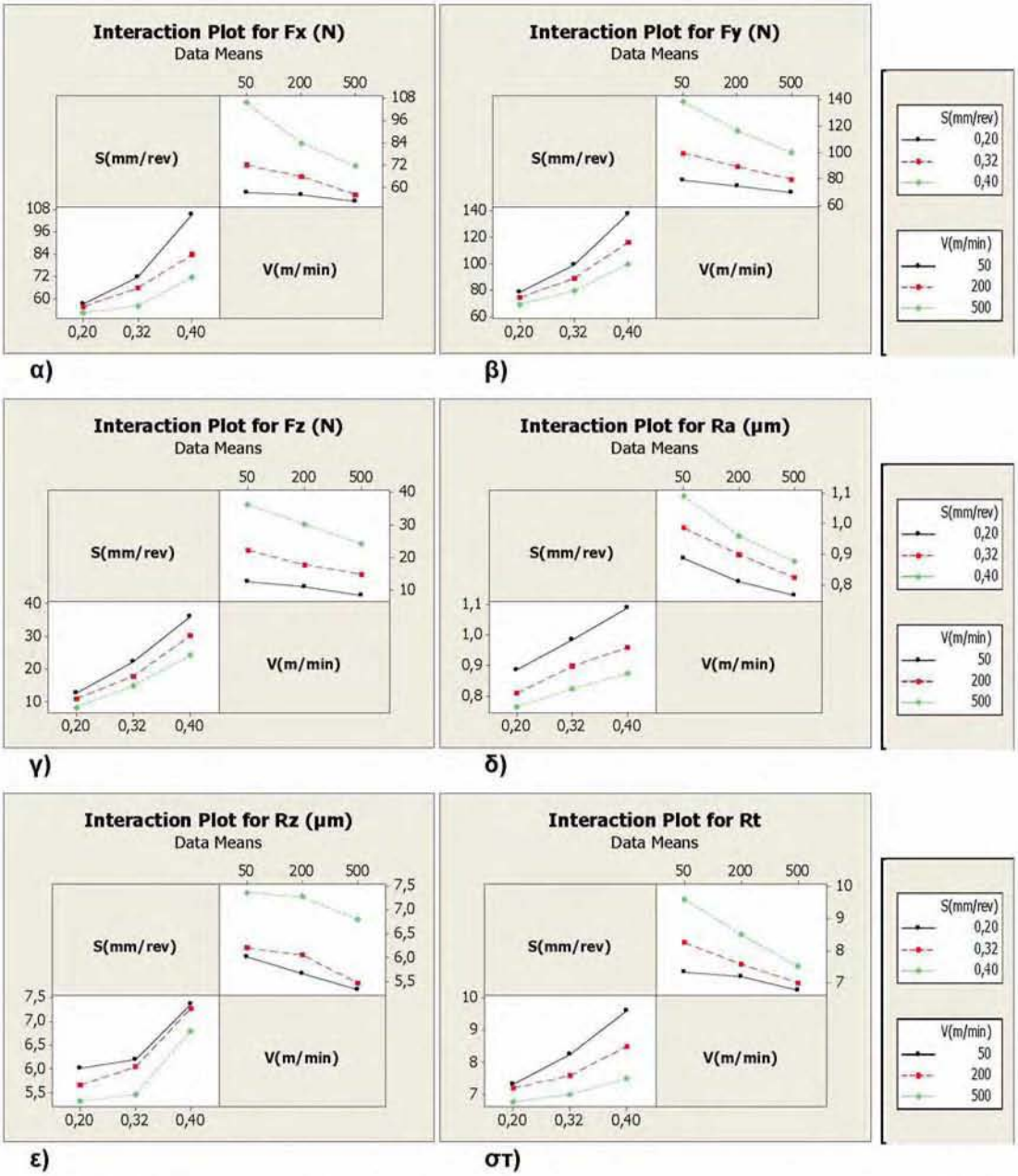
Σχήμα 8.3 (συνέχεια): Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα για τις αποκρίσεις: γ)Αξονική δύναμη F_z(N), δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm), ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο ύψος R_t(μm), ζ)Μέσο διάστημα κορυφών R_{sm}(mm), η)Λοξότητα R_{sk}, θ)Κυρτότητα R_{ku}.

Παρατηρώντας τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων, γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι, η αύξηση της πρόωσης S(mm/rev) επιφέρει σημαντική αύξηση στις τιμές των δυνάμεων, ενώ αντίθετα, η ταχύτητα κοπής V(m/min), οδηγεί σε πτώση τις τιμές τους, αλλά με μικρότερη ένταση. Οι παράμετροι της τραχύτητας, ωστόσο, δείχνουν να επηρεάζονται ισόποσα και από την πρόωση (ανάλογα), και από την ταχύτητα κοπής (αντιστρόφως ανάλογα). Εξαίρεση αποτελούν η λοξότητα R_{sk} και η κυρτότητα R_{ku}, όπου οι τιμές τους αρχικά μειώνονται και στη συνέχεια αυξάνονται με την αύξηση και των δύο παραγόντων. Σημαντικό είναι ότι οι περισσότερες τιμές της λοξότητας είναι αρνητικές (<0), γεγονός που αποδεικνύει ότι, το προφίλ των κατεργασμένων επιφανειών στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι «γεμάτο» από υλικό (κεφ.3.2.3.7). Χαρακτηριστικό είναι, επίσης, ότι όλες οι τιμές της κυρτότητας είναι μεγαλύτερες του 3, που φανερώνει ότι οι επιφάνειες είναι λεπτόκυρτες (R_{ku}>3) σε κάθε περίπτωση, δηλαδή, εμφανίζουν οξύτητα στις κορυφές και στις κοιλάδες (κεφ.3.2.3.8).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

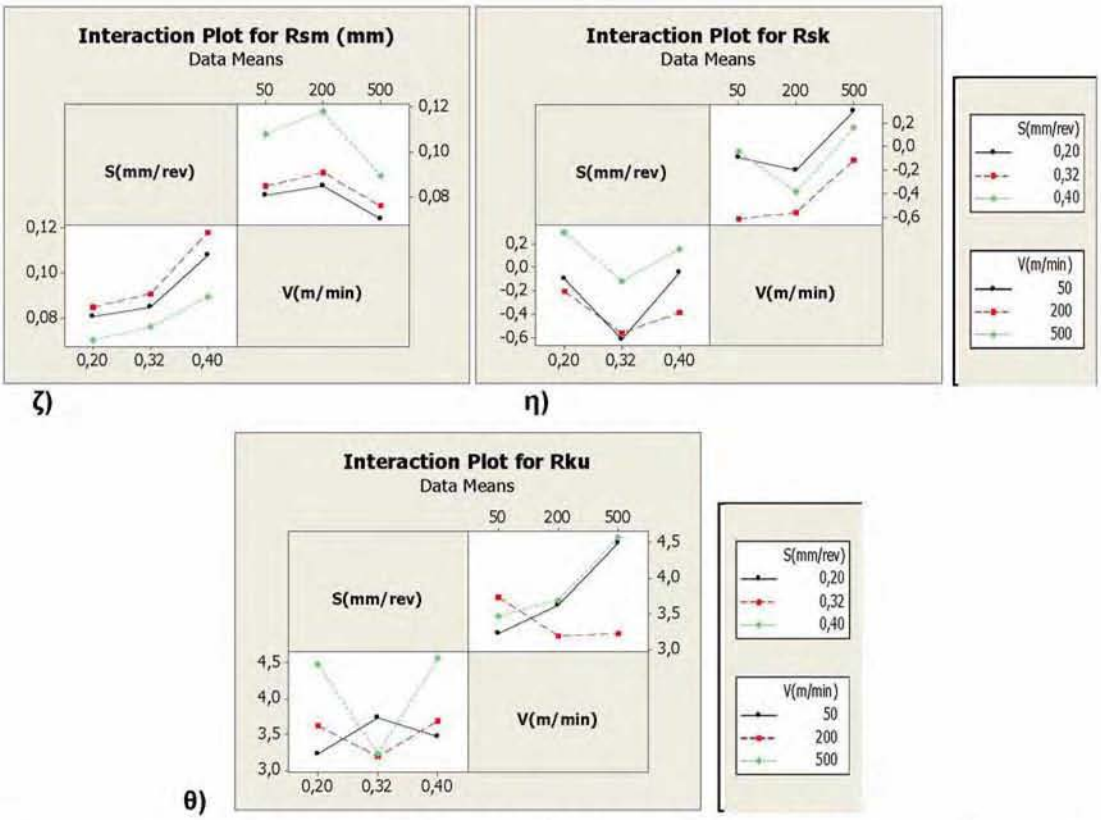
8.3.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι παράγοντες συνδυάζονται για να επηρεάσουν τις εξαρτημένες μεταβλητές (κεφ.5.4). Τα διαγράμματα κατασκευάζονται από τις τιμές των μετρήσεων του πειραματικού χώρου (Πίνακας 8.7).



Σχήμα 8.4: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη F_x(N), β)Δύναμη F_y(N).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 8.4 (συνέχεια): Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για τις αποκρίσεις: γ)Αξονική δύναμη F_z(N), δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm), ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο ύψος R_t(μm), ζ)Μέσο διάστημα κορυφών R_{sm}(mm), η)Λοξότητα R_{sk}, θ)Κυρτότητα R_{ku}.

Είναι εμφανές από τα παραπάνω διαγράμματα, ότι οι γραμμές έχουν έντονη τάση να διασταυρωθούν σε προέκτασή τους στο χώρο, κυρίως για τις δυνάμεις κοπής αλλά και για τις παραμέτρους της τραχύτητας R_a και R_t. Μικρότερη τάση να διασταυρωθούν έχουν στην περίπτωση των παραμέτρων R_z, R_{sm} και R_{sk}, ενώ όσον αφορά την λοξότητα R_{ku}, η τάση των γραμμών εναλλάσσεται από έντονη απόκλιση σε διασταύρωση μεταξύ τους, δυσχεραίνοντας την διεξαγωγή συμπερασμάτων. Σε κάθε περίπτωση, η αλληλεπίδραση των παραγόντων θα συμπεριληφθεί στη συνέχεια, στην διαμόρφωση των μοντέλων προσαρμογής, καθώς φαίνεται να αφορά το σύνολο των παραμέτρων (κεφ.5.5.1).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

8.3.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων

8.3.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα

Με αρχικό μαθηματικό μοντέλο το πλήρες τετραγωνικό (Full Quadratic) (σχέση 5.8) και τα πειραματικά δεδομένα του πίνακα 8.7, πραγματοποιώντας τη στατιστική ανάλυση σύμφωνα με την θεωρία του πειραματικού σχεδιασμού (Κεφάλαιο 5), κατασκευάζονται τα στοχαστικά μοντέλα των εξαρτημένων μεταβλητών. Στην συνέχεια και μέσω της ανάλυσης διακύμανσης ANOVA, πραγματοποιείται ο έλεγχος των μοντέλων ως προς τη στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών τους και επαναπροσδιορίζονται στις περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαίο (διαγραφή όρων όταν το p-value είναι μικρότερο του 0,05) (κεφ.5.5.5). Σκοπός είναι πάντα, η απλοποίηση των στοχαστικών μοντέλων χωρίς την μείωση της προσεγγιστικής τους ικανότητας, διατηρώντας τους συντελεστές προσαρμογής R^2 και R^2(adj) σε υψηλά επίπεδα. Οι τελικές αναλύσεις διακύμανσης *ANOVA* και τα αντίστοιχα απλοποιημένα στοχαστικά μοντέλα για όλες τις αποκρίσεις παρουσιάζονται ακολούθως:

Πίνακας 8.9: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης F_x(N).

Analysis of Variance for Fx (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	1401,08	69,50	1401,08	72,63	0,001	63,08%
V(m/min)	1	460,92	52,88	460,92	23,89	0,008	20,75%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	182,75	182,75	182,75	9,47	0,037	8,22%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	176,42	176,42	176,42	9,15	0,039	7,95%
Error	4	77,16	77,16	19,29			
Total	8	2298,34					

S = 4,39206 R-Sq = 96,64% R-Sq(adj) = 93,29%

Πίνακας 8.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης F_y(N).

Analysis of Variance for Fy (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	2769,47	83,76	2769,47	140,31	0,000	70,50%
V(m/min)	1	724,42	38,12	724,42	36,70	0,004	18,44%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	249,11	249,11	249,11	12,62	0,024	6,34%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	185,11	185,11	185,11	9,38	0,038	4,71%
Error	4	78,95	78,95	19,74			
Total	8	4007,06					

S = 4,44272 R-Sq = 98,03% R-Sq(adj) = 96,06%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 8.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου της αξονικής δύναμης F_z(N).

Analysis of Variance for Fz (N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	547,01	9,44	547,01	369,42	0,000	80,33%
V(m/min)	1	88,78	1,00	88,78	59,95	0,001	13,04%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	32,50	32,50	32,50	21,95	0,009	4,77%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	12,67	12,67	12,67	8,55	0,043	1,86%
Error	4	5,92	5,92	1,48			
Total	8	686,88					

S = 1,21685 R-Sq = 99,14% R-Sq(adj) = 98,28%

Πίνακας 8.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm).

Analysis of Variance for Ra (μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,035849	0,022230	0,035849	285,54	0,000	44,83%
V(m/min)	1	0,038553	0,002760	0,038553	307,07	0,000	48,21%
V(m/min)*V(m/min)	1	0,003584	0,003584	0,003584	28,55	0,006	4,48%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	0,001983	0,001983	0,001983	15,80	0,016	2,48%
Error	4	0,000502	0,000502	0,000126			
Total	8	0,080472					

S = 0,0112049 R-Sq = 99,38% R-Sq(adj) = 98,75%

Πίνακας 8.13: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του ύψους δέκα σημείων R_z(μm).

Analysis of Variance for Rz (μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	2,9327	0,5551	2,9327	495,61	0,000	66,03%
V(m/min)	1	0,6879	0,6879	0,6879	116,25	0,000	15,49%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,8208	0,8208	0,8208	138,71	0,000	18,48%
Error	5	0,0296	0,0296	0,0059			
Total	8	4,4710					

S = 0,0769247 R-Sq = 99,34% R-Sq(adj) = 98,94%

Πίνακας 8.14: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του μέγιστου ύψους R_t(μm).

Analysis of Variance for Rt (μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	2,9053	0,0575	2,9053	72,12	0,001	47,69%
V(m/min)	1	2,4185	0,0898	2,4185	60,04	0,001	39,70%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,2392	0,2392	0,2392	5,94	0,071	3,93%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	0,5286	0,5286	0,5286	13,12	0,022	8,68%
Error	4	0,1611	0,1611	0,0403			
Total	8	6,2527					

S = 0,200710 R-Sq = 97,42% R-Sq(adj) = 94,85%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 8.15: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του μέσου διαστήματος κορυφών R_{sm}(μm).

Analysis of Variance for Rsm (mm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,0009538	0,0001451	0,0009538	58,05	0,002	54,61%
V(m/min)	1	0,0003439	0,0001254	0,0003439	20,93	0,010	19,69%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,0002233	0,0002233	0,0002233	13,59	0,021	12,78%
V(m/min)*V(m/min)	1	0,0002256	0,0002256	0,0002256	13,73	0,021	12,92%
Error	4	0,0000657	0,0000657	0,0000164			
Total	8	0,0018124					

S = 0,00405348 R-Sq = 96,37% R-Sq(adj) = 92,75%

Πίνακας 8.16: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Λοξότητας R_{sk}.

Analysis of Variance for Rsk, using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,02967	0,29446	0,02967	2,78	0,171	4,20%
V(m/min)	1	0,27343	0,06054	0,27343	25,60	0,007	38,65%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,27991	0,27991	0,27991	26,21	0,007	39,57%
V(m/min)*V(m/min)	1	0,12431	0,12431	0,12431	11,64	0,027	17,58%
Error	4	0,04272	0,04272	0,01068			
Total	8	0,75006					

S = 0,103350 R-Sq = 94,30% R-Sq(adj) = 88,61%

Πίνακας 8.17: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της Κυρτότητας R_{ku}.

Analysis of Variance for Rku, using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,0069	0,3963	0,0069	0,02	0,890	0,51%
V(m/min)	1	0,6664	0,0007	0,6664	2,16	0,238	54,96%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,4436	0,4436	0,4436	1,44	0,317	36,64%
V(m/min)*V(m/min)	1	0,0638	0,0638	0,0638	0,21	0,680	5,34%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	0,0305	0,0305	0,0305	0,10	0,774	2,54%
Error	3	0,9261	0,9261	0,3087			
Total	8	2,1373					

S = 0,555608 R-Sq = 56,67% R-Sq(adj) = 0,00%

Τα αντίστοιχα στοχαστικά μοντέλα των εξαρτημένων μεταβλητών είναι τα ακόλουθα:

$$F_x = 91,46 - 371,3\,S + 5,005\,10^{-2}\,V + 1002,4\,S^2 - 28,793\,10^{-2}\,S\,V \quad (8.4)$$

$$F_y = 113,1 - 407,6\,S + 4,249\,10^{-2}\,V + 1170,3\,S^2 - 29,494\,10^{-2}\,S\,V \quad (8.5)$$

$$F_z = 23,269 - 136,81\,S + 6,871\,10^{-3}\,V + 422,69\,S^2 - 7,715\,10^{-2}\,S\,V \quad (8.6)$$

$$R_a = 72,048\,10^{-2} + 1,009\,S - 6,01\,10^{-4}\,V + 0,1\,10^{-5}\,V^2 - 9,65\,10^{-4}\,S\,V \quad (8.7)$$

$$R_z = 9,945 - 32,936\,S - 1,478\,10^{-3}\,V + 67,176\,S^2 \quad (8.8)$$

$$R_t = 8,064 - 10,675\,S + 2,062\,10^{-3}\,V + 36,26\,S^2 - 1,576\,10^{-2}\,S\,V \quad (8.9)$$

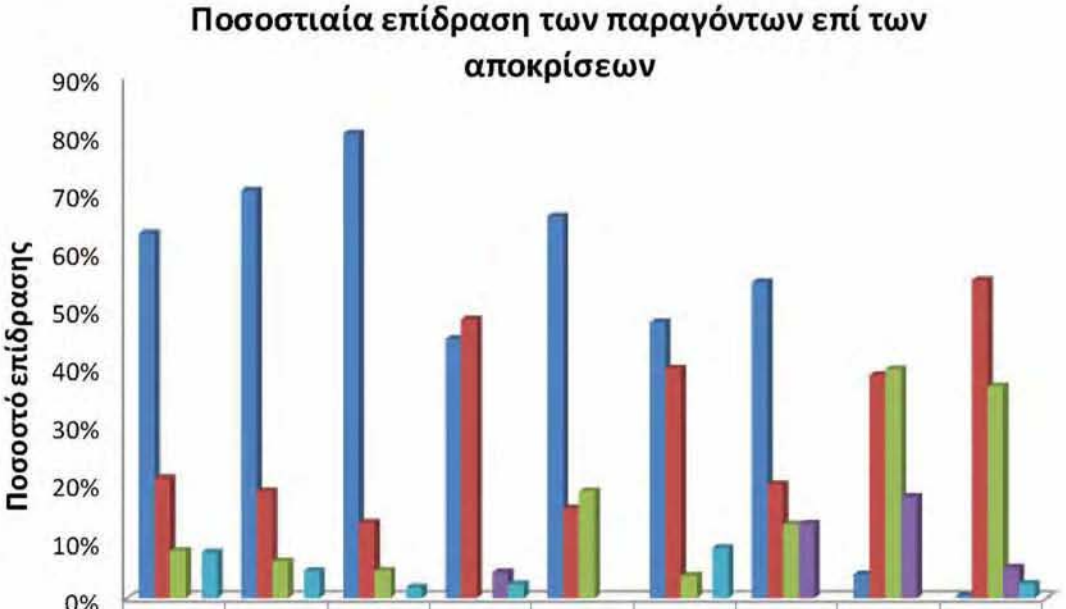
$$R_{sm} = 0,138 - 53,25\,10^{-2}\,S + 1,04\,10^{-4}\,V + 1,108\,S^2 - 2,4\,10^{-7}\,V^2 \quad (8.10)$$

$$R_{sk} = 3,254 - 23,988\,S - 2,292\,10^{-3}\,V + 39,229\,S^2 + 0,6\,10^{-5}\,V^2 \quad (8.11)$$

$$R_{ku} = 7,131 - 28,04\,S + 3,06\,10^{-4}\,V + 49,39\,S^2 + 0,4\,10^{-5}\,V^2 - 3,78\,10^{-3}\,S\,V \quad (8.12)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Η επί τοις εκατό ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων κάθε στοχαστικού μοντέλου και για κάθε απόκριση, δίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα-διάγραμμα:



	Fx	Fy	Fz	Ra	Rz	Rt	Rsm	Rsk	Rku
S	63,08%	70,50%	80,33%	44,83%	66,03%	47,69%	54,61%	4,20%	0,51%
V	20,75%	18,44%	13,04%	48,21%	15,49%	39,70%	19,69%	38,65%	54,96%
S S	8,22%	6,34%	4,77%		18,48%	3,93%	12,78%	39,57%	36,64%
V V				4,48%			12,92%	17,58%	5,34%
S V	7,95%	4,71%	1,86%	2,48%		8,68%			2,54%

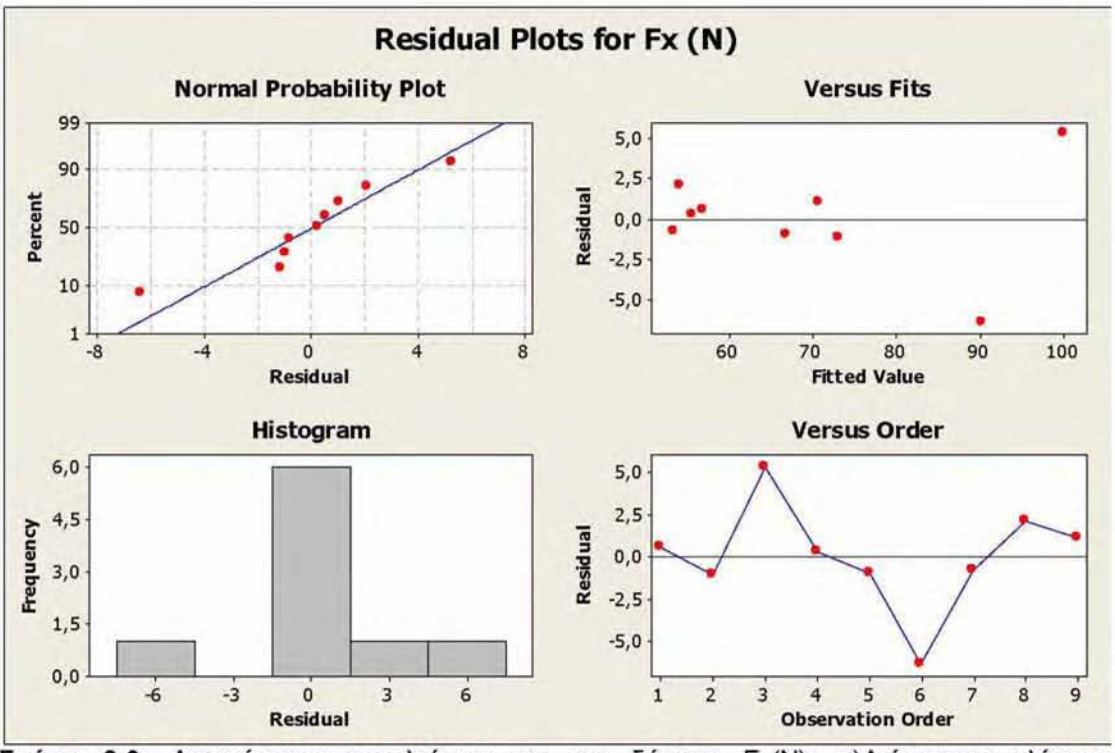
Σχήμα 8.5: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις αποκρίσεις.

Στο Σχήμα 8.5 διακρίνεται ότι οι δυνάμεις κοπής καθώς και οι παράμετροι τραχύτητας R_z και R_{sm}, επηρεάζονται σημαντικά από την πρόωση (S) και πολύ λιγότερο από την ταχύτητα κοπής (V). Αντίθετα οι υπόλοιποι παράμετροι τραχύτητας φαίνεται να επηρεάζονται ιδιαίτερα από την ταχύτητα κοπής, με χαρακτηριστικό παράδειγμα την R_a όπου η επίδραση της ταχύτητας ξεπερνά αυτή της πρόωσης (ποσοστό 48,21% έναντι 44,83%), αλλά και τις στατιστικές παραμέτρους R_{sk} και R_{ku}, όπου η πρόωση δείχνει να έχει ελάχιστη επιρροή. Τέλος, αρκετά υψηλή είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων, με το μεγαλύτερο ποσοστό να διαμορφώνεται για την δύναμη F_x και την παράμετρο R_t με 7,95% και 8,68% αντίστοιχα. Όσον αφορά την κυρτότητα R_{ku}, πρέπει να επισημανθεί ότι το μοντέλο προσαρμογής της έχει πολύ μικρό συντελεστή προσδιορισμού (R^2=56,67%, Πίνακας 8.17, κεφ.5.5.4).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

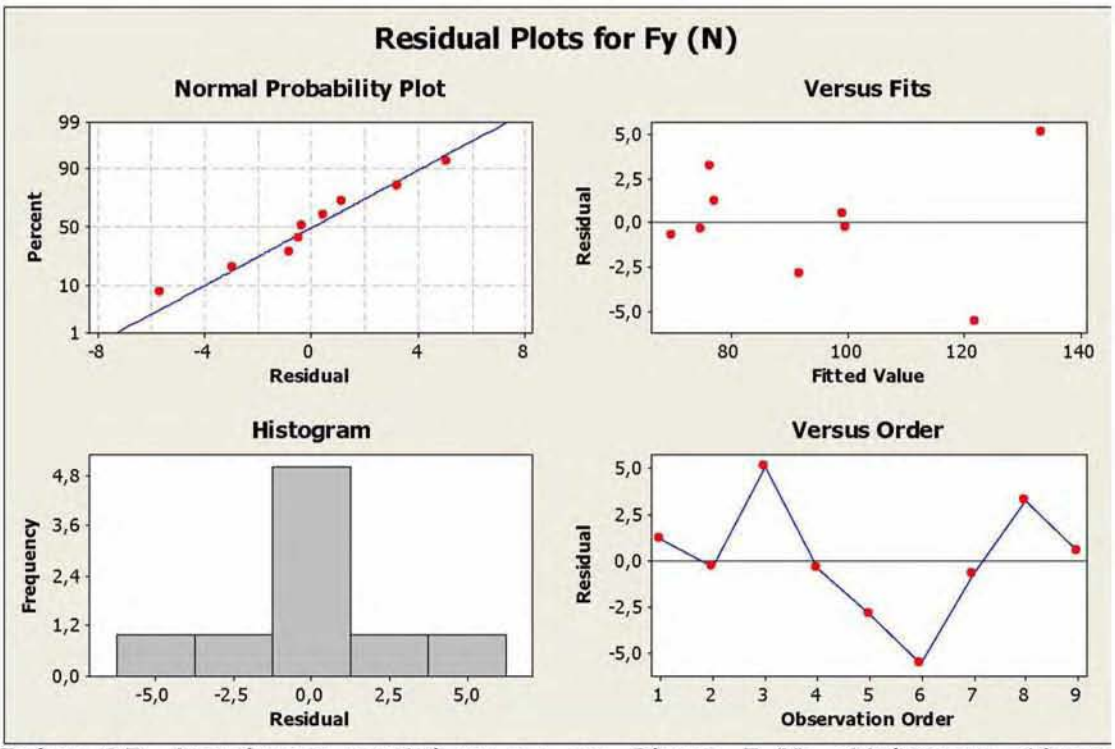
8.3.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων

Μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων πραγματοποιείται ο έλεγχος των υποθέσεων ισχύς των μοντέλων, δηλαδή, αν ικανοποιούνται οι απαραίτητες συνθήκες έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατιστική συμπερασματολογία (κεφ.5.5.6). Όλα τα κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τις δυνάμεις κοπής και τις παραμέτρους τραχύτητας, δίνονται στους πίνακες Β5-Β13 του παραρτήματος Β, από τα οποία, κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

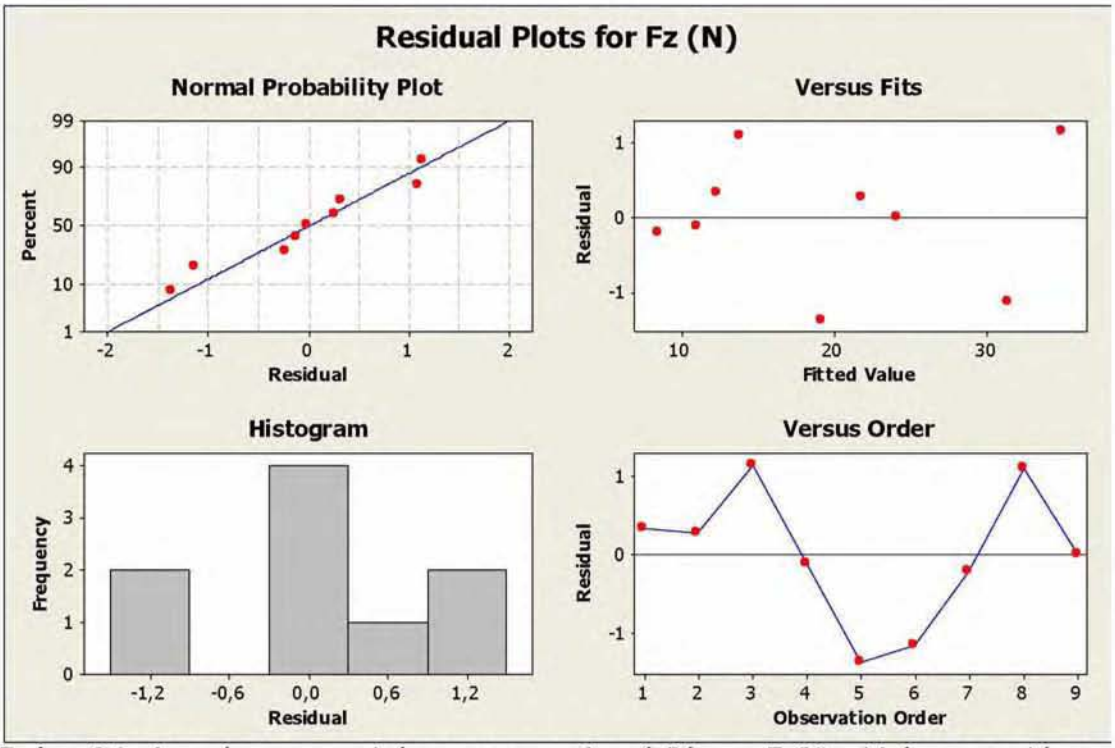


Σχήμα 8.6: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη $F_X(N)$: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

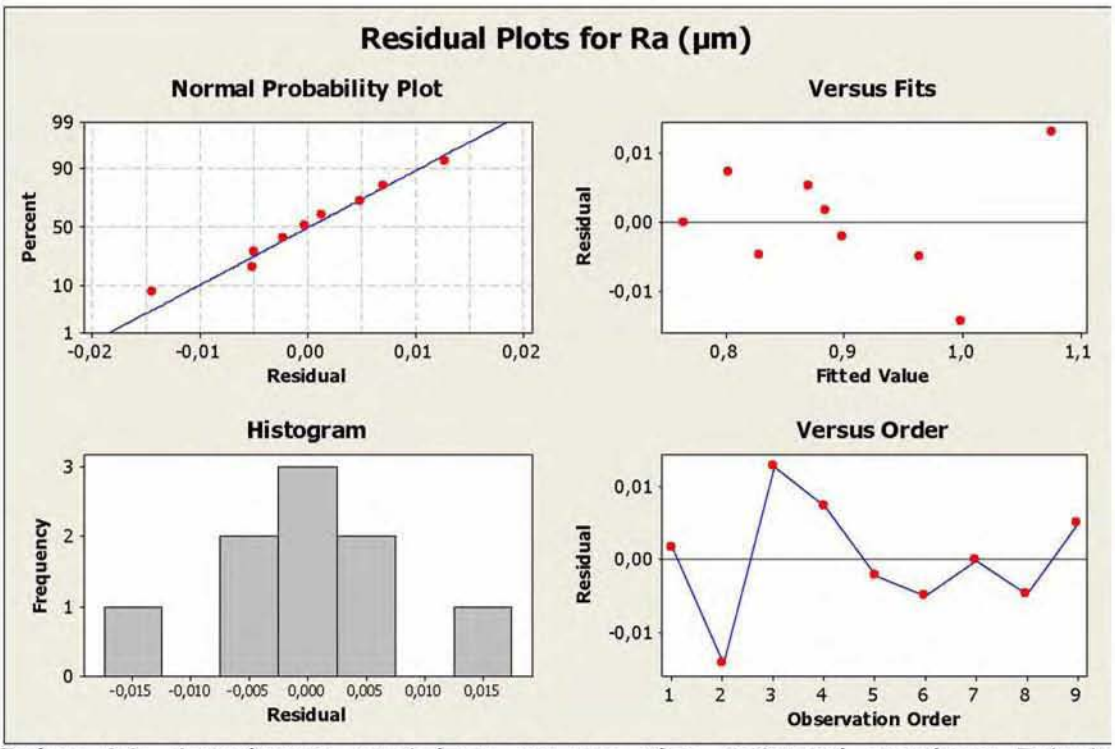


Σχήμα 8.7: Διαγράμματα καταλοίπων για την δύναμη F_Y(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

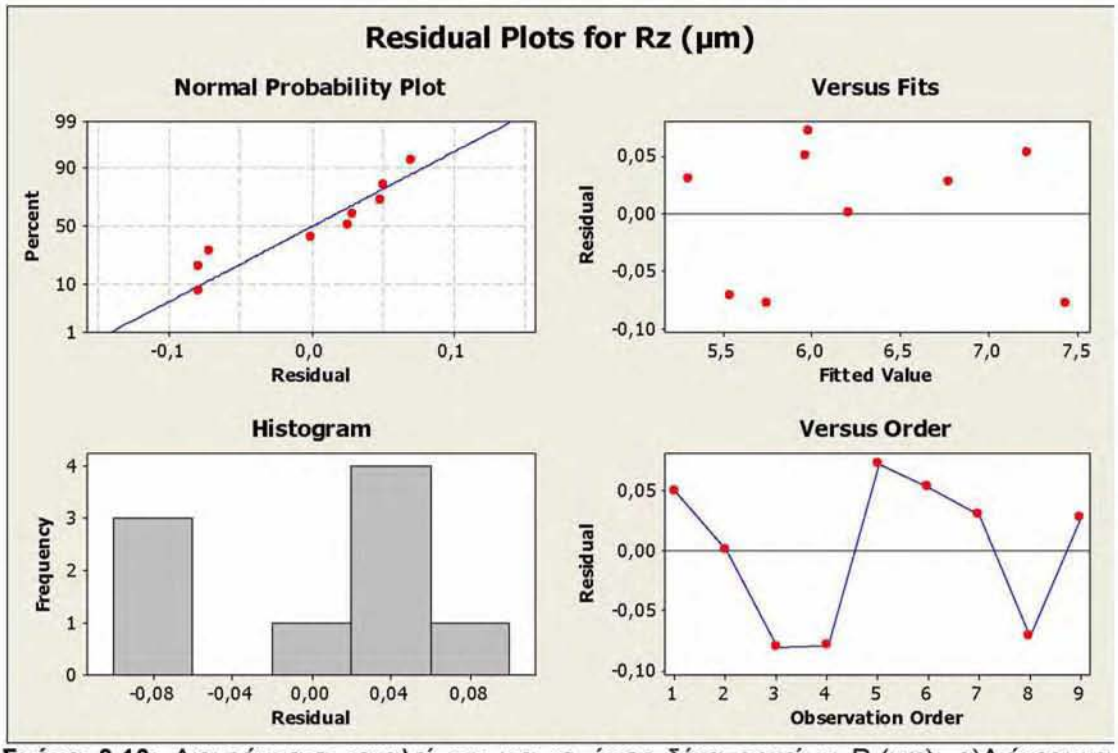


Σχήμα 8.8: Διαγράμματα καταλοίπων για την αξονική δύναμη F_Z(N): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

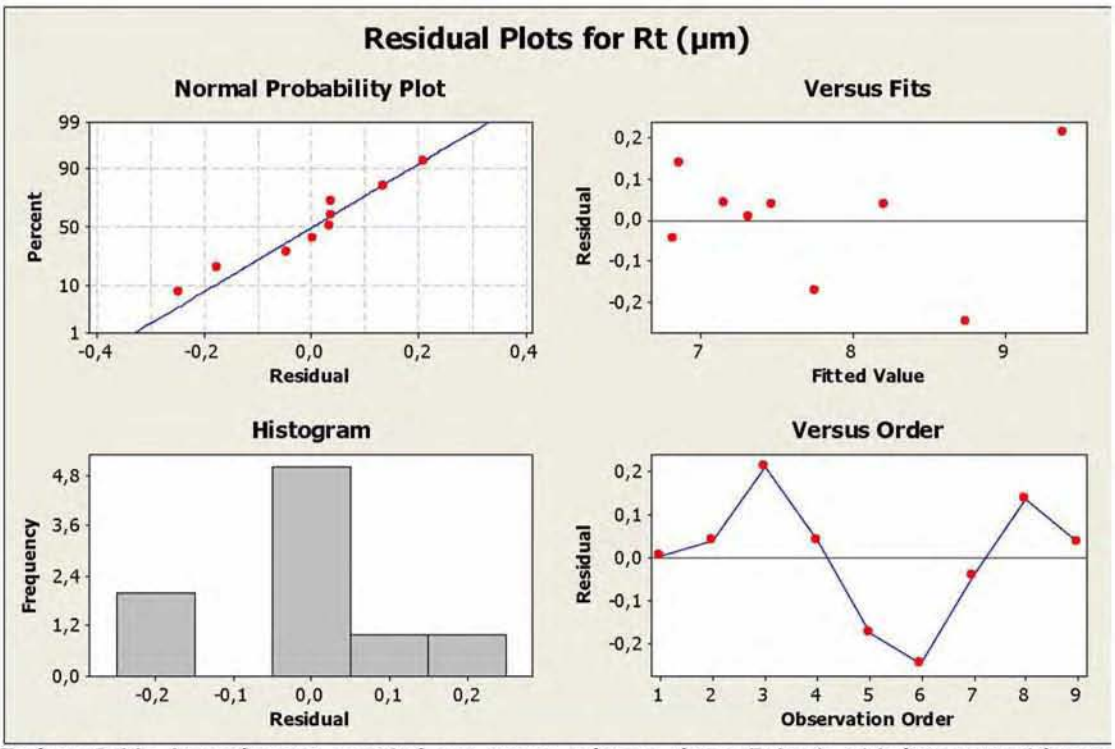


Σχήμα 8.9: Διαγράμματα καταλοίπων για την μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

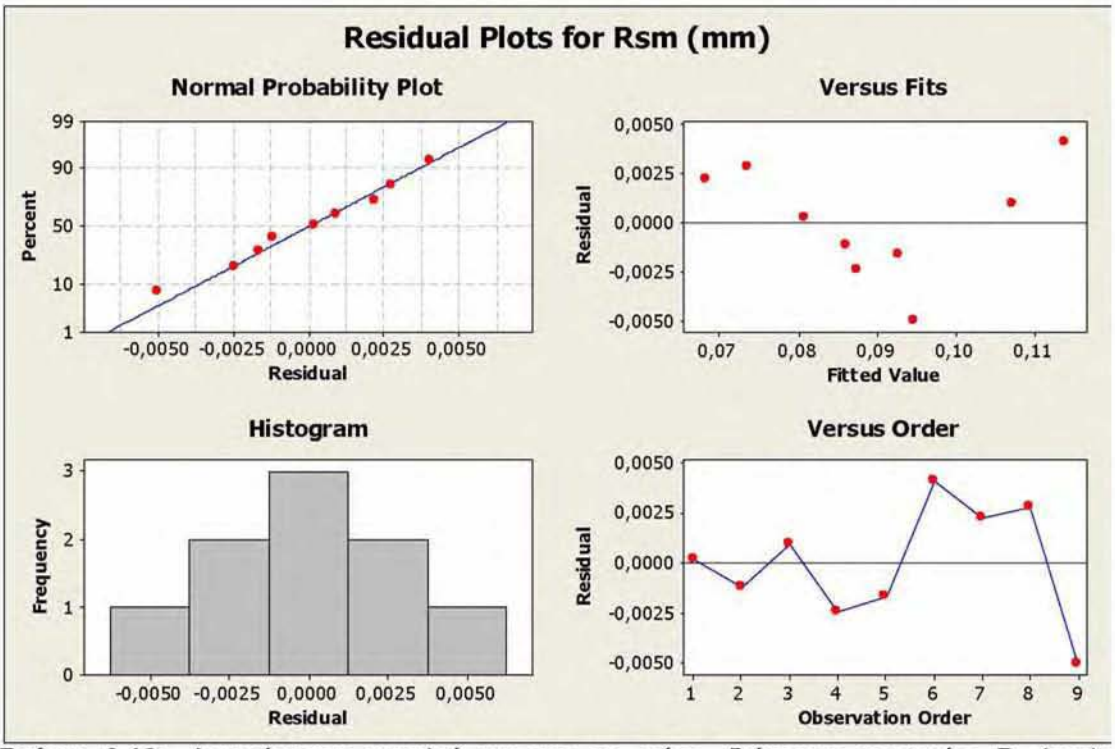


Σχήμα 8.10: Διαγράμματα καταλοίπων για το ύψος δέκα σημείων R_z(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

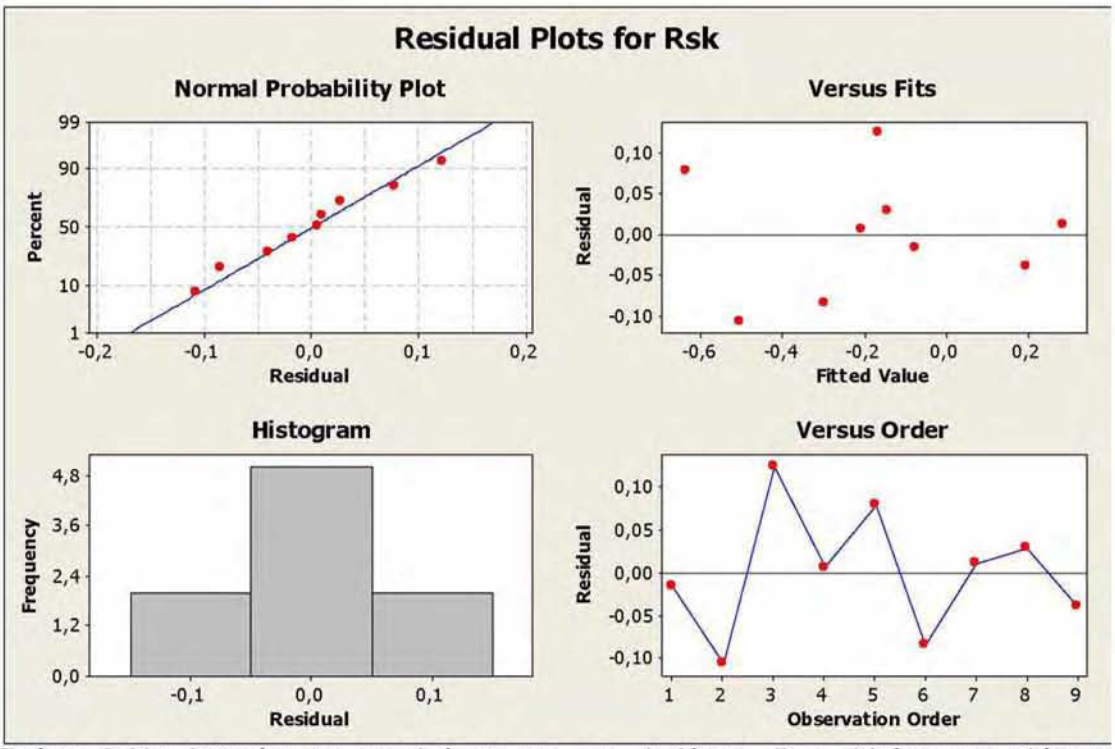


Σχήμα 8.11: Διαγράμματα καταλοίπων για το μέγιστο ύψος R_t(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

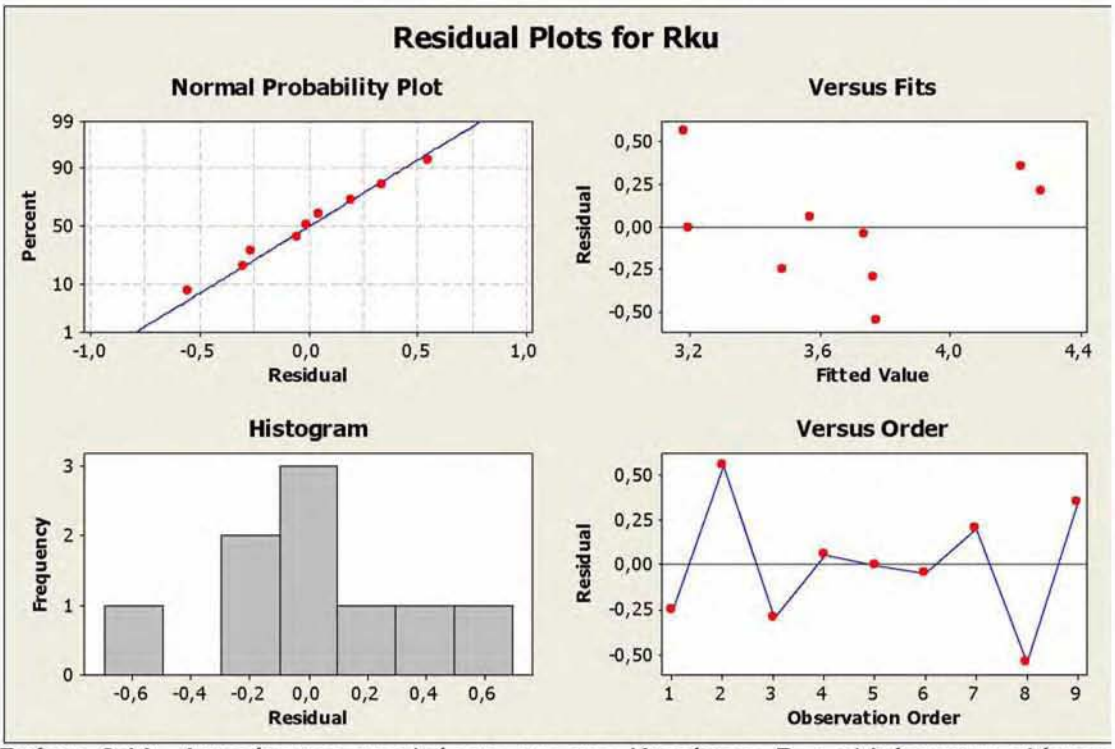


Σχήμα 8.12: Διαγράμματα καταλοίπων για το μέσο διάστημα κορυφών R_{sm}(mm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 8.13: Διαγράμματα καταλοίπων για την Λοξότητα R_{sk}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

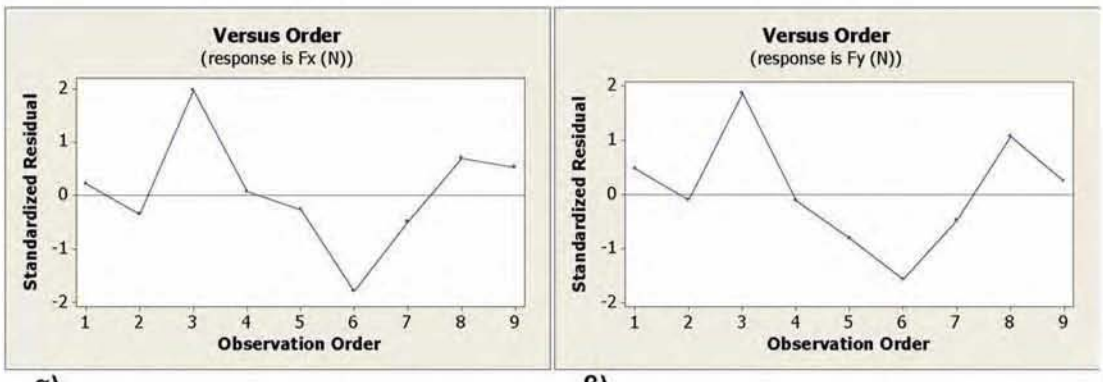


Σχήμα 8.14: Διαγράμματα καταλοίπων για την Κυρτότητα R_{ku}: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τα διαγράμματα ελέγχου κανονικότητας 8.5α-8.13α, φανερώνουν πως τα κατάλοιπα των μοντέλων ακολουθούν την κανονική κατανομή, καθώς, εκτός από λίγες τιμές αυτών, κινούνται πολύ κοντά στη κεντρική γραμμή σε κάθε περίπτωση (κεφ.5.5.6). Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγούν και τα ιστογράμματα των συχνοτήτων των καταλοίπων 8.5γ-8.13γ, από όπου διακρίνεται γραφικά η κανονικότητα αυτών. Παρατηρώντας, επίσης, τα διαγράμματα των καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές 8.5β-8.13β και ως προς τη σειρά παρατήρησης 8.5δ-8.13δ, εξάγεται το συμπέρασμα ότι τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους για κάθε καταρτισμένο μοντέλο, καθώς εμφανίζονται τυχαιοποιημένα σε όλο το εύρος των τιμών, χωρίς να ακολουθούν κάποια καθορισμένη τάση (κεφ.5.5.6). Τα σημεία σε γενικές γραμμές ισαπέχουν εκατέρωθεν της κεντρικής γραμμής στο σημείο 0 σε όλο το μήκος της, εξασφαλίζοντας ότι η διασπορά τους παραμένει σταθερή σε κάθε περίπτωση. Τέλος, από τους πίνακες Β5-Β13 του παραρτήματος Β και τα παρακάτω διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων (Σχήμα 8.), διακρίνεται ότι, σε καμία περίπτωση δεν υπάρχουν «ασυνήθιστες» ή έκτροπες παρατηρήσεις, γεγονός που διασφαλίζει την εγκυρότητα των πειραματικών μετρήσεων και των μοντέλων, καθώς και τη σταθερότητα της διακύμανσης των καταλοίπων.

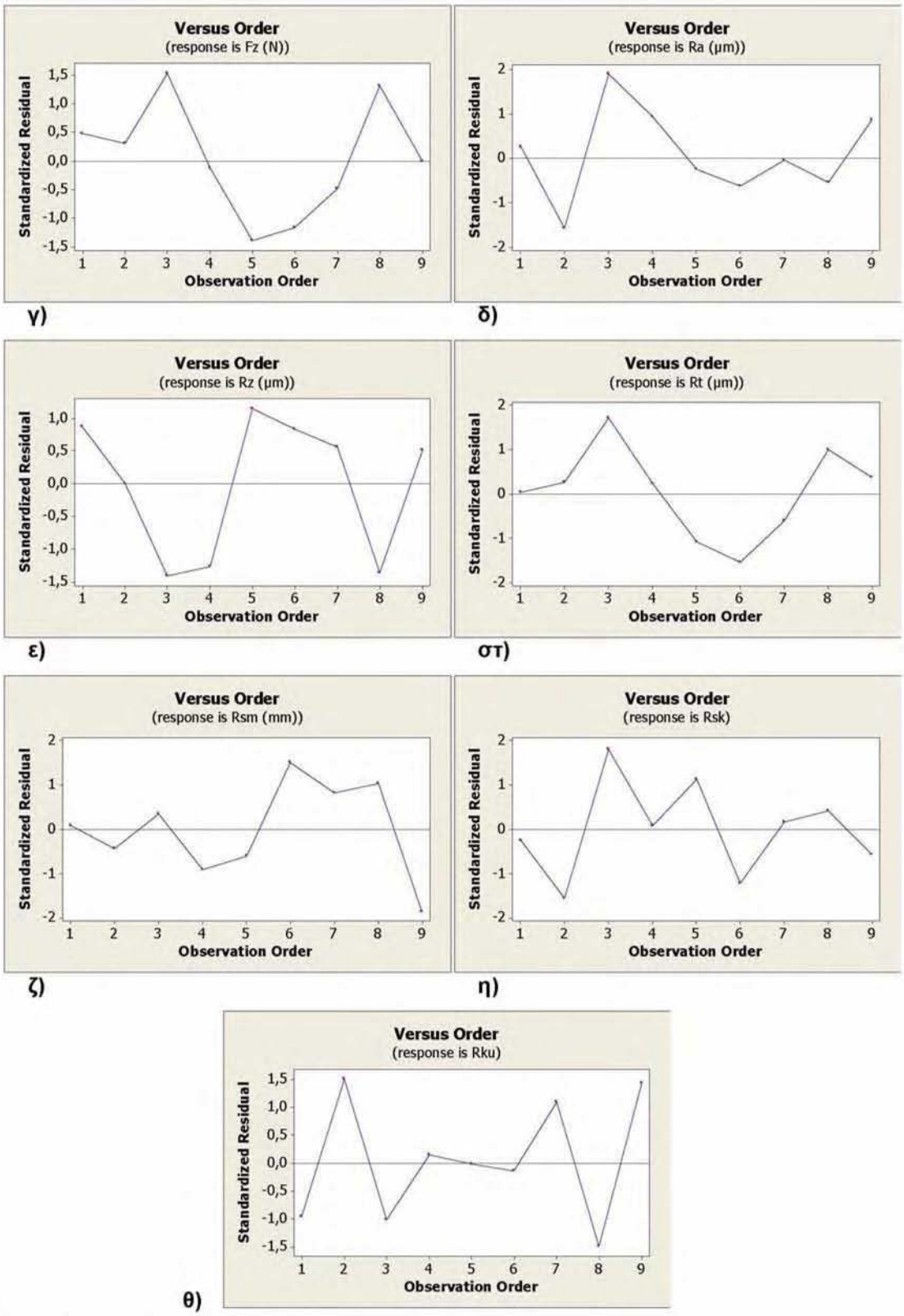
Με τα διαγράμματα των καταλοίπων αποδείχθηκε ότι, ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ισχύς των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων 8.1 - 8.9, γεγονός που τα καθιστά αξιόπιστα για στατιστική συμπερασματολογία και πρόβλεψη τιμών.



α) β)

Σχήμα 8.15: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των αποκρίσεων ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Δύναμη F_X(N), β)Δύναμη F_Y(N).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 8.15 (συνέχεια): Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των αποκρίσεων ως προς τη σειρά παρατήρησης: γ)Αξονική δύναμη F_Z(N), δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a, ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο ύψος R_t, ζ)Μέσο διάστημα κορυφών R_{sm}, η)Λοξότητα R_{sk}, θ)Κυρτότητα R_{ku}.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

8.3.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces

Μέσω των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων (σχέσεις 8.1 – 8.9) και καθώς διασφαλίστηκε η αξιοπιστία τους μέσω των διαγραμμάτων των καταλοίπων, κατασκευάζονται οι επιφάνειες προσαρμογής αυτών, με τις οποίες απεικονίζεται γραφικά και σε τρισδιάστατο γράφημα η συμπεριφορά των εξαρτημένων μεταβλητών ως προς τους δυο ανεξάρτητους παράγοντες ταυτόχρονα, την πρόωση S(mm/rev) και την ταχύτητα κοπής V(m/min) (κεφ.5.5.7). Οι επιφάνειες προσαρμογής παρουσιάζονται στο παράρτημα Β σε αντιπαραβολή με τα τρισδιάστατα διαγράμματα των δεδομένων των πειραματικών μετρήσεων (Σχήματα Β1 – Β18), ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση μεταξύ τους. Η σαφής ομοιότητά τους στις περισσότερες περιπτώσεις, αποτελεί ακόμα μία απόδειξη τις υψηλής συσχέτισης και προσεγγιστικής ικανότητας των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

8.4 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση

8.4.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση με μαθηματικά μοντέλα (στοχαστικά), των βασικών παραγόντων κοπής (πρόωση και ταχύτητα κοπής), με βασικές αποκρίσεις (δυνάμεις κοπής, παράμετροι τραχύτητας) κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30, μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης και των μαθηματικών μεθόδων προσαρμογής (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Η προσαρμογή που επιτεύχθηκε για τα καταρτισμένα μοντέλα είναι αρκετά υψηλή (ο συντελεστής προσδιορισμού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι υψηλότερος του 96%), γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα ως προς την χρησιμοποίησή τους για μελλοντική πρόβλεψη τιμών των αποκρίσεων, στο εύρος τιμών των παραγόντων κατά το οποίο έχουν ισχύ (εύρος τιμών των παραγόντων όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα στη φραίζα).

Επίσης, αποδείχτηκε μέσω στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων (πίνακες ανάλυσης διακύμανσης), ότι σημαντικότερος παράγοντας για την συγκεκριμένη κατεργασία είναι η πρόωση, με τα ποσοστά επιρροής στα μετρούμενα μεγέθη να ανέρχονται σε πολλές περιπτώσεις πάνω από 60%. Η αύξησή της επιφέρει αύξηση στις τιμές των αποκρίσεων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την εκτέλεση της κοπής, σε όσο το δυνατό χαμηλότερες τιμές αυτής. Η ταχύτητα κοπής έχει ποσοστά επιρροής που αγγίζουν το 20% στις περισσότερες περιπτώσεις και αντίθετα από την πρόωση, η αύξησή της επιφέρει μείωση στις τιμές των μετρούμενων μεγεθών. Παρόλο που τα ποσοστά επιρροής της ταχύτητας κοπής υπολείπονται σημαντικά τα αντίστοιχα της πρόωσης, λαμβάνοντας υψηλές τιμές καθιστά τις συνθήκες κοπής ευνοϊκότερες βελτιώνοντας το αποτέλεσμα της διεργασίας. Αποδείχτηκε, επίσης, μέσω της στατιστικής ανάλυσης ότι οι εξεταζόμενοι παράγοντες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν τις τιμές των αποκρίσεων σε ποσοστά που σε κάποιες περιπτώσεις ανέρχονται ακόμα και κοντά στο 8%.

Συνοψίζοντας, παρατίθενται σε πίνακα τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα και ο συντελεστής προσδιορισμού του καθενός, για τις δυνάμεις κοπής και τις παραμέτρους της τραχύτητας:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 8.18: Τα στοχαστικά μοντέλα των αποκρίσεων.

Απόκριση	Στοχαστικό μοντέλο	Συντελεστής Προσδιορισμού
F_x (N)	$Y = 91,46 - 371,3\ X_1 - 5,005\ 10^{-2}\ X_2 + 1002,4\ X_1^2 - 28,793\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	96,64%
F_y (N)	$Y = 113,1 - 407,6\ X_1 + 4,249\ 10^{-2}\ X_2 + 1170,3\ X_1^2 - 29,494\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	98,03%
F_z (N)	$Y = 23,269 - 136,81\ X_1 + 6,871\ 10^{-3}\ X_2 + 422,69\ X_1^2 - 7,715\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	99,14%
R_a (μm)	$Y = 72,048\ 10^{-2} + 1,009\ X_1 - 6,01\ 10^{-4}\ X_2 + 0,1\ 10^{-5}\ X_2^2 - 9,65\ 10^{-4}\ X_1\ X_2$	99,38%
R_z (μm)	$Y = 9,945 - 32,936\ X_1 - 1,478\ 10^{-3}\ X_2 + 67,176\ X_1^2$	99,34%
R_t (μm)	$Y = 8,064 - 10,675\ X_1 + 2,062\ 10^{-3}\ X_2 + 36,26\ X_1^2 - 1,576\ 10^{-2}\ X_1\ X_2$	97,42%
R_{sm} (mm)	$Y = 0,138 - 53,25\ 10^{-2}\ X_1 + 1,04\ 10^{-4}\ X_2 + 1,108\ X_1^2 - 2,4\ 10^{-7}\ X_2^2$	96,37%
R_{sk}	$Y = 3,254 - 23,988\ X_1 - 2,292\ 10^{-3}\ X_2 + 39,229\ X_1^2 + 0,6\ 10^{-5}\ X_2^2$	94,30%
R_{ku}	$Y = 7,131 - 28,04\ X_1 + 3,06\ 10^{-4}\ X_2 + 49,39\ X_1^2 + 0,4\ 10^{-5}\ X_2^2 - 3,78\ 10^{-3}\ X_1\ X_2$	56,67%

Όπου: *Y η απόκριση*
X_1 *η πρόωση σε* mm/rev
X_2 *η ταχύτητα κοπής* m/min

Η επί τοις εκατό ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων κάθε στοχαστικού μοντέλου και για κάθε απόκριση, δίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 8.19: Ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων και της αλληλεπίδρασης αυτών στις αποκρίσεις.

