



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ  
ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ  
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΗΤΡΑΣ  
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΛΑΣΙΟΥ Χ. ΔΕΔΕ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου  
Κρήτης

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ**

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2018**





**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

**ΠΟΛΥΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ  
ΤΟΡΝΕΥΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΜΕ  
ΝΑΝΟΔΟΜΕΣ ΓΡΑΦΕΝΙΟΥ  
ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΜΗΤΡΑΣ  
ΠΟΛΥΑΙΘΥΛΕΝΙΟΥ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΒΛΑΣΙΟΥ Χ. ΔΕΔΕ**

Διπλωματούχου Μηχανικού Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου  
Κρήτης

**ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Α. ΜΑΡΚΟΠΟΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δ. ΜΑΝΩΛΑΚΟΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Λ. ΖΟΥΜΠΟΥΛΑΚΗΣ, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Οκτώβριος 2018**



Στους γονείς μου



*Η ουτοπία βρίσκεται στον ορίζοντα. Αν κάνω δύο βήματα προς το μέρος της, αυτή απομακρύνεται δύο βήματα πίσω. Αν προχωρήσω δέκα βήματα μπροστά, εκείνη ξεγλιστράει δέκα βήματα πιο πέρα. Όσο μακριά κι αν πάω, ποτέ δεν την αγγίζω. Προς τι λοιπόν η ουτοπία; Μας αναγκάζει να προχωρούμε.*

*Eduardo Galeano*





## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2017-2018 στον Τομέα Τεχνολογίας των Κατεργασιών της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για το Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών». Τίποτα από όσα γράφτηκαν σε αυτή τη διπλωματική εργασία, δε θα είχε πραγματοποιηθεί εάν δεν είχα την πολύτιμη βοήθεια ανθρώπων που στάθηκαν δίπλα μου σε αυτό το υπέροχο ταξίδι τον τελευταίο ένα χρόνο.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή κ. Άγγελο Μαρκόπουλο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, δίνοντας μου τη δυνατότητα να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψή του.

Παράλληλα, είμαι πραγματικά ευγνώμων στον Διδάκτορα κ. Γεώργιο Σερέτη, ο οποίος ως συνεπιβλέπωντας στην παρούσα διπλωματική εργασία, μου παρείχε πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση.

Επίσης, ευχαριστώ από καρδιάς όλο το τεχνικό προσωπικό του Εργαστηρίου Κατεργασίας των Υλικών, και πιο συγκεκριμένα στον κ. Νικόλαο Μελισσά και τον κ. Κωνσταντίνο Κερασιώτη, για την απεριόριστη υλικοτεχνική υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια των πειραμάτων, καθώς και για την υπομονή τους. Ακόμα, ευχαριστώ τον Υποψήφιο Διδάκτορα κ. Ιωάννη Παπαντωνίου, ο οποίος μου στάθηκε και με βοήθησε να ξεπεράσω πρακτικά προβλήματα.

Ένα τεράστιο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Ανδρέα Πλατή, του οποίου η εμπειρία και η βοήθεια που μου προσέφερε ήταν πολύτιμες. Ακόμα, θέλω να ευχαριστήσω την κ. Μαρία Λώλου, για τη βοήθεια που μου προσέφερε στη διαμόρφωση των εικόνων αυτής της διπλωματικής.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους δικούς μου ανθρώπους, στους φίλους μου, παλιούς και νέους, οι οποίοι ήταν εκεί και με στήριξαν, ο καθένας με τον τρόπο του. Αν δεν ήταν αυτοί, θα είχα παραιτηθεί από την προσπάθεια.



## Περίληψη

Τα νανοσύνθετα υλικά ή πιο αναλυτικά τα σύνθετα υλικά με ενίσχυση νανοϋλικών, αποτελούν την αιχμή του δόρατος της επιστήμης και της τεχνολογίας των υλικών, καθώς από το στάδιο της ανακάλυψης και της ανάπτυξης, βρίσκονται πλέον στο στάδιο της εφαρμογής. Το γεγονός αυτό δε συνεπάγεται αυτόματα ότι τερματίστηκε η έρευνα των νανοϋλικών. Αντιθέτως, ο ρυθμός έρευνας αυξήθηκε, καθώς απαραίτητη προϋπόθεση ορθής χρήσης των νανοσύνθετων υλικών είναι η πλήρη κατανόηση τους. Για το λόγο αυτό, η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τη διερεύνηση της κατεργασιμότητας σε δοκιμές τόννευσης, του νανοσύνθετου υλικού μήτρας πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) ενισχυμένης με νανοδομές γραφενίου (GNPs), μέσω παραμετρικής ανάλυσης.

Τα κυλινδρικά δοκίμια παρασκευάστηκαν μέσω εκβολής, αφού η ενσωμάτωση των νανοδομών γραφενίου είχε επιτευχθεί μέσω ανάδευσης με τα πέλλετ πολυαιθυλενίου σε θερμοκρασία δωματίου. Δημιουργήθηκαν τέσσερις διαφορετικές ομάδες δοκιμίων, 0%, 1%, 2% και 3%, ανάλογα την περιεκτικότητα της μήτρας πολυαιθυλενίου σε γραφένιο. Οι τελικές διαστάσεις των δοκιμίων, οι οποίες ήταν 150mm μήκος και 11mm διάμετρος, τους δόθηκαν μέσω κοπής σε δισκοτόμο και μίας αρχικής επεξεργασίας σε τόρνο. Στη συνέχεια, ορίστηκαν οι τιμές των τριών παραμέτρων της κοπής, οι οποίες ήταν το βάθος κοπής, η ταχύτητα περιστροφής και η πρόωση και μέσω της μεθόδου Taguchi δημιουργήθηκε ένας πίνακας 16 διαφορετικών πειραμάτων. Κάθε κοπή είχε μήκος 20mm, ενώ τα πειράματα κοπής διεξήχθησαν σε ένα τόρνο CNC, όπου κατά τη διάρκεια της κοπής μετρήθηκαν οι παραγόμενες δυνάμεις με τη χρήση ενός δυναμόμετρου. Μετά το πέρας των πειραμάτων, μετρήθηκε η τελική τραχύτητα επιφανείας, μέσω των παραμέτρων τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  και  $S_m$ , οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια, μαζί με τη δύναμη  $F_{z_{max}}$ , για την εξαγωγή αποτελεσμάτων μέσω της μεθόδου ανάλυσης της διακύμανσης (ANOVA).

Αναλύοντας τα πειραματικά δεδομένα, από τις παραμέτρους της τραχύτητας διαφαίνεται ότι η κατεργασιμότητα του νανοσύνθετου επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την πρόωση, ενώ όσο το ποσοστό γραφενίου αυξάνεται, η σημαντικότητα της προώσεως σημειώνει ανοδική πορεία. Παράλληλα, η δύναμη της κοπής επηρεάζεται κυρίως από το βάθος κοπής και όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα γραφενίου στο σύνθετο υλικό, το φαινόμενο αυτό γίνεται πιο έντονο.

## Abstract

Nanocomposite materials or more analytically, composites reinforced with nanomaterials are state of the art of the materials science and technology, as they have moved forth, from the stage of discovering and developing, to the stage of practical application. This fact does not mean that research about nanocomposite materials has stopped. Contrariwise, the tempo of researching is much higher than before, mainly because it is a necessity to be completely understood in their whole, before being used in scientific or everyday-use applications. Thus, this thesis is about the machinability of graphene nanoplatelets (GNPs) reinforced high density polyethylene (HDPE) matrix particulate composites in turning, via multi-parameter analysis.

The cylindrical specimens, which have been made with extrusion, after mixing the GNPs with the HDPE pellets in room temperature, depending on the percentage of GNPs, were categorized in four different groups, 0%, 1%, 2% and 3%. Also, the final dimensions of the specimens were 150mm length and 11mm diameter and they obtained them after they had been cut in a tabletop cut-off machine and turned in a lathe. Furthermore, the three cutting parameters were the depth of cut, the rotational speed and the feed rate. After defining the values for each one of the cutting parameters, a table with sixteen different experiments was created using Taguchi method. The experiments took place in a CNC lathe and for each one of them a 20mm-length part was cut from its specimen. Moreover, for every experiment were measured the produced forces using a dynamometer. When the experiments were completed, the roughness of the surface had been measured, using the roughness parameters  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  and  $S_m$ . The four roughness parameters alongside with cutting force  $F_{z_{max}}$ , which had been measured before via the dynamometer, have been used for exporting results by using analysis of variance (ANOVA).

Analyzing the experimental data regarding to parameters of surface roughness, the machinability of nanocomposite material is basically affected by feed rate, which increases while the percentage of graphene in the nanocomposite material also increases. Furthermore, cutting force ( $F_{z_{max}}$ ) is mainly affected by depth of cut. This influence increases while the percentage of graphene in the nanocomposite material also increases.

## Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	9
Περίληψη .....	11
Abstract .....	12
Περιεχόμενα.....	13
Εικόνες-Πίνακες .....	16
Εικόνες.....	16
Πίνακες.....	19
1. Εισαγωγή.....	20
1.1. Αντικείμενο της εργασίας .....	20
1.2. Δομή της εργασίας.....	20
2. Νανοσύνθετα υλικά και νανοτεχνολογία .....	22
2.1. Γενικά .....	22
2.2. Νανοσύνθετα υλικά.....	22
2.3. Γραφένιο.....	23
2.4. Νανοσωλήνες άνθρακα.....	26
3. Εκβολή πολυμερούς .....	29
3.1. Γενικά .....	29
3.2. Εκβολέας.....	29
3.2.1. Κοχλίας.....	30
3.2.2. Συστήματα κοχλίωσης .....	32
3.2.3. Χοάνη τροφοδοσίας.....	34
3.3. Τύποι εκβολής .....	35
3.3.1. Εκβολή ανάμιξης .....	35
3.3.2. Εκβολή από μήτρα ορισμένου προφίλ .....	37
3.3.3. Παραγωγή φύλλων και μεμβρανών με εκβολή.....	38
4. Κατεργασία κοπής .....	40
4.1. Γενικά .....	40
4.2. Μηχανική της κοπής .....	42
4.2.1. Βασικές έννοιες.....	42
4.2.2. Δημιουργία αποβλίπτου .....	44
4.2.3. Δυνάμεις κοπής .....	46
4.3. Κοπτικό εργαλείο .....	48
4.3.1. Γενικά .....	48
4.3.2. Αναπτυσσόμενη θερμότητα .....	50
4.3.3. Φθορά και διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου.....	51
4.3.4. Υγρά κοπής .....	54
4.4. Τόρνευση.....	55

4.4.1.	Γενικά .....	55
4.4.2.	Ο τόννος.....	56
4.4.3.	Το κοπτικό στην τόννευση.....	57
4.4.4.	Οι συνθήκες κοπής.....	58
5.	Τραχύτητα .....	59
5.1.	Γενικά .....	59
5.2.	Τραχύτητα .....	60
5.3.	Παράμετροι τραχύτητας .....	63
5.3.1.	Μέση αριθμητική τραχύτητα <b>R<sub>a</sub></b> .....	63
5.3.2.	Τραχύτητα μέσης τιμής <b>R<sub>q</sub></b> .....	64
5.3.3.	Μέγιστο ύψος <b>R<sub>t</sub></b> ή <b>R<sub>max</sub></b> .....	64
5.3.4.	Μέσο διάστημα κορυφών <b>R<sub>sm</sub></b> ή <b>S<sub>m</sub></b> .....	64
5.4.	Μέτρηση τραχύτητας .....	65
6.	Πειραματικός εξοπλισμός.....	67
6.1.	Υλικά .....	67
6.1.1.	Υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE).....	67
6.1.2.	Νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets-GNPs).....	67
6.2.	Ζυγός ακριβείας.....	68
6.3.	Εκβολέας.....	69
6.4.	Δισκοτόμος.....	70
6.5.	Τόννος.....	71
6.5.1.	Συμβατικός τόννος.....	71
6.5.2.	Τόννος CNC.....	71
6.6.	Δυναμόμετρο .....	73
6.7.	Τραχύμετρο .....	74
6.8.	Πρόγραμμα ανάλυσης Minitab .....	75
6.9.	Μέτρα ατομικής προστασίας (ΜΑΠ).....	76
7.	Πειραματική διαδικασία .....	77
7.1.	Προετοιμασία πρώτων υλών.....	77
7.2.	Εκβολή .....	77
7.3.	Τόννευση.....	78
7.4.	Τραχυμέτρηση.....	82
7.5.	Ανάλυση των δεδομένων .....	82
8.	Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας.....	84
8.1.	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων (Main effects plots).....	84
8.1.1.	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα <b>R<sub>a</sub></b> .....	84
8.1.2.	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα <b>R<sub>q</sub></b> .....	85

8.1.3.	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα $R_t$ .....	86
8.1.4.	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα $S_m$ .....	87
8.1.5.	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για τη δύναμη $F_{z_{max}}$ .....	88
8.2.	Ανάλυση διακύμανσης (Analysis of variance-ANOVA).....	89
8.2.1.	Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $R_a$ .....	89
8.2.2.	Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $R_q$ .....	91
8.2.3.	Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $R_t$ .....	93
8.2.4.	Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $S_m$ .....	95
8.2.5.	Ανάλυση διακύμανσης για τη δύναμη $F_{z_{max}}$ .....	96
8.3.	Ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis).....	98
8.3.1.	Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $R_a$ .....	98
8.3.2.	Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $R_q$ .....	99
8.3.3.	Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $R_t$ .....	100
8.3.4.	Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $S_m$ .....	101
8.3.5.	Ανάλυση παλινδρόμησης για τη δύναμη $F_{z_{max}}$ .....	102
9.	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	104
9.1.	Σύνοψη πειραματικών συμπερασμάτων.....	104
9.2.	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	104
	Βιβλιογραφία.....	105
	Παραρτήματα.....	108
	Παράρτημα Α: Υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE).....	108
	Παράρτημα Β: Διάταξη δυναμόμετρου.....	110
	Παράρτημα Γ: Πρόγραμμα τórνευσης δοκιμίων.....	121
	Παράρτημα Δ: Κατεργασμένα δοκίμια και απόβλιπτα πειραμάτων 13, 14.....	122
	Παράρτημα Ε: Πίνακες ANOVA.....	124
	Παράρτημα ΣΤ: Ανάλυση παλινδρόμησης.....	129
	Βιογραφικό σημείωμα.....	149

## Εικόνες-Πίνακες

### Εικόνες

Εικόνα 2-1:	Δισδιάστατη δομή γραφενίου (πάνω), η οποία μπορεί να μετατραπεί σε φουλερένιο (κατω αριστερά), νανοσωλήνα άνθρακα (κάτω κέντρο) και πολυστρωματικό γραφένιο (κάτω δεξιά).....	24
Εικόνα 2-2:	Πολυστρωματικό γραφένιο σχηματισμένο μέσω της διαδικασίας CVD [39] .....	25
Εικόνα 2-3:	Νανοσωλήνας άνθρακα μονού τοιχώματος (SWCNT).....	26
Εικόνα 2-4:	Δομή νανοσωλήνων άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος (MWCNT) στα αριστερά, ενώ στα δεξιά φαίνονται μέσω TEM νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος με 5, 2 και 7 τοιχώματα [45] .....	27
Εικόνα 2-5:	Σχηματική περιγραφή του τρόπου περιτύλιξης του πλέγματος του γραφενίου για το σχηματισμό νανοσωλήνων άνθρακα στα αριστερά. Στα δεξιά φαίνονται νανοσωλήνες σε διάταξη Α)armchair, Β)zigzag και C)chiral [45] .....	27
Εικόνα 3-1:	Τα βασικά μέρη ενός εκβολέα .....	29
Εικόνα 3-2:	Οι τρεις βασικές ζώνες ενός κοχλία εκβολής .....	30
Εικόνα 3-3:	Διαστασιολογικές αναλογίες ενός κοχλία εκβολής .....	31
Εικόνα 3-4:	Σχέδια διαφόρων μορφών κοχλιών εκβολής.....	32
Εικόνα 3-5:	Γραφικό παράδειγμα κοχλία δύο σταδίων .....	33
Εικόνα 3-6:	Σχέδιο εκβολέα που χρησιμοποιεί εφραπτόμενους κοχλίες εκβολής ....	34
Εικόνα 3-7:	α) πλήρως εμπλεκόμενοι κοχλίες, β) απλά εμπλεκόμενοι κοχλίες, γ) μη εμπλεκόμενοι κοχλίες.....	34
Εικόνα 3-8:	Μορφές τροφοδοσίας εκβολέα. Α)τροφοδοσία πλημμύρας (flood feed), Β) τροφοδοσία πείνας (starve feed), Γ) τροφοδοσία παραγεμίσματος (crammer), Δ) τροφοδοσία τήγματος (melt feed) .....	35
Εικόνα 3-9:	Διάταξη παρασκευής πέλλετ [8] .....	36
Εικόνα 3-10:	Μαχαίρι αέρος (air knife) [8] .....	36
Εικόνα 3-11:	Μηχανή κοπής πέλλετ (pelletizer) [8] .....	36
Εικόνα 3-12:	Μηχανές διαχωρισμού πέλλετ [8] .....	37
Εικόνα 3-13:	Γραμμή παραγωγής προφίλ μέσω εκβολής [8].....	38
Εικόνα 3-14:	Γραμμή παραγωγής φύλλου ή μεμβράνης από εκβολή [8] .....	39
Εικόνα 3-15:	Διάταξη παραγωγής μεβράνης μέσω εκβολής [8].....	39
Εικόνα 4-1:	Κέντρο κατεργασίας τόννευσης (αριστερά) και κέντρο κατεργασίας φρεζαρίσματος (δεξιά) .....	40
Εικόνα 4-2:	Το σύστημα της κοπής με το κοπτικό, το τεμάχιο και το απόβλιπτο ....	42
Εικόνα 4-3:	Αριστερά παρουσιάζεται σχηματικά η ορθογωνική κοπή, ενώ δεξιά η λοξή κοπή [13] .....	42
Εικόνα 4-4:	Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και βασικές έννοιες κοπής .....	44
Εικόνα 4-5:	Είδη μορφών αποβλίπτου .....	45
Εικόνα 4-6:	Γραφική κατανομή της σκληρότητας στο τεμάχιο, το απόβλιπτο και στη διαμορφωμένη ψευδόκοψη, λόγω της δημιουργίας συνεχούς αποβλίπτου με ψευδόκοψη [13].....	46
Εικόνα 4-7:	Το σύστημα δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιπτο [13].....	46
Εικόνα 4-8:	Κύκλος του Merchant [13] .....	47
Εικόνα 4-9:	Δυνάμεις στη γενική περίπτωση της λοξής κοπής .....	48
Εικόνα 4-10:	Παράδειγμα δυναμόμετρου με πιεζοκρύσταλλους.....	48
Εικόνα 4-11:	Φθορά κοπτικών εργαλείων από διάφορα υλικά κατά την κοπή CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) [16].....	49
Εικόνα 4-12:	Σχηματικό γράφημα με τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες μεταξύ κοπτικού-τεμαχίου-αποβλίπτου.....	50
Εικόνα 4-13:	Απίες αστοχίας του κοπτικού εργαλείου: 1) πεδίο φθοράς, 2) κρατήρας, 3) απολέπιση, 4) μικροθραύσεις, 5) μεγαλύτερης έκτασης θραύση της κόψης, 6) πλαστική παραμόρφωση ακής, 7) θερμά ρήγματα, 8) θραύση ακής, 9) αστοχία στελέχους [13].....	51



Εικόνα 4-14:	Χαρακτηριστικά μεγέθη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου [13].....	52
Εικόνα 4-15:	Διάγραμμα θερμότητας κοπής-συνολικής φθοράς κοπτικού εργαλείου, όπου εμφανίζεται η συμβολή των βασικών μηχανισμών φθοράς του κοπτικού εργαλείου [13].....	53
Εικόνα 4-16:	Ψύξη συστήματος κοπτικού-τεμχαιού αποβλίπτου μέσω της μεθόδου της πλημμύρας (Flooded cooling).....	55
Εικόνα 4-17:	Αριστερά παρουσιάζεται ένας συμβατικός τόννος, ενώ δεξιά ένα σύγχρονο CNC κέντρο κατεργασίας τόννευσης.....	56
Εικόνα 4-18:	Σχέδιο συμβατικού τόννου με τα βασικά μέρη του.....	56
Εικόνα 4-19:	Παράδειγμα προγράμματος γραμμένο σε κώδικα μηχανής (G-κώδικα).....	57
Εικόνα 4-20:	Χαρακτηριστικές γωνίες τοποθέτησης στην τόννευση [3].....	58
Εικόνα 5-1:	Κάθετη τομή κατεργασμένης επιφάνειας [1].....	59
Εικόνα 5-2:	Κατηγορίες αποκλίσεων νεοκατεργασμένης επιφάνειας [2].....	60
Εικόνα 5-3:	Μήκος υπολογισμού $L_n$ και μήκος αποκοπής $L_c$ .....	61
Εικόνα 5-4:	Διάγραμμα ψαροκόκκαλο με τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τελική τραχύτητα μίας κατεργασμένης επιφάνειας.....	63
Εικόνα 5-5:	Γραφικός υπολογισμός του $R_a$ και του $R_q$ .....	64
Εικόνα 5-6:	Γραφικός υπολογισμός του $R_t$ .....	64
Εικόνα 5-7:	Γραφικός υπολογισμός του $S_m$ .....	65
Εικόνα 5-8:	Ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο στυλίσκου.....	66
Εικόνα 6-1:	Πέλλετ υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE pellets).....	67
Εικόνα 6-2:	Δοχείο που περιέχει Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micron particles, S.A. 500 m2g της εταιρίας Alfa Aesar™.....	68
Εικόνα 6-3:	Ζυγός ακριβείας KERN KB 5000-1.....	68
Εικόνα 6-4:	Εκβολέας παραγωγής προφίλ του εργαστηρίου Κατεργασιών των υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.....	69
Εικόνα 6-5:	α) Χοάνη τροφοδοσίας εκβολέα (πάνω αριστερά), β) Κοχλίας εκβολέα (πάνω δεξιά), γ) Μήτρα εκβολής προφίλ (κάτω αριστερά), δ) Πίνακας ελέγχου εκβολέα (κάτω δεξιά).....	70
Εικόνα 6-6:	Δισκοτόμος Struers Discotom-2.....	70
Εικόνα 6-7:	Συμβατικός τόννος Fritz Kern K.G. D18L.....	71
Εικόνα 6-8:	Ο CNC τόννος HAAS TL-1 SL20.....	71
Εικόνα 6-9:	α) Το εσωτερικό του HAAS TL-1 SL20, β) Ο ο υπολογιστής μέσω του οποίου ελέγχεται ο HAAS TL-1 SL20.....	72
Εικόνα 6-10:	Μανέλλα με τοποθετημένο πλακίδιο κοπής.....	73
Εικόνα 6-11:	Δυναμόμετρο Kistler 9257A.....	74
Εικόνα 6-12:	Ενισχυτές δυναμόμετρου α) 5011B και β) 5006.....	74
Εικόνα 6-13:	Τραχύμετρο Taylor-Hobson Surtronic 3+.....	75
Εικόνα 6-14:	Αρχικό παράθυρο λειτουργίας του προγράμματος Minitab 17.....	76
Εικόνα 6-15:	Μέτρα ατομικής προστασίας.....	76
Εικόνα 7-1:	Γυάλινο σκεύος που χρησιμοποιήθηκε για ζύγιση και για την ανάμιξη του γραφένιου με το HDPE.....	77
Εικόνα 7-2:	Διαδικασία εκβολής σύνθετου υλικού (πάνω) και σύνθετο υλικό που έχει αφεθεί να έρθει σε θερμοκρασία δωματίου (κάτω).....	78
Εικόνα 7-3:	Στο πάνω μέρος παρουσιάζεται ένα δοκίμιο σύνθετου υλικού πριν τον καθαρισμό, ενώ στο κάτω μέρος εμφανίζεται μετά τον καθαρισμό και τη δημιουργία οπής στο ένα άκρο του.....	80
Εικόνα 7-4:	Πειραματική διάταξη για κατεργασία του δοκιμίου και μέτρηση των παραγόμενων δυνάμεων κατά την τόννευση.....	81
Εικόνα 7-5:	Κατεργασμένο δοκίμιο, με το πείραμα 13 στο δεξί άκρο και το πείραμα 14 στο αριστερό και με τα αντίστοιχα παραχθέντα απόβλιττα.....	82
Εικόνα 7-6:	Διαδικασία τραχυμέτρησης.....	82
Εικόνα 8-1:	Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραμέτρων της κοπής στην $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE.....	84



για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE..... 103

## **Πίνακες**

Πίνακας 4-1:	Ταξινόμηση κατεργασιών αφαίρεσης υλικού και κοπής .....	41
Πίνακας 4-2:	Υλικά κοπτικών εργαλείων .....	49
Πίνακας 6-1:	Τεχνικά χαρακτηριστικά του HAAS TL-1 SL20 .....	72
Πίνακας 6-2:	Χαρακτηριστικά του τραχυμέτρου Taylor-Hobson Surtronic 3+.....	75
Πίνακας 7-1:	Οι παράμετροι κοπής και τα επίπεδά τους, που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία .....	79
Πίνακας 7-2:	Πίνακας πειραμάτων Taguchi.....	79

## 1. Εισαγωγή

### 1.1. Αντικείμενο της εργασίας

Τα νανοσύνθετα υλικά εξελίσσονται ραγδαία τα τελευταία χρόνια, με αποτέλεσμα να υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής τους σε μη εργαστηριακό περιβάλλον. Αυτό συνεπάγεται την ανάγκη αύξησης της παραγωγής των νανοϋλικών, καθώς και της διερεύνησης των ιδιοτήτων τους σε μεγαλύτερο βάθος. Αν και τα σύνθετα υλικά εν γένει, συνεπώς και τα νανοσύνθετα, αποκτούν τις τελικές τους διαστάσεις κατά την αρχική διαδικασία μορφοποίησής τους, σε εφαρμογές υψηλής τεχνολογίας, όπως η αεροναυπηγική, απαιτούνται μεγαλύτερης ακρίβειας διαστάσεις και ανοχές. Αυτές επιτυγχάνονται μέσω της κατεργασίας των σύνθετων υλικών σε εργαλειομηχανές. Σε αυτό το σημείο, εντοπίζεται το κενό γνώσεων ως προς τις βέλτιστες συνθήκες κοπής των νανοσύνθετων υλικών, τις οποίες αυτή η διπλωματική πραγματεύεται.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει στόχο τη διερεύνηση της κατεργασιμότητας σύνθετων υλικών μήτρας πολυαιθυλενίου ενισχυμένων με νανοδομές γραφενίου, μέσω τόννευσης. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού χρησιμοποιήθηκε η εργαλειομηχανή HAAS TL-1 SL20. Για τη μέτρηση των δυνάμεων κοπής χρησιμοποιήθηκε το δυναμόμετρο τριών αξόνων 9257A της εταιρίας Kistler, ενώ η τραχυμέτρηση των κατεργασμένων επιφανειών διεξήχθη με χρήση του τραχύμετρου τύπου στυλίσκου Surtronic 3+ της εταιρίας Taylor-Hobson. Τέλος, με χρήση κατάλληλου προγράμματος, πραγματοποιήθηκε πολυπαραμετρική ανάλυση για την εξαγωγή αποτελεσμάτων.

### 1.2. Δομή της εργασίας

Στο κεφάλαιο 1 «Εισαγωγή», πραγματοποιείται μία γενική αναφορά στην κατεργασία τόννευσης και στις κατεργασίες σύνθετων υλικών. Επίσης αναφέρεται ο στόχος και η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε, καθώς και η δομή της εργασίας.

Στο κεφάλαιο 2 «Νανοσύνθετα υλικά και νανοτεχνολογία», παρουσιάζεται μία γενική εμποπτεία των νανοσύνθετων υλικών, καθώς και των δύο κύριων μέσων ενίσχυσης από γραφίτη, των νανοδομών γραφενίου και των νανοσωλήνων άνθρακα.

Στο κεφάλαιο 3 «Εκβολή», παρουσιάζονται τα βασικά μέρη ενός εκβολέα με έμφαση στον κοχλία, καθώς και κάποια είδη εκβολής πολυμερών.

Στο κεφάλαιο 4 «Κατεργασία κοπής», παρουσιάζεται γενικά η μηχανική της κοπής, το κοπτικό εργαλείο, καθώς και πιο αναλυτικά η διαδικασία της τόννευσης.

Στο κεφάλαιο 5 «Τραχύτητα», πραγματοποιείται εισαγωγή στην έννοια της τραχύτητας, ενώ παρατίθενται μερικές βασικές παράμετροι και αναλύεται ο τρόπος μέτρησης της τραχύτητας μίας επιφάνειας.

Στο κεφάλαιο 6 «Πειραματικός εξοπλισμός», παρουσιάζεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση του πειραματικού μέρους της εργασίας, περιγράφονται δηλαδή τα χρησιμοποιούμενα υλικά, οι μηχανές παραγωγής των δοκιμών και ο βοηθητικός εξοπλισμός, τα κέντρα κατεργασίας, τα μετρητικά όργανα και το λογισμικό επεξεργασίας των δεδομένων.

Στο κεφάλαιο 7 «Πειραματική διαδικασία», αναλύεται η πειραματική διαδικασία και τα βήματα που ακολουθήθηκαν για την παραγωγή, την επεξεργασία και την κατεργασία των δοκιμών, καθώς και για την καταγραφή των πειραματικών δεδομένων.

Στο κεφάλαιο 8 «Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας», παραθέτονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης των πειραματικών δοκιμών, με μορφή πινάκων και διαγραμμάτων, τα οποία και αναλύονται διεξοδικά.

Στο κεφάλαιο 9 «Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα», γίνεται αναφορά στα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία και την ανάλυσή της. Ακόμα, προτείνονται ιδέες για περαιτέρω διερεύνηση του θέματος.

## 2. Νανοσύνθετα υλικά και νανοτεχνολογία

### 2.1. Γενικά

Νανοτεχνολογία είναι το κομμάτι της επιστήμης στο οποίο πραγματοποιείται διαχείριση της ύλης σε ατομικό, μοριακό και υπερομοριακό επίπεδο. Παρόλα αυτά, ο όρος νανοτεχνολογία, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε από τον Norio Taniguchi [23] το 1974, αναφέρεται στο σχεδιασμό και την κατασκευή συσκευών, συστημάτων και υλικών επιπέδου 1 έως 100 νανόμετρων. Όμως, ο πρώτος που μίλησε για τη νανοτεχνολογία ήταν ο φυσικός Richard P. Feynman, στην ομιλία που έδωσε κατά την ετήσια συγκέντρωση της Αμερικανικής Ένωσης Φυσικών στις 29 Δεκεμβρίου 1959, με τίτλο «Υπάρχει πολύς χώρος στον πυθμένα» (“There’s Plenty of Room at the Bottom”) [24]. Ο Feynman πρότεινε να χρησιμοποιηθούν μηχανικά εργαλεία ώστε να κατασκευαστούν μικρότερα εργαλεία, τα οποία θα κατασκεύαζαν μικρότερα και η διαδικασία θα συνεχιζόταν μέχρι την κατασκευή εργαλείων ατομικής κλίμακας, δημιουργώντας έτσι μία πυραμίδα, με κορυφή τα εργαλεία νανοκλίμακας.