Απόκριση	Επίδραση S (%)	Επίδραση V (%)	Επίδραση SV (%)
F_x (N)	*63,08%*	*20,75%*	*7,95%*
F_y (N)	*70,50%*	*18,44%*	*4,71%*
F_z (N)	*80,33%*	*13,04%*	*1,86%*
R_a (μm)	*44,83%*	*48,21%*	*2,48%*
R_z (μm)	*66,03%*	*15,49%*	-
R_t (μm)	*47,69%*	*39,70%*	*8,68%*
R_{sm} (mm)	*54,61%*	*19,69%*	-
R_{sk}	*4,20%*	*38,65%*	-
R_{ku}	*0,51%*	*54,96%*	*2,54%*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

8.4.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας

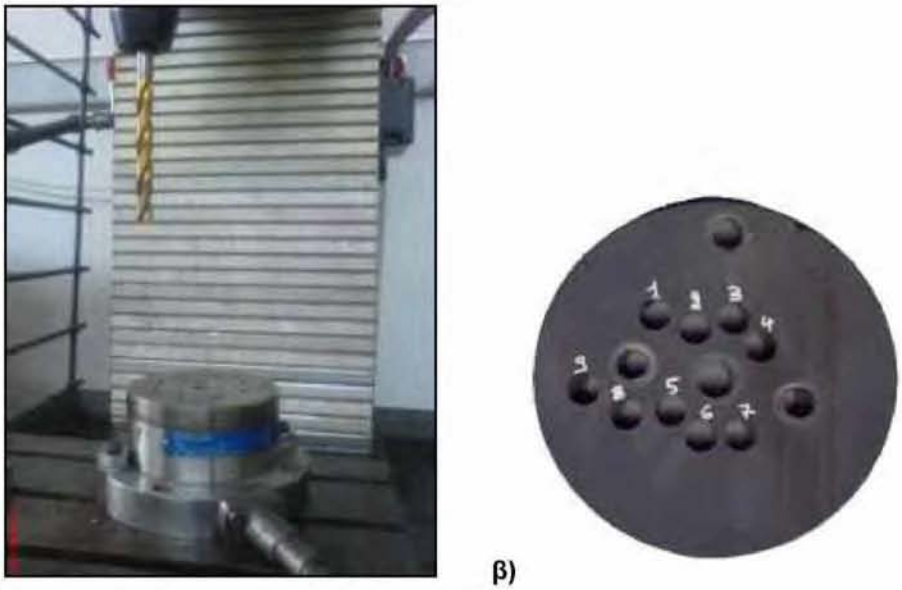
Οι χαρακτηριστικές καμπύλες αποτελούν διαγράμματα των αποκρίσεων συναρτήσει του χρόνου κοπής του τεμαχίου (Σχέση 3.3), και κατασκευάζονται αναπτύσσοντας τα στοχαστικά μοντέλα σε ενδιάμεσες τιμές των επιπέδων των παραγόντων, μέσα πάντα στο εύρος τιμών ισχύς των μοντέλων (εύρος τιμών των παραγόντων των πειραμάτων στη φραίζα, Πίνακας 8.3). Τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων, συντελούν στην βέλτιστη επιλογή του συνδυασμού τιμών των παραγόντων για την πραγματοποίηση μιας κατεργασίας, με βάση το χρόνο κοπής και τις επιθυμητές τιμές των αποκρίσεων, ικανοποιώντας τις εκάστοτε παραγωγικές και σχεδιαστικές απαιτήσεις. Στο παράρτημα Β (Σχήματα Β19-Β26) δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες για όλες τις αποκρίσεις που μελετήθηκαν από τα πειράματα στη φραίζα, του ενισχυμένου πλαστικού PA66-GF30 (σχέσεις 8.1 – 8.9).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 9: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

9.1 Πειραματική διάταξη

Τα πειράματα της διάτρησης εκτελέστηκαν στο εργαστήριο Μηχανουργικών Κατεργασιών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Το δράπανο που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο 1B-35-P της Ισπανικής εταιρίας Ibarmia. Είναι τύπου ορθοστάτη, έχει αυτόματη πρόωση και βρισκόταν σε άψογη λειτουργική κατάσταση (κεφ.6.3.1).



Σχήμα 9.1: α)Διάταξη δραπάνου-δυναμομέτρου β)Κατεργασμένο δοκίμιο και οπές πειραμάτων (οι οπές χωρίς αρίθμηση χρησιμεύουν για την στήριξη του δοκιμίου στο δυναμόμετρο).

Για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της διάτρησης χρησιμοποιήθηκαν κυλινδρικά δοκίμια ενισχυμένου πολυμερούς Ertalon66-GF30 (PA66-GF30), διαμέτρου 150mm και μήκους 50mm (κεφ.6.4). Τα δοκίμια προσδένονταν με κοχλίες σταθερά επάνω στο δυναμόμετρο, το οποίο είναι στερεωμένο ακλόνητα στην τράπεζα του δραπάνου με κατάλληλους κοχλίες και σφιγκτήρες. Ανάμεσά τους παρεμβάλλονταν αποστάτες για την διατήρηση των δοκιμίων σε απόσταση ασφαλείας από το δυναμόμετρο, ώστε να αποφευχθεί πιθανός τραυματισμός του κατά τη διενέργεια των πειραμάτων, καθώς η διάτρηση συντελέστηκε σε όλο το μήκος των δοκιμίων (διαμπερή οπή). Η συγκράτηση παράλληλα του κοπτικού εργαλείου (τρυπάνι)

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

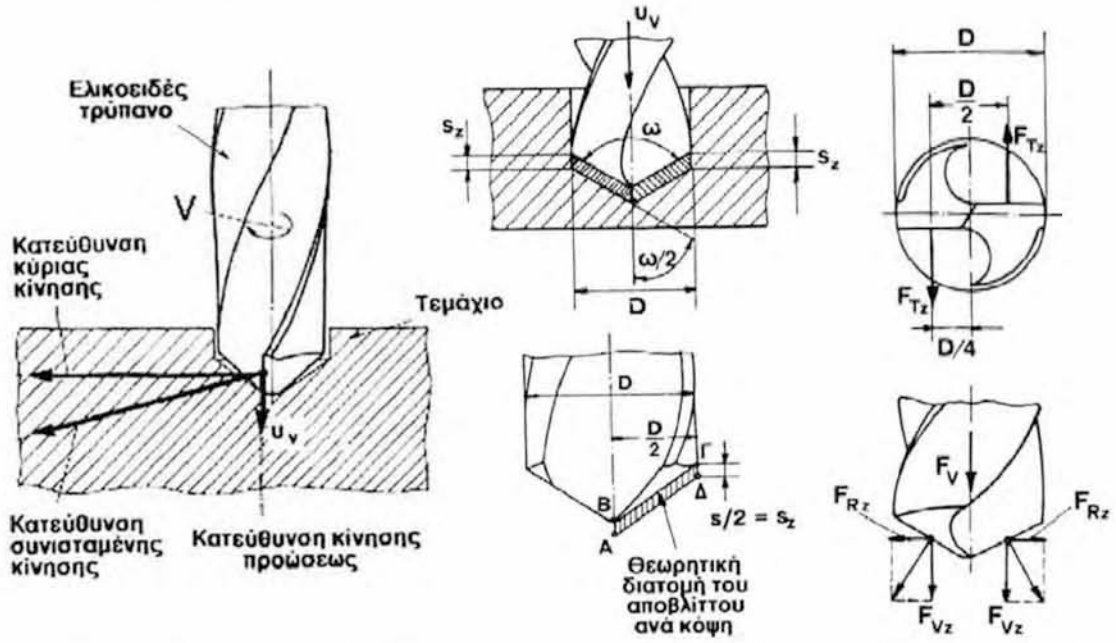
έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε το ελεύθερο μήκος του να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο, ελαχιστοποιώντας φαινόμενα λυγισμού και ταλάντωσής του κατά την διάρκεια της κοπής. Το τρυπάνι που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων της διάτρησης είναι ελικοειδές τύπου, κυλινδρικού στελέχους από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5%, διεθνής προτυποποίησης κατά DIN 338 HSS-Co (High Speed Steel Cobalt alloyed) και η διάμετρός του ήταν 12,5mm (κεφ.6.3.2). Όλες οι κατεργασίες πραγματοποιήθηκαν με άφθαρτο εργαλείο, γεγονός που απαιτούσε την αντικατάστασή του όταν κρινόταν αναγκαίο και δεν χρησιμοποιήθηκε υγρό κοπής (στεγνή κοπή).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.2 Πειραματικός σχεδιασμός διάτρησης

9.2.1 Παράμετροι των πειραμάτων της διάτρησης

Τα πειράματα στο δράπανο επικεντρώθηκαν στην έρευνα της επίδρασης της πρόωσης και της ταχύτητας κοπής ως συνθηκών κοπής (ανεξάρτητες μεταβλητές, X_i), σε βασικές παραμέτρους κατεργασιμότητας. Κατά τη διάτρηση ενδιαφέρουν κυρίως η δύναμη προώσεως F_v (κατά μήκος του άξονα περιστροφής του τρυπανιού) και η ροπή στρέψεως M_d. Αναπτύσσονται επίσης η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής ανά κόψη F_{Tz}, καθώς και η δύναμη απώθησης του εργαλείου ανά κόψη F_{Rz} (Σχήμα 9.2).



Σχήμα 9.2: Στοιχεία κινηματικής και δυνάμεις κοπής κατά την διάτρηση (S η πρόωση, S_z η πρόωση ανά δόντι, V η ταχύτητα κοπής, U_v η ταχύτητα πρόωσης, ω η γωνία κορυφής, F_T η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής, F_V η δύναμη προώσεως και F_R η δύναμη απώθησης του εργαλείου). **[25]**

Οι δυνάμεις F_{Rz} εξουδετερώνονται μεταξύ τους, λόγω της συμμετρίας του τρυπανιού. Επίσης, με την υπόθεση ότι η συνιστώσα της δυνάμεως κοπής F_{Tz} εφαρμόζει σε απόσταση D/4 από το κέντρο του τρυπανιού, η ροπή στρέψεως M_d προσδιορίζεται από την ακόλουθη σχέση [25]:

$$M_d = F_{Tz}\frac{D}{2}\frac{1}{10} = F_{Tz}\frac{D}{20} \qquad \text{[daNcm]} \qquad (9.1)$$

Μέσω της ροπής στρέψεως υπολογίζεται η ισχύς της κοπής P_C από την ακόλουθη σχέση [25]:

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

$$P_C = \frac{M_d V}{305{,}87 D} \quad [\text{kW}] \qquad (9.2)$$

Οι δυνάμεις κοπής που αποδίδει το 4-αξονικό δυναμόμετρο 9272 της Kistler (κεφ.6.5.4) κατά την κατεργασία της διάτρησης είναι η δύναμη πρόωσης και η ροπή στρέψης. Επίσης, ως παράμετροι της κοπής (εξαρτημένες μεταβλητές, Y_i) λαμβάνονται ο παράγοντας αποκόλλησης F_d (κεφ9.2.4) και η επιφανειακή τραχύτητα εκφρασμένη από τις παραμέτρους R_a, R_z, και R_t (κεφ.3.2.3). Συνοψίζοντας, οι παράγοντες και οι αποκρίσεις των πειραμάτων της διάτρησης παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στους πίνακες που ακολουθούν.

Πίνακας 9.1: Παράγοντες των πειραμάτων της διάτρησης.

Παράγοντες	
Πρόωση S (mm/rev)	Ταχύτητα Κοπής V (m/min)
X_1	**X_2**

Πίνακας 9.2: Αποκρίσεις των πειραμάτων της διάτρησης.

Εξαρτημένες Μεταβλητές Μοντέλου					
Δύναμη Πρόωσης F_v (N)	Ροπή Στρέψης M_d (Ncm)	Παράγοντας αποκόλλησης, F_d	Μέση αριθμ. Τραχύτητα R_a (μm)	Ύψος δέκα σημείων R_z (μm)	Μέγιστο ύψος R_t (μm)
Y_1	**Y_2**	**Y_3**	**Y_4**	**Y_5**	**Y_6**

Στα αποτελέσματα των μετρήσεων διεξήχθη στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους και ανάλυση διακύμανσης (analysis of variance - ANOVA), με σκοπό την κατάρτιση προβλεπτικών εμπειρικών μοντέλων (στοχαστικά μοντέλα προσαρμογής) (κεφ.5.5).

9.2.2 Καθορισμός των επιπέδων των παραγόντων

Οι κοπές συντελέστηκαν υπό τρεις διαφορετικές προώσεις (0.1, 0.2, 0.3 mm/rev) και τρεις διαφορετικές περιστροφικές ταχύτητες (226, 637, 904 m/min), με βάση τις επιλογές που διατίθενται από το δράπανο (κεφ.6.3.1) και

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

με στόχο ένα εκτενές πειραματικό εύρος, με διασφαλισμένη συγχρόνως την απροβλημάτιστη λειτουργία της εργαλειομηχανής και την αξιοπιστία των μετρήσεων. Από τις τιμές της περιστροφικής ταχύτητας υπολογίζονται οι τιμές της ταχύτητας κοπής των πειραμάτων μέσω της ακόλουθης σχέσης που προκύπτει από την κινηματική της διάτρησης (Σχήμα 9.2, [25]):

$$V = \frac{\pi ND}{1000}[m/\min] \qquad (9.3)$$

όπου *N* (rev/min) η περιστροφική ταχύτητα και D (mm) η διάμετρος του τρυπανιού.

Οι τιμές της ταχύτητας κοπής των πειραμάτων της διάτρησης συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας, δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9.3: Ταχύτητα κοπής των πειραμάτων της διάτρησης.

Περιστροφική ταχύτητα N (rpm)	Ταχύτητα κοπής V (m/min)
226	8,87
637	25,01
904	35,50

Συνοπτικά, τα επίπεδα των παραγόντων του πειραματικού σχεδιασμού, δίνονται στον επόμενο πίνακα:

Πίνακας 9.4: Επίπεδα των παραγόντων των πειραμάτων της διάτρησης.

Επίπεδα Παραγόντων	
Πρόωση S (mm/rev)	Ταχύτητα κοπής V (m/min)
0,1	8,87
0,2	25,01
0,3	35,50

Οι χρόνοι κοπής υπολογίζονται από τη Σχέση 9.4 (Σχήμα 9.2, [25]) από την οποία για κάθε συνδυασμό των παραγόντων και για μήκος κοπής L ίσο με 50mm (πάχος των δοκιμίων), προκύπτουν οι τιμές του πίνακα που ακολουθεί:

$$t = 60\frac{L}{SN} \quad [\text{sec}] \qquad (9.4)$$

όπου Uv (mm/min) η ταχύτητα πρόωσης και L (mm) το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 9.5: Χρόνοι κοπής σε sec για κάθε συνδυασμό πρόωσης S(mm/rev) και περιστροφικής ταχύτητας N(rpm).

t (sec)		S (mm/rev)		
		0,1	0,2	0,3
N (rpm)	226	133	66	44
	637	47	24	16
	904	33	17	11

9.2.3 Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού

Επιλέγοντας τον πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό (Full Factorial Design), ο αριθμός των πειραμάτων (κοπές για κάθε συνδυασμό των παραγόντων) που απαιτούνται στις επιλεγμένες συνθήκες κοπής, δίνεται από τον πολλαπλασιασμό των επιπέδων των παραγόντων (κεφ.5.3.1), δηλαδή:

Συνδυασμοί** = **3** (επίπεδα πρόωσης) **x 3** (επίπεδα ταχύτητας κοπής) = **9

Για να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα των μετρήσεων και να αποφευχθούν συστηματικά πειραματικά σφάλματα, κάθε κοπή επαναλαμβάνεται τρεις φορές αυξάνοντας τον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων στα 27. Με βάση τη μέθοδο του πλήρη παραγοντικού σχεδιασμού και μέσω στατιστικού πακέτου που αποδίδει τυχαιότητα στην σειρά εκτέλεσης των πειραμάτων, πραγματοποιείται ο πίνακας σχεδιασμού του πειράματος ή πειραματικός χώρος (Design Matrix) (κεφ.5.3):

Πίνακας 9.6: Πειραματικός χώρος (Design Matrix) των πειραμάτων της διάτρησης.

Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)
1	6	0,1	8,87
2	4	0,2	8,87
3	8	0,3	8,87
4	3	0,1	25,01
5	9	0,2	25,01
6	5	0,3	25,01
7	1	0,1	35,50
8	7	0,2	35,50
9	2	0,3	35,50

Οι δοκιμές πραγματοποιούνται με βάση τη σειρά Run που παραθέτει το στατιστικό πρόγραμμα, εξασφαλίζοντας έτσι, την κανονική και ανεξάρτητη κατανομή των πειραματικών σφαλμάτων (κεφ.5.3).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.2.4 Πειραματικές μετρήσεις

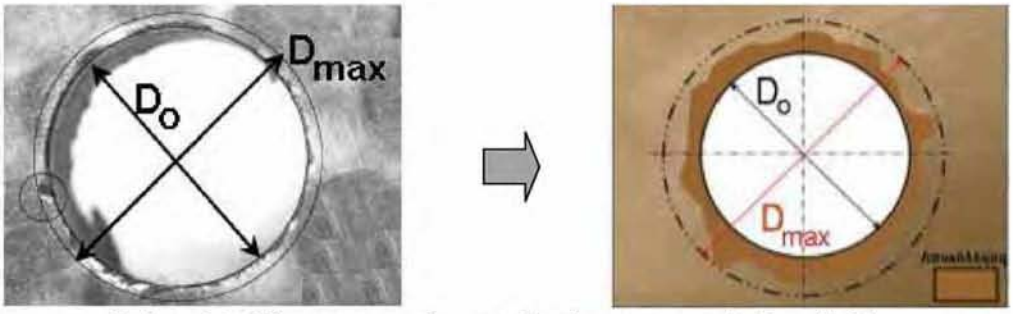
Κατά τη διάτρηση των δοκιμίων στους συνδυασμούς των συνθηκών κοπής του πειραματικού χώρου (Πίνακας 9.6), πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις της δύναμης προώσεως F_v και της ροπής στρέψης M_d μέσω του 4-αξονικού δυναμόμετρου 9272 της Kistler (κεφ.6.5.4). Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με συχνότητα 100Hz (100 σημεία ανά δευτερόλεπτο) γεγονός όπου με βάση το χρόνο κοπής της εκάστοτε κατεργασίας (Πίνακας 9.5), καθορίζεται το συνολικό πλήθος των σημείων που λαμβάνει το δυναμόμετρο για κάθε μέτρηση (tx100). Με κατάλληλη επεξεργασία των διαγραμμάτων που εξάγονται από το συνεργαζόμενο με το δυναμόμετρο, λογισμικό επεξεργασίας των σημείων, προκύπτουν οι μέσες τιμές των δυνάμεων κοπής για κάθε δοκιμή (κεφ.6.5.5).

Μετά το τέλος της διάτρησης τα τεμάχια μεταφέρθηκαν σε μετρητικό μικροσκόπιο με προσοφθάλμιο φακό υψηλής μεγέθυνσης και μηχανική τράπεζα με ενσωματωμένες βαθμονομημένες κλίμακες, όπου πραγματοποιήθηκε η μέτρηση της διαμέτρου των οπών στο σημείο εξόδου του τρυπανιού λαμβάνοντας δύο τιμές (D_{max}) για την κάθε οπή. Η διαδικασία αυτή είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό του παράγοντα αποκόλλησης F_d, ο οποίος αποτελεί ένδειξη του μεγέθους της διαστρωματικής αποκόλλησης που έχει υποστεί μια οπή και ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_o} \qquad (9.5)$$

όπου D_{max} είναι η μέση μέγιστη διάμετρος της οπής (πραγματική διάμετρος οπής) και D_o η ονομαστική διάμετρος του τρυπανιού (12,5mm).

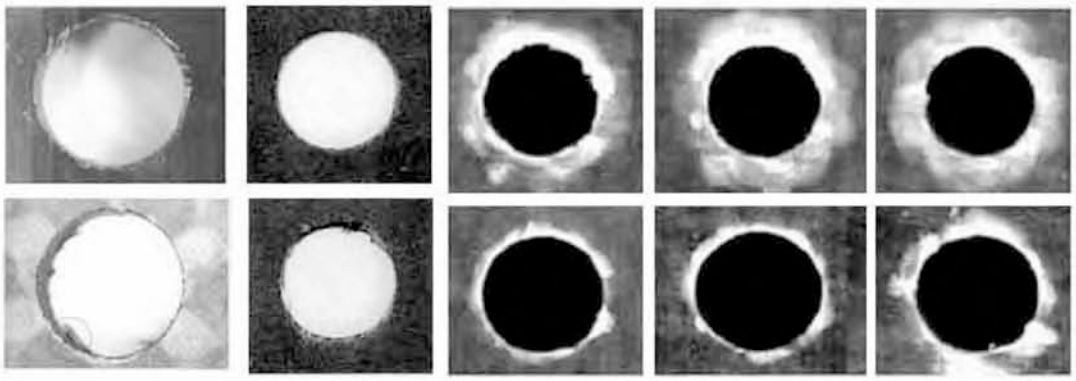
Η D_{max} μετράται μέσω οργάνων υψηλής ακρίβειας σε διάφορα σημεία της οπής και υπολογίζεται ο μέσος όρος της (Σχήμα 9.3).



Σχήμα 9.3: Μέτρηση της μέγιστης διαμέτρου της οπής D_{max}.**[147]**

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Η διαστρωματική αποκόλληση (delamination) είναι το σημαντικότερο ελάττωμα που προκαλείται κατά τη διάτρηση κυρίως σύνθετων υλικών. Δημιουργείται, λόγω της τάσης των ινών ενίσχυσης να αποσχίζονται από το υλικό της μήτρας, κάτω από την επίδραση των δυνάμεων κοπής. Απαντάται συνήθως στην έξοδο της οπής, όπου το θεωρητικό πάχος του αποβλίττου, στο οποίο επενεργεί η αξονική δύναμη, ελαττώνεται, καθώς το τρυπάνι πλησιάζει στο επίπεδο εξόδου από την οπή. Από κάποιο σημείο και μετά η δύναμη κοπής υπερβαίνει την αντοχή του υλικού της μήτρας μεταξύ των ινών και λαμβάνει χώρα η αποκόλληση[1]. Αποτέλεσμα του φαινομένου αυτού είναι η μείωση της διαστασιακής ακρίβειας και της ακρίβειας θέσης της οπής, η αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειάς της κοντά στα σημεία αποκόλλησης και γενικότερα η παραμόρφωση της μορφής της (κυκλικότητα). Τα παραπάνω αποτελούν επιπτώσεις που επηρεάζουν στη συνέχεια τη λειτουργικότητα του τεμαχίου με συνεργαζόμενα αντικείμενα (Σχήμα 9.4).



Σχήμα 9.4: Παραδείγματα οπών με διαστρωματική αποκόλληση.

Στη συνέχεια η πειραματική διαδικασία μεταφέρθηκε στο τραχύμετρο Surtronic 3+ της εταιρίας Taylor-Hobson (κεφ.6.6), όπου έγινε η καταγραφή των προφίλ επιφανείας των διανοιγμένων οπών και η μέτρηση των παραμέτρων της τραχύτητας. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν κατά την αξονική διεύθυνση της κοπής (διεύθυνση πρόωσης). Το φίλτρο αποκοπής ήταν το "Gaussian", ενώ σαν μήκος κύματος αποκοπής (cut-off length) επιλέχθηκε η τιμή 0.8mm, που συνίσταται για την κατεργασία της διάτρησης

[1] Η αποκόλληση είναι δυνατό να ελαττωθεί δραστικά ή και να εξαλειφθεί με ελάττωση της ταχύτητας πρόωσης κοντά στην έξοδο της οπής. Επίσης, πολλές φορές εφαρμόζεται η χρήση πλακών στήριξης και συγκράτησης του τεμαχίου κοντά στο σημείο διάνοιξης της οπής, ώστε να περιορίζονται οι ελαστικές παραμορφώσεις που οδηγούν σε πλευρικές αποκολλήσεις.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

(κεφ.6.6, κεφ.3.2.4.2). Επίσης, το δειγματοληπτικό μήκος (L_n), όπως προκύπτει από το γινόμενο πέντε μηκών αποκοπής (5x0.8=4mm), ήταν σε κάθε περίπτωση 4mm. Οι παράμετροι που συλλέγονται και μελετώνται είναι η μέση αριθμητική τραχύτητα R_a, το ύψος δέκα σημείων R_z και το μέγιστο ύψος R_t (κεφ.3.2.3).

Μεταφέροντας τις πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων στον Πίνακα 9.6 διαμορφώνεται ο συγκεντρωτικός πειραματικός χώρος των μετρήσεων:

Πίνακας 9.7: Πίνακας πειραματικού σχεδιασμού και πειραματικές μετρήσεις των αποκρίσεων.

Std	Run	S (mm/rev)	V (m/min)	F_v * (N)	M_d * (Ncm)	F_d **	R_a * (μm)	R_z * (μm)	R_t * (μm)
1	6	0,1	8,87	79,88	39,04	1,007	4,43	27,42	43,97
2	4	0,2	8,87	125,53	60,07	1,010	5,35	34,84	55,41
3	8	0,3	8,87	175,72	91,48	1,016	6,84	45,01	75,64
4	3	0,1	25,01	48,67	27,62	1,009	4,15	26,40	35,08
5	9	0,2	25,01	97,04	49,07	1,011	5,09	32,60	41,39
6	5	0,3	25,01	162,78	86,67	1,019	6,51	43,11	64,67
7	1	0,1	35,50	29,22	20,38	1,011	3,92	22,38	32,39
8	7	0,2	35,50	83,94	45,18	1,013	4,47	25,74	37,65
9	2	0,3	35,50	163,57	88,09	1,023	5,87	37,77	58,66

*Μέσος όρος τριών επαναλήψεων

**Μέσος όρος τριών οπών (μέτρηση δυο D_{max} σε κάθε οπή για τον υπολογισμό του F_d, Σχέση 9.5)

Οι τιμές των αποκρίσεων αποτελούν τον μέσο όρο επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Στους πίνακες Γ1, Γ2 και Γ4 του παραρτήματος Γ δίνονται οι πειραματικές μετρήσεις κάθε επανάληψης.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.3 Στατιστική ανάλυση

9.3.1 Στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους

Η στατιστική ανάλυση με γραφικές μεθόδους περιλαμβάνει τις γραφικές παραστάσεις των κύριων επιδράσεων και των αλληλεπιδράσεων (κεφ.5.4). Όπως έχει προαναφερθεί, με τη συγκεκριμένη τεχνική ανιχνεύεται γραφικά η επίδραση που έχουν οι παράγοντες και η αλληλεπίδρασή τους στις αποκρίσεις, πραγματοποιώντας στατιστική επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων.

9.3.1.1 Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραγόντων

Μέσω των διαγραμμάτων των κύριων επιδράσεων, γίνεται διακριτός ο τρόπος με τον οποίο επιδρούν οι παράγοντες στα μετρούμενα μεγέθη, δηλαδή, αν επιφέρουν αύξηση ή μείωση στις τιμές αυτών και ενδεικτικά σε ποιό βαθμό (κεφ.5.4). Για να επιτευχθεί αυτό, υπολογίζονται από τα δεδομένα του πειραματικού χώρου (Πίνακας 9.7) οι μέσοι όροι των αποκρίσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων. Στον παρακάτω πίνακα δίνονται οι μέσοι όροι των αποκρίσεων όλων των επιπέδων του ενός παράγοντα ανά επίπεδο του δεύτερου:

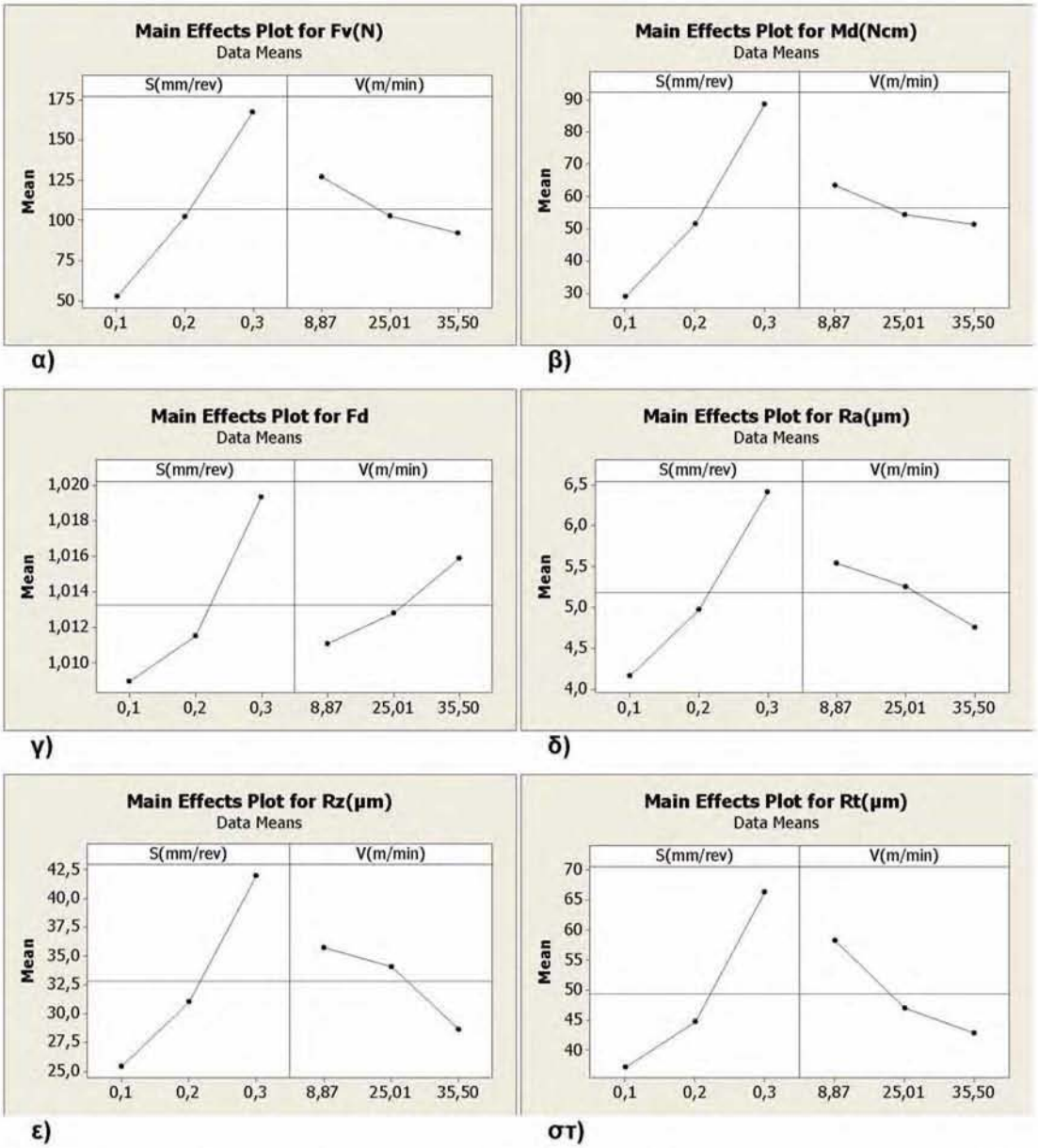
Πίνακας 9.8: Μέσος όρος των μετρήσεων για κάθε επίπεδο των παραγόντων

		S (mm/rev)		
		0,1	0,2	0,3
		V (m/min)		
		8,87	25,01	35,5
F_v (N)	m_S (N)	52,59	102,17	167,36
	m_v (N)	127,04	102,83	92,24
M_d (Ncm)	m_S (Ncm)	29,01	51,44	88,75
	m_v (Ncm)	63,53	54,45	51,22
Fd	m_S	1,009	1,012	1,019
	m_v	1,011	1,013	1,016
Ra (μm)	m_S (μm)	4,17	4,97	6,41
	m_v (μm)	5,54	5,25	4,75
Rz (μm)	m_S (μm)	25,40	31,06	41,96
	m_v (μm)	35,76	34,04	28,63
Rt (μm)	m_S (μm)	37,15	44,82	66,33
	m_v (μm)	58,34	47,05	42,90

Όπου: m_{Vi} *ο μέσος όρος των αποκρίσεων στα επίπεδα της ταχύτητας κοπής*
m_{Si} *ο μέσος όρος των αποκρίσεων στα επίπεδα της πρόωσης*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Μέσω των δεδομένων του πίνακα των μέσων όρων (Πίνακας 9.8) κατασκευάζονται τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων των παραγόντων που παρουσιάζονται ακολούθως.



Σχήμα 9.5: Διαγράμματα των κύριων επιδράσεων του κάθε παράγοντα για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη πρόωσης F_v(N), β)Ροπή στρέψης M_d(Ncm), γ)Συντελεστής αποκόλλησης Fd, δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm), ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο ύψος R_t(μm).

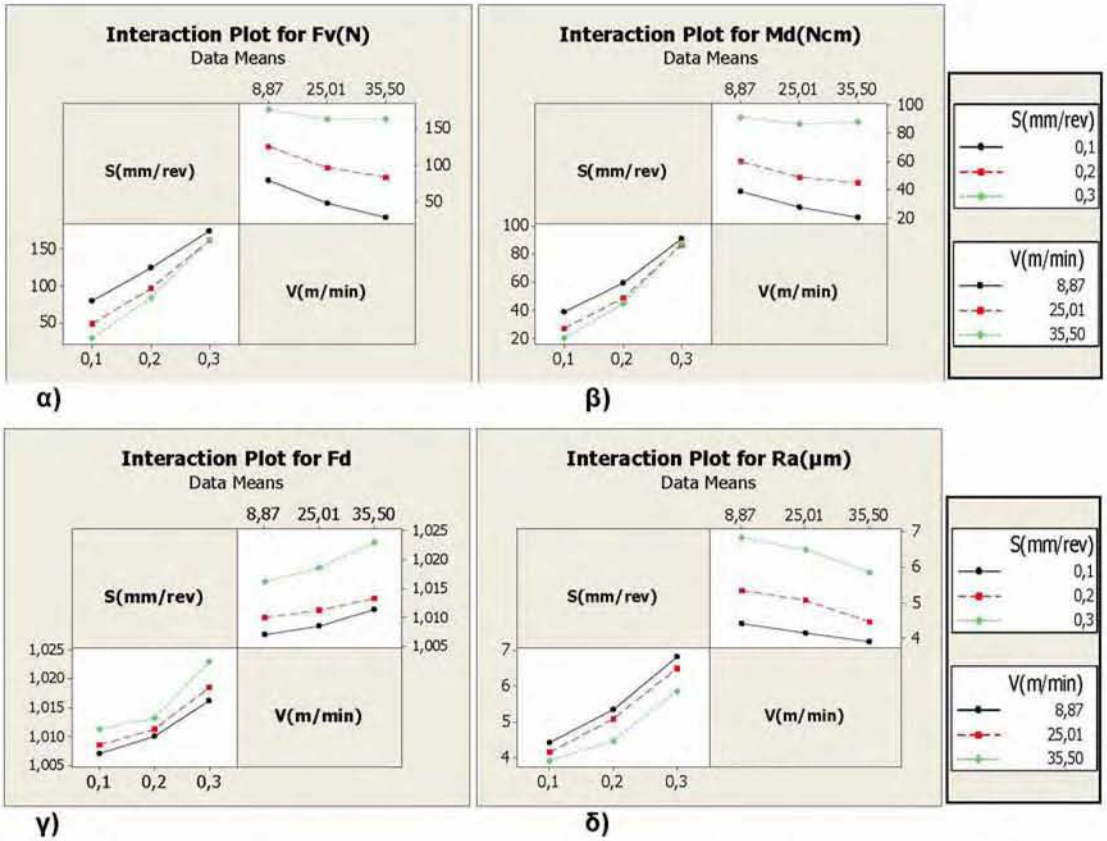
Τα διαγράμματα των κύριων επιδράσεων φανερώνουν ότι η αύξηση της πρόωσης S(mm/rev) επιφέρει σημαντική αύξηση στις τιμές όλων των αποκρίσεων ανεξαιρέτως. Αντίθετα, ο παράγοντας της ταχύτητας κοπής V(m/min), οδηγεί σε πτώση τις τιμές τους αλλά με σημαντικά μικρότερη

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ένταση. Εξαίρεση αποτελεί η συμπεριφορά του συντελεστή αποκόλλησης, καθώς δείχνει να αυξάνεται ανάλογα με την αύξηση της ταχύτητας κοπής. Επίσης, η δύναμη πρόωσης και η ροπή στρέψης φαίνεται να μην επηρεάζονται σημαντικά από την αύξηση της ταχύτητας κοπής, καθώς η πτώση των τιμών τους ολοένα και μειώνεται.

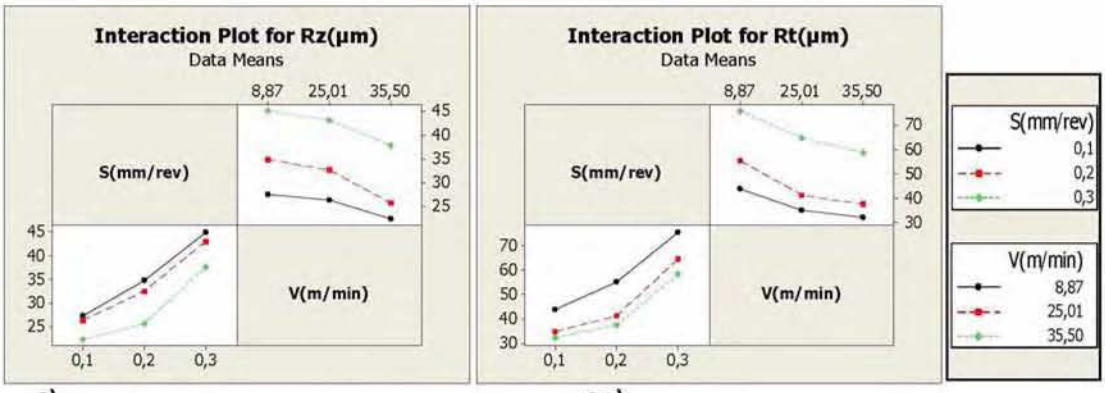
9.3.1.2 Διαγράμματα αλληλεπιδράσεων μεταξύ των παραγόντων

Από τα διαγράμματα των αλληλεπιδράσεων των παραγόντων, θα εξετάσουμε τον τρόπο με τον οποίο οι παράγοντες συνδυάζονται για να επηρεάσουν τις εξαρτημένες μεταβλητές (κεφ.5.4). Τα διαγράμματα κατασκευάζονται από τις τιμές των μετρήσεων του πειραματικού χώρου (Πίνακας 9.7).



Σχήμα 9.6: Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για τις αποκρίσεις: α)Δύναμη πρόωσης F_v(N), β)Ροπή στρέψης M_d(Ncm), γ)Συντελεστής αποκόλλησης Fd, δ)Μέση αριθμητική τραχύτητα R_a(μm).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



ε) στ)

Σχήμα 9.6 (συνέχεια): Διάγραμμα αλληλεπιδράσεων των παραγόντων για τις αποκρίσεις: ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο ύψος R_t(μm).

Από τα παραπάνω διαγράμματα ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα α και β, καθώς οι γραμμές διασταυρώνονται επιβεβαιώνοντας την ύπαρξη σημαντικής αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων. Η αλληλεπίδραση, επομένως, θα πρέπει οπωσδήποτε να συμπεριληφθεί υπόψη κατά την διαμόρφωση των μοντέλων προσαρμογής για την δύναμη πρόωσης F_v και τη ροπή στρέψης M_d (κεφ.5.5.1). Για τις υπόλοιπες αποκρίσεις δεν διακρίνεται κάποια τάση σύγκλισης των γραμμών (Σχήμα 9.6γ-στ) και επομένως το ενδεχόμενο ύπαρξης αλληλεπίδρασης των παραγόντων φαίνεται να είναι αρκετά μικρό. Τα παραπάνω εξαγόμενα συμπεράσματα, θα εξεταστούν κατά την κατασκευή των στοχαστικών μοντέλων προσαρμογής στη συνέχεια.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.3.2 Κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων

9.3.2.1 Ανάλυση Διακύμανσης (ANOVA) και στοχαστικά μοντέλα

Με αρχικό μαθηματικό μοντέλο το πλήρες τετραγωνικό (Full Quadratic) (σχέση 5.8) και τα πειραματικά δεδομένα του πίνακα 9.7, πραγματοποιώντας τη στατιστική ανάλυση σύμφωνα με την θεωρία του πειραματικού σχεδιασμού (Κεφάλαιο 5), κατασκευάζονται τα στοχαστικά μοντέλα των εξαρτημένων μεταβλητών. Στην συνέχεια και μέσω της ανάλυσης διακύμανσης ANOVA, πραγματοποιείται ο έλεγχος των μοντέλων ως προς τη στατιστική σημαντικότητα των συντελεστών τους και επαναπροσδιορίζονται στις περιπτώσεις όπου κρίνεται αναγκαίο (διαγραφή όρων όταν το p-value είναι μικρότερο του 0,05) (κεφ.5.5.5). Σκοπός είναι πάντα, η απλοποίηση των στοχαστικών μοντέλων χωρίς την μείωση της προσεγγιστικής τους ικανότητας, διατηρώντας τους συντελεστές προσαρμογής R^2 και R^2(adj) σε υψηλά επίπεδα. Οι τελικές αναλύσεις διακύμανσης *ANOVA* και τα αντίστοιχα απλοποιημένα στοχαστικά μοντέλα για όλες τις αποκρίσεις παρουσιάζονται ακολούθως:

Πίνακας 9.9: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της δύναμης πρόωσης F_v(N).

Analysis of Variance for Fv(N), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	19756,1	1845,1	19756,1	534,39	0,000	89,77%
V(m/min)	1	1890,0	1160,0	1890,0	51,12	0,001	8,59%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	362,5	362,5	362,5	9,81	0,026	1,65%
Error	5	184,8	184,8	37,0			
Total	8	22193,5					

S = 6,08026 R-Sq = 99,17% R-Sq(adj) = 98,67%

Πίνακας 9.10: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της ροπής στρέψης M_d(Ncm).

Analysis of Variance for Md(Ncm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	5352,5	4,5	5352,5	1672,34	0,000	84,12%
V(m/min)	1	239,4	163,7	239,4	74,80	0,001	9,36%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	110,7	110,7	110,7	34,58	0,004	4,33%
S(mm/rev)*V(m/min)	1	56,3	56,3	56,3	17,59	0,014	2,20%
Error	4	12,8	12,8	3,2			
Total	8	5771,7					

S = 1,78902 R-Sq = 99,78% R-Sq(adj) = 99,56%

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 9.11: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του παράγοντα αποκόλλησης F_d.

Analysis of Variance for Fd, using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,0001602	0,0000034	0,0001602	124,18	0,000	77,56%
V(m/min)	1	0,0000327	0,0000327	0,0000327	25,34	0,004	15,83%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,0000136	0,0000136	0,0000136	10,58	0,023	6,61%
Error	5	0,0000065	0,0000065	0,0000013			
Total	8	0,0002130					

S = 0,00113589 R-Sq = 96,97% R-Sq(adj) = 95,15%

Πίνακας 9.12: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm).

Analysis of Variance for Ra(μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	7,5281	0,0023	7,5281	270,18	0,000	87,45%
V(m/min)	1	0,8817	0,8817	0,8817	31,65	0,002	10,24%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,1980	0,1980	0,1980	7,11	0,045	2,30%
Error	5	0,1393	0,1393	0,0279			
Total	8	8,7471					

S = 0,166921 R-Sq = 98,41% R-Sq(adj) = 97,45%

Πίνακας 9.13: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του ύψους δέκα σημείων R_z(μm).

Analysis of Variance for Rz(μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	411,52	0,60	411,52	377,15	0,000	80,97%
V(m/min)	1	69,67	4,97	69,67	63,85	0,001	13,71%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	13,75	13,75	13,75	12,60	0,024	2,71%
V(m/min)*V(m/min)	1	13,31	13,31	13,31	12,20	0,025	2,62%
Error	4	4,36	4,36	1,09			
Total	8	512,61					

S = 1,04456 R-Sq = 99,15% R-Sq(adj) = 98,30%

Πίνακας 9.14: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του μέγιστου ύψους R_t(μm).

Analysis of Variance for Rt(μm), using Sequential SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	1277,22	20,97	1277,22	299,42	0,000	73,04%
V(m/min)	1	375,62	375,62	375,62	88,06	0,000	21,48%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	95,74	95,74	95,74	22,44	0,005	5,47%
Error	5	21,33	21,33	4,27			
Total	8	1769,91					

S = 2,06534 R-Sq = 98,79% R-Sq(adj) = 98,07%

Τα αντίστοιχα στοχαστικά μοντέλα των εξαρτημένων μεταβλητών είναι τα ακόλουθα:

$$F_v = 56{,}03 + 409{,}70\ S - 2{,}7424\ V + 7{,}097\ S\ V \qquad (9.6)$$

$$M_d = 45{,}291 - 63{,}59\ S - 1{,}0303\ V + 743{,}9\ S^2 + 2{,}7971\ S\ V \qquad (9.7)$$

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

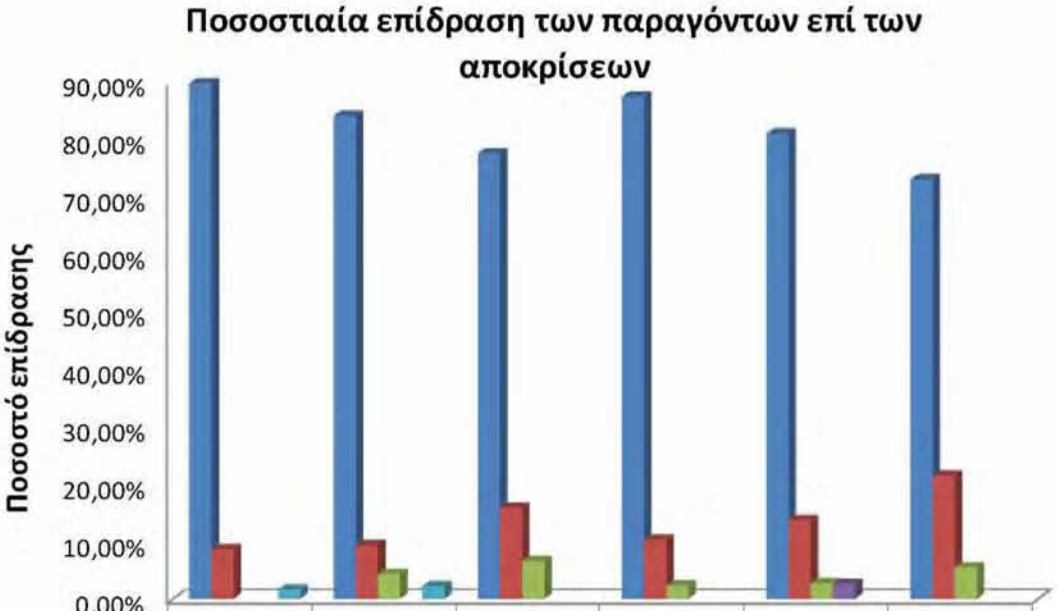
$$F_d = 1{,}008 - 5{,}28\ 10^{-2}\ S + 1{,}74\ 10^{-4}\ V + 26{,}12\ 10^{-2}\ S^2 \quad (9.8)$$

$$R_a = 4{,}65 - 1{,}384\ S - 28{,}577\ 10^{-3}\ V + 31{,}46\ S^2 \quad (9.9)$$

$$R_z = 25{,}472 - 22{,}05\ S + 41{,}36\ 10^{-2}\ V + 262{,}17\ S^2 - 15{,}353\ 10^{-3}\ V^2 \quad (9.10)$$

$$R_t = 56{,}953 - 130{,}85\ S - 58{,}953\ 10^{-2}\ V + 691{,}9\ S^2 \quad (9.11)$$

Η επί τοις εκατό ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων κάθε στοχαστικού μοντέλου και για κάθε απόκριση, δίνεται συγκεντρωτικά στον παρακάτω πίνακα-διάγραμμα:



	Fv	Md	Fd	Ra	Rz	Rt
S	89,77%	84,12%	77,56%	87,45%	80,97%	73,04%
V	8,59%	9,36%	15,83%	10,24%	13,71%	21,48%
S S		4,33%	6,61%	2,30%	2,71%	5,47%
V V					2,62%	
S V	1,65%	2,20%				

Σχήμα 9.7: Επίδραση των παραγόντων των στοχαστικών μοντέλων στις αποκρίσεις.

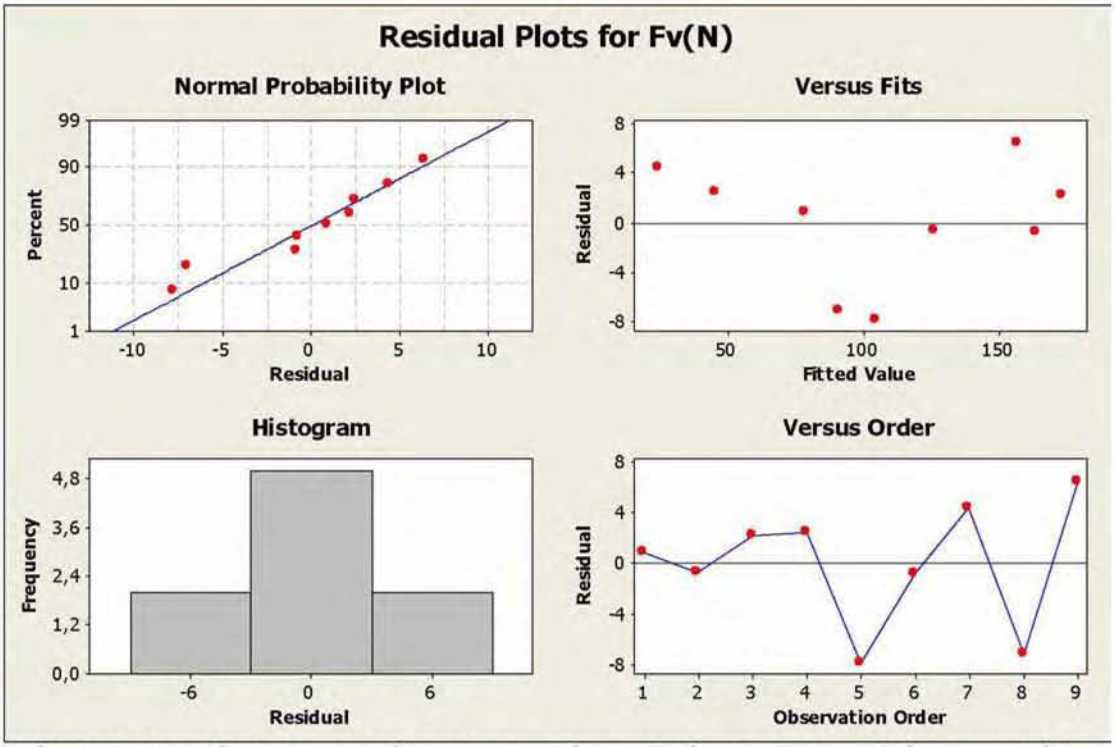
Στο Σχήμα 9.7 διακρίνεται ότι η πρόωση S(mm/rev) αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα κατεργασίας για κάθε απόκριση, με τα μεγαλύτερα ποσοστά επιρροής να διαμορφώνονται για την δύναμη πρόωσης F_v και τη μέση αριθμητική τραχύτητα R_a, με 89,77% και 87,45% αντίστοιχα. Αρκετά μικρότερης σημασίας φαίνεται είναι να η επίδραση της ταχύτητας κοπής V(m/min), με υψηλότερο ποσοστό επιρροής για το μέγιστο ύψος R_t, με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

21,48%. Η αλληλεπίδραση των παραγόντων συναντάται μόνο στη δύναμη πρόωσης και στη ροπή στρέψης, με την τελευταία να επηρεάζεται περισσότερο με ποσοστό 2,20%.

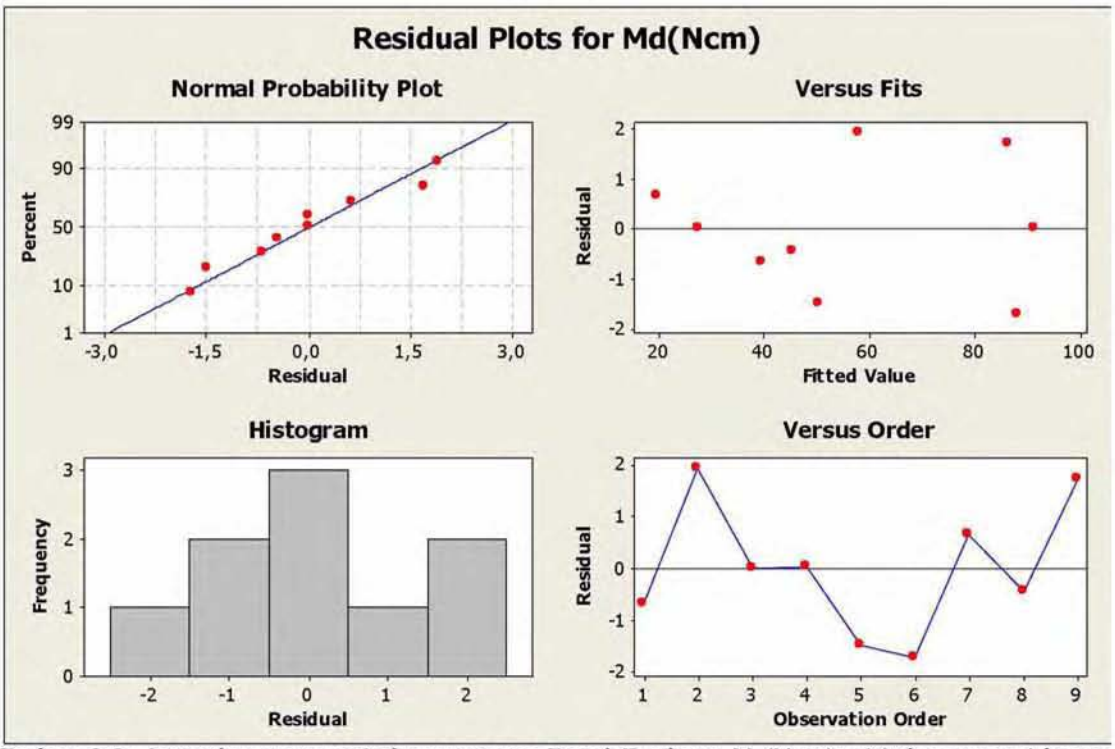
9.3.2.2 Έλεγχος καταλληλότητας των μοντέλων

Μέσω των γραφημάτων των καταλοίπων θα πραγματοποιηθεί έλεγχος των υποθέσεων ισχύς των μοντέλων, αν ικανοποιούνται, δηλαδή, οι απαραίτητες συνθήκες έτσι ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για στατιστική συμπερασματολογία (κεφ.5.5.6). Όλα τα κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για τις δυνάμεις κοπής, δίνονται στους πίνακες Γ5-Γ10 του παραρτήματος Γ, από τα οποία κατασκευάζονται τα παρακάτω διαγράμματα:

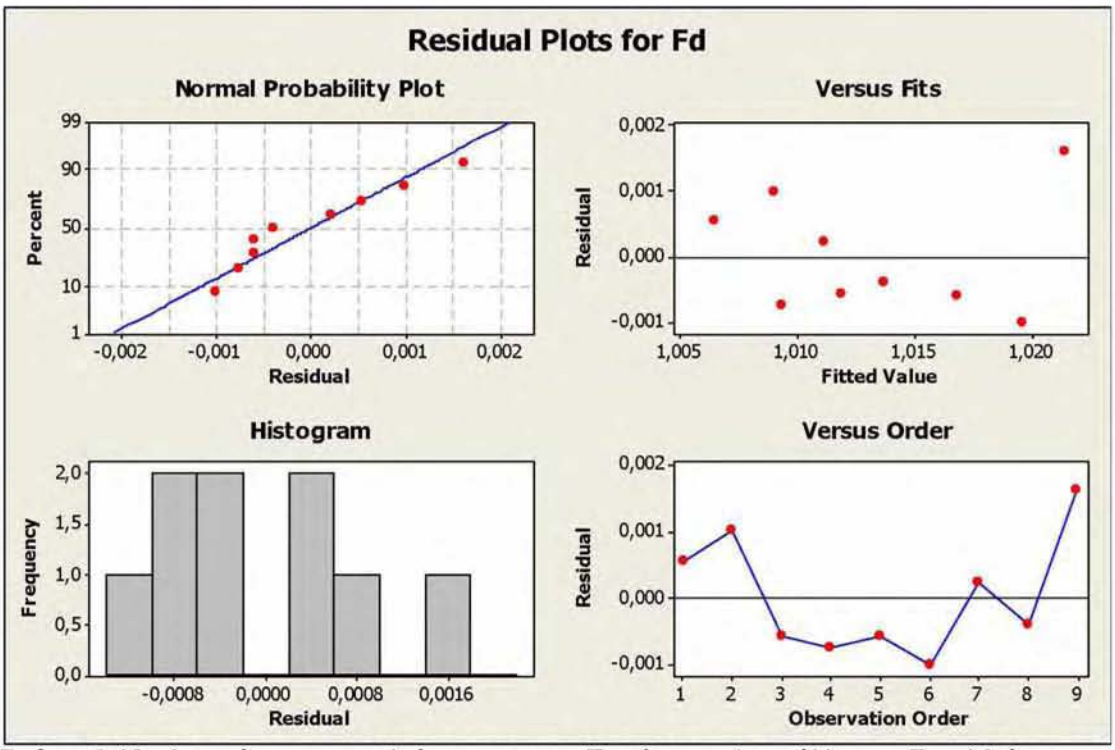


Σχήμα 9.8: Διαγράμματα καταλοίπων για την Δύναμη Πρόωσης $F_v(N)$: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

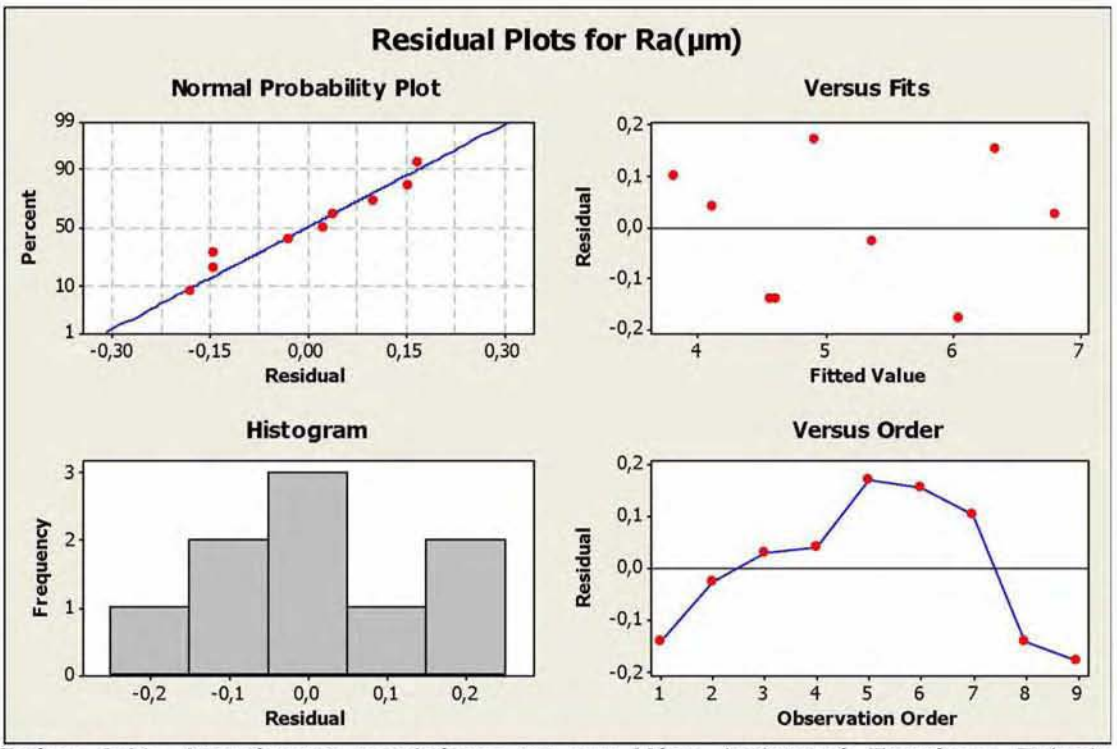


Σχήμα 9.9: Διαγράμματα καταλοίπων για την Ροπή Στρέψης M_d(Ncm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

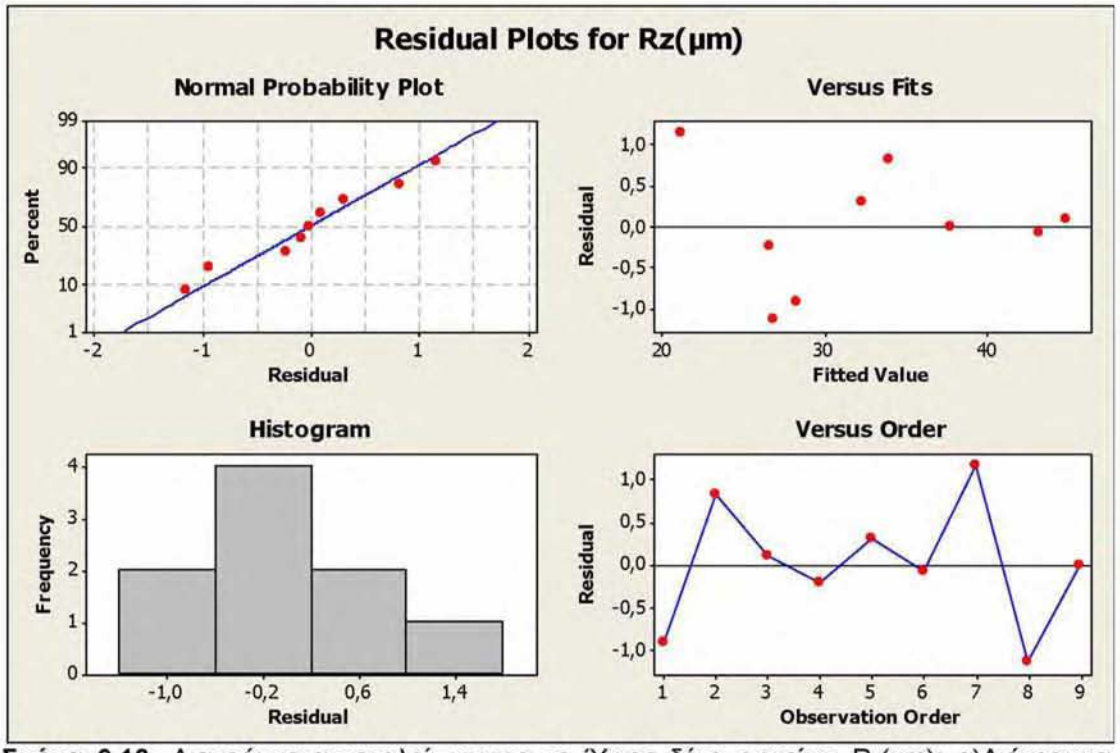


Σχήμα 9.10: Διαγράμματα καταλοίπων για τον Παράγοντα Αποκόλλησης F_d: α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

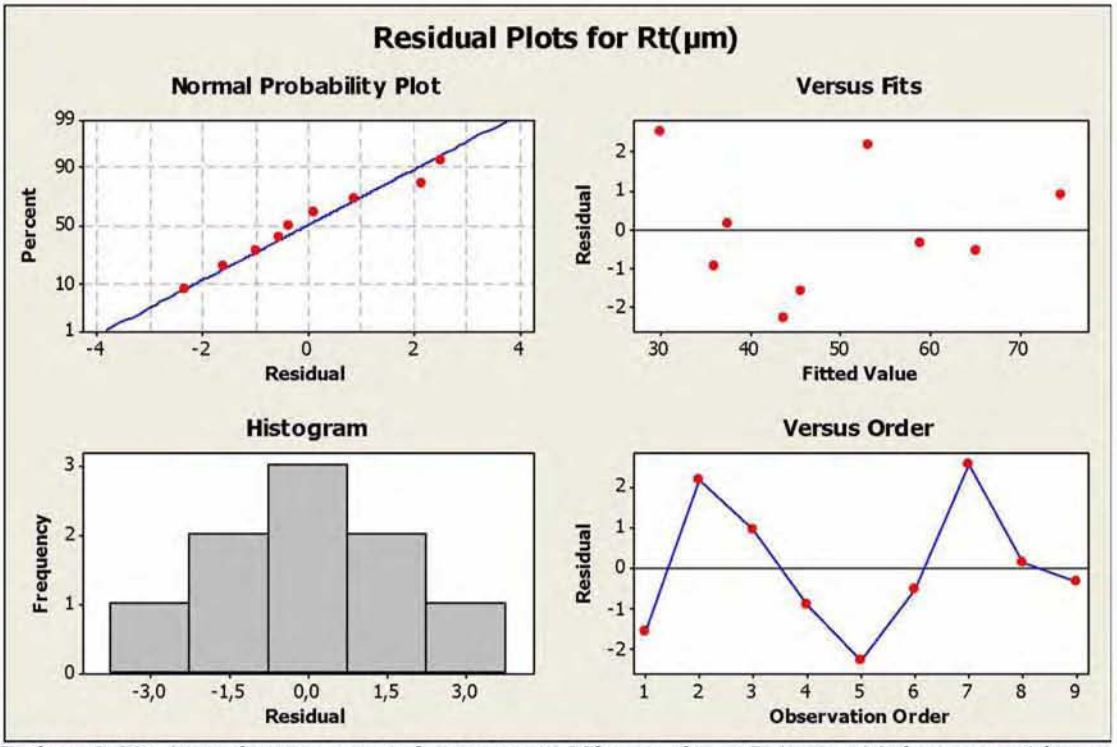


Σχήμα 9.11: Διαγράμματα καταλοίπων για την Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).



Σχήμα 9.12: Διαγράμματα καταλοίπων για το Ύψος δέκα σημείων R_z(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

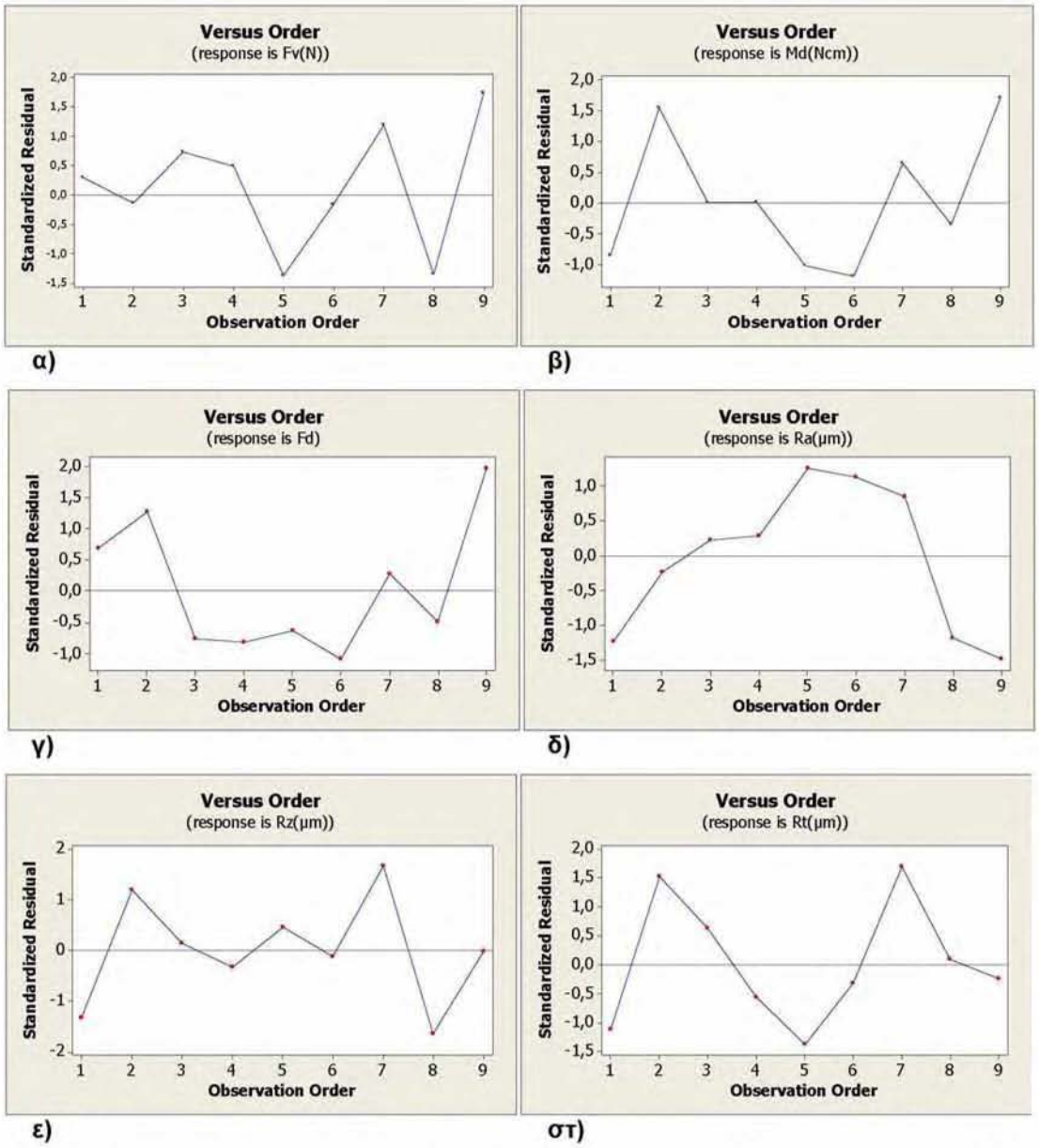


Σχήμα 9.13: Διαγράμματα καταλοίπων για το Μέγιστο ύψος R_t(μm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

Στα διαγράμματα ελέγχου κανονικότητας 9.5α - 9.10α διακρίνεται ότι, για όλα τα μοντέλα τα κατάλοιπα κινούνται πολύ κοντά στη κεντρική γραμμή, γεγονός που εξασφαλίζει ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή (κεφ.5.5.6). Στο ίδιο συμπέρασμα οδηγούν και τα ιστογράμματα των συχνοτήτων των καταλοίπων 9.5γ - 9.10γ, όπου διακρίνεται γραφικά η κανονικότητα της κατανομής τους. Επίσης, παρατηρώντας τα διαγράμματα των καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές 9.5β - 9.10β και ως προς τη σειρά παρατήρησης 9.5δ - 9.10δ, γίνεται αντιληπτό ότι τα κατάλοιπα είναι τυχαιοποιημένα σε όλο το εύρος τιμών σε κάθε περίπτωση και επομένως δεν έχουν κάποια καθορισμένη τάση, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι, είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους για κάθε καταρτισμένο μοντέλο (κεφ.5.5.6). Τα σημεία γενικότερα διασκορπίζονται συμμετρικά εκατέρωθεν της κεντρικής γραμμής στο σημείο 0 και σε όλο το μήκος της, εξασφαλίζοντας ότι η διασπορά τους παραμένει σταθερή. Τέλος, από τους πίνακες Γ5 - Γ10 του παραρτήματος Γ και τα παρακάτω διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων, φαίνεται ότι σε καμία περίπτωση δεν υπάρχουν «ασυνήθιστες» ή έκτροπες τιμές. Το γεγονός

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

αυτό διασφαλίζει τη σταθερότητα της διακύμανσης των καταλοίπων και την εγκυρότητα, εν τέλει, των μοντέλων και των πειραματικών μετρήσεων.



Σχήμα 9.14: Διαγράμματα των κανονικοποιημένων καταλοίπων των αποκρίσεων ως προς τη σειρά παρατήρησης: α)Δύναμη Πρόωσης F_v(N), β)Ροπή Στρέψης M_d(Ncm), γ)Συντελεστή Αποκόλλησης Fd, δ)Μέση Αριθμητική Τραχύτητα R_a(μm), ε)Ύψος δέκα σημείων R_z(μm), στ)Μέγιστο Ύψος R_t(μm).

Με τα διαγράμματα των καταλοίπων αποδείχθηκε ότι, ικανοποιούνται οι προϋποθέσεις ισχύς των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων 9.1 - 9.6, γεγονός που τα καθιστά αξιόπιστα για στατιστική συμπερασματολογία και πρόβλεψη τιμών.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.3.2.3 Επιφάνειες προσαρμογής – Response Surfaces

Οι επιφάνειες προσαρμογής κατασκευάζονται μέσω των στοχαστικών μοντέλων που έχουν καταρτιστεί (σχέσεις 9.6 – 9.11), και εφόσον έχει διασφαλιστεί η αξιοπιστία τους μέσω των διαγραμμάτων των καταλοίπων. Με αυτές αποδίδονται γραφικά και σε τρισδιάστατη μορφή οι αποκρίσεις σε κάθε συνδυασμό τιμών των δυο ανεξάρτητων παραγόντων ταυτόχρονα, την πρόωση S(mm/rev) και την ταχύτητα κοπής V(m/min). (κεφ.5.5.7). Οι επιφάνειες προσαρμογής τίθενται στο παράρτημα Γ (Σχήματα Γ1 – Γ12) σε αντιπαραβολή με τα τρισδιάστατα διαγράμματα των δεδομένων των πειραματικών μετρήσεων, όπου διακρίνεται και οπτικά η χαρακτηριστική ομοιότητά τους στις περισσότερες περιπτώσεις, αποτέλεσμα του υψηλού βαθμού προσαρμογής που έχει επιτευχθεί για τα στοχαστικά μοντέλα.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.4 Συμπεράσματα – Ανακεφαλαίωση

9.4.1 Συγκεντρωτικά στοιχεία

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο πραγματοποιήθηκε η συσχέτιση με μαθηματικά μοντέλα (στοχαστικά), των βασικών παραγόντων κοπής (πρόωση και ταχύτητα κοπής), με βασικές αποκρίσεις (δυνάμεις κοπής, παράγοντας αποκόλλησης, παράμετροι τραχύτητας) κατά την διάτρηση του PA66-GF30, μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης και των μαθηματικών μεθόδων προσαρμογής (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων). Η προσαρμογή που επιτεύχθηκε για τα καταρτισμένα μοντέλα είναι αρκετά υψηλή (ο συντελεστής προσδιορισμού στις περισσότερες περιπτώσεις είναι υψηλότερος του 98%), γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα ως προς την χρησιμοποίησή τους για μελλοντική πρόβλεψη τιμών των αποκρίσεων, στο εύρος τιμών των παραγόντων κατά το οποίο έχουν ισχύ (εύρος τιμών των παραγόντων όπου πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα της διάτρησης).

Επίσης, αποδείχτηκε μέσω στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών δεδομένων (πίνακες ανάλυσης διακύμανσης), ότι σημαντικότερος παράγοντας για την συγκεκριμένη κατεργασία είναι η πρόωση, με τα ποσοστά επιρροής στα μετρούμενα μεγέθη να υπερβαίνουν στις περισσότερες περιπτώσεις, αρκετά το 80%. Η αύξησή της επιφέρει αύξηση στις τιμές των αποκρίσεων, γεγονός που έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται ευνοϊκές συνθήκες για την εκτέλεση της κοπής, σε όσο το δυνατό χαμηλότερες τιμές αυτής.

Η ταχύτητα κοπής έχει ποσοστά επιρροής στις περισσότερες περιπτώσεις μεταξύ 10% και 15% και αντίθετα από την πρόωση, η αύξησή της επιφέρει μείωση αρχικά στις τιμές όλων των μετρούμενων μεγεθών εκτός του παράγοντα αποκόλλησης. Η αύξηση του παράγοντα αποκόλλησης ανάλογα με την αύξηση των τιμών της ταχύτητας, εξηγείται λόγω του ότι το τρυπάνι εισέρχεται και εξέρχεται πιο γρήγορα, άρα και πιο βίαια, στην οπή, με αποτέλεσμα τον αναπόφευκτο τραυματισμό της από την έντονη διαδικασία αποκόλλησης, επηρεάζοντας, έτσι και την τελική της διάσταση. Επίσης, σε υψηλές τιμές της ταχύτητας, παρατηρείται μια τάση αύξησης των τιμών της δύναμης πρόωσης και της ροπής στρέψης. Το γεγονός αυτό, πιθανόν οφείλεται στην αδυναμία απομάκρυνσης των αποβλίττων μέσω των αυλακώσεων του τρυπανιού, όσο επιταχύνεται η εισχώρησή του, με

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό τους στην ανοιγόμενη οπή, που επιφέρει δυσκολίες στην περαιτέρω διάνοιξη αυτής.

Μέσω της στατιστικής ανάλυσης, αποδείχτηκε επίσης, ότι οι εξεταζόμενοι παράγοντες αλληλεπιδρούν και επηρεάζουν ουσιαστικά μόνο τις τιμές των δυνάμεων (δύναμη πρόωσης και ροπή στρέψης), με ποσοστά που ανέρχονται περίπου στο 2%.

Συνοψίζοντας, παρατίθενται σε πίνακα τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα και ο συντελεστής προσδιορισμού του καθενός, για τις δυνάμεις κοπής και τις παραμέτρους της τραχύτητας:

Πίνακας 9.15: Τα στοχαστικά μοντέλα των αποκρίσεων.

Απόκριση	Στοχαστικό μοντέλο	Συντελεστής Προσδιορισμού
F_v (N)	$Y = 56,03 + 409,7\ X_1 - 2,7424\ X_2 + 7,097\ X_1\ X_2$	99,17%
M_d (Ncm)	$Y = 45,291 - 63,59\ X_1 - 1,0303\ X_2 + 743,9\ X_1^2 + 2,7971\ X_1\ X_2$	99,78%
F_d	$Y = 1,008 - 5,28\ 10^{-2}\ X_1 + 1,74\ 10^{-4}\ X_2 + 26,12\ 10^{-2}\ X_1^2$	96,97%
R_a (μm)	$Y = 4,65 - 1,384\ X_1 - 28,577\ 10^{-3}\ X_2 + 31,46\ X_1^2$	98,41%
R_z (μm)	$Y = 25,472 - 22,05\ X_1 + 41,36\ 10^{-2}\ X_2 + 262,17\ X_1^2 - 15,353\ 10^{-3}\ X_2^2$	99,15%
R_t (μm)	$Y = 56,953 - 130,85\ X_1 - 58,953\ 10^{-2}\ X_2 + 691,9\ X_1^2$	98,79%

Όπου: *Y η απόκριση*
X_1 *η πρόωση σε* mm/rev
X_2 *η ταχύτητα κοπής* m/min

Στον παρακάτω πίνακα συνοψίζονται τα ποσοστά επιρροής του κάθε παράγοντα και της αλληλεπίδρασης αυτών στις εξαρτημένες μεταβλητές:

Πίνακας 9.16: Ποσοστιαία επίδραση των παραγόντων και της αλληλεπίδρασης αυτών στις αποκρίσεις.

Απόκριση	Επίδραση S (%)	Επίδραση V (%)	Επίδραση SV (%)
F_v (N)	89,77%	8,59%	1,65%
M_d (Ncm)	84,12%	9,36%	2,20%
F_d	77,56%	15,83%	-
R_a (μm)	87,45%	10,24%	-
R_z (μm)	80,97%	13,71%	-
R_t (μm)	73,04%	21,48%	-

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

9.4.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας

Όπως προαναφέρθηκε, τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων συντελούν στην επιλογή του βέλτιστου συνδυασμού τιμών των παραγόντων για την πραγματοποίηση μιας κατεργασίας, βάσει του χρόνου κοπής και των επιθυμητών τιμών των αποκρίσεων, σύμφωνα με τις σχεδιαστικές απαιτήσεις. Αποτελούν διαγράμματα των αποκρίσεων συναρτήσει του χρόνου κοπής του τεμαχίου και κατασκευάζονται αναπτύσσοντας τα στοχαστικά μοντέλα σε ενδιάμεσες τιμές των επιπέδων των παραγόντων, μέσα πάντα στο εύρος τιμών ισχύς των μοντέλων (εύρος τιμών των παραγόντων των πειραμάτων διάτρησης, Πίνακας 9.4). Στο παράρτημα Γ (Σχήματα Γ13-Γ18) δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες για όλες τις αποκρίσεις των πειραμάτων τις διάτρησης του ενισχυμένου πλαστικού PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κεφάλαιο 10: ΣΥΝΟΨΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ

10.1 Ανακεφαλαίωση

Στην παρούσα διατριβή εξετάστηκε σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο η κατεργαστικότητα του ενισχυμένου με κοντές ίνες γυαλιού πολυαμιδίου PA66-GF30 σε κατεργασίες με αφαίρεση υλικού. Η κατεργαστικότητά του αποδόθηκε μέσω της μελέτης των αναπτυσσόμενων δυνάμεων κοπής και άλλων παραμέτρων κατεργαστικότητας στις κυριότερες συμβατικές μηχανουργικές κατεργασίες, την τόρνευση, το φραιζάρισμα και την διάτρηση. Η συγκεκριμένη μελέτη φιλοδοξεί να συμβάλει στον εμπλουτισμό της επιστημονικής γνώσης, μέσα από μια πρωτότυπη ως προς το αντικείμενο έρευνα, καθώς δεν έχει πραγματοποιηθεί κάτι ανάλογο και σε αυτήν την έκταση στο παρελθόν για τα ενισχυμένα σύνθετα πολυμερή αυτού του τύπου.

10.2 Μεθοδολογία και στάδια ανάπτυξης της διατριβής

Ο θεωρητικός υπολογισμός των δυνάμεων κατά την κοπή του PA66-GF30 πραγματοποιήθηκε μέσω των θεωρητικών και εμπειρικών σχέσεων που έχουν αναπτυχθεί για τα μέταλλα με κατάλληλη προσαρμογή τους στα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού. Για τον υπολογισμό αρχικά χρησιμοποιήθηκε η θεμελιώδης θεωρία της κοπής των μετάλλων των Ernst και Merchant και στη συνέχεια η ημι-εμπειρική μεθοδολογία των Kienzle και Victor, γνωστή και ως το μοντέλο της ειδικής αντίστασης κοπής.

Στην πρώτη περίπτωση, ο υπολογισμός των δυνάμεων συντελέστηκε υπο συνθήκες ορθογωνικής κοπής και οδήγησε στην κατάλληλη διαμόρφωση των θεωρητικών σχέσεων των Ernst και Merchant, που βασίζονται στο πρότυπο του επιπέδου διατμήσεως. Χαρακτηριστικά, όπως το πραγματικό πάχος του αποβλίττου, η μέση διατμητική τάση και ο διορθωτικός συντελεστής δ υπολογισμού της γωνίας διάτμησης, συσχετίστηκαν με τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου υλικού και συντέλεσαν στον υπολογισμό της γωνίας διάτμησης, της μέσης φαινόμενης γωνίας τριβής και του συντελεστή συμπιέσεως του αποβλίττου. Γνωρίζοντας τα συγκεκριμένα δεδομένα, υπολογίστηκαν μέσω της βελτιωμένης θεωρίας του Merchant οι

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

δυνάμεις κοπής. Όλες οι σχέσεις υπολογισμού των παραπάνω δίνονται συγκεντρωτικά στο Κεφάλαιο 4.4.

Κατά τη δεύτερη θεωρητική προσέγγιση, η ημι-εμπειρική μεθοδολογία των Kienzle και Victor, γνωστή και ως το μοντέλο της ειδικής αντίστασης κοπής, εφαρμόστηκε στη διαμήκη τόρνευση του ενισχυμένου πολυμερούς σε συνθήκες επίσης ορθογωνικής κοπής. Μέσω πειραματικών δεδομένων αντίστοιχων συνθηκών, προσδιορίστηκαν η ειδική αντίσταση κοπής k_{st1} και η σταθερά z_t, οι οποίες σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μεθοδολογία συσχετίζουν τις δυνάμεις κοπής με τις διαστάσεις του αποβλίττου, το πάχος και το μήκος του. Οι σταθερές αυτές αποτελούν χαρακτηριστικά του ενισχυμένου πολυαμιδίου και εξαρτώνται κυρίως από τις ιδιότητες των υλικών του. Οι τιμές των σταθερών και οι σχέσεις υπολογισμού των δυνάμεων κοπής βάσει των ημι-εμπειρικών μοντέλων, συνοψίζονται στο Κεφάλαιο 4.4.

Η μελέτη της κατεργαστικότητας του σύνθετου πολυαμιδίου σε πειραματικό επίπεδο διεξήχθη πραγματοποιώντας πειράματα στις κυριότερες συμβατικές κατεργασίες κοπής. Συγκεκριμένα, εκτελέστηκαν πειράματα διαμήκης τόρνευσης σε συνθήκες ορθογωνικής κοπής, μετωπικό φραιζάρισμα μικτών συνθηκών (αντίρροπο – ομόρροπο) και διάτρηση διαμπερών οπών. Σε κάθε περίπτωση, η πειραματική διαδικασία συντελέστηκε βάσει του πλήρους παραγοντικού σχεδιασμού και έγινε χρήση στατιστικών εργαλείων, όπως η περιγραφική στατιστική, η ανάλυση διακύμανσης, η ανάλυση παλινδρόμησης και οι επιφάνειες προσαρμογής. Εξετάστηκε η επίδραση των παραγόντων κοπής (συνθήκες κατεργασίας) σε βασικούς παραμέτρους κατεργαστικότητας και μέσω ολοκληρωμένης στατιστικής ανάλυσης αποδόθηκε τεκμηριωμένα η σημαντικότητα και η αλληλεπίδρασή τους με ποσοτικοποίηση. Επίσης, καταρτίστηκαν στοχαστικά μοντέλα υψηλής αξιοπιστίας και ακρίβειας προσαρμογής, που συσχετίζουν τις παραμέτρους κατεργαστικότητας με τους παράγοντες της κοπής, την πρόωση και την ταχύτητα κοπής. Η προσαρμογή των μοντέλων ελέγχθηκε μέσω της εξέτασης του τυπικού σφάλματος και του συντελεστή προσδιορισμού, ενώ η εγκυρότητα και αξιοπιστία τους μέσω της μελέτης των γραφημάτων των καταλοίπων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα ελέγχθηκαν και αξιολογήθηκαν μέσω πρόσθετων πειραματικών μετρήσεων σε νέους τυχαίους συνδυασμούς τιμών των παραγόντων, εντός του εύρους τιμών ισχύος τους (Πίνακες 10.1-10.4)[1]. Στην περίπτωση της τόρνευσης, οι νέες πειραματικές μετρήσεις και οι εκτιμήσεις των στοχαστικών μοντέλων αντιπαρατέθηκαν επίσης με τις τιμές των δυνάμεων που αποδίδουν οι προαναφερθείσες διαμορφωμένες θεωρητικές σχέσεις στους αντίστοιχους συνδυασμούς των παραγόντων κοπής, καθώς τα πειράματα αποτίμησης διεξήχθησαν σε συνθήκες ορθογωνικής κοπής. Από τα ποσοστά απόκλισης της κάθε μεθόδου γίνεται αντιληπτό ότι υψηλότερη ακρίβεια συσχέτισης για κάθε δύναμη κοπής επιτυγχάνουν τα στοχαστικά μοντέλα (Πίνακας 10.1).

Πίνακας 10.1: Πειράματα αποτίμησης των διαφορετικών μεθόδων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής, κατά την τόρνευση του PA66-GF30.

		Αποτίμηση των μεθόδων υπολογισμού των δυνάμεων κοπής για την τόρνευση του PA66-GF30						
		1	2	3	4	5	6	***Μέσος όρος****
	S (mm/rev)	0,08	0,14	0,22	0,08	0,14	0,22	
	V (m/min)	275	275	275	425	425	425	
F_t (N)	***Μέτρηση***	51,03	73,36	137,65	43,86	66,51	131,08	
	ANOVA	47,18	79,00	127,13	44,17	73,49	118,28	
	Απόκλιση	-7,55%	7,69%	-7,64%	0,71%	10,50%	-9,76%	7,31%
	Merchant	46,97	87,49	124,07	45,88	79,02	120,86	
	Απόκλιση	-7,96%	19,26%	-9,86%	4,61%	18,81%	-7,80%	11,38%
	Kienzle	48,23	81,33	124,02	35,35	76,22	115,93	
	Απόκλιση	-5,48%	10,86%	-9,90%	-19,40%	14,60%	-11,56%	11,97%
F_r (N)	***Μέτρηση***	6,19	10,08	14,89	4,41	7,18	12,42	
	ANOVA	5,85	9,27	13,84	4,94	7,67	11,30	
	Απόκλιση	-5,57%	-8,02%	-7,05%	12,08%	6,76%	-9,06%	8,09%
	Merchant	6,64	10,30	12,66	5,44	8,13	9,23	
	Απόκλιση	7,24%	2,22%	-14,96%	23,27%	13,18%	-25,65%	14,42%
	Kienzle	5,62	8,91	12,93	4,98	7,61	10,72	
	Απόκλιση	-9,18%	-11,60%	-13,19%	12,96%	6,04%	-13,65%	11,10%
F_v (N)	***Μέτρηση***	23,68	39,01	58,29	18,77	27,23	45,92	
	ANOVA	24,93	37,37	53,96	20,84	29,90	41,98	
	Απόκλιση	5,30%	-4,19%	-7,43%	11,04%	9,81%	-8,58%	7,73%
	Kienzle	24,71	36,81	50,80	21,00	30,16	40,40	
	Απόκλιση	4,33%	-5,63%	-12,85%	11,89%	10,76%	-12,02%	9,58%

**Ο μέσος όρος προκύπτει από τις απόλυτες τιμές των αποκλίσεων.*

[1] Δεν περιλαμβάνονται οι παράμετροι που τα στοχαστικά τους μοντέλα έχουν συντελεστή συσχέτισης μικρότερο του 80%.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 10.2: Πειράματα αποτίμησης των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων τραχύτητας, για την τόρνευση του PA66-GF30.

		Αποτίμηση των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων τραχύτητας για την τόρνευση του PA66-GF30						
		1	2	3	4	5	6	*Μέσος όρος**
	S (mm/rev)	0,08	0,14	0,22	0,08	0,14	0,22	
	V (m/min)	275	275	275	425	425	425	
Ra (μm)	*Μέτρηση*	1,38	2,87	5,61	1,03	1,92	4,54	
	ANOVA	1,44	2,64	5,35	1,12	2,10	4,54	
	Απόκλιση	4,51%	-8,17%	-4,65%	9,07%	9,60%	-0,11%	6,02%
Rt (μm)	*Μέτρηση*	11,95	25,08	38,14	8,96	15,68	30,21	
	ANOVA	12,38	22,41	35,78	9,39	17,50	28,32	
	Απόκλιση	3,63%	-10,65%	-6,20%	4,75%	11,60%	-6,27%	7,18%
Rp (μm)	*Μέτρηση*	4,84	9,26	16,24	3,04	7,27	13,02	
	ANOVA	4,36	8,53	17,97	3,30	6,42	14,49	
	Απόκλιση	-9,99%	-7,94%	10,68%	8,40%	-11,64%	11,26%	9,99%
Rsm (mm)	*Μέτρηση*	0,14	0,32	0,55	0,12	0,26	0,37	
	ANOVA	0,16	0,29	0,51	0,13	0,22	0,40	
	Απόκλιση	12,90%	-10,70%	-7,50%	9,00%	-14,03%	8,08%	10,37%

**Ο μέσος όρος προκύπτει από τις απόλυτες τιμές των αποκλίσεων.*

Πίνακας 10.3: Πειράματα αποτίμησης των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων κατεργαστικότητας του PA66-GF30 σε φραιζάρισμα.

		Αποτίμηση των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων κατεργαστικότητας για το φραιζάρισμα του PA66-GF30						
		1	2	3	4	5	6	*Μέσος όρος**
	S (mm/rev)	0,24	0,28	0,36	0,24	0,28	0,36	
	V (m/min)	150	150	150	350	350	350	
Fx (N)	*Μέτρηση*	53,24	64,28	74,21	50,06	57,44	71,95	
	ANOVA	57,23	61,50	79,66	53,42	55,38	68,94	
	Απόκλιση	7,49%	-4,33%	7,35%	6,71%	-3,58%	-4,18%	5,61%
Fy (N)	*Μέτρηση*	81,23	89,14	115,03	78,62	80,11	101,47	
	ANOVA	78,44	84,71	108,48	72,78	76,69	95,74	
	Απόκλιση	-3,43%	-4,97%	-5,69%	-7,43%	-4,27%	-5,64%	5,24%
Fz (N)	*Μέτρηση*	11,94	16,04	29,08	12,14	14,56	23,43	
	ANOVA	13,03	15,89	25,66	10,71	12,95	21,48	
	Απόκλιση	9,17%	-0,93%	-11,75%	-11,81%	-11,09%	-8,31%	8,84%
Ra (μm)	*Μέτρηση*	0,78	0,93	1,04	0,87	0,91	0,93	
	ANOVA	0,86	0,89	0,96	0,79	0,82	0,87	
	Απόκλιση	10,29%	-3,78%	-7,31%	-8,77%	-9,83%	-5,99%	7,66%
Rz (μm)	*Μέτρηση*	6,12	6,84	7,27	4,85	5,96	6,63	
	ANOVA	5,69	5,77	6,57	5,39	5,47	6,28	
	Απόκλιση	-7,06%	-15,68%	-9,60%	11,18%	-8,18%	-5,33%	9,50%
Rt (μm)	*Μέτρηση*	6,59	7,14	9,05	7,48	7,56	9,02	
	ANOVA	7,33	7,57	8,38	6,99	7,10	7,66	
	Απόκλιση	11,27%	5,95%	-7,42%	-6,57%	-6,15%	-15,12%	8,75%
Rsm (mm)	*Μέτρηση*	0,076	0,095	0,118	0,071	0,092	0,106	
	ANOVA	0,084	0,086	0,100	0,081	0,083	0,097	
	Απόκλιση	10,82%	-9,51%	-15,17%	14,11%	-10,04%	-8,59%	11,37%
Rsk	*Μέτρηση*	-0,41	-0,52	-0,41	-0,27	-0,48	-0,42	
	ANOVA	-0,45	-0,60	-0,51	-0,31	-0,45	-0,36	
	Απόκλιση	10,32%	14,59%	23,51%	15,09%	-5,36%	-13,14%	13,67%

**Ο μέσος όρος προκύπτει από τις απόλυτες τιμές των αποκλίσεων.*

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας 10.4: Πειράματα αποτίμησης των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων κατεργαστικότητας του PA66-GF30 σε διάτρηση.

		Αποτίμηση των στοχαστικών μοντέλων των παραμέτρων κατεργαστικότητας για τη διάτρηση του PA66-GF30						
		1	2	3	4	5	6	*Μέσος όρος**
	S (mm/rev)	0,1	0,2	0,3	0,1	0,2	0,3	
	V (m/min)	15	15	15	30	30	30	
Fv (N)	***Μέτρηση***	63,83	105,97	157,32	40,12	92,38	156,41	
	ANOVA	66,51	118,13	169,74	36,02	98,28	160,54	
	Απόκλιση	4,20%	11,47%	7,90%	-10,22%	6,39%	2,64%	7,14%
Md (Ncm)	***Μέτρηση***	33,74	60,02	95,16	22,12	51,64	91,06	
	ANOVA	35,11	55,27	90,30	23,85	48,20	87,43	
	Απόκλιση	4,07%	-7,92%	-5,11%	7,84%	-6,66%	-3,99%	5,93%
Fd	***Μέτρηση***	1,087	1,104	1,126	1,008	1,056	1,096	
	ANOVA	1,008	1,010	1,018	1,011	1,013	1,021	
	Απόκλιση	-7,27%	-8,47%	-9,57%	0,25%	-4,06%	-6,85%	6,08%
Ra (μm)	***Μέτρηση***	3,96	4,86	6,11	4,21	5,34	6,18	
	ANOVA	4,40	5,20	6,64	3,97	4,77	6,21	
	Απόκλιση	11,05%	7,06%	8,63%	-5,73%	-10,59%	0,47%	7,25%
Rz (μm)	***Μέτρηση***	26,19	32,45	48,17	20,11	33,6	45,08	
	ANOVA	28,64	34,30	45,20	24,48	30,14	41,04	
	Απόκλιση	9,35%	5,70%	-6,16%	21,73%	-10,30%	-8,96%	10,36%
Rt (μm)	***Μέτρηση***	37,12	45,37	63,48	35,18	44,81	60,25	
	ANOVA	41,94	49,62	71,13	33,10	40,77	62,28	
	Απόκλιση	13,00%	9,36%	12,04%	-5,91%	-9,01%	3,37%	8,78%

**Ο μέσος όρος προκύπτει από τις απόλυτες τιμές των αποκλίσεων.*

Τέλος, μέσω των καταρτισμένων στοχαστικών μοντέλων πραγματοποιήθηκε η χαρτογράφηση του ενισχυμένου πολυμερούς στις μηχανουργικές κατεργασίες, κατασκευάζοντας τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπύλων. Οι χαρακτηριστικές καμπύλες κατασκευάστηκαν αναπτύσσοντας τα στοχαστικά μοντέλα σε ενδιάμεσες, προκαθορισμένες και διαβαθμισμένες τιμές των επιπέδων των παραγόντων και αποτελούν διαγράμματα των αποκρίσεων σε συνάρτηση με το χρόνο κοπής της κατεργασίας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

10.3 Σύνοψη αποτελεσμάτων

Η παρούσα ερευνητική εργασία ανέδειξε την κατεργαστικότητα του ενισχυμένου πολυαμιδίου PA66-GF30, ένα πλαστικό που ανήκει σε μια ξεχωριστή κατηγορία σύνθετων υλικών, τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά με ενίσχυση κοντές ίνες υάλου τυχαίου προσανατολισμού. Από την ολοκληρωμένη θεωρητική και πειραματική μελέτη που πραγματοποιήθηκε, προέκυψαν οι ακόλουθες συμπερασματικές διαπιστώσεις:

- Η θεωρητική προσέγγιση του μηχανισμού της κοπής του PA66-GF30, σύμφωνα με τη θεωρία της κοπής των μετάλλων των Ernst και Merchant, είναι εφικτή και αρκετά ικανοποιητική, μέσω κατάλληλων διαμορφώσεων των σχέσεων και υπολογισμού διορθωτικών συντελεστών (Κεφάλαιο 4.4). Βάσει των πειραμάτων αποτίμησης (Πίνακας 10.1) οι τιμές των δυνάμεων κοπής που αποδίδουν οι προσαρμοσμένες σχέσεις αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές σε ποσοστό της τάξης του 13% (11,5%-14,5%). Τα αποτελέσματα αυτά επιβεβαιώνουν αντίστοιχη προηγούμενη έρευνα, όσον αφορά τη μελέτη της κοπής του ενισχυμένου πολυαμιδίου μέσω της συγκεκριμένης θεωρητικής μεθοδολογίας.

- Η θεωρητική προσέγγιση του μηχανισμού της κοπής του PA66-GF30, σύμφωνα με την ημι-εμπειρική μεθοδολογία των Kienzle και Victor, είναι εφικτή και αποτελεσματική, μέσω της συσχέτισης των απαραίτητων για την επίλυση των σχέσεων σταθερών με τα χαρακτηριστικά του σύνθετου υλικού (Κεφάλαιο 4.4). Βάσει των πειραμάτων αποτίμησης (Πίνακας 10.1) οι τιμές των δυνάμεων κοπής που αποδίδουν οι διαμορφωμένες εμπειρικές σχέσεις αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές σε ποσοστό της τάξης του 11% (9,5%-12%).

- Η προσέγγιση της κοπής του PA66-GF30, μέσω πειραματικού σχεδιασμού και στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων, απέδωσε στοχαστικά μοντέλα υπολογισμού των δυνάμεων κοπής εξαιρετικά υψηλής ακρίβειας προσαρμογής (Πίνακας 7.21). Η αποτίμηση των διαφορετικών μεθοδολογιών, που εφαρμόστηκαν ως προς τον υπολογισμό των δυνάμεων κοπής κατά τη διαμήκη τόρνευση (σε συνθήκες ορθογωνικής κοπής), απέδειξε τη σημαντική υπερίσχυση των στοχαστικών μοντέλων ως

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

προς την ικανότητα πρόβλεψης, καθώς οι τιμές που αποδίδουν αποκλίνουν από τις πραγματικές σε ποσοστό της τάξης του 7,5% (7%-8%).

- Η μελέτη της διαμήκους τόρνευσης του PA66-GF30, μέσω πειραματικού σχεδιασμού και στατιστικής ανάλυσης των πειραματικών μετρήσεων των παραμέτρων τραχύτητας, απέδωσε στοχαστικά μοντέλα υψηλής ακρίβειας προσαρμογής (Πίνακας 7.22). Βάσει των πειραμάτων αποτίμησης (Πίνακας 10.2) οι τιμές των παραμέτρων τραχύτητας που αποδίδουν τα στοχαστικά μοντέλα αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές σε ποσοστό της τάξης του 8% (6%-10%).

- Ο πειραματικός σχεδιασμός και η στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του ενισχυμένου πολυαμιδίου PA66-GF30 οδήγησαν στην κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων υπολογισμού παραμέτρων κατεργαστικότητας υψηλής ακρίβειας προσαρμογής (Πίνακας 8.18). Βάσει των πειραμάτων αποτίμησης (Πίνακας 10.3) οι τιμές των παραμέτρων που αποδίδουν τα στοχαστικά μοντέλα αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές σε ποσοστό της τάξης του 9% (5%-13,5%).

- Ο πειραματικός σχεδιασμός και η στατιστική ανάλυση των πειραματικών μετρήσεων κατά την διάτρηση του PA66-GF30 συντέλεσαν στην κατάρτιση στοχαστικών μοντέλων υπολογισμού παραμέτρων κατεργαστικότητας, υψηλής ακρίβειας προσαρμογής (Πίνακας 9.15). Βάσει των πειραμάτων αποτίμησης (Πίνακας 10.4), οι τιμές των παραμέτρων που αποδίδουν τα στοχαστικά μοντέλα αποκλίνουν από τις πραγματικές τιμές σε ποσοστό της τάξης του 8% (6%-10%).

- Η επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, μέσω των εργαλείων της στατιστικής ανάλυσης και κυρίως της ανάλυσης διακύμανσης, κατέδειξε τη σημαντικότητα των παραγόντων κοπής (συνθήκες κατεργασίας) και της αλληλεπίδρασης αυτών στις παραμέτρους κατεργαστικότητας (μετρούμενα μεγέθη). Σύμφωνα με τα στατιστικά δεδομένα, η πρόωση αποτελεί το σημαντικότερο παράγοντα κοπής σε κάθε μηχανουργική κατεργασία του σύνθετου PA66-GF30, επηρεάζοντας ανάλογα τις παραμέτρους

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

κατεργαστικότητας με ποσοστά που ανέρχονται από 48% μέχρι και 98%[1]. Η επίδραση της ταχύτητας κοπής είναι μικρότερης βαρύτητας και στις περισσότερες περιπτώσεις επηρεάζει αντιστρόφως ανάλογα τις αποκρίσεις με ποσοστά 2% με 48%. Ισχυρή είναι επίσης η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων που ανέρχεται ακόμα και στο ποσοστό του 8,6%, η οποία και λαμβάνεται υπόψη κατά την κατάρτιση των στοχαστικών μοντέλων. Στο τέλος του κάθε κεφαλαίου των πειραματικών αποτελεσμάτων παρουσιάζεται η επίδραση των παραγόντων σε κάθε παράμετρο κατεργαστικότητας ποσοτικοποιημένα (Πίνακας 7.23, Πίνακας 8.19, Πίνακας 9.16).

- Η εκτέλεση πειραμάτων στις τρεις μηχανουργικές κατεργασίες απέδειξε ότι οι δυνάμεις που αναπτύσσονται κατά την κοπή του πολυαμιδίου PA66-GF30 είναι σε κάθε περίπτωση σχετικά χαμηλές και βρίσκονται κοντά στα επίπεδα ενός ελαφρού μετάλλου, λαμβάνοντας τιμές μεταξύ 30-160N για την τόρνευση (Πίνακας Α2), 90-175N για το φραιζάρισμα (Πίνακας Β2) και 30-175N για την διάτρηση (Πίνακας 9.7). Επίσης, η επιφανειακή τραχύτητα που προκύπτει από τη μηχανουργική κατεργασία του μπορεί να λάβει με κατάλληλο συνδυασμό των παραγόντων κοπής αρκετά χαμηλές τιμές, αποδίδοντας εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας (π.χ. 0,75μm για την παράμετρο Ra κατά την τόρνευση και το φραιζάρισμα, Πίνακας 7.8 και Πίνακας 8.7). Η συμπεριφορά αυτή των εξεταζόμενων παραμέτρων κατεργαστικότητας αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό διαθέτει αρκετά καλή κατεργαστικότητα. Παράλληλα, η υψηλή συσχέτιση που επιτυγχάνουν τα στοχαστικά μοντέλα, για τις περισσότερες παραμέτρους που μελετώνται, δηλώνει ότι η μηχανουργική κατεργασία του ενισχυμένου πολυαμιδίου είναι ελεγχόμενη και κατά μεγάλο ποσοστό προβλέψιμη.

- Ο παραγοντικός πειραματικός σχεδιασμός αποδείχτηκε αποτελεσματική μέθοδος κατασκευής αξιόπιστων μοντέλων προσαρμογής, με πολύ υψηλό βαθμό συσχέτισης ικανών για τη μελλοντική πρόβλεψη τιμών. Επίσης, μέσω της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA) δίνεται η δυνατότητα καθορισμού της σημαντικότητας των παραγόντων και του τρόπου επίδρασής τους στις αποκρίσεις, καθώς και το μέγεθος της αλληλεπίδρασής τους. Η επιρροή τους

[1] Δεν περιλαμβάνονται τα ποσοστά επίδρασης που αφορούν παραμέτρους, για τους οποίους ο συντελεστής συσχέτισης των στοχαστικών μοντέλων είναι πολύ χαμηλός.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

χαρακτηρίζεται σε θετική ή αρνητική και το μέγεθος της επίδρασής τους ποσοτικοποιείται.

- Τα καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα και τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπυλών αποτελούν έγκυρες και αξιόπιστες βιομηχανικές βάσεις δεδομένων της μηχανουργικής κατεργασίας του ενισχυμένου πολυαμιδίου PA66-GF30. Τα μοντέλα και τα διαγράμματα έχουν ισχύ μέσα στο εύρος μεταβολής των συνθηκών κοπής κατά το οποίο κατασκευάστηκαν (εύρος τιμών των παραγόντων των πειραμάτων, Πίνακας 7.3, 8.3 και 9.3). Στα Παραρτήματα Α4, Β4 και Γ4 δίνονται οι χαρακτηριστικές καμπύλες του ενισχυμένου πλαστικού PA66-GF30, για όλες τις παραμέτρους κατεργαστικότητας που μελετήθηκαν σε κάθε κατεργασία. Αποτελούν άμεσα εφαρμόσιμη και εύχρηστη βάση δεδομένων, που οδηγεί σε βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς παρέχουν τη δυνατότητα καθορισμού των παραμέτρων κατεργαστικότητας μέσω της κατάλληλης επιλογής των παραγόντων κοπής.

- Η μεθοδολογία κατάρτισης των στοχαστικών μοντέλων που παρουσιάστηκε, καθώς και η διαδικασία ανάπτυξής τους σε κοινό διάγραμμα με τον χρόνο εκτέλεσης της κοπής, διαμόρφωσαν τα διαγράμματα των χαρακτηριστικών καμπυλών των παραμέτρων κατεργαστικότητας, αναδεικνύοντας μια εμπεριστατωμένη καινοτόμο μέθοδο κατασκευής βάσεων δεδομένων, τόσο για τα σύνθετα υλικά αυτού του τύπου, όσο και για κάθε ομογενές υλικό.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

10.4 Προτάσεις πρόσθετων ερευνητικών εργασιών

Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε προσφέρει στην παραγωγική διαδικασία της βιομηχανίας πρότυπα και άμεσα εφαρμόσιμα νέα δεδομένα. Προς εμβάθυνση και επέκταση των γνώσεων που αποκτήθηκαν με την ολοκλήρωσή της, προτείνεται περαιτέρω ερευνητική εργασία σύμφωνα με τις ακόλουθες προτάσεις:

- Εξέταση της κοπής των σύνθετων υλικών του συγκεκριμένου τύπου με περισσότερες θεωρητικές μεθοδολογίες, όπως της θεωρίας των Lee και Shaffer (όπου το επίπεδο διάτμησης έχει την κατεύθυνση της μέγιστης διατμητικής τάσης και προτείνεται το πεδίο γραμμών ολισθήσεως με τον αντίστοιχο κύκλο του Mohr), της θεωρίας του Hill (όπου ισχυρίζεται ότι η τιμή της γωνίας διάτμησης δεν είναι μοναδική) και των Palmer και Oxley (που αφορά στην μελέτη των παραμορφώσεων κατά την κοπή σε πολύ χαμηλές ταχύτητες).

- Βελτίωση της ακρίβειας των στοχαστικών μοντέλων και διεύρυνση της ισχύς τους όσον αφορά τις συνθήκες κοπής, μέσω της διεύρυνσης του εύρους τιμών των παραγόντων κοπής.

- Βελτίωση του πειραματικού σχεδιασμού με ταυτόχρονη εξέταση περισσότερων παραγόντων κοπής (π.χ. γεωμετρία ή υλικό του κοπτικού εργαλείου), ή με πραγματοποίηση σχεδιασμών διαφορετικού τύπου (π.χ. Taguchi, Blocking, Confounding κ.α.), ανάλογα με τις υπάρχουσες συνθήκες και την πειραματική διαδισκασία που μελετάται.

- Διεύρυνση της βάσης δεδομένων των στοχαστικών μοντέλων και των χαρακτηριστικών καμπυλών, κατασκευάζοντας στοχαστικά μοντέλα παραμέτρων κατεργαστικότητας για όσο το δυνατό περισσότερα υλικά (σύνθετα υλικά ομοίου τύπου και συμβατικά) και παραμέτρους κατεργαστικότητας (π.χ. φθορά του κοπτικού εργαλείου, βάθος κοπής, περισσότερες παραμέτρους τραχύτητας κτλ).

- Κατασκευή και προώθηση ηλεκτρονικών-ψηφιακών αυτοματοποιημένων βάσεων δεδομένων, που θα αποδίδουν τις χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας (π.χ. κατασκευή λογισμικού σε γλώσσα προγραμματισμού ή μέσω μαθηματικών-υπολογιστικών λογισμικών του

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

εμπορίου, τύπου Excel ή Matlab). Στόχος η ανάπτυξη και ανάδειξη μιας νέας μορφής τράπεζας πληροφοριών, αξιόπιστης και εύχρηστης, κατασκευασμένης από καταρτισμένα στοχαστικά μοντέλα πολυωνυμικής μορφής υψηλής ακρίβειας, που θα συντελεί στην ταχύτερη βελτιστοποίηση της μηχανουργικής παραγωγής. Παράλληλα, μπορούν να παρέχονται στο χρήστη ψηφιακά εργαλεία και επιλογές, για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των διαγραμμάτων, όπως:

-Ανάπτυξη διορθωτικών συντελεστών που θα διαμορφώνουν τις καμπύλες των διαγραμμάτων, συσχετίζοντας και άλλα χαρακτηριστικά της κοπής (π.χ. μετατόπιση των καμπυλών[1], βάσει των τιμών του βάθους κοπής, των γωνιών κοπής, της χρήσης υγρών κοπής διαφορετικού ιξώδους κ.α.) για την άμεση απόκρισή τους στην εφαρμογή.

-Συνδυασμός συμπληρωματικών δεδομένων στο διάγραμμα των χαρακτηριστικών καμπυλών (π.χ. περιορισμός, λόγω των χαρακτηριστικών της εργαλειομηχανής ή του εργαλείου κοπής, Σχήμα 10.):

-Περιορισμός των συνθηκών κοπής από άλλα δεδομένα (π.χ. από διάγραμμα με τις χαρακτηριστικές καμπύλες της φθοράς του εργαλείου κοπής, Σχήμα 10.2).

-Δυνατότητα άμεσης ανάπτυξης διορθωτικού συντελεστή από το χρήστη, για τη μετατόπιση των καμπυλών του διαγράμματος, κατά την τιμή που αποκλίνουν από την πραγματικότητα, βάσει ενδείξεων της εφαρμογής.

-Δυνατότητα υπολογισμού του πραγματικού χρόνου κοπής.

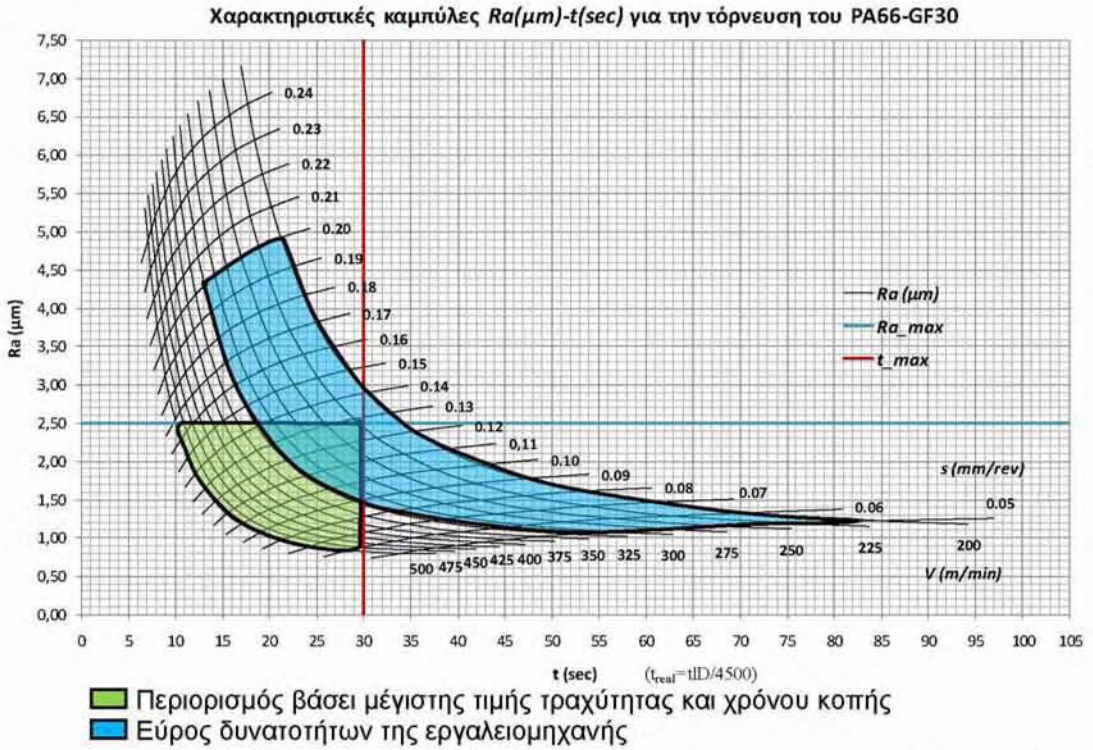
-Δυνατότητα επεξεργασίας/τροποποίησης των δεδομένων.

-Δυνατότητα καταχώρησης νέων δεδομένων.

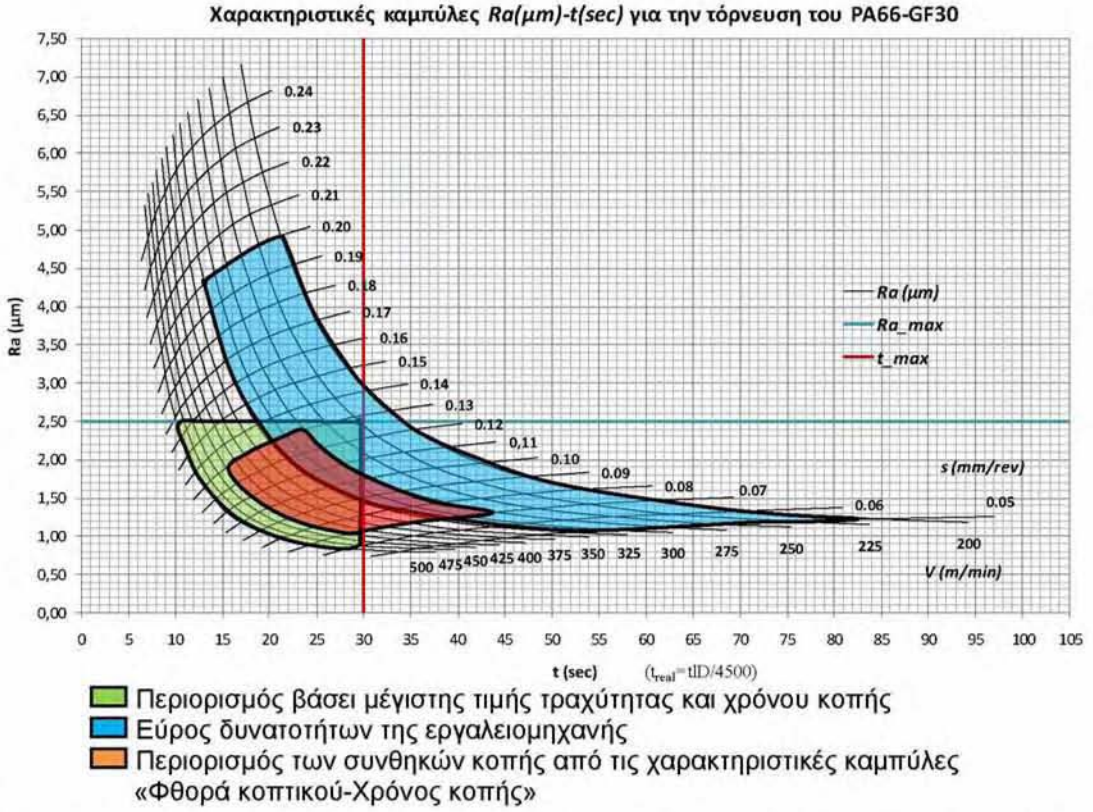
-Δυνατότητα διαδικτυακής πρόσβασης με στόχο την ανάδειξη και προώθηση της ψηφιακής βάσης, καθώς και τον συνεχή εμπλουτισμό της από τους χρήστες.

[1] Διορθωτικοί συντελεστές που θα μεταβάλλουν τους συντελεστές των στοχαστικών μοντέλων.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα 10.1: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα και στον χρόνο κοπής, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής.



Σχήμα 10.2: Χαρακτηριστικές καμπύλες Ra(μm)-t(sec) για την τόρνευση του PA66-GF30, επιλογή τιμών των παραγόντων βάσει περιορισμού στην τραχύτητα και στον χρόνο κοπής, σε συνδυασμό με τις δυνατότητες της εργαλειομηχανής και τον περιορισμό των συνθηκών κοπής από τις χαρακτηριστικές καμπύλες Φθορά κοπτικού-Χρόνου κοπής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Στα πλαίσια εκπόνησης της διατριβής κατασκευάστηκε στο λογισμικό MS-Excel ψηφιακή βάση δεδομένων με αρκετά από τα προαναφερθέντα εργαλεία. Παρέχει την δυνατότητα καταχώρησης και επισκόπησης των πολυωνυμικών στοχαστικών μοντέλων κατηγοριοποιημένα, σύμφωνα με το υλικό (Σιδηρούχο, Μη Σιδηρούχο και Μη Μεταλλικό) και την κατεργασία (Τόρνευση, Φραιζάρισμα και Διάτρηση), μέσω αυτόματης φόρμας εισαγωγής ή επιλογής αντίστοιχα. Επίσης, βάσει των στοχαστικών μοντέλων παράγει το διάγραμμα των χαρακτηριστικών καμπύλων και παρέχει επιλογές τροποποίησής του, καθώς και δυνατότητα εκτύπωσης. Το συγκεκριμένο υπολογιστικό φύλλο είναι κατασκευασμένο κατά κύριο λόγο με μακροεντολές του Excel (γλώσσα προγραμματισμού Visual Basic) και αποτελεί ένα πρότυπο πρόγραμμα κατασκευής ψηφιακής και αυτοματοποιημένης βάσης δεδομένων των παραμέτρων κατεργαστικότητας συμβατικών κατεργασιών κοπής.

- Μοντελοποίηση των παραμέτρων κατεργαστικότητας με διαφορετικές μεθοδολογίες, όπως της Υπολογιστικής Νοημοσύνης με τις τεχνικές μηχανές εκμάθησης (π.χ. τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, ο Γενετικός Προγραμματισμός, οι Ευφυείς και οι Εξελικτικοί αλγόριθμοι κ.α.). Πρόκειται για μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μέσα από διεξαγωγές ερευνών της Τεχνητής Νοημοσύνης και χρησιμοποιεί εξελιγμένες τεχνικές, μη γραμμικής μοντελοποίησης, ευέλικτες και ικανές να μοντελοποιήσουν εξαιρετικά πολύπλοκα συστήματα.

- Μελέτη της κοπής σύνθετων υλικών με διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως οι υπολογιστικές μέθοδοι (πεπερασμένα στοιχεία), με στόχο την αποτελεσματική και αξιόπιστη προσομοίωση της κατεργασίας, η οποία θα δίνει τη δυνατότητα της άμεσης επίβλεψης των παραμέτρων κατεργαστικότητας.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

10.5 Επίλογος

Η συγκεκριμένη διατριβή βασίστηκε σε διαχρονικές θέσεις και θεωρίες της φυσικής, της μηχανικής και των υλικών. Αναπτύχθηκε λαμβάνοντας υπόψη προηγούμενη έρευνα σχετικού αντικειμένου και μέσω των διαπιστώσεων, των συμπερασμάτων και των καινοτομιών που ανέπτυξε, φιλοδοξεί να αποτελέσει συνέχεια αυτής. Παράλληλα με τη γνώση που αποκτήθηκε, η παρούσα μελέτη επιδιώκει να αποτελέσει κίνητρο για περαιτέρω ερευνητική εργασία στο συγκεκριμένο τομέα, προσελκύοντας το επιστημονικό ενδιαφέρον.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

10.6 Δημοσιεύσεις

Η έρευνα της παρούσας διατριβής συντέλεσε στη δημοσίευση των εξής εργασιών[1]:

I. Ntziantzias, J. Kechagias, N. Fountas, S. Maropoulos, N. M. Vaxevanidis, "A cutting force model in turning of glass fiber reinforced polymer composite", International Conference on Economic Engineering and Manufacturing Systems, 24-25 November 2011, Braşov, Romania, RECENT, 12(3), pp. 348-351

I. Ntziantzias, J. Kechagias, M. Pappas, N.M. Vaxevanidis, "An experimental study of cutting force system during turning of a glass fiber reinforced polymer composite", Proc. 4th International Conference on Manufacturing Engineering – ICMEN, 3-5 October 2011, Thessaloniki, Greece, pp.113-122.

F. Mata, G. Petropoulos, **I. Ntziantzias**, J. Paulo Davim, "A surface roughness analysis in turning of polyamide PA-6 using statistical techniques", International Journal of Materials & Product Technology, Inderscience, 37, 1-2, (2010), pp. 173-187.

G. Petropoulos, **I. Ntziantzias**, P. Reis, J. Paulo Davim, "Predicting machinability parameters on drilling glass fibre reinforced plastics using response surface methodology", International Journal of Materials & Product Technology, Inderscience, 32, 2-3, (2008), pp. 243-263.

[1] Αφορούν σε δημοσιεύσεις που πραγματοποιήθηκαν μέχρι την ημερομηνία παρουσίασης της διατριβής.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Βιβλιογραφία

[1] Αντωνιάδης Α, (2010) «Κατασκευαστικές τεχνολογίες», Εργαστήριο Μικροκοπής και Κατασκευαστικής Προσομοίωσης, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.

[2] Αντωνιάδης Α., Πανταζόπουλος Γ. (2000) «Μηχανουργική Τεχνολογία ΙΙ (Κατεργασίες Διαμόρφωσης)», ΟΕΔΒ – ΤΕΕ – Αθήνα.

[3] Αντωνίου Σ., (1993) «Τριβολογία», Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

[4] Αντωνόπουλος Σ., (2009) «Ανάλυση και πειραματική θεώρηση παραμέτρων κατεργαστικότητας σύνθετου πολυμερούς Ertalon66 GF-30», Πτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος.

[5] Βασιλάκης Σ., (2005) «Διερεύνηση της κοπής με πίδακα νερού υψηλής πίεσης ως προς τους κύριους παράγοντες κατεργασίας, με χρήση παραγοντικού σχεδιασμού και στατιστικής συμπερασματολογίας», Πτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος.

[6] Βασιλειάδης Γ., «Διερεύνηση κατεργαστικότητας σε μετωπικό φραιζάρισμα του σύνθετου υλικού PA66-GF30», Πτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος.

[7] ΕΜΠ, «Εκπαιδευτικό Υλικό για το μάθημα Κατεργασίες ΙΙ», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών.

[8] Ιακώβου Α., (2005) «Πολυπαραμετρική ανάλυση και μοντελοποίηση επιφανειών κατεργασμένων με ηλεκτροδιάβρωση», Πτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος.

[9] Καλόγηρος Θ., (2008) «Προσδιορισμός μεγεθών κατεργαστικότητας πολυμερούς υλικού», Πτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος.

[10] Μητσούλης Ε., (1998) «Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά», Εκδόσεις ΕΜΠ.

[11] Μουρλάς Α., «Εργαστήριο Τριβολογίας», Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων, ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Μηχανολογίας, 2011.

[12] Μπάκος Δ. «Κατασκευή και προσδιορισμός μηχανικής συμπεριφοράς νέων σύνθετων υλικών τύπου Arall», Διδακτορική διατριβή, Πάτρα 1996

[13] Μπουζάκης Κ-Δ, (2010) «Μηχανική και Τεχνολογία Μηχανουργικών Μορφοποιήσεων με Αφαίρεση Υλικού», Εκδόσεις Ζήτη, Θεασσαλονίκη.

[14] Νιάρχου Ν., Μάμαλη Α. Γ., (1992) «Κατεργασίες των υλικών», Ε.Μ.Π.

[15] Πανεπιστημιακές Παραδόσεις ΕΜΠ, Εκπαιδευτικό Υλικό για το μάθημα «Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών»,

[16] Παντελάκης Σπ., «Τεχνολογία σύνθετων υλικών», Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πάτρα 1993 (1η Έκδοση)

[17] Παντελής Δ.Ι. «Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά», Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2008.