Από τότε, οι επιστημονικές εξελίξεις έχουν ως αποτέλεσμα την εφαρμογή της νανοτεχνολογίας σε επιστήμες όπως η χημεία, η βιολογία, η βιοϊατρική, η ηλεκτρονική, η επιστήμη των υλικών και άλλες. Συνεπώς, λόγω των πολλών εφαρμογών που βρίσκει η νανοτεχνολογία, τα τελευταία χρόνια έχουν επενδυθεί ανά τον κόσμο μεγάλα χρηματικά ποσά σε προγράμματα ερευνών και πιστεύεται ότι θα αποτελέσει την αιχμή του δόρατος στην επόμενη βιομηχανική επανάσταση.

Ως νανοϋλικά περιγράφονται τα υλικά των οποίων μία μονάδα έχει τουλάχιστον τη μία διάστασή της από 1 έως 1000 νανόμετρα, παρόλο που συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1 και 100 νανόμετρων. Δυο πολύ σημαντικές ανακαλύψεις για την πορεία των νανοϋλικών είναι των φουλερενίων ( $C_{60}$ ), τα οποία ανακαλύφθηκαν το 1985 από τους Kroto H.W., Heath J.R. O’Brien S.C., Curl R.F. και Smalley R.E. [25] και των νανοσωλήνων άνθρακα (CNTs), οι οποίοι θα αναλυθούν σε παρακάτω. Ακόμα, αναπτύχθηκαν εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε ατομικές διεργασίες, όπως το STM-Scanning Tunneling Microscope (Μικροσκοπία σήραγγος) και το AFM-Atomic Force Microscope (Μικροσκόπιο ατομικής δύναμης), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την απεικόνιση, καθώς και τη χειραγώγηση μεμονωμένων ατόμων. Τέλος, εργαλεία όπως τα παραπάνω, τα οποία λέγονται και νανοεργαλεία, βρίσκουν εφαρμογές στη λιθογραφία, στη χημική εναπόθεση ατμών (CVD) και αλλού [26].

### 2.2. Νανοσύνθετα υλικά

Τα νανοσύνθετα υλικά ή απλά νανοσύνθετα αποτελούνται από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά, εκ των οποίων ένα από αυτά έχει μία, δύο ή και τις τρεις διαστάσεις του μικρότερες από 100 νανόμετρα (nm). Συνήθως, στα νανοσύνθετα συγκαταλέγονται σύνθετα υλικά τα οποία έχουν μήτρα από πολυμερές, μεταλλικό ή κεραμικό υλικό και το μέσο ενίσχυσης είναι κάποιο έγκλεισμα το οποίο πληροί τις προϋποθέσεις του νανοϋλικού. Τα εγκλείσματα αυτά ποικίλουν μορφολογικά, διότι μπορούν να βρίσκονται σε μορφή κόκκου (μηδενική διάσταση-0D), σε μορφή νανοσωλήνων (μία διάσταση-1D), σε μορφή λεπτών υμενίων (δύο διαστάσεις-2D) ή σε μορφή συμπολημερών και πολυστρωματικών δομών (τριών διαστάσεων-3D). Αυτά τα εγκλείσματα, ακόμα και αν περιέχονται σε πολύ μικρό ποσοστό εντός της μήτρας του νανοσύνθετου υλικού, του προσδίδουν πολύ καλές ιδιότητες, οι οποίες πέραν από τις ιδιότητες του ίδιου του μέσου ενίσχυσης, οφείλονται και στην άπειρη διεπιφάνεια μεταξύ αυτών και της μήτρας.

Λόγω των παραπάνω ιδιοτήτων, τα νανοσύνθετα υλικά παρουσιάζουν ένα εύρος πλεονεκτημάτων συγκριτικά με τα απλά σύνθετα. Μερικά από τα πλεονεκτήματα παρατίθενται παρακάτω:

- Εμφανίζουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες.
- Έχουν πάρα πολύ υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.

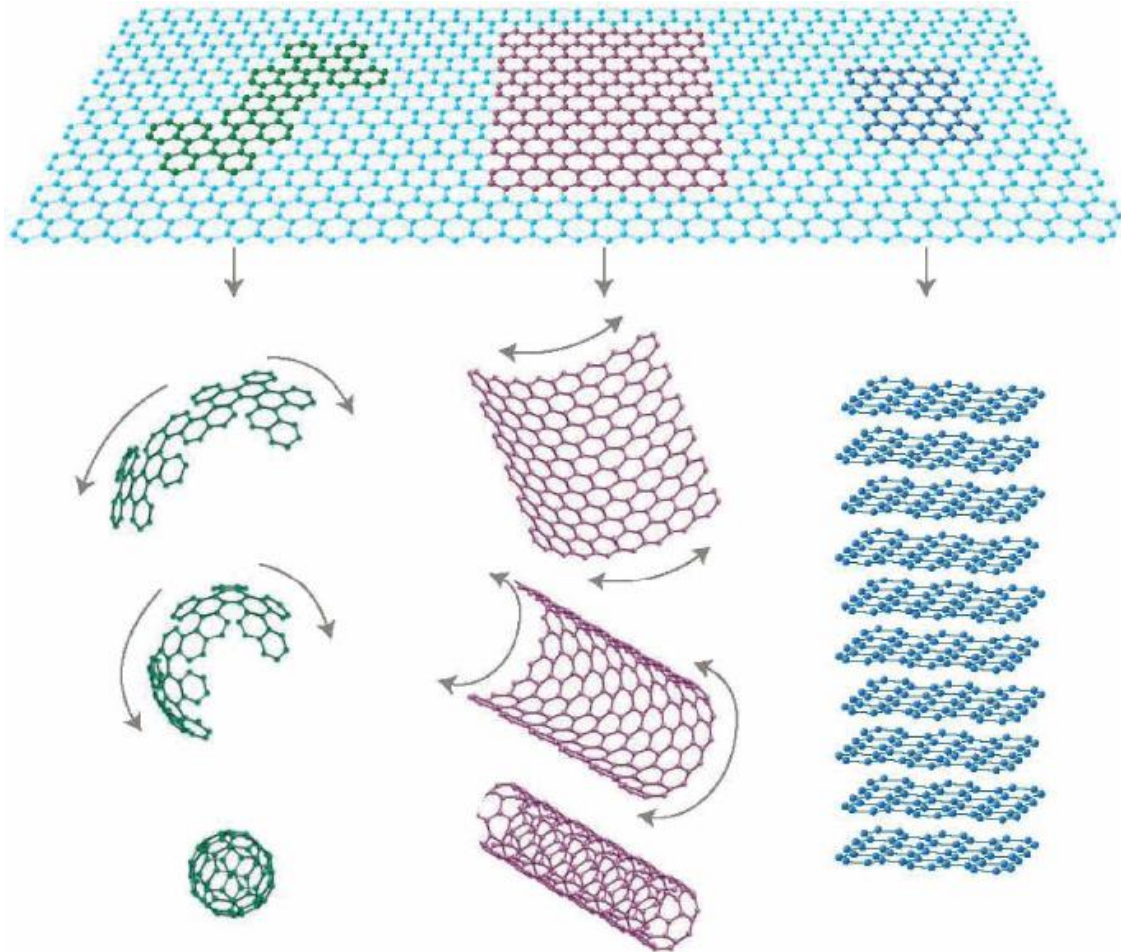
- Παρουσιάζουν θερμική σταθερότητα.
- Διαθέτουν χαμηλή πυκνότητα, άρα και υψηλές ειδικές ιδιότητες.
- Δεν καίγονται εύκολα.
- Η αντοχή τους σε χημικό περιβάλλον είναι σχετικά υψηλή.

Ωστόσο, παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα, παρουσιάζουν ένα σημαντικό μειονέκτημα. Αυτό είναι η δυσκολία στη διασπορά του ενισχυτικού μέσου εντός της μήτρας. Τα εγκλείσματα έλκονται μεταξύ τους με δυνάμεις Van der Waals, με συνέπεια να δημιουργούνται συσσωματώματα κατά τη διαδικασία της ανάμιξής τους με τη μήτρα. Επομένως, το νανοσύνθετο υλικό για να αποδώσει τα βέλτιστα, είναι αναγκαίο να χαρακτηρίζεται από ένα ποσοστό ομοιογένειας, το οποίο όμως επιτυγχάνεται δύσκολα, καθώς οι διαδικασίες ομογενοποίησης που ακολουθούνται είναι αρκετά δαπανηρές και χρονοβόρες [27], [28], [29].

Λόγω των πολύ καλών ιδιοτήτων τους, τα νανοϋλικά και τα νανοσύνθετα υλικά έχουν ήδη βρει εφαρμογές κυρίως σε εργαστηριακό επίπεδο, αλλά όσο περνάει ο καιρός ανοίγει και η βιομηχανική οδός. Αρχικά, οι μηχανικές τους ιδιότητες, ιδίως η αντοχή σε εφελκυσμό και σε διάτμηση σε συνδυασμό με το μικρό τους βάρος, τα εντάσσουν στην αυτοκινητοβιομηχανία, ως υλικά κατασκευής του αμαξώματος. Επίσης, νανοϋλικά ως προσμίξεις χρησιμοποιούνται και στις βαφές των αυτοκινήτων, αλλά και στην παραγωγή καυσίμων αυτοκίνησης, καθώς προσφέρουν οικονομικότερη μετακίνηση με λιγότερους ρύπους. Επιπλέον, επειδή τα νανοσύνθετα δεν είναι ιδιαίτερα εύφλεκτα μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μονωτικά υλικά, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τοξικό περιβάλλον λόγω της χημικής τους σταθερότητας. Τέλος, ένας ακόμα τομέας που χρησιμοποιεί νανοϋλικά είναι αυτός της κοσμετολογίας. Έχουν ήδη παρασκευασθεί αντιηλιακά με νανοσφαιρίδια γυαλιού για αποτελεσματικότερη προστασία από την UV ακτινοβολία, αντιγηραντικές κρέμες και άλλα.

### 2.3. Γραφένιο

Το γραφένιο (graphene) είναι μία αλλοτροπική μορφή του άνθρακα, αποτελούμενη από ένα μόνο στρώμα ατόμων άνθρακα διατεταγμένων σε εξαγωνικό πλέγμα (ή κυψελοειδές πλέγμα), όπως φαίνεται στην εικόνα 2-1. Το πάχος του δισδιάστατου πλέγματος του γραφενίου κυμαίνεται μεταξύ 0,33 έως 1,6 νανόμετρα, όπως έχει περιγραφεί μετά από πειραματικές μελέτες αρκετών ερευνητικών ομάδων [30], [31], [32] και αποτελεί επί της ουσίας το δομικό στοιχείο αρκετών αλλοτροπικών μορφών του άνθρακα όπως ο γραφίτης, το διαμάντι, αλλά και νανοδομές άνθρακα όπως οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes-CNTs), το πολυστρωματικό γραφένιο (graphene nanoplatelets-GNPs) και τα φουλερένια (fullerenes), οι οποίες και παρουσιάζονται στην εικόνα 1.



Εικόνα 2-1: Δισδιάστατη δομή γραφενίου (πάνω), η οποία μπορεί να μετατραπεί σε φουλερένιο (κατω αριστερά), νανοσωλήνα άνθρακα (κάτω κέντρο) και πολυστρωματικό γραφένιο (κάτω δεξιά)

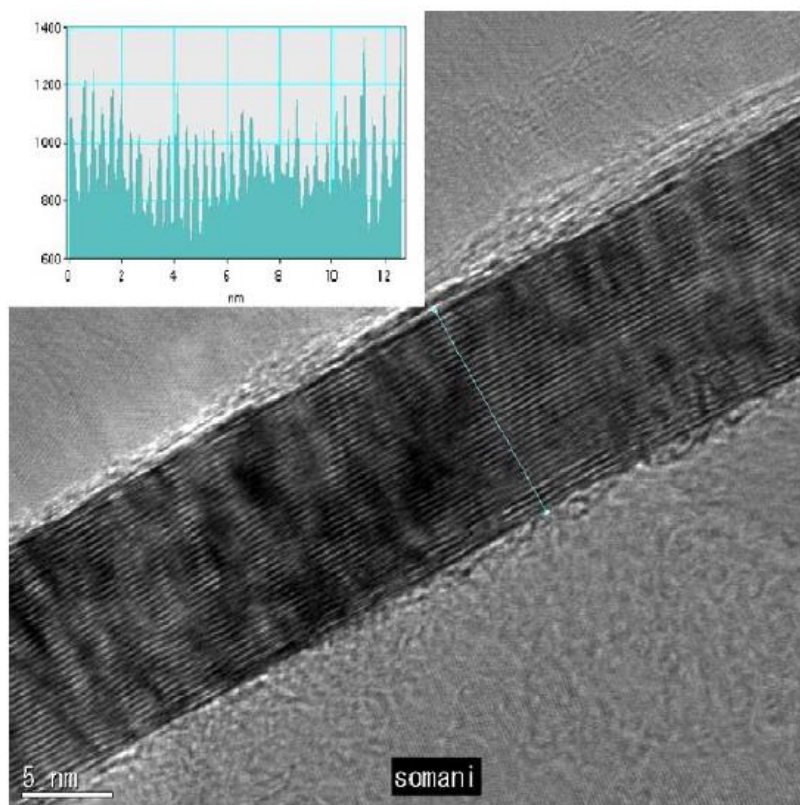
Οι πρώτες προσπάθειες για παραγωγή γραφενίου μέσω μηχανικής απόσχισης πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του 1990, αλλά μόλις το 2004 επετεύχθη η απομόνωση μίας στρώσης γραφενίου, από τους Andre K. Geim και Konstantin S. Novoselov στο Πανεπιστήμιο του Μάντσεστερ. Οι δύο επιστήμονες χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του μικρομηχανικού σχισμού (scotch tape method) [33], κατάφεραν να απομονώσουν μία στρώση γραφενίου και να κερδίσουν το Νόμπελ Φυσικής το 2010.

Το γραφένιο αποτελεί έναν ημιαγωγό μηδενικού χάσματος, γεγονός που του προσδίδει πολύ καλές ηλεκτρικές ιδιότητες, καθώς σε θερμοκρασία δωματίου η ηλεκτρική του αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) είναι περίπου  $15000 \text{ cm}^2 * \text{V}^{-1} * \text{s}^{-1}$ , ενώ η ηλεκτρική του αντίσταση ( $\rho$ ) είναι περίπου  $10^{-6} \Omega * \text{cm}$  (μικρότερη και από του ασημιού, που μέχρι πρότινος θεωρούταν η μικρότερη αντίσταση σε θερμοκρασία δωματίου). Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα ( $k$ ) του γραφενίου αν και αρχικά μετρήθηκε σε  $5300 \text{ W} * \text{m}^{-1} * \text{K}^{-1}$  [34], από επόμενες έρευνες διαπιστώθηκε πως είναι περίπου  $2500\text{-}1500 \text{ W} * \text{m}^{-1} * \text{K}^{-1}$  [35], ενώ το σημείο τήξης του ( $T_m$ ) αγγίζει τους  $4510 \text{ K}$  [36], γεγονός που το κατατάσσει ως το υλικό με το μεγαλύτερο σημείο τήξης. Επιπρόσθετα, αξιοσημείωτες είναι και οι μηχανικές ιδιότητες του γραφενίου, καθώς έχοντας αντοχή σε εφελκυσμό ( $\sigma_U$ ) ίση με  $130,5 \text{ GPa}$  και μέτρο ελαστικότητας ίσο με  $1 \text{ TPa}$  [37], αποτελεί το πλέον ισχυρό υλικό που έχει ποτέ εξεταστεί. Παρόλα αυτά, η δυσθραυστότητα (fracture toughness) του γραφενίου, η οποία είναι  $4 \text{ MPa} * \sqrt{\text{m}}$  και ο τρόπος θραύσης του, που είναι ψαθυρός θυμίζουν τη συμπεριφορά των κεραμικών [38].



Αν και το μονοστρωματικό γραφένιο που περιγράφηκε παραπάνω έχει έναν εντυπωσιακό συνδυασμό ιδιοτήτων, ακόμα παραμένει δύσκολο στην παραγωγή, ειδικά για βιομηχανική χρήση, συνεπώς και ακριβό. Το πολυστρωματικό γραφένιο (GNPs), το οποίο αποτελείται από 2 ή και παραπάνω στρώματα γραφενίου, διατηρεί αρκετές από τις ιδιότητες του μονοστρωματικού, όπως το μέτρο ελαστικότητας, η θερμική αγωγιμότητα και η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για να παρασκευαστεί πολυστρωματικό γραφένιο αρκετοί τρόποι έχουν προταθεί και κάποιοι από αυτούς χρησιμοποιούνται πλέον πιο συστηματικά, με τους κύριους εκπροσώπους να είναι:

- Η χημική εναπόθεση αερίου (Chemical Vapor Deposition-CVD) αποτελεί σχετικά καινούρια μέθοδο, καθώς πρώτη φορά το 2006 ο Somanι και οι συνεργάτες του κατάφεραν να παράξουν λίγα στρώματα γραφενίου (20), χρησιμοποιώντας ελάσματα νικελίου και καμφορά ως πηγή άνθρακα [39], απεικόνιση του οποίου μέσω TEM παρουσιάζεται στην εικόνα 2-2. Η μέθοδος CVD είναι η καταλληλότερη για την παραγωγή πολυστρωματικού γραφενίου με σχετικά χαμηλό κόστος, συνεπώς είναι λογική η συνεχόμενη βελτίωση της μεθόδου και ο πειραματισμός με διάφορα υποστρώματα, όπως κοβάλτιο (Co), νικέλιο (Ni), χαλκός (Cu), ρουθίνιο (Ru) και άλλα [40].
- Η μηχανική αποφλοίωση (Mechanical exfoliation), η οποία είναι η πρώτη μέθοδος παρασκευής γραφενίου, όπως προαναφέρθηκε. Αν και η απόδοση της μεθόδου θεωρούνταν μικρή μέχρι πρότινος, πρόσφατες εξελίξεις έδειξαν ότι μπορούν να παραχθούν μεγάλες ποσότητες πολυστρωματικού γραφενίου λίγων στρωμάτων και χωρίς ατέλειες [41].

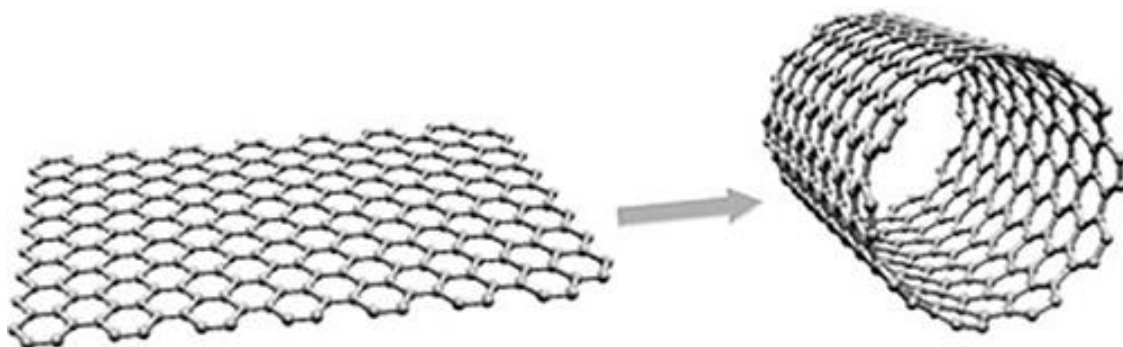


Εικόνα 2-2: Πολυστρωματικό γραφένιο σχηματισμένο μέσω της διαδικασίας CVD [39]

Συνεπώς, όσο η παραγωγή του γραφενίου –μονοστρωματικού ή πολυστρωματικού– πραγματοποιείται πιο μαζικά, αλλά και με μικρότερο κόστος, διευκολύνεται και η χρήση του σε περισσότερες εφαρμογές. Στην ιατρική και στη φαρμακευτική επιστήμη βρίσκει εφαρμογή σε βιοαισθητήρες κατά του καρκίνου, στη μεταφορά φαρμάκων στο ακριβές σημείο όπου είναι απαραίτητα και στην υποβοήθηση δημιουργίας οστικής μάζας (bone

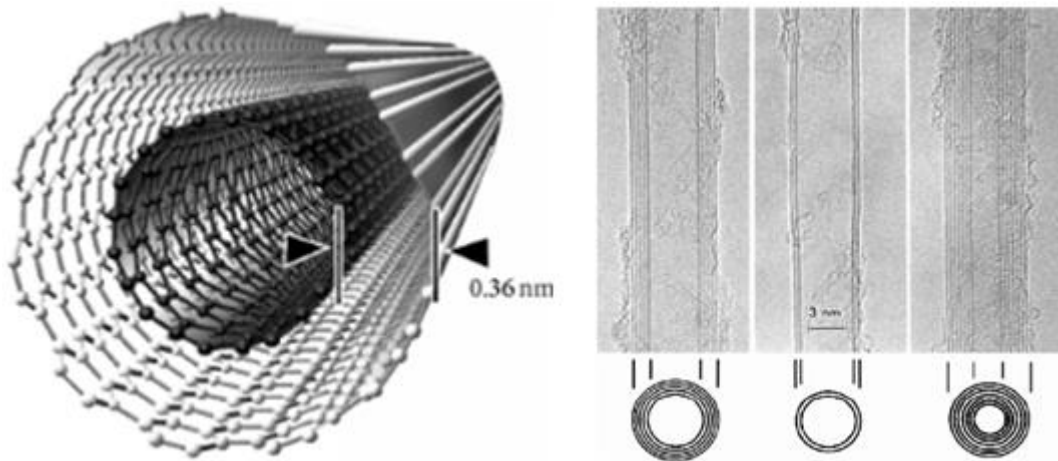
tissue engineering). Παρόλα αυτά, έχουν γίνει πολλές έρευνες για το αν το γραφένιο αποτελεί τοξική ουσία για τον ανθρώπινο οργανισμό, με τα αποτελέσματα να εξαρτώνται τελικά από παράγοντες όπως το μέγεθος, το σχήμα, η καθαρότητα του γραφενίου και άλλους. Επίσης, πολύ σημαντική θεωρείται η δυνατότητα εφαρμογής του γραφενίου στην παραγωγή τρανζίστορ και πυκνωτών με μεγαλύτερες δυνατότητες και μικρότερο μέγεθος. Παράλληλα μπαταρίες με πολύ μεγαλύτερη χωρητικότητα και αντοχή έχουν ήδη κατασκευασθεί με τη χρήση γραφενίου. Ακόμα, ένα πεδίο με πρόσφορο έδαφος για εφαρμογή του γραφενίου, είναι αυτό των αισθητήρων αερίων, καθώς το γραφένιο λόγω της υψηλής και ευμετάβλητης αγωγιμότητάς του, ικανότητα την οποία μελέτησαν πρώτοι Schedin F. και οι συνεργάτες του [42]. Τέλος, εκτός των νανοσύνθετων δομικών υλικών, το γραφένιο χρησιμοποιείται σε λιπαντικά και ψυκτικά, λόγω των πολύ καλών μηχανικών και θερμικών ιδιοτήτων του.

## 2.4. Νανοσωλήνες άνθρακα



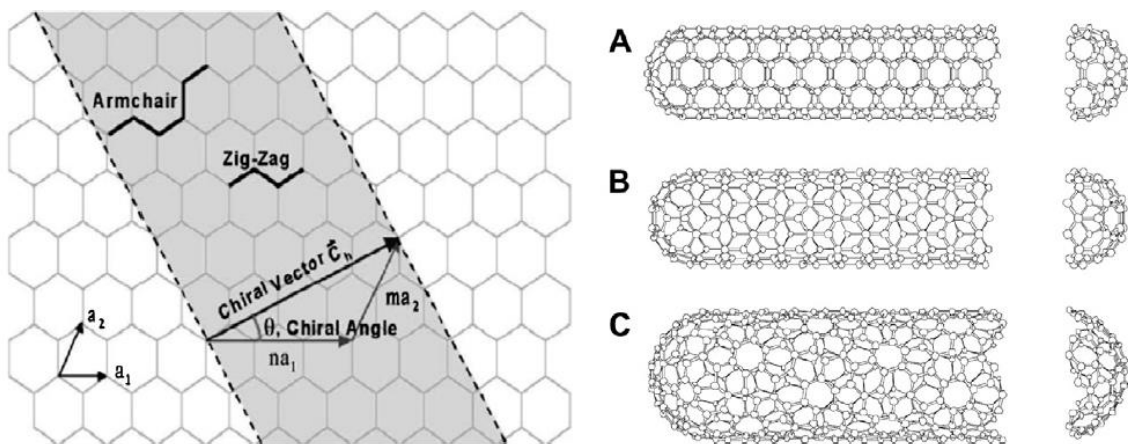
Εικόνα 2-3: Νανοσωλήνας άνθρακα μονού τοιχώματος (SWCNT)

Οι νανοσωλήνες άνθρακα δομούνται από ένα μονοδιάστατο πλέγμα ατόμων άνθρακα και είναι ομόκεντροι κύλινδροι με λόγο διαστάσεων (aspect ratio) άνω του 1000. Ο βασικός διαχωρισμός τους γίνεται σε μονοφλοιϊκούς (Single Walled Carbon Nanotubes-SWCNTs) και πολυφλοιϊκούς (Multi Walled Carbon Nanotubes-MWCNTs). Πρώτοι ανακαλύφθηκαν οι πολυφλοιϊκοί το 1991 από τον Iijima [43] και έπειτα από δύο χρόνια ανακαλύφθηκαν και οι μονοφλοιϊκοί από τον Iijima σε συνεργασία με τον Ichihashi [44]. Οι μονοφλοιϊκοί νανοσωλήνες άνθρακα, όπως αυτός στην εικόνα 2-3, αποτελούνται από ένα πλέγμα γραφίτη τυλιγμένο σε κύλινδρο, με διάμετρο διατομής ένα νανόμετρο (1 nm) περίπου. Οι πολυφλοιϊκοί, παράδειγμα των οποίων παρατίθεται στην εικόνα 2-4, συνθέτονται από δύο ή περισσότερα ομόκεντρα κυλινδρικά στρώματα γραφίτη που συγκρατούνται με δυνάμεις van der Waals, γύρω από ένα κεντρικό κοίλο πυρήνα και η ενδοστρωματική απόσταση τους είναι περίπου ίση με το πάχος ενός γραφιτικού επιπέδου (0,36 nm).



Εικόνα 2-4: Δομή νανοσωλήνων άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος (MWCNT) στα αριστερά, ενώ στα δεξιά φαίνονται μέσω TEM νανοσωλήνες άνθρακα πολλαπλού τοιχώματος με 5, 2 και 7 τοιχώματα [45]

Ο τρόπος τύλιξης του πλέγματος του γραφίτη διαχωρίζει τους νανοκυλίνδρους άνθρακα σε τρεις κατηγορίες: α) armchair, β) zigzag και γ) chiral, οι οποίες εμφανίζονται στην εικόνα 2-5. Ο τρόπος με τον οποίο τυλίγεται το πλέγμα περιγράφεται από το διάνυσμα  $\vec{C}_h = n * \vec{a}_1 + m * \vec{a}_2$  (chiral vector), όπου οι δείκτες  $n$  και  $m$  είναι ακέραιοι αριθμοί και περιγράφουν τον αριθμό βημάτων κατά μήκος των μοναδιαίων διανυσμάτων  $\vec{a}_1$  και  $\vec{a}_2$  του εξαγωνικού πλέγματος. Εάν  $n=m$  και  $\theta=30^\circ$ , η διάταξη των νανοσωλήνων ορίζεται ως armchair, ενώ εάν  $m=0$  και  $\theta=30^\circ$  η διάταξη ορίζεται ως zigzag. Σε περίπτωση αντίθετη από τις προαναφερθείσες, η διάταξη ορίζεται ως chiral.



Εικόνα 2-5: Σχηματική περιγραφή του τρόπου περιτύλιξης του πλέγματος του γραφενίου για το σχηματισμό νανοσωλήνων άνθρακα στα αριστερά. Στα δεξιά φαίνονται νανοσωλήνες σε διάταξη A) armchair, B) zigzag και C) chiral [45]

Οι μηχανικές, θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες που διαθέτουν οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι εξαιρετικές και επιτρέπουν τη χρήση τους σε πληθώρα εφαρμογών. Αρχικά, το μέτρο ελαστικότητας των MWCNTs είναι περίπου ίσο με 1TPa [46], ενώ το όριο θραύσης αγγίζει τα 500GPa. Παράλληλα, έχοντας πολύ μικρή πυκνότητα 1,1-1,4g/cm<sup>3</sup>, η ειδική τους αντοχή σε εφελκυσμό φτάνει τα 48500Nm/kg. Ακόμα, ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι ηλεκτρικές ιδιότητές τους, καθότι όταν ο νανοσωλήνας έχει δομή armchair λειτουργεί ως τέλειος αγωγός του ηλεκτρισμού, ενώ σε οποιαδήποτε άλλη μορφή λειτουργεί ως ημιαγωγός. Επίσης, η θερμική αγωγιμότητα των νανοσωλήνων άνθρακα είναι αξιοσημείωτη, καθώς στην αξονική διεύθυνση

παρουσιάζουν αγωγιμότητα  $3500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [47], ενώ στην κάθετη στην αξονική διεύθυνση η αγωγιμότητά τους είναι  $1,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  [48].

Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί για τη σύνθεση των νανοσωλήνων άνθρακα είναι αρκετές, μα οι πιο βασικές είναι οι τρεις που αναφέρονται παρακάτω:

- Η ηλεκτρική εκκένωση (arc discharge method), η οποία χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά από τον Iijima [43] και συνίσταται από δύο ράβδους γραφίτη, που απέχουν μεταξύ τους 1mm και λειτουργούν ως ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου. Με εφαρμογή κατάλληλων συνθηκών πραγματοποιείται ηλεκτρική εκκένωση και τελικά παραγωγή SWCNTs εάν χρησιμοποιηθεί κατάλληλο μέταλλο στην άνοδο, ή MWCNTs εάν δε χρησιμοποιηθεί.
- Η μέθοδος εξάχνωσης με δέσμη Laser (laser ablation method), κατά την οποία ο γραφίτης τοποθετείται εντός σωλήνα χαλαζία, ο οποίος με τη σειρά του περιβάλεται από κλίβανο, που θερμαίνεται στους 800-1000 °C. Ο γραφίτης στοχεύεται από δέσμη Laser, ενώ αέριο αργό μεταφέρει το παραγόμενο προϊόν σε υδρόψυκτο συλλέκτη χαλκού. Η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει νανοσωλήνες υψηλής καθαρότητας και μικρής διασποράς, αλλά το κόστος της είναι ιδιαίτερα υψηλό.
- Η χημική εναπόθεση αερίων (chemical vapor deposition, CVD), όπου μεταλλικοί καταλύτες θερμαίνονται σε θερμοκρασίες μεταξύ 300 °C και 1000 °C και από τους οποίους πραγματοποιείται ροή αερίων υδρογονανθράκων. Κατά αυτό τον τρόπο, τα μόρια του υδρογονάνθρακα διαχωρίζονται και ατμοποιούνται τα άτομα του άνθρακα, τα οποία στη συνέχεια καθιζάνουν στην επιφάνεια του υποστρώματος των οξειδίων μετάλλων, γεγονός που οδηγεί στο σχηματισμό νανοσωλήνων άνθρακα. Η μέθοδος χρησιμοποιείται για την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων νανοσωλήνων, αν και μειονεκτεί στο ότι παράγονται ταυτόχρονα μονοφλοιικοί και πολυφλοιικοί νανοσωλήνες άνθρακα.

Λόγω των ιδιοτήτων που διαθέτουν οι νανοσωλήνες άνθρακα, οι οποίες και περιγράφηκαν παραπάνω, οι χρήσεις τους αγγίζουν ένα ευρύ φάσμα πεδίων, όπως τα σύνθετα υλικά, η μικροηλεκτρονική και η ηλεκτρονική, η αποθήκευση ενέργειας, τα φωτοβολταϊκά πάνελ και αλλού. Ακόμα, σύνθετα υλικά με CNTs χρησιμοποιούνται στην αυτοκινητοβιομηχανία, αξιοποιώντας τις μηχανικές ιδιότητες του μέσου ενίσχυσης. Ακόμα, οι νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση σε ηλεκτρικά αγωγίμα πολυμερή, αυξάνοντας την ηλεκτρική αγωγιμότητα του τελικού σύνθετου υλικού. Τέλος, νανοσωλήνες άνθρακα χρησιμοποιούνται σε αισθητήρες αερίων, ηλεκτροχημικούς αισθητήρες και βιοαισθητήρες.

### 3. Εκβολή πολυμερούς

#### 3.1. Γενικά

Η εκβολή πολυμερούς αποτελεί μία διαδικασία παραγωγής ή μορφοποίησης συνεχούς έργου, όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ([Κεφάλαιο 2](#)). Η παραγωγική διαδικασία ξεκινά τροφοδοτώντας τον εκβολέα, μέσω της χοάνης τροφοδοσίας, με την πρώτη ύλη η οποία βρίσκεται σε μορφή σκόνης, νιφάδων ή pellet. Το αρχικό υλικό αλλάζει μορφή και ρευστοποιείται, μέσω της μηχανικής ενέργειας που παράγεται από τον περιστρεφόμενο κοχλία μεταφοράς του υλικού εντός του εκβολέα, καθώς και από τη θερμότητα που παράγεται από τα στοιχεία θέρμανσης, τα οποία είναι τοποθετημένα κατά μήκος του συστήματος εκβολής. Στη συνέχεια, η ρευστοποιημένη πρώτη ύλη προωθείται μέσα από μία μήτρα μορφοποίησης και από την οποία εξέρχεται το τελικό προϊόν στο επιθυμητό σχήμα. Τέλος, το παραγόμενο προϊόν είτε θα αφηθεί να κρυσώσει σε ηρεμία σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είτε με τεχνητό τρόπο θα επιταχυνθεί η διαδικασία ψύξης μέσω λουτρών.

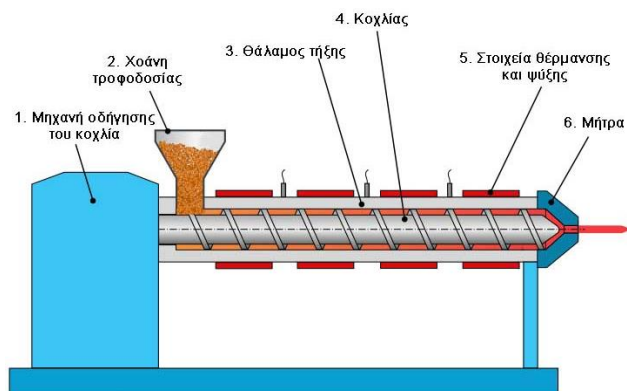
Κάνοντας μία ιστορική αναδρομή, ο πρώτος πρόδρομος των σύγχρονων εκβολέων δημιουργήθηκε στις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα, όπου ο Thomas Hancock εφηύρε ένα είδος εκβολέα, ο οποίος είχε τη δυνατότητα να αναμορφώνει λαστιχένια άχρηστα κομμάτια (απόβλητα). Στη συνέχεια, η πρώτη εκβολή θερμοπλαστικών υλών πραγματοποιήθηκε από τους Paul Troester και Ashley Gershoff στο Αμβούργο, στη Γερμανία. Αρκετά σύντομα, ο Ιταλός Roberto Colombo δημιούργησε τον πρώτο εκβολέα διπλού κοχλία.

Μέσω της παραγωγικής διαδικασίας της εκβολής λαμβάνονται μορφές συνεχούς μήκους και συγκεκριμένης διατομής, όπως ράβδοι, σωλήνες, ίνες, φύλλα, καθώς και προϊόντα μεγάλου μήκους με μεγάλη ποικιλομορφία διατομών. Επίσης, η εκβολή εκτός από μέθοδο μορφοποίησης, μπορεί να αποτελέσει και τρόπο ανάμιξης ή/και πλαστικοποίησης. Ακόμα, είναι βασικό το σύστημα εκβολής να τροφοδοτείται συνεχώς με πρώτη ύλη, καθώς όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, παράγεται συνεχούς μήκους προϊόν. Επιπλέον, βασική προϋπόθεση για την ομαλή λειτουργία του εκβολέα, αποτελεί η ικανότητα σταθερής ροής του παραγόμενου υλικού, στις συνθήκες πίεσης που επικρατούν εντός του συστήματος εκβολής.

#### 3.2. Εκβολέας

Τα βασικά τμήματα από τα οποία απαρτίζεται ένας εκβολέας, τα οποία παρουσιάζονται και στην [εικόνα 3-1](#) είναι:

1. Η χοάνη τροφοδοσίας
2. Η μηχανή οδήγησης του κοχλία
3. Ο θάλαμος τήξης
4. Ο κοχλίας
5. Τα στοιχεία θέρμανσης και ψύξης
6. Η μήτρα

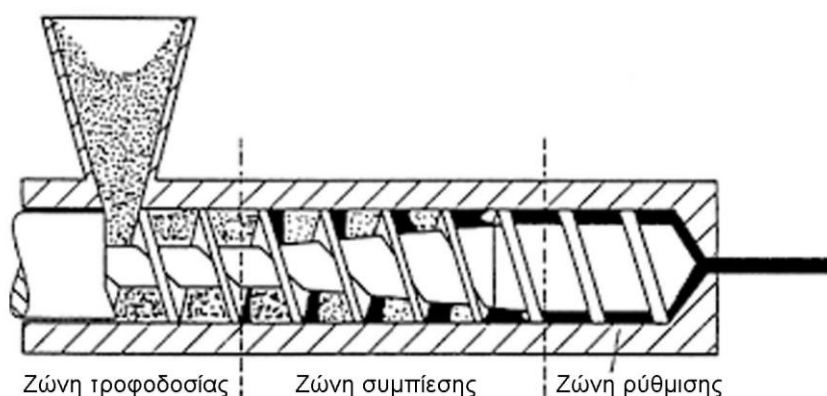


Εικόνα 3-1: Τα βασικά μέρη ενός εκβολέα

Από τα βασικά τμήματα ενός εκβολέα, οι αλλαγές των οποίων μπορούν να επιφέρουν μεγαλύτερες μεταβολές στη διαδικασία παραγωγής και στο τελικό αποτέλεσμα, είναι η αλλαγή της μήτρας εκβολής και η αλλαγή της κοχλίωσης. Οι διάφοροι τύποι της μήτρας περιγράφονται αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο, καθώς η όποια αλλαγή στον τύπο της μήτρας επιφέρει αλλαγή και στην περαιτέρω κατεργασία του παραγόμενου τεμαχίου. Ομοίως, οι αλλαγές στο σύστημα κοχλίωσης επιφέρουν αλλαγές στο τελικό προϊόν, αλλά αυτές δεν παρατηρούνται μόνο στη μορφολογία του, αλλά και στα ποιοτικά του χαρακτηριστικά. Συνεπώς, οι διαφοροποιήσεις στα συστήματα κοχλίωσης, αλλά και στους κοχλίες, έχουν στόχο να βελτιώνουν την απόδοση της γραμμής παράγωγης, σε ποσοτικό και ποιοτικό επίπεδο, ανάλογα με το είδος του κατεργαζόμενου υλικού.

### 3.2.1. Κοχλίας

Ο κοχλίας αποτελεί την «καρδιά» ενός εκβολέα, καθώς αποτελεί την κινητήριο δύναμή του. Ο κοχλίας μεταβάλλεται σε μορφή και διαστάσεις αναλόγως με το κατεργαζόμενο υλικό. Έτσι, μία πρώτη διακριτοποίηση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίζοντας τους κοχλίες σε πλήρους ελίκωση και μερικής ελίκωση (ή τύπου τορπίλης). Στην πρώτη περίπτωση φτάνει μέχρι το άκρο του κοχλία και χρησιμοποιείται σε απλά συστήματα εκβολής, που δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις για ανάμιξη του υλικού εντός του εκβολέα. Στη δεύτερη περίπτωση, η ελίκωση δεν εκτείνεται μέχρι το άκρο του κοχλία, ο οποίος έχει μορφή που μπορεί να προσομοιαστεί με υποβρύχιο και επιφάνεια ανάγλυφη, καθώς χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις με ιδιαίτερες απαιτήσεις στην ανάμιξη των πρώτων υλών. Παρόλα αυτά, τρεις βασικές ζώνες, οι οποίες παρουσιάζονται και στην εικόνα 3-2, υπάρχουν σχεδόν σε όλους τους σχεδιασμούς κοχλίων, κάποιες φορές με παραλλαγές και άλλες με προσθήκες κι άλλων ζωνών.



Εικόνα 3-2: Οι τρεις βασικές ζώνες ενός κοχλία εκβολής

#### Ζώνη τροφοδοσίας

Η πρώτη ζώνη, ακριβώς κάτω από τη χοάνη τροφοδοσίας, είναι η ζώνη τροφοδοσίας, η οποία προωθεί το υλικό στο επόμενο τμήμα, αφού πρώτα το προθερμάνει μέσω της τριβής και των υπαρχόντων στοιχείων θέρμανσης. Στη ζώνη τροφοδοσίας, ο κοχλίας ελέγχει την ποσότητα του υλικού το οποίο προωθείται για μορφοποίηση, μέσω της τριβής του υλικού όταν έρχεται σε επαφή μαζί του. Η τριβή που αναπτύσσεται εξαρτάται κυρίως από τη μορφή της πρώτης ύλης (κόκκος, νιφάδα, σκόνη) και από τα επιφανειακά χαρακτηριστικά του κοχλία και του εσωτερικού του κυλίνδρου, καθώς μεγαλύτεροι ρυθμοί προώθησης του υλικού επιτυγχάνονται με υψηλό συντελεστή τριβής ως προς την επιφάνεια του κυλίνδρου και μικρό συντελεστή τριβής ως προς την επιφάνεια του κοχλία.

#### Ζώνη συμπίεσης

Στη συνέχεια το προθερμασμένο υλικό προωθείται στη ζώνη συμπίεσης, όπου θερμαίνεται και συμπιέζεται, μέχρις ότου αποκτήσει μεγάλη πυκνότητα και υψηλή θερμοκρασία. Ο σχεδιασμός του κοχλία και της ζώνης συμπίεσης εν γένει, στηρίζεται στα χαρα-

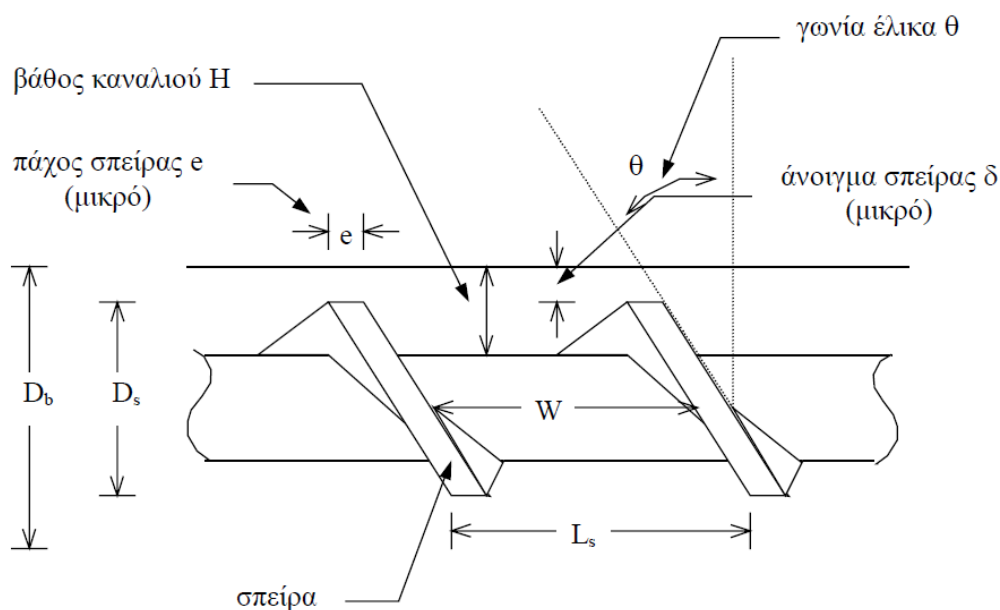
κτηριστικά τήξεως και στη φαινόμενη πυκνότητα του εκάστοτε πολυμερούς. Η ζώνη συμπίεσης αφού μεταβάλει πλήρως τη μορφή του πολυμερούς και το μετατρέψει με ρευστό τήγμα, το προωθεί στην επόμενη ζώνη.

### Ζώνη ρύθμισης

Η τελευταία από τις τρεις βασικές ζώνες είναι η ζώνη ρύθμισης, η οποία δρα σαν μία δοσομετρική αντλία και τροφοδοτεί τη μήτρα εκβολής με το ρευστό τήγμα του υλικού. Μέσα στη ζώνη ρύθμισης, ενώ η θερμοκρασία και το ιξώδες του ρευστού διατηρούνται σταθερά, η πίεση αυξάνει από μηδενική τιμή έως την απαιτούμενη για να πραγματοποιηθεί η εκβολή μέσω της μήτρας. Μεταξύ ζώνης ρύθμισης και μήτρας εκβολής, παρεμβάλλεται ένα μεταλλικό πλέγμα το οποίο λειτουργεί σαν φίλτρο για τυχόν ακαθαρσίες εντός του ρευστού, αλλά επιτελεί και το ρόλο του τελικού ομογενοποιητή του μίγματος.

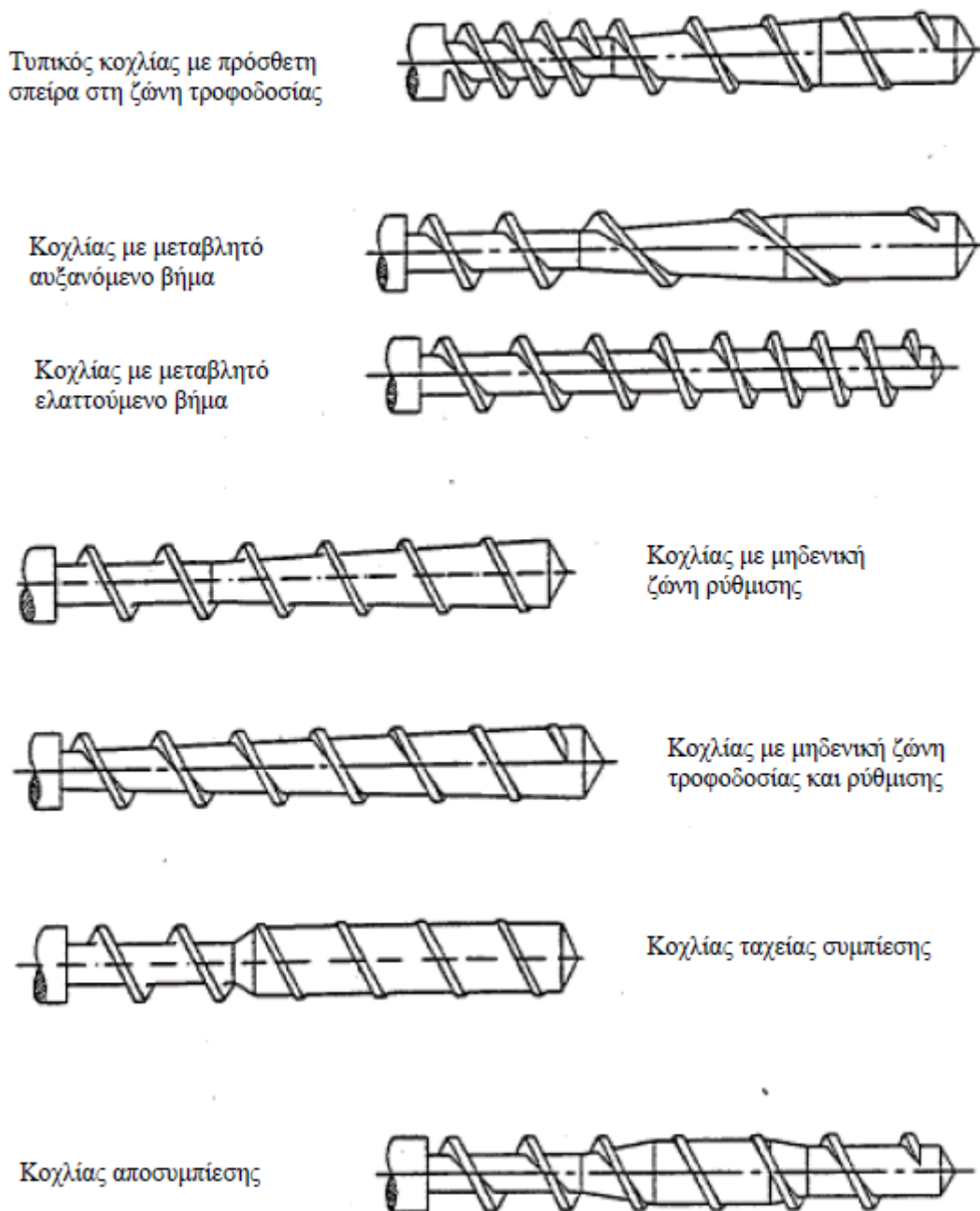
Παρά τα διάφορα είδη κοχλιών και των συστημάτων κοχλίωσης που θα αναφερθούν παρακάτω, κάποιες αναλογίες στους κοχλίες παραμένουν σε συγκεκριμένα πλαίσια, πάντα ανάλογα την κατεργασία του εκάστοτε υλικού. Για να γίνει όμως αυτό έχουν οριστεί τα παρακάτω μεγέθη, τα οποία παρουσιάζονται και στην [εικόνα 3-3 \[10\]](#):

- $D_s =$  διάμετρος κοχλία (στο χείλος της σπείρας)
- $D_b = D_s + 2\delta =$  διάμετρος κυλίνδρου
- $L_s =$  βήμα κοχλία ( $L_s = \pi D_s \tan \theta$ )
- $W =$  πλάτος καναλιού ( $W = L_s \cos \theta - e = \pi D_s \tan \theta \cos \theta$ )



Εικόνα 3-3: Διαστασιολογικές αναλογίες ενός κοχλία εκβολής

Στην [εικόνα 3-4](#) παρουσιάζονται κοχλίες με διαφοροποιήσεις από το σχέδιο των τριών σταδίων με σταθερό βήμα έλικας. Οι διαφορές επικεντρώνονται αφενός στην αφαίρεση μίας ζώνης από τις τρεις κύριες, είτε αυτή είναι η ζώνη ρύθμισης, είτε η ζώνη τροφοδοσίας, είτε και οι δύο. Αφετέρου, η αλλαγή του βήματος της σπείρας ή της προσθήκη δεύτερης σπείρας στον ίδιο κοχλία, αποτελεί πρακτική η οποία επίσης χρησιμοποιείται. Ακόμα χαρακτηριστική κατηγορία αποτελούν οι κοχλίες δύο σταδίων ή διβάθμιοι, οι οποίοι αναλύονται παρακάτω. Τέλος, οι κοχλίες φραγμού (ή διπλής σπείρας) χρησιμοποιούν μία δεύτερη σπείρα, η οποία χωρίζει το τήγμα από τα στερεά. Για τη λειτουργία τους χρησιμοποιούν την αρχή της συνεχούς μείωσης του πλάτους των στερεών, κάτι που ως αποτέλεσμα έχει την αυξημένη παροχή καλύτερης ποιότητας τήγματος, χωρίς να παρατηρείται όμως η απαιτούμενη ευστάθεια.



Εικόνα 3-4: Σχέδια διαφόρων μορφών κοχλιών εκβολής

### 3.2.2. Συστήματα κοχλίωσης

Επομένως, ανάλογα με τους ειδικότερους σχεδιασμούς των εγκαταστάσεων διακρίνουμε τα ακόλουθα συστήματα κοχλίωσης:

1. Μονοβάθμια συστήματα ενός κοχλία
2. Διβάθμια συστήματα ενός κοχλία και
3. Συστήματα εφαπτόμενων κοχλιών

#### Μονοβάθμια συστήματα ενός κοχλία

Τα μονοβάθμια συστήματα ενός κοχλία είναι τα βασικά συστήματα που χρησιμοποιούνται για την εκβολή θερμοπλαστικών υλικών. Επομένως, τα υλικά για να μορφοποιηθούν, ο εκβολέας και ο κοχλίας πρέπει να πληρούν κάποιες προδιαγραφές. Για τη διεξαγωγή της εκβολής των θερμοπλαστικών, ο λόγος του μήκους προς τη διάμετρο (L/D) ενός κοχλία μπορεί να μεταβάλλεται ανάλογα με τις υπάρχουσες ανάγκες μεταξύ 20 και 32. Σε αυτές τις περιπτώσεις η διάμετρος του κοχλία κυμαίνεται μεταξύ 50,8 mm (ή 2

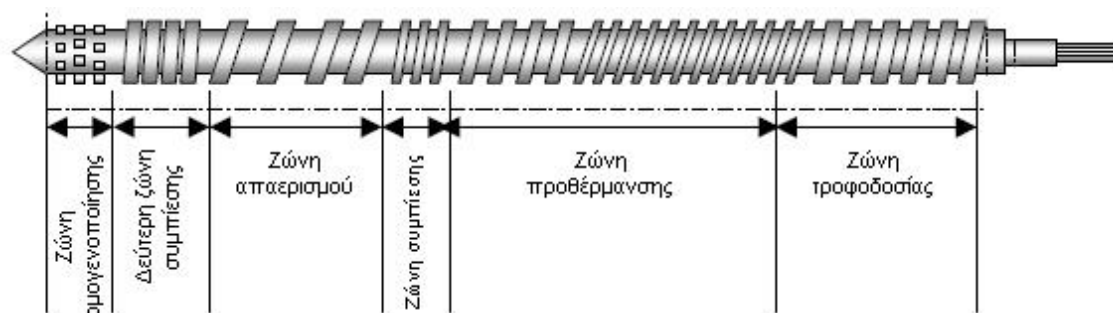


in) και 304,8 mm (ή 12 in). Παράλληλα αυξάνοντας το μήκος του κοχλία αυξάνεται η απόδοση της εγκατάστασης ανά μονάδα καταναλισκόμενης ισχύος. Ακόμα με την αύξηση του μήκους, αυξάνεται η ομοιομορφία θερμοκρασίας και ιξώδους του ρευστού (πολυμερούς), καθώς επίσης και η δυνατότητα επίτευξης μεγαλύτερης διαστασιολογικής ακρίβειας στο εκβαλλόμενο προϊόν.

### Διβάθμια συστήματα ενός κοχλία

Στα μονοβάθμια συστήματα ο περιεχόμενος στο τήγμα αέρας δεν κατευθύνεται πάντα στη ζώνη τροφοδοσίας και πολλές φορές εγκλωβίζεται εντός του τήγματος. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τα αέρια ή τους υδρατμούς που παράγονται κατά τη μετατροπή του υλικού τροφοδοσίας σε τήγμα, προκαλεί ατέλειες στο εκβαλλόμενο προϊόν. Για να επιλυθεί το πρόβλημα αυτό, ένας διβάθμιος κοχλίας φέρει δύο διαδοχικές έλικες, σαν να προέρχεται από τη συνένωση δύο όμοιων κοχλιών μονοβάθμιου συστήματος. Έτσι, ο κοχλίας έγινε πιο σύνθετος και απέκτησε δύο επιπλέον στάδια, πέραν των ζωνών τροφοδοσίας, συμπίεσης και ρύθμισης.

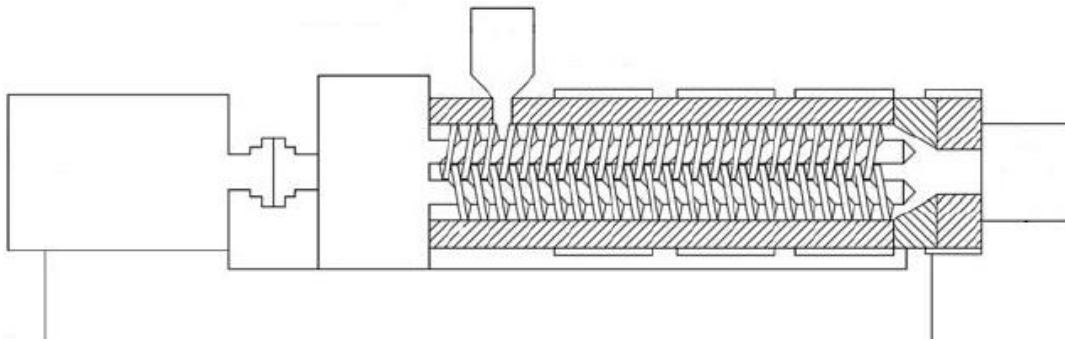
Η βασική προσθήκη είναι η ζώνη απαερισμού (ή ζώνη κενού ή ζώνη εξαγωγής). Χρησιμοποιώντας κατάλληλη διάταξη είναι δυνατή η δημιουργία κενού εντός της ζώνης εξαγωγής, η οποία έχει μεγαλύτερο χώρο από τη ζώνη ρύθμισης. Το τήγμα όταν μεταφερθεί στη ζώνη εξαγωγής αποσυμπιέζεται και απομακρύνονται τα αέρια. Στη συνέχεια, τροφοδοτείται η ζώνη προώθησης, η οποία είναι όμοια με τη ζώνη ρύθμισης των μονοβάθμιων συστημάτων κοχλίωσης και τροφοδοτεί με τη σειρά της τη μήτρα του εκβολέα. Ένα παράδειγμα κοχλίας δύο σταδίων παρουσιάζεται στην εικόνα 3-5, όπου πριν να πραγματοποιηθεί η τροφοδοσία της μήτρας, το τήγμα περνάει από μία επιπλέον ζώνη ομογενοποίησής του.



Εικόνα 3-5: Γραφικό παράδειγμα κοχλίας δύο σταδίων

### Συστήματα επαπτόμενων κοχλιών

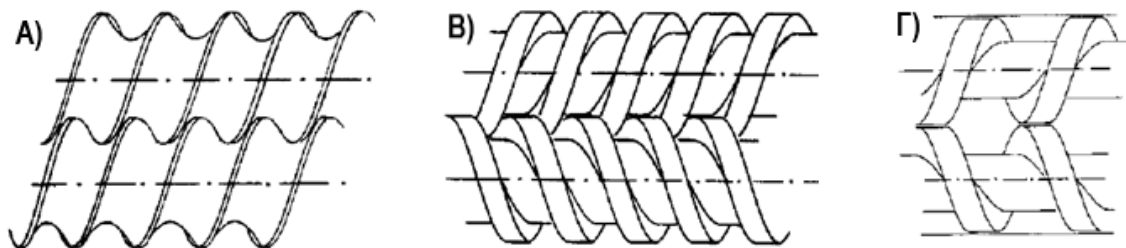
Τα συστήματα δύο κοχλιών είναι σύνηθες να αποτελούνται από δύο όμοιους κοχλίες, οι οποίοι τοποθετούνται παράλληλα, με τρόπο τέτοιο ώστε να εφάπτονται μεν, αλλά να μη συμπλέκονται. Στα συστήματα επαπτόμενων κοχλιών εκτός από την αξονική όδευση εμφανίζεται και μία πλευρική όδευση του υλικού από τον ένα κοχλία στον άλλο. Αυτό συνεπάγεται καλύτερη ανάμιξη του υλικού, καθώς δε συμβαίνει μία απλή μονόδρομη μεταφορά του. Επίσης, η ελίκωση του κοχλία καταλαμβάνει ένα μέρος αυτού και το υπόλοιπο διαμορφώνεται κατ' αυτό τον τρόπο, ώστε να ενισχύεται το φαινόμενο της ανάμιξης. Επομένως, τα συστήματα επαπτόμενων κοχλιών χρησιμοποιούνται εκτενέστερα σε περιπτώσεις που παρουσιάζονται προβλήματα ανάμιξης. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα επαπτόμενων κοχλιών παρατίθεται στην εικόνα 3-6.



Εικόνα 3-6: Σχέδιο εκβολέα που χρησιμοποιεί επαπτόμενους κοχλίες εκβολής

Επίσης μπορεί να υπάρξει διαφοροποίηση αναλόγως τη μεταξύ τους τοποθέτηση και περιστροφή των κοχλιών. Τρεις βασικές περιπτώσεις που διακρίνονται και οι οποίες παρατίθενται στην εικόνα 3-7 [9], είναι:

- Παράλληλης περιστροφής με πλήρως εμπλεκόμενους κοχλίες
- Αντίστροφη περιστροφή με απλά εμπλεκόμενους κοχλίες και
- Αντίστροφη περιστροφή με μη εμπλεκόμενους κοχλίες.