[18] Παπανικολάου Γ. «Σύνθετα υλικά», Εκδόσεις Κλειδάριθμος, Αθήνα 2007.

[19] Παπανικολάου Γ., Μουζάκης Δ. «Σύνθετα υλικά», Πανεπιστημιακές παραδόσεις, Πάτρα 2007.

[20] Παππάς Ι. «Μελέτη της συμπεριφοράς σε κόπωση στοχαστικών υλικών μέσω της χρήσης στοχαστικών και πιθανοθεωρητικών μοντέλων», Διδακτορική

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

διατριβή, Πάτρα 2001

[21] Πετρόπουλος, Π. Γ., (1986) «Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας. Θεσσαλονίκη: Εκδ. Γιαχούδη – Γιαπούλη.

[22] Πετρόπουλος, Π. Γ., (1991) «Μαθήματα Μηχανουργικής Τεχνολογίας – Θεωρία και Τεχνολογία Μηχανουργικών Κατεργασιών των Μετάλλων – Τεύχος ΙΙ», Εκδόσεις Ζήτη.

[23] Πετρόπουλος, Π. Γ., (1991) «Μηχανουργική Τεχνολογία - Εργαστήριο Ι.» Ίδρυμα Ευγενίδου.

[24] Πετρόπουλος Π. Γ., (1997) «Μεταλλουργία», Ίδρυμα Ευγενίδου.

[25] Πετρόπουλος, Π. Γ., (1998) «Μηχανουργική τεχνολογία Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων - Τόμος ΙΙ-1», Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη.

[26] Σταυρόπουλος Χ.Δ., «Πρόβλεψη της εναπομένουσας αντοχής πολύστρωτων ινωδών υλικών μετά από κρούση και βελτίωση της κρουστικής συμπεριφοράς τους με την εισαγωγή ενισχυτικών πλαστικών στρώσεων», Διδακτορική διατριβή, Πάτρα 1998.

[27] Χρυσόμαλλος Α. Γ., (2007) «Η κατεργασία της διάτρησης, τα εργαλεία της και η προσομοίωσης της», Πτυχιακή Εργασία, Τ.Ε.Ι Δυτικής Μακεδονίας, Κοζάνη.

[28] Χρυσουλάκη Γ. Δ., Παντελή Δ. Ι. (1996) «Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών», Εκδ. Παπασωτηρίου, Αθήνα.

[29] Abouelatta, O.B., Madl, J. (2001) "Surface roughness prediction based on cutting parameters and tool vibrations in turning operations", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 118, 269-277.

[30] Andersson, C, Andersson, M, Ståhl, J.E., (2011) "Experimental studies of cutting force variation in face milling", International Journal of Machine Tools & Manufacture 51, 67-76.

[31] Araujo P.W, Brereton R.G, (1996) "Experimental design II: optimization", Trends Anal. Chem., 15(2), 63-70.

[32] Arola D., Ramulu M., (1997) "Orthogonal cutting of fiber-reinforced composites: A finite element analysis", International Journal of Mechanical Science, 39(5): 597-613.

[33] Arola, D., Sultan, M. B., Ramulu, M., (2002) "Finite element modeling of edge trimming fiber reinforced plastics", Transactions of ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 124, 32-41.

[34] ASM Handbook, Volume 1, (1993) "Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys".

[35] ASM Metals HandBook, Volume 02, (1992) "Properties and Selection Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials".

[36] ASM Metals HandBook, Volume 21, (2001) "Composites".

[37] ASME B46.1-1995, American Society of Mechanical Engineers.

[38] Benardos, P.G., Vosniakos, G.C., (2002) "Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments", Robotics and Computer Integrated Manufacturing 18, 343–354.

[39] Bernardos, P.G., Vosniakos, G.C., (2003) "Predicting surface roughness in

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

machining: a review", International Journal of Machine Tools & Manufacture 43, 833-844.

[40] Berthouex, P.M., Brown, L.C., (2002) "Statistics for Environmental Engineers", 2nd ed., CRC Press LLC, Boca Raton, FL, USA.

[41] Bhatnagar, N., Ramakrishnan, N., Naik, N.K., Komanduri, R., (1995), "On the machining of fiber reinforced plastic (FRP) composite laminates", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Appl. 35 (5) 701–716.

[42] Boothroyd G, Knight W. (1989), "Fundamentals of machining and machine tools". New York: Marcel Dekker; 61–91

[43] Bouzakis K.-D., Lili E., Michailidis N., Friderikos O., (2008) "Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: a critical synthesis of analysis methods. Annals of the CIRP – Manufacturing Technology, Vol. 57, 676-696.

[44] Box, G, Hunter, W., Hunter, J., (1978) "Statistics for Experimenters: An introduction to design, data analysis and model building", J. Wiley & Sons Inc., NJ, USA.

[45] Box, G.E.P., K.B. Wilson, (1951) "On the experimental attainment of optimum conditions", J. R. Statist. Soc., 13: 1-45.

[46] Byett, J.H., C Allen, (1992) "Dry sliding wear behaviour of polyamide 66 and polycarbonate composites", Tribology International, 25, 237.

[47] Byrne, G., Wunsch, U.E., (1986) "Composite materials in manufacturing engineering, technical development and applications", NBST.

[48] Callister W. D. «Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2004.

[49] Caprino G, Santo L, Nele L. (1998) "Interpretation of size effect in orthogonal machining of composite materials. Part I: Unidirectional glass-fibre-reinforced plastics", J Mater Process Technol:887–892.

[50] Chang, C.S., (2006) "Turning of glass–fiber reinforced plastics materials with chamfered main cutting edge carbide tools", Journal of Materials Processing Technology 180 117–129

[51] Chang, C.S., Fuh, K.H., (1995) "Prediction of the cutting forces for chamfered main cutting edge tools", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Appl. 35 (1) 1559–1586.

[52] Chang, Wen-Ruey, Mikko Hirvonen, Raoul Grönqvist, (2004) "The effects of cut-off length on surface roughness parameters and their correlation with transition friction", Safety Science, V42, 8, 755–769.

[53] Chavarria, F. and Paul, D.R. (2004) "Comparison of Nanocomposites Based on Nylon 6 and Nylon 66", Polymer, 45: 8501-8515

[54] Chen, Y.K., Modi, O.P., Mhay, A.S., Chrysanthou, A. and O'Sullivan, J.M. (2003) "The Effect of Different Metallic Counterface Materials and Different Surface Treatments on the Wear and Friction of Polyamide 66 and its Composite in Rolling-Sliding Contact", Wear, 255: 714-721

[55] Chirus D., (2007) «Διερεύνηση της κατεργαστικότητας σύνθετου πολυμερούς υλικού σε διαμήκη τόρνευση», Πτυχιακή εργασία, ΤΜΜΒ, Βόλος.

[56] Cornell, J.A., (1990) "Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data", 2nd ed., John Wiley and Sons.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

[57] Davim JP, Mata F (2004) "Influence of cutting parameters on surface roughness in turning glass-fiber-reinforced plastics using statistical analysis", Industrial Lubrication and Tribology 56(5):270–274

[58] Davim JP, Mata F (2005) "Optimisation of surface roughness on turning fiber-reinforced plastics (FRPs) with diamond cutting tools", International Journal of Advanced Manufacturing Technology 26(4):319–323

[59] Davim JP, Reis P (2004) "Machinability study on composite (polyetheretherketone reinforced with 30% glass fiber-PEEK GF 30) using polycrystalline diamond (PCD) and cemented carbide (K20) tools", Int J Adv Manuf Technol 23:412–418

[60] Davim JP, Reis P, (2004) "Dimensional precision and surface roughness on turning tubes in fibre reinforced plastics based on the design experiment" Int J Mater Prod Technol 20(4):268–279

[61] Davim JP, Reis P, Lapa V, Conceição António C (2003) "Machinability study on polyetheretherketone (PEEK) unreinforced and reinforced (GF30) for applications in structural components", Compos Struct 62:67–73

[62] Davim, J.P. and Mata, F. (2006). "Physical Cutting Model of Polyetheretherketone Composites", Materials & Design, 27: 847-852

[63] Davim, J.P. and Mata, F. (2007). A comparative Evaluation of the Turning of Reinforced and Unreinforced Polyamide, , International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 33: 911–914

[64] Davim, J.P., (2001) "A note on the determination of optimal cutting conditions for surface finish obtained in turning using design of experiments", Journal of Materials Processing Technology 116, 305–308.

[65] Davim, J.P., Mata, F. (2007) "New machinability study of glass fibre reinforced plastics using polycrystalline diamond and cemented carbide (K15) tools", Materials and Design, Vol. 28, 1050-1054.

[66] Davim, J.P., P. Reis, (2003) "Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments", Compos. Struct. 59 (4) 481–487.

[67] Davim, J.P., Pedro Reis, (2003) "Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study", Materials and Design, 24, 315–324.

[68] Davim, J.P., Reis, P., (2004) "Multiple regression analysis (MRA) in modeling milling of glass fibre reinforced plastics (GFRP). Int J Manuf Technol Manag 6(1/2):185–197.

[69] Davim, J.P., Reis, P., Conceicao, C. Antonio, (2004) "Experimental study of drilling glass fiber reinforced plastics (GFRP) manufactured by hand lay-up", Composites Science and Technology, vol. 64, 289–297.

[70] Davim, J.P., Silva, José, Baptista, A.M., (2007), "Experimental cutting model of metal matrix composites (MMCs)", Journal of Materials Processing Technology 183, 358–362

[71] Design-expert V8, Software for Design of Experiments (DOE) by Stat-Ease Inc.

[72] DIN338: Parallel shank twist drills, jobber series. Deutsches Institut Fuer Normung E.V. (German National Standard), 01-Nov-2006.

[73] DIN4760: Form Deviations, Concepts, Classification System. Deutches Institut

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Fuer Normung, E.V., 1982.

[74] DIN4776: Determination Of Surface Roughness Parameters Rk, Rpk, Rvk, Mr1, Mr2 Serving To Describe The Material Component Of Roughness Profile. Deutches Institut Fuer Normung, E.V., 1990.

[75] DIN4987: Form Deviations, Concepts, Classification System. Deutches Institut Fuer Normung, E.V., 1982.

[76] DIN6581: Terminology of chip removing; reference systems and angles on the cutting part of the tool. Deutsches Institut Fur Normung E.V. 1985.

[77] DIN8589: Manufacturing processes chip removal. Deutsches Institut Fur Normung E.V. 2003.

[78] Doran, J.H. and C.R. Maikish, (1973), Machining boron composite, in: B.R. Noton (Ed.), Composite Material Engineering Design, ASM. 242–250.

[79] Draper, N, H. Smith (1998), "Applied Regression Analysis", 3rd ed., J. Wiley & Sons Inc., NJ, USA.

[80] Draper, N, Smith, H., (1998) "Applied Regression Analysis", 3rd ed., J. Wiley & Sons Inc., NJ, USA.

[81] Enemuoh, E.U., (2000) "Smart drilling of fiber reinforced laminated thermoset composites", Ph.D. Dissertation, University of Missouri-Columbia.

[82] Enemuoh, E.U., Ugo E., El-Gizawy Sherif A., Chukwujekwu Okafor A., (2001) "An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets", International Journal of Machine Tools and Manufacture 41 (12) 1795-814.

[83] Ernst, H., Merchant, M.E., (1941), "Chip Formation Friction and Hig Quality Machined Surface, Surface Treatment of Metals", ASME 29 299

[84] Everstine, G.C., Rogers, T.G., (1971), "A theory of machining of fiber-reinforced materials", Journal of Composite Materials Vol. 5 pp.94–106.

[85] Finney, D.J., (1945) "The Fractional Replication of factorial Arrangements", Annals of Eugenics, 12, 291-301.

[86] Fisher, R.A., (1922) "The goodness of fit of regression formulae, and the distribution of regression coefficients". J. Royal Statist. Soc. (Blackwell Publishing) 85 (4): 597–612.

[87] Fisher, R.A., (1954) "Statistical Methods for Research Workers", 12th ed., Oliver and Boyd.

[88] Friedrich, K., (1993) "Advances in Composite Tribology", Elsevier, London, 103.

[89] Friend, C.A., Clyne R.W., and Valentine G.G., (1973) "Machining Graphite composite materials", Composite Materials in Engineering Design 217-224.

[90] Furber K, J.R. Atkinson and D Dowson, (1978) "Wear mechanisms for nylon 66", Wear of Non-metallic Materials Proceedings of the 3rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Mechanical Engineering Publications Ltd, 25.

[91] Gaitonde V. N., Karnik S. R., Mata F., Davim J. Paulo, (2009), "Study on some aspects of machinability in unreinforced and reinforced polyamides", Journal of Composite Materials, Sage, 43, 7, 725-739

[92] Gaitonde, V.N., S.R. Karnik, J. Campos Rubio, A. Esteves Correia, A.M. Abrao, J. Paulo Davim (2008) "Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

composites" Journal of materials processing technology 203, 431–438.

[93] Gauss C.F., (1809) "Theoria Motus Corporum Coelestium in Sectionibus Conicis Solem Ambientum".

[94] Gauss C.F., (1821/1823) "Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae".

[95] George PM, Raghunath BK, Manochac LM, Warrier AM, (2004) "EDM machining of carbon-carbon composite-a Taguchi approach". J Mater Process Technol 145:66-71.

[96] Groover, M. P., (1996), "Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Process and Systems" Prentice Hall International Editions, 543-563.

[97] Hull D., Clyne T.W.: An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press (1981).

[98] Hull D., Clyne T.W.: An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press (1996).

[99] ISO513:2012, "Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges -- Designation of the main groups and groups of application", International Standard.

[100] ISO1832:2012, "Indexable inserts for cutting tools. Designation", International Standard.

[101] ISO3274:1996, "Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Nominal characteristics of contact (stylus) instruments", International Standard.

[102] ISO4287:1997, "Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Terms, definitions and surface texture parameters", International Standard.

[103] ISO5419:1982, "Twist drills-Terms, Definitions and Types", International Standard.

[104] ISO11562:1996, "Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Metrological characteristics of phase correct filters", International Standard.

[105] ISO12085:1996, "Geometrical Product Specifications (GPS) -- Surface texture: Profile method -- Motif parameters", International Standard.

[106] Johnson, R., (1994) "Miller and Freunds's Probability and Statistics for Engineers", Prentice-Hall Inc., NJ, USA.

[107] Kaneeda T., (1989) "CFRP Cutting mechanism", Proceeding of the 16th North American Manufacturing Research Conference, 216–221.

[108] Kaushikkumar, M., Patel, Suhas S. Joshi, (2006) "Mechanics of machining of face-milling operation performed using a self-propelled round insert milling cutter" Journal of Materials Processing Technology 171, 68-76.

[109] Kechagias, J., Ziogas, C., Pappas, M., Ntziantzias, I., (2011) "Parameter Optimization During Finish End Milling of Al Alloy 5083 Using Robust Design", Lecture Notes in Engineering and Computer Science, Vol 1, 627-631.

[110] Kienzle, O. and Victor, H. (1957), "Spezifische Shnittkraefte bei der Metall-bearbeitung, Werkstattstehnik und Maschinenbau", Bd. 47, H.5.

[111] Kienzle, O., (1952), "Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spänenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen (Determination of forces and

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

productivity of tools used for machine-tools)". VDI-Z 94 (11/12), p. 299-305 (in German)

[112] Kobayashi, A., (1967) "Machining of Plastics", McGraw-Hill, New York.

[113] Koplev, A., (1980) "Cutting of CFRP with Single Edge Tool", Proceedings of the 3rd ICCM, Paris, 1597-1605.

[114] Koplev, A., Lystrup, A, Vorm, T., (1983) "The Cutting Process, Chips, and Cutting Forces in Machining CFRP", Composites, Vol.l4, 371-376.

[115] Krishnamurthy, R, Santhanakrishnan, G, Malhotra, S K, (1992) "Machining of polymeric composites", Proceedings of the machining of composite materials symposium, ASM Materials Week, Chicago, Illinois, 139-148.

[116] Kwak, J.S., (2005) "Application of Taguchi and response surface methodologies for geometric error in surface grinding process", International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, 327-334.

[117] Lee, B.Y., Tarng, Y.S., Lii, H.R. (2000), "An investigation of modelling of the machining database in turning operations", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 105, 1-6.

[118] Legendre A.M., (1805) "Nouvelles méthodes pour la détermination des orbites des comètes", "Sur la Méthode des moindres quarrés" appears as an appendix.

[119] Lundstedt T., Seifert E., Abramo L., Thelin B., Nystrom A., Pettersen J., Bergman R., (1998) "Experimental design and optimization", Chem. Intell. Lab. Syst., 42, 30-40.

[120] Mackey, B.A., (1980) "How to Drill Precision Holes in Reinforced Plastics in a Hurry", Plastics Engineering, 22-24.

[121] Mahdi, M., Zhang, L., (2001) "A finite element model for the orthogonal cutting of fiber-reinforced composite materials", Journal of materials processing technology, 113, 373-377.

[122] Mansour, A., Abdalla, H., (2002) "Surface roughness model for end milling: a semi-free cutting carbon casehardening steel (EN32) in dry condition", Journal of Materials Processing Technology 124, 183–191.

[123] Marx, W. and S. Trink, (1978) "Manufacturing Methods for Cutting, Machining and Drilling Composite Materials", Technical Rep, No. AD-B034202.

[124] Mata, F, Gaitonde, V.N., S.R. Karnik, J. Paulo Davim, (2009) "Influence of cutting conditions on machinability aspects of PEEK, PEEK CF 30 and PEEK GF 30 composites using PCD tools", journal of materials processing technology 209, 1980–1987.

[125] Mata, F., Petropoulos, G., Ntziantzias, I., Davim, J.P., (2010) "A surface roughness analysis in turning of polyamide PA-6 using statistical techniques", Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 37, Nos. 1/2, 173–187.

[126] Mata, F., Reis, P. and Davim, J.P. (2006). Physical Cutting Model of Polyamide Composites (PA66 GF30), Mater. Sci. For., 514–516: 643–647

[127] McCuen, R. H., (1985) "Statistical Methods for Engineers", Prentice-Hall Inc., NJ, USA.

[128] Merchant ME. (1945), Mechanics of metal cutting process. I. Orthogonal cutting and type 2 chip. Journal of Applied Physics, 16:267–275

[129] Merchant, M.E., (1944), "Basic mechanics of the metal cutting process", Journal of Applied Mechanics Trans. ASME 66 267.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

[130] Miner, L.H., (1980) "Cutting and Machining Kevlar Aramid Composites", Kevlar Composites Symposium, Society of Plastics Engineers, 85-93.

[131] Minitab, Release 16, Statistical Software by Minitab Inc.

[132] Montgomery D.C., (1996). Design and analysis of experiments. New York, Marcel Dekker, 4th edition, 160-458.

[133] Montgomery, D. C. (1999) "Experimental Design for product and Process Design and Development", The Statistician, 48(2), 159-177.

[134] Montgomery, D. C., (2005), "Design and Analysis of Experiments", 6th ed., J. Wiley & Sons Inc., NJ, USA.

[135] Montgomery, D. C., G. Runger, N. Hubele (1998) "Engineering Statistics", 1st ed., John Wiley & Sons, NJ, USA

[136] Montgomery, D., (1997) "Design and Analysis of Experiments". New York: John Willey & Sons, Inc.

[137] Montgomery, D.G., (1976) "Design and Analysis of Industrial Experiments", 3rd Edn., John Weley and Sons, Inc., New Delhi.

[138] Ntziantzias, I, Anghel , C, Petropoulos, G, (2005), "A predictive model of cutting force in turning using Taguchi and response surface techniques", Proceedings of 1st IC-EpsMsO, Athens, 6-9 July

[139] Ntziantzias, I., Petropoulos, G., Vaxevanidis, N., Dasic, P., (2007) "Statistical modelling of basic machinability parameters in drilling of metals", Proc. 7th International Conference "Research and Development in Mechanical Industry" RaDMI 2007, 16-20 September, Belgrade, Serbia, 36-47.

[140] Palanikumar, K., (2008), "Application of Taguchi and Response surface Methodology for surface Roughness In Machining Glass Fiber Reinforced Plastics by PCD Tooling", Int J Adv Manuf Technol, 36, 19-27.

[141] Palanikumar, K., Karthikeyan, R., (2007), "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of Al/SiC particulate composites", Materials and Design 28, 1584–1591.

[142] Palanikumar, K., Karunamoorthy, L., Karthikeyan, R., (2006), "Assessment of factors influencing surface roughness on the machining of glass fiber-reinforced polymer composites", Materials and Design 27, 862–871.

[143] Palanikumar, K., Karunamoorthy, L., Manoharan, N., (2006) "Mathematical Model to Predict the Surface Roughness on the Machining of Glass Fiber Reinforced Polymer Composites", Journal of Reinforced Plastics and Composites, 25, 407-419

[144] Palanikumar, K., Mata, F. and Davim, J.P. (2008) "Analysis of surface roughness parameters in turning of FRP tubes by PCD tool", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 204, 469–474.

[145] Pappas M, Ntziantzias I, Kechagias J, Vaxevanidis N, (2011) "Modeling of Abrasive Water Jet Machining using Taguchi Method and Artificial Neural Networks", NCTA 2011-International Conference on Neural Computation Theory and Applications, 24-26 October, Paris, 377-380

[146] Petropoulos, G., Mata, F. and Davim, J.P. (2008) "Statistical study of surface roughness in turning of Peek composites", Materials and Design, Vol. 29, No. 1, 218–223.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

[147] Petropoulos, G., Ntziantzias, I., Reis, P., Davim, J. P., (2008) "Predicting machinability parameters on drilling glass fibre reinforced plastics using response surface methodology", International Journal of Materials & Product Technology, Inderscience, 32, 2-3, 243-263

[148] Petropoulos, G., Pandazaras, C., Vaxevanidis, N., Ntziantzias, I., Korlos, A., (2007) "Selecting subsets of mutually unrelated ISO 13565-2:1997 surface roughness parameters in turning operations", International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering 1/1, 114-128.

[149] Petropoulos, G., Vaxevanidis, N., Ntziantzias, I., (2007) "A combined analysis of surface roughness obtained by EDM according to two ISO standards", Proceedings of the 13th International Conference on Nonconventional Technologies ICNcT'2007, Iasi.

[150] Porter, S.C., Verseput R.P., Cunnigham C.R., (1997) "Process optimization using design of experiments", Pharm. Technol., 1-7.

[151] Puw, H.Y.; Hocheng, H., (1993) "Machinability test of carbon fiber-reinforced plastics in milling", Materials and manufacturing processes, 8(6), 717-729.

[152] Rahman M, Ramakrishna S, Thoo HC., (1999) "Machinability study of carbon/peek composites", Mach Sci Technol, 3, 49–59.

[153] Raj, P. Praveen, Perumal, A. Elaya, (2010) "Taguchi Analysis of surface roughness and delamination associated with various cemented carbide K10 end mills in milling of GFRP" Journal of Engineering Science and Technology Review 3 (1) 58-64

[154] Rank TaylorHobson, "Talyprofile handbookversion 1.1.1",1995.

[155] Ross P., (1988) "Taguchi techniques for quality engineering—loss function, orthogonal experiments, parameter and tolerance design". New York: McGraw-Hill, 10–50.

[156] Sakuma K., Seto M., (1983) "Tool wear in cutting glass–fiber-reinforced plastics. The relation between fiber orientation and tool wear", Bulletin of the JSME 26 (218) 1420–1427.

[157] Santhanakrishnan, G., Krishnamurthy, R., Malhotra, S.K. (1992) "Investigation into the machining of carbon-fibre-reinforced plastics with cemented carbides", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 30, 263-275.

[158] Shaw, M.C. (2004), "Metal Cutting Principles", Oxford University Press, 2nd ed., Oxford, United Kingdom.

[159] Silva, Leonardo R., Davim, J. Paulo, Abrão, A.M. and Faria, P.E., (2009), "Merchant Model Applied to Precision Orthogonal Cutting of PA66 Polyamide with and without Glass Fiber Reinforcing", Journal of Composite Materials 43: 2727

[160] Singh B., Kumar R., Ahuja N., (2004) "Optimization drug delivery systems using systematic Design of Experiments. Part I: fundamental aspects", Crit. Rev. Ther. Drug Carrier Syst., 22(1), 27-105.

[161] Sorrentino, L., Turchetta, S., (2011) "Milling of carbon fiber-reinforced plastics: Analysis of cutting forces and surface roughness", 18TH International conference on composite materials.

[162] Strong, A.B., (1989) "Fundamentals of Composites Manufacturing: Materials, Methods, and Applications", Society of Manufacturing Engineers, Publications

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Development Department., Reference Publications Division.

[163] Syed Altaf Hussain, V. Pandurangadu, K. Palanikumar, (2010) "Surface Roughness Analysis in Machining of GFRP Composites by Carbide Tool (K20)", European Journal of Scientific Research, ISSN 1450-216X Vol.41 No.1, 84-98

[164] Taguchi G, Konishi S., (1987) "Taguchi methods, orthogonal arrays and linear graphs, tools for quality engineering". American Supplier Institute, 35–38.

[165] Taguchi G., (1993) "Taguchi on robust technology development methods", New York, NY: ASME Press, 1–40.

[166] Tsao, C.C., Hocheng, H., (2004) "Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material", Int. J. Machine Tools Manuf. 44 (10) 1085–1090.

[167] Vassilakis, S., Petropoulos, G., Sokovic, M., Vaxevanidis, N.M., Ntziantzias, I., (2007) "Macro-geometric and Surface Roughness Quality of TRIP Steel sheets Processed by Abrasive Waterjet Machining", Proceedings of 9th International Conference on Management of Innovative Technologies MIT'2007, 8th - 10th October, Fiesa, Slovenia, 196-203.

[168] Victor, H. (1956) "Beitrag zur Kenntnis der Schnittkräfte beim Drehen, Hobeln und Bohren (Contribution to the science of the cutting forces in turning, planning and drilling)". Ph.D. thesis. University of Hannover, Hannover, Germany, (in German)

[169] Wang, D.H., Ramulu, M., Arola, D., (1995), "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part 1. Unidirectional laminate", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Appl. 35 (12) 1623–1638.

[170] Wang, D.H., Ramulu, M., Arola, D., (1995), "Orthogonal cutting mechanisms of graphite/epoxy composite. Part II. Multi-directional laminate", Int. J. Mach. Tool Des. Res. Appl. 35 (12) 1639–1648.

[171] Wang, XM, Zhang, LC, (2003), "An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics", International Journal of Machine Tools & Manufacture 43:1015–1022.

[172] www.alphaomegaswiss.com/cnc_milling.php

[173] www.carbideanddiamondtooling.com

[174] www.carbideinsert.net/category/milling-cutter-2/

[175] www.colchester.co.uk

[176] www.efunda.com/processes/machining/mill.cfm

[177] www.en.wikipedia.org/wiki

[178] www.en.wikipedia.org/wiki/Surface_finish

[179] www.engineeringtoolbox.com

[180] www.etka.gr

[181] www.freetechnicalcharts.com

[182] www.ghms-india.com/milling.htm

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

[183] www.hipolymers.com.ar

[184] www.ibarmia.com

[185] www.infinitycompounding.com

[186] www.iso.org

[187] www.kistler.gr

[188] www.matbase.com

[189] www.matweb.com

[190] www.merrem-materials.com/

[191] www.metalworkingtool.net/2011/03/03/shell-end-face-milling-cutter-2/

[192] www.millerstooling.com.au

[193] www.misumiusa.com/CategoryImages/Metric_2009_pdf/p2839.pdf

[194] www.mitsubishicarbide.com

[195] www.myyellowcoat.com

[196] www.okuma.com

[197] www.plastics.dupont.com/

[198] www.pwr-tools.com/

[199] www.quadrantplastics.com

[200] www.taylor-hobson.com

[201] www.ticona.com

[202] www.users.auth.gr/dkugiu/Teach/DataAnalysis/

[203] www.waltertools.blaetterkatalog.de/

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διδακτορική Διατριβή

ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΕΡΓΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΙΝΩΔΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ-ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ «ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ»

ΙΩΑΝΝΗΣ ΝΤΖΙΑΝΤΖΙΑΣ

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, 2014

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Παράρτημα Α

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΡΝΕΥΣΗ

Παράρτημα Β

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ

Παράρτημα Γ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Παράρτημα Δ

ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΠΟΒΑΙΤΤΟΥ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ IV

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ VI

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΡΝΕΥΣΗ ..... - 1 -

Α.1 Δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων ..... - 2 -
Α.2 Εκτιμήσεις και κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων ..... - 4 -
Α.3 Επιφάνειες προσαρμογής και διαγράμματα επιφανείας ..... - 7 -
Α.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30 ..... - 16 -

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ ..... - 24 -

Β.1 Δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων ..... - 25 -
Β.2 Εκτιμήσεις και κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων ..... - 27 -
Β.3 Επιφάνειες προσαρμογής και διαγράμματα επιφάνειας ..... - 29 -
Β.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30 ..... - 38 -

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗ ..... - 46 -

Γ.1 Δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων ..... - 47 -
Γ.2 Εκτιμήσεις και κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων ..... - 49 -
Γ.3 Επιφάνειες προσαρμογής και διαγράμματα επιφανείας ..... - 51 -
Γ.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας για την διάτρηση του PA66-GF30 ..... - 57 -

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ ..... - 63 -

Δ.1 Δεδομένα των μετρήσεων του πάχους των αποβλίττων ..... - 64 -
Δ.2 Μορφολογία των αποβλίττων ..... - 66 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας Α1: Πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 2 -
Πίνακας Α2: Η δύναμη κοπής F(N) (Σχέση 3.10) και η ισχύς της κοπής P_c(W) (Σχέση 3.12) στα πειράματα της διαμήκης τόρνευσης του PA66-GF30. - 2 -
Πίνακας Α3: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_a, R_t και R_p κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 3 -
Πίνακας Α4: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_{sm}, R_{sk} και R_{ku} κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 3 -
Πίνακας Α5: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής Ft(N). - 4 -
Πίνακας Α6: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης πρόωσης Fv(N). - 4 -
Πίνακας Α7: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης απώθησης του εργαλείου Fr(N). - 4 -
Πίνακας Α8: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra(μm). - 5 -
Πίνακας Α9: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους Rt(μm). - 5 -
Πίνακας Α10: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους κορυφής Rp(μm). - 5 -
Πίνακας Α11: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm). - 6 -
Πίνακας Α12: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της λοξότητας Rsk. - 6 -
Πίνακας Α13: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της κυρτότητας Rku. - 6 -
Πίνακας Β1: Πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 25 -
Πίνακας Β2: Η συνισταμένη των Fx, Fy, δύναμη F(N) (αντίστοιχη της F_{Tm}(N), κεφ3.3.4, κεφ8.2.1, Σχήμα 3.25α και Σχήμα 8.1) και η ισχύς P(W) που της αναλογεί, κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 25 -
Πίνακας Β3: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_a, R_z και R_t κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 26 -
Πίνακας Β4: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_{sm}, R_{sk} και R_{ku} κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 26 -
Πίνακας Β5: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης Fx(N). - 27 -
Πίνακας Β6: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης Fy(N). - 27 -
Πίνακας Β7: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της αξονικής δύναμης Fz(N). - 27 -
Πίνακας Β8: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra(μm). - 27 -
Πίνακας Β9: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του ύψους δέκα σημείων Rz(μm). - 28 -
Πίνακας Β10: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους Rt(μm). - 28 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Β11: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm). - 28 -
Πίνακας Β12: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της λοξότητας Rsk. - 28 -
Πίνακας Β13: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της κυρτότητας Rku. - 28 -
Πίνακας Γ1: Πειραματικές μετρήσεις κατά τη διάτρηση του PA66-GF30. - 47 -
Πίνακας Γ2: Πειραματικές μετρήσεις κατά τη διάτρηση του PA66-GF30. Έλεγχο το μικροσκόπιο - 47 -
Πίνακας Γ3: Η ισχύς της εργαλειομηχανής P_c(W) (σχέση 3.56) στα πειράματα της διάτρησης του PA66-GF30. - 48 -
Πίνακας Γ4: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας R_a, R_Z και R_t κατά την διάτρηση του PA66-GF30. - 48 -
Πίνακας Γ5: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης πρόωσης F_v(N). - 49 -
Πίνακας Γ6: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της ροπής στρέψης M_d(Ncm). - 49 -
Πίνακας Γ7: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του παράγοντα αποκόλλησης Fd. - 49 -
Πίνακας Γ8: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra(μm). - 49 -
Πίνακας Γ9: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του ύψους δέκα σημείων Rz(μm). - 50 -
Πίνακας Γ10: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους Rt(μm). - 50 -
Πίνακας Δ1: Πειραματικές μετρήσεις του πάχους των αποβλίττων κατά την τόρνευση του PA66-GF30. - 64 -
Πίνακας Δ.2: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου του πραγματικού πάχους του αποβλίττου t_2(mm). - 65 -
Πίνακας Δ.3: Το στοχαστικό μοντέλο του πραγματικού πάχους του αποβλίττου t_2(mm). - 65 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα Α1: Επιφάνεια προσαρμογής της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N). - 7 -
Σχήμα Α2: Γράφημα επιφάνειας της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 7 -
Σχήμα Α3: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης πρόωσης Fv(N). - 8 -
Σχήμα Α4: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης πρόωσης F_v(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 8 -
Σχήμα Α5: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης απώθησης εργαλείου F_r(N). - 9 -
Σχήμα Α6: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης απώθησης εργαλείου F_r(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 9 -
Σχήμα Α7: Επιφάνεια προσαρμογής της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm). - 10 -
Σχήμα Α8: Γράφημα επιφάνειας της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 10 -
Σχήμα Α9: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους Rt(μm). - 11 -
Σχήμα Α10: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους Rt(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 11 -
Σχήμα Α11: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους κορυφής Rp(μm). - 12 -
Σχήμα Α12: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους κορυφής Rp(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 12 -
Σχήμα Α13: Επιφάνεια προσαρμογής του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm). - 13 -
Σχήμα Α14: Γράφημα επιφάνειας του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 13 -
Σχήμα Α15: Επιφάνεια προσαρμογής της λοξότητας Rsk. - 14 -
Σχήμα Α16: Γράφημα επιφάνειας της λοξότητας Rsk συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 14 -
Σχήμα Α17: Επιφάνεια προσαρμογής της κυρτότητας Rku. - 15 -
Σχήμα Α18: Γράφημα επιφάνειας της κυρτότητας Rku συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 15 -
Σχήμα Α19: Χαρακτηριστικές καμπύλες της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 16 -
Σχήμα Α20: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης πρόωσης F_v(N) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 17 -
Σχήμα Α21: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης απώθησης των εργαλείων F_r(N) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 18 -
Σχήμα Α22: Χαρακτηριστικές καμπύλες της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 19 -
Σχήμα Α23: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους R_t(μm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 20 -
Σχήμα Α24: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους κορυφής R_p(μm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 21 -
Σχήμα Α25: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέσου διαστήματος κορυφών R_{sm}(mm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 22 -
Σχήμα Α26: Χαρακτηριστικές καμπύλες της λοξότητας R_{sk} για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30. - 23 -
Σχήμα Β1: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης F_X(N). - 29 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα Β2: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης F_X(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 29 -
Σχήμα Β3: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης F_y(N). - 30 -
Σχήμα Β4: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης F_Y(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 30 -
Σχήμα Β5: Επιφάνεια προσαρμογής της αξονικής δύναμης F_z(N). - 31 -
Σχήμα Β6: Γράφημα επιφάνειας της αξονικής δύναμης F_Z(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 31 -
Σχήμα Β7: Επιφάνεια προσαρμογής της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm). - 32 -
Σχήμα Β8: Γράφημα επιφάνειας της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 32 -
Σχήμα Β9: Επιφάνεια προσαρμογής του ύψους δέκα σημείων R_z(μm). - 33 -
Σχήμα Β10: Γράφημα επιφάνειας του ύψους δέκα σημείων R_z(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 33 -
Σχήμα Β11: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους Rt(μm). - 34 -
Σχήμα Β12: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους Rt(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 34 -
Σχήμα Β13: Επιφάνεια προσαρμογής του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm). - 35 -
Σχήμα Β14: Γράφημα επιφάνειας του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 35 -
Σχήμα Β15: Επιφάνεια προσαρμογής της λοξότητας Rsk. - 36 -
Σχήμα Β16: Γράφημα επιφάνειας της λοξότητας Rsk συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 36 -
Σχήμα Β17: Επιφάνεια προσαρμογής της κυρτότητας Rku. - 37 -
Σχήμα Β18: Γράφημα επιφάνειας της κυρτότητας Rku συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 37 -
Σχήμα Β19: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης F_x(N) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 38 -
Σχήμα Β20: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης F_y(N) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 39 -
Σχήμα Β21: Χαρακτηριστικές καμπύλες της αξονικής δύναμης F_z(N) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 40 -
Σχήμα Β22: Χαρακτηριστικές καμπύλες της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 41 -
Σχήμα Β23: Χαρακτηριστικές καμπύλες του ύψους δέκα σημείων R_Z(μm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 42 -
Σχήμα Β24: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους R_t(μm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 43 -
Σχήμα Β25: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέσου διαστήματος κορυφών R_{sm}(mm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 44 -
Σχήμα Β26: Χαρακτηριστικές καμπύλες της λοξότητας R_{sk} για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30. - 45 -
Σχήμα Γ1: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης πρόωσης F_v(N). - 51 -
Σχήμα Γ2: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης πρόωσης F_v(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 51 -
Σχήμα Γ3: Επιφάνεια προσαρμογής της ροπής στρέψης M_d(Ncm). - 52 -
Σχήμα Γ4: Γράφημα επιφάνειας της ροπής στρέψης M_d(Ncm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). - 52 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Σχήμα Γ5: Επιφάνεια προσαρμογής του παράγοντα αποκόλλησης F_d ..... - 53 -
Σχήμα Γ6: Γράφημα επιφάνειας του παράγοντα αποκόλλησης F_d συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). ..... - 53 -
Σχήμα Γ7: Επιφάνεια προσαρμογής της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm). - 54 -
Σχήμα Γ8: Γράφημα επιφάνειας της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). ..... - 54 -
Σχήμα Γ9: Επιφάνεια προσαρμογής του ύψους δέκα σημείων R_z(μm) ..... - 55 -
Σχήμα Γ10: Γράφημα επιφάνειας του ύψους δέκα σημείων R_z(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). ..... - 55 -
Σχήμα Γ11: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους Rt(μm). ..... - 56 -
Σχήμα Γ12: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους Rt(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec). ..... - 56 -
Σχήμα Γ13: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης πρόωσης F_v(N) για την διάτρηση του PA66-GF30. ..... - 57 -
Σχήμα Γ14: Χαρακτηριστικές καμπύλες της ροπής στρέψης M_d(Ncm) για την διάτρηση του PA66-GF30. ..... - 58 -
Σχήμα Γ15: Χαρακτηριστικές καμπύλες του παράγοντα αποκόλλησης F_d(N) για την διάτρηση του PA66-GF30. ..... - 59 -
Σχήμα Γ16: Χαρακτηριστικές καμπύλες της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) για την διάτρηση του PA66-GF30. ..... - 60 -
Σχήμα Γ17: Χαρακτηριστικές καμπύλες του ύψους δέκα σημείων R_Z(μm) για την διάτρηση του PA66-GF30. ..... - 61 -
Σχήμα Γ18: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους R_t(μm) για την διάτρηση του PA66-GF30. ..... - 62 -
Σχήμα Δ.1: Το πάχος του αποβλίττου συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β) V=350m/min, γ) V=500m/min. ..... - 64 -
Σχήμα Δ.2: Διαγράμματα καταλοίπων για το πραγματικό πάχος του αποβλίττου t_2(mm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order). ..... - 65 -
Σχήμα Δ.3: Η μορφολογία του αποβλίττου για ταχύτητα κοπής V=200m/min, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, β)S=0,10mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, γ)S=0,16mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, δ)S=0,20mm/rev: Ασυνεχές ταινιοειδές, ε)S=0,24mm/rev: Ασυνεχές ταινιοειδές. ..... - 66 -
Σχήμα Δ.4: Η μορφολογία του αποβλίττου για ταχύτητα κοπής V=350m/min, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, β)S=0,10mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, γ)S=0,16mm/rev: Συνεχές σπειροειδές, δ)S=0,20mm/rev: Ασυνεχές σπειροειδές, ε)S=0,24mm/rev: Ασυνεχές σπειροειδές. ..... - 67 -
Σχήμα Δ.5: Η μορφολογία του αποβλίττου για ταχύτητα κοπής V=500m/min, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, β)S=0,10mm/rev: Συνεχές ελικοειδές, γ)S=0,16mm/rev: Συνεχές ελικοειδές, δ)S=0,20mm/rev: Ασυνεχές ελικοειδές, ε)S=0,24mm/rev: Ασυνεχές ελικοειδές. ..... - 68 -

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Παράρτημα Α

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΟΡΝΕΥΣΗ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Α.1 Δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων

Πίνακας Α1: Πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	F_t (N)				F_v (N)				F_r (N)			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
5	1	0,05	200	33,06	32,89	33,41	33,12	19,01	21,98	18,62	19,87	4,61	4,29	3,49	4,13
11	2	0,1	200	60,02	59,01	61,69	60,24	34,16	33,06	32,23	33,15	7,05	7,98	7,56	7,53
1	3	0,16	200	94,88	93,91	97,89	95,56	46,98	46,15	48,5	47,21	11,47	11,3	13,44	12,07
10	4	0,2	200	114,5	118,63	112,11	115,08	51,47	54,81	52,03	52,77	14,66	14,13	12,73	13,84
15	5	0,24	200	150,47	149,98	143,22	147,89	69,07	69,33	65,57	67,99	17,92	15,42	15,02	16,12
6	6	0,05	350	29,58	29,11	32,03	30,24	14,61	16,41	16,26	15,76	3,69	5,14	2,93	3,92
4	7	0,1	350	58,69	55,06	59,59	57,78	27,27	26,93	28,84	27,68	6,04	5,12	8,43	6,53
8	8	0,16	350	86,46	90,06	86,82	87,78	35,09	37,11	37,21	36,47	11,36	8,91	8,23	9,5
14	9	0,2	350	105,42	102,32	106,09	104,61	40,51	38,08	40,15	39,58	9,12	10,06	13,07	10,75
12	10	0,24	350	140,74	131,93	135,12	135,93	51,68	49,37	49,91	50,32	13,2	13,64	14,8	13,88
3	11	0,05	500	29,28	27,36	30,69	29,11	14,66	14,4	16,06	15,04	3,14	4,36	2,85	3,45
13	12	0,1	500	52,66	51,48	55,07	53,07	21,67	23,81	20,94	22,14	5,67	4,91	4,78	5,12
2	13	0,16	500	82,54	80,12	85,71	82,79	28,06	28,92	32,96	29,98	8,39	8,19	6,7	7,76
9	14	0,2	500	95,28	103,08	101,16	99,84	33,75	33,06	32,97	33,26	10,11	8,61	8,13	8,95
7	15	0,24	500	123,62	130,41	129,43	127,82	37,94	40,6	42,12	40,22	11,86	10,49	11,16	11,17

Πίνακας Α2: Η δύναμη κοπής F(N) (Σχέση 3.10) και η ισχύς της κοπής P_c(W) (Σχέση 7.2) στα πειράματα της διαμήκης τόρνευσης του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	F_t (N)	F_v (N)	F_r (N)	F (N)	P_c (W)
5	1	0,05	200	33,12	19,87	4,13	38,84	108
11	2	0,1	200	60,24	33,15	7,53	69,17	197
1	3	0,16	200	95,56	47,21	12,07	107,27	312
10	4	0,2	200	115,08	52,77	13,84	127,36	376
15	5	0,24	200	147,89	67,99	16,12	163,57	483
6	6	0,05	350	30,24	15,76	3,92	34,32	173
4	7	0,1	350	57,78	27,68	6,53	64,40	330
8	8	0,16	350	87,78	36,47	9,5	95,53	502
14	9	0,2	350	104,61	39,58	10,75	112,36	598
12	10	0,24	350	135,93	50,32	13,88	145,61	777
3	11	0,05	500	29,11	15,04	3,45	32,95	238
13	12	0,1	500	53,07	22,14	5,12	57,73	434
2	13	0,16	500	82,79	29,98	7,76	88,39	676
9	14	0,2	500	99,84	33,26	8,95	105,61	816
7	15	0,24	500	127,82	40,22	11,17	134,46	1044

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Α3: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_a, R_t και R_p κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	R_a (μm)				R_t (μm)				R_p (μm)			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
5	1	0,05	200	1,01	1,08	0,97	1,02	6,99	7,24	7,22	7,15	3,52	2,88	2,56	2,99
11	2	0,1	200	1,97	2,13	2,24	2,11	15,34	16,55	18,11	16,67	4,89	7,79	8,91	7,20
1	3	0,16	200	3,65	3,38	3,44	3,49	31,56	32,45	32,89	32,30	11,31	11,47	12,82	11,87
10	4	0,2	200	5,67	4,69	5,8	5,39	41,03	32,78	31,19	35,00	20,37	12,61	16,72	16,57
15	5	0,24	200	4,16	11,2	4,21	6,52	21,72	41,17	63,71	42,20	20,48	23,69	24,13	22,77
6	6	0,05	350	1,16	0,88	0,94	0,99	6,94	7,15	7,33	7,14	2,56	2,33	2,30	2,4
4	7	0,1	350	1,71	2,03	2,01	1,92	13,89	17,14	16,17	15,73	4,94	6,23	6,02	5,73
8	8	0,16	350	2,13	2,47	2,74	2,45	17,32	20,67	16,91	18,30	6,55	8,44	7,02	7,34
14	9	0,2	350	3,95	4,09	3,46	3,83	29,73	35,56	33,01	32,77	14,86	15,23	11,41	13,83
12	10	0,24	350	6,47	5,43	5,23	5,71	36,24	32,89	31,97	33,7	23,18	18,34	17,68	19,7
3	11	0,05	500	0,84	0,75	0,63	0,74	4,64	5,56	4,24	4,81	3,08	2,04	1,69	2,27
13	12	0,1	500	1,09	1,07	1,86	1,34	8,26	8,78	11,70	9,58	3,49	2,71	6,46	4,22
2	13	0,16	500	2,49	2,07	2,15	2,24	16,07	16,11	14,72	15,63	7,05	5,96	6,25	6,42
9	14	0,2	500	3,08	3,08	3,61	3,26	22,92	25,41	22,37	23,57	9,51	10,72	10,48	10,24
7	15	0,24	500	5,39	5,34	5,12	5,28	24,83	29,36	28,11	27,43	15,51	14,97	16,02	15,5

Πίνακας Α4: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_{sm}, R_{sk} και R_{ku} κατά την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	R_{sm} (mm)				R_{sk}				R_{ku}			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
5	1	0,05	200	0,12	0,11	0,11	0,12	0,31	-0,28	0,09	0,04	3,01	2,78	3,16	2,98
11	2	0,1	200	0,09	0,27	0,28	0,22	-0,53	0,19	0,52	0,06	3,63	3,39	3,69	3,57
1	3	0,16	200	0,31	0,32	0,38	0,34	0,29	0,34	0,51	0,38	2,53	3,02	3,01	2,85
10	4	0,2	200	0,49	0,47	0,61	0,52	1,19	0,54	0,47	0,73	4,51	2,61	2,36	3,16
15	5	0,24	200	0,65	0,68	0,54	0,63	0,41	1,06	0,70	0,72	2,36	3,56	3,75	3,22
6	6	0,05	350	0,11	0,08	0,09	0,09	-0,39	-0,65	-0,59	-0,54	2,66	3,84	3,39	3,3
4	7	0,1	350	0,14	0,23	0,19	0,19	-0,66	-0,39	0,04	-0,34	4,48	3,46	2,94	3,63
8	8	0,16	350	0,33	0,39	0,24	0,31	0,09	-0,16	-0,27	-0,12	2,92	3,58	2,64	3,05
14	9	0,2	350	0,33	0,44	0,45	0,41	0,42	0,82	1,36	0,87	3,41	2,36	4,27	3,35
12	10	0,24	350	0,52	0,52	0,49	0,5	0,81	0,73	0,61	0,72	3,01	2,72	2,68	2,8
3	11	0,05	500	0,08	0,11	0,11	0,1	-0,06	-0,61	-0,08	-0,25	2,53	3,57	2,79	2,96
13	12	0,1	500	0,11	0,12	0,19	0,13	-0,47	-0,79	2,11	0,29	3,44	3,93	1,81	3,06
2	13	0,16	500	0,21	0,13	0,29	0,21	0,02	-0,29	0,01	-0,09	2,77	3,13	2,80	2,9
9	14	0,2	500	0,28	0,26	0,38	0,31	0,24	0,71	0,38	0,44	2,98	3,66	2,47	3,04
7	15	0,24	500	0,39	0,39	0,39	0,39	0,79	0,63	0,19	0,53	2,39	2,35	2,69	2,48

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Α.2 Εκτιμήσεις και κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων

Πίνακας Α5: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής Ft(N).

Obs	Ft (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	33,12	33,511	2,29134	-0,39138	-0,21499	
2	60,24	59,298	1,58449	0,94207	0,38289	
3	95,56	93,596	1,51257	1,96422	0,78403	
4	115,08	118,494	1,51638	-3,41373	-1,36386	
5	147,89	145,018	2,18646	2,87215	1,47654	
6	30,24	31,759	1,59626	-1,51887	-0,61923	
7	57,78	55,459	1,09212	2,32132	0,85498	
8	87,78	87,252	1,18868	0,52757	0,19728	
9	104,61	110,481	0,99072	-5,87098	-2,13204	R
10	135,93	135,336	1,55856	0,59429	0,23993	
11	29,11	30,006	2,29134	-0,89636	-0,49238	
12	53,07	51,619	1,58449	1,45058	0,58956	
13	82,79	80,909	1,51257	1,88092	0,75078	
14	99,84	102,468	1,51638	-2,62824	-1,05004	
15	127,82	125,654	2,18646	2,16643	1,11374	

R denotes an observation with a large standardized residual.

Πίνακας Α6: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης πρόωσης Fv(N).

Obs	Fv (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	19,87	19,9159	1,64843	-0,04591	-0,02933	
2	33,15	31,6901	1,15120	1,45988	0,74478	
3	47,21	45,8192	0,93797	1,39082	0,67168	
4	52,77	55,2385	1,15120	-2,46854	-1,25937	
5	67,99	64,6579	1,53775	3,33209	1,99034	
6	15,76	17,5137	1,04256	-1,75367	-0,86815	
7	27,68	26,4715	0,72808	1,20850	0,56119	
8	36,47	37,2209	0,59323	-0,75090	-0,34219	
9	39,58	44,3872	0,72808	-4,80716	-2,23232	R
10	50,32	51,5534	0,97256	-1,23343	-0,60031	
11	15,04	15,1114	1,64843	-0,07143	-0,04564	
12	22,14	21,2529	1,15120	0,88712	0,45258	
13	29,98	28,6226	0,93797	1,35738	0,65553	
14	33,26	33,5358	1,15120	-0,27578	-0,14070	
15	40,22	38,4489	1,53775	1,77105	1,05789	

R denotes an observation with a large standardized residual.

Πίνακας Α7: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης απώθησης του εργαλείου Fr(N).

Obs	Fr (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	4,13	4,4072	0,283063	-0,277201	-1,03132	
2	7,53	7,5563	0,197680	-0,026267	-0,07804	
3	12,07	11,3351	0,161065	0,734853	2,06672	R
4	13,84	13,8544	0,197680	-0,014399	-0,04278	
5	16,12	16,3737	0,264057	-0,253652	-0,88234	
6	3,92	3,8569	0,179025	0,063092	0,18189	
7	6,53	6,4191	0,125024	0,110879	0,29985	
8	9,50	9,4938	0,101867	0,006224	0,01652	
9	10,75	11,5435	0,125024	-0,793546	-2,14599	R
10	13,88	13,5933	0,167004	0,286684	0,81256	
11	3,45	3,3066	0,283063	0,143385	0,53346	
12	5,12	5,2820	0,197680	-0,161974	-0,48122	
13	7,76	7,6524	0,161065	0,107595	0,30260	
14	8,95	9,2327	0,197680	-0,282693	-0,83988	
15	11,17	10,8130	0,264057	0,357020	1,24191	

R denotes an observation with a large standardized residual.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Α8: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra(μm).

Obs	Ra (μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	1,019	1,22284	0,243400	-0,203844	-1,05411
2	2,110	1,95462	0,168313	0,155377	0,59449
3	3,490	3,49449	0,160674	-0,004491	-0,01688
4	5,390	4,92212	0,161078	0,467880	1,75973
5	6,520	6,67059	0,232258	-0,150589	-0,72879
6	0,994	1,01017	0,169564	-0,016172	-0,06207
7	1,920	1,56509	0,116011	0,354913	1,23058
8	2,450	2,89272	0,126269	-0,442718	-1,55848
9	3,830	4,17886	0,105240	-0,348856	-1,19261
10	5,710	5,78583	0,165559	-0,075833	-0,28821
11	0,742	0,79750	0,243400	-0,055501	-0,28700
12	1,340	1,17555	0,168313	0,164448	0,62920
13	2,240	2,29095	0,160674	-0,050945	-0,19143
14	3,260	3,43559	0,161078	-0,175591	-0,66041
15	5,283	4,90108	0,232258	0,381923	1,84835

Πίνακας Α9: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους Rt(μm).

Obs	Rt (μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	7,150	8,3927	1,77628	-1,24267	-0,73676
2	16,670	17,5439	1,24048	-0,87390	-0,41375
3	32,300	28,5254	1,01072	3,77462	1,69172
4	35,000	35,8464	1,24048	-0,84637	-0,40071
5	42,200	43,1674	1,65701	-0,96735	-0,53624
6	7,140	6,3508	1,12342	0,78917	0,36256
7	15,730	13,9083	0,78455	1,82172	0,78507
8	18,300	22,9772	0,63923	-4,67722	-1,97802
9	32,770	29,0232	0,78455	3,74682	1,61470
10	33,700	35,0691	1,04798	-1,36914	-0,61841
11	4,813	4,3090	1,77628	0,50400	0,29882
12	9,580	10,2727	1,24048	-0,69267	-0,32794
13	15,630	17,4291	1,01072	-1,79907	-0,80631
14	23,570	22,2000	1,24048	1,37000	0,64863
15	27,433	26,9709	1,65701	0,46207	0,25614

Πίνακας Α10: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους κορυφής Rp(μm).

Obs	Rp (μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	2,987	3,4807	0,687171	-0,49368	-0,90425	
2	7,200	6,1722	0,475185	1,02781	1,39291	
3	11,870	11,6952	0,453617	0,17479	0,23264	
4	16,570	16,7670	0,454759	-0,19703	-0,26249	
5	22,770	22,9507	0,655717	-0,18071	-0,30978	
6	2,397	2,9400	0,478717	-0,54303	-0,73822	
7	5,730	4,7645	0,327524	0,96548	1,18573	
8	7,340	9,2471	0,356484	-1,90710	-2,37796	R
9	13,830	13,6253	0,297115	0,20469	0,24786	
10	19,733	19,1154	0,467410	0,61763	0,83146	
11	2,270	2,3994	0,687171	-0,12939	-0,23699	
12	4,220	3,3568	0,475185	0,86315	1,16977	
13	6,420	6,7990	0,453617	-0,37900	-0,50443	
14	10,240	10,4836	0,454759	-0,24358	-0,32450	
15	15,500	15,2800	0,655717	0,21998	0,37709	

R denotes an observation with a large standardized residual.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Α11: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm).

Obs	Rsm (mm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	0,115	0,092014	0,0186794	0,0229856	1,29592	
2	0,220	0,229091	0,0130449	-0,0090905	-0,40927	
3	0,340	0,393582	0,0106287	-0,0535819	-2,28360	R
4	0,520	0,503243	0,0130449	0,0167572	0,75444	
5	0,630	0,612904	0,0174251	0,0170963	0,90120	
6	0,091	0,082190	0,0118139	0,0088098	0,38487	
7	0,190	0,190128	0,0082503	-0,0001284	-0,00526	
8	0,310	0,319654	0,0067222	-0,0096543	-0,38825	
9	0,410	0,406005	0,0082503	0,0039951	0,16372	
10	0,501	0,492355	0,0110206	0,0086445	0,37129	
11	0,100	0,072366	0,0186794	0,0276339	1,55799	
12	0,130	0,151166	0,0130449	-0,0211664	-0,95295	
13	0,210	0,245727	0,0106287	-0,0357267	-1,52263	
14	0,310	0,308767	0,0130449	0,0012330	0,05551	
15	0,394	0,371807	0,0174251	0,0221928	1,16986	

R denotes an observation with a large standardized residual.

Πίνακας Α12: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της λοξότητας Rsk.

Obs	Rsk	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
1	0,038	-0,125521	0,150171	0,163521	0,78796	
2	0,060	0,130040	0,124421	-0,070040	-0,31280	
3	0,380	0,436712	0,114969	-0,056712	-0,24775	
4	0,730	0,641160	0,124421	0,088840	0,39676	
5	0,720	0,845609	0,144084	-0,125609	-0,59306	
6	-0,540	-0,393721	0,150171	-0,146279	-0,70488	
7	-0,340	-0,138160	0,124421	-0,201840	-0,90142	
8	-0,120	0,168512	0,114969	-0,288512	-1,26037	
9	0,870	0,372960	0,124421	0,497040	2,21979	R
10	0,717	0,577409	0,144084	0,139591	0,65908	
11	-0,247	-0,326721	0,150171	0,079721	0,38415	
12	0,285	-0,071160	0,124421	0,356160	1,59062	
13	-0,090	0,235512	0,114969	-0,325512	-1,42201	
14	0,440	0,439960	0,124421	0,000040	0,00018	
15	0,534	0,644409	0,144084	-0,110409	-0,52130	

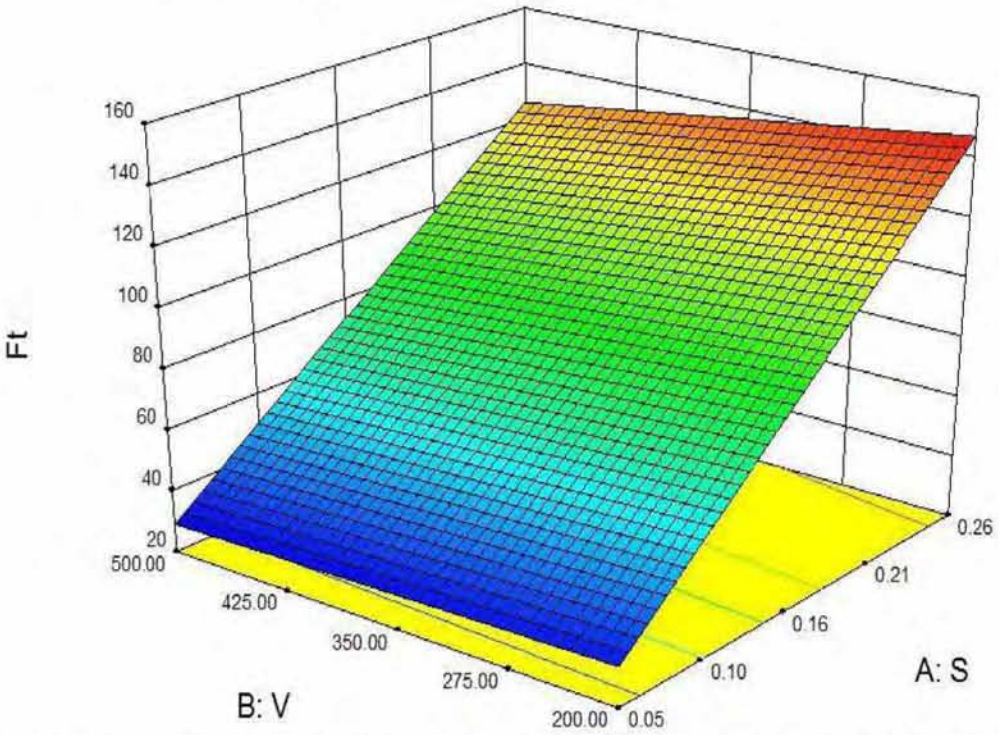
R denotes an observation with a large standardized residual.

Πίνακας Α13: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της κυρτότητας Rku.