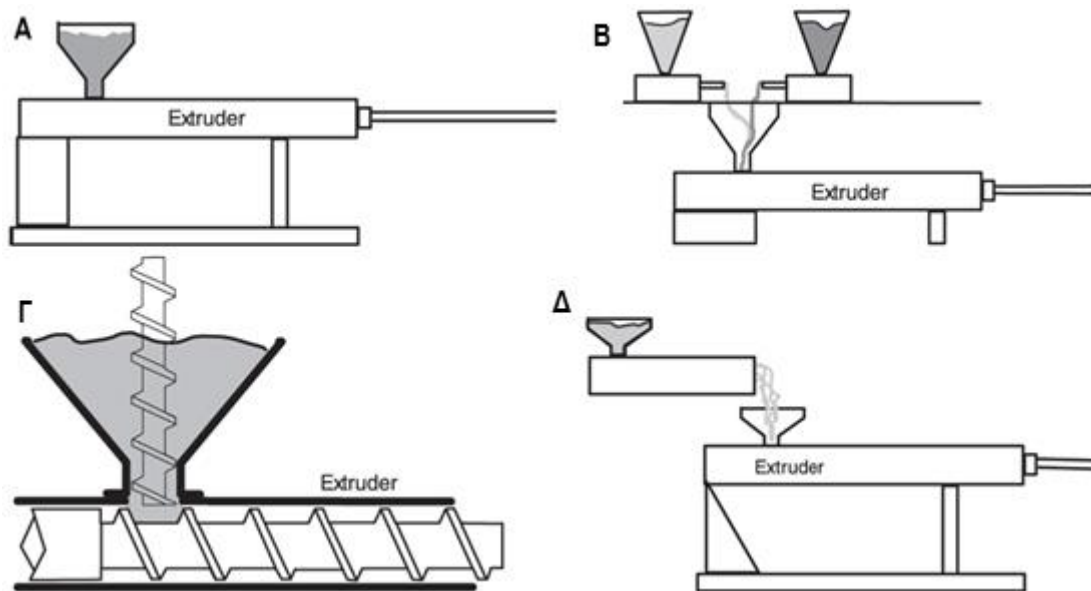
Εικόνα 3-7: α) πλήρως εμπλεκόμενοι κοχλίες, β) απλά εμπλεκόμενοι κοχλίες, γ) μη εμπλεκόμενοι κοχλίες

### 3.2.3. Χοάνη τροφοδοσίας

Αφού οι πρώτες ύλες αναμιχθούν και αφαιρεθεί η υγρασία (αν αυτό κριθεί απαραίτητο), εισέρχονται στον θάλαμο του εκβολέα από τη χοάνη τροφοδοσίας. Η τροφοδοσία έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιηθεί με 4 διαφορετικούς τρόπους:

- Με τροφοδοσία πλημμύρας (flood feed), όπως φαίνεται στην εικόνα 3-8 (α)
- Με τροφοδοσία πείνας (starve feed), όπως φαίνεται στην εικόνα 3-8 (β)
- Με τροφοδοσία παραγεμίσματος (crammer) και, όπως φαίνεται στην εικόνα 3-8 (γ)
- Με τροφοδοσία τήγματος (melt feed), όπως φαίνεται στην εικόνα 3-8 (δ)

Από αυτούς τους τρόπους τροφοδοσίας, ο πρώτος είναι ο πιο συνηθισμένος και ευρέως χρησιμοποιούμενος. Στην τροφοδοσία πλημμύρας, με τη χρήση της δύναμης της βαρύτητας και με την περιστροφική κίνηση του κοχλία του εκβολέα, η πρώτη ύλη κατευθύνεται προχωράει εντός του θαλάμου. Επειδή, η ποσότητα που παρέχεται είναι ανάλογη με την ταχύτητα περιστροφής του κοχλία, όσο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής, ως επακόλουθο αυξάνεται ο ρυθμός παραγωγής τελικού προϊόντος.



Εικόνα 3-8: Μορφές τροφοδοσίας εκβολέα. Α) τροφοδοσία πλημμύρας (flood feed), Β) τροφοδοσία πείνας (starve feed), Γ) τροφοδοσία παραγεμίσματος (crammer), Δ) τροφοδοσία τήγματος (melt feed)

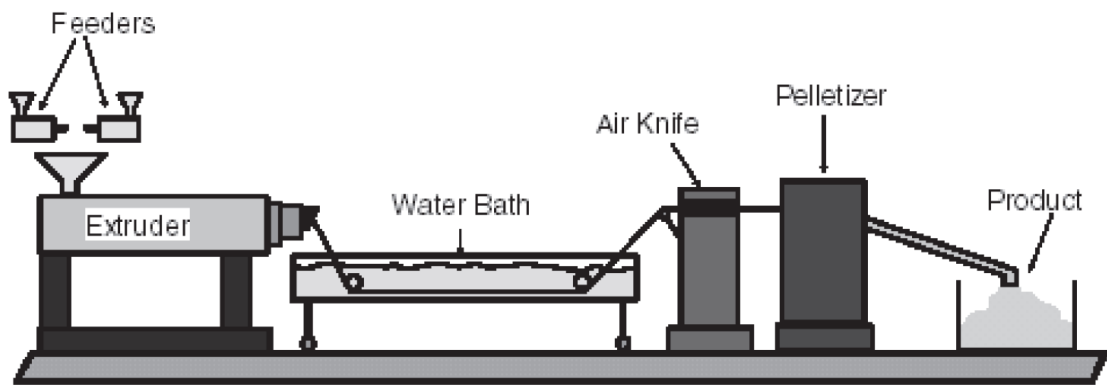
### 3.3. Τύποι εκβολής

Οι τύποι εκβολής χωρίζονται και χαρακτηρίζονται ανάλογα με το παραγόμενο προϊόν ή/και τη διαδικασία παραγωγής. Αν και στα παρακάτω υποκεφάλαια θα αναπτυχθούν εκτενέστερα κάποιοι τύποι, αρχικά θα παρατεθούν στο σύνολό τους. Έτσι οι βασικοί τύποι εκβολής που χρησιμοποιούνται είναι:

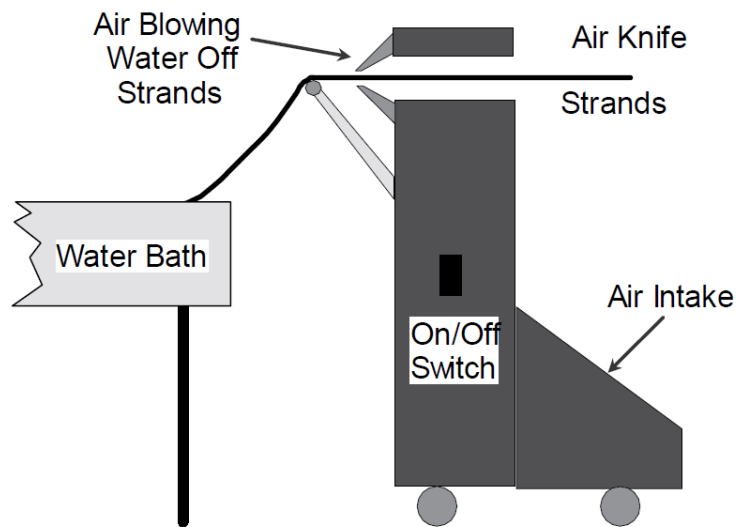
- Εκβολή ανάμιξης
- Εκβολή μεμβράνης και φύλλου
- Εκβολή φυσητής μεμβράνης
- Εκβολή επένδυσης καλωδίων
- Εκβολή σωλήνων
- Εκβολή αφρού
- Εκβολή επένδυσης

#### 3.3.1. Εκβολή ανάμιξης

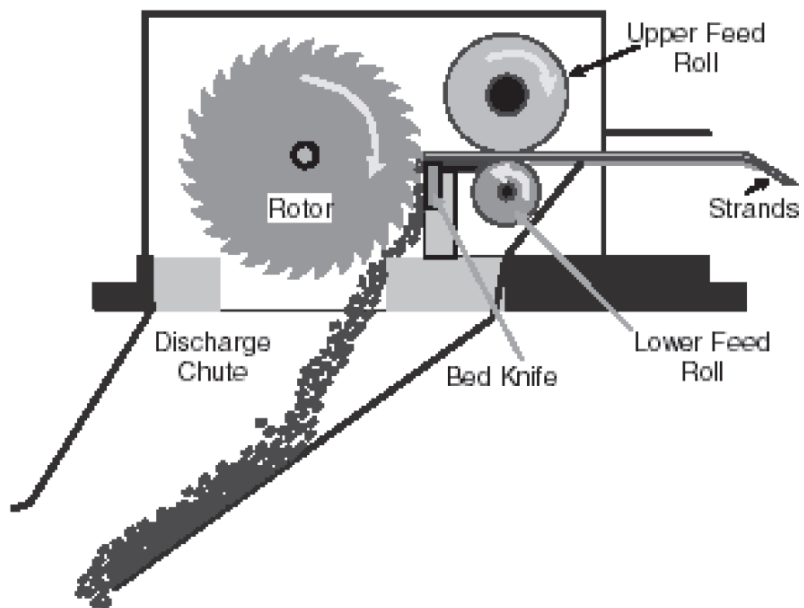
Κατά την εκβολή ανάμιξης αρχικά πραγματοποιείται η προσθήκη όλων των συστατικών στη χοάνη τροφοδοσίας του εκβολέα. Στη συνέχεια, εντός του εκβολέα και με τη διαδικασία της θέρμανσης και της περιστροφής, επιτυγχάνεται η ορθή ανάμιξη των συστατικών. Τέλος, το νέο υλικό, καθώς εξάγεται από τη μήτρα του εκβολέα, προωθείται μέσω ράουλων σε ένα λουτρό όπου ψύχεται, μέσω μίας μηχανής εκφύσησης αέρος, η οποία ονομάζεται μαχαίρι αέρος. Το παραγόμενο προϊόν στεγνώνει και περνάει από τη μηχανή τεμαχισμού (pelletizer), η οποία το μετατρέπει σε πέλλετ. Τέλος, τα παράγωγα του τεμαχισμού, επειδή τα μεγέθη είναι πολλά και διαφορετικά, κατευθύνονται σε μία μηχανή διαχωρισμού, η οποία τα χωρίζει και τα κατηγοριοποιεί. Στην εικόνα 3-9 απεικονίζεται συνολικά ο εξοπλισμός για την παραγωγή των pellets, ενώ στην εικόνα 3-10, στην εικόνα 3-11 και στην εικόνα 3-12 [8], παρουσιάζονται το μαχαίρι αέρος, η μηχανή κοπής pellet (pelletizer) και δύο τύποι μηχανών χωρισμού των pellet, αντίστοιχα. Η διαδικασία ανάμιξης συνήθως προηγείται των υπόλοιπων διαδικασιών παραγωγής με μήτρα, καθώς το προϊόν της χρησιμοποιείται από τις υπόλοιπες διαδικασίες εκβολής, καθώς και από άλλες διαδικασίες, όπως χύτευσης με έγχυση. Ακόμα, για τη διαδικασία της ανάμιξης προτιμούνται διπλοί εκβολείς, καθότι επιτυγχάνουν καλύτερης ποιότητας ανάμιξη ανάμεσα στα συστατικά του τελικού μείγματος.



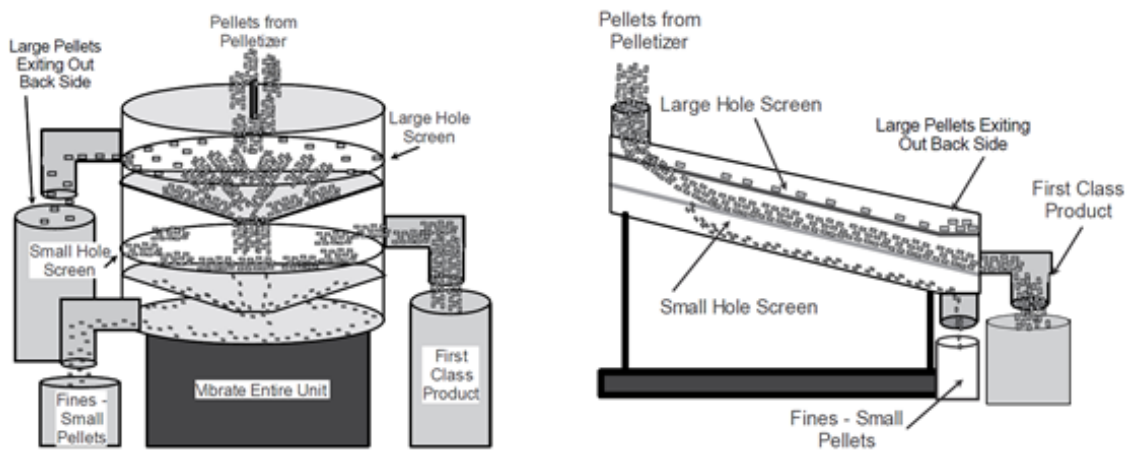
Εικόνα 3-9: Διάταξη παρασκευής πέλλετ [8]



Εικόνα 3-10: Μαχαίρι αέρος (air knife) [8]



Εικόνα 3-11: Μηχανή κοπής πέλλετ (pelletizer) [8]



Εικόνα 3-12: Μηχανές διαχωρισμού πέλλετ [8]

Η εκβολή ανάμιξης χρησιμοποιείται για τις παρακάτω περιπτώσεις εκβολής [7]:

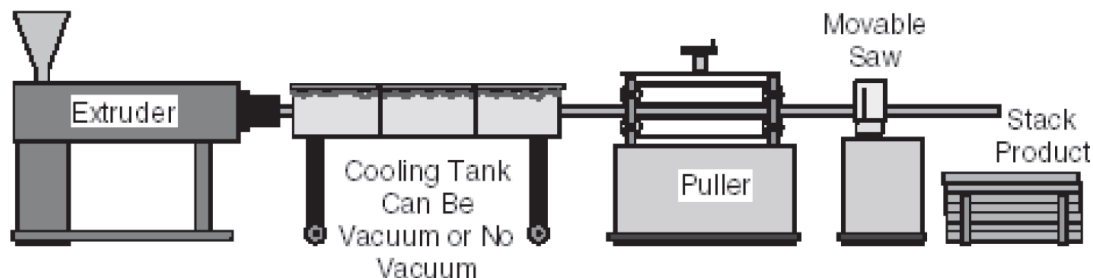
- Ανάμιξη δύο ή παραπάνω ρητινών.
- Κραματοποίηση δύο ή περισσότερων πολυμερικών ρητινών.
- Προσθήκη σκληρυντή (impact modifier) σε μία ρητίνη, ώστε να γίνει πιο ανθεκτική και σκληρή.
- Προσθήκη αντιπυρικών, ώστε να βελτιωθεί η αντοχή σε περίπτωση φωτιάς.
- Προσθήκη σταθεροποιητών ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά του προϊόντος απέναντι:
  - a) στην υπεριώδη ακτινοβολία,
  - b) στη θερμότητα στο στάδιο της επεξεργασίας,
  - c) στη γήρανση λόγω θερμότητας και
  - d) στην οξείδωση.
- Προσθήκη πληρωτικών ή αραιωτικών υλικών για μείωση του κόστους.
- Πρόσθετα που τροποποιούν της επιφανειακές ιδιότητες, όπως αντιστατικά, ολισθητικά, αντικολλητικά και αντιτριβικά.
- Προσθήκη μέσων ενίσχυσης, όπως ίνες γυαλιού, ανθρακονήματα ή αραμιδικές ίνες, καθώς και νανοσωματίδια, για τη βελτίωση της σκληρότητας και της αντοχής του προϊόντος .
- Προσθήκη αγώγιμων και μαγνητικών πληρωτικών μέσων, ώστε να βελτιωθούν οι ηλεκτρομαγνητικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος.
- Προσθήκη διευκολυντικών ροής, ώστε να αλλάξουν τα χαρακτηριστικά ροής του υλικού.
- Προσθήκη χρωστικών, για αλλαγή στο χρώμα του τελικού προϊόντος.

### 3.3.2. Εκβολή από μήτρα ορισμένου προφίλ

Η εκβολή με μήτρα συγκεκριμένου σχήματος διατομής, αποτελεί μία από τις πιο συνηθισμένες διαδικασίες εκβολής, καθώς παράγονται κατ' αυτό τον τρόπο μεγάλες ποσότητες και πολυποίκιλες μορφές προϊόντων. Μερικά προϊόντα ευρείας χρήσεως είναι τα κουφώματα των παραθύρων, οι υδρορροές, τα κολονάκια για φράχτες και άλλα. Οι κοινές ρητίνες που χρησιμοποιούνται για τη συγκεκριμένου τύπου εκβολή είναι:

- το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC),
- το πολυαιθυλένιο (PE),
- το πολυπροπυλένιο (PP),
- το ακρυλονιτρίλιο βουταδιενίου στυρολίου (ABS) και
- το υψηλής αντοχής πολυστυρένιο (High Impact PS).

Στην εικόνα 3-13 [8] παρουσιάζεται σχηματικά μία γραμμή παραγωγής με μήτρα εκβολής. Στην αρχή είναι τοποθετημένος ο εκβολέας, από τον οποίο εξάγεται το μορφοποιημένο προϊόν. Έπειτα ο θάλαμος ψύξης, ο οποίος λειτουργεί με σύστημα ψύξης μέσω του αέρα ή του νερού, με συνθήκες κενού ή χωρίς. Στη συνέχεια, το μορφοποιημένο προϊόν σύρεται με τη βοήθεια ενός εξολκέα και κατευθύνεται προς έναν κινούμενο κόπτη και τέλος στοιβάζεται και αποθηκεύεται.



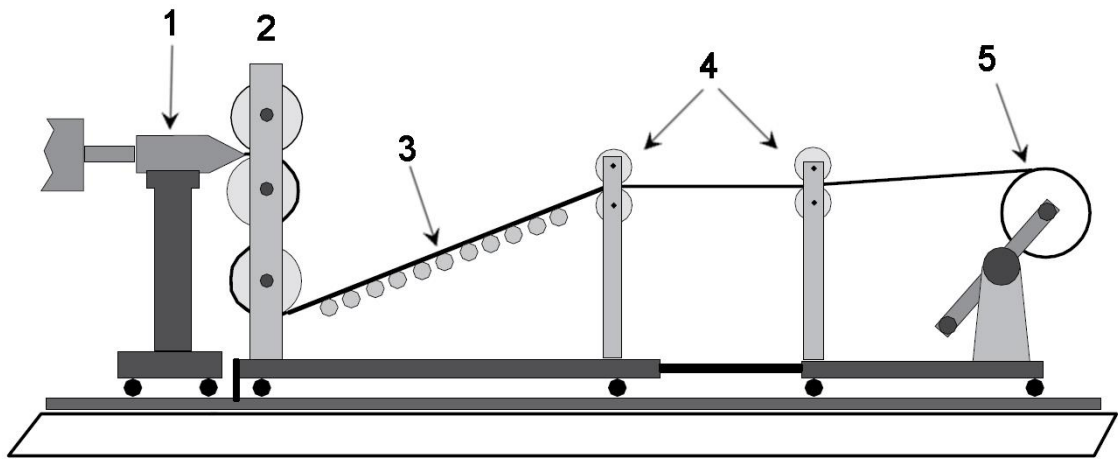
Εικόνα 3-13: Γραμμή παραγωγής προφίλ μέσω εκβολής [8]

Λόγω της ιδιαίτερης μορφής της διατομής της μήτρας, ο σωστός σχεδιασμός αυτής, ώστε το τελικό προϊόν, μετά και τη στερεοποίησή του, να έχει την επιθυμητή διαστασιολογική ακρίβεια, αποτελεί σύνθετη διαδικασία. Για να σχεδιαστεί ορθά μία μήτρα εκβολής πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του εκβαλλόμενου υλικού, καθώς και οι συνθήκες εκβολής. Η πίεση και η ροή μέσα από τη μήτρα είναι απαραίτητο να είναι ομοιόμορφη, ώστε κατά τη συρρίκνωση του παραγόμενου προϊόντος, να μην υπάρχουν εσωτερικές τάσεις που θα οδηγήσουν σε στρέψη αυτού. Ακόμα, ως υλικό κατασκευής της μήτρας επιλέγονται χάλυβες, που στη συνέχεια επιχρωμιώνονται ή επινικελώνονται. Επομένως, η κατάλληλη σχεδίαση της μήτρας λειτουργεί ευεργετικά και στην ορθή στερεοποίηση του προϊόντος, η οποία ολοκληρώνεται εντός του θαλάμου ψύξης. Ο θάλαμος ψύξης και βαθμονόμησης συντελεί στην απόδοση των επιθυμητών διαστάσεων στο τεμάχιο και στη μη στρέβλωσή του, ενώ ο εξολκέας χρησιμοποιώντας ερπύστριες, έλκει το τεμάχιο με σταθερό ρυθμό, από τη στιγμή που θα βγει από τον εκβολέα και διά μέσου του θαλάμου ψύξης το μεταφέρει στο μαχαίρι. Επίσης, ο κόπτης αποτελείται είτε από ένα «ιπτάμενο» μαχαίρι, είτε από ένα μετακινούμενο πριόνι και μπορεί να λειτουργεί πλήρως αυτοματοποιημένα με σταθερό ρυθμό, καθώς και σε μη τακτά χρονικά διαστήματα, λαμβάνοντας ένα σήμα για το χρονικό σημείο στο οποίο θα επέμβει για να διακόψει τη ροή του συνεχούς προϊόντος. Τέλος, η φορά κοπής είναι είτε με μετακίνηση από κάτω προς τα πάνω ή το αντίθετο, είτε από πλάγια σε πλάγια θέση (από αριστερά στα δεξιά ή το αντίστροφο).

### 3.3.3. Παραγωγή φύλλων και μεμβρανών με εκβολή

Η παραγωγή μεμβράνης και φύλλου με εκβολή, αν και έχει σημαντικές ομοιότητες, διαχωρίζεται ανάλογα με το πάχος του παραγόμενου προϊόντος. Εάν το προϊόν έχει πάχος πάνω από 0,254 χιλιοστά, θεωρείται φύλλο και ακολουθεί την αντίστοιχη διαδικασία παραγωγής. Εάν το πάχος του είναι κάτω από 0,254 χιλιοστά, τότε συγκαταλέγεται στην κατηγορία των μεμβρανών και η παραγωγική διαδικασία είναι αντίστοιχη της κατηγορίας. Τα τεμάχια φύλλων που παράγονται με εκβολή αντικαθιστούν το γυαλί σε πόρτες και παράθυρα, λειτουργούν ως χωρίσματα μεταξύ των γραφείων σε χώρους εργασίας, ακόμα και ως αλεξίσφαιρη μόνωση. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-14, μία γραμμή παραγωγής φύλλων από εκβολή περιλαμβάνει:

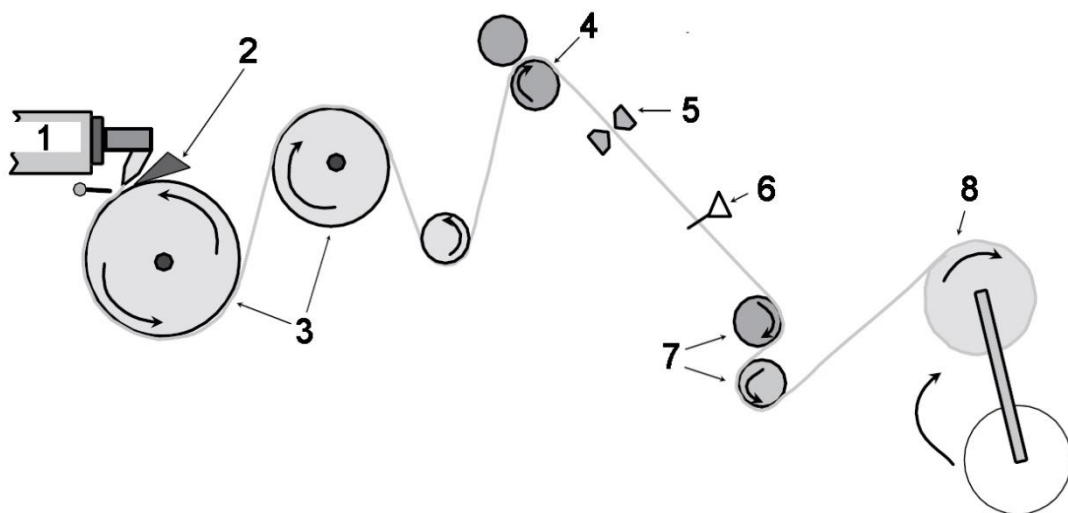
1. Τη μήτρα
2. Τον πύργο των κυλίνδρων (three-roll stack)
3. Τους κυλίνδρους μεταφοράς και στήριξης
4. Τους ελκτικούς κυλίνδρους
5. Μια μηχανή περιέλιξης ή έναν συσσωρευτή



Εικόνα 3-14: Γραμμή παραγωγής φύλλου ή μεμβράνης από εκβολή [8]

Η μεμβράνη η οποία προέρχεται από μία διάταξη εκβολής ίδια ή παρόμοια με αυτή της εικόνας 3-14, βρίσκει χρήση σαν μεμβράνη περιτυλίγματος φαγητών, μεμβράνη προστασίας, γενικής χρήσεως μεμβράνη για περιτύλιξη δεμάτων και εμπορευμάτων, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ιατρική, σε πάνες και αλλού. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 3-15, μία γραμμή παραγωγής μεμβράνης από εκβολή περιλαμβάνει:

1. Εκβολέας με εγκατεστημένη τη μήτρα
2. Μηχανή δημιουργίας κενού
3. Ένας ή παραπάνω κύλινδροι χύτευσης (ή ψύξης)
4. Κύλινδροι έλκυσης
5. Κέντρο επεξεργασίας με πλάσμα ή φλόγα
6. Διαχωριστής
7. Κύλινδροι δημιουργίας έντασης, μεταξύ του διαχωριστή και της μηχανής περιέλιξης
8. Μηχανή περιέλιξης υψηλής ταχύτητας



Εικόνα 3-15: Διάταξη παραγωγής μεμβράνης μέσω εκβολής [8]

## 4. Κατεργασία κοπής

### 4.1. Γενικά

Η ιστορία των κατεργασιών αφαίρεσης υλικού είναι πολύ μεγάλη και ξεκινάει στα προϊστορικά χρόνια. Οι άνθρωποι δημιούργησαν τα πρώτα εργαλεία τους, τα οποία ήταν από πέτρα ή από κόκκαλα ζώων, χρησιμοποιώντας κρούση ή λείανση. Με τη χρήση ενός χωροχρονικού άλματος, μπορεί κανείς να παρατηρήσει τους αρχαίους Έλληνες να εισέρχονται δειλά στην εποχή του χαλκού και να μορφοποιούν εργαλεία και όπλα από χαλκό, αλλά και από κρατερώματα αυτού με κασσίτερο. Ακολουθεί η εποχή του σιδήρου, στην οποία ο άνθρωπος άρχισε να προσπαθεί να κατεργαστεί τα υλικά που διέθετε με πιο σύνθετες μεθόδους. Έτσι, ο τόρνος πρωτοεμφανίστηκε το 1300 π.Χ. περίπου και χρησιμοποιήθηκε από τους Αιγυπτίους, τους Ασσύριους, τους αρχαίους Έλληνες και άλλους. Στη συνέχεια, αν και βελτιώθηκε η δομή του σαν εργαλειομηχανή, ο τόρνος αρχίζει να εξελίσσεται ραγδαία κατά την περίοδο της Αναγέννησης, όπου έως τη βιομηχανική επανάσταση θα βρει εφαρμογές και θα μετατραπεί στο σύγχρονο τόρνο. Άξιο αναφοράς είναι το πρώτο σύγγραμμα με λεπτομέρειες για την τεχνολογία της τόννευσης, το "L' Art du Tourner" του μοναχού Charles Plumier το οποίο εκδόθηκε το 1701.

Τον εικοστό αιώνα ο μηχανικός John T. Parsons ανέπτυξε τον αυτόματο έλεγχο στις εργαλειομηχανές, μέσω της χρήσης διάτρητων καρτών και στη συνέχεια ταινιών, αν και η πραγματικά αυτοματοποιημένη διαδικασία κατεργασίας τεμαχίων απέκτησε σάρκα και οστά τις δεκαετίες του 1970 και του 1980. Τότε πραγματοποιήθηκε η σύνδεση του μικροεπεξεργαστή και των εργαλειομηχανών και διαμορφώθηκε η σύγχρονη μονάδα γνωστή σαν CNC (Computer Numerical Control). Οι μηχανές CNC έχουν πλέον συνδεθεί απόλυτα με τη γραμμή παραγωγής και χρησιμοποιούνται από σύγχρονα μηχανουργεία σαν μέρος ευέλικτων συστημάτων παραγωγής (FMS). Ακόμα, μία μηχανή CNC στην πιο απλή της μορφή, είτε αυτή είναι ένας κέντρο τόννευσης, όπως αυτό της εικόνας 4-1, είτε ένα κέντρο φραιζαρίσματος σαν αυτό της εικόνας 21, μπορεί να επιτελέσει παραπάνω από μία κατεργασία, όπως διάτρηση, φραιζάρισμα, τόννευση, λείανση και άλλα.



Εικόνα 4-1: Κέντρο κατεργασίας τόννευσης (αριστερά) και κέντρο κατεργασίας φρεζαρίσματος (δεξιά)

Με τον όρο κατεργασίες κοπής ή κατεργασίες με αφαίρεση υλικού, γίνεται αναφορά σε μία σειρά από τεχνολογίες, που σαν σκοπό έχουν την αφαίρεση ενός μέρους από το αρχικό τεμάχιο. Οι κατεργασίες κοπής χρησιμοποιούνται είτε για διαμόρφωση ενός τεμαχίου από έναν όγκο υλικού, είτε πιο συχνά ως κατεργασίες αποπεράτωσης και φινιρίσματος αντικειμένων τα οποία έχουν προέλθει από πρωτογενείς διαδικασίες διαμόρφωσης, όπως η χύτευση, η έλαση και άλλες. Αν και η πλειοψηφία των κατεργασιών κοπής αφορά μεταλλικά αντικείμενα, το ποσοστό των σύνθετων τεμαχίων που υποβάλλονται σε κατεργασία κοπής ή διαμόρφωσης αυξάνεται σταθερά. Τα σύνθετα βρίσκουν κυρίως εφαρμογή σε τεχνολογικούς τομείς υψηλού επιστημονικού ενδιαφέροντος, όπως η αεροδιαστημική, η ναυπηγική και η αεροναυπηγική, οι αγώνες αυτοκινή-



των ταχύτητας, αλλά και ο αθλητισμός. Συνεπώς, οι εφαρμογές των αντικειμένων από σύνθετα υλικά απαιτούν εξαιρετική ακρίβεια, η οποία είναι δύσκολο να επιτευχθεί αποκλειστικά από τις πρωτογενείς διαδικασίες μορφοποίησης.