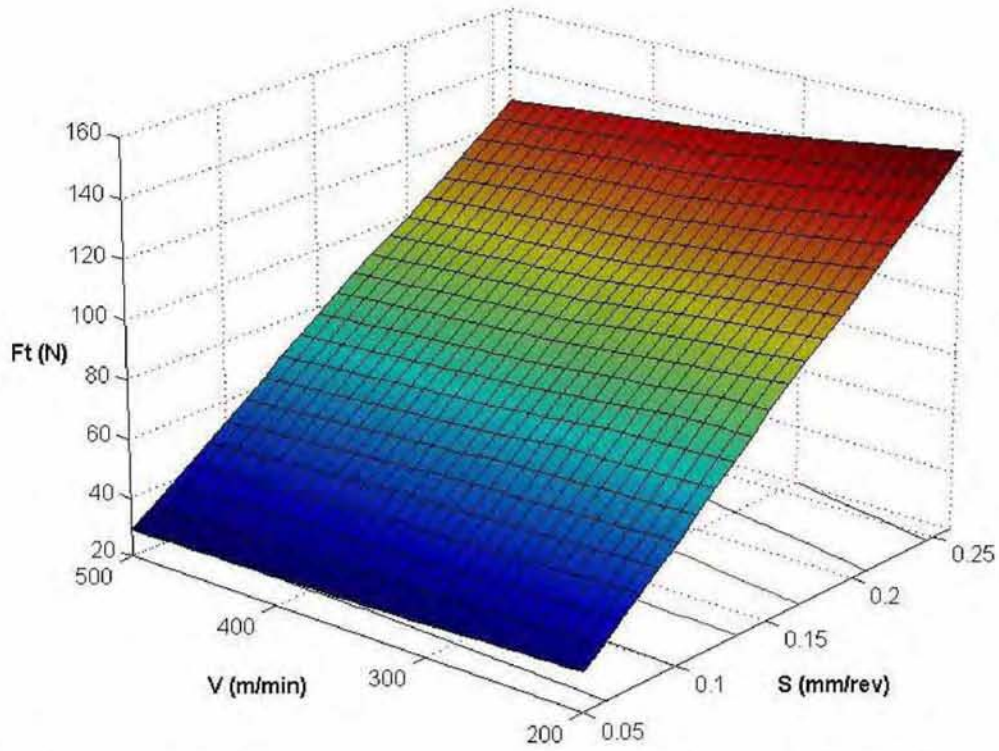
Obs	Rku	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	2,983	3,11704	0,208674	-0,134039	-0,86841
2	3,570	3,24744	0,148305	0,322557	1,51427
3	2,850	3,25245	0,142275	-0,402452	-1,85388
4	3,160	3,16399	0,142594	-0,003987	-0,01838
5	3,220	3,00208	0,199626	0,217921	1,31368
6	3,297	3,28314	0,170370	0,013859	0,07078
7	3,630	3,36519	0,135516	0,264806	1,19622
8	3,050	3,31218	0,141764	-0,262182	-1,20588
9	3,350	3,18504	0,129241	0,164964	0,73288
10	2,803	2,98445	0,167601	-0,181447	-0,91553
11	2,963	3,04184	0,208674	-0,078844	-0,51082
12	3,060	3,07555	0,148305	-0,015546	-0,07298
13	2,900	2,96451	0,142275	-0,064511	-0,29717
14	3,040	2,79868	0,142594	0,241315	1,11268
15	2,477	2,55941	0,199626	-0,082415	-0,49682

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Α.3 Επιφάνειες προσαρμογής και διαγράμματα επιφανείας

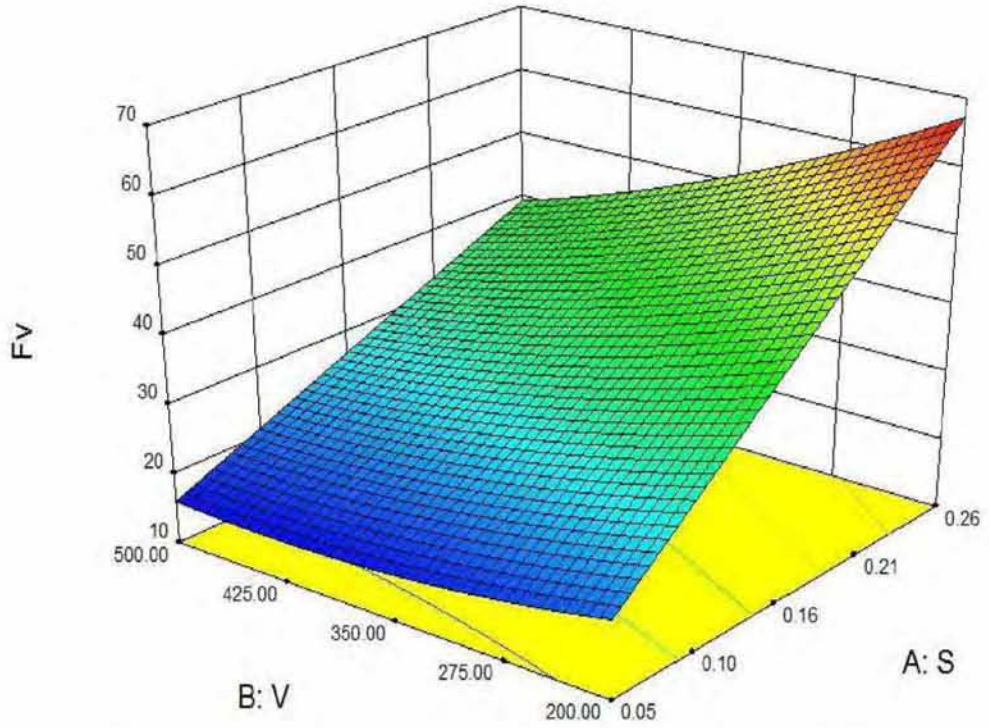


Σχήμα Α1: Επιφάνεια προσαρμογής της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N).

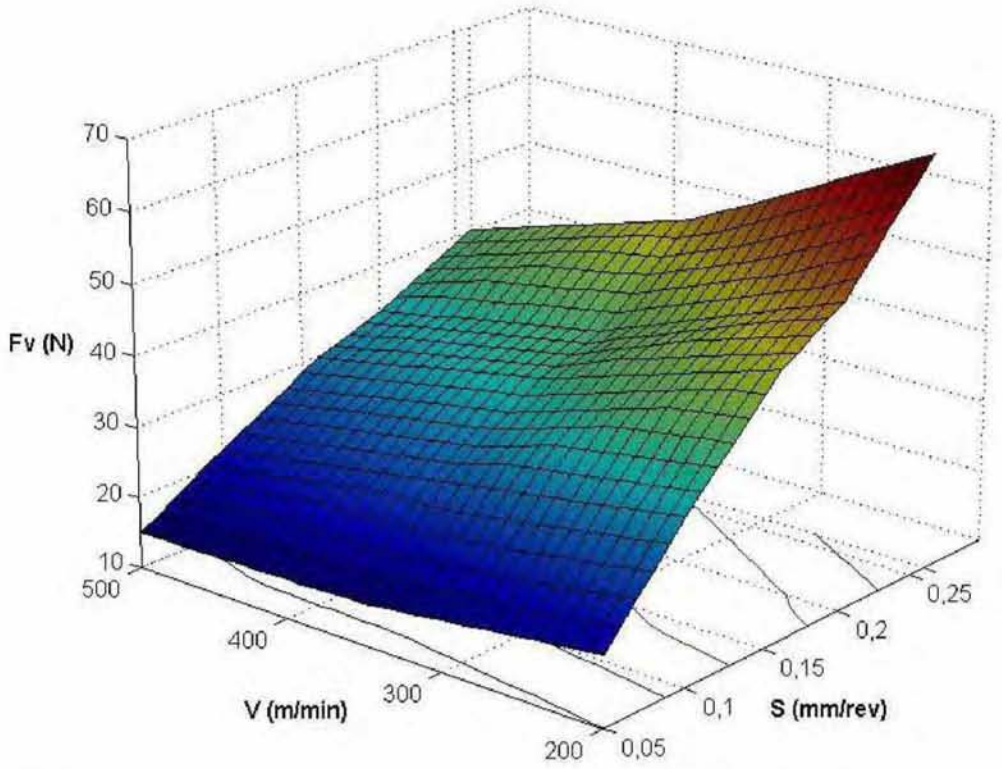


Σχήμα Α2: Γράφημα επιφάνειας της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

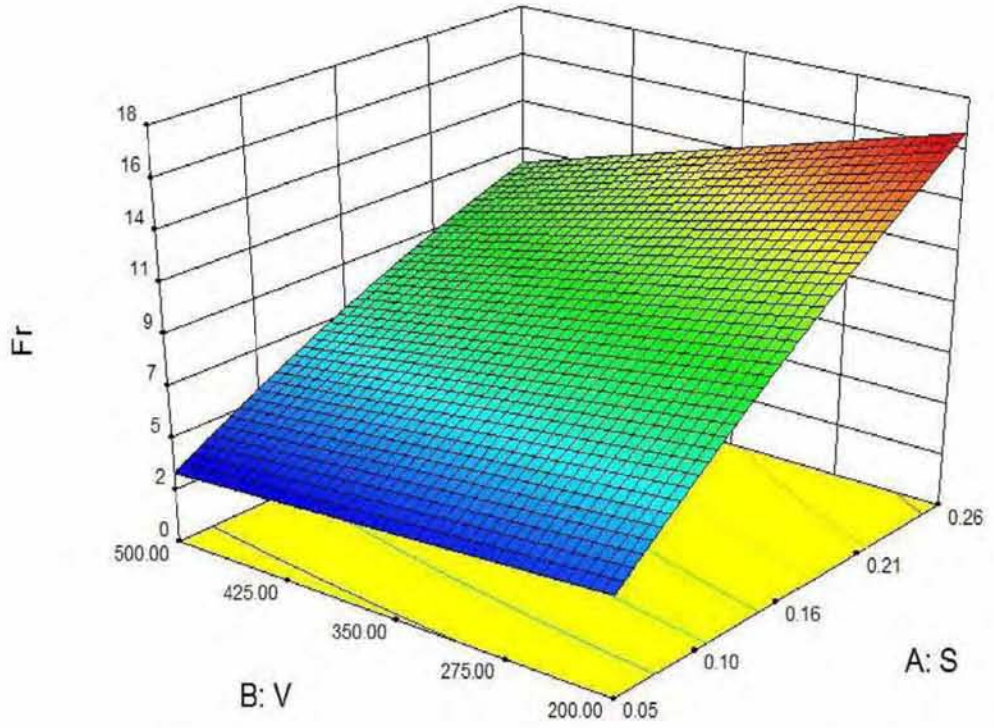


Σχήμα Α3: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης πρόωσης Fv(N).

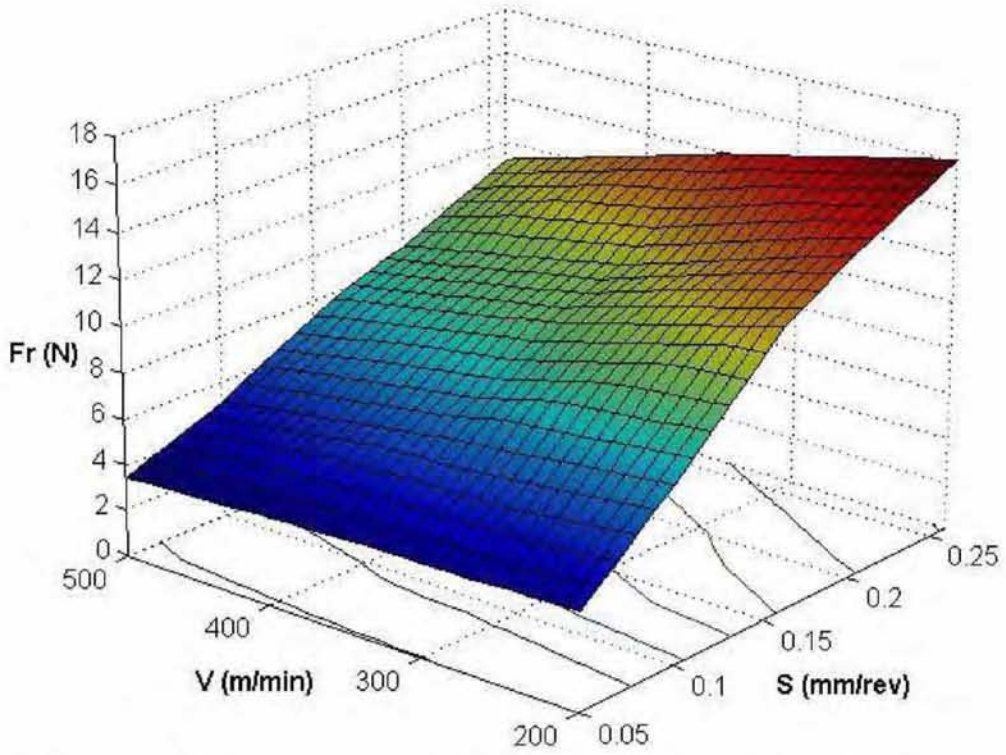


Σχήμα Α4: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης πρόωσης F_v(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

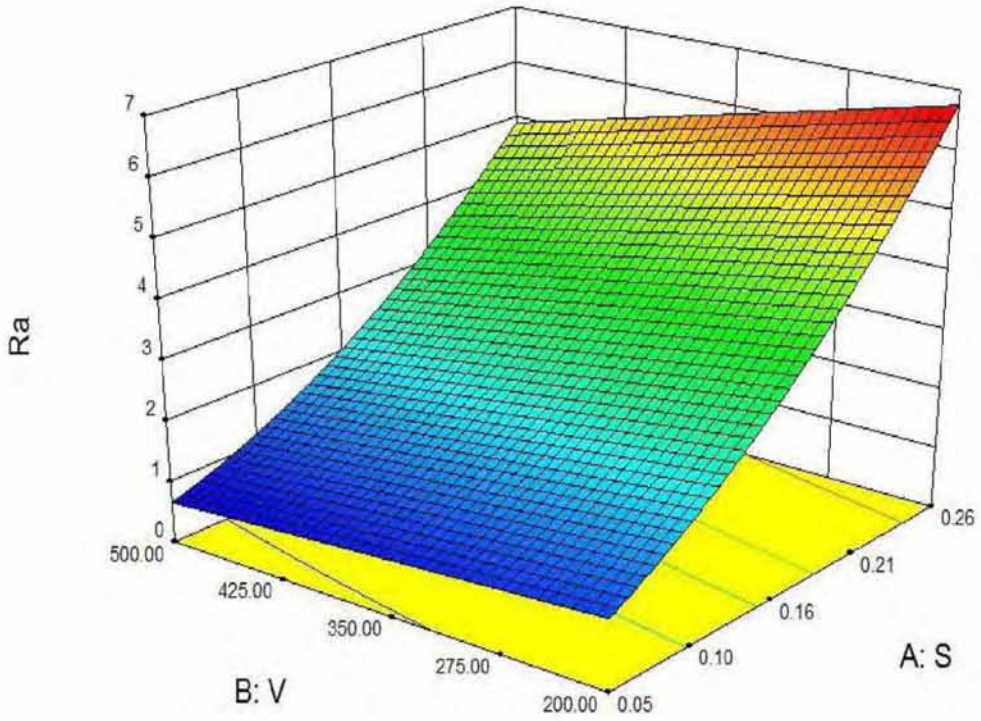


Σχήμα Α5: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης απώθησης εργαλείου F_r(N).

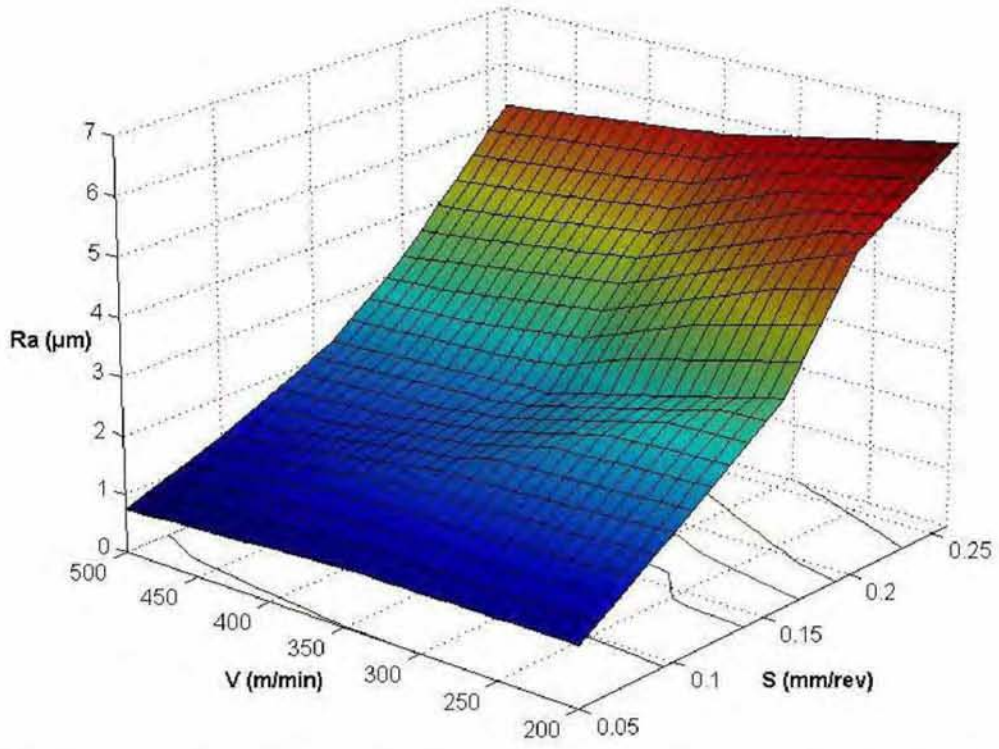


Σχήμα Α6: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης απώθησης εργαλείου F_r(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

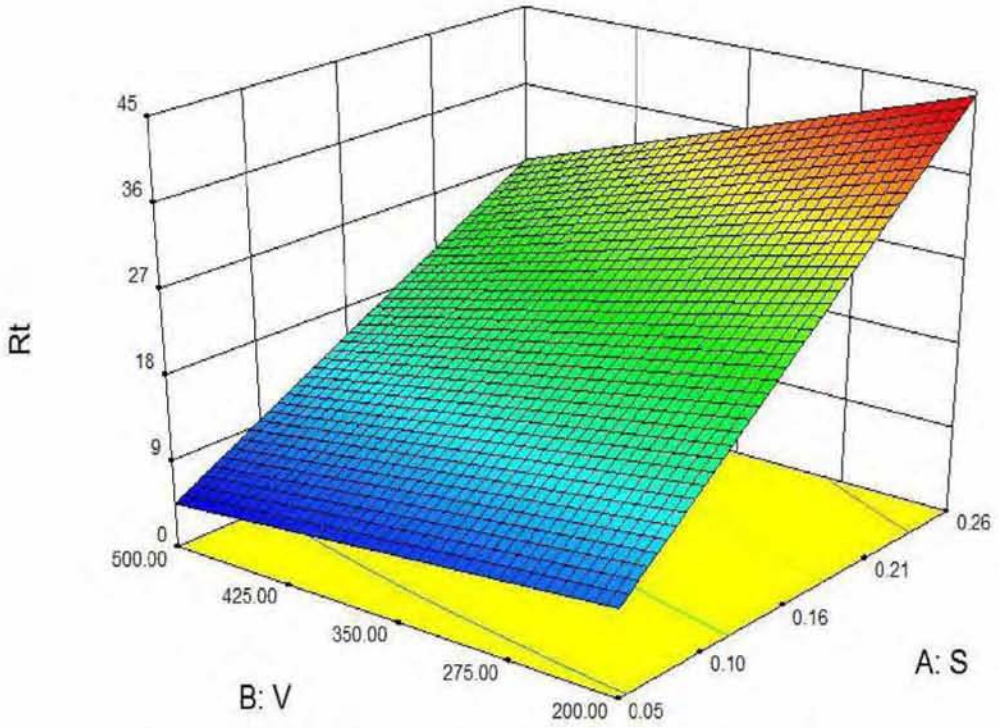


Σχήμα Α7: Επιφάνεια προσαρμογής της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm).

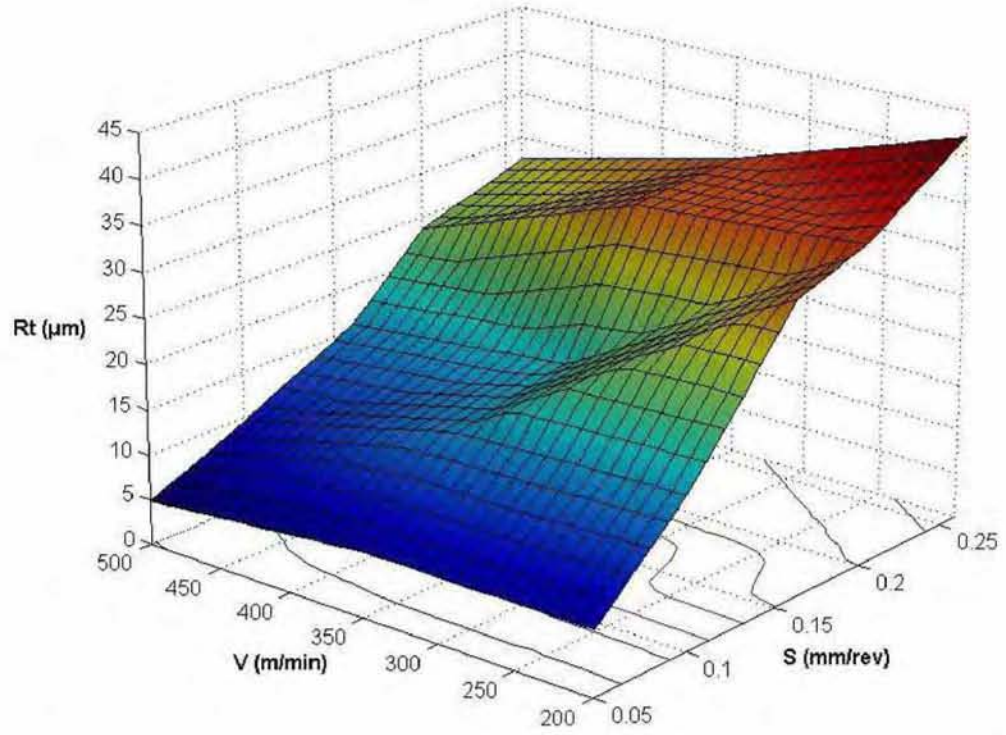


Σχήμα Α8: Γράφημα επιφάνειας της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

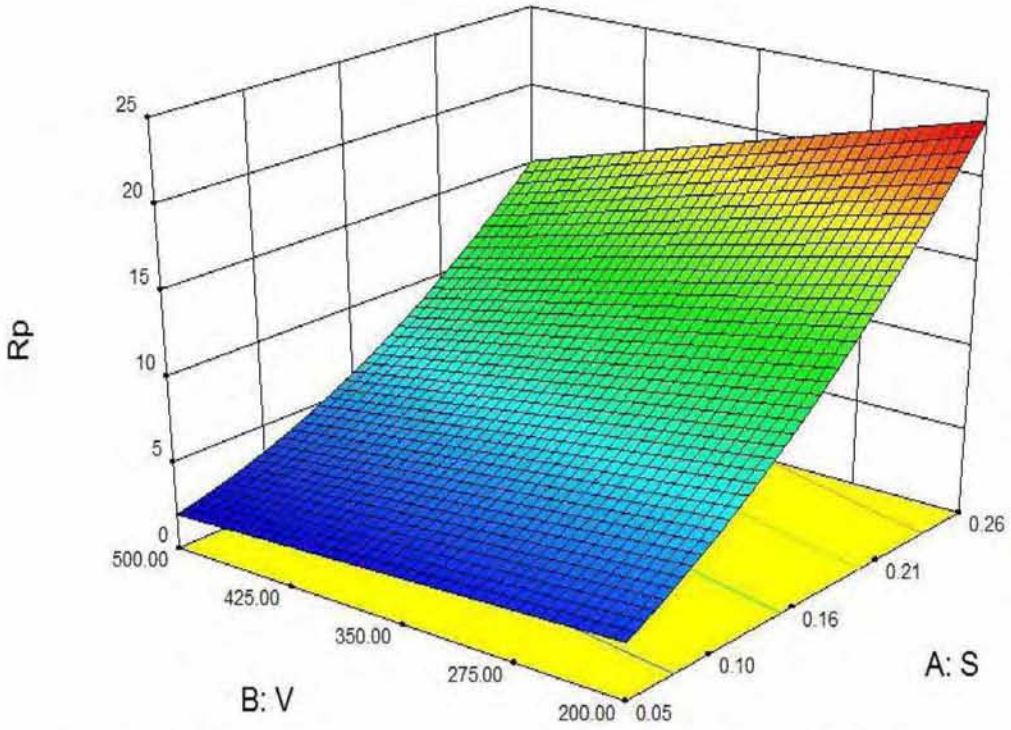


Σχήμα Α9: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους Rt(μm).

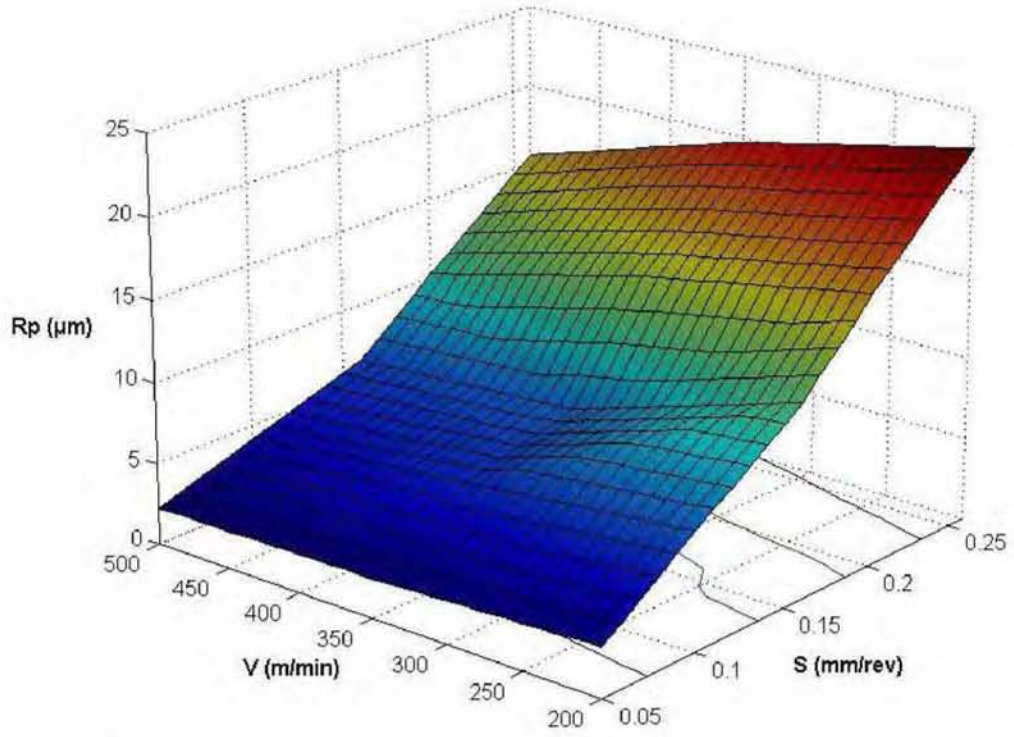


Σχήμα Α10: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους Rt(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

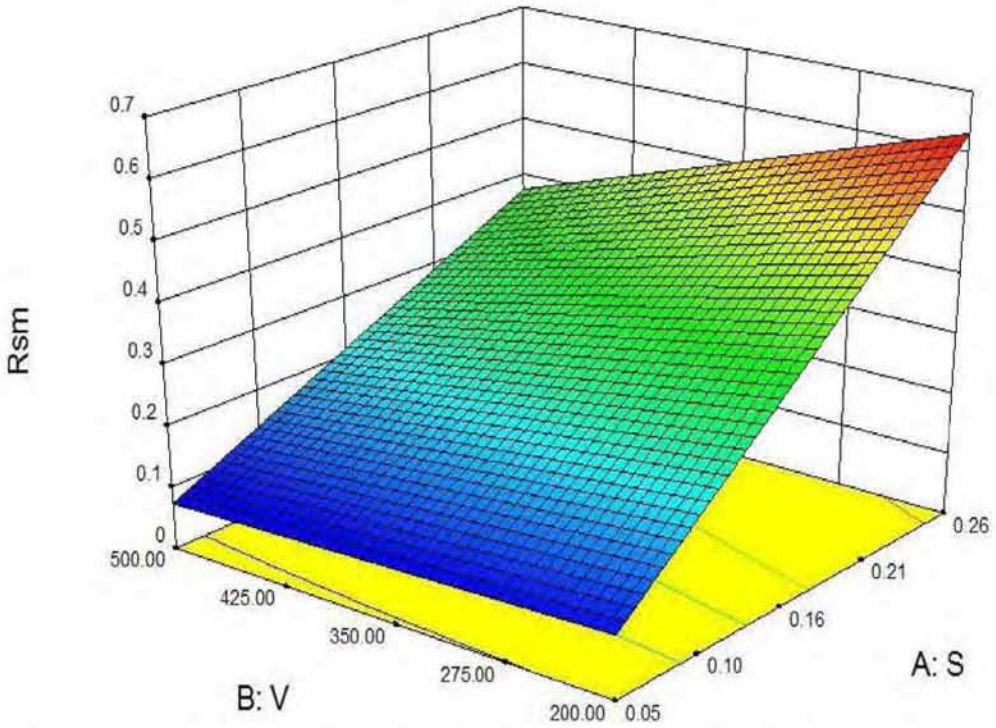


Σχήμα Α11: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους κορυφής Rp(μm).

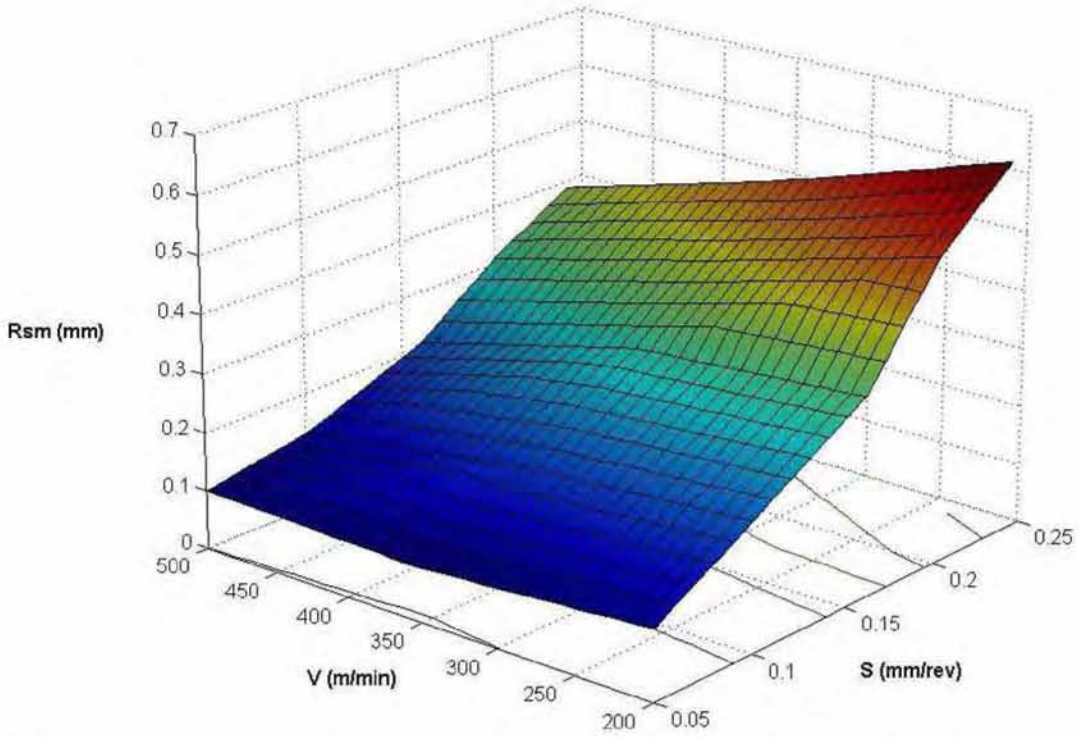


Σχήμα Α12: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους κορυφής Rp(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

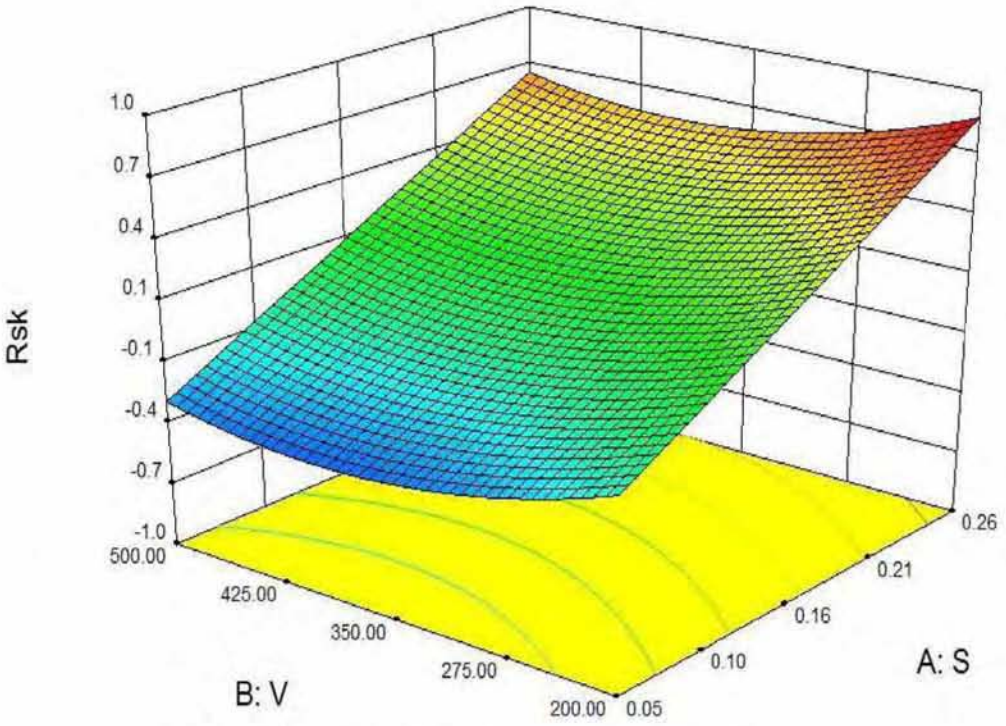


Σχήμα Α13: Επιφάνεια προσαρμογής του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm).

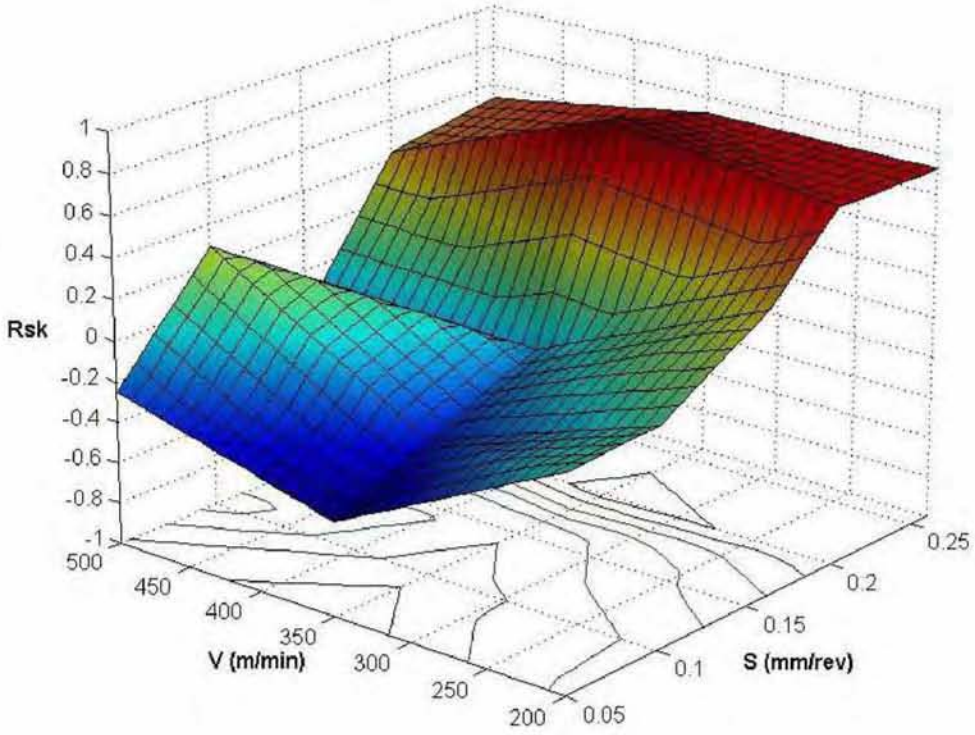


Σχήμα Α14: Γράφημα επιφάνειας του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

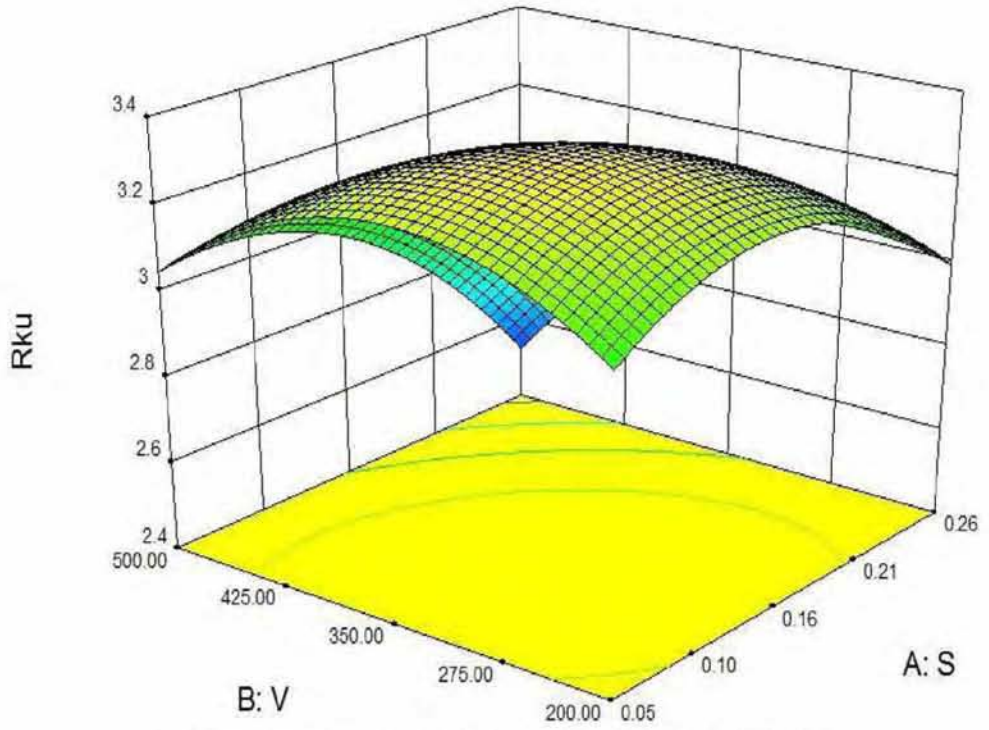


Σχήμα Α15: Επιφάνεια προσαρμογής της λοξότητας Rsk.

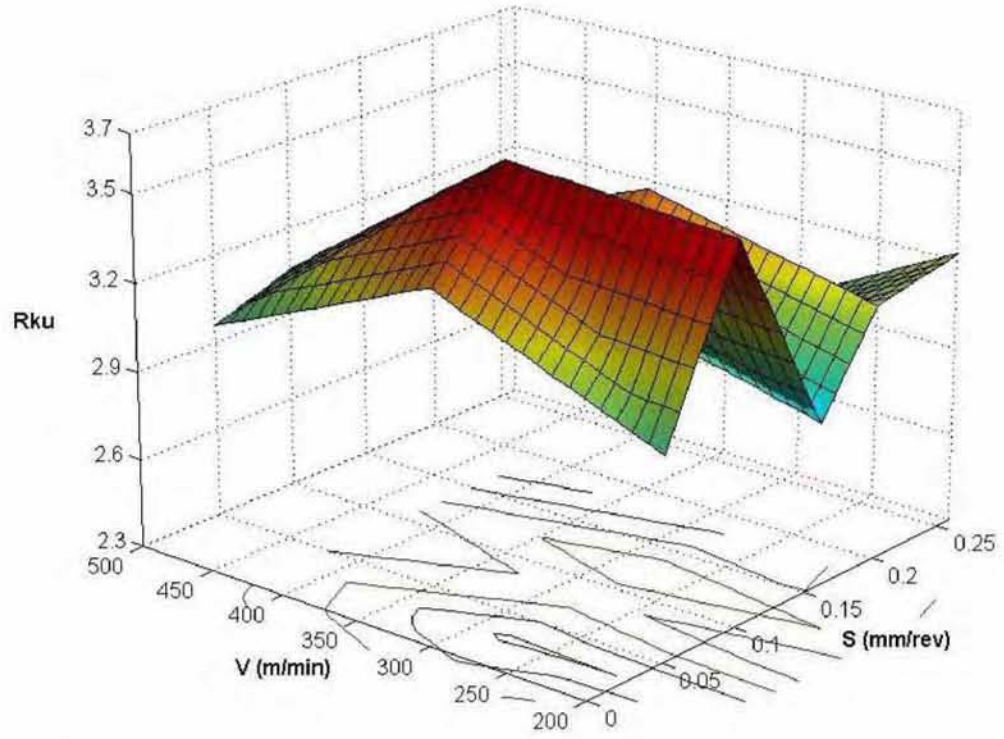


Σχήμα Α16: Γράφημα επιφάνειας της λοξότητας Rsk συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



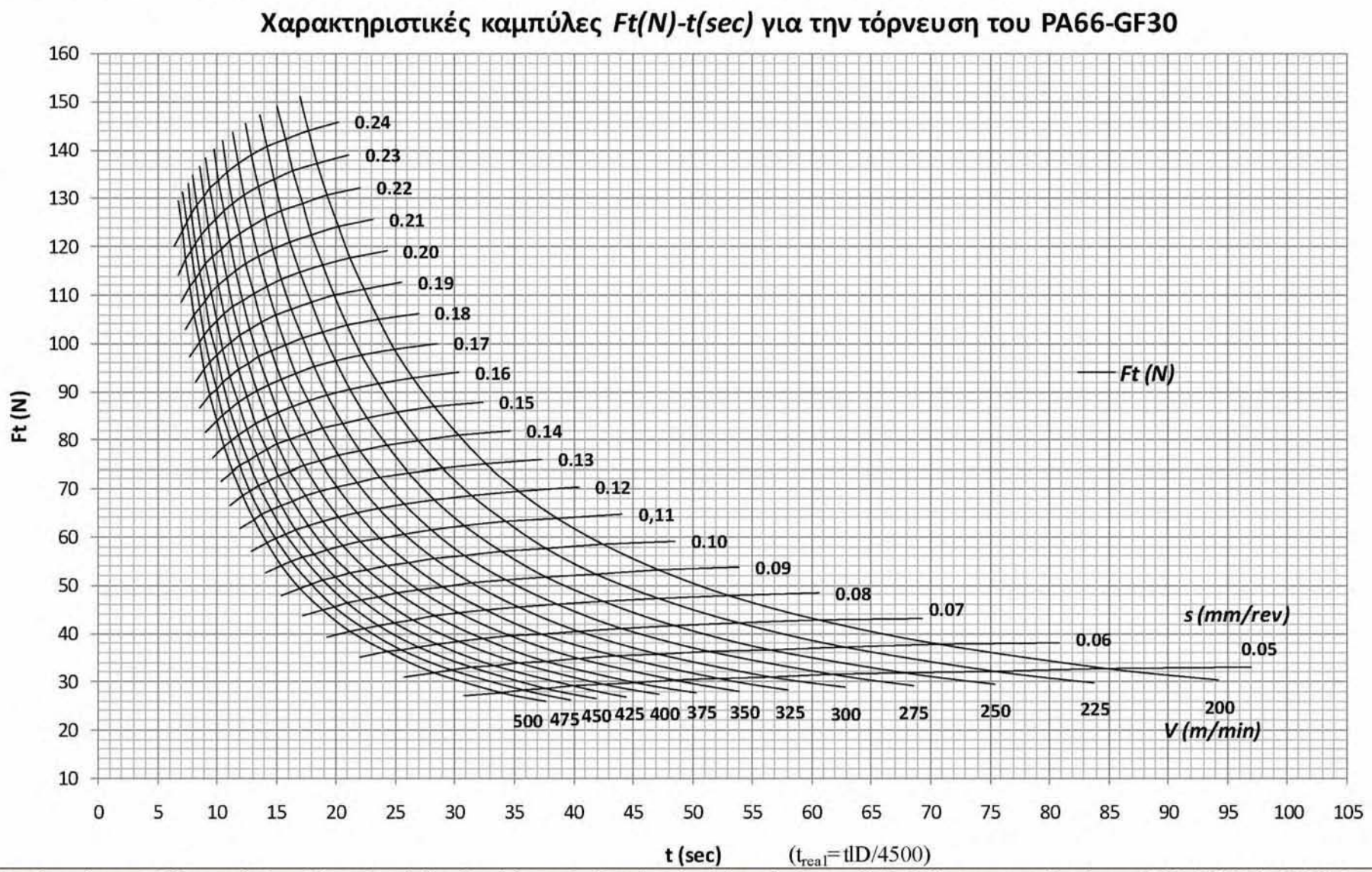
Σχήμα Α17: Επιφάνεια προσαρμογής της κυρτότητας Rku.



Σχήμα Α18: Γράφημα επιφάνειας της κυρτότητας Rku συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Α.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30

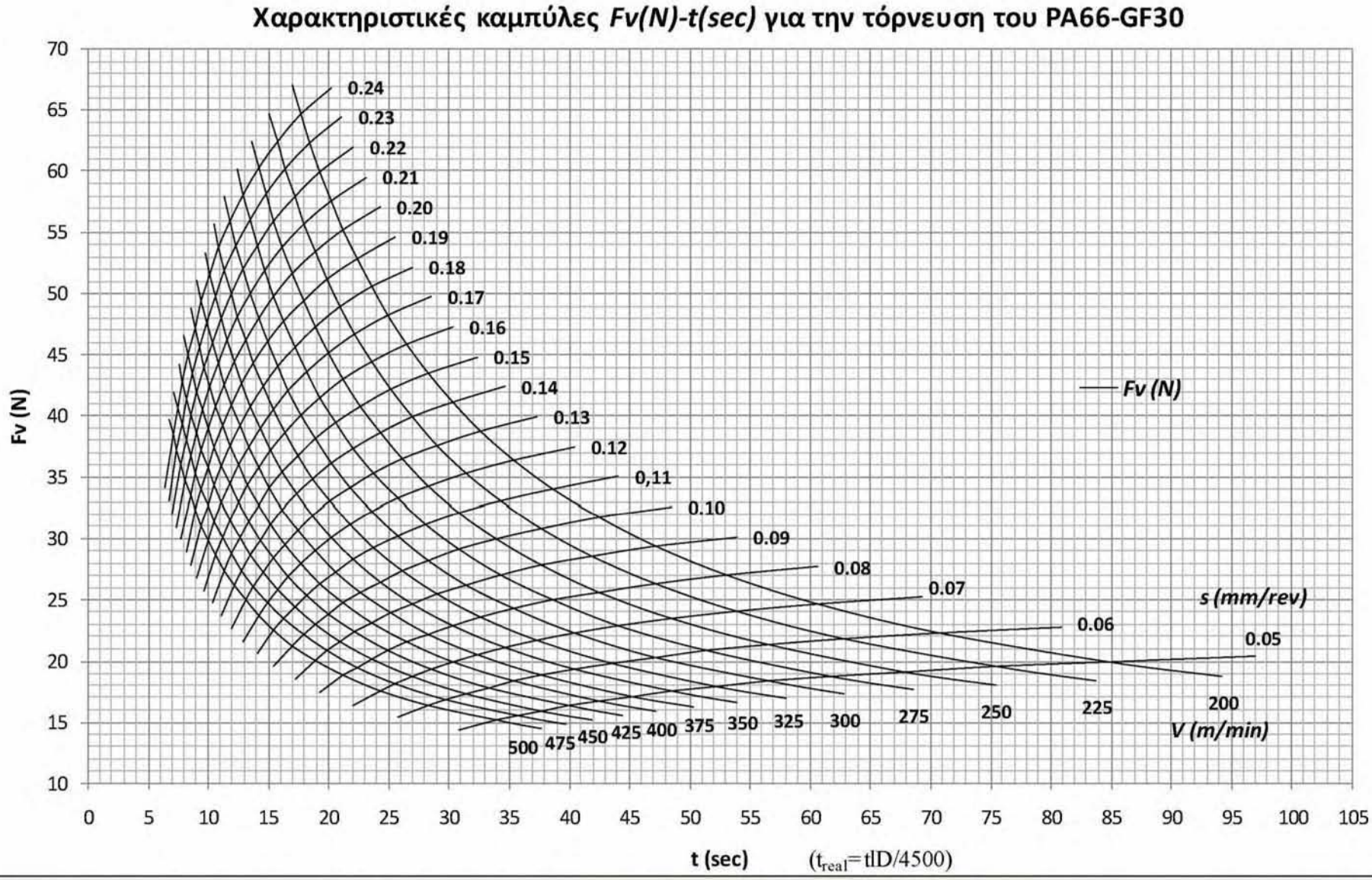


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής 2mm, Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου P20, τετραγωνικού σχήματος **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6°, Γωνία ελευθερίας 5°, Γωνία θέσεως της κύριας κόψης 90°, Γωνία λοξότητας της κόψης 0°, Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης 0.8mm

Όπου: Ft(N) η κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α19: Χαρακτηριστικές καμπύλες της κύριας συνιστώσας της δύναμης κοπής F_t(N) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

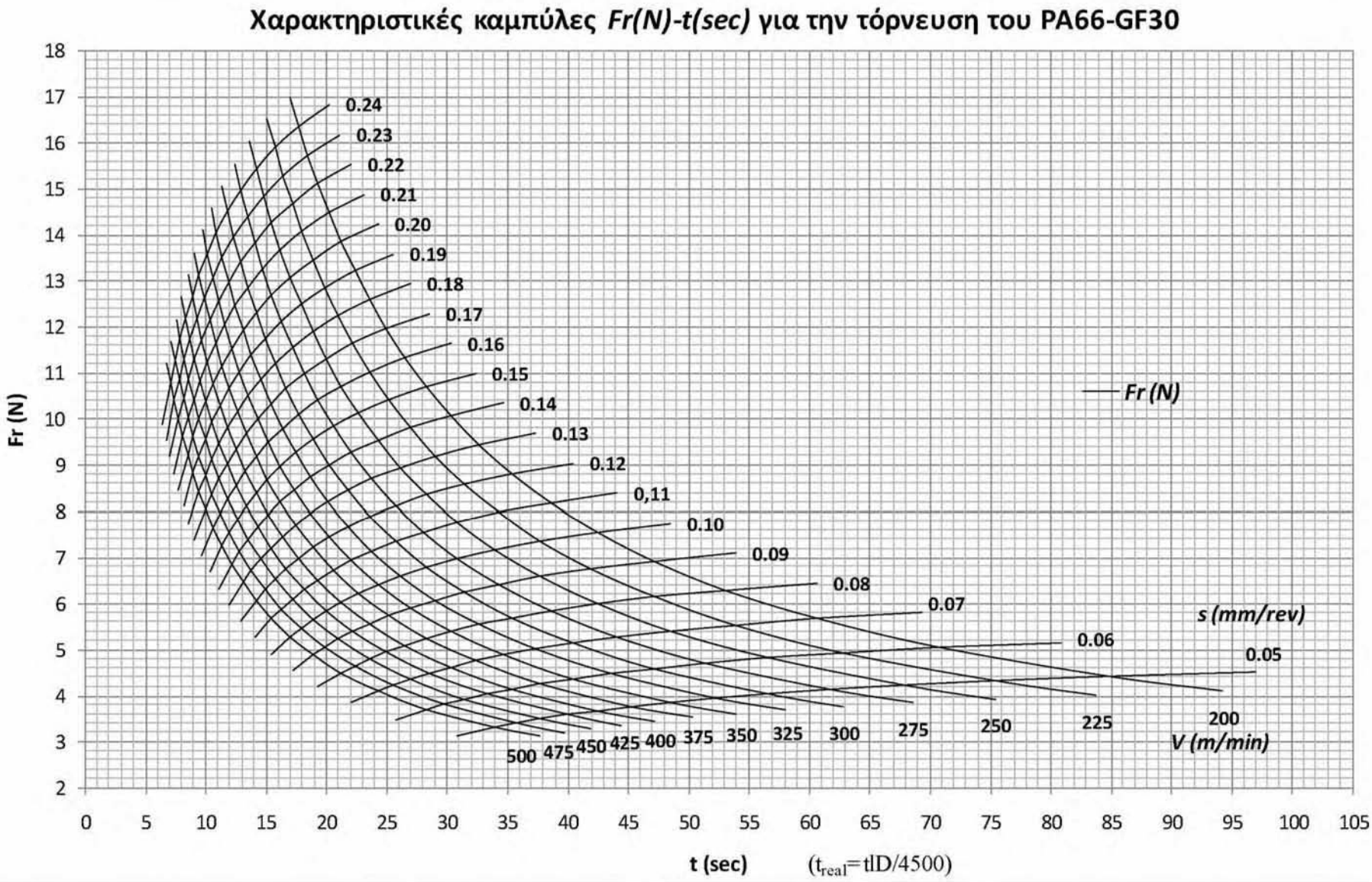


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6^o, *Γωνία ελευθερίας* 5^o, *Γωνία θέσεως της κύριας κόψης* 90^o, *Γωνία λοξότητας της κόψης* 0^o, *Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης* **0.8mm**

Όπου: Fv(N) η δύναμης πρόωσης, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm
t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α20: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης πρόωσης F_v(N) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

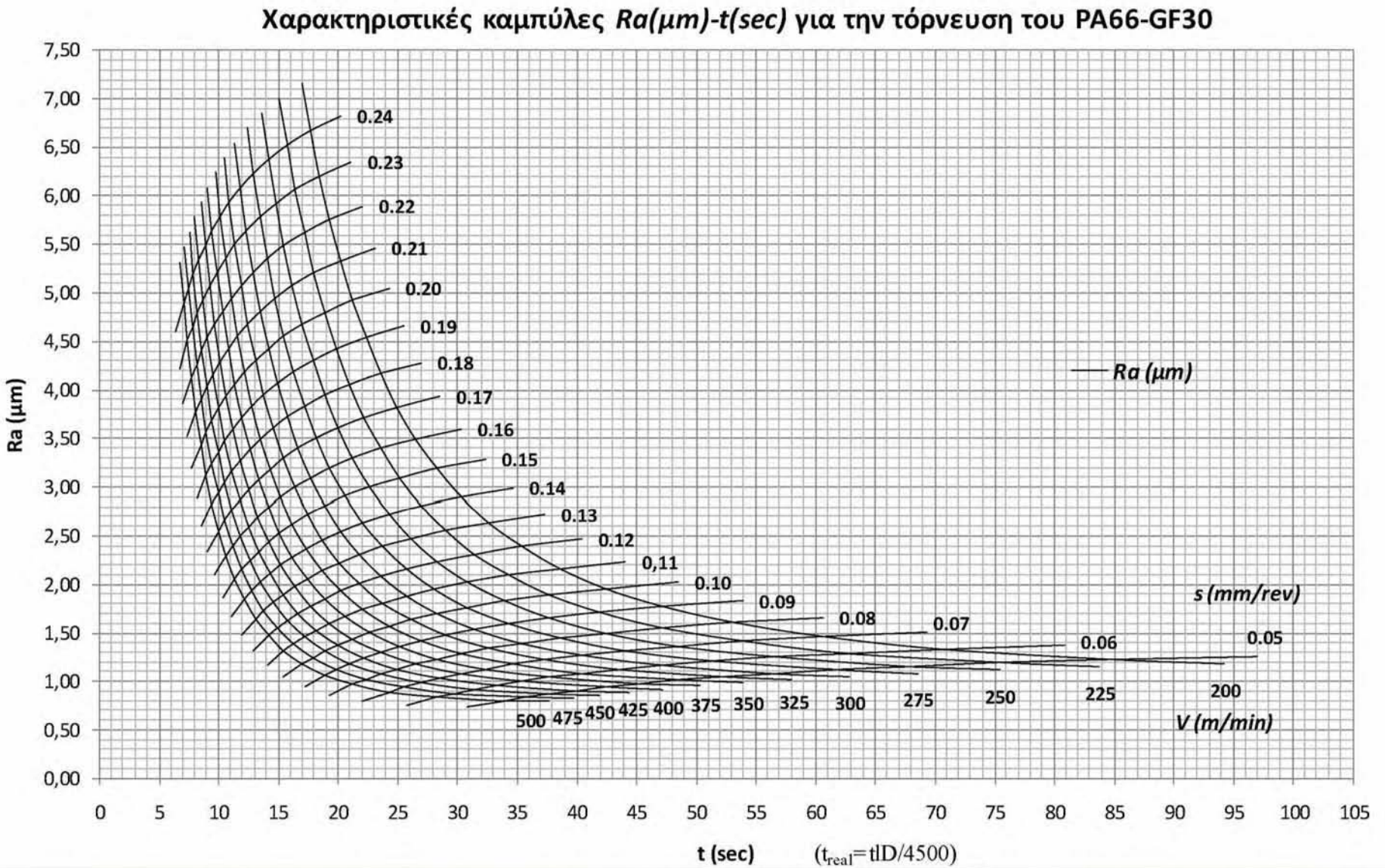


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6°, Γωνία ελευθερίας 5°, Γωνία θέσεως της κύριας κόψης 90°, Γωνία λοξότητας της κόψης 0°, Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης 0.8mm

Όπου: Fr(N) η δύναμης απώθησης εργαλείου, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α21: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης απώθησης των εργαλείων F_r(N) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

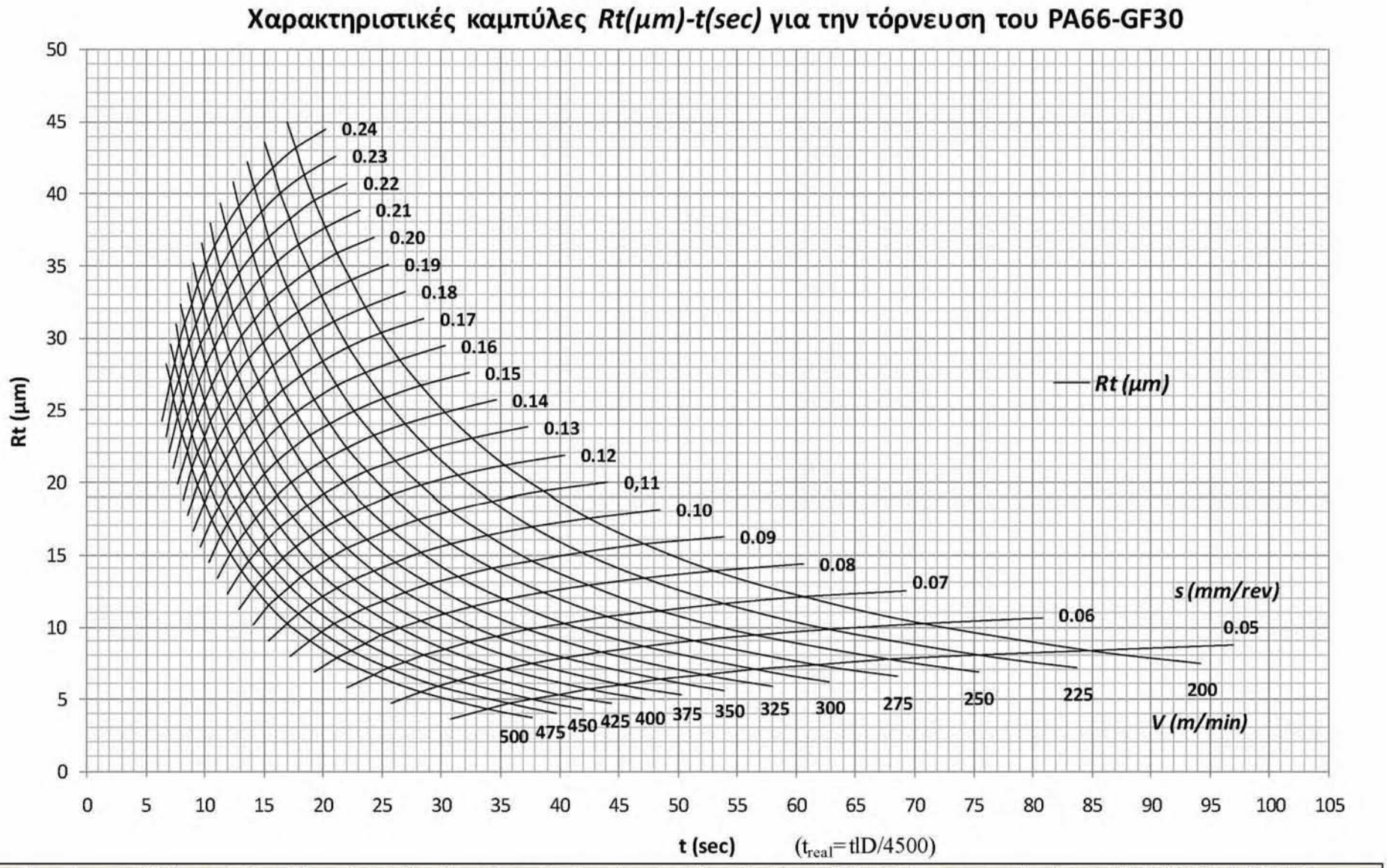


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6°, Γωνία ελευθερίας 5°, Γωνία θέσεως της κύριας κόψης 90°, Γωνία λοξότητας της κόψης 0°, Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης 0.8mm

Όπου: Ra(μm) η μέση αριθμητική τραχύτητα, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α22: Χαρακτηριστικές καμπύλες της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

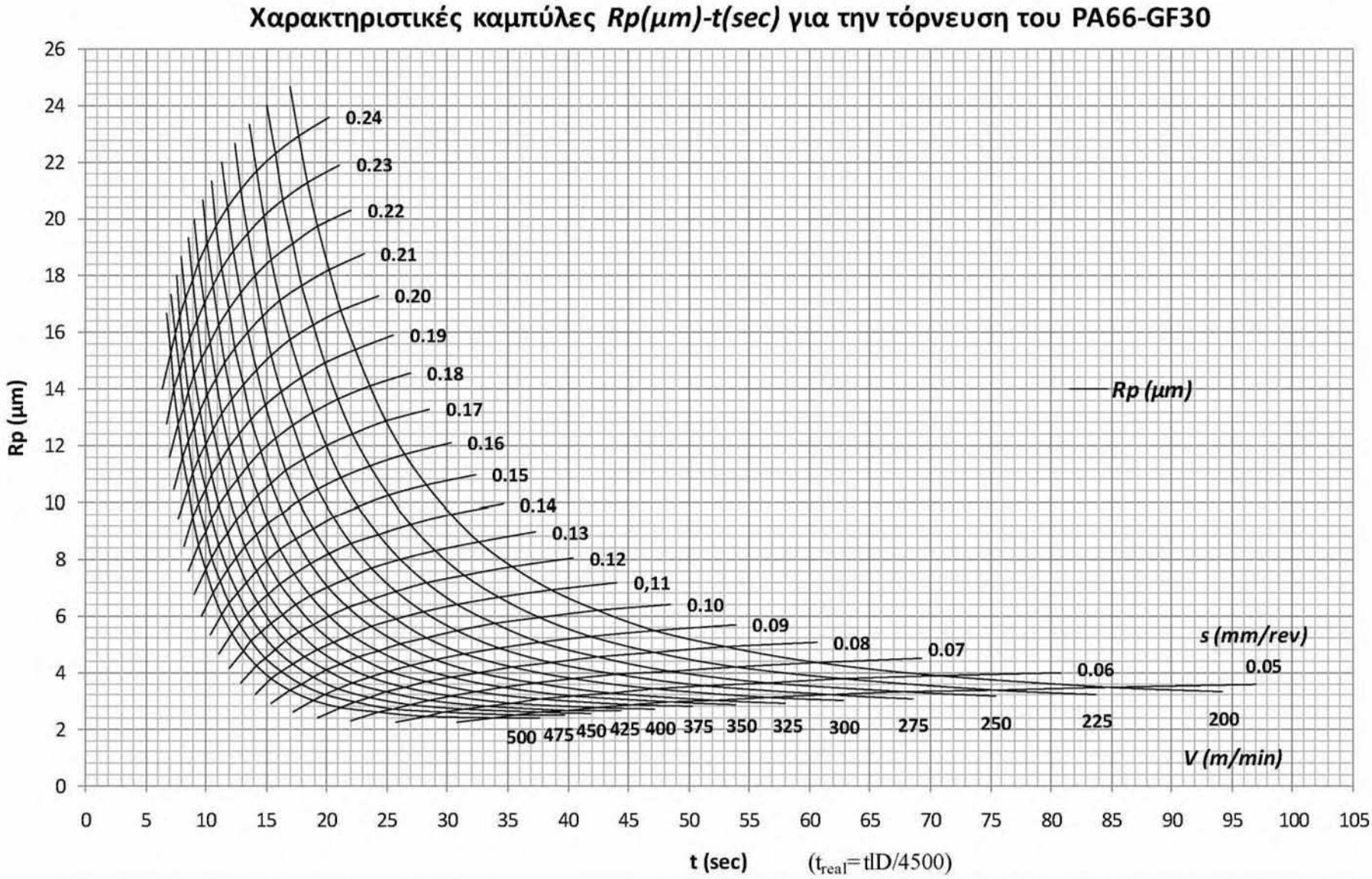


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6°, Γωνία ελευθερίας 5°, Γωνία θέσεως της κύριας κόψης 90°, Γωνία λοξότητας της κόψης 0°, Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης 0.8mm