Ο βασικός τρόπος διαχωρισμού των κατεργασιών κοπής είναι η μορφή που έχει το κοπτικό εργαλείο που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Με αυτό σαν κριτήριο, οι κατεργασίες χωρίζονται σε αυτές με γεωμετρικά καθορισμένη μορφή κοπτικού εργαλείου, με ακαθόριστη μορφή κοπτικού εργαλείου και σε μη συμβατικές κατεργασίες [3], [12], οι οποίες αναφέρονται στον πίνακα 4-1. Ακόμα, οι κατεργασίες κοπής μπορούν να ταξινομηθούν σε αρκετές κατηγορίες, εκτός από τις τρεις κύριες που αναφέρθηκαν παραπάνω, μερικές από τις οποίες περιγράφονται ως [12]:

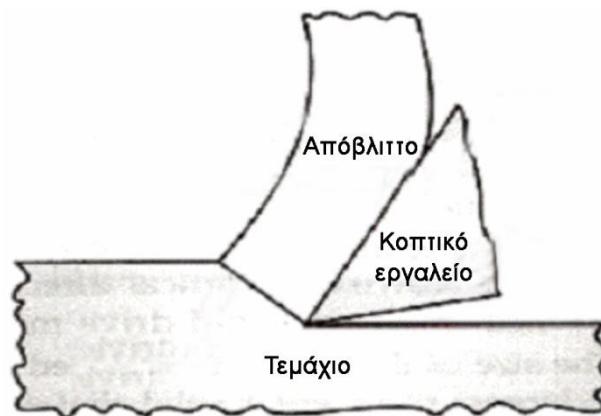
- Κατεργασίες με ένα ή περισσότερα περάσματα
- Κατεργασίες με εργαλείο μίας ή περισσότερων όψεων
- Κατεργασίες με ένα ή περισσότερα εργαλεία (σε ταυτόχρονη χρήση)
- Συνεχείς ή διακοπτόμενες κατεργασίες
- Με μεταφορική ή περιστροφική πρωτεύουσα κίνηση
- Ανάλογα με το είδος της εργαλειομηχανής (δράπανο, τόρνος, φρέζα, πλάνη και άλλα)
- Ανάλογα με την ακρίβεια μορφής, διαστάσεων, και τραχύτητας, χωρίζονται σε ύψιστης, υψηλής, μέσης, χαμηλής ή μέτριας ακρίβειας, ή ποιοτικής δυναμικότητας
- Ανάλογα με το ρυθμό αφαιρέσεως του υλικού, χωρίζονται σε υψηλής, μέσης και χαμηλής παραγωγικότητας ή ποσοτικής δυναμικότητας κατεργασίας.

<b>Κατεργασίες με αφαίρεση υλικού και κοπή</b>		
<b>Κοπή με γεωμετρικά καθορισμένη μορφή του κοπτικού εργαλείου</b>	<b>Κοπή με ακαθόριστη γεωμετρική μορφή του κοπτικού εργαλείου</b>	<b>Μη συμβατικές κατεργασίες</b>
Τόρνευση	Λείανση	Ηλεκτροχημικές κατεργασίες
Διάτρηση	Υπερλείανση	Ηλεκτροδιάβρωση (EDM)
Φρεζάρισμα	Honing	Laser
Boring	Lapping	Plasma
Πλάνιση		Δέσμη ηλεκτρονίων (EBM)
Αυλάκωση		Δέσμη ιόντων (IBM)
Πριόνισμα		Υπέρηχοι
Γραναζοκοπή		

Πίνακας 4-1: Ταξινόμηση κατεργασιών αφαίρεσης υλικού και κοπής

## 4.2. Μηχανική της κοπής

### 4.2.1. Βασικές έννοιες

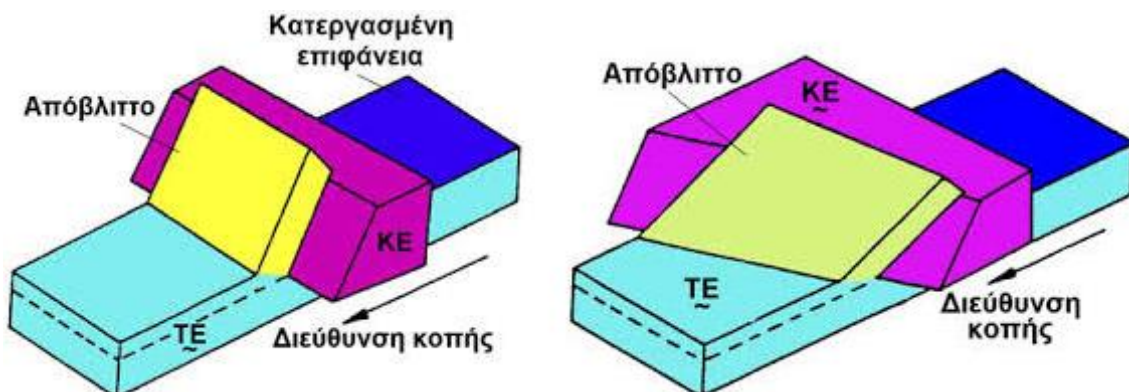


Εικόνα 4-2: Το σύστημα της κοπής με το κοπτικό, το τεμάχιο και το απόβλιττο

Οι τρεις βασικοί παράγοντες που έχουν σημαντικό ρόλο στην κοπή είναι:

- Το κατεργαζόμενο τεμάχιο
- Το κοπτικό εργαλείο
- Το απόβλιττο (ή αλλιώς το αφαιρούμενο υλικό)

Το κοπτικό εργαλείο κινείται ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο με συγκεκριμένη κατεύθυνση (την κατεύθυνση κοπής), ενώ παράλληλα σχηματίζεται το απόβλιττο, το οποίο κινείται (ολισθαίνει) πάνω στο κοπτικό εργαλείο, αφού έχει υποστεί ισχυρή πλαστική παραμόρφωση, όπως φαίνεται στην εικόνα 4-2. Οι συνδυασμοί τοποθετήσεων των τριών βασικών παραγόντων είναι πάρα πολλοί. Επομένως κρίθηκε πιο συνετό να εξεταστεί μία απλουστευμένη προσέγγιση, που είναι η ορθογωνική κοπή. Στην ορθογωνική κοπή το κοπτικό εργαλείο έχει τη μορφή σφήνας και είναι κάθετο στη διεύθυνση της κοπής, ενώ στη λοξή κοπή, η κόψη του κοπτικού εργαλείου είναι υπό γωνία ως προς τη διεύθυνση κοπής. Ένα σχέδιο των δύο διαφορετικών τρόπων κοπής φαίνεται στην εικόνα 4-3.



Εικόνα 4-3: Αριστερά παρουσιάζεται σχηματικά η ορθογωνική κοπή, ενώ δεξιά η λοξή κοπή [13]

Ακόμα, οι κινήσεις κοπτικού εργαλείου και τεμαχίου χωρίζονται σε πρωτεύουσα ή κύρια κίνηση και δευτερεύουσα ή κίνηση πρόωσης. Η πρωτεύουσα κίνηση παρέχεται από την εργαλειομηχανή είτε στο τεμάχιο είτε στο κοπτικό και σκοπό έχει τη μείωση της με-

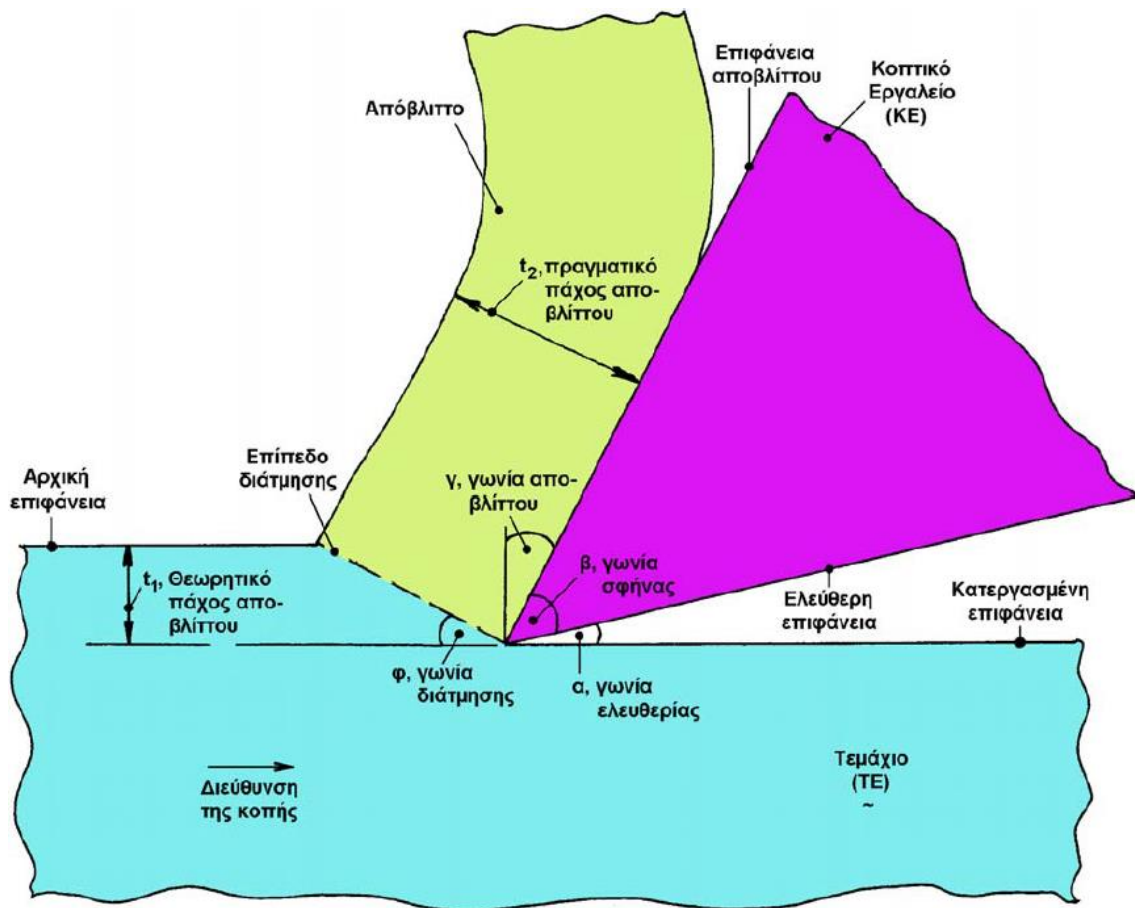
ταξύ τους απόστασης ή την αφαίρεση υλικού στο σημείο της κοπής. Ενώ η δευτερεύουσα κίνηση, παρέχεται πάλι από την εργαλειομηχανή στο τεμάχιο ή το κοπτικό, αλλά κατά τρόπο συνεχή ή διακοπτόμενο, ο οποίος τελικά σε συνδυασμό με την κύρια κίνηση, έχει σαν αποτέλεσμα την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η κύρια κίνηση απορροφά το μεγαλύτερο ποσοστό της ισχύος κοπής, ενώ η δευτερεύουσα απορροφά πολύ μικρότερο.

Μεταξύ του κοπτικού εργαλείου, του αποβλίπτου και του κατεργαζόμενου τεμαχίου διακρίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, τα οποία παρουσιάζονται και σχηματικά στην εικόνα 4-4 και είναι τα εξής [13]:

- Επιφάνεια αποβλίπτου: είναι η επιφάνεια του κοπτικού, πάνω στην οποία ολισθαίνει το απόβλιπτο αφού αποκολληθεί από το τεμάχιο.
- Ελεύθερη επιφάνεια: είναι η επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου, η οποία είτε έρχεται σε επαφή είτε αντικρίζει την κατεργασμένη επιφάνεια του τεμαχίου.
- Κόψη: είναι η ακμή του κοπτικού εργαλείου, η οποία προκύπτει από την τομή των δύο προαναφερθέντων επιφανειών.
- Γωνία αποβλίπτου  $\gamma$ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την επιφάνεια αποβλίπτου και το κάθετο στην κατεργασμένη επιφάνεια επίπεδο που περνάει από την κόψη του κοπτικού εργαλείου. Η γωνία αποβλίπτου μπορεί να λάβει τιμές θετικές, αρνητικές ή μηδέν.
- Γωνία ελευθερίας  $\alpha$ : είναι η γωνία που σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου και την απέναντι από αυτήν κατεργασμένη επιφάνεια.
- Γωνία σφήνας  $\beta$ : είναι η γωνία η οποία σχηματίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και την επιφάνεια αποβλίπτου.
- Θεωρητικό πάχος αποβλίπτου  $t_1$ : είναι το πάχος του αφαιρούμενου υλικού, πριν αυτό αποκολληθεί από το τεμάχιο.
- Πραγματικό πάχος αποβλίπτου  $t_2$ : είναι η μέση τιμή του πάχους που έχει το απόβλιπτο μετά την κοπή, αφού δηλαδή αφαιρεθεί από το κατεργασμένο τεμάχιο.
- Πλάτος αποβλίπτου  $b$ : είναι το πλάτος που έχει το απόβλιπτο.
- Θεωρητική διατομή αποβλίπτου  $A_1$ : είναι η διατομή του αποβλίπτου πριν αυτό αφαιρεθεί από το κατεργαζόμενο τεμάχιο και υπολογίζεται από τη σχέση  $A_1 = b * t_1$ .
- Πραγματική διατομή αποβλίπτου  $A_2$ : είναι η διατομή του αποβλίπτου αφού αυτό αφαιρεθεί από το κατεργαζόμενο τεμάχιο και υπολογίζεται από τη σχέση  $A_2 = b * t_2$ .

Να σημειωθεί ότι για τις γωνίες ισχύει η σχέση:

$$\alpha + \beta + \gamma = 90$$



Εικόνα 4-4: Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και βασικές έννοιες κοπής

Επιπλέον, όταν γίνεται αναφορά στις συνθήκες κοπής, αυτές είναι:

- Το βάθος κοπής **a**: το οποίο είναι το βάθος στο οποίο εισχωρεί το κοπτικό εργαλείο μέσα στο τεμάχιο και συνήθως μετράται σε mm.
- Η ταχύτητα κοπής **u**: η οποία είναι η σχετική ταχύτητα της κόψης του κοπτικού εργαλείου ως προς το κατεργαζόμενο τεμάχιο κατά την πρωτεύουσα κίνηση και μετράται συνήθως σε m/min.
- Και η πρόωση **f**: η οποία είναι η σχετική μετατόπιση του κοπτικού εργαλείου ως προς το τεμάχιο ανά περιστροφή ή ενεργό διαδρομή (του τεμαχίου ή του κοπτικού). Συνήθως μετράται κατά την κατεύθυνση της κίνησης πρόωσης σε mm/rev ή mm/ενεργό διαδρομή.

Επίσης, εναλλακτικά αντί της πρόωσης, χρησιμοποιείται η ταχύτητα πρόωσης  $v_v$ , η οποία είναι η στιγμιαία ταχύτητα της κόψης του κοπτικού ως προς το τεμάχιο κατά τη συνεχή κίνηση πρόωσης και μετράται συνήθως σε m/min. Επιπρόσθετα, η πρόωση και η ταχύτητα πρόωσης συσχετίζονται με τη σχέση:

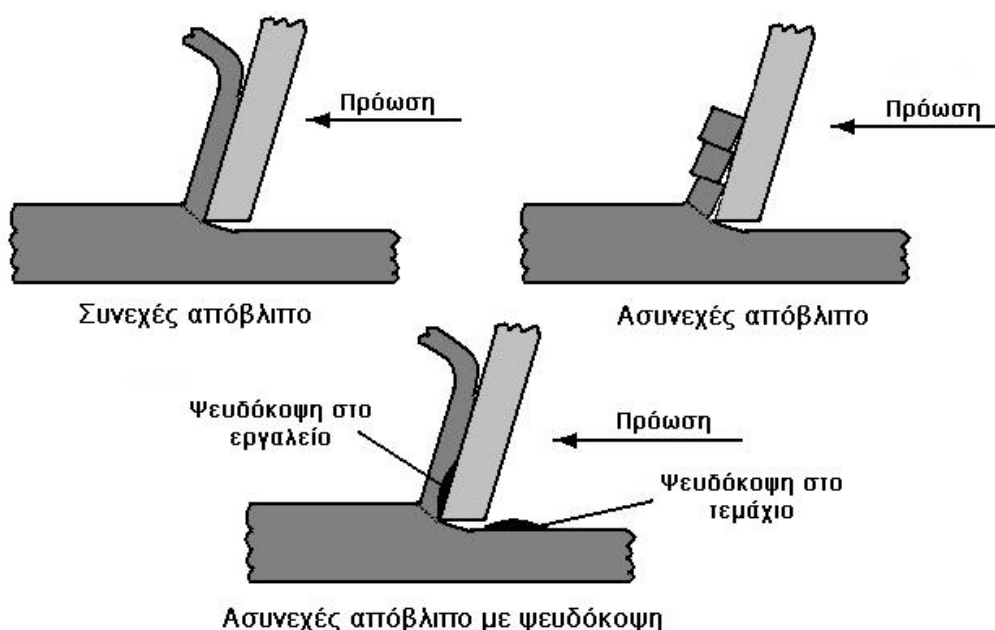
$$v_v = f * n$$

όπου, **n** είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου ή ο αριθμός ενεργών διαδρομών στη μονάδα του χρόνου.

#### 4.2.2. Δημιουργία αποβλίττου

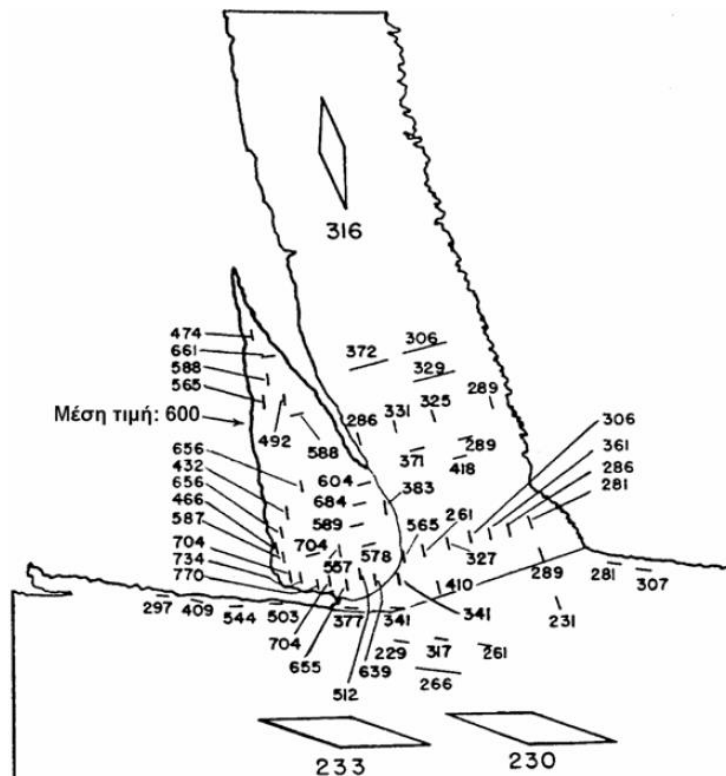
Το απόβλιττο κατά την κοπή λειτουργεί σαν πρώτο δείγμα επιτυχίας ή αποτυχίας. Το απόβλιττο μπορεί να είναι ως προς τη μορφή του συνεχές, ασυνεχές ή ασυνεχές με ψευδόκοψη, μορφές οι οποίες παρουσιάζονται και στην εικόνα 4-5. Το συνεχές απόβλιττο δημιουργείται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης που υφίσταται στην περιοχή της

ζώνης διάτμησης. Το συνεχές απόβλιπτο προκύπτει από κατεργασία όλκιμων υλικών, όπως ο χαλκός, τα θερμοπλαστικά και σύνθετα με μήτρες θερμοπλαστικών. Το ασυνεχές απόβλιπτο προκύπτει λόγω περιοδικής θραύσης του αποβλίπτου κατά τη διέλευση του από τη ζώνη διάτμησης και δημιουργείται από κατεργασία ψαθυρών υλικών, όπως οι χυτοσίδηροι, θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά και σύνθετα με θερμοσκληρυνόμενες μήτρες. Επιπλέον, από τις δύο βασικές μορφές αποβλίπτου, είναι επιθυμητή η συνεχής μορφή κατά την κοπή, καθώς σχετίζεται με ευνοϊκότερες συνθήκες κοπής όσον αφορά την τραχύτητα της επιφάνειας, τις δυνάμεις κοπής και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου. Συνήθως, οι συνθήκες κοπής που υποβοηθούν τη δημιουργία συνεχούς αποβλίπτου είναι η μεγάλη ταχύτητα κοπής, η μεγάλη γωνία αποβλίπτου και η μικρή πρόωση.



Εικόνα 4-5: Είδη μορφών αποβλίπτου

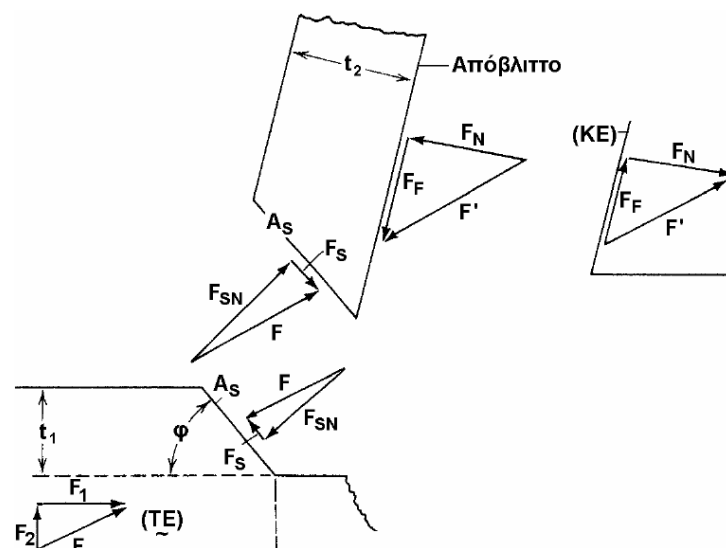
Μερικές φορές κατά την κατεργασία της κοπής, λόγω ύπαρξης των κατάλληλων προϋποθέσεων είναι πιθανό να δημιουργηθεί ψευδόκοψη στην κόψη του εργαλείου. Η ψευδόκοψη είναι ένα ασύμμετρο σφηνοειδές σώμα από παραμορφωμένο και ιδιαίτερα σκληρυμένο υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου και δημιουργείται στην περιοχή μεταξύ κοπτικού εργαλείου, κατεργαζόμενου τεμαχίου και αποβλίπτου. Το σώμα της ψευδόκοψης αυξάνει συνεχώς σε μέγεθος, καθώς επάλληλα λεπτά στρώματα προσκολλώνται στην κόψη του κοπτικού με μηχανισμούς συγκόλλησης μέσω πίεσης, λόγω των οποίων προκύπτει η πολύ υψηλή σκληρότητα της ψευδόκοψης, η οποία παρουσιάζεται σχηματικά στην εικόνα 4-6. Αυτό συμβαίνει μέχρι ένα κρίσιμο σημείο, όπου ένα μεγάλο μέρος της ψευδόκοψης αποκολλάται από το κοπτικό και προσκολλάται στο απόβλιπτο και στην κατεργασμένη επιφάνεια. Αν και το μέρος της ψευδόκοψης που καταλήγει στο απόβλιπτο δεν είναι επιβλαβές για τη διαδικασία της κοπής, το μέρος που προσκολλάται στην κατεργασμένη επιφάνεια, έχει σαν αποτέλεσμα να αλλοιώνει τη μορφολογία της και ουσιαστικά να τη χειροτερεύει, διαφοροποιώντας παράλληλα και τις προβλεπόμενες ανοχές του νεοκατεργασμένου τεμαχίου.



Εικόνα 4-6: Γραφική κατανομή της σκληρότητας στο τεμάχιο, το απόβλιπτο και στη διαμορφωμένη ψευδόκοψη, λόγω της δημιουργίας συνεχούς αποβλίπτου με ψευδόκοψη [13]

#### 4.2.3. Δυνάμεις κοπής

Κατά την κοπή αναπτύσσονται δυνάμεις μεταξύ του τεμαχίου, του κοπτικού εργαλείου και του αποβλίπτου, οι οποίες ονομάζονται δυνάμεις κοπής και αποτελούν σημαντικό στοιχείο για την κατεργαστικότητα ενός υλικού. Το μέγεθος των δυνάμεων αυτών επηρεάζει μία σειρά από παράγοντες, όπως το μέγεθος της εργαλειομηχανής από άποψη ισχύς και η βέλτιστη περιοχή λειτουργίας της εργαλειομηχανής. Οι δυνάμεις κοπής επηρεάζονται δε, από τη μέθοδο της κατεργασίας και το είδος του αποβλίπτου, από τις βασικές συνθήκες κοπής (πρόωση, βάθος κοπής κ.λπ.), το κατεργαζόμενο υλικό και από το κοπτικό εργαλείο.



Εικόνα 4-7: Το σύστημα δυνάμεων που ασκούνται στο απόβλιπτο [13]

Για τον ορισμό των δυνάμεων κοπής, το απόβλιπτο θεωρείται ως ελεύθερο σώμα, απόλυτα στερεό, το οποίο είναι σε ισορροπία, αλλά παράλληλα αλληλεπιδρά με το κοπτικό και το τεμάχιο. Οι δυνάμεις που ασκούνται στο απόβλιπτο φαίνονται στην εικόνα 4-7 και είναι:

- $F_S$ : η αντίσταση του τεμαχίου σε διάτμηση,
- $F_{SN}$ : η κάθετη δύναμη στο επίπεδο της διάτμησης,
- $F_F$ : η δύναμη τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του κοπτικού και του αποβλίπτου και αντιτίθεται στην κίνηση του τελευταίου,
- $F_N$ : η κάθετη δύναμη στη διεπιφάνεια του κοπτικού με το απόβλιπτο

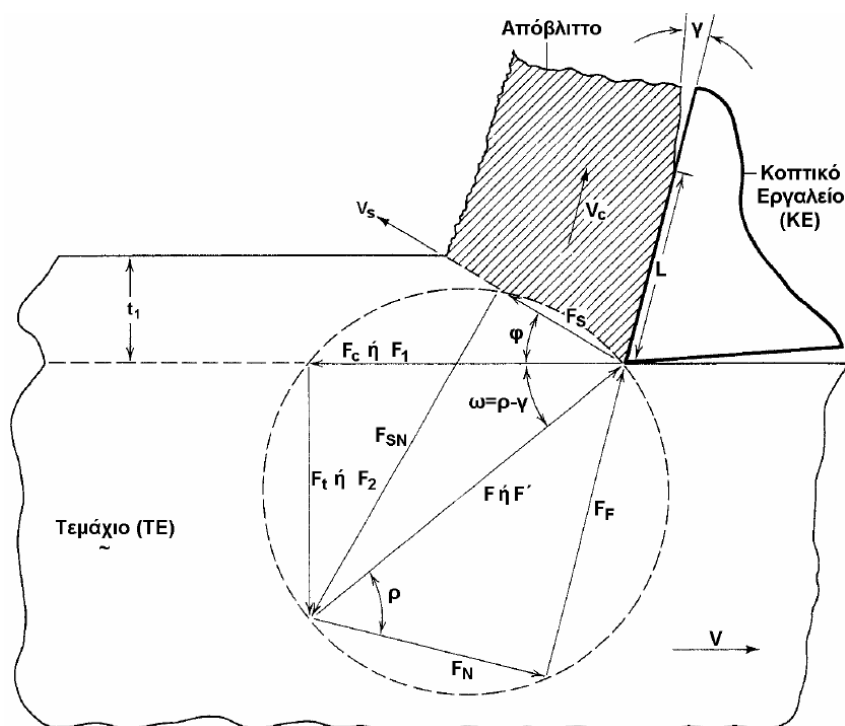
Έτσι, αν  $F$  οριστεί η συνισταμένη των  $F_S$  και  $F_{SN}$  και  $F'$  η συνισταμένη των  $F_F$  και  $F_N$ , για να ισορροπεί το απόβλιπτο θα πρέπει να ισχύει:

$$F = F'$$

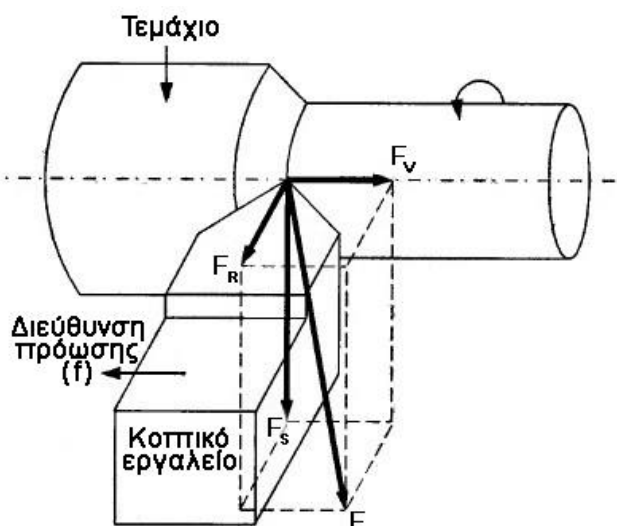
όπου η  $F'$  ορίζεται ως δύναμη κοπής και αν μεταφερθεί στην κόψη του κοπτικού εργαλείου, αναλύεται στα παρακάτω ζευγάρια δυνάμεων:

- $F_S$  και  $F_{SN}$
- $F_F$  και  $F_N$
- $F_1$  και  $F_2$ , οι οποίες είναι η κύρια-οριζόντια συνιστώσα της δύναμης κοπής και η κάθετη στην  $F_1$  – δύναμη άπωσης, αντίστοιχα.

Οι δυνάμεις αυτές εγγράφονται σε κύκλο με διάμετρο ίση με  $F$  ή  $F'$ , ο οποίος παρατίθεται στην εικόνα 4-8, πρωτοσχεδιάστηκε από τον Eugene Merchant το 1945 [14], [15] και ονομάζεται κύκλος του Merchant. Παρόλα αυτά, οι δυνάμεις που αναφέρονται παραπάνω, σχετίζονται με την ορθογωνική κοπή. Στη γενική περίπτωση της λοξής κοπής, η δύναμη κοπής  $F$  αναλύεται σε 3 συνιστώσες στη διεύθυνση των τριών αξόνων  $X, Y, Z$ , οι οποίες είναι κάθετες μεταξύ τους. Οι δυνάμεις αυτές είναι η κύρια δύναμη κοπής  $F_S$ , η δύναμη στη διεύθυνση της πρόωσης  $F_V$  και η δύναμη απώθησης του κοπτικού  $F_R$ , οι οποίες παρουσιάζονται στο σχήμα της εικόνας 4-9.