Όπου: Rt(μm) το μέγιστο ύψος, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm
t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α23: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους R_t(μm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

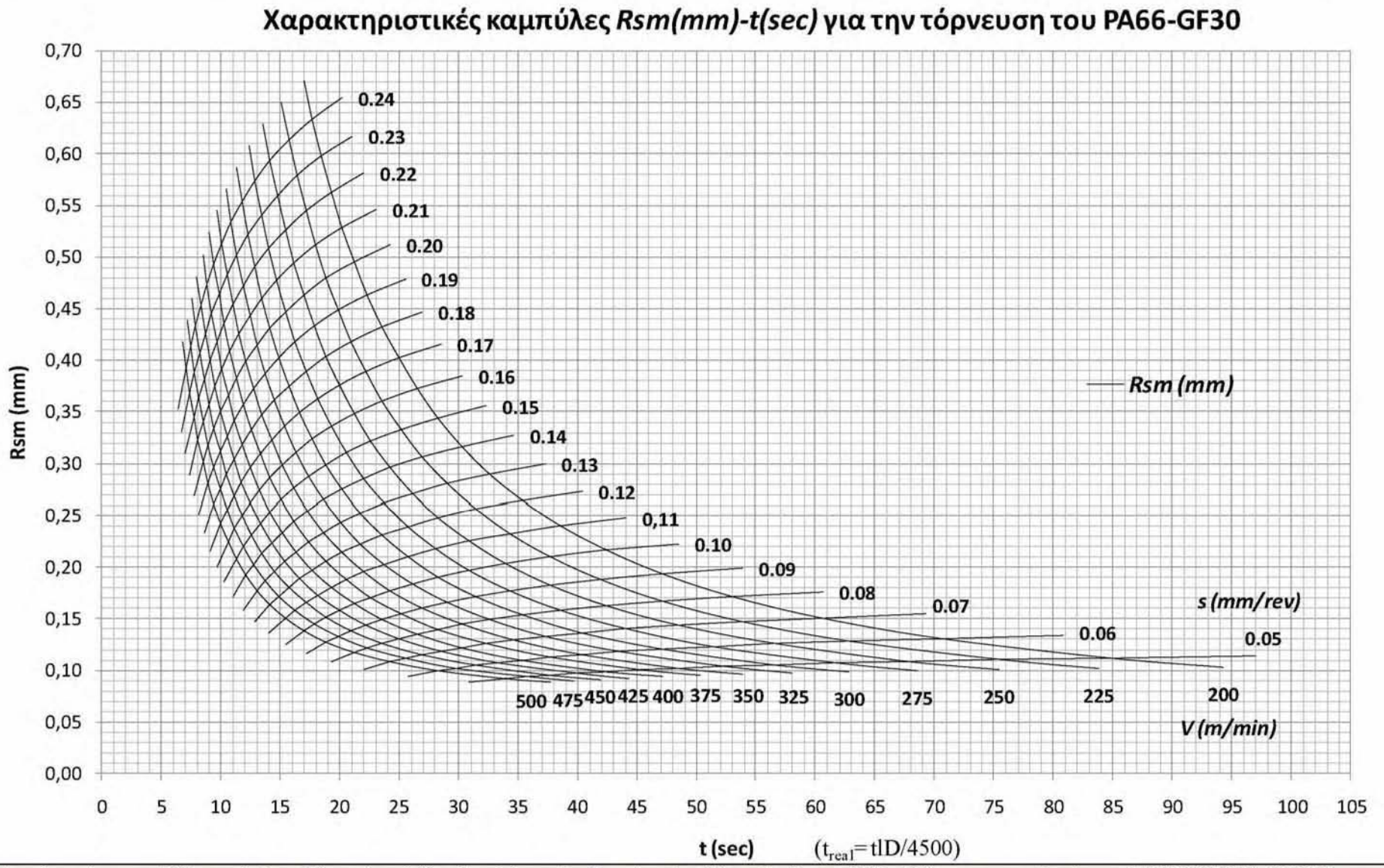


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6°, Γωνία ελευθερίας 5°, Γωνία θέσεως της κύριας κόψης 90°, Γωνία λοξότητας της κόψης 0°, Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης 0.8mm

Όπου: Rp(μm) το μέγιστο ύψος κορυφής, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α24: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους κορυφής R_p(μm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

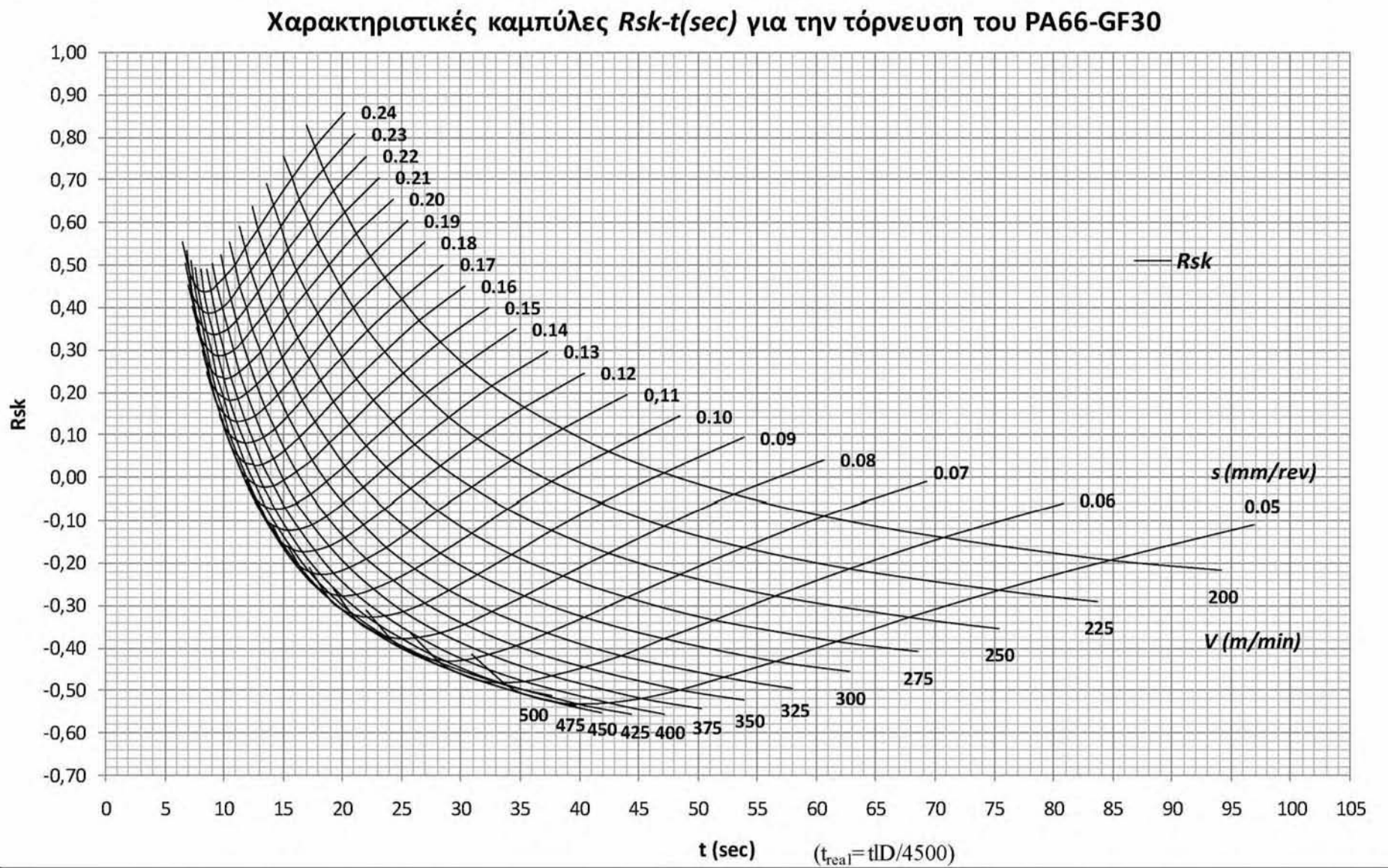


-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6^o, *Γωνία ελευθερίας* 5^o, *Γωνία θέσεως της κύριας κόψης* 90^o, *Γωνία λοξότητας της κόψης* 0^o, *Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης* **0.8mm**

Όπου: Rsm(mm) το μέσο διάστημα κορυφών, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α25: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέσου διαστήματος κορυφών R_{sm}(mm) για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



-Διαμήκης τόρνευση, Βάθος κοπής **2mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι, Εργαλείο κοπής: Επικαλυμμένο ένθετο πλακίδιο καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SPEA120408FN –UP20M).**
-Γωνία αποβλίττου 6°, Γωνία ελευθερίας 5°, Γωνία θέσεως της κύριας κόψης 90°, Γωνία λοξότητας της κόψης 0°, Ακτίνα καμπυλότητας της κόψης 0.8mm

Όπου: Rsk η λοξότητα, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο του τεμαχίου 150mm και μήκος κοπής 30mm
t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του τεμαχίου στο σημείο κοπής, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Α26: Χαρακτηριστικές καμπύλες της λοξότητας R_{sk} για την διαμήκη τόρνευση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Παράρτημα Β

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΦΡΑΙΖΑΡΙΣΜΑ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Β.1 Δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων

Πίνακας Β1: Πειραματικές μετρήσεις των δυνάμεων κοπής κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	F_x (N)				F_y (N)				F_z (N)			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
4	1	0,2	50	60,13	56,98	55,27	57,46	80,55	79,06	76,64	78,75	11,12	13,89	13,15	12,72
3	2	0,32	50	70,84	75,11	70,23	72,06	102,11	98,05	98,55	99,57	20,64	23,17	22,67	22,16
8	3	0,4	50	106,12	101,75	108,21	105,36	143,81	139,04	133,01	138,62	34,56	33,99	39,81	36,12
1	4	0,2	200	58,07	57,23	52,79	56,03	76,08	75,14	72,76	74,66	9,79	11,03	12,14	10,99
7	5	0,32	200	66,19	63,9	67,64	65,91	92,33	91,56	83,74	89,21	16,64	17,02	19,87	17,84
2	6	0,4	200	80,44	85,06	86,29	83,93	116,45	113,04	120,28	116,59	33,08	31,18	26,46	30,24
6	7	0,2	500	49,92	53,62	54,68	52,74	67,18	72,69	68,24	69,37	8,66	7,9	8,40	8,32
9	8	0,32	500	53,20	55,01	60,75	56,32	81,81	82,3	75,26	79,79	13,07	15,71	16,10	14,96
5	9	0,4	500	73,61	71,01	70,84	71,82	97,35	98,42	104,41	100,06	22,78	26,22	23,54	24,18

Πίνακας Β2: Η συνισταμένη των Fx, Fy, και Fz δύναμη κοπής F(N) κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	F (N)
4	1	0,2	50	57,46	78,75	12,72	98,31
3	2	0,32	50	72,06	99,57	22,16	124,89
8	3	0,4	50	105,36	138,62	36,12	177,82
1	4	0,2	200	56,03	74,66	10,99	93,99
7	5	0,32	200	65,91	89,21	17,84	112,34
2	6	0,4	200	83,93	116,59	30,24	146,81
6	7	0,2	500	52,74	69,37	8,32	87,54
9	8	0,32	500	56,32	79,79	14,96	98,80
5	9	0,4	500	71,82	100,06	24,18	125,52

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Β3: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_a, R_z και R_t κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	R_a (μm)				R_z (μm)				R_t (μm)			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
4	1	0,2	50	0,91	0,86	0,89	0,89	5,80	5,88	6,38	6,02	7,33	7,03	7,63	7,33
3	2	0,32	50	0,95	0,93	1,09	0,99	5,86	6,36	6,41	6,21	8,22	8,35	8,18	8,25
8	3	0,4	50	1,21	0,98	1,08	1,09	7,02	7,41	7,66	7,37	9,19	9,89	9,71	9,60
1	4	0,2	200	0,83	0,80	0,80	0,81	5,51	5,72	5,78	5,67	6,99	7,35	7,26	7,20
7	5	0,32	200	0,86	0,91	0,92	0,90	6,33	6,00	5,85	6,06	7,42	7,80	7,55	7,59
2	6	0,4	200	0,94	0,94	1,00	0,96	7,74	7,10	6,98	7,28	8,23	8,86	8,41	8,50
6	7	0,2	500	0,73	0,78	0,78	0,76	5,01	5,55	5,44	5,34	6,55	7,07	6,76	6,79
9	8	0,32	500	0,87	0,81	0,80	0,82	5,98	5,23	5,20	5,47	7,22	6,85	6,95	7,01
5	9	0,4	500	0,91	0,91	0,81	0,88	6,32	7,06	7,04	6,81	7,29	7,20	8,04	7,51

Πίνακας Β4: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων της τραχύτητας R_{sm}, R_{sk} και R_{ku} κατά το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	R_{sm} (μm)				R_{sk}				R_{ku}			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
4	1	0,2	50	0,076	0,081	0,086	0,081	-0,16	-0,03	-0,09	-0,09	4,53	2,12	3,04	3,23
3	2	0,32	50	0,083	0,085	0,087	0,085	-0,84	-1,23	0,24	-0,61	3,21	3,33	4,67	3,74
8	3	0,4	50	0,119	0,099	0,107	0,108	0,06	-0,15	-0,03	-0,04	2,89	3,51	4,01	3,47
1	4	0,2	200	0,082	0,088	0,085	0,085	0,22	-0,24	-0,59	-0,20	4,12	3,07	3,69	3,63
7	5	0,32	200	0,088	0,093	0,092	0,091	-0,15	-0,96	-0,57	-0,56	3,67	3,51	2,39	3,19
2	6	0,4	200	0,127	0,111	0,116	0,118	-0,17	-0,55	-0,43	-0,38	4,01	3,28	3,78	3,69
6	7	0,2	500	0,069	0,067	0,074	0,070	-0,05	0,63	0,32	0,30	3,94	4,46	5,06	4,49
9	8	0,32	500	0,071	0,077	0,080	0,076	-0,25	0,18	-0,27	-0,11	2,79	3,14	3,75	3,23
5	9	0,4	500	0,086	0,092	0,092	0,090	0,23	0,41	-0,16	0,16	4,23	4,19	5,29	4,57

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Β.2 Εκτιμήσεις και κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων

Πίνακας Β5: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης Fx(N).

Obs	Fx (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	57,46	56,918	3,60627	0,54208	0,21623
2	72,06	73,182	2,99066	-1,12163	-0,34871
3	105,36	100,062	3,46962	5,29812	1,96741
4	56,03	55,787	2,61553	0,24302	0,06888
5	65,91	66,868	2,56655	-0,95791	-0,26876
6	83,93	90,293	2,60395	-6,36297	-1,79903
7	52,74	53,525	4,08701	-0,78510	-0,48816
8	56,32	54,240	3,21842	2,07954	0,69581
9	71,82	70,755	3,89780	1,06485	0,52606

Πίνακας Β6: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης Fy(N).

Obs	Fy (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	78,75	77,559	3,64786	1,19095	0,46963
2	99,57	99,901	3,02516	-0,33095	-0,10172
3	138,62	133,520	3,50964	5,10000	1,87224
4	74,66	75,085	2,64570	-0,42476	-0,11901
5	89,21	92,118	2,59616	-2,90774	-0,80653
6	116,59	122,197	2,63399	-5,60750	-1,56735
7	69,37	70,136	4,13415	-0,76619	-0,47097
8	79,79	76,551	3,25554	3,23869	1,07131
9	100,06	99,553	3,94276	0,50750	0,24786

Πίνακας Β7: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της αξονικής δύναμης Fz(N).

Obs	Fz (N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	12,7210	12,3874	0,99914	0,33357	0,48025
2	22,1586	21,8837	0,82859	0,27492	0,30849
3	36,1200	34,9776	0,96128	1,14235	1,53110
4	10,9860	11,1036	0,72465	-0,11761	-0,12031
5	17,8420	19,2112	0,71108	-1,36924	-1,38662
6	30,2400	31,3794	0,72144	-1,13941	-1,16276
7	8,3200	8,5360	1,13234	-0,21596	-0,48467
8	14,9606	13,8663	0,89169	1,09432	1,32161
9	24,1800	24,1829	1,07991	-0,00294	-0,00525

Πίνακας Β8: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra(μm).

Obs	Ra (μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	0,8865	0,88500	0,0096018	0,0015013	0,25994
2	0,9860	1,00031	0,0065296	-0,0143127	-1,57185
3	1,0900	1,07719	0,0089663	0,0128114	1,90656
4	0,8090	0,80178	0,0081867	0,0072218	0,94399
5	0,8975	0,89972	0,0064995	-0,0022152	-0,24271
6	0,9600	0,96501	0,0078181	-0,0050066	-0,62375
7	0,7645	0,76467	0,0103585	-0,0001704	-0,03989
8	0,8230	0,82785	0,0065477	-0,0048537	-0,53380
9	0,8750	0,86998	0,0095895	0,0050241	0,86688

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Β9: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του ύψους δέκα σημείων Rz(μm).

Obs	Rz (μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	6,02000	5,97056	0,0521909	0,0494444	0,87495
2	6,21000	6,21000	0,0521909	0,0000000	0,00000
3	7,36500	7,44444	0,0521909	-0,0794444	-1,40582
4	5,67000	5,74889	0,0449381	-0,0788889	-1,26356
5	6,06000	5,98833	0,0449381	0,0716667	1,14788
6	7,27500	7,22278	0,0449381	0,0522222	0,83644
7	5,33500	5,30556	0,0560942	0,0294444	0,55937
8	5,47333	5,54500	0,0560942	-0,0716667	-1,36148
9	6,80667	6,77944	0,0560942	0,0272222	0,51715

Πίνακας Β10: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους Rt(μm).

Obs	Rt (μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	7,33000	7,32463	0,164801	0,005372	0,04689
2	8,25000	8,21176	0,136669	0,038237	0,26013
3	9,59500	9,38337	0,158556	0,211629	1,71968
4	7,20000	7,16116	0,119526	0,038843	0,24090
5	7,59000	7,76461	0,117287	-0,174607	-1,07203
6	8,50000	8,74709	0,118997	-0,247093	-1,52875
7	6,79000	6,83421	0,186770	-0,044215	-0,60160
8	7,00667	6,87030	0,147077	0,136370	0,99849
9	7,51000	7,47454	0,178123	0,035464	0,38338

Πίνακας Β11: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm).

Obs	Rsm (mm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	0,08105	0,080822	0,0030213	0,0002278	0,08429
2	0,08490	0,086056	0,0030213	-0,0011556	-0,42762
3	0,10820	0,107272	0,0030213	0,0009278	0,34333
4	0,08500	0,087456	0,0030213	-0,0024556	-0,90868
5	0,09105	0,092689	0,0030213	-0,0016389	-0,60647
6	0,11800	0,113906	0,0030213	0,0040944	1,51516
7	0,07050	0,068272	0,0030213	0,0022278	0,82439
8	0,07630	0,073506	0,0030213	0,0027944	1,03409
9	0,08970	0,094722	0,0030213	-0,0050222	-1,85849

Πίνακας Β12: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της λοξότητας Rsk.

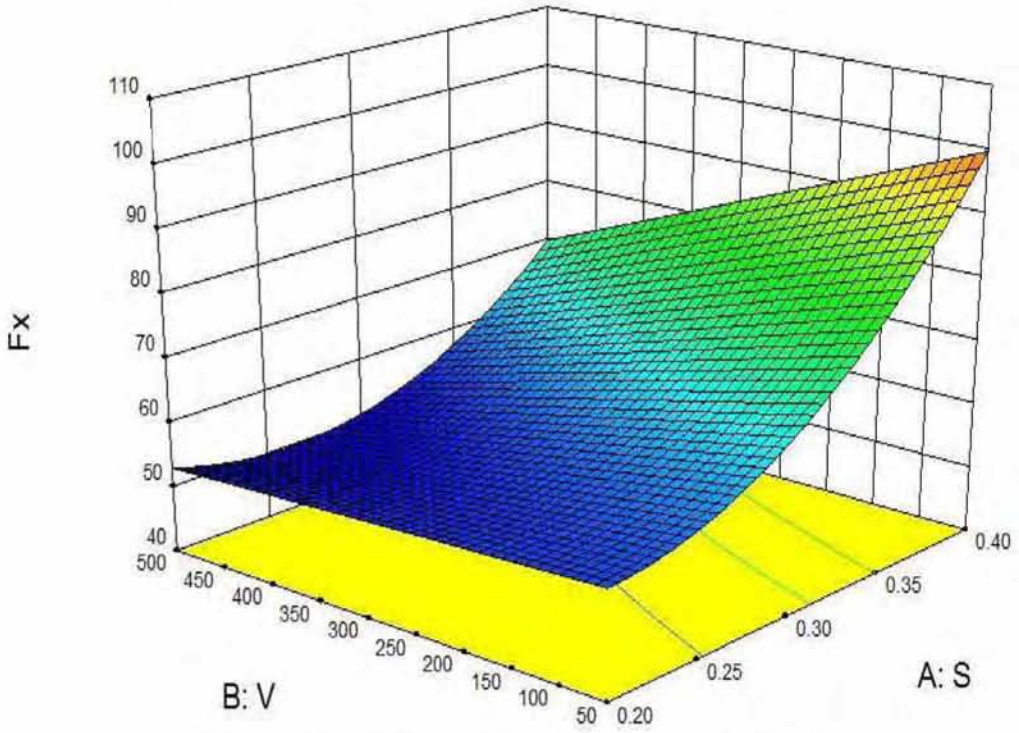
Obs	Rsk	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	-0,092250	-0,075113	0,0770326	-0,017137	-0,24872
2	-0,612500	-0,505807	0,0770326	-0,106693	-1,54851
3	-0,041450	-0,165280	0,0770326	0,123830	1,79724
4	-0,201500	-0,207380	0,0770326	0,005880	0,08534
5	-0,560000	-0,638074	0,0770326	0,078074	1,13315
6	-0,381500	-0,297546	0,0770326	-0,083954	-1,21849
7	0,301000	0,289743	0,0770326	0,011257	0,16339
8	-0,112333	-0,140952	0,0770326	0,028619	0,41536
9	0,159700	0,199576	0,0770326	-0,039876	-0,57875

Πίνακας Β13: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της κυρτότητας Rku.

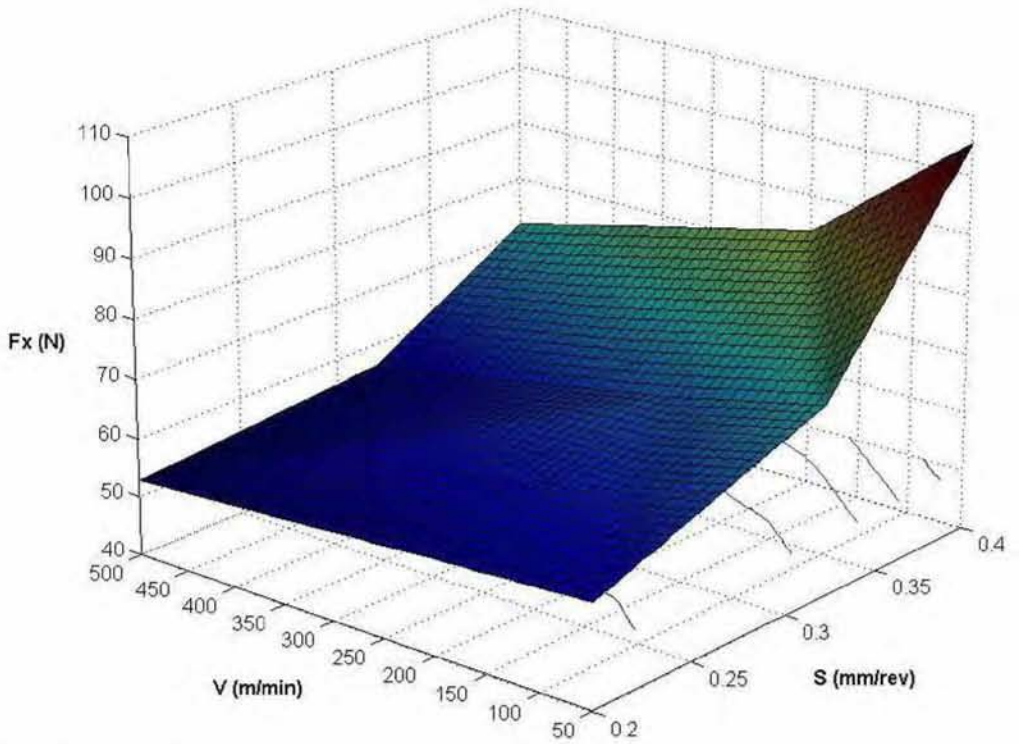
Obs	Rku	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	3,23000	3,48632	0,487361	-0,256324	-0,96076
2	3,73500	3,18102	0,415369	0,553985	1,50127
3	3,47000	3,76766	0,471219	-0,297661	-1,01119
4	3,62500	3,57019	0,419078	0,054808	0,15024
5	3,19000	3,19678	0,414203	-0,006782	-0,01831
6	3,69000	3,73803	0,417922	-0,048026	-0,13118
7	4,48500	4,28348	0,524078	0,201516	1,09220
8	3,22667	3,77387	0,416067	-0,547203	-1,48607
9	4,57000	4,22431	0,500480	0,345687	1,43268

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Β.3 Επιφάνειες προσαρμογής και διαγράμματα επιφάνειας

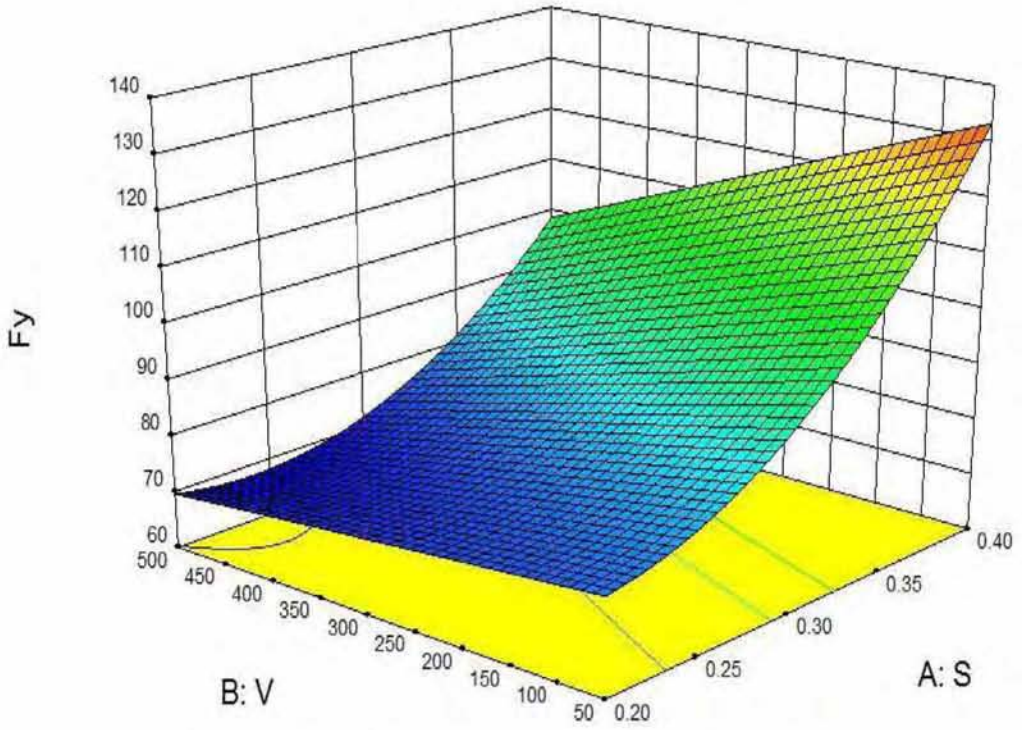


Σχήμα Β1: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης F_X(N).

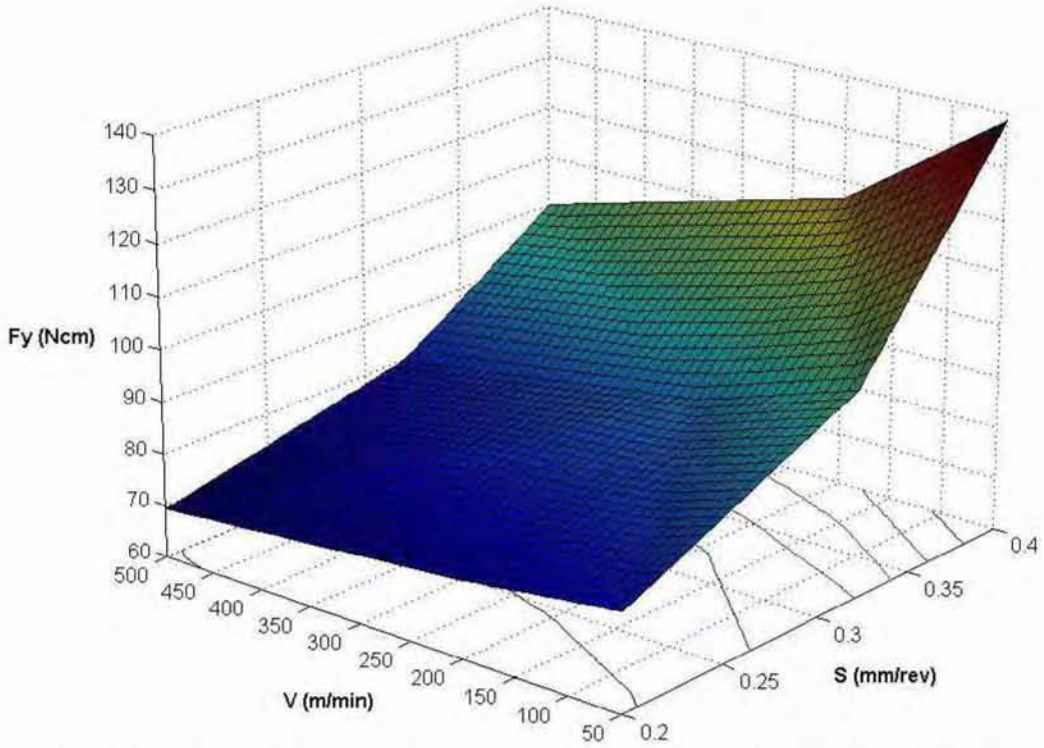


Σχήμα Β2: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης F_X(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

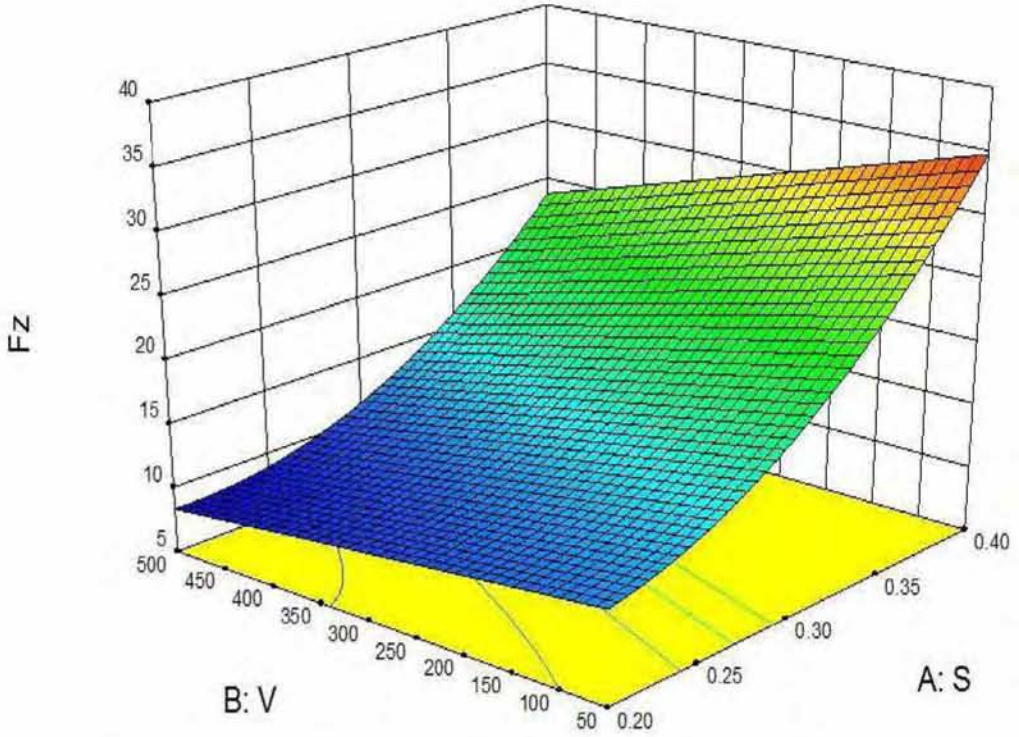


Σχήμα Β3: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης F_y(N).

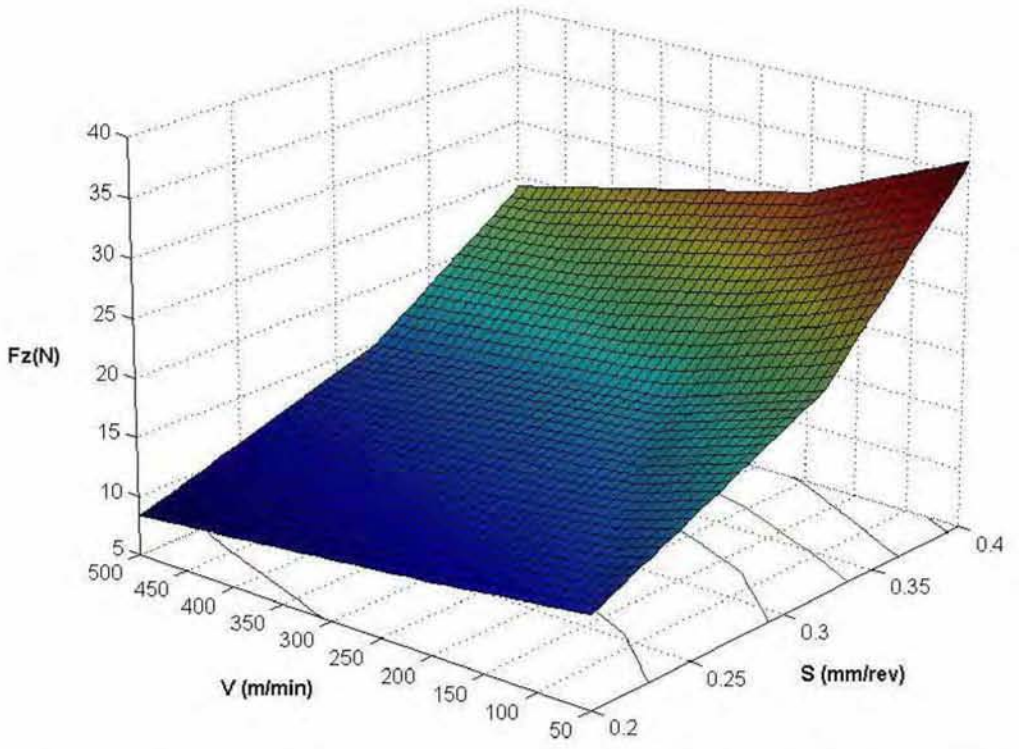


Σχήμα Β4: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης F_Y(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

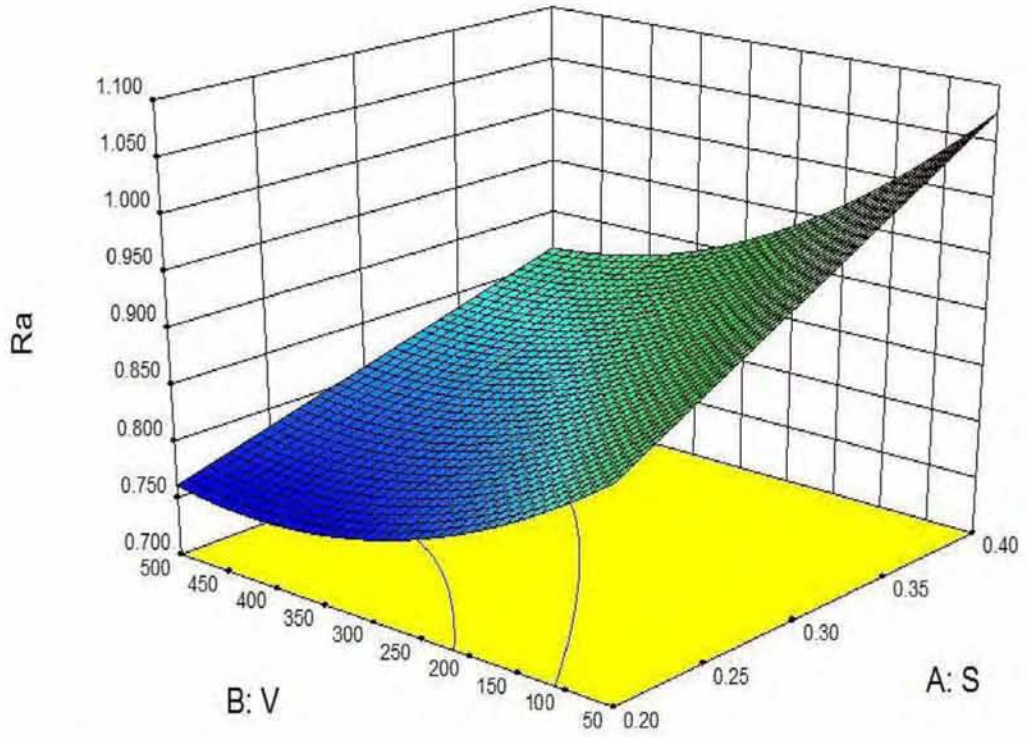


Σχήμα Β5: Επιφάνεια προσαρμογής της αξονικής δύναμης F_z(N).

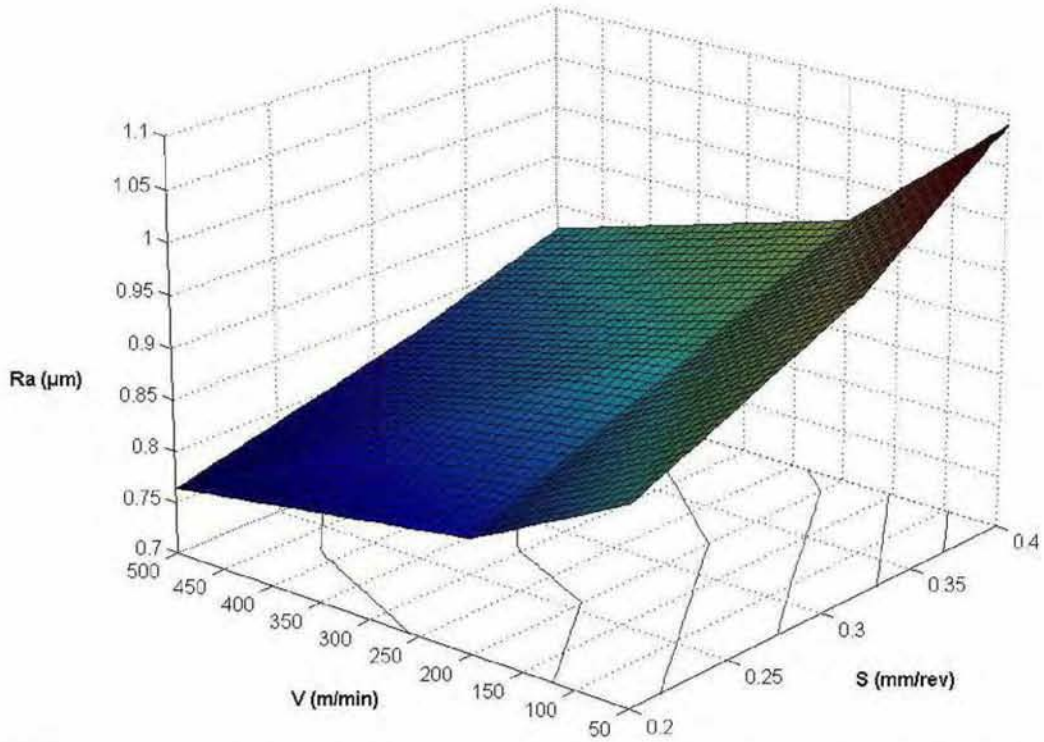


Σχήμα Β6: Γράφημα επιφάνειας της αξονικής δύναμης F_Z(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

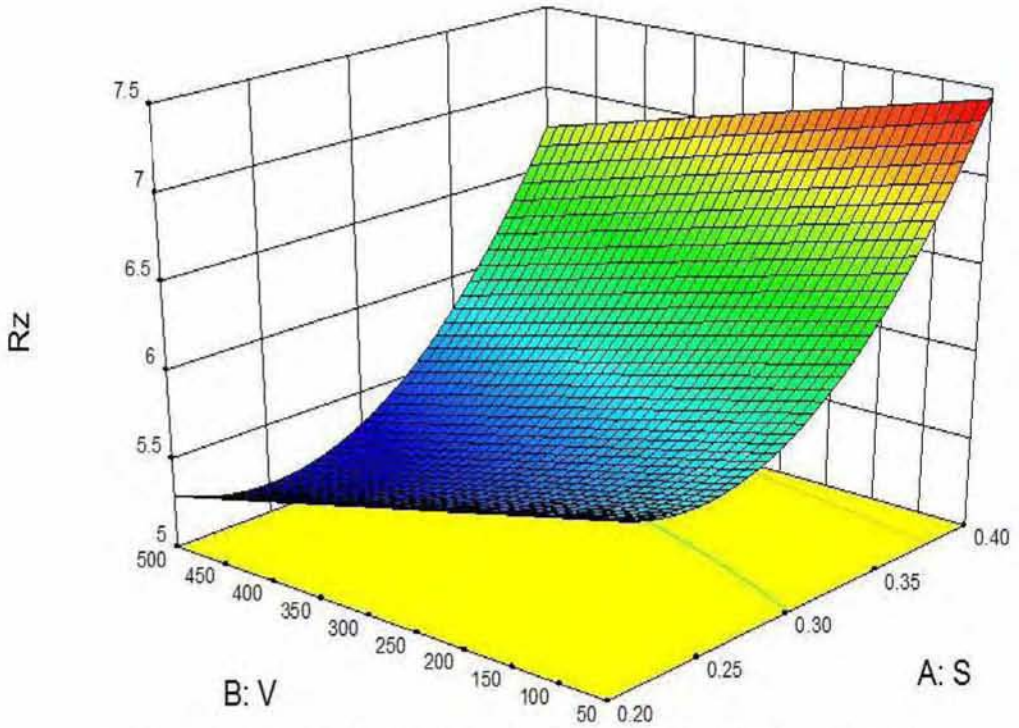


Σχήμα Β7: Επιφάνεια προσαρμογής της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm).

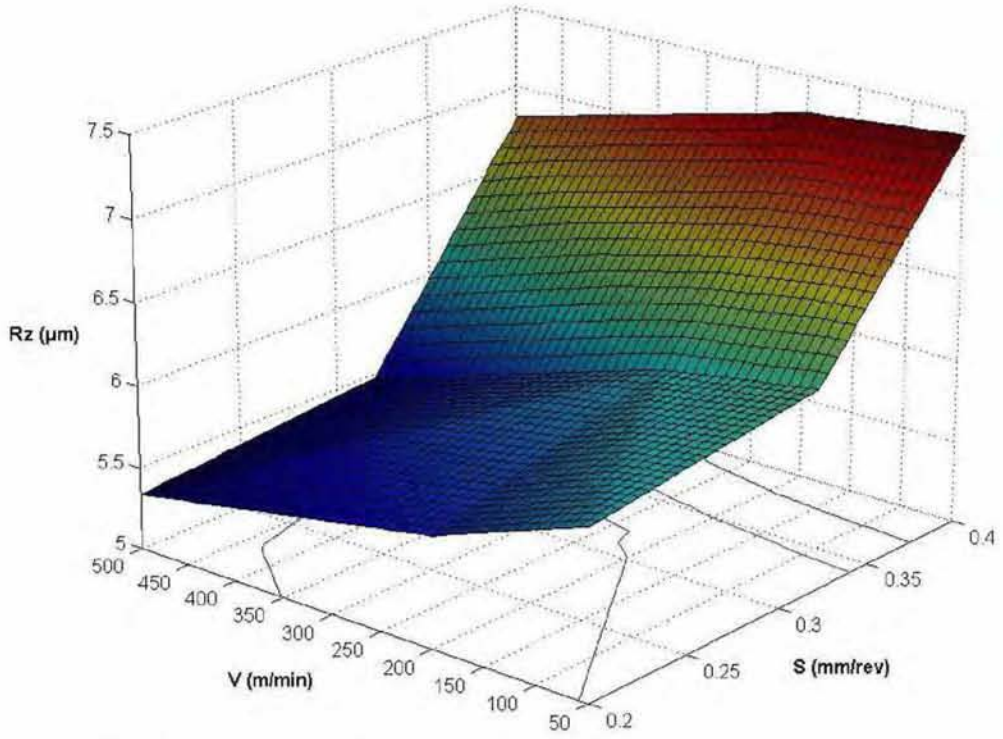


Σχήμα Β8: Γράφημα επιφάνειας της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

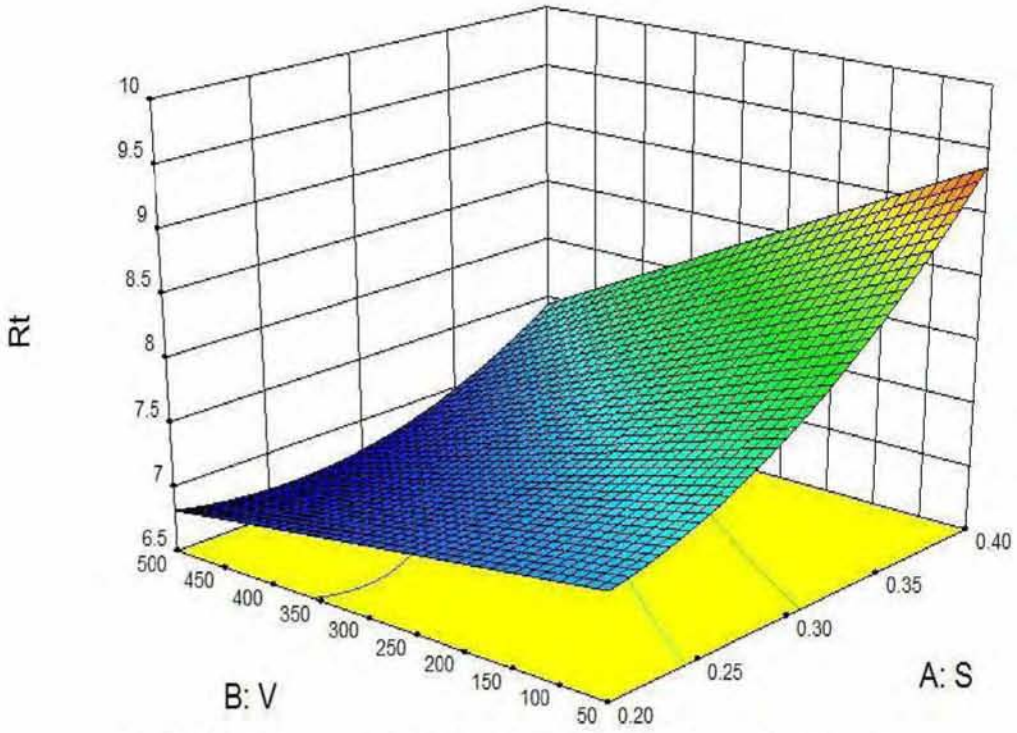


Σχήμα Β9: Επιφάνεια προσαρμογής του ύψους δέκα σημείων R_z(μm).

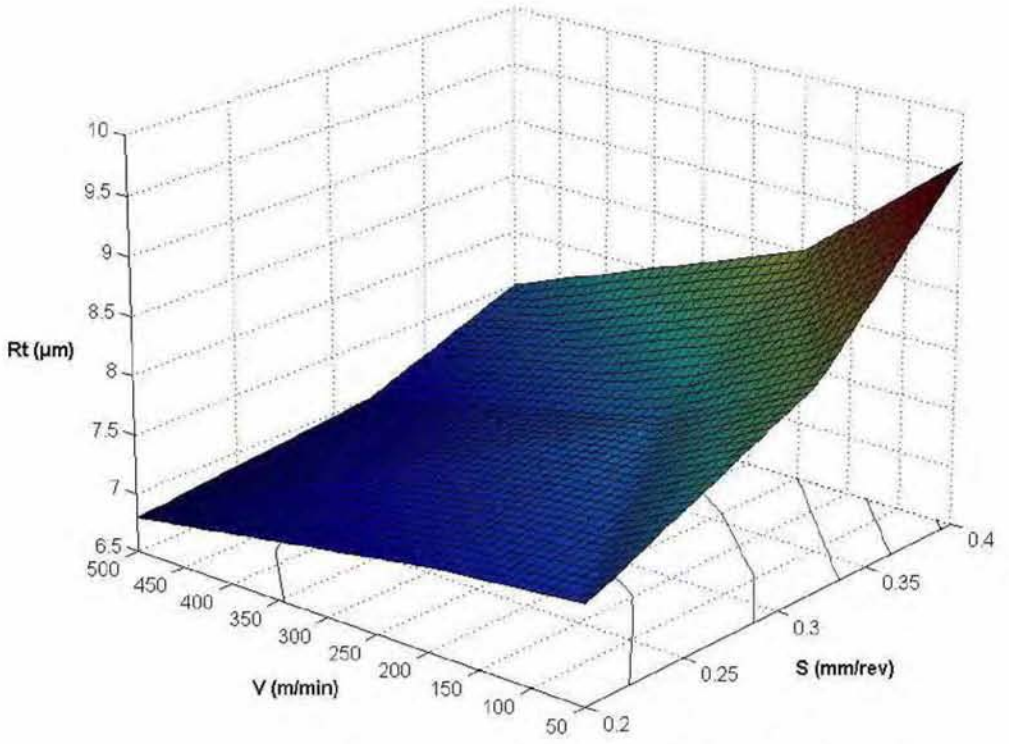


Σχήμα Β10: Γράφημα επιφάνειας του ύψους δέκα σημείων R_z(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

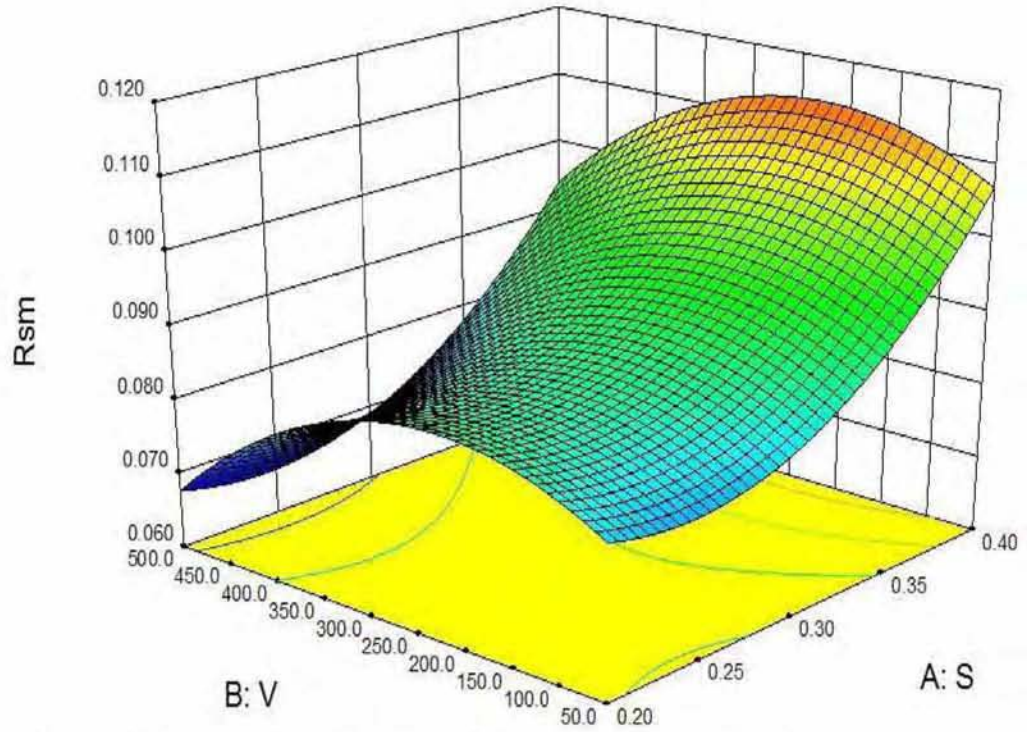


Σχήμα Β11: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους Rt(μm).

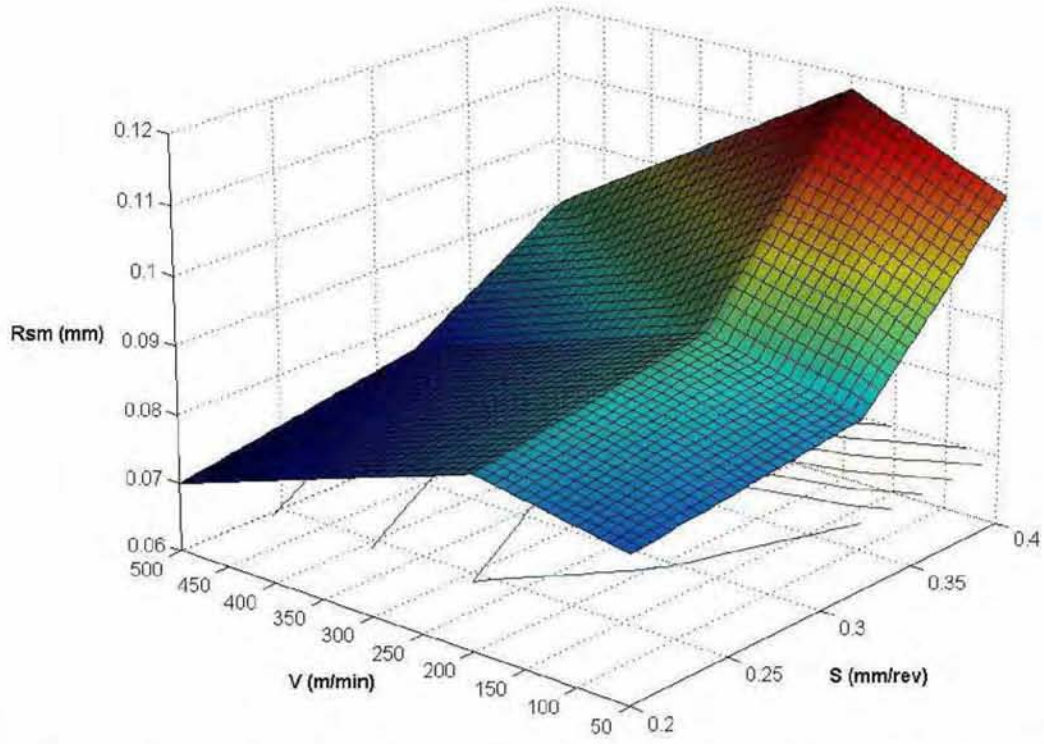


Σχήμα Β12: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους Rt(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

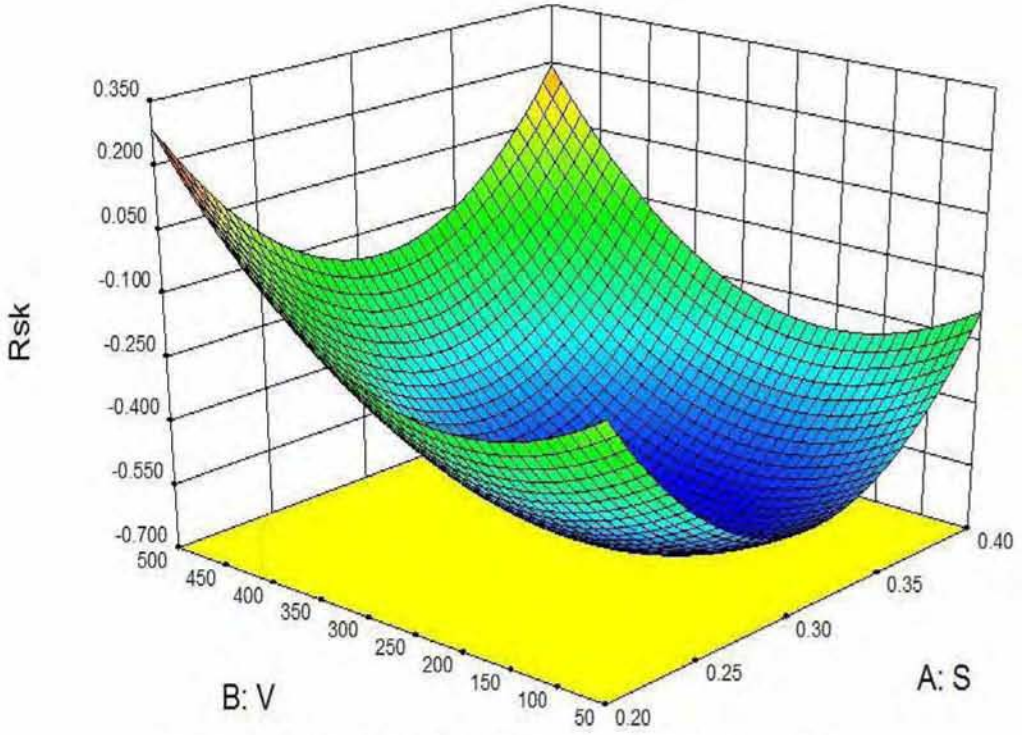


Σχήμα Β13: Επιφάνεια προσαρμογής του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm).

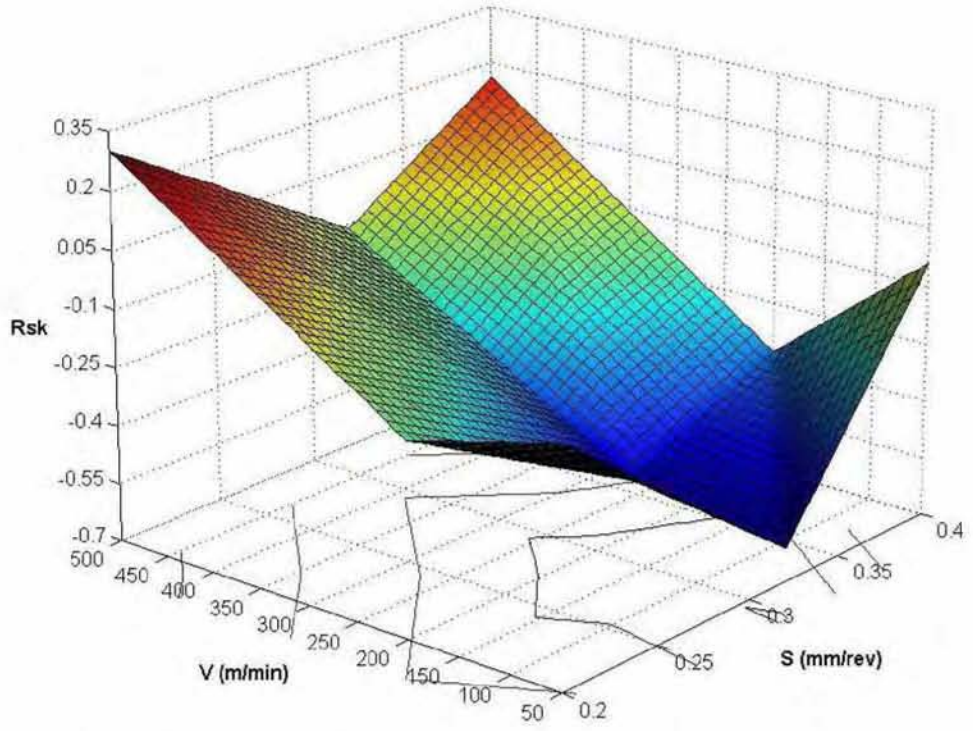


Σχήμα Β14: Γράφημα επιφάνειας του μέσου διαστήματος κορυφών Rsm(mm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

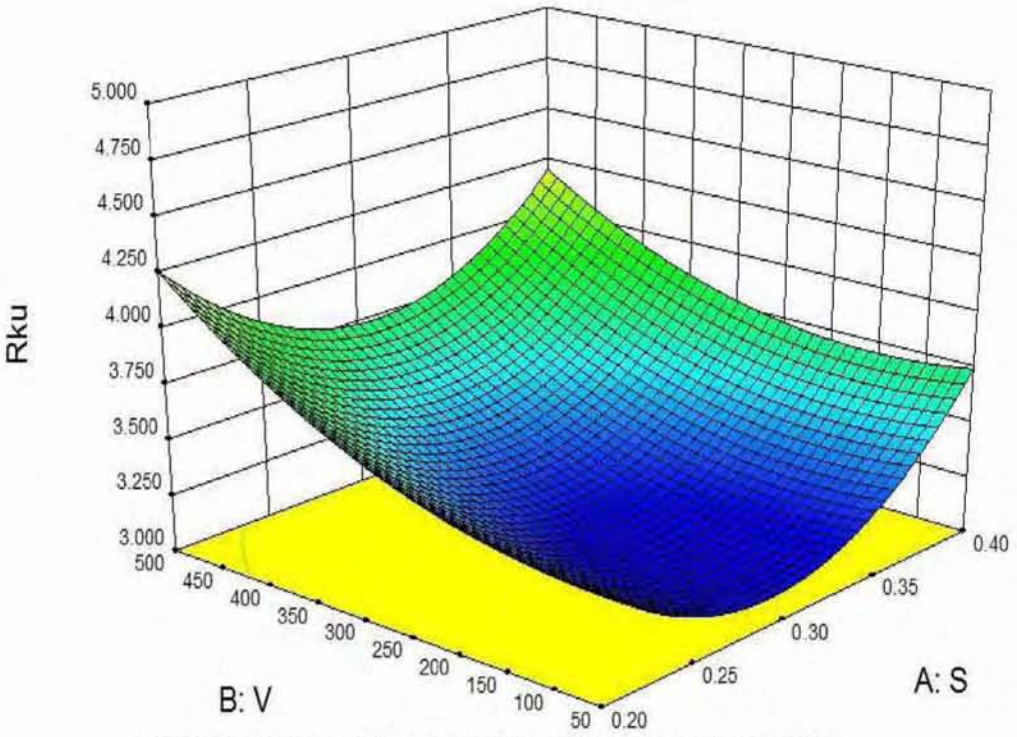


Σχήμα Β15: Επιφάνεια προσαρμογής της λοξότητας Rsk.