Εικόνα 4-8: Κύκλος του Merchant [13]



Εικόνα 4-9: Δυνάμεις στη γενική περίπτωση της λοξής κοπής

Τέλος, για να μετρηθούν οι δυνάμεις κοπής χρησιμοποιούνται δυναμόμετρα με πιεζοκρύσταλλους, όπως της εικόνας 4-10, τα οποία ικανοποιούν απαιτήσεις στιβαρότητας κατασκευής, ακρίβειας και ευαισθησίας, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα μέτρησης ενός μεγάλου φάσματος δυνάμεων. Η λειτουργία των δυναμόμετρων με πιεζοκρύσταλλους στηρίζεται στην ιδιότητα των πιεζοκρυσταλλών να προσανατολίζονται προς μία ορισμένη κατεύθυνση ανάλογα με το μέγεθος της πίεσης που τους ασκείται. Στη συνέχεια στέλνονται στην έξοδο του οργάνου τρία ηλεκτρικά φορτία, αντίστοιχα της διεύθυνσης και της έντασης της εφαρμοσμένης δύναμης και κατά αυτό τον τρόπο γίνεται η μέτρηση των δυνάμεων της κοπής.



Εικόνα 4-10: Παράδειγμα δυναμόμετρου με πιεζοκρύσταλλους

### 4.3. Κοπτικό εργαλείο

#### 4.3.1. Γενικά

Πολύ σημαντικό στοιχείο των κατεργασιών κοπής αποτελεί το κοπτικό εργαλείο. Το κοπτικό εργαλείο αρχικά αποτελούσε ένα σώμα προσαρμοσμένο πάνω στην εργαλειομηχανή, γεγονός αντισυμβατικό στην περίπτωση αλλαγής του. Πλέον, τα κοπτικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι ως επί το πλείστον σε μορφή πλακιδίων και προσαρμόζονται σε ειδικά τυποποιημένα στελέχη (μανέλλες). Η γεωμετρία και τα χαρακτηριστικά των κοπτικών πλακιδίων είναι συγκεκριμένα και προβλέπονται από τον κανονισμό ISO 1832 του 2004 [18]. Τα υλικά των κοπτικών εργαλείων χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, τα σιδηρούχα και τα μη σιδηρούχα, όπως παρουσιάζονται στον πίνακα 4-2. Επίσης, τα υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των κοπτικών εργαλείων υπάρχει η απαίτηση να διαθέτουν τις παρακάτω ιδιότητες:

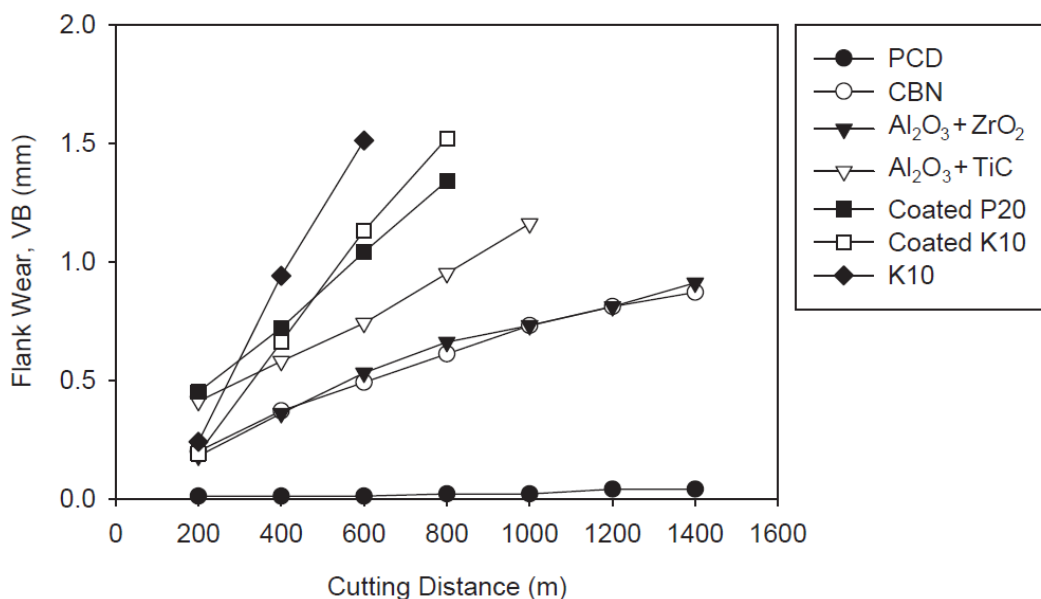


- Σκληρότητα (εν θερμώ), διότι κατά την κοπή αναπτύσσονται πολύ υψηλές θερμοκρασίες.
- Αντίσταση στις απότομες θερμοκρασιακές μεταβολές, διότι το κοπτικό υποβάλλεται σε θερμικά σοκ, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν μικρορωγμές.
- Απουσία συγγένειας με τα κατεργαζόμενα υλικά, διότι μπορεί να προκληθεί ψευδόκοψη.
- Αντίσταση στην οξειδωση, καθώς σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες η ανάπτυξη της είναι πολύ εύκολη.
- Μηχανική αντοχή, ώστε να απορροφούνται οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κοπής, καθώς και οι καταπονήσεις που προέρχονται από την κοπή.

Υλικά κοπτικών εργαλείων	
Σιδηρούχα υλικά (ή εργαλειοχάλυβες)	Μη σιδηρούχα υλικά
Ανθρακούχοι χάλυβες εργαλείων	Σκληρομέταλλα
Κεκραμμένοι χάλυβες εργαλείων	Κεραμικά
Ταχυχάλυβες	Διαμάντια
	Βοριονιτρίδια

Πίνακας 4-2: Υλικά κοπτικών εργαλείων

Παρόλα αυτά, επειδή κανένα γνωστό υλικό, πλην του πολύ ακριβού διαμαντιού, δεν έχει τις ιδιότητες που περιγράφηκαν παραπάνω, η λύση που υιοθετήθηκε για την αύξηση του χρόνου ζωής των κοπτικών εργαλείων, είναι η επικάλυψη του κυρίως υλικού με ένα (ή παραπάνω) λεπτό στρώμα σκληρής επικάλυψης. Οι επικαλύψεις πραγματοποιούνται συνήθως με τη μέθοδο της φυσικής ή χημικής εναπόθεσης ατμών (PVD, CVD) και το πάχος τους φτάνει μερικά μικρόμετρα (1-10 μm). Όμως, αν και με την ανάπτυξη της μεθόδου των επικαλύψεων δεν είναι απαραίτητη η χρήση του πολύ ακριβού διαμαντιού (Polycrystalline Diamond-PCD), λόγω της μικρής συνάφειας μεταξύ υποστρώματος και στρώσης σκληρού υλικού, παρατηρείται μεγάλη διαφορά στην αντοχή των κοπτικών από διαμάντι, από συγκολλημένα καρβίδια του βολφραμίου (cemented tungsten carbides) και από καρβίδια με επίστρωση διαμαντιού, κατά την κοπή συνθέτου GFRP [17], όπως φαίνεται και στο διάγραμμα της εικόνας 4-11.

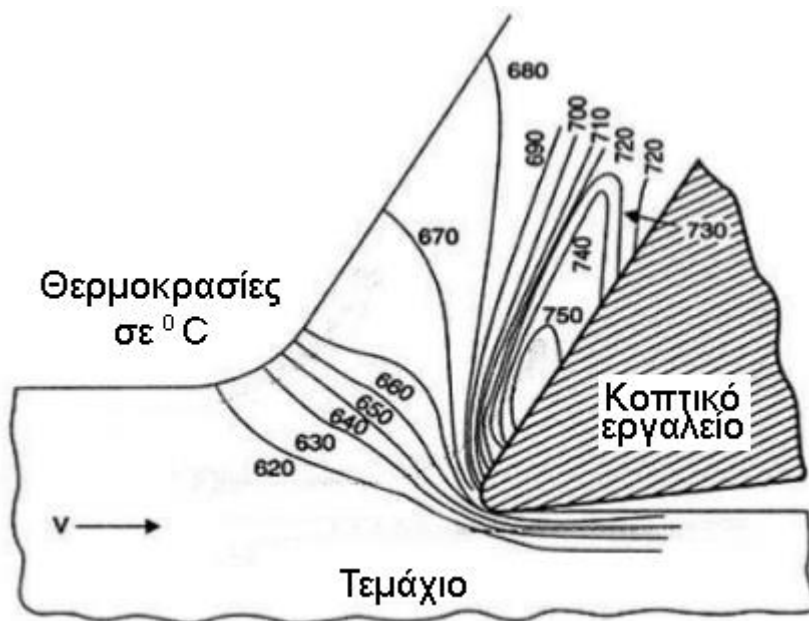


Εικόνα 4-11: Φθορά κοπτικών εργαλείων από διάφορα υλικά κατά την κοπή CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) [16]

### 4.3.2. Αναπτυσσόμενη θερμότητα

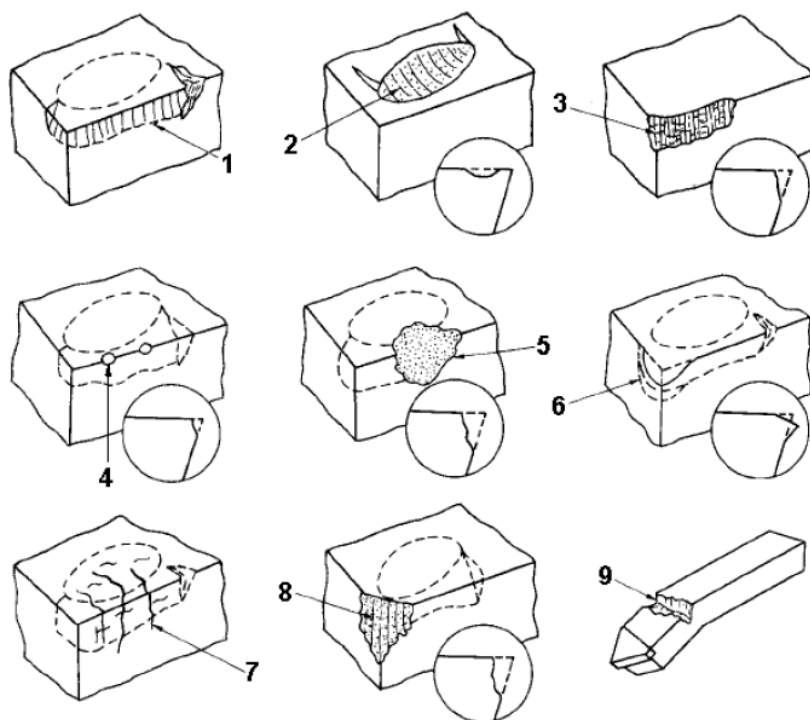
Η ενέργεια που δίδεται από την εργαλειομηχανή σε μορφή ισχύος, καταναλώνεται σε δύο κυρίως περιοχές της κοπής, τη ζώνη διάτμησης και τη ζώνη τριβής μεταξύ κοπτικού εργαλείου και αποβλίπτου. Ενώ, η ισχύς που καταναλώνεται στη ζώνη μεταξύ κοπτικού και κατεργαζόμενου τεμαχίου είναι πολύ μικρότερη, συγκριτικά με τις δύο προαναφερθείσες. Επιπλέον, στη ζώνη πλαστικής παραμόρφωσης το κατεργαζόμενο τεμάχιο υφίσταται πλαστική παραμόρφωση και η ενέργεια παραμόρφωσης μετατρέπεται σε θερμότητα, η οποία σε ένα μεγάλο ποσοστό της τάξεως του 65-80%, απάγεται από το σύστημα μέσω της απομάκρυνσης του αποβλίπτου. Η υπόλοιπη ενέργεια παραμένει σε μορφή θερμότητας στο κοπτικό και στο τεμάχιο.

Παρόλα αυτά, αν και το απόβλιπτο συγκεντρώνει πολύ μεγαλύτερο ποσοστό θερμότητας από το κοπτικό, το γεγονός ότι απομακρύνεται από την περιοχή της κοπής, δεν του επιτρέπει να αυξήσει υπερβολικά τη θερμοκρασία του. Αναντίστοιχα με το κοπτικό, που επειδή παραμένει στην περιοχή κοπής δέχεται συνεχώς θερμότητα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται επικίνδυνα η θερμοκρασία του. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι η μεγαλύτερη παρατηρούμενη θερμοκρασία στο κοπτικό δεν βρίσκεται στη κόψη του, αλλά στην επιφάνεια αποβλίπτου, όπως γίνεται εμφανές και από το σχήμα της εικόνας 4-12, όπου το κοπτικό βρίσκεται σε συνεχή επαφή με το απόβλιπτο και δέχεται θερμότητα μέσω αγωγής, με συνέπεια τη δημιουργία φθοράς κρατήρα. Τέλος, ο πιο σημαντικός παράγοντας στην αύξηση της θερμοκρασίας του κοπτικού είναι η ταχύτητα κοπής, η οποία όσο μεγαλώνει, αναγκάζει τον ρυθμό απομάκρυνσης της θερμότητας να υπολείπεται συγκριτικά με τον ρυθμό έκλυσής της, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού εργαλείου.



Εικόνα 4-12: Σχηματικό γράφημα με τις αναπτυσσόμενες θερμοκρασίες μεταξύ κοπτικού-τεμαχίου-αποβλίπτου

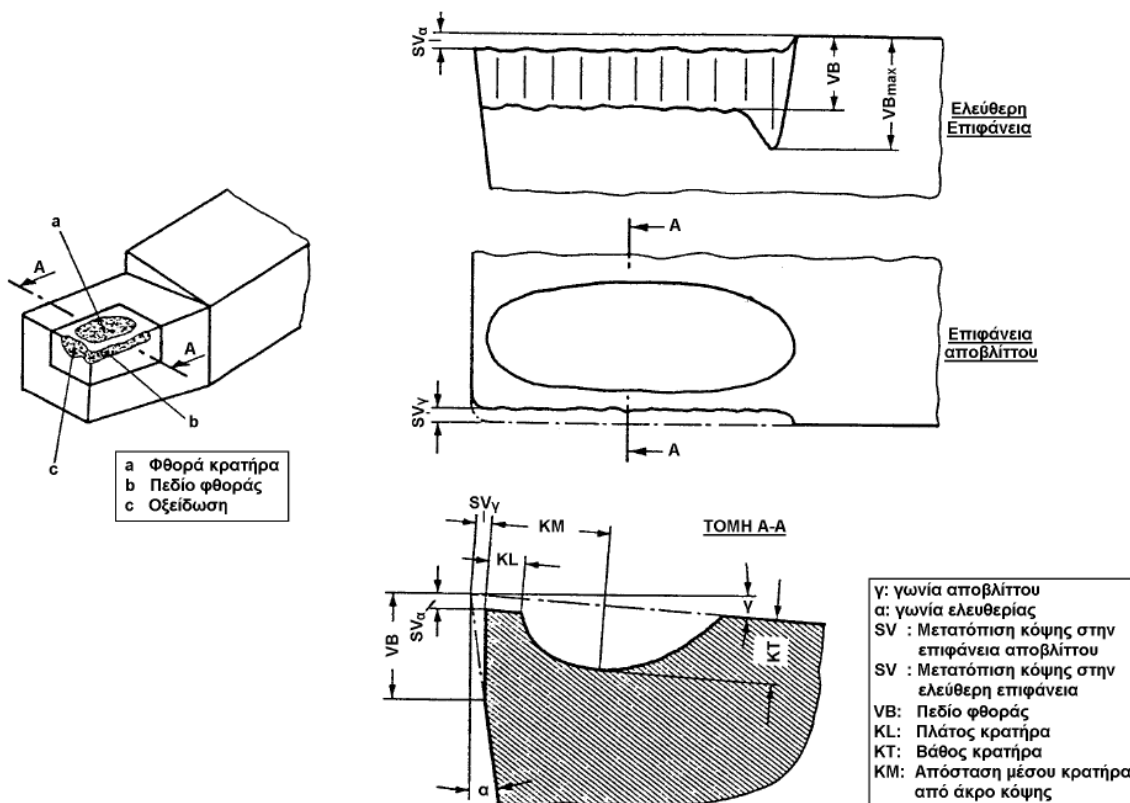
### 4.3.3. Φθορά και διάρκεια ζωής κοπτικού εργαλείου



Εικόνα 4-13: Αιτίες αστοχίας του κοπτικού εργαλείου: 1) πεδίο φθοράς, 2) κρατήρας, 3) απολέπιση, 4) μικροθραύσεις, 5) μεγαλύτερης έκτασης θραύση της κόψης, 6) πλαστική παραμόρφωση ακής, 7) θερμά ρήγματα, 8) θραύση ακής, 9) αστοχία στελέχους [13]

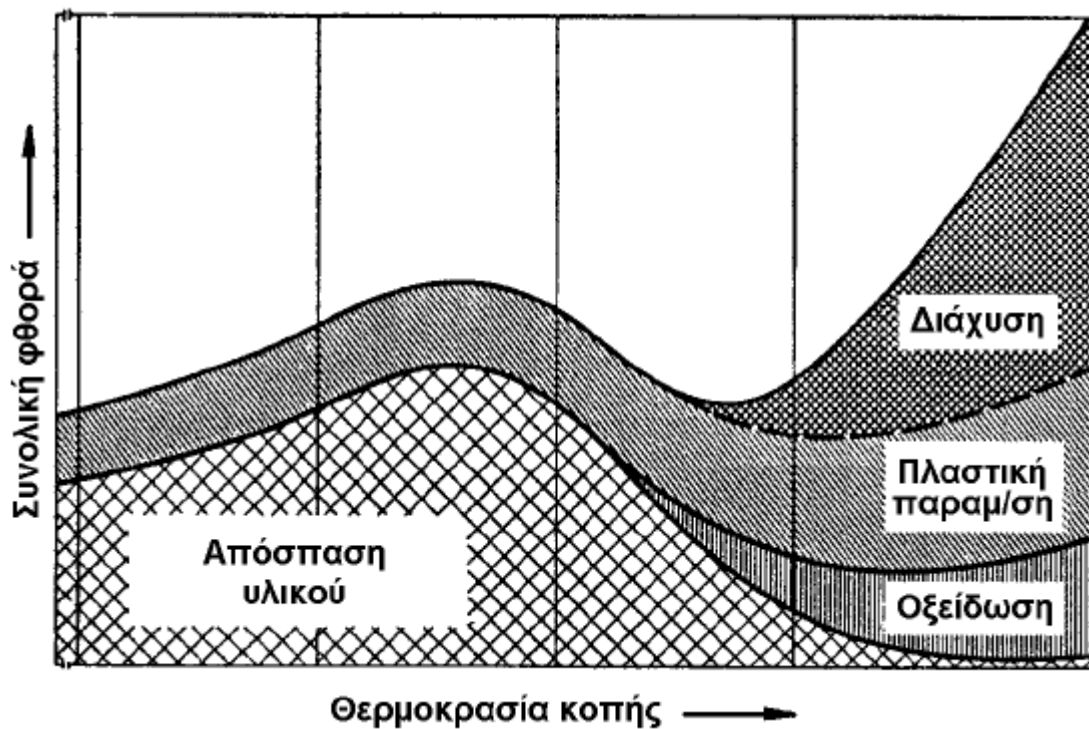
Το κοπτικό εργαλείο κατά την κατεργασία της κοπής δέχεται καταπονήσεις, οι οποίες σαν αποτέλεσμα έχουν είτε τη θραύση του, είτε την υπέρβαση της προκαθορισμένης τιμής σε κάποιο χαρακτηριστικό μέγεθος μέτρησης φθοράς (τα οποία θα αναλυθούν στη συνέχεια). Η φθορά του κοπτικού εντοπίζεται κυρίως στην κύρια και στη δευτερεύουσα επιφάνεια, καθώς και στην επιφάνεια αποβλίπτου, ενώ οι λόγοι πρόκλησής της είναι η ανάπτυξη υψηλών τάσεων και θερμοκρασιών (με απότομη διακύμανση των τελευταίων) στην περιοχή της κοπής, οι φυσικοχημικές αντιδράσεις μεταξύ υλικού του κοπτικού και κατεργαζόμενου υλικού, καθώς και η μεταλλική επαφή στις διεπιφάνειες κοπτικού/αποβλίπτου και κοπτικού/τεμαχίου. Οι λόγοι που οδηγούν στην αχρήστευση του κοπτικού παραθέτονται παρακάτω [13], ενώ στην εικόνα 4-13 πραγματοποιείται σχηματική απεικόνισή τους:

1. Ανάπτυξη πεδίου φθοράς στην ελεύθερη επιφάνεια του κοπτικού εργαλείου.
2. Ανάπτυξη φθοράς κρατήρα στην επιφάνεια αποβλίπτου.
3. Απολέπιση στην περιοχή γύρω από την κόψη, λόγω σχηματισμού ψευδόκοψης και δεσμών συγκόλλησης εν ψυχρώ.
4. Μικροθραύσεις στην κόψη λόγω υψηλής τοπικής φόρτισης.
5. Τοπική θραύση μεγάλης έκτασης της κόψης.
6. Πλαστική παραμόρφωση της μύτης του κοπτικού εργαλείου.
7. Θερμά ρήγματα, λόγω μεγάλης θερμοκρασιακής βάρθρωσης.
8. Θραύση της μύτης του κοπτικού λόγω κρουστικής φόρτισης.
9. Θραύση του στελέχους του κοπτικού εργαλείου, λόγω ισχυρής καμπτικής φόρτισης.



Εικόνα 4-14: Χαρακτηριστικά μεγέθη της φθοράς του κοπτικού εργαλείου [13]

Επιπλέον, από τις αιτίες φθοράς που αναφέρθηκαν οι πιο σημαντικοί, λόγω συχνότητας αστοχίας του κοπτικού οφειλομένης σε αυτούς, είναι το πεδίο φθοράς (**VB**) και η φθορά κρατήρα (**KM**, **KT**), οι οποίοι παρουσιάζονται σχηματικά στην εικόνα 4-14. Το πεδίο φθοράς έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της κόπης του κοπτικού και συνεπώς τη λάθος διαστατική απόδοση στο κατεργαζόμενο τεμάχιο. Επίσης, η ποιότητα της επιφανείας αλλοιώνεται, ενώ λόγω αύξησης της θερμοκρασίας στη ζώνη επαφής, παρατηρείται αύξηση στη δύναμη κοπής. Παράλληλα, η αύξηση του βάθους του κρατήρα στην περίπτωση της φθοράς κρατήρα, αδυνατίζει την κόψη, οδηγώντας σε θραύση του κοπτικού εργαλείου. Οι βασικοί μηχανισμοί φθοράς στους οποίους οφείλονται οι παραπάνω λόγοι θραύσης των κοπτικών εργαλείων, είναι ο σχηματισμός και η λύση συγκολλητών δεσμών, η απόξεση, η διάχυση στερεάς κατάστασης και η οξειδωση. Από αυτούς, σε μικρές ταχύτητες κοπής, πρόωσης και χαμηλές θερμοκρασίες, ο πιο σημαντικός είναι η απόξεση (απόσπαση υλικού), αλλά όπως φαίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 4-15, σε υψηλές ταχύτητες και θερμοκρασίες, κύρια επίδραση έχει η διάχυση.



Εικόνα 4-15: Διάγραμμα θερμότητας κοπής-συνολικής φθοράς κοπτικού εργαλείου, όπου εμφανίζεται η συμβολή των βασικών μηχανισμών φθοράς του κοπτικού εργαλείου [13]

Ακόμα, η φθορά του κοπτικού κατά τη διάρκεια μίας κατεργασίας έχει μεγάλη επιρροή στο τελικό κόστος. Επομένως, επιτακτική ανάγκη αποτελεί η πρόβλεψη της διάρκειας ζωής ενός κοπτικού. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάρκεια ζωής ενός κοπτικού εργαλείου είναι:

- Το κατεργαζόμενο υλικό, μέσω των φυσικών ιδιοτήτων του.
- Το κοπτικό εργαλείο, μέσω των χαρακτηριστικών αυτού (κοπτική ακμή, γωνία αποβλίπτου κ.λπ.) και του συνδυασμού του με τις συνθήκες κοπής.
- Οι συνθήκες διεπαφής, δηλαδή η χρήση ή όχι υγρού κοπής.
- Τα δυναμικά χαρακτηριστικά του συστήματος εργαλειομηχανή - κοπτικό εργαλείο - κατεργαζόμενο τεμάχιο.

Για τον υπολογισμό της διάρκειας ζωής του κοπτικού εργαλείου, αναπτύχθηκαν εμπειρικά μοντέλα, με πιο γνωστή την εξίσωση Taylor [3], η οποία συσχετίζει τη διάρκεια ζωής του κοπτικού με παραμέτρους της κατεργασίας (ταχύτητα κοπής, πρόωση, κ.λπ.) και με κάποιες σταθερές, που υπολογίζονται πειραματικά για κάθε συνδυασμό υλικών κοπτικού και τεμαχίου.

Βασική εξίσωση Taylor:

$$V * L^n = C_1 \quad (n, C_1: \text{σταθερές})$$

Γενικευμένη εξίσωση Taylor:

$$L = \frac{C_2}{V^p * f^q * d^r} \quad (p, q, r, C_2: \text{σταθερές})$$

Γενικευμένη εξίσωση Taylor:

$$V = \frac{C_3}{L^m * f^p * d^q * (BHN/200)^r} \quad (m, p, q, r, C_3: \text{σταθερές})$$

Εξίσωση με βάση τη θερμοκρασία:

$$T * L^n = C_4 \quad (n, C_4: \text{σταθερές})$$

Αργότερα, δημιουργήθηκαν νέα αναλυτικά μοντέλα υπολογισμού της διάρκειας ζωής του κοπτικού [3], τα οποία λαμβάνουν υπόψη το ρυθμό της απώλειας όγκου του υλικού στην επιφάνεια επαφής του εργαλείου ανά μονάδα επιφάνειας και ανά μονάδα χρόνου.

Μοντέλο των Takeyama και Murata:  $dW/dt = G(V, f) + D * e^{(-E/R*T)}$  (G, D: σταθερές)  
Μοντέλο του Usui:  $dW/dt = A * \sigma_n * V_s * e^{(-B/T)}$  (A, B: σταθερές)

όπου για τις παραπάνω σχέσεις:

- L**=διάρκεια ζωής εργαλείου
- T**=θερμοκρασία κοπής
- R**=παγκόσμια σταθερά αερίων
- dW/dt**=ρυθμός φθοράς
- E**=ενέργεια ενεργοποίησης
- V**=ταχύτητα κοπής
- f**=πρόωση
- d**=βάθος κοπής
- BHN**=σκληρότητα
- V<sub>s</sub>**=ταχύτητα ολίσθησης

#### 4.3.4. Υγρά κοπής

Κατά τη διαδικασία της κοπής και για τη διευκόλυνση αυτής χρησιμοποιούνται υγρά, τα οποία έχουν ψυκτική ή/και λιπαντική δράση, ενώ παράλληλα απομακρύνουν και τα σχηματιζόμενα απόβλιττα. Μέσω της ψυκτικής τους δράσης, τα υγρά κοπής αποτρέπουν την υπέρμετρη αύξηση της θερμοκρασίας στο κοπτικό εργαλείο και στο κατεργαζόμενο τεμάχιο, καθώς επίσης περιορίζουν και τις παραμορφώσεις του τελευταίου. Επιπρόσθετα, η λιπαντική δράση των υγρών κοπής λειτουργεί θετικά στη μείωση των τριβών μεταξύ κοπτικού εργαλείου, τεμαχίου και αποβλίττου, συνεπώς αποτελεί και στοιχείο πρόληψης της ανάπτυξης υψηλών θερμοκρασιών που οφείλονται στην τριβή. Τέλος, με την απομάκρυνση των απόβλιττων από την κατεργασμένη επιφάνεια επιτυγχάνεται βελτιωμένη τραχύτητα επιφανείας, καθώς στην κοπή δεν παρεμβάλλονται ξένα σώματα (απόβλιττο απομακρυσμένο από το σύστημα της κοπής).

Ο διαχωρισμός των υγρών κοπής γίνεται αρχικά σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τα έλαια κοπής, τα οποία χαρακτηρίζονται από αυξημένη λιπαντική δράση και τα υδατικά υγρά κοπής, που εμφανίζουν πολύ καλή ψυκτική λειτουργία. Τα μεν πρώτα χωρίζονται περαιτέρω σε απλά ή χημικά μη ενεργά -τα οποία με τη σειρά τους χωρίζονται σε λιπαρά έλαια και ορυκτέλαια- και σε χημικά ενεργά ή με πρόσθετα υψηλής πίεσης. Τα δε υδατικά υγρά κοπής διαχωρίζονται σε γαλακτώματα και σε υδατικά διαλύματα. Επομένως, μεταξύ τόσων επιλογών, για να χρησιμοποιηθεί το σωστό υγρό κοπής πρέπει να ληφθούν υπόψη οι εξής παράγοντες:

- Το είδος της κατεργασίας και τα χαρακτηριστικά (συνθήκες κοπής) αυτής.
- Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Το υλικό και η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου.

Ο τρόπος εφαρμογής του υγρού κοπής μπορεί να λάβει διάφορες μορφές οι οποίες είναι [\[19\]](#):

- Η ψύξη πλημμύρας (Flooded cooling), όπου το υγρό εκτοξεύεται κατευθείαν στο σημείο κοπής, όπως φαίνεται στην [εικόνα 4-16](#).
- Η ξηρή κοπή (Dry machining), όπου δεν χρησιμοποιείται κάποιο υγρό κοπής.
- Η σχεδόν ξηρή/ελάχιστης ποσότητας λιπαντικού κοπή (Near dry/Minimum Quantity Lubricant (MQL) machining), όπου το υγρό κοπής ψεκάζεται με μεγάλη ταχύτητα σε μορφή πάρα πολύ μικρών σταγονιδίων.
- Η κρυογονική ψύξη (Cryogenic cooling), γίνεται χρήση υλικού ψύξης, με πιο κοινά το υγρό άζωτο και το παγωμένο διοξείδιο του άνθρακα, σε θερμοκρασία κάτω από -150 °C.
- Η ψύξη υψηλής πίεσης (High pressure cooling), όπου ο πίδακας του υγρού κοπής εκτοξεύεται με πολύ μεγάλη ακρίβεια στο σημείο της κοπής, μεταξύ είτε κοπτικού και αποβλίττου, είτε κοπτικού και τεμαχίου, ή εσωτερικά από τη μανέλλα συγκράτησης του κοπτικού πλακιδίου [\[20\]](#).

- Η χρήση νανοϋγρών (nanofluid), όπου γίνεται προσθήκη νανοσωματιδίων σε ένα υγρό κοπής, το οποίο λειτουργεί σαν «βάση» ή μήτρα για το σύνθετο υγρό.