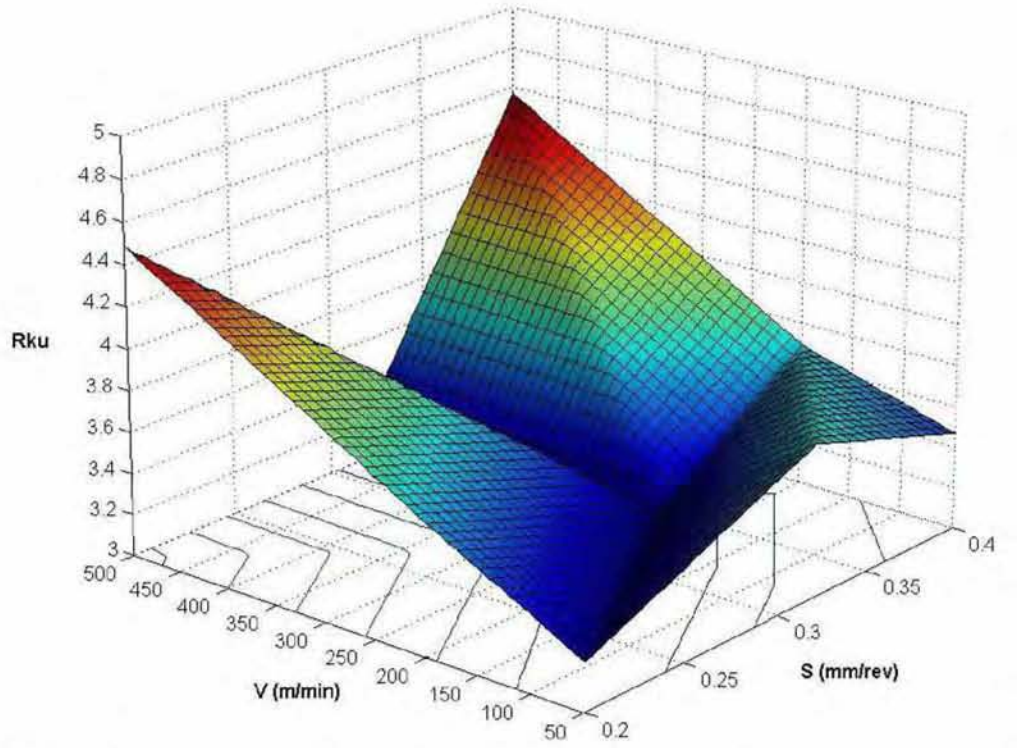


Σχήμα Β16: Γράφημα επιφάνειας της λοξότητας Rsk συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



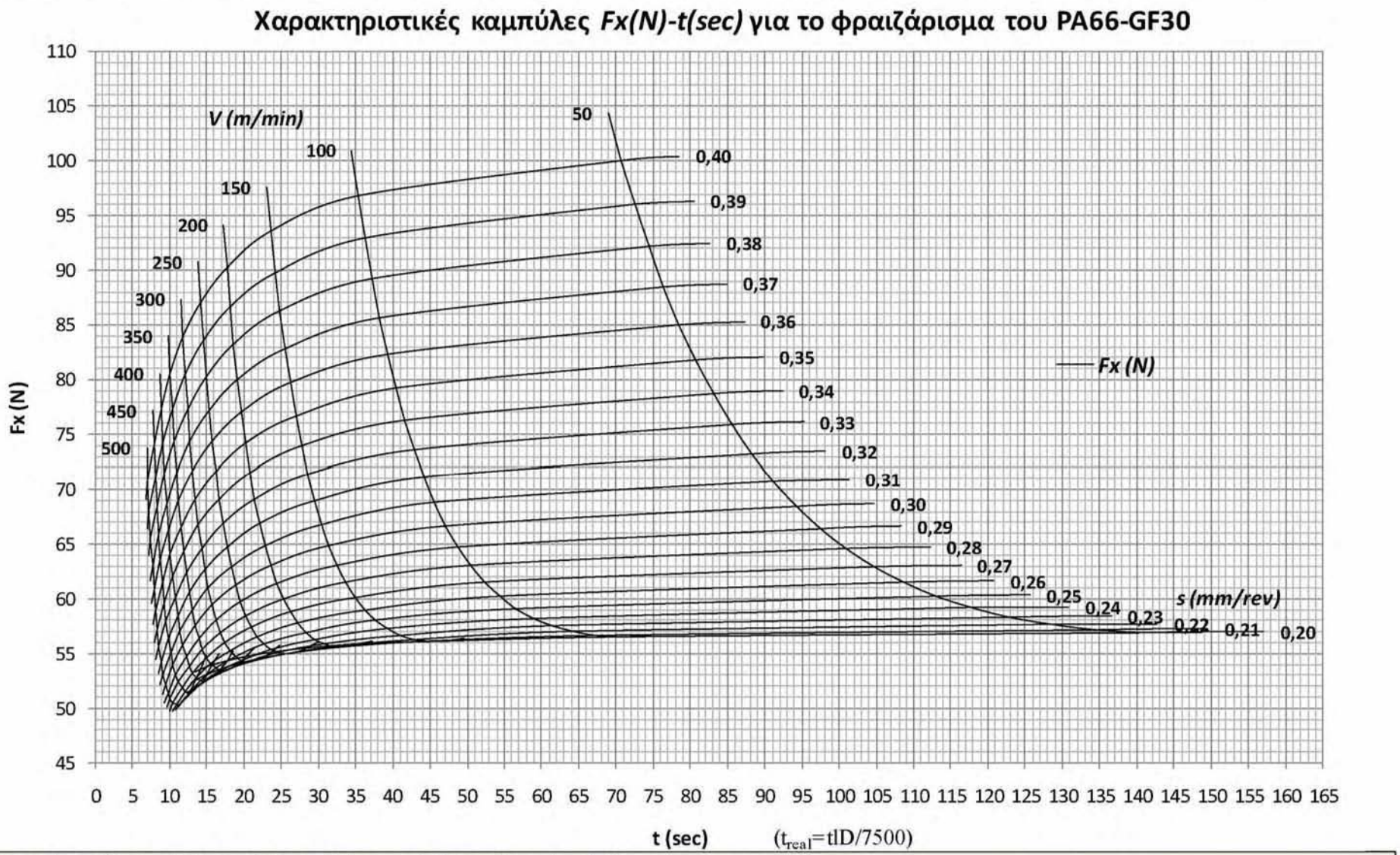
Σχήμα Β17: Επιφάνεια προσαρμογής της κυρτότητας Rku.



Σχήμα Β18: Γράφημα επιφάνειας της κυρτότητας Rku συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Β.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30

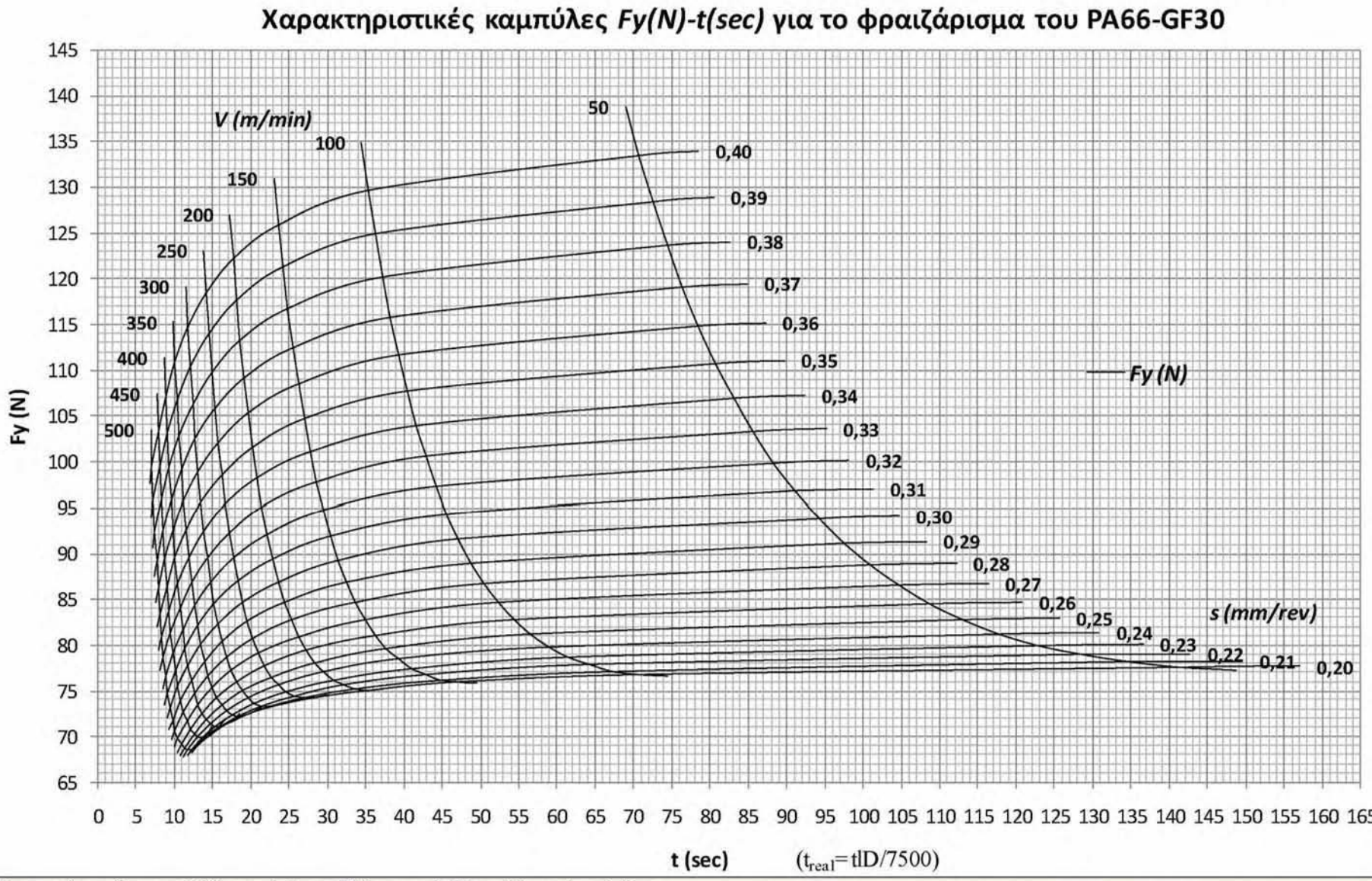


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής 50***mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
*-Εργαλείο κοπής: Φραιζοκεφαλή Ο50***mm (LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1-F7030).**

Όπου: Fx(N) η δύναμη κατά τη διεύθυνση της πρόωσης, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β19: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης F_x(N) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

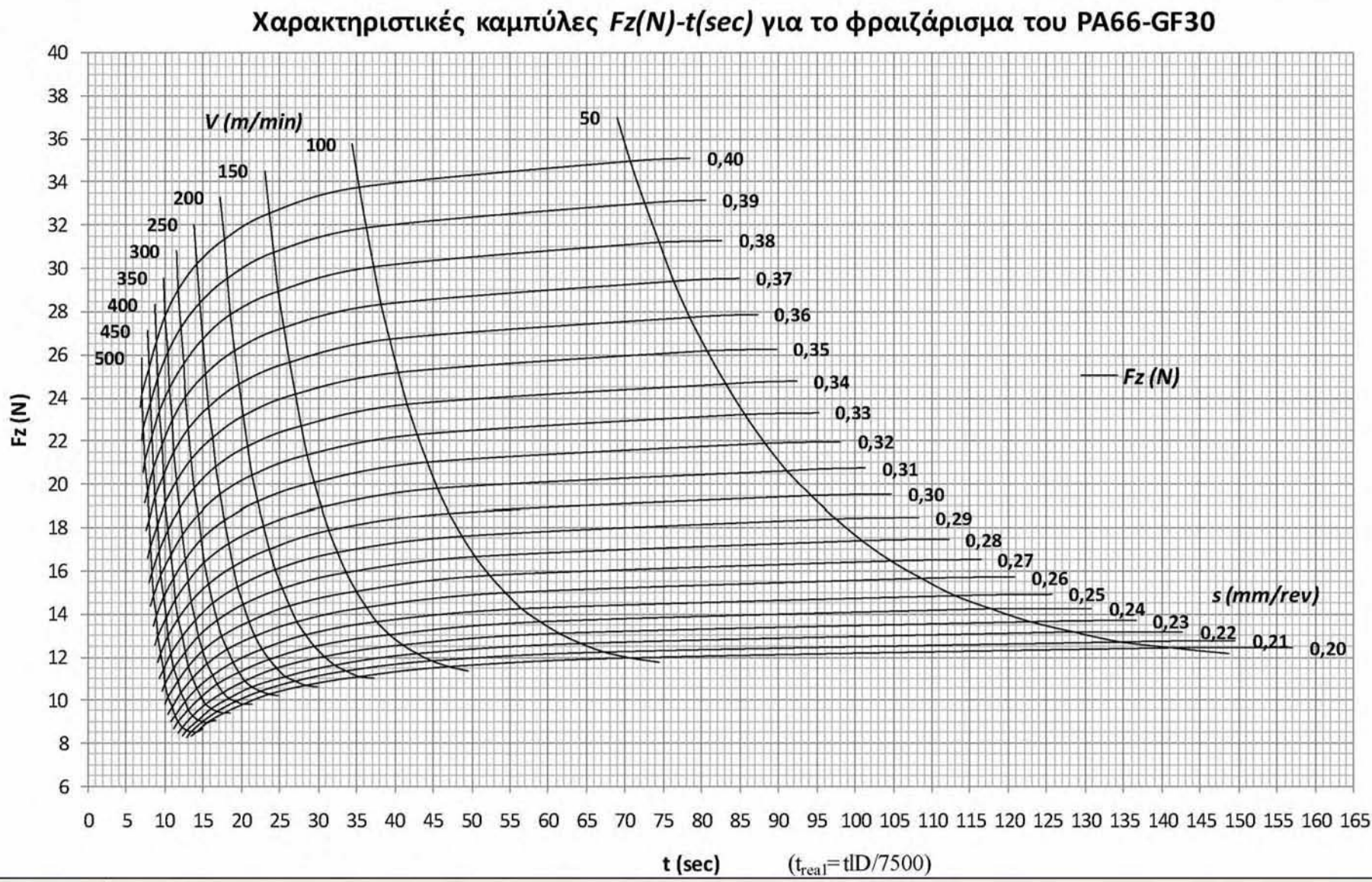


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής 1mm, *Πλάτος κοπής 50*mm, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
-Εργαλείο κοπής: *Φραιζοκεφαλή Ø50*mm **(LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Fy(N) η κάθετη στη διεύθυνση της πρόωσης δύναμη, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β20: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης F_y(N) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

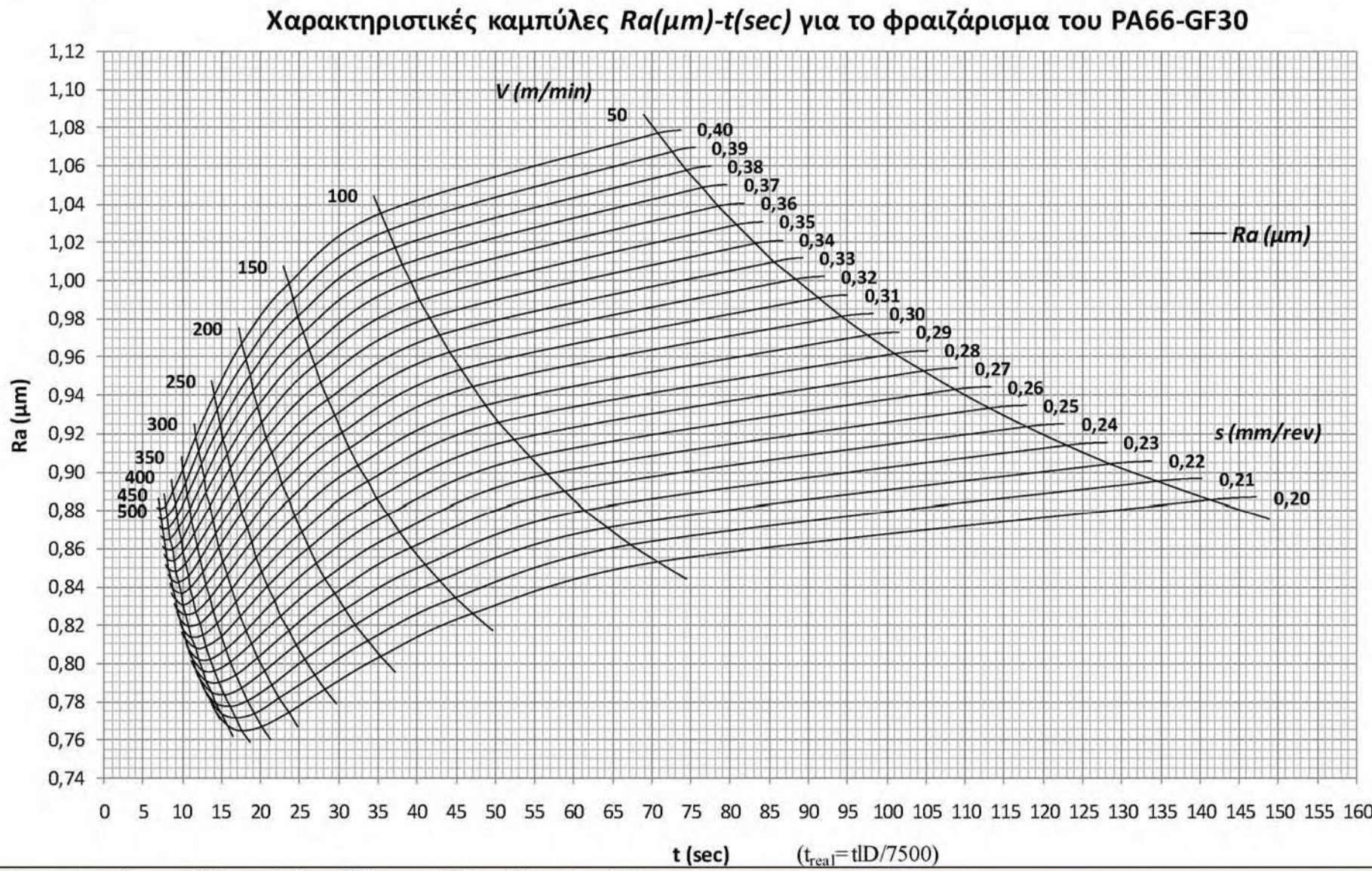


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής 50***mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
*-Εργαλείο κοπής: Φραιζοκεφαλή Ο50***mm (LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Fz(N) η αξονική δύναμη, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β21: Χαρακτηριστικές καμπύλες της αξονικής δύναμης F_z(N) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

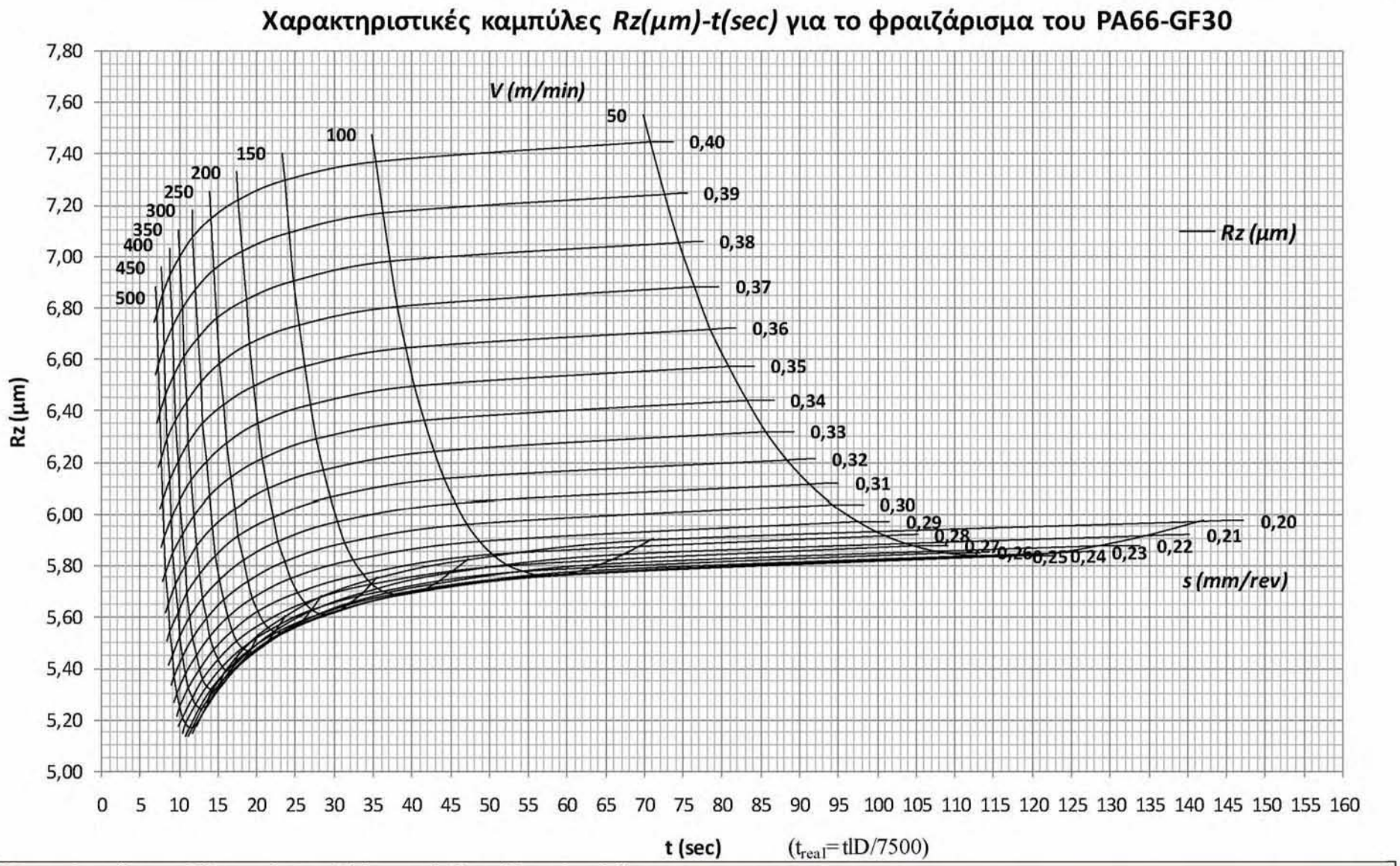


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής 50***mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
*-Εργαλείο κοπής: Φραιζοκεφαλή Ο50***mm (LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Ra(μm) η μέση αριθμητική τραχύτητα, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β22: Χαρακτηριστικές καμπύλες της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

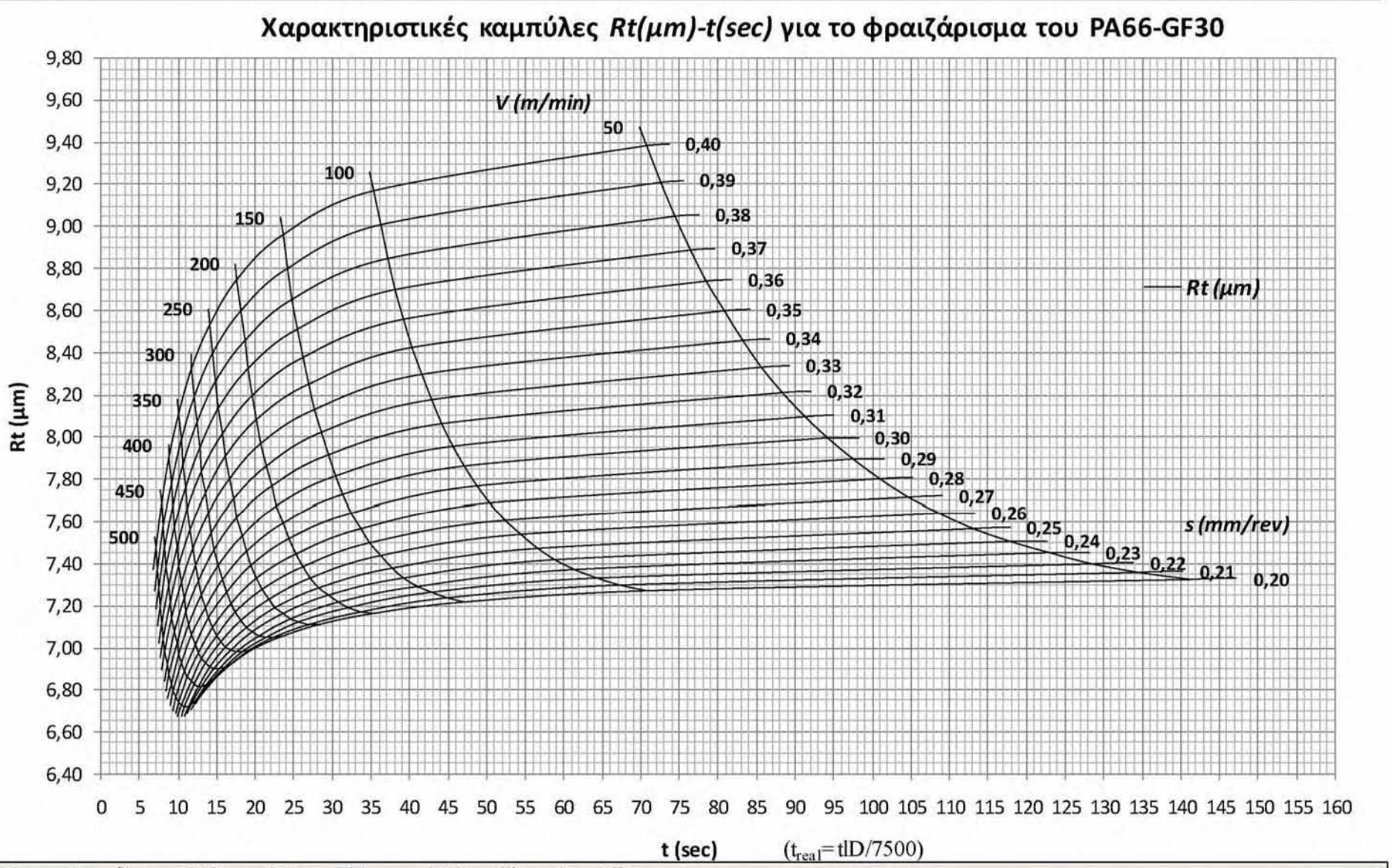


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής* **50mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
-Εργαλείο κοπής: *Φραιζοκεφαλή Ο50*mm **(LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Rz(μm) το ύψος δέκα σημείων, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β23: Χαρακτηριστικές καμπύλες του ύψους δέκα σημείων R_Z(μm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

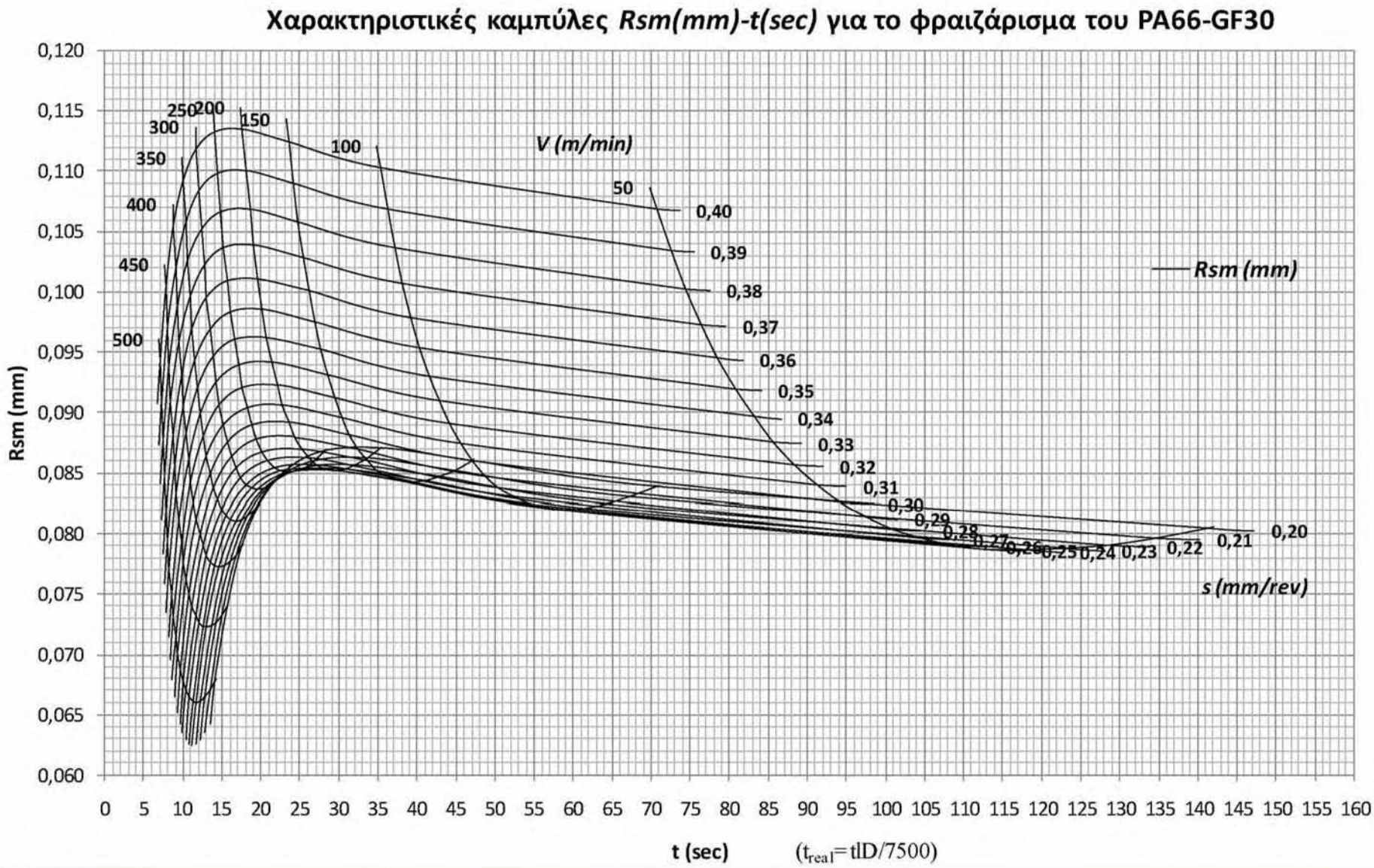


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής 50***mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
*-Εργαλείο κοπής: Φραιζοκεφαλή Ο50***mm (LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Rt(μm) το μέγιστο ύψος, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β24: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους R_t(μm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

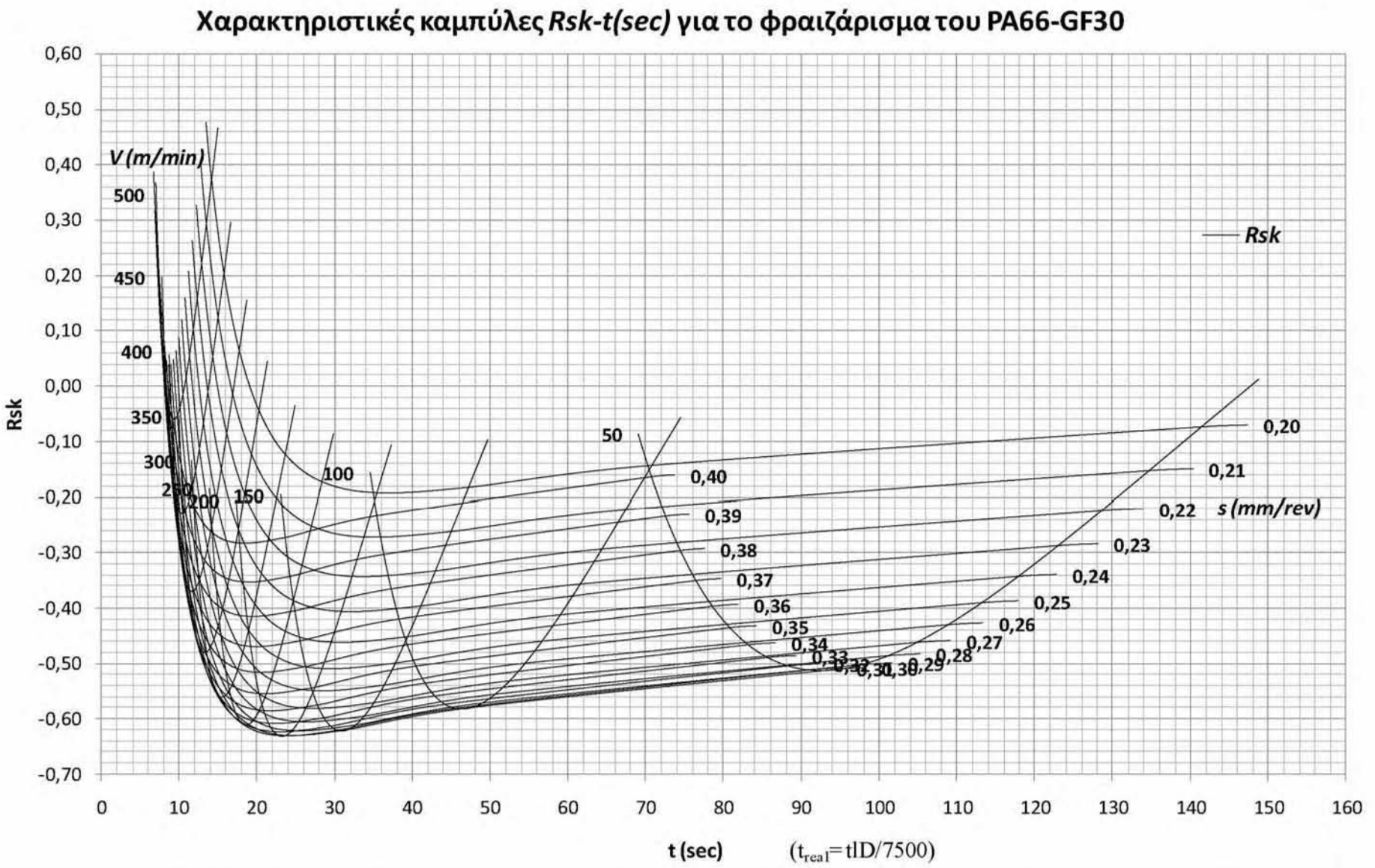


-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής 50***mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
*-Εργαλείο κοπής: Φραιζοκεφαλή Ø50***mm (LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Rsm(mm) το μέσο διάστημα κορυφών, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου.

Σχήμα Β25: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέσου διαστήματος κορυφών R_{sm}(mm) για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



-Μετωπικό φραιζάρισμα, Βάθος κοπής **1mm**, *Πλάτος κοπής 50***mm**, *Ψυκτικό υγρό: Όχι*
*-Εργαλείο κοπής: Φραιζοκεφαλή Ο50***mm (LSE445-050A04R)** *με επικαλυμμένα ένθετα πλακίδια καρβιδίου* **P20**, *τετραγωνικού σχήματος* **(SEEN1203AFTS1- F7030).**

Όπου: Rsk η λοξότητα, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο φραιζοκεφαλής 50mm και μήκος κοπής 150mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου, l το μήκος κοπής του τεμαχίου

Σχήμα Β26: Χαρακτηριστικές καμπύλες της λοξότητας R_{sk} για το μετωπικό φραιζάρισμα του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Παράρτημα Γ

ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΔΙΑΤΡΗΣΗ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Γ.1 Δεδομένα των πειραματικών μετρήσεων

Πίνακας Γ1: Πειραματικές μετρήσεις κατά τη διάτρηση του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	F_v (N)				M_d (Ncm)			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
6	1	0,1	8,87	76,45	80,92	82,27	79,88	38,07	37,22	41,83	39,04
4	2	0,2	8,87	126,66	123,06	126,87	125,53	62,10	61,34	56,77	60,07
8	3	0,3	8,87	178,37	174,38	174,41	175,72	89,68	93,82	90,95	91,48
3	4	0,1	25,01	50,06	47,12	48,83	48,67	25,61	26,84	30,40	27,62
9	5	0,2	25,01	97,91	95,33	97,88	97,04	47,23	52,02	47,97	49,07
5	6	0,3	25,01	164,08	163,42	160,84	162,78	86,24	87,09	86,68	86,67
1	7	0,1	35,50	30,26	31,13	26,27	29,22	22,25	19,86	19,03	20,38
7	8	0,2	35,50	82,47	85,39	83,96	83,94	44,16	44,83	46,54	45,18
2	9	0,3	35,50	160,97	165,11	164,63	163,57	90,72	89,67	83,88	88,09

Πίνακας Γ2: Πειραματικές μετρήσεις κατά τη διάτρηση του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	F_d												Fd_{mean}
				Οπή Α				*Οπή Β*				*Οπή Γ*				
				Dmax1	*Dmax2*	*Dmax mean*	Fd_A	*Dmax1*	*Dmax2*	*Dmax mean*	Fd_B	*Dmax1*	*Dmax2*	*Dmax mean*	$Fd_Γ$	
6	1	0,1	8,87	12,578	12,622	12,600	1,008	12,591	12,559	12,575	1,006	12,554	12,622	12,588	1,007	1,007
4	2	0,2	8,87	12,617	12,658	12,638	1,011	12,623	12,652	12,638	1,011	12,605	12,622	12,613	1,009	1,010
8	3	0,3	8,87	12,713	12,637	12,675	1,014	12,754	12,646	12,700	1,016	12,765	12,700	12,733	1,019	1,016
3	4	0,1	25,01	12,611	12,589	12,600	1,008	12,62	12,630	12,625	1,01	12,623	12,566	12,595	1,008	1,009
9	5	0,2	25,01	12,634	12,641	12,638	1,011	12,698	12,602	12,650	1,012	12,611	12,657	12,634	1,011	1,011
5	6	0,3	25,01	12,729	12,796	12,763	1,021	12,741	12,709	12,725	1,018	12,757	12,663	12,710	1,017	1,019
1	7	0,1	35,50	12,651	12,624	12,638	1,011	12,673	12,652	12,663	1,013	12,663	12,586	12,625	1,010	1,011
7	8	0,2	35,50	12,677	12,673	12,675	1,014	12,711	12,664	12,688	1,015	12,645	12,624	12,635	1,011	1,013
2	9	0,3	35,50	12,802	12,823	12,813	1,025	12,743	12,857	12,800	1,024	12,782	12,723	12,752	1,020	1,023

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Γ3: Η ισχύς της εργαλειομηχανής P_c(W) (Σχέση 9.2) στα πειράματα της διάτρησης του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	M_d (Ncm)	P_c (W)
6	1	0,1	8,87	39,04	90,57
4	2	0,2	8,87	60,07	139,36
8	3	0,3	8,87	91,48	212,24
3	4	0,1	25,01	27,62	180,66
9	5	0,2	25,01	49,07	321,01
5	6	0,3	25,01	86,67	566,95
1	7	0,1	35,50	20,38	189,24
7	8	0,2	35,50	45,18	419,48
2	9	0,3	35,50	88,09	817,92

Πίνακας Γ4: Πειραματικές μετρήσεις των παραμέτρων τραχύτητας R_a, R_Z και R_t κατά την διάτρηση του PA66-GF30.

Run No	Test No	S (mm/rev)	V (m/min)	R_a (μm)				R_Z (μm)				R_t (μm)			
				Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean	*Rep. 1*	*Rep. 2*	*Rep. 3*	Mean
6	1	0,1	8,87	5,25	4,38	3,67	4,43	25,12	26,07	31,07	27,42	40,44	44,76	46,70	43,97
4	2	0,2	8,87	5,82	4,47	5,76	5,35	35,89	37,32	31,31	34,84	53,02	52,57	60,65	55,41
8	3	0,3	8,87	5,67	7,62	7,23	6,84	44,91	49,03	41,09	45,01	76,96	77,09	72,87	75,64
3	4	0,1	25,01	4,77	4,5	3,18	4,15	25,68	24,64	28,88	26,4	37,87	34,12	33,24	35,08
9	5	0,2	25,01	5,52	4,98	4,77	5,09	30,07	33,85	33,88	32,6	40,06	39,11	44,99	41,39
5	6	0,3	25,01	5,64	7,41	6,47	6,51	40,19	42,77	46,37	43,11	63,21	62,84	67,97	64,67
1	7	0,1	35,50	3,03	4,08	4,64	3,92	20,09	24,65	22,40	22,38	31,05	36,42	29,70	32,39
7	8	0,2	35,50	5,16	3,57	4,69	4,47	25,29	28,42	23,51	25,74	40,14	36,13	36,68	37,65
2	9	0,3	35,50	5,55	5,31	6,76	5,87	36,47	34,66	42,18	37,77	57,31	60,67	58,01	58,66

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Γ.2 Εκτιμήσεις και κατάλοιπα των στοχαστικών μοντέλων

Πίνακας Γ5: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της δύναμης πρόωσης F_v(N).

Obs	Fv(N)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	79,88	78,972	5,25913	0,90841	0,29791
2	125,53	126,236	3,32616	-0,70568	-0,13868
3	175,72	173,500	5,25913	2,22024	0,72811
4	48,67	46,160	3,25104	2,50978	0,48858
5	97,04	104,880	2,05614	-7,84032	-1,37047
6	162,78	163,600	3,25104	-0,82043	-0,15971
7	29,22	24,835	4,83391	4,38514	1,18953
8	83,94	91,001	3,05723	-7,06067	-1,34373
9	163,57	157,166	4,83391	6,40353	1,73704

Πίνακας Γ6: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της ροπής στρέψης M_d(Ncm).

Obs	Md(Ncm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	39,0397	39,7137	1,60410	-0,67400	-0,85088
2	60,0709	58,1543	1,29204	1,91661	1,54887
3	91,4834	91,4738	1,60410	0,00955	0,01206
4	27,6176	27,5993	1,04554	0,01833	0,01263
5	49,0741	50,5543	1,03797	-1,48017	-1,01581
6	86,6713	88,3883	1,04554	-1,71693	-1,18270
7	20,3813	19,7256	1,48373	0,65567	0,65595
8	45,1783	45,6148	1,23317	-0,43645	-0,33674
9	88,0902	86,3828	1,48373	1,70738	1,70812

Πίνακας Γ7: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του παράγοντα αποκόλλησης Fd.

Obs	Fd	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	1,00701	1,00647	0,0008204	0,0005396	0,68681
2	1,01002	1,00903	0,0008204	0,0009990	1,27149
3	1,01620	1,01681	0,0008204	-0,0006057	-0,77092
4	1,00852	1,00928	0,0006590	-0,0007591	-0,82051
5	1,01124	1,01183	0,0006590	-0,0005947	-0,64285
6	1,01860	1,01961	0,0006590	-0,0010144	-1,09646
7	1,01132	1,01110	0,0007830	0,0002195	0,26673
8	1,01326	1,01366	0,0007830	-0,0004042	-0,49121
9	1,02306	1,02144	0,0007830	0,0016201	1,96869

Πίνακας Γ8: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου της μέσης αριθμητικής τραχύτητας Ra(μm).

Obs	Ra(μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	4,43175	4,57354	0,120552	-0,141790	-1,22809
2	5,35125	5,37904	0,120552	-0,027790	-0,24070
3	6,84000	6,81379	0,120552	0,026210	0,22701
4	4,15163	4,11230	0,096846	0,039320	0,28922
5	5,08875	4,91780	0,096846	0,170945	1,25737
6	6,50625	6,35255	0,096846	0,153695	1,13049
7	3,91500	3,81253	0,115059	0,102470	0,84734
8	4,47487	4,61803	0,115059	-0,143155	-1,18378
9	5,87287	6,05278	0,115059	-0,179905	-1,48767

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Γ9: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του ύψους δέκα σημείων Rz(μm).

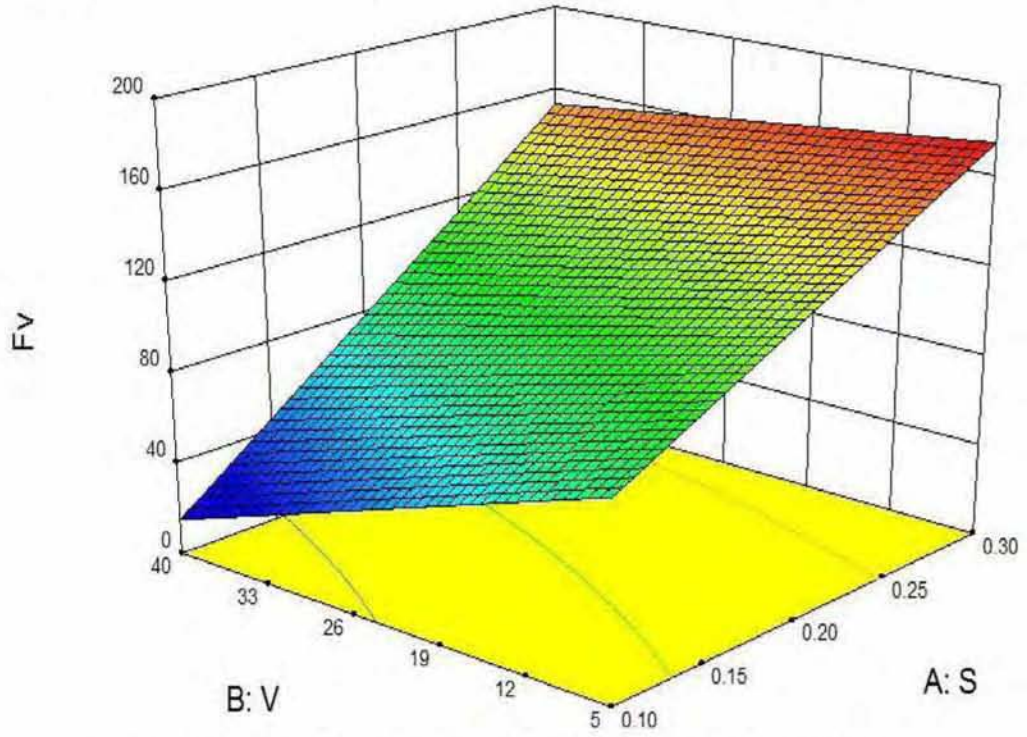
Obs	Rz(μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	27,42	28,3489	0,778571	-0,92889	-1,33389
2	34,84	34,0089	0,778571	0,83111	1,19348
3	45,01	44,9122	0,778571	0,09778	0,14041
4	26,40	26,6289	0,778571	-0,22889	-0,32869
5	32,60	32,2889	0,778571	0,31111	0,44676
6	43,11	43,1922	0,778571	-0,08222	-0,11807
7	22,38	21,2222	0,778571	1,15778	1,66258
8	25,74	26,8822	0,778571	-1,14222	-1,64024
9	37,77	37,7856	0,778571	-0,01556	-0,02234

Πίνακας Γ10: Εκτιμήσεις και κατάλοιπα του στοχαστικού μοντέλου του μέγιστου ύψους Rt(μm).

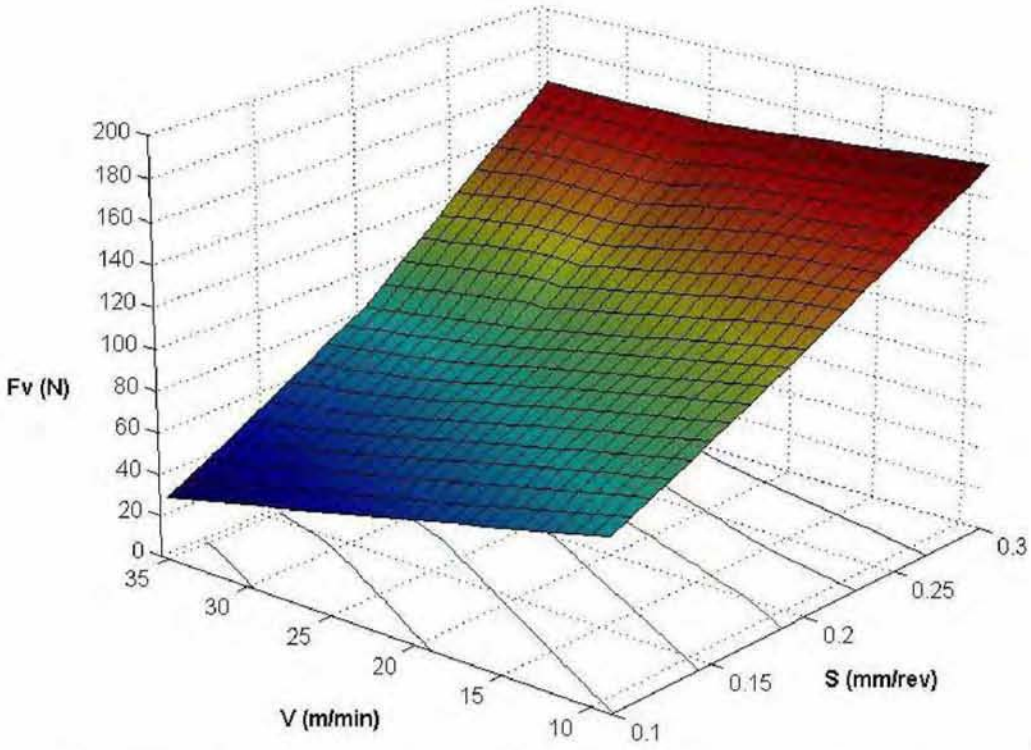
Obs	Rt(μm)	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	43,9669	45,5544	1,49160	-1,58748	-1,11126
2	55,4123	53,2257	1,49160	2,18664	1,53067
3	75,6391	74,7346	1,49160	0,90452	0,63317
4	35,0779	36,0346	1,19829	-0,95672	-0,56874
5	41,3869	43,7059	1,19829	-2,31897	-1,37855
6	64,6732	65,2148	1,19829	-0,54153	-0,32192
7	32,3916	29,8474	1,42363	2,54421	1,70034
8	37,6509	37,5186	1,42363	0,13234	0,08844
9	58,6645	59,0275	1,42363	-0,36298	-0,24259

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Γ.3 Επιφάνειες προσαρμογής και διαγράμματα επιφανείας

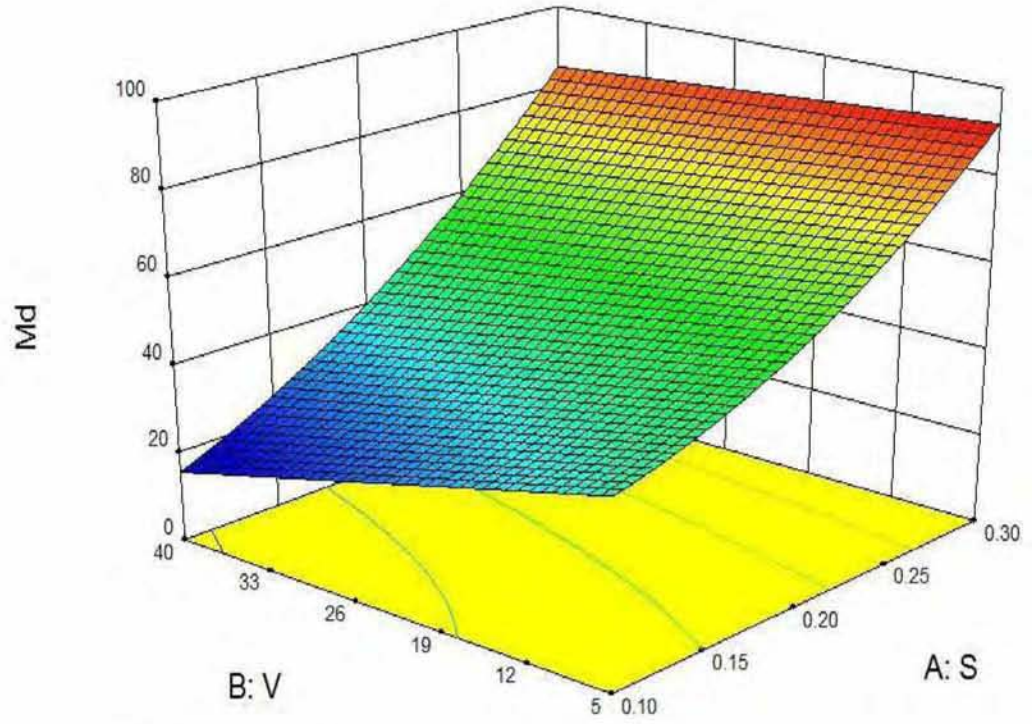


Σχήμα Γ1: Επιφάνεια προσαρμογής της δύναμης πρόωσης F_v(N).

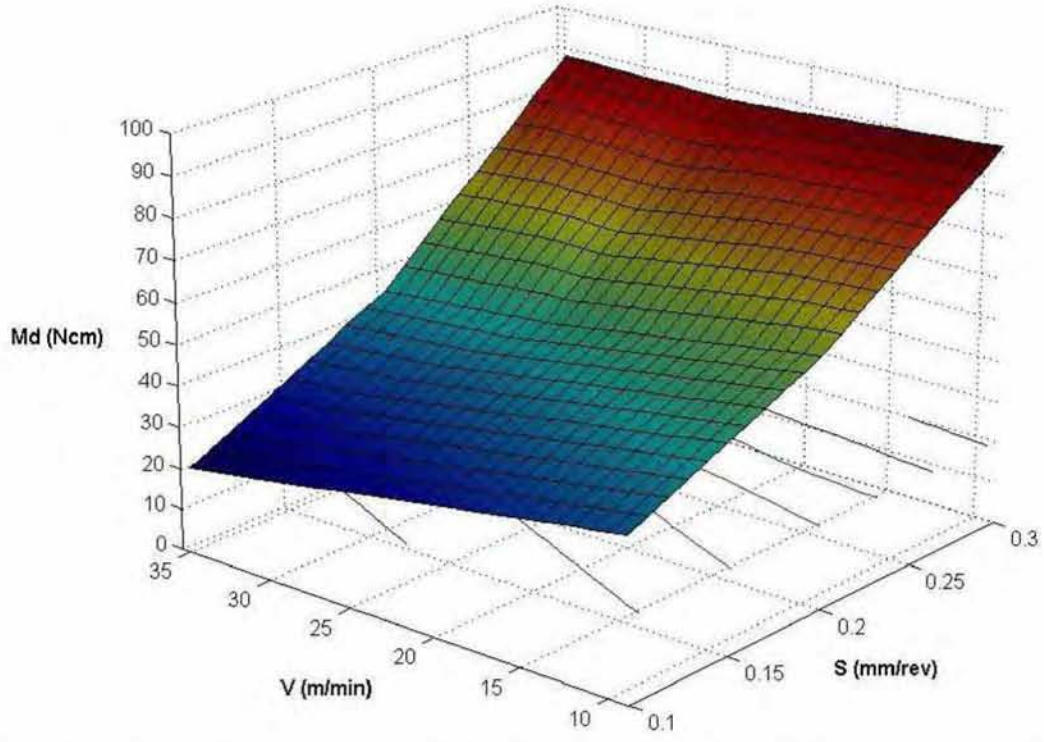


Σχήμα Γ2: Γράφημα επιφάνειας της δύναμης πρόωσης F_v(N) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

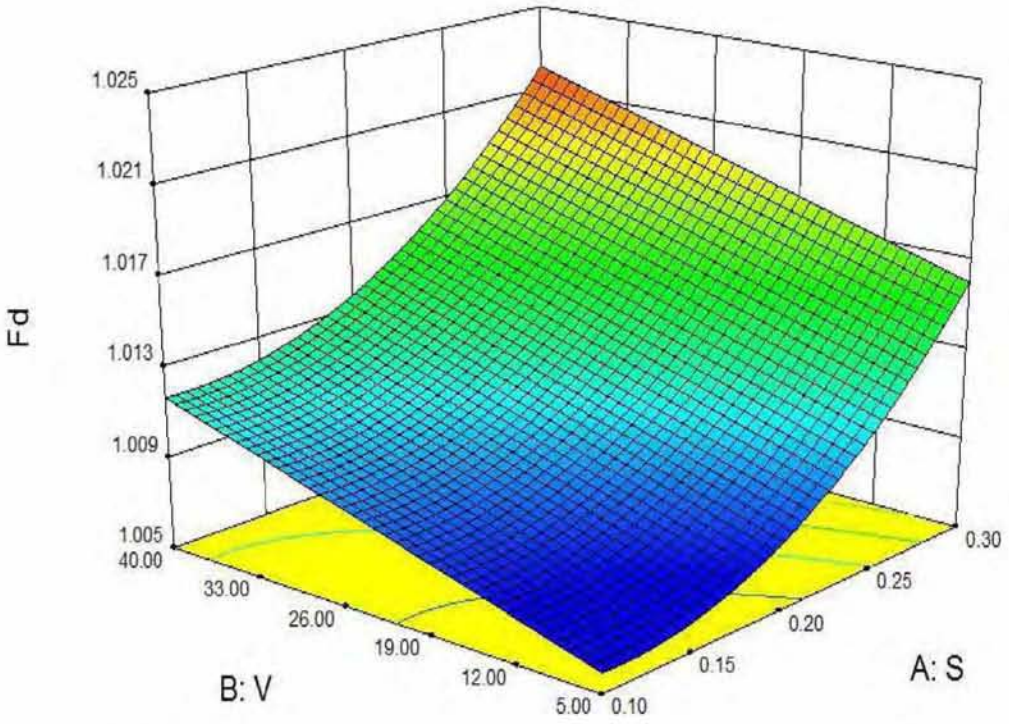


Σχήμα Γ3: Επιφάνεια προσαρμογής της ροπής στρέψης M_d(Ncm).

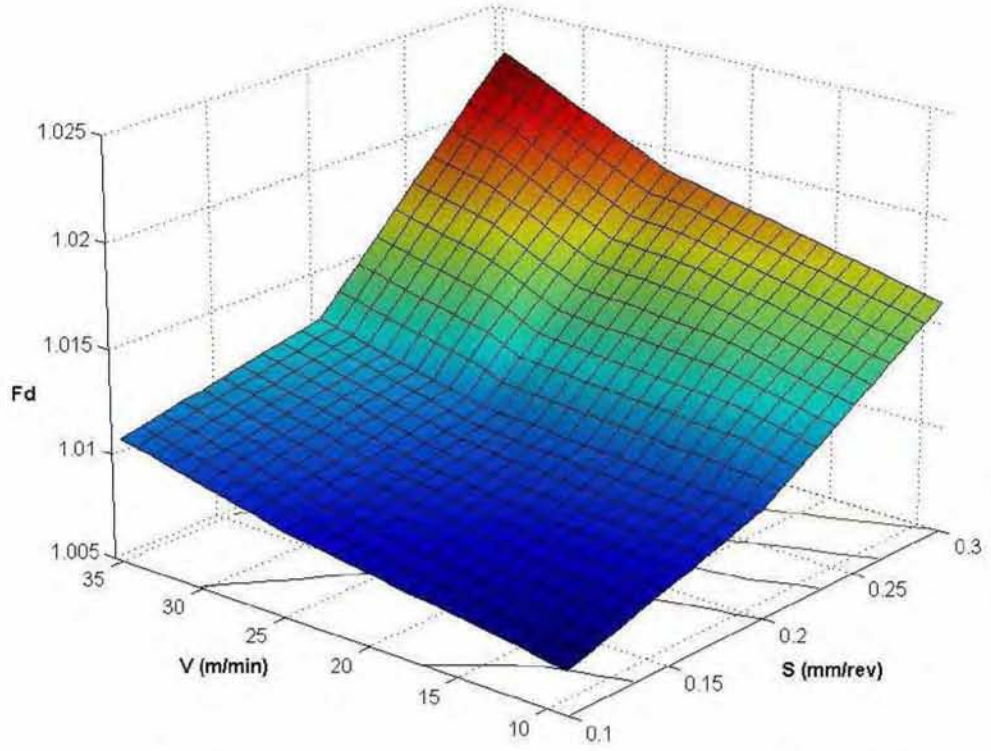


Σχήμα Γ4: Γράφημα επιφάνειας της ροπής στρέψης M_d(Ncm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

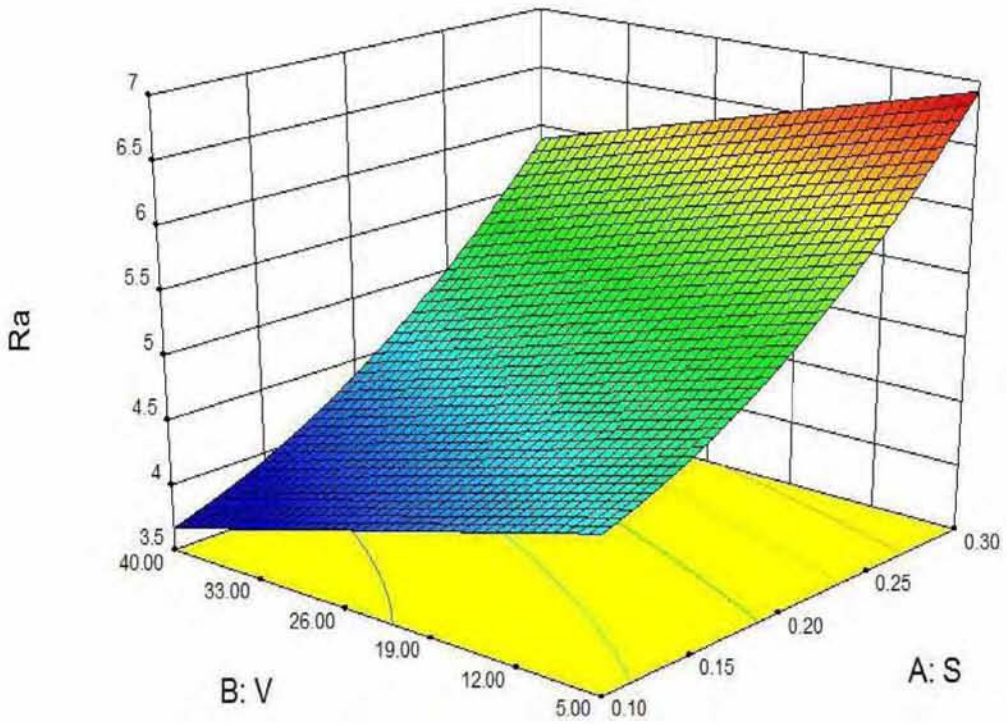


Σχήμα Γ5: Επιφάνεια προσαρμογής του παράγοντα αποκόλλησης F_d.

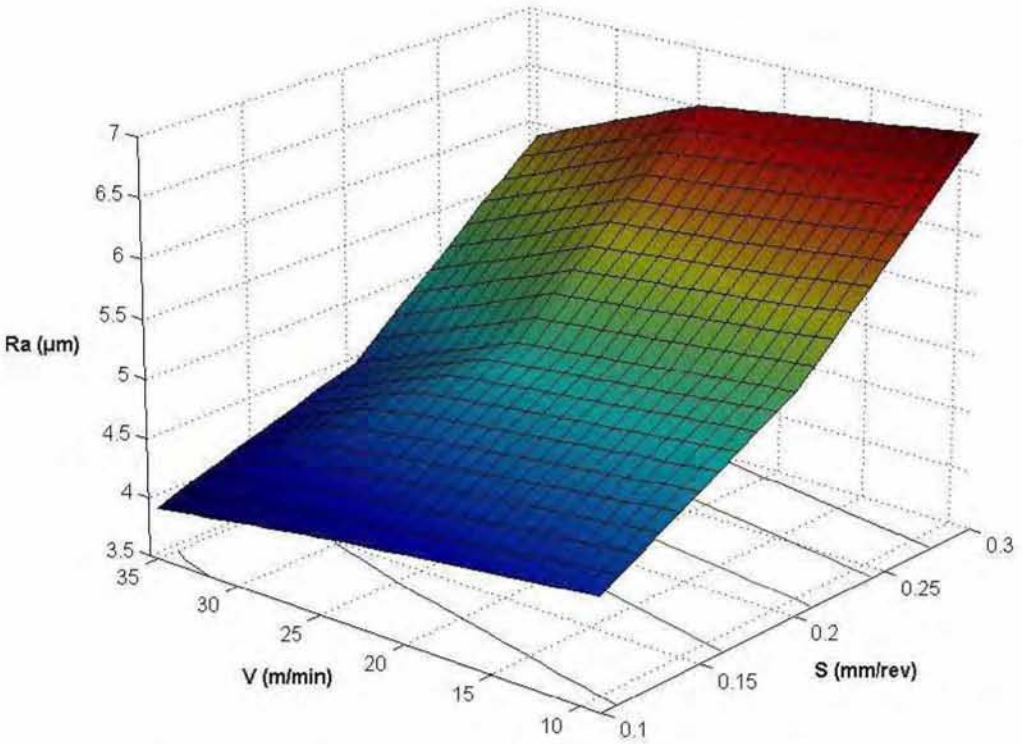


Σχήμα Γ6: Γράφημα επιφάνειας του παράγοντα αποκόλλησης F_d συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

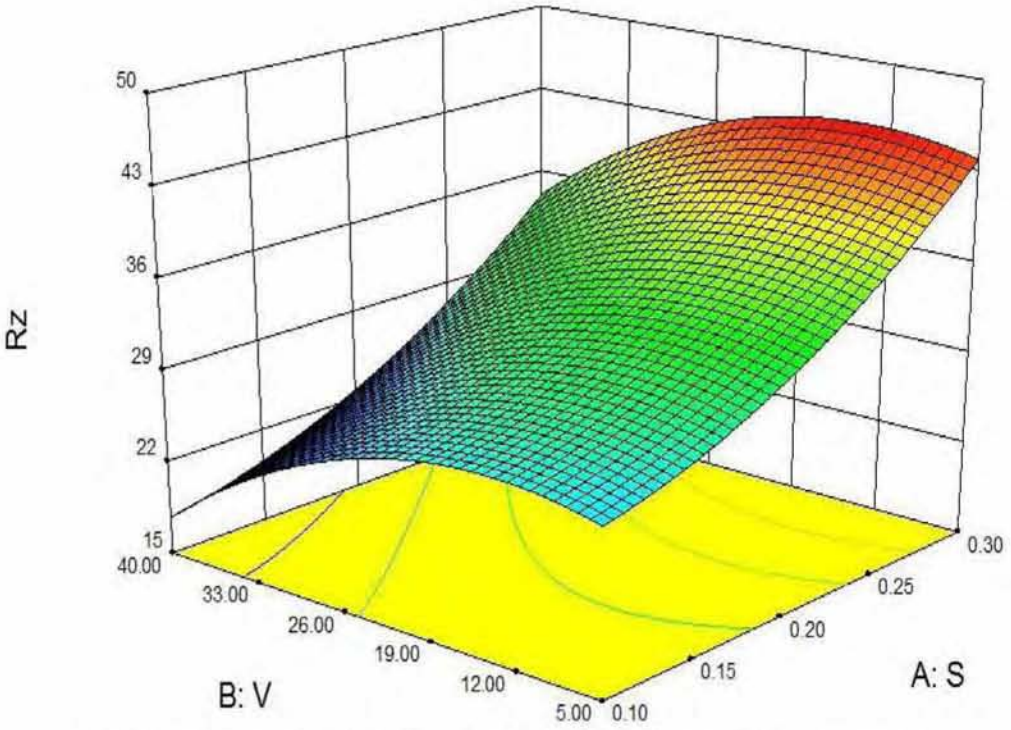


Σχήμα Γ7: Επιφάνεια προσαρμογής της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm).

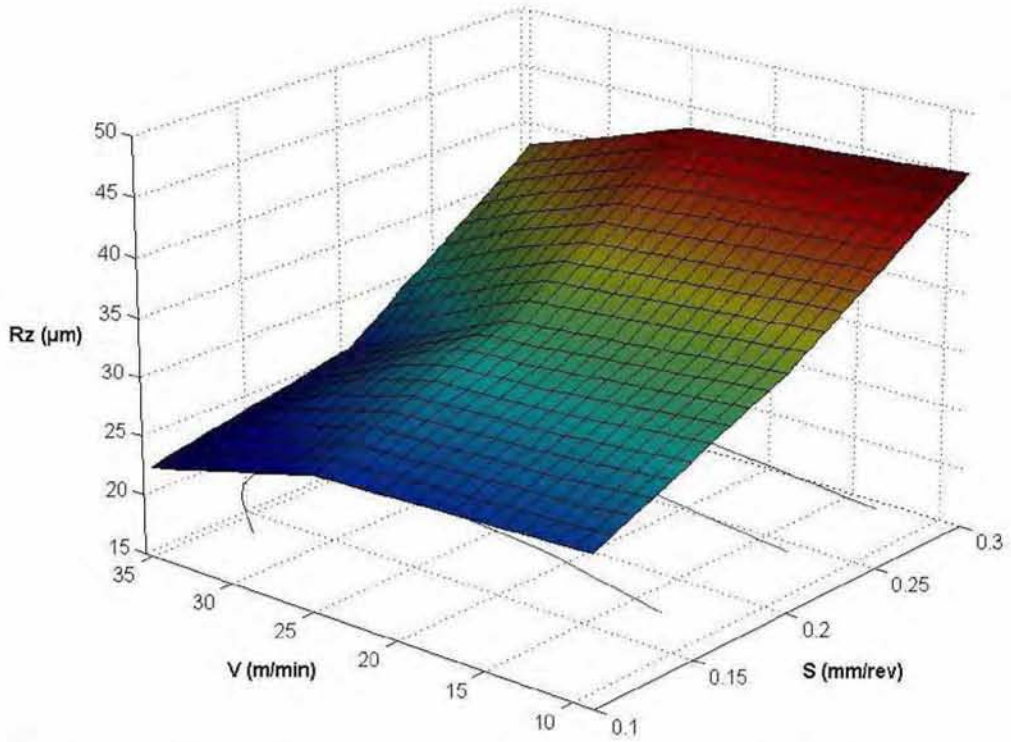


Σχήμα Γ8: Γράφημα επιφάνειας της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a (μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

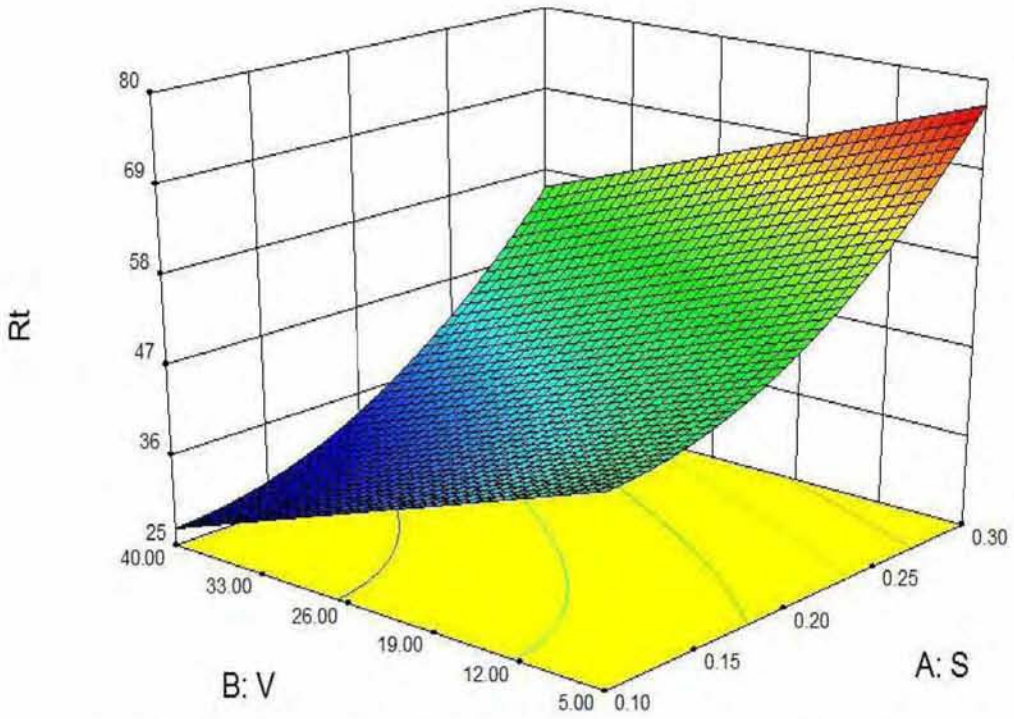


Σχήμα Γ9: Επιφάνεια προσαρμογής του ύψους δέκα σημείων R_z(μm).

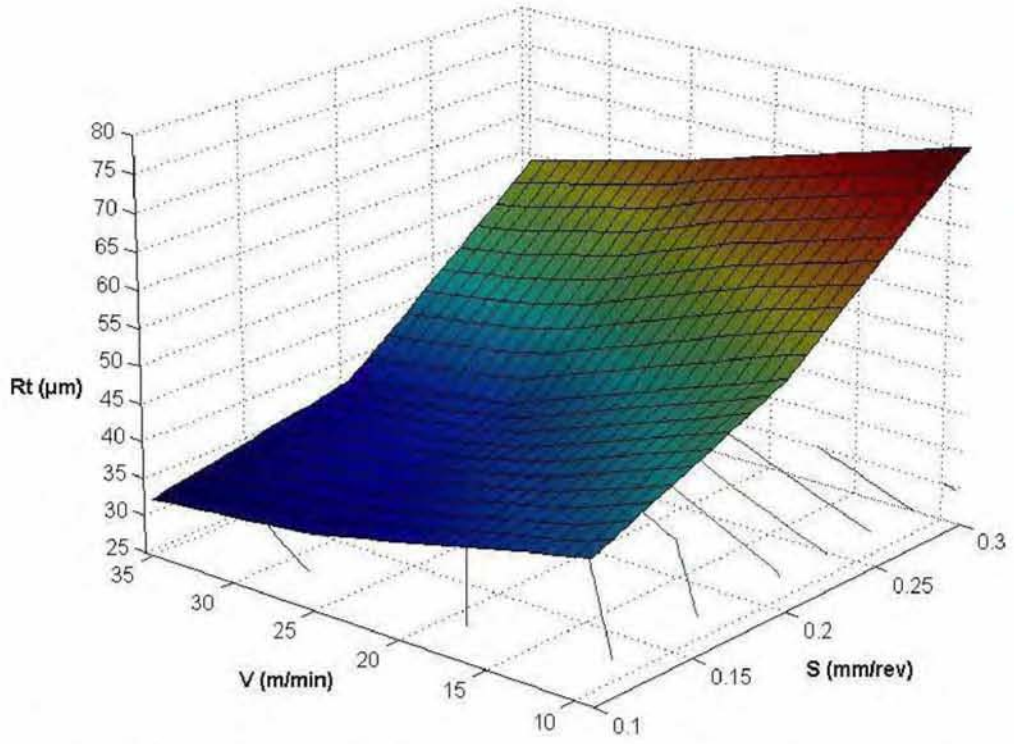


Σχήμα Γ10: Γράφημα επιφάνειας του ύψους δέκα σημείων R_z(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



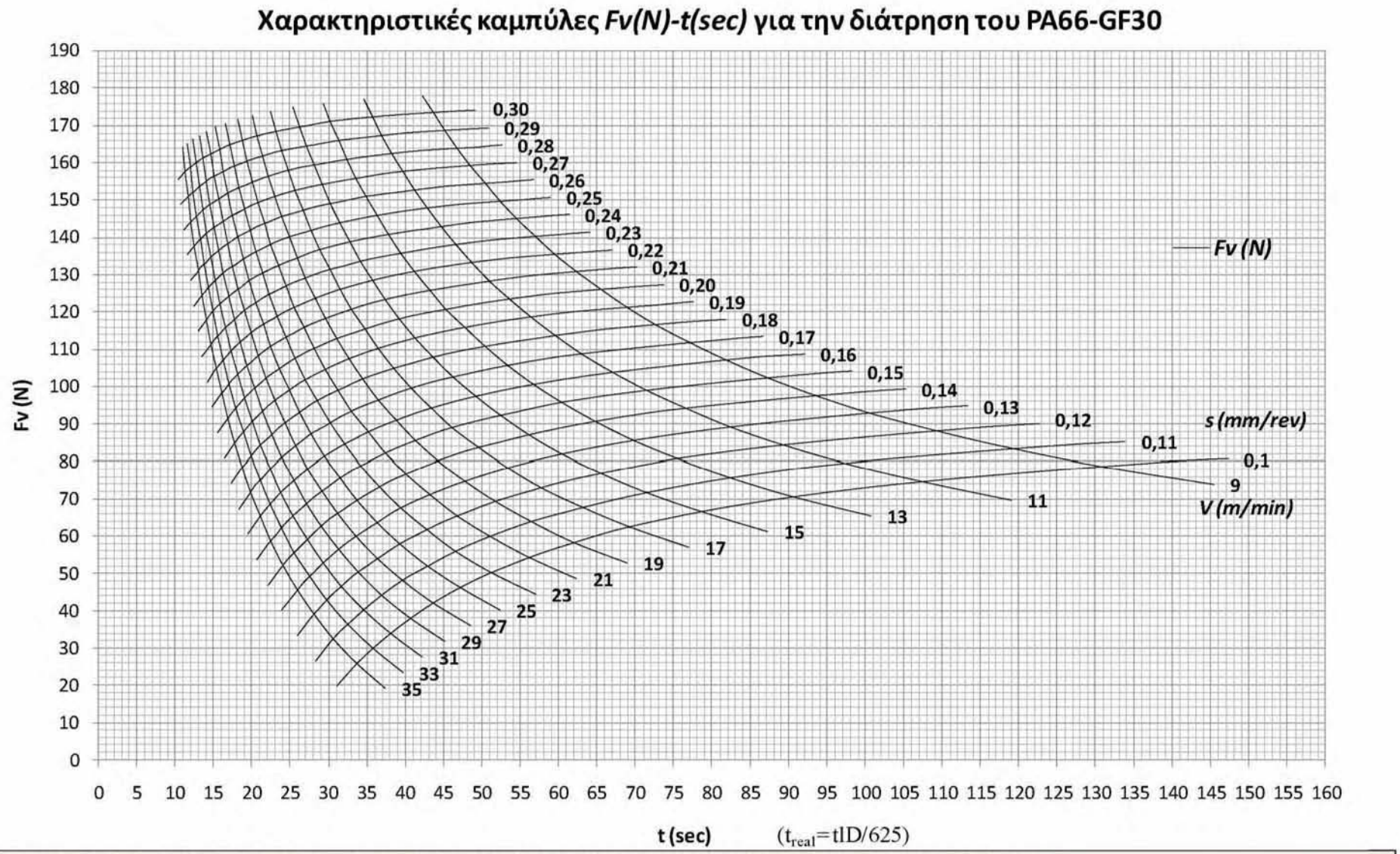
Σχήμα Γ11: Επιφάνεια προσαρμογής του μέγιστου ύψους Rt(μm).



Σχήμα Γ12: Γράφημα επιφάνειας του μέγιστου ύψους Rt(μm) συναρτήσει της περιστροφικής ταχύτητας V(m/min) και της πρόωσης S(mm/sec).

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Γ.4 Χαρακτηριστικές καμπύλες των παραμέτρων κατεργαστικότητας για την διάτρηση του PA66-GF30

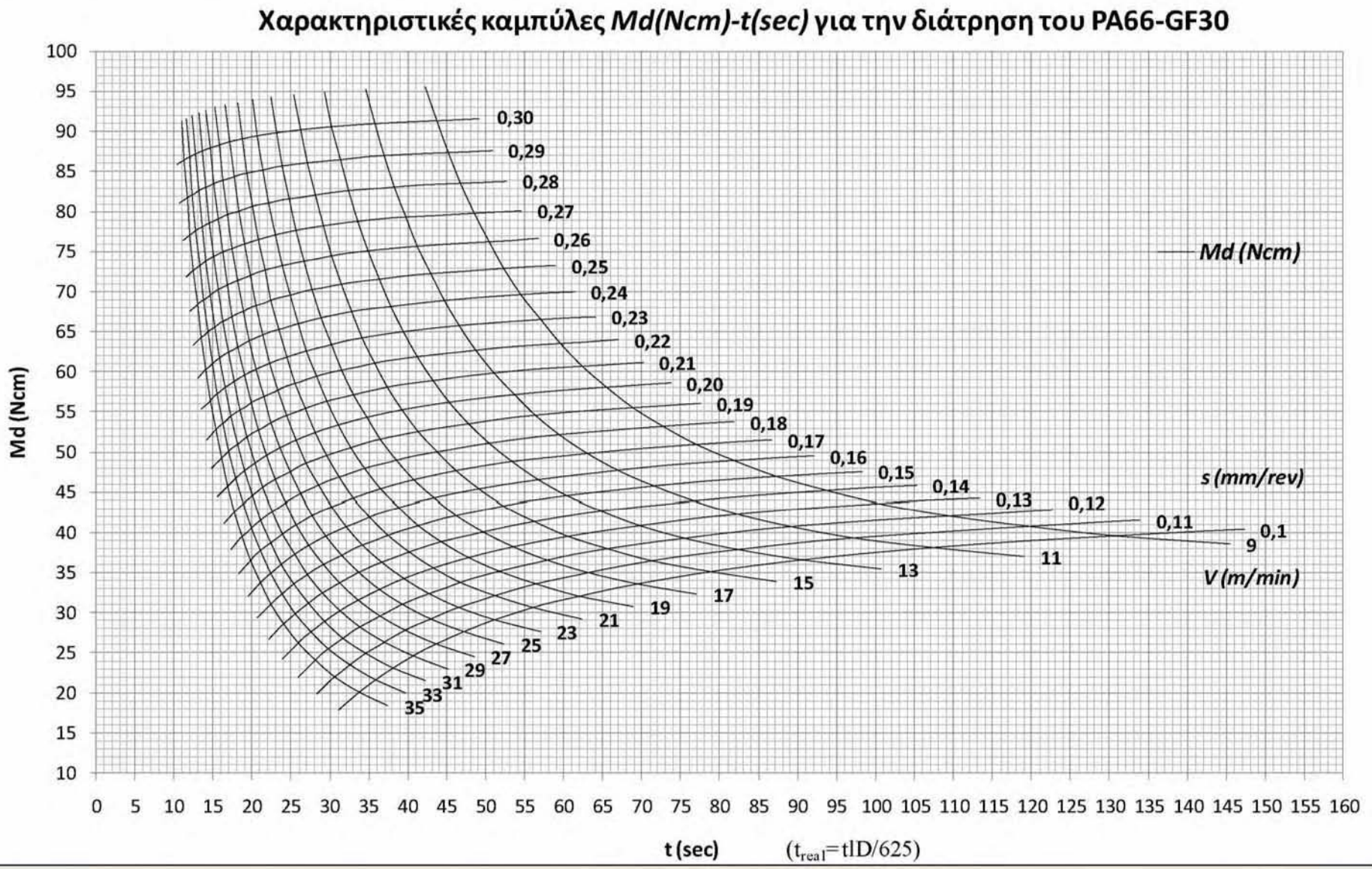


-Εργαλείο κοπής: Ελικοειδές τρυπάνι τύπου N από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5% HSS-Co (DIN 338), Διάμετρος 12,5mm, Γωνία κορυφής 135°
-Είδος οπής: Διαμπερή, Ψυκτικό υγρό: Όχι

Όπου: Fv(N) η δύναμη πρόωσης, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο τρυπανιού 12,5mm και μήκος κοπής 50mm t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου κοπής, l το μήκος κοπής.

Σχήμα Γ13: Χαρακτηριστικές καμπύλες της δύναμης πρόωσης F_v(N) για την διάτρηση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

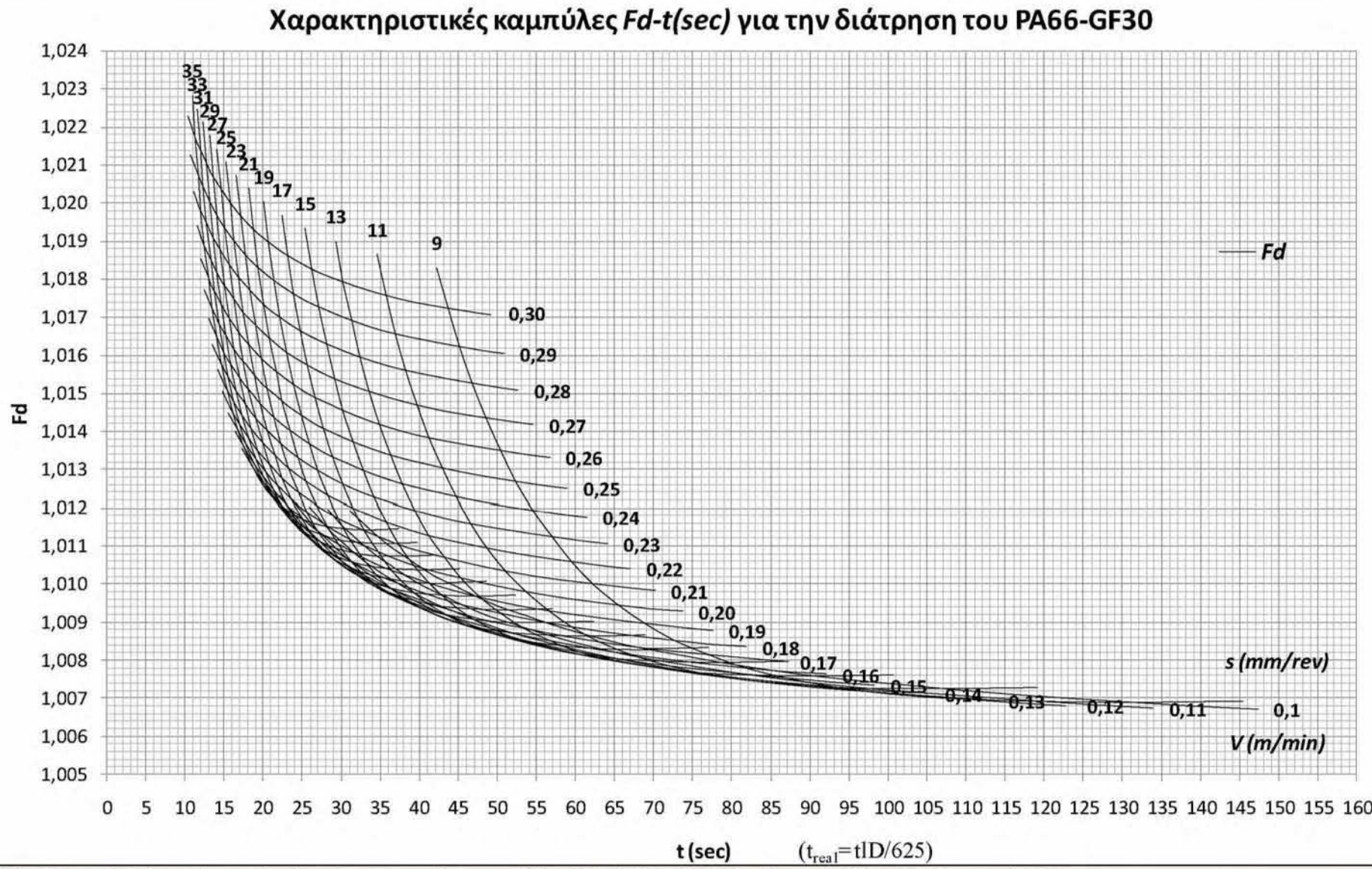


-Εργαλείο κοπής: Ελικοειδές τρυπάνι τύπου N από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5% HSS-Co (DIN 338), Διάμετρος 12,5mm, Γωνία κορυφής 135°
-Είδος οπής: Διαμπερή, Ψυκτικό υγρό: Όχι

Όπου: Md(Ncm) η ροπή στρέψης, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο τρυπανιού 12,5mm και μήκος κοπής 50mm t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου κοπής, l το μήκος κοπής.

Σχήμα Γ14: Χαρακτηριστικές καμπύλες της ροπής στρέψης M_d(Ncm) για την διάτρηση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

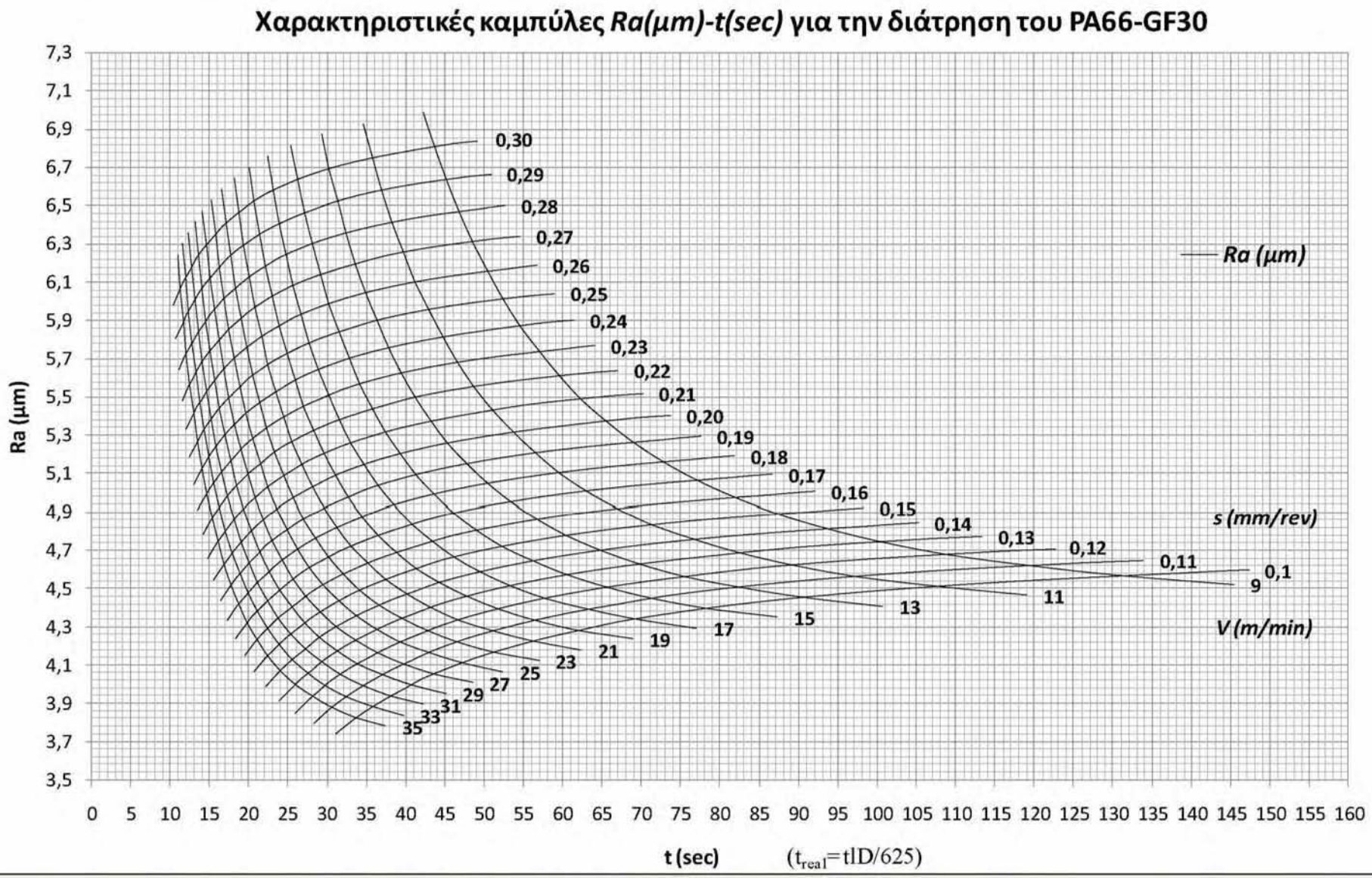


-Εργαλείο κοπής: Ελικοειδές τρυπάνι τύπου N από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5% HSS-Co (DIN 338), Διάμετρος 12,5mm, Γωνία κορυφής 135°
-Είδος οπής: Διαμπερή, Ψυκτικό υγρό: Όχι

Όπου: Fd ο παράγοντας αποκόλλησης, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο τρυπανιού 12,5mm και μήκος κοπής 50mm t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου κοπής, l το μήκος κοπής.

Σχήμα Γ15: Χαρακτηριστικές καμπύλες του παράγοντα αποκόλλησης F_d(N) για την διάτρηση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

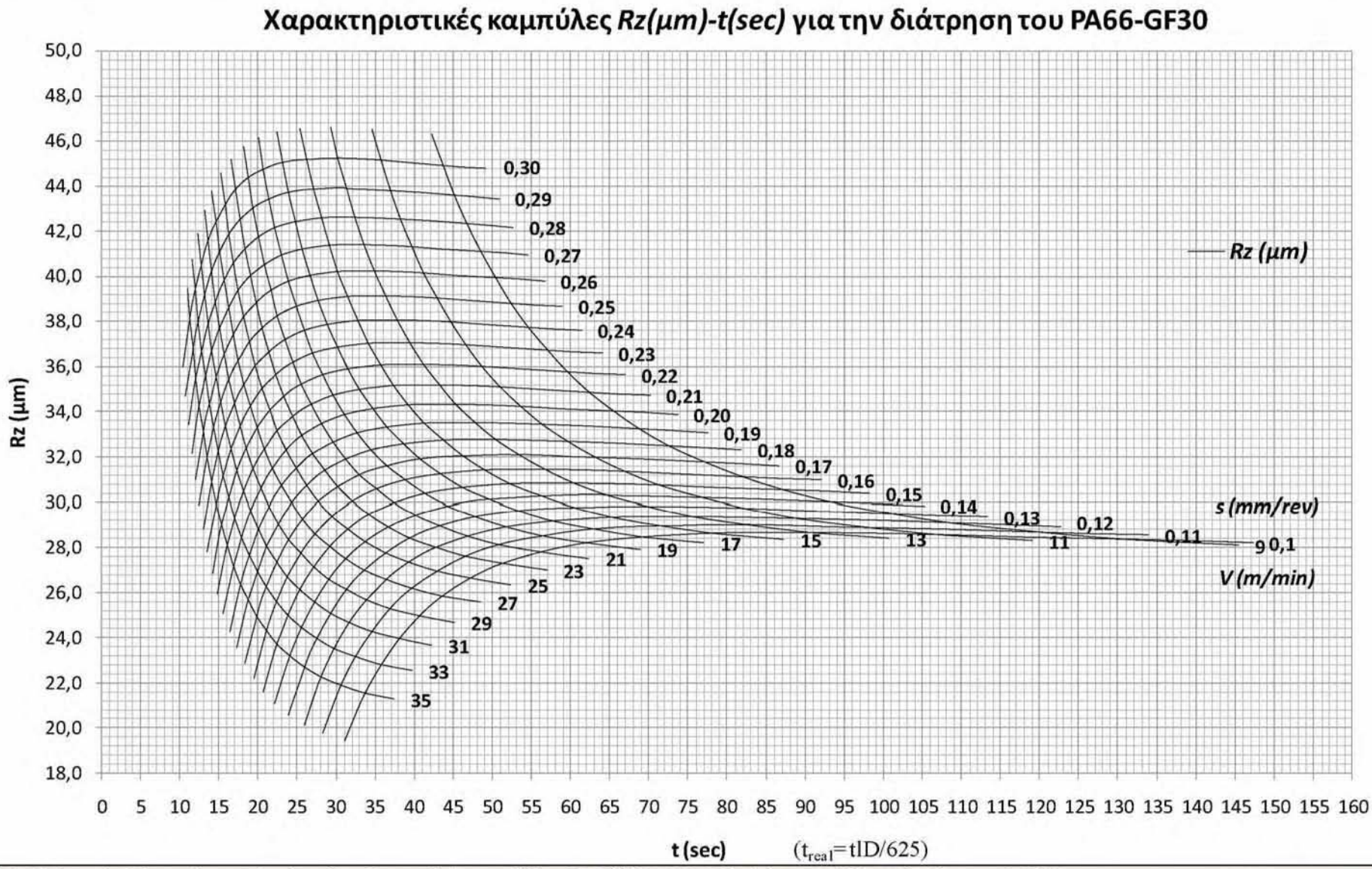


-Εργαλείο κοπής: Ελικοειδές τρυπάνι τύπου N από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5% HSS-Co (DIN 338), Διάμετρος 12,5mm, Γωνία κορυφής 135°
-Είδος οπής: Διαμπερή, Ψυκτικό υγρό: Όχι

Όπου: Ra(μm) η μέση αριθμητική τραχύτητα, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο τρυπανιού 12,5mm και μήκος κοπής 50mm, t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου κοπής, l το μήκος κοπής.

Σχήμα Γ16: Χαρακτηριστικές καμπύλες της μέσης αριθμητικής τραχύτητας R_a(μm) για την διάτρηση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

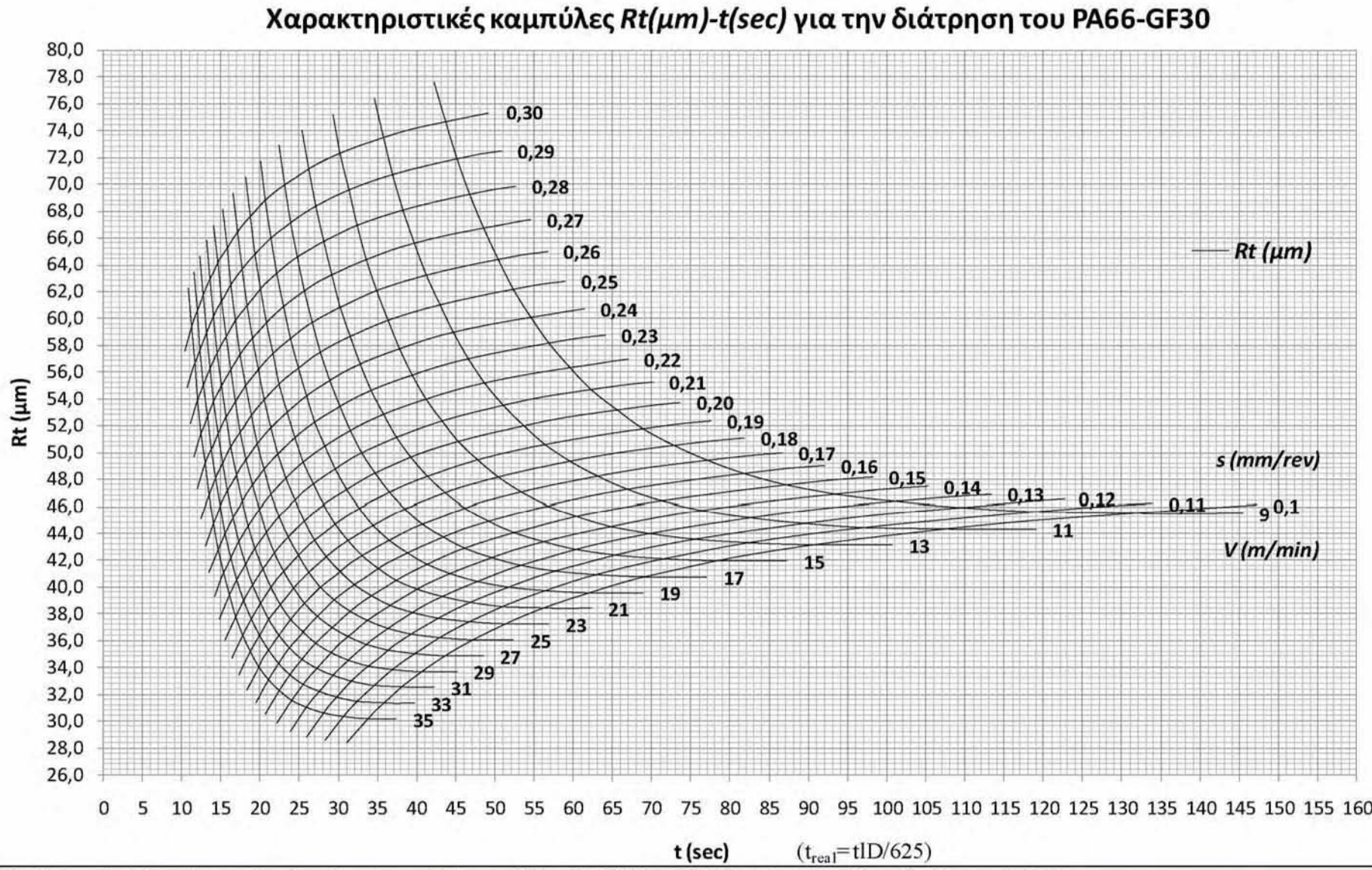


-Εργαλείο κοπής: Ελικοειδές τρυπάνι τύπου N από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5% HSS-Co (DIN 338), Διάμετρος 12,5mm, Γωνία κορυφής 135°
-Είδος οπής: Διαμπερή, Ψυκτικό υγρό: Όχι

Όπου: Rz(μm) το ύψος δέκα σημείων, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο τρυπανιού 12,5mm και μήκος κοπής 50mm t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου κοπής, l το μήκος κοπής.

Σχήμα Γ17: Χαρακτηριστικές καμπύλες του ύψους δέκα σημείων R_Z(μm) για την διάτρηση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



-Εργαλείο κοπής: Ελικοειδές τρυπάνι τύπου N από ταχυχάλυβα με κοβάλτιο 5% HSS-Co (DIN 338), Διάμετρος 12,5mm, Γωνία κορυφής 135°
-Είδος οπής: Διαμπερή, Ψυκτικό υγρό: Όχι

Όπου: Rt(μm) το μέγιστο ύψος, S(mm/rev) η πρόωση, V(m/min) η ταχύτητας κοπής, t ο χρόνος κοπής για διάμετρο τρυπανιού 12,5mm και μήκος κοπής 50mm
t_{real} ο πραγματικός χρόνος κοπής συναρτήσει των διαστάσεων του τεμαχίου, D η διάμετρος του εργαλείου κοπής, l το μήκος κοπής.

Σχήμα Γ18: Χαρακτηριστικές καμπύλες του μέγιστου ύψους R_t(μm) για την διάτρηση του PA66-GF30.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Παράρτημα Δ

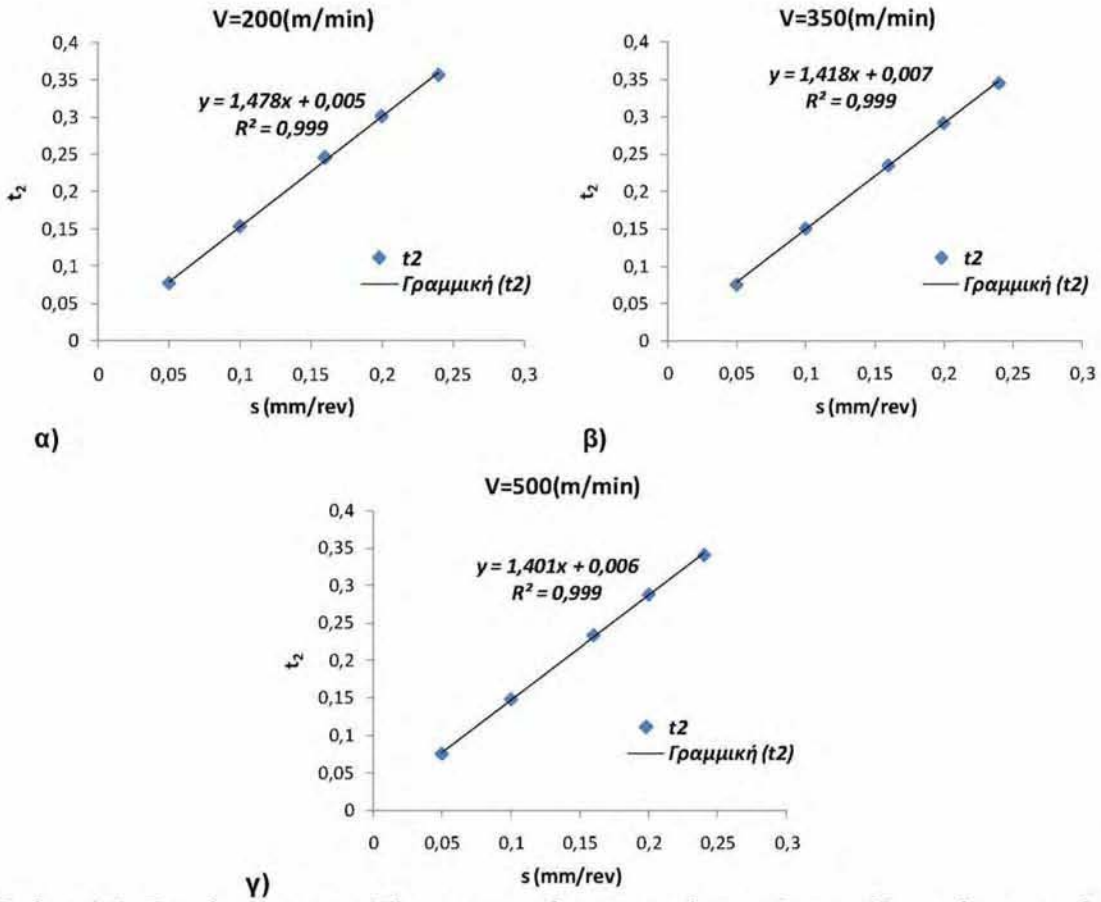
ΜΕΤΡΗΣΗ ΠΑΧΟΥΣ ΑΠΟΒΛΙΤΤΟΥ

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Δ.1 Δεδομένα των μετρήσεων του πάχους των αποβλίττων

Πίνακας Δ1: Πειραματικές μετρήσεις του πάχους των αποβλίττων κατά την τόρνευση του PA66-GF30.

S (mm/rev)	V (m/min)	t_2 (mm)			
		Rep. 1	*Rep. 2*	*Rep. 1*	Mean
0,05	200	0,078	0,092	0,063	0,078
0,1	200	0,149	0,151	0,162	0,154
0,16	200	0,261	0,25	0,228	0,246
0,2	200	0,331	0,291	0,284	0,302
0,24	200	0,362	0,329	0,382	0,358
0,05	350	0,072	0,075	0,081	0,076
0,1	350	0,154	0,161	0,138	0,151
0,16	350	0,203	0,247	0,256	0,235
0,2	350	0,276	0,292	0,308	0,292
0,24	350	0,34	0,336	0,361	0,346
0,05	500	0,071	0,082	0,072	0,075
0,1	500	0,137	0,153	0,154	0,148
0,16	500	0,229	0,224	0,248	0,234
0,2	500	0,224	0,287	0,353	0,288
0,24	500	0,308	0,319	0,395	0,341



Σχήμα Δ.1: Το πάχος του αποβλίττου συναρτήσει της πρόωσης S, για κάθε ταχύτητα κοπής V α)V=200m/min, β) V=350m/min, γ) V=500m/min.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Πίνακας Δ.2: Ανάλυση διακύμανσης (ANOVA) του στοχαστικού μοντέλου του πραγματικού πάχους του αποβλίττου t_2(mm).

Analysis of Variance for t2(mm), using Sequential SS for Tests

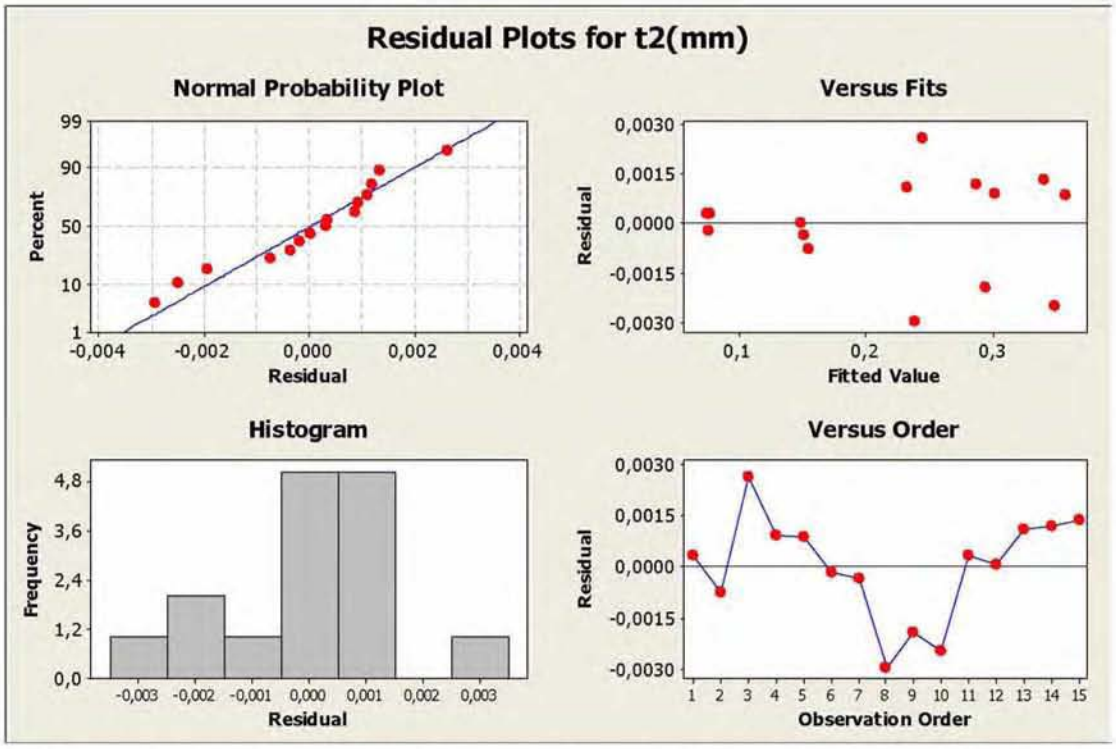
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Seq MS	F	P	Perc.%
S(mm/rev)	1	0,142709	0,005123	0,142709	43983,68	0,000	99,72%
V(m/min)	1	0,000277	0,000000	0,000277	85,27	0,000	0,19%
S(mm/rev)*S(mm/rev)	1	0,000054	0,000054	0,000054	16,62	0,002	0,04%
V(m/min)*S(mm/rev)	1	0,000065	0,000065	0,000065	20,11	0,001	0,05%
Error	10	0,000032	0,000032	0,000003			
Total	14	0,143137					

S = 0,00125353 R-Sq = 99,98% R-Sq(adj) = 99,97%

Πίνακας Δ.3: Το στοχαστικό μοντέλο του πραγματικού πάχους του αποβλίττου t_2(mm).

Απόκριση	Στοχαστικό μοντέλο	Συντελεστής Προσδιορισμού
t_2 (mm)	$Y = -2{,}42\ 10^{-3} + 1{,}668\ X_1 + 2\ 10^{-6}\ X_2 - 0{,}5167\ X_1^2 - 2{,}5\ 10^{-4}\ X_1 X_2$	99,98%

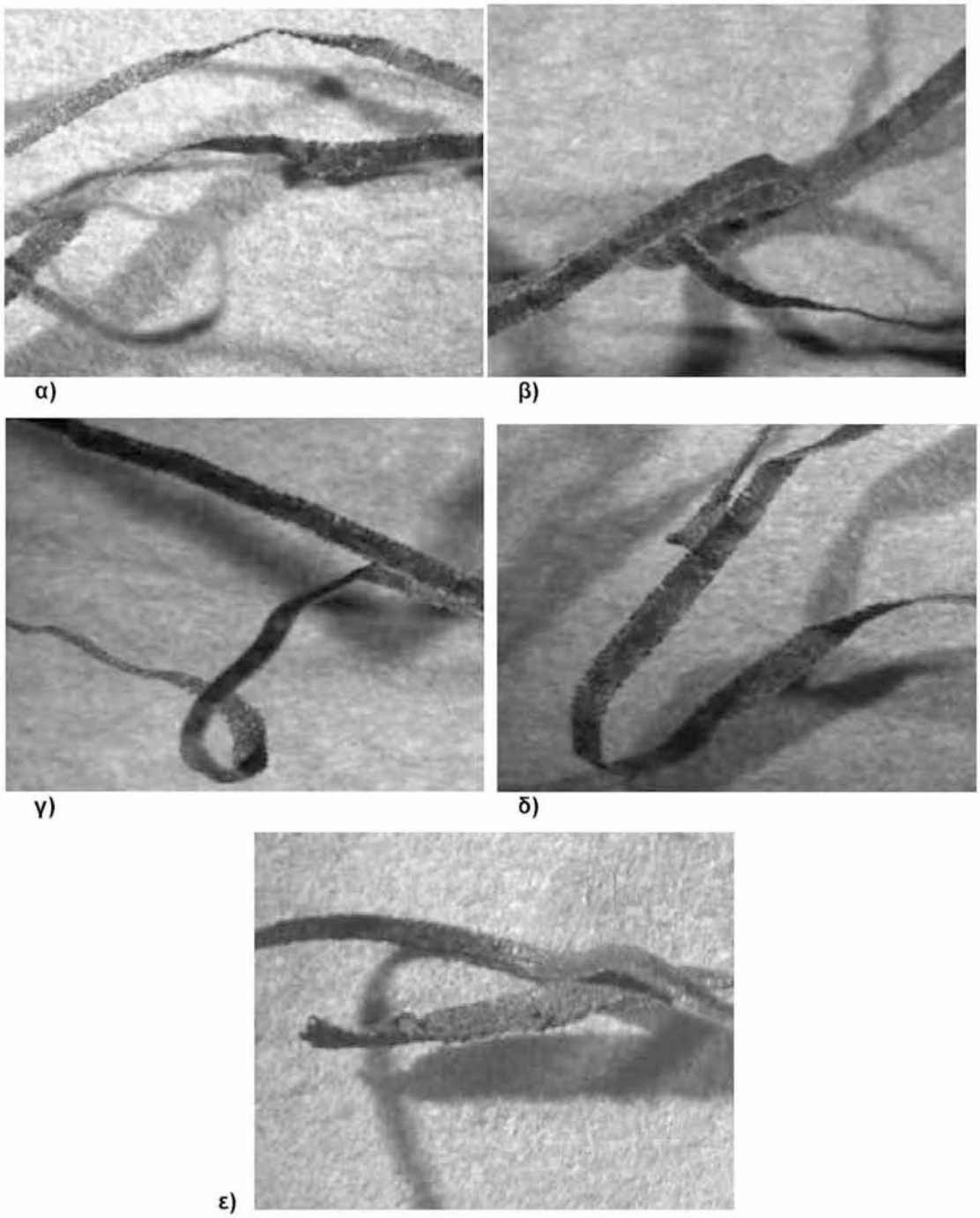
Όπου: Y το πραγματικό πάχος του αποβλίττου
X_1 η πρόωση
X_2 η ταχύτητα κοπής



Σχήμα Δ.2: Διαγράμματα καταλοίπων για το πραγματικό πάχος του αποβλίττου t_2(mm): α)Διάγραμμα ελέγχου κανονικότητας (Normal Probability Plot), β)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τις εκτιμούμενες τιμές (Versus Fits), γ)Ιστόγραμμα συχνοτήτων των καταλοίπων (Histogram), δ)Διάγραμμα καταλοίπων ως προς τη σειρά παρατήρησης (Versus Order).

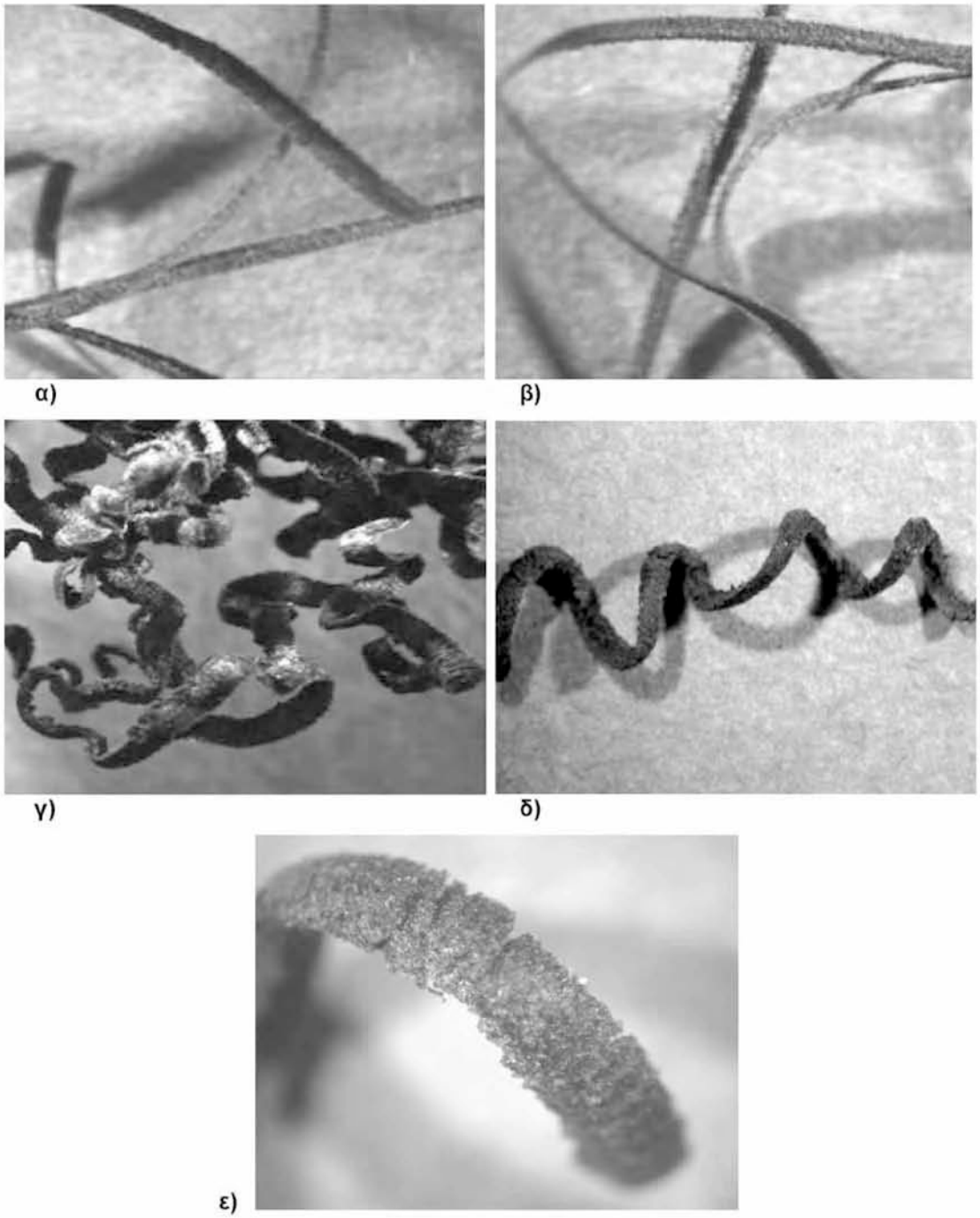
Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38

Δ.2 Μορφολογία των αποβλίττων



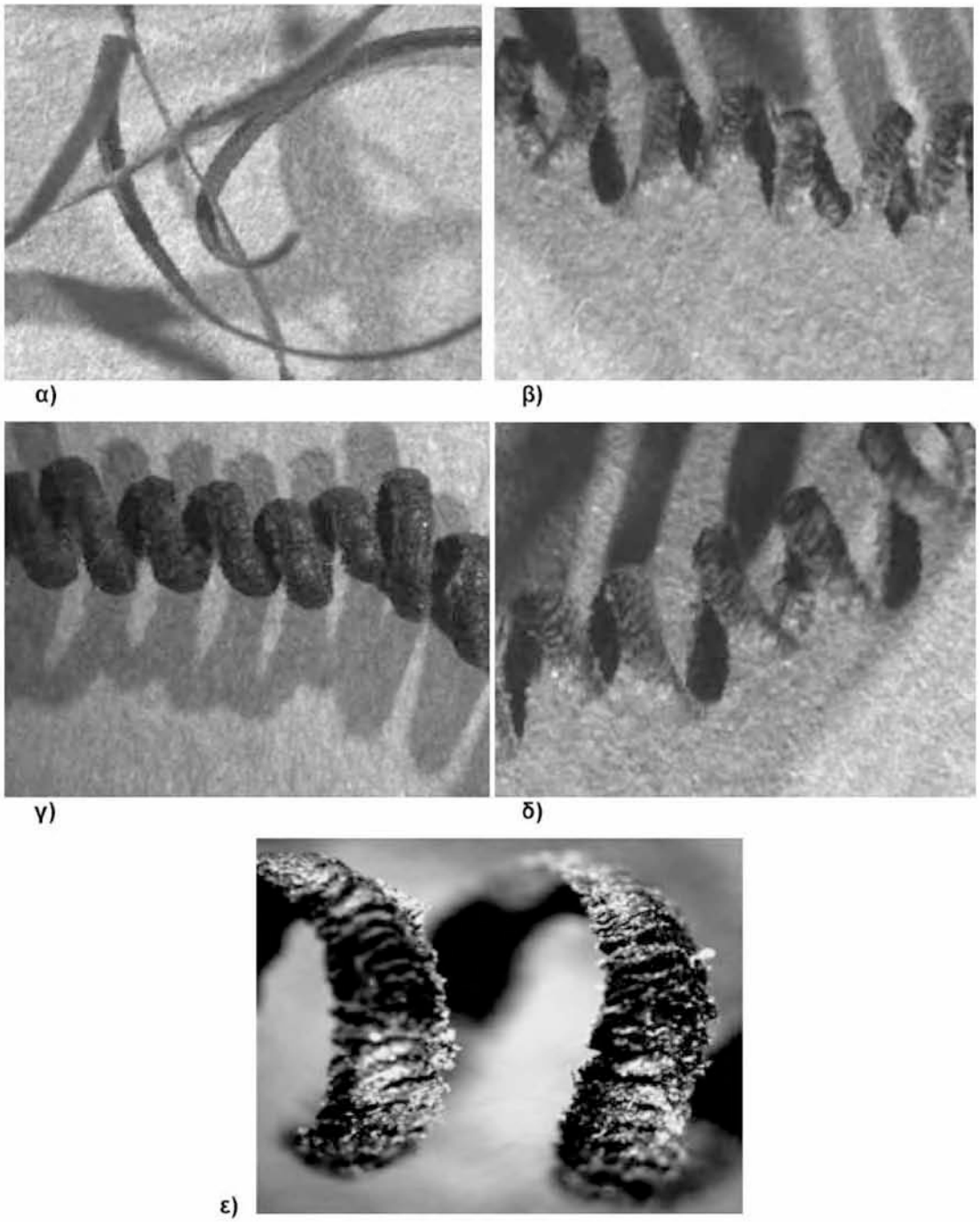
Σχήμα Δ.3: Η μορφολογία του αποβλίττου για ταχύτητα κοπής V=200m/min, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, β)S=0,10mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, γ)S=0,16mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, δ)S=0,20mm/rev: Ασυνεχές ταινιοειδές, ε)S=0,24mm/rev: Ασυνεχές ταινιοειδές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα Δ.4: Η μορφολογία του αποβλίττου για ταχύτητα κοπής V=350m/min, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, β)S=0,10mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, γ)S=0,16mm/rev: Συνεχές σπειροειδές, δ)S=0,20mm/rev: Ασυνεχές σπειροειδές, ε)S=0,24mm/rev: Ασυνεχές σπειροειδές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38



Σχήμα Δ.5: Η μορφολογία του αποβλίττου για ταχύτητα κοπής V=500m/min, για κάθε πρόωση S α)S=0,05mm/rev: Συνεχές ταινιοειδές, β)S=0,10mm/rev: Συνεχές ελικοειδές, γ)S=0,16mm/rev: Συνεχές ελικοειδές, δ)S=0,20mm/rev: Ασυνεχές ελικοειδές, ε)S=0,24mm/rev: Ασυνεχές ελικοειδές.

Institutional Repository - Library & Information Centre - University of Thessaly
03/05/2026 08:06:19 EEST - 216.73.217.38