Εικόνα 4-16: Ψύξη συστήματος κοπτικού-τεμαχίου αποβλίττου μέσω της μεθόδου της πλημμύρας (Flooded cooling)

## 4.4. Τόρνευση

### 4.4.1. Γενικά

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του Κεφαλαίου, ανάμεσα στις μηχανουργικές κατεργασίες η τόρνευση είναι η πιο παλιά. Αυτό δεν την εμποδίζει να είναι παράλληλα και η πιο παραγωγική μέχρι σήμερα, καθώς περίπου το 40% των μηχανουργικών κατεργασιών πραγματοποιούνται σε κέντρα τόρνευσης. Σε αυτό βοήθησε το γεγονός, ότι μετά την εξέλιξη των συμβατικών τόρνων σε τόρνους ψηφιακής καθοδήγησης, το επόμενο βήμα ήταν η δημιουργία κέντρων τόρνευσης, όπου πέραν των κλασσικών κατεργασιών τόρνευσης, άρχισαν να συμπεριλαμβάνονται και κατεργασίες φρεζαρίσματος, διάτρησης και άλλες. Σαν αποτέλεσμα, αυξήθηκαν οι ρυθμοί παραγωγής και αυτοματοποιήθηκε η παραγωγή, καθώς το τεμάχιο δεν έπρεπε πλέον να αλλάξει μηχανή κατεργασίας, να δεθεί και να μετρηθεί εκ νέου. Παρόλα αυτά, αυτή η αλματώδης εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών, δεν μπορεί να αντικαταστήσει τη γνώση των υλικών, τη γνώση της συμπεριφοράς των κοπτικών και των κατάλληλων συνθηκών κοπής, δηλαδή της τεχνολογίας της κοπής.

Η τόρνευση ορίζεται ως η κατεργασία κοπής με κύρια κίνηση αυτή της περιστροφής της ατράκτου, στην οποία έχει δεθεί το κατεργαζόμενο τεμάχιο και δευτερεύουσα τη μεταφορική κίνηση της πρόωσης του κοπτικού εργαλείου. Θεωρείται συμβατική κατεργασία κοπής, καθώς για την αφαίρεση υλικού χρησιμοποιείται κοπτικό εργαλείο καθορισμένης γεωμετρίας και απλής σημειακής επαφής. Ακόμα, η τόρνευση χωρίζεται σε οριζόντια ή κατακόρυφη, ανάλογα με τη διάταξη του άξονα τόρνευσης, καθώς και σε εξωτερική ή εσωτερική τόρνευση, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση της κατεργαζόμενης επιφάνειας, αν βρίσκεται δηλαδή στο εσωτερικό μέρος ή στο εξωτερικό μέρος του κατεργαζόμενου τεμαχίου αντίστοιχα. Επιπλέον, εξετάζοντας τη σχέση κύριας και δευτερεύουσας κίνησης, η τόρνευση χωρίζεται σε διαμήκη, όπου η κίνηση πρόωσης είναι παράλληλη στον άξονα τόρνευσης και σε εγκάρσια τόρνευση, στην οποία η κίνηση της πρόωσης είναι κάθετη στον άξονα της τόρνευσης. Τέλος, πολύ σημαντικές κρίνονται οι ειδικές περιπτώσεις, στις οποίες ανήκει και η σπειροτόμηση, εσωτερική ή εξωτερική.

#### 4.4.2. Ο τόνος

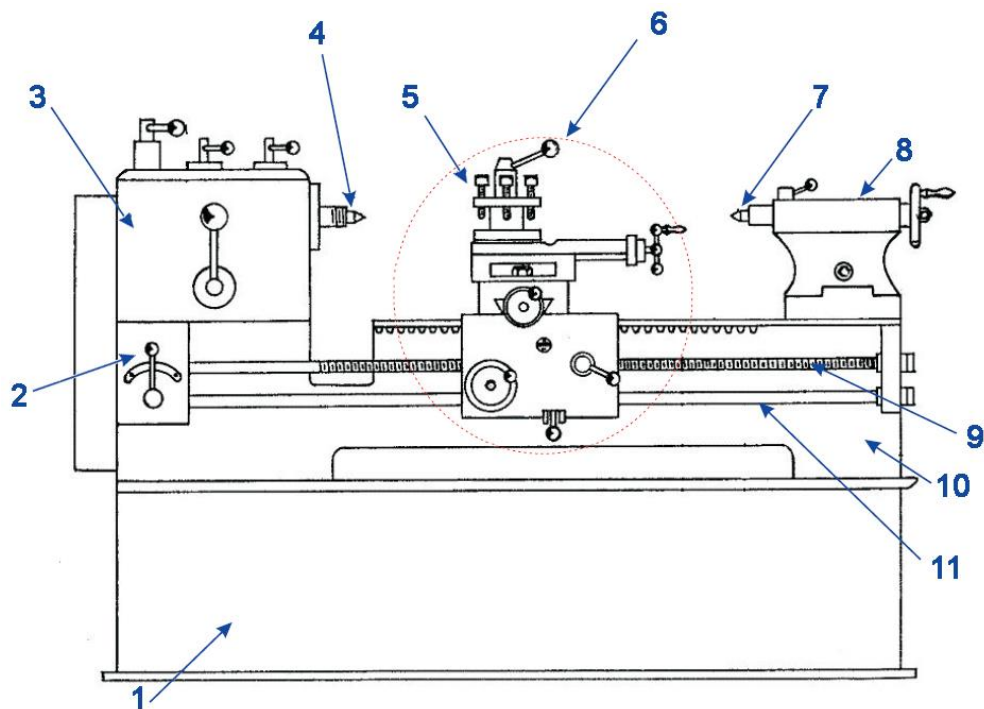


Εικόνα 4-17: Αριστερά παρουσιάζεται ένας συμβατικός τόνος, ενώ δεξιά ένα σύγχρονο CNC κέντρο κατεργασίας τόννευσης

#### Συμβατικός τόνος

Η γενική περίπτωση τόνου, η οποία θα αναλυθεί, είναι ο συμβατικός τόνος μετωπικής τόννευσης, σχηματική αναπαράσταση του οποίου υπάρχει στο αριστερό μέρος της εικόνας 4-17. Τα μέρη ενός συμβατικού τόνου, τα οποία φαίνονται και στην εικόνα 4-18, είναι:

1. Έδραση
2. Κιβώτιο προώσεων
3. Κιβώτιο ταχυτήτων
4. Σφιγκτήρας τεμαχίου (τσοκ)
5. Σφιγκτήρας εργαλείου
6. Εργαλειοφορείο
7. Πινόλη
8. Κεντροφορέας (κουκουβάγια)
9. Κινητήρια άτρακτος σπειρωμάτων
10. Κρεβάτι
11. Κινητήρια άτρακτος πρόωσης



Εικόνα 4-18: Σχέδιο συμβατικού τόνου με τα βασικά μέρη του



### Ψηφιακά καθοδηγούμενος τόννος

Ένας ψηφιακά καθοδηγούμενος τόννος διαφέρει από ένα συμβατικό τόννο, κυρίως στο χειρισμό, ο οποίος δεν πραγματοποιείται από τον ατμοκίνητο, αλλά από προγραμματιστή. Αυτό συμβαίνει καθώς η διαδικασία της κατεργασίας τόννευσης ελέγχεται σχεδόν εξ ολοκλήρου μέσω της μονάδας καθοδήγησης, η οποία έχει τη δυνατότητα να δέχεται πληροφορίες, εντολές, να αποθηκεύει, να επεξεργάζεται και να παρουσιάζει δεδομένα. Οι εντολές που δέχεται η μονάδα καθοδήγησης είναι συγκεκριμένης μορφής και ονομάζονται κώδικας μηχανής. Ο κώδικας μηχανής περιέχει πληροφορίες για τα γεωμετρικά και τα τεχνολογικά δεδομένα του προγράμματος, όπως φαίνεται στο παράδειγμα προγράμματος, που παρουσιάζεται στην εικόνα 4-19. Τα γεωμετρικά δεδομένα αφορούν τις κινήσεις του κοπτικού εργαλείου και προγραμματίζονται με τις εντολές προγραμματισμού G, ενώ τα τεχνολογικά δεδομένα αποτελούνται από πληροφορίες σχετικές με τα χρησιμοποιούμενα εργαλεία, τις συνθήκες κοπής και άλλες λειτουργίες της εργαλειομηχανής. Ο προγραμματισμός του τόννου πραγματοποιείται σε δύο άξονες κυρίως, στον άξονα X που ελέγχει την εγκάρσια κίνηση του κοπτικού εργαλείου και στον άξονα Z, ο οποίος ελέγχει τη διαμήκη κίνηση του κοπτικού. Συνεπώς, ο κώδικας που χρησιμοποιείται για την κατεργασία του τεμαχίου περιέχει συντεταγμένες των αξόνων X και Z, ώστε να γνωρίζει σε ποιο σημείο ακριβώς θα γίνει η κατεργασία και τι μορφή θα έχει.

```
%  
O201501  
N5 G40 G80 G90 G99 G54 G18 G21  
N10 S400 M03 T01  
N15 G00 Z2.  
N20 G00 X5.  
N25 G01 X-0.5 F1.  
N30 G01 Z-50. F0.13  
N35 G01 Z-100. F0.37  
N40 G01 Z-150. F0.6  
N45 G00 Z2.X5.  
N50 G01 X-1.8 F1.  
N55 G01 Z-50. F0.13  
N60 G01 Z-100. F0.37  
N65 G01 Z-150. F0.6  
N70 G00 Z2.X5.  
N75 G01 X-3.8 F1.  
N80 G01 Z-50. F0.13  
N85 G01 Z-100. F0.37  
N90 G01 Z-150. F0.6  
N95 G00 Z2.X5.  
N100 M05  
N105 M30  
%
```

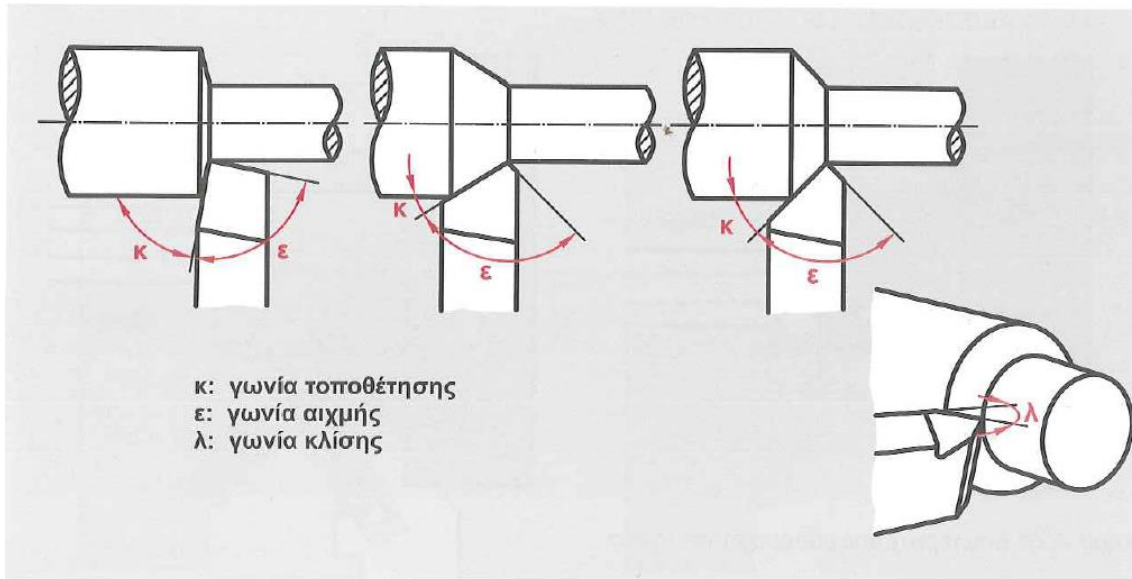
Εικόνα 4-19: Παράδειγμα προγράμματος γραμμένο σε κώδικα μηχανής (G-κώδικα)

#### 4.4.3. Το κοπτικό στην τόννευση

Το κοπτικό εργαλείο, το οποίο έχει αναλυθεί σε προηγούμενο σημείο του παρόντος Κεφαλαίου, εκτός από τα γνωρίσματα που διαθέτουν τα κοπτικά σε κατεργασίες αφαίρεσης υλικού, διαθέτει στην κατεργασία της τόννευσης και τρεις επιπλέον γωνίες [3], οι οποίες γίνονται εμφανείς στο σχήμα της εικόνας 4-20. Αυτές είναι:

- Η γωνία τοποθέτησης  $\kappa$ , η οποία ορίζεται ως η γωνία ανάμεσα στην κύρια κοπτική ακμή και στην κατεργαζόμενη επιφάνεια.

- Η γωνία αιχμής  $\epsilon$ , η οποία είναι η γωνία μεταξύ της κύριας και της δευτερεύουσας κόψης του κοπτικού εργαλείου.
- Η γωνία κλίσης  $\lambda$ , η οποία προσδιορίζει τη γωνία κλίσης της κύριας κοπτικής ακμής του κοπτικού σε σχέση με το οριζόντιο επίπεδο.



Εικόνα 4-20: Χαρακτηριστικές γωνίες τοποθέτησης στην τόννευση [3]

Επιπλέον, τα κοπτικά εργαλεία στην τόννευση συνήθως προορίζονται για να κόβουν μόνο από τη μία πλευρά (αριστερόκοπτα, ή δεξιόκοπτα), ενώ ανάλογα με την κατεργασία για την οποία χρησιμοποιούνται, μπορούν να διαχωριστούν σε:

- Εργαλεία εκχόνδρισης
- Εργαλεία αποπεράτωσης
- Πλευρικά εργαλεία
- Εργαλεία ειδικών μορφών

#### 4.4.4. Οι συνθήκες κοπής

Στην τόννευση οι συνθήκες κατεργασίας είναι η ταχύτητα κοπής, η πρόωση και το βάθος κοπής. Η πρόωση (mm/rev) εκφράζει την ταχύτητα κίνησης του κοπτικού σε χιλιοστά ανά περιστροφή του τεμαχίου και συμβολίζεται με  $f$ , ενώ το βάθος κοπής (mm) συμβολίζεται με  $a$ , μετράται συνήθως σε χιλιοστά και είναι το βάθος διείσδυσης του κοπτικού εντός του τεμαχίου. Επίσης, η ταχύτητα κοπής ορίζεται ως η σχετική ταχύτητα μεταξύ του κατεργαζόμενου τεμαχίου και του κοπτικού, αναφερόμενη στην κύρια κίνηση κοπής και υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$v = \pi * D * n$$

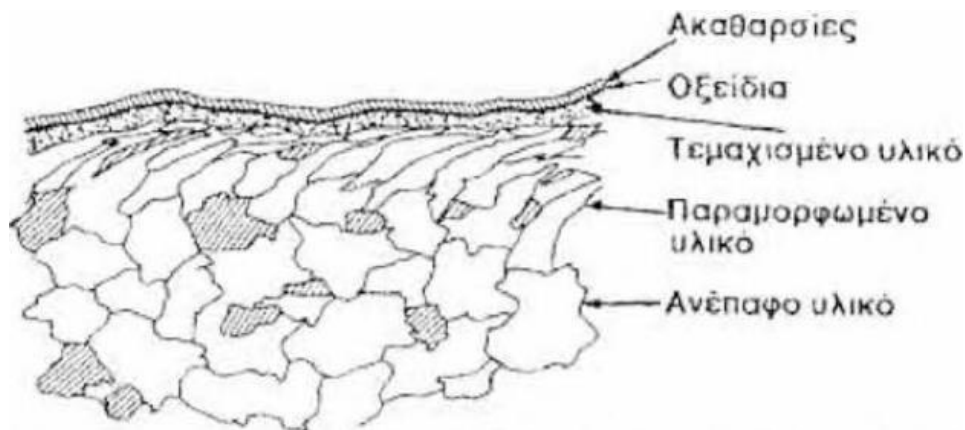
όπου  $D$  είναι η αρχική διάμετρος του κατεργαζόμενου τεμαχίου και  $n$  είναι η ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου.

Βάσει αυτών των συνθηκών προκύπτουν και η ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ο χρόνος κατεργασίας του τεμαχίου, η διάρκεια ζωής του κοπτικού εργαλείου και οι αναπτυσσόμενες δυνάμεις κατά την κοπή.

## 5. Τραχύτητα

### 5.1. Γενικά

Η τραχύτητα είναι ένα από τα χαρακτηριστικά της τοπογραφίας μίας επιφάνειας. Αφού ένα αντικείμενο μορφοποιηθεί λόγω μηχανικών, χημικών και θερμικών επιδράσεων, αποκτά επιφάνεια με διαφορετικά χαρακτηριστικά από το υπόλοιπο σώμα, τα οποία στο σύνολο τους αποτελούν την ποιότητα επιφάνειας (surface integrity) του κατεργασμένου αντικειμένου. Επιπλέον, ο όρος «ποιότητα επιφάνειας» αναφέρεται σε φυσικοχημικά και μηχανικά χαρακτηριστικά, αλλά και σε γεωμετρικά. Τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά γίνονται ορατά με μία τομή κάθετη στην κατεργασμένη επιφάνεια σαν στρώσεις, όπως γίνεται εμφανές στην εικόνα 5-1, οι οποίες προσδιορίζουν την τελική εμφάνιση και τη συμπεριφορά της επιφάνειας του αντικειμένου.

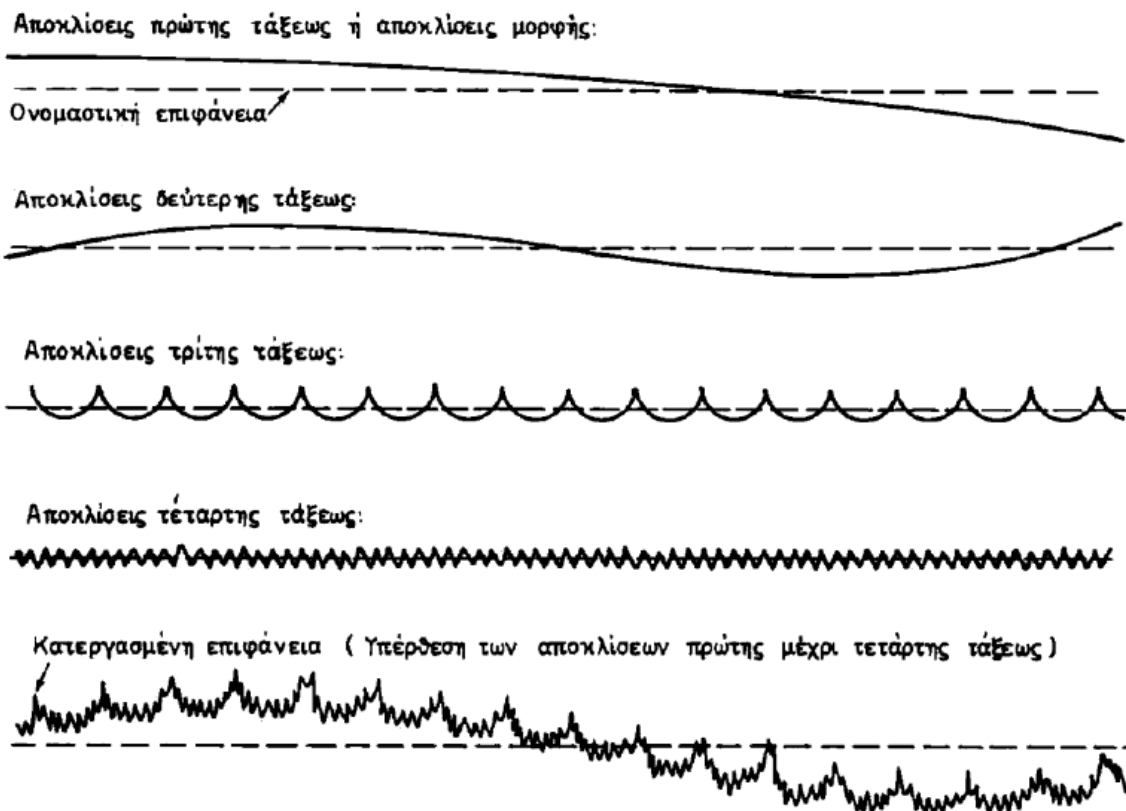


Εικόνα 5-1: Κάθετη τομή κατεργασμένης επιφάνειας [1]

Για κάθε τεχνολογική εφαρμογή και προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση της επιφάνειας, στη φάση του σχεδιασμού του στερεού προκαθορίζονται τα αποδεκτά γεωμετρικά όρια της επιφανειακής τοπογραφίας του, δηλαδή η αποδεκτή ποιότητα της επιφάνειας. Παρόλα αυτά, η τελική νεοκατεργασμένη επιφάνεια συνήθως αποκλίνει από τη θεωρητική μορφή της, δηλαδή τη μορφή που έχει προβλεφθεί στο μηχανολογικό σχέδιο του τεμαχίου. Οι αποκλίσεις χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες, οι οποίες παρουσιάζονται και στην εικόνα 5-2:

- Αποκλίσεις πρώτης τάξης, ή αλλιώς αποκλίσεις μορφής. Είναι μακρογεωμετρικές αποκλίσεις από την ονομαστική επιφάνεια και μπορεί να είναι της τάξεως μερικών χιλιοστών (mm). Συνδέονται με τη λανθασμένη ρύθμιση της εργαλειομηχανής, καθώς και των παραμέτρων κατεργασίας και αναφέρονται στην επιπεδότητα, στην καθετότητα, στην παραλληλότητα και αλλού.
- Αποκλίσεις δεύτερης τάξης, οι οποίες συνδέονται με τις ταλαντώσεις της μηχανής κατά τη διάρκεια της κατεργασίας, με εκκεντρότητα του κομματιού ή του εργαλείου και άλλα. Χαρακτηρίζονται ως κυμάτωση της επιφάνειας, είναι της τάξεως του χιλιοστού (mm) και γίνονται αντιληπτές ως περιοδικά επαναλαμβανόμενες μακροσκοπικές εξάρσεις ή/και βυθίσεις του συνολικού ανάγλυφου [2].
- Αποκλίσεις τρίτης τάξης, οι οποίες είναι ανωμαλίες της επιφάνειας και είναι της τάξεως μερικών μικρών (μm). Εμφανίζονται υπό μορφή αυλακώσεων και συνδέονται με τη γεωμετρία των κοπτικών άκρων και με την κινηματική των κατεργασιών. Χαρακτηρίζονται ως τραχύτητα της επιφάνειας (roughness).
- Αποκλίσεις τέταρτης τάξης, οι οποίες είναι μικρογεωμετρικές ανωμαλίες της επιφάνειας, τάξης μεγέθους νανόμετρου (nm) και οφείλονται κυρίως σε φθορά του κοπτικού εργαλείου, δημιουργία ψευδοκοπής, λανθασμένη τρόχιση του εργαλείου και άλλα.

- Αποκλίσεις πέμπτης και ανώτερης τάξης, οι οποίες είναι ανωμαλίες της επιφάνειας μικρογεωμετρικής μορφής (μικροτραχύτητα), που αποδίδονται σε φυσικές και χημικές επιδράσεις στη δομή του υλικού.



Εικόνα 5-2: Κατηγορίες αποκλίσεων νεοκατεργασμένης επιφάνειας [2]

Από τις αποκλίσεις αυτές, οι αποκλίσεις πρώτης και δεύτερης τάξης αποτελούν τα μακρογεωμετρικά σφάλματα της επιφάνειας, ενώ οι αποκλίσεις τρίτης, τέταρτης και ανώτερης τάξης αποτελούν αυτό που αποκαλείται «τραχύτητα επιφανείας» (surface roughness). Η τραχύτητα της κατεργασμένης επιφάνειας επηρεάζεται, σε διαφορετικό πάντα βαθμό, από τους εξής παράγοντες [3]:

- Την κινηματική της κατεργασίας (σχετική κίνηση εργαλείου-τεμαχίου).
- Το υλικό του κατεργαζόμενου τεμαχίου.
- Τα μορφολογικά χαρακτηριστικά, την τραχύτητα επιφανείας και τη φθορά του κοπτικού εργαλείου.
- Τις συνθήκες κατεργασίας, δηλαδή την ταχύτητα κοπής, την πρόωση και το βάθος κοπής.
- Τη χρησιμοποίηση ή όχι υγρού κοπής, καθώς και τις ιδιότητες αυτού.
- Την εργαλειομηχανή, όσων αφορά την επίτευξη ακρίβειας.
- Καθώς και τις ταλαντώσεις του συστήματος.

## 5.2. Τραχύτητα

Η ποιότητα μίας κατεργασμένης επιφάνειας χαρακτηρίζεται κυρίως από την τραχύτητα της. Ο καθορισμός την επιθυμητής ή αποδεκτής τραχύτητας για ένα εξάρτημα είναι μείζονος σημασίας στην περίπτωση συνεργαζόμενων επιφανειών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τραχύτητα των επιφανειών επιδρά:

- Στις συνθήκες που δημιουργούνται μεταξύ των σωμάτων κατά την επαφή, όπως ο συντελεστής τριβής, η φθορά τους και άλλα.
- Στη ρευστομηχανική των λιπαντικών ή των υγρών στα τοιχώματα.

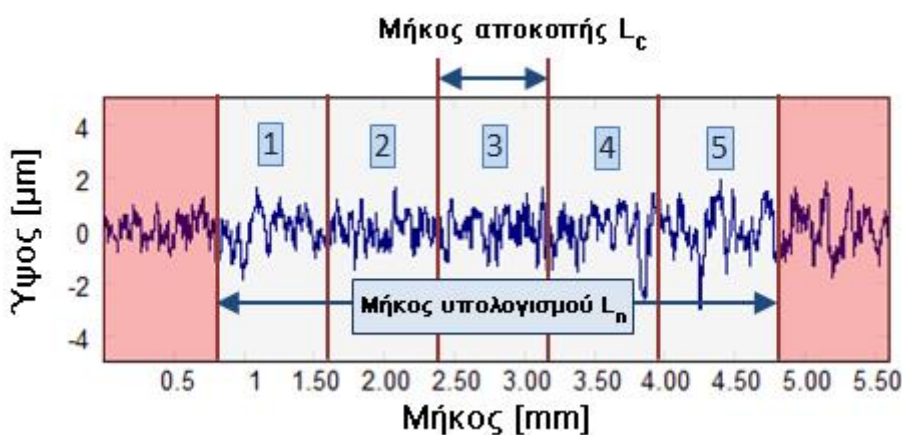
- Στους συντελεστές μετάδοσης της θερμότητας μεταξύ των σωμάτων που έρχονται σε επαφή.
- Στην αντίσταση στη διάβρωση .
- Και στην αντοχή σε κόπωση των δύο σωμάτων που εφάπτονται.

Παρόλα αυτά, η τραχύτητα αν και έχει καθοριστικό ρόλο στην εκτίμησης της ποιότητας μίας επιφάνειας, δεν είναι μετρίσιμο μέγεθος, καθώς δεν αποτελείται από διακριτά στοιχεία. Έτσι μπορεί να ειπωθεί ότι η τραχύτητα δεν μετράται, αλλά χαρακτηρίζεται. Επειδή μία μηχανολογική επιφάνεια παρουσιάζει κορυφές και κοιλάδες, τα χαρακτηριστικά που μελετούνται ώστε να καθοριστεί η ποιοτική τιμή μίας επιφάνειας είναι το εύρος των κορυφών και των κοιλάδων, η απόσταση μεταξύ αυτών, καθώς και η μορφολογία τους. Για να αποκτηθούν δεδομένα, ώστε να υπολογιστούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά υπάρχουν δύο μετρολογικά συστήματα:

- Το σύστημα **E** ή σύστημα περιβάλλουσας (Envelope system), που χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο στη δυτική Ευρώπη.
- Το σύστημα **M** ή σύστημα κεντρικής γραμμής (Mean line system), που βρίσκει χρήση κυρίως στις Αγγλοσαξονικές χώρες και στην Ανατολική Ευρώπη.

Το σύστημα E δεν χρησιμοποιείται ευρέως, συνεπώς δε θα αναλυθεί περαιτέρω. Το σύστημα M χρησιμοποιείται για την εξαγωγή αποτελεσμάτων στην παρούσα εργασία, καθώς βάσει αυτού λειτουργούν και τα τραχύμετρα που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις των κατεργασμένων επιφανειών. Συνεπώς είναι αυτό το οποίο θα αναλυθεί εκτενέστερα.

Αρχικά, στο σύστημα M ορίζεται μία γραμμή αναφοράς, η «κεντρική γραμμή» ή αλλιώς «μέση γραμμή» (Center Line – **CL**). Ως κεντρική γραμμή ορίζεται η παράλληλη γραμμή προς τη γενική κατεύθυνση του πραγματικού περιγράμματος της επιφάνειας, τέτοια ώστε τα σχηματιζόμενα εμβαδά από τις κοιλάδες και τις κορυφές της πραγματικής επιφάνειας, κάτω και πάνω από τη γραμμή αυτή, να είναι ίσα για συγκεκριμένο μήκος μέτρησης, το οποίο ονομάζεται μήκος υπολογισμού (evaluation length) και συμβολίζεται με **L** ή **L<sub>n</sub>**. Το μήκος υπολογισμού χωρίζεται σε δύο ή παραπάνω μέρη, τα οποία ονομάζονται μήκη αποκοπής (cut-off length) ή δειγματοληπτικά μήκη (sampling length) και συμβολίζονται με **l** ή **L<sub>c</sub>**. Και τα δύο μήκη παρουσιάζονται στην εικόνα 5-3 παρακάτω. Με το μήκος αποκοπής διαχωρίζονται η τραχύτητα από τους κυματισμούς της επιφάνειας, συνεπώς συμβάλει στον ορθό υπολογισμό των παραμέτρων της τραχύτητας [21]. Το μήκος αποκοπής πρέπει να έχει μήκος τέτοιο, ώστε να παρέχονται δεδομένα αρκετά για να δημιουργηθεί ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του προφίλ της επιφάνειας, αλλά παράλληλα να μην είναι τόσο μεγάλο, σε βαθμό που να αποδίδονται στην τραχύτητα μακρογεωμετρικά χαρακτηριστικά τα οποία έχουν σχέση με σφάλματα μορφής, όπως η κυμάτωση.



Εικόνα 5-3: Μήκος υπολογισμού  $L_n$  και μήκος αποκοπής  $L_c$

Τα μέτρα της τραχύτητας τα οποία έχουν προταθεί είναι πάρα πολλά, με ποικίλα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα το καθένα. Τα μέτρα αυτά ονομάζονται παράμετροι της τραχύτητας και χωρίζονται σε τρεις κύριες κατηγορίες, αναλόγως τα χαρακτηριστικά του περιγράμματος που ποσοτικοποιούν:

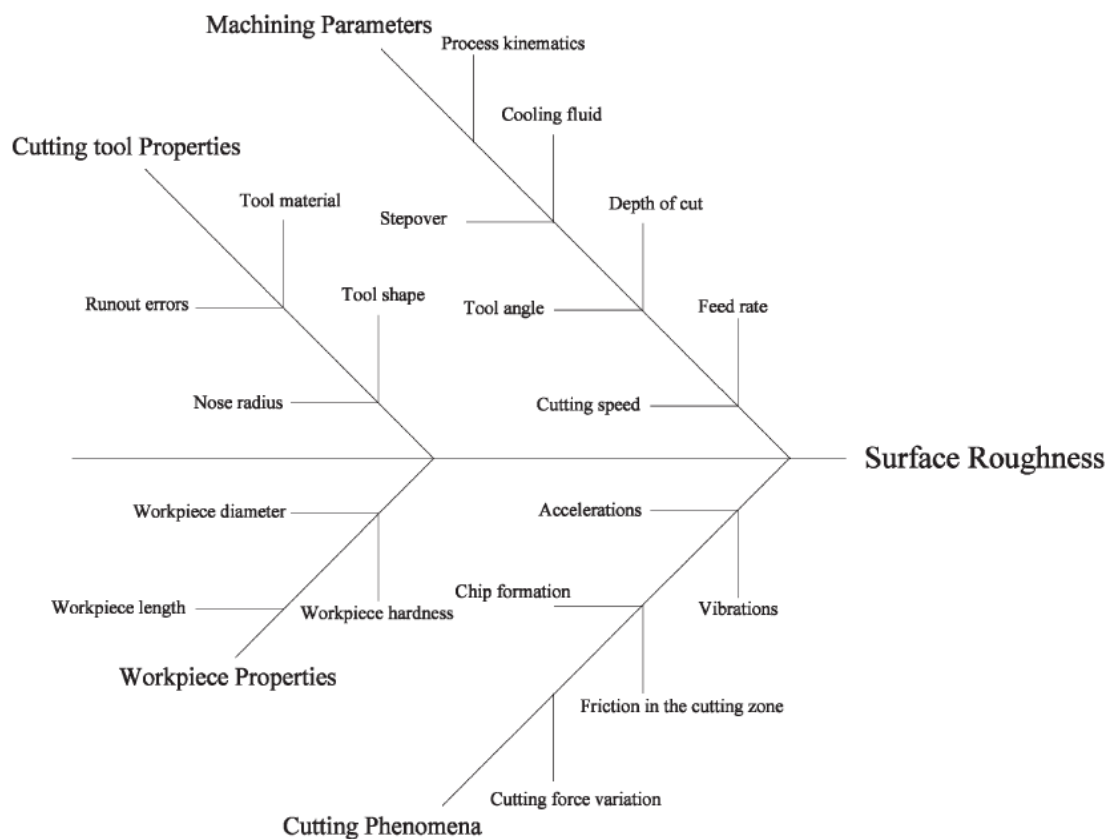
- Παράμετροι ύψους (amplitude parameters), οι οποίες αποτελούν τη σημαντικότερη κατηγορία και περιγράφουν την κάθετη απόσταση μεταξύ κορυφών και κοιλάδων.
- Παράμετροι μήκους (spacing parameters), οι οποίες συντελούν στη μέτρηση των οριζόντιων αποκλίσεων των ανωμαλιών της επιφάνειας.
- Υβριδικές παράμετροι (hybrid parameters), οι οποίες αποτελούν συνδυασμό των παραμέτρων ύψους και των παραμέτρων μήκους.

Ακόμα, σε μία έρευνα για το πόσο επηρεάζουν ποσοστιαία την επιφανειακή τραχύτητα οι συνθήκες κοπής ενός ενισχυμένου με ίνες γυαλιού πλαστικού, οι J. Paulo Davim και Fransisco Mata [\[6\]](#), κάνοντας στατιστική ανάλυση για δύο διαφορετικές τεχνικές κατασκευής δοκιμίων (filament winding και hand lay-up) και δύο διαφορετικές παραμέτρους τραχύτητας ( $R_a$  και  $R_t$ ), κατέληξαν ότι η επιφανειακή τραχύτητα αυξάνεται με αύξηση της πρόωσης και με μείωση της ταχύτητας κοπής. Επίσης, συμπέραναν ότι η μέθοδος hand lay-up έχει ως αποτέλεσμα μικρότερη τραχύτητα μετά την κατεργασία και ότι από τις δύο παραμέτρους κοπής, η πρόωση επηρεάζει σε μεγαλύτερο βαθμό την επιφανειακή τραχύτητα.

Είναι λογικό να υπάρχει η ανάγκη για πρόβλεψη της τραχύτητας της επιφάνειας ενός κατεργασμένου τεμαχίου. Παρακάτω θα αναφερθεί μία προσπάθεια να συγκεντρωθούν σε ένα πρόγραμμα οι περισσότερες παράμετροι τραχύτητας. Μία παρόμοια εργασία, αλλά με συγκέντρωση των τρόπων πρόβλεψης της τραχύτητας μίας κατεργασμένης επιφάνειας, εκπονήθηκε από τους P.G. Benardos και G.C. Vosniakos [\[7\]](#), όπου συγκεντρώθηκαν και σχολιάστηκαν διάφοροι τρόποι και στρατηγικές πρόβλεψης. Οι ερευνητές των μελετών που εξετάστηκαν, έλαβαν υπόψη τους αρκετές παραμέτρους της κοπής, που επηρεάζουν την τελική τραχύτητα μίας κατεργασμένης επιφάνειας και οι οποίες παρατίθενται στο διάγραμμα με μορφή ψαροκόκαλου στην [εικόνα 5-4](#). Οι κατεργασίες που πραγματεύονταν οι μελετημένες εργασίες, αφορούσαν φρεζάρισμα και τórνευση και δημιουργήθηκαν τέσσερις κύριες κατηγορίες προσέγγισης/πρόβλεψης, στις οποίες χωρίστηκαν οι εργασίες. Αυτές ήταν:

- Προσεγγίσεις βασισμένες στη θεωρία κατεργασιών, οι οποίες αναπτύσσουν αναλυτικά μοντέλα και/ή υπολογιστικούς αλγορίθμους ώστε να αναπαρασταθούν οι κατεργασμένες επιφάνειες.
- Προσεγγίσεις οι οποίες αναπαριστούν το πώς επηρεάζουν διάφοροι παράγοντες, κατά την εκτέλεση των πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων.
- Προσεγγίσεις στις οποίες χρησιμοποιείται σχεδιασμός πειραμάτων.
- Προσεγγίσεις τεχνητής νοημοσύνης (Artificial Intelligence, AI).

Από τις τέσσερις παραπάνω προσεγγιστικές μεθόδους, οι πιο πολλά υποσχόμενες αποδείχτηκαν οι θεωρητικές και αυτές που χρησιμοποιούν μεθόδους τεχνητής νοημοσύνης.



Εικόνα 5-4: Διάγραμμα ψαροκόκκαλο με τις παραμέτρους που επηρεάζουν την τελική τραχύτητα μίας κατεργασμένης επιφάνειας

### 5.3. Παράμετροι τραχύτητας

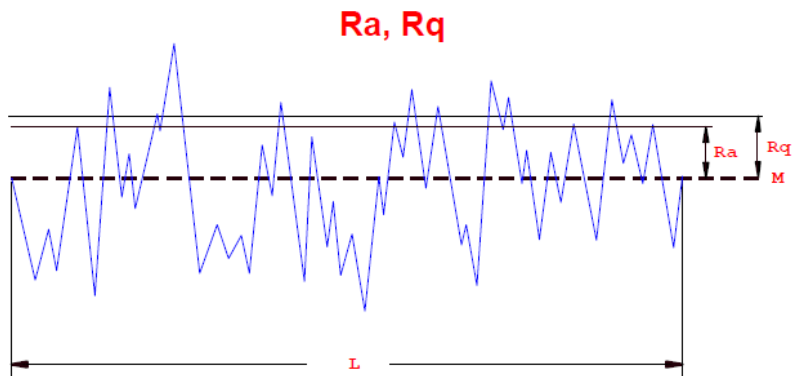
Οι E.S. Gademawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa και H.H. Soliman [4], διεξήγαγαν έρευνα όπου σκοπός ήταν η συγκέντρωση και η ανάλυση συνολικά 59 διαφορετικών παραμέτρων τραχύτητας, καθώς και η δημιουργία ενός προγράμματος βάση αυτών των παραμέτρων, το οποίο υπολογίζει την τρισδιάστατη τοπογραφία των δοκιμίων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται μερικές από τις σημαντικότερες παραμέτρους, οι οποίες αφενός χρησιμοποιούνται με μεγάλη συχνότητα διεθνώς, αφετέρου χρησιμοποιούνται και στην παρούσα διπλωματική εργασία για την εξαγωγή των πειραματικών αποτελεσμάτων.

#### 5.3.1. Μέση αριθμητική τραχύτητα $R_a$

Ως μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$  ορίζεται το μέτρο της τραχύτητας που δίνεται από τη σχέση:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y| dx$$

Παριστάνει τη μέση τιμή των αποκλίσεων όλων των σημείων της πραγματικής κατατομής από τη κεντρική γραμμή CL, μέσα στο δεδομένο δειγματοληπτικό μήκος  $l$ , όπως γίνεται εμφανές και στην εικόνα 5-5. Η τραχύτητα  $R_a$  αποτελεί την πλέον διαδεδομένη παράμετρο τραχύτητας, καθώς ο προσδιορισμός της κεντρικής γραμμής πραγματοποιείται αυτόματα από τα ηλεκτρικά όργανα μέτρησης (τραχύμετρα) και συνεπώς, η διαδικασία προσδιορισμού της είναι ταχύτερη. Η γνώση της τραχύτητα  $R_a$  παρέχει μία μέση τιμή, χρήσιμη τόσο για τον έλεγχο της συναφούς κατεργασίας παραγωγής της επιφάνειας, όσο και για τη λειτουργική της συμπεριφορά. Παρόλα αυτά, δε μπορεί να αποδώσει πληροφορίες για το πραγματικό ύψος των ανωμαλιών της επιφάνειας.



Εικόνα 5-5: Γραφικός υπολογισμός του  $R_a$  και του  $R_q$

### 5.3.2. Τραχύτητα μέσης τιμής $R_q$

Ως τραχύτητα μέσης τιμής (Root Mean Square – RMS)  $R_q$  των υψών μέσα στο δεδομένο δειγματοληπτικό μήκος, ορίζεται το μέτρο της τραχύτητας που δίνεται από τη σχέση:

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

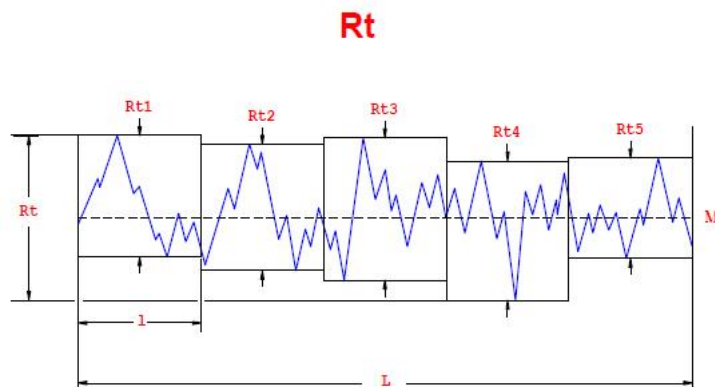
Ο αριθμητικός μέσος των τετραγώνων είναι πιο ευαίσθητος σε μεγάλες αποκλίσεις από την κεντρική γραμμή, σε σχέση με τη μέση αριθμητική τραχύτητα  $R_a$ . Ο γραφικός υπολογισμός του  $R_q$  γίνεται καλύτερα κατανοητός στην εικόνα 5-5.

### 5.3.3. Μέγιστο ύψος $R_t$ ή $R_{max}$

Καλείται και μέγιστη υψομετρική διαφορά του προφίλ ή μέγιστη τραχύτητα, συμβολίζεται με  $R_t$  και είναι η υψομετρική διαφορά της υψηλότερης κορυφής των επιφανειακών ανωμαλιών από τη βαθύτερη κοιλάδα εντός του μήκους υπολογισμού, όπως γίνεται εμφανές στην εικόνα 5-6. Η τιμή του μέγιστου ύψους  $R_t$  δίνεται από τη σχέση:

$$R_t = R_p + R_v$$

όπου  $R_p$  είναι το ύψος της μεγαλύτερης κορυφής, μετρούμενης από την κεντρική γραμμή, ενώ  $R_v$  είναι το βάθος της μεγαλύτερης κοιλάδας, μετρούμενης ομοίως από την κεντρική γραμμή.



Εικόνα 5-6: Γραφικός υπολογισμός του  $R_t$

### 5.3.4. Μέσο διάστημα κορυφών $R_{sm}$ ή $S_m$

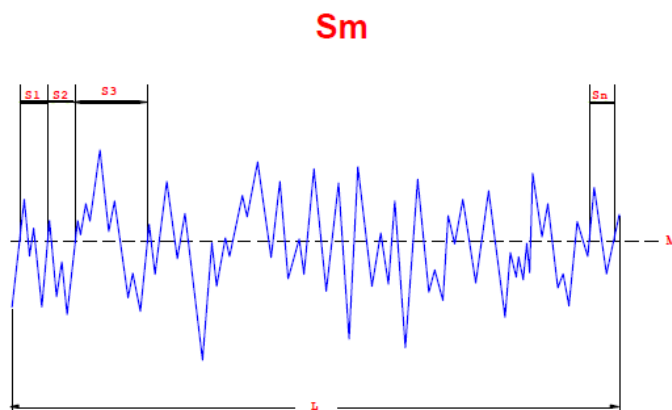
Καλείται και μέσο διάστημα μέσης γραμμής, συμβολίζεται με  $R_{sm}$  ή  $S_m$  και ορίζεται ως η μέση οριζόντια απόσταση των διαδοχικών κορυφών (ή κοιλάδων) στο μήκος υπολογι-



σμού, όταν αυτές διασταυρώνονται με τη μέση γραμμή, όπως γίνεται εμφανές στην εικόνα 5-7. Η σχέση υπολογισμού της είναι η εξής [4]:

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

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. Η παράμετρος μέσου διαστήματος κορυφών  $R_{sm}$  είναι η μοναδική παράμετρος μήκους που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία για να αναλυθεί η τραχύτητα των μετρούμενων επιφανειών.



Εικόνα 5-7: Γραφικός υπολογισμός του  $S_m$

#### 5.4. Μέτρηση τραχύτητας

Οι διατάξεις με τις οποίες πραγματοποιείται η καταγραφή της τραχύτητας μίας επιφάνειας ονομάζονται προφιλόμετρα ή τραχύμετρα και ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους διακρίνονται σε μηχανικά, ηλεκτρομηχανικά και οπτικά. Ο διαχωρισμός συμβαίνει διότι οι τεχνικές που χρησιμοποιούν τα τραχύμετρα κατά τη σάρωση της επιφάνειας στηρίζονται σε μηχανικά, ηλεκτρικά και οπτικά φαινόμενα. Τα ηλεκτρομηχανικά τραχύμετρα είναι αυτά που κυρίως χρησιμοποιούνται, καθώς η καταγραφή γίνεται γρήγορα και παράλληλα την ποσοτικοποιούν με υπολογισμό παραμέτρων τραχύτητας.

Η λειτουργία των ηλεκτρομηχανικών τραχυμέτρων (ή τραχυμέτρων στυλίσκου), όπως αυτό που παρουσιάζεται στην εικόνα 5-8, στηρίζεται σε έναν ειδικό μετρητικό δρομέα, ο οποίος πραγματοποιεί την καταγραφή της κατεργασμένης επιφάνειας και στην άκρη του οποίου βρίσκεται μία αδαμάντινη ακίδα από φυσικό ή τεχνητό διαμάντι. Η διάταξη που περιγράφηκε ονομάζεται στυλίσκος ή μορφοτροπέας ή στοιχείο αντίληψης. Ο στυλίσκος για να καταγράψει την επιφάνεια, ολισθαίνει σε μία προκαθορισμένη ευθεία γραμμή, παράλληλη προς την επιφάνεια, ακολουθώντας την κατατομή αυτής και μετατρέπει τις μηχανικές κάθετες προς την καταγραφόμενη επιφάνεια μετατοπίσεις σε ηλεκτρικά σήματα. Η αδαμάντινη ακίδα είναι συγκεκριμένης γεωμετρίας και είναι παραβολοειδούς σχήματος με σφαιρική απόληξη. Όμως, λόγω των πεπερασμένων διαστάσεων της αντιμετωπίζει προβλήματα στην καταγραφή επιφανειακών ανωμαλιών, είτε μικρότερων από την ακτίνα καμπυλότητάς της, είτε σχήματος τέτοιου στο οποίο η κωκικότητά της δεν επιτρέπει να έχει κατάλληλη πρόσβαση. Έτσι, η καταγραφόμενη επιφάνεια δεν είναι ακριβώς η πραγματική, αλλά ένα εξομαλυμένο περίγραμμα αυτής, το οποίο διατρέχει το κέντρο της σφαιρικής απόληξης του στυλίσκου. Συμπερασματικά όσων αναφέρθηκαν, παρατηρείται ότι κατά τη μέτρηση, οι κορυφές υπερθεματίζονται ενώ οι κοιλάδες υποεκτιμούνται. Για να δοθεί λύση στην ιδιομορφία αυτή των τραχύμετρων στυλίσκου, έχουν υιοθετηθεί διεθνή πρότυπα προτυποποίησης των γεωμετρικών χαρακτηριστικών αυτών των οργάνων [5].



Εικόνα 5-8: Ηλεκτρομηχανικό τραχύμετρο στυλίσκου

## 6. Πειραματικός εξοπλισμός

### 6.1. Υλικά

#### 6.1.1. Υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE)

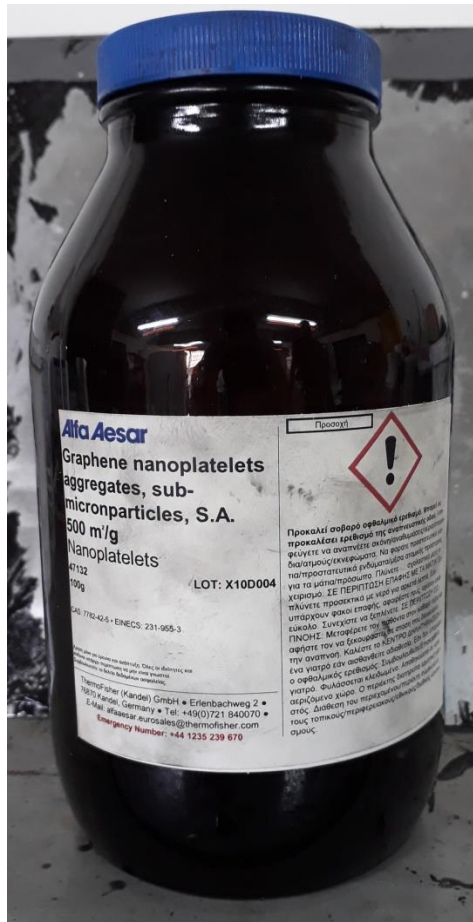
Για την τροφοδότηση του εκβολέα και την παραγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (HDPE) για εκβολή σε μορφή πέλλετ (pellet), όπως αυτό που παρουσιάζεται στην [εικόνα 6-1](#). Αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του πολυαιθυλενίου που χρησιμοποιήθηκε, περιγράφονται στο [Παράρτημα Α](#), όπου παρατίθεται το δίφυλλο το οποίο παρέχει η εταιρία παραγωγής.



Εικόνα 6-1: Πέλλετ υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE pellets)

#### 6.1.2. Νανοδομές γραφενίου (Graphene nanoplatelets-GNPs)

Οι νανοδομές γραφενίου (graphene nanoplatelets - GNPs) χρησιμοποιήθηκαν ώστε να δημιουργηθεί ένα μείγμα με το πολυαιθυλένιο, το οποίο στη συνέχεια τροφοδότησε τον εκβολέα και παρήχθησαν τα δοκίμια. Το γραφένιο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία των δοκιμών της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν το προϊόν Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micron particles, S.A.  $500 \text{ m}^2/\text{g}$  της εταιρίας Alfa Aesar<sup>TM</sup>, το οποίο παρουσιάζεται στην [εικόνα 6-2](#).



Εικόνα 6-2: Δοχείο που περιέχει Graphene nanoplatelets aggregates, sub-micron particles, S.A. 500 m<sup>2</sup>/g της εταιρίας Alfa Aesar™

## 6.2. Ζυγός ακριβείας

Η ζύγιση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν στην παρασκευή των δοκιμίων πραγματοποιήθηκε σε ζυγό ακριβείας, ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 6-3. Ο ζυγός είναι της εταιρίας KERN και το μοντέλο KB 5000-1. Το μέγιστο δυνατό μετρούμενο φορτίο φτάνει τα 5100g (γραμμάρια), ενώ η αναγνωσιμότητα (readability) έχει οριστεί σε d=0,1g.



Εικόνα 6-3: Ζυγός ακριβείας KERN KB 5000-1

### 6.3. Εκβολέας

Για την παραγωγή των δοκιμών χρησιμοποιήθηκε ο εκβολέας του εργαστηρίου Κατεργασιών των Υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Ο εκβολέας, ο οποίος είναι της εταιρίας Johnson Plastics Machinery, παρουσιάζεται στην εικόνα 6-4 και αποτελείται από τη χοάνη τροφοδοσίας, τον πίνακα ελέγχου, τη μηχανή του εκβολέα, τον θάλαμο με τα στοιχεία θέρμανσης και τον κοχλία του εκβολέα, καθώς και τη μήτρα.



Εικόνα 6-4: Εκβολέας παραγωγής προφίλ του εργαστηρίου Κατεργασιών των υλικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου

Η χοάνη τροφοδοσίας, η οποία μπορεί να παρατηρηθεί με μεγαλύτερη ευκολία στην εικόνα 6-5(α), λειτουργεί με τροφοδοσία πλημμύρας (flood feed). Ο κοχλίας, ο οποίος εμφανίζεται στην εικόνα 6-5(β), είναι τριών σταδίων με σταθερό βήμα έλικας και μπορεί να περιστραφεί με έως 2192 rpm, ενώ η μήτρα εκβολής λειτουργεί ως μήτρα ορισμένου (κυκλικού) προφίλ και παρατίθεται στην εικόνα 6-5(γ). Τέλος, ο πίνακας ελέγχου, ο οποίος εμφανίζεται στην εικόνα 6-5(δ), διαθέτει τα εξής κουμπιά για τον έλεγχο της ροής του υλικού:

- Κουμπιά εκκίνησης/διακοπής λειτουργίας (Start/stop)
- Κουμπιά αύξησης και μείωσης της ταχύτητας περιστροφής του κοχλία
- Διακόπτης ρύθμισης της ταχύτητας περιστροφής του κοχλία

Πιο αναλυτικά τα τεχνικά χαρακτηριστικά του εκβολέα είναι:

- Εξωτερική διάμετρος: 37,5mm
- Βήμα: 37,5mm
- Εσωτερική διάμετρος κυλίνδρου: 38mm
- Λόγος μήκους/εσωτερικής διαμέτρου κυλίνδρου: 24,1
- Μήκος ζώνης τροφοδοσίας: 255mm
- Μήκος μεταβατικής ζώνης: 304mm
- Μήκος ζώνης ρύθμισης: 343mm
- Βάθος καναλιού στη ζώνη τροφοδοσίας: 6,3mm

- Βάθος καναλιού στη ζώνη ρύθμισης: 2,3mm
- Λόγος συμπίεσης: 2,75
- Ολικό μήκος κοχλίας: 1195mm



Εικόνα 6-5: α) Χοάνη τροφοδοσίας εκβολέα (πάνω αριστερά), β) Κοχλίας εκβολέα (πάνω δεξιά), γ) Μήτρα εκβολής προφίλ (κάτω αριστερά), δ) Πίνακας ελέγχου εκβολέα (κάτω δεξιά)

#### 6.4. Δισκοτόμος

Για τον τεμαχισμό των δοκιμίων, ώστε να αποκτήσουν το σωστό μήκος για να είναι δυνατή η βέλτιστη κατεργασία τους στον τόρνο, χρησιμοποιήθηκε ο δισκοτόμος Struers Discotom-2, ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 6-6. Ο δισκοτόμος Struers Discotom-2 έχει δυνατότητα να κατεργαστεί δοκίμια μέχρι 75 mm πάχους, ενώ διαθέτει και σύστημα κλειδώματος του δοκιμίου, ώστε να μη μετακινηθεί κατά την κοπή. Η κοπή πραγματοποιείται με περιστροφική ταχύτητα δίσκου 3440 rpm και ταχύτητα κοπής 45 m/s. Επίσης διαθέτει διακόπτη «ανοιχτό/κλειστό» και κουμπιά «λειτουργίας/διακοπής».



Εικόνα 6-6: Δισκοτόμος Struers Discotom-2

## 6.5. Τόρνος

Για την κατεργασία των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικοί τόρνοι. Αρχικά, ένας συμβατικός τόρνος για να γίνει αποπεράτωση των κυλινδρικών δοκιμών και να αποκτήσουν όλα την ίδια διάμετρο. Στη συνέχεια, οι δοκιμές κοπής και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε τόρνο CNC.

### 6.5.1. Συμβατικός τόρνος

Ο συμβατικός τόρνος που χρησιμοποιήθηκε είναι Fritz Kern K.G., μοντέλο D18L και παρατίθεται στην εικόνα 6-7 παρακάτω. Η ταχύτητα περιστροφής του κυμαίνεται από 19 έως 850 rpm, ενώ η πρόωση ρυθμίζεται από 0,044 έως 0,8 mm/rev.



Εικόνα 6-7: Συμβατικός τόρνος Fritz Kern K.G. D18L

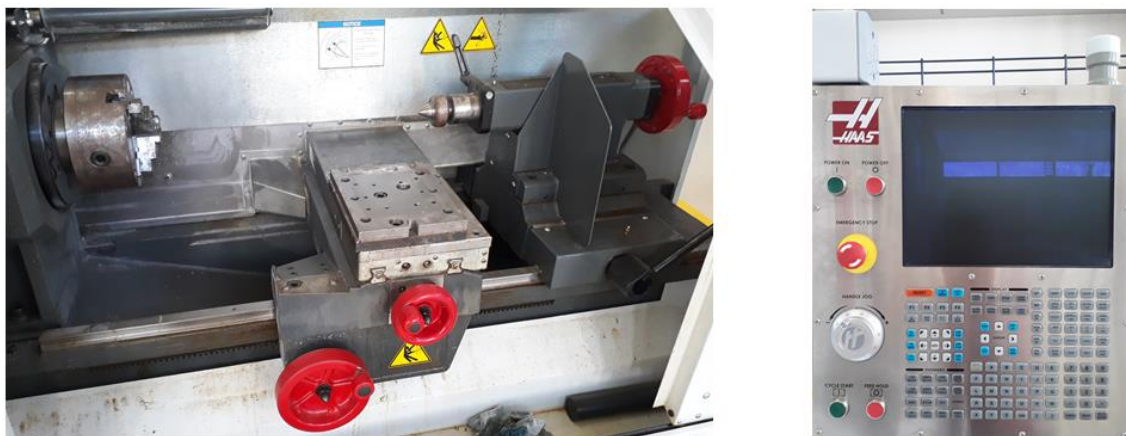
### 6.5.2. Τόρνος CNC



Εικόνα 6-8: Ο CNC τόρνος HAAS TL-1 SL20

Ο τόρνος CNC που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των κοπών είναι κατασκευασμένος από την εταιρία HAAS και το μοντέλο είναι το TL-1 SL20, το οποίο εμφανίζεται στην εικόνα 6-8. Στον πίνακα 6-1 παρουσιάζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μοντέλου, όπως δίδονται από την εταιρία κατασκευής [\[22\]](#). Ο τόρνος HAAS TL-1 είναι

ένας απλός τόννος CNC και όχι ένα κέντρο κατεργασιών, καθώς μπορεί να επεξεργαστεί δοκίμια όπως ένας συμβατικός τόννος, χωρίς όμως επιπλέον λειτουργίες όπως φρεζάρισμα ή λείανση, ενώ ο έλεγχος πραγματοποιείται από υπολογιστή, ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 6-9(β). Ακόμα, στο εσωτερικό του τόννου, το οποίο είναι εμφανές στην εικόνα 6-9(α), διακρίνονται καθαρά ο σφιγκτήρας του τεμαχίου, ο εργαλειοφορέας και ο κεντροφορέας.



Εικόνα 6-9: α) Το εσωτερικό του HAAS TL-1 SL20, β) Ο ο υπολογιστής μέσω του οποίου ελέγχεται ο HAAS TL-1 SL20

<b>SWING DIAMETER</b>	<b>METRIC</b>
Over Front Apron	508 mm
Over Cross Slide	279 mm
<b>CAPACITIES</b>	<b>METRIC</b>
Chuck (optional)	203 mm
Max Cutting Diameter (varies with turret)	406 mm
Max Cutting Length (without workholding)	762 mm
Between Centers	762 mm
<b>TRAVELS &amp; FEEDRATES</b>	<b>METRIC</b>
X Axis	203 mm
Z Axis	762 mm
Rapids on X	11.4 m/min
Rapids on Z	11.4 m/min
Max Thrust X	17 321 N
Max Thrust Z	8661 N
<b>SPINDLE</b>	<b>METRIC</b>
Max Rating	7.5 kW
Max Speed	1800 rpm
Max Torque	146 Nm @ 355 rpm
Spindle Nose	A2-5
Spindle Bore $\varnothing$	58 mm
<b>SPINDLE (OPT)</b>	<b>METRIC</b>
Max Rating	7.5 kW
Max Speed	3000 rpm
Max Torque	146 Nm @ 355 rpm

Πίνακας 6-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά του HAAS TL-1 SL20



Το κοπτικό πλακίδιο το οποίο χρησιμοποιήθηκε κατά τη διεξαγωγή των πειραματικών δοκιμών, τοποθετήθηκε σε ειδικά διαμορφωμένη μανέλλα, όπως φαίνεται στην [εικόνα 6-10](#). Η μανέλλα είναι της εταιρίας Seco και το μοντέλο είναι το PCLNR 2020-12A, ενώ στο σώμα της έχουν πραγματοποιηθεί διαμπερείς οπές, ώστε να μπορεί να τοποθετηθεί στο δυναμόμετρο και να παραμείνει σταθερή κατά τη διάρκεια της κοπής. Το πλακίδιο κοπής προέρχεται από την ίδια εταιρία και ο κωδικός του μοντέλου είναι CNMG120408-M4 TP200 P20/M20.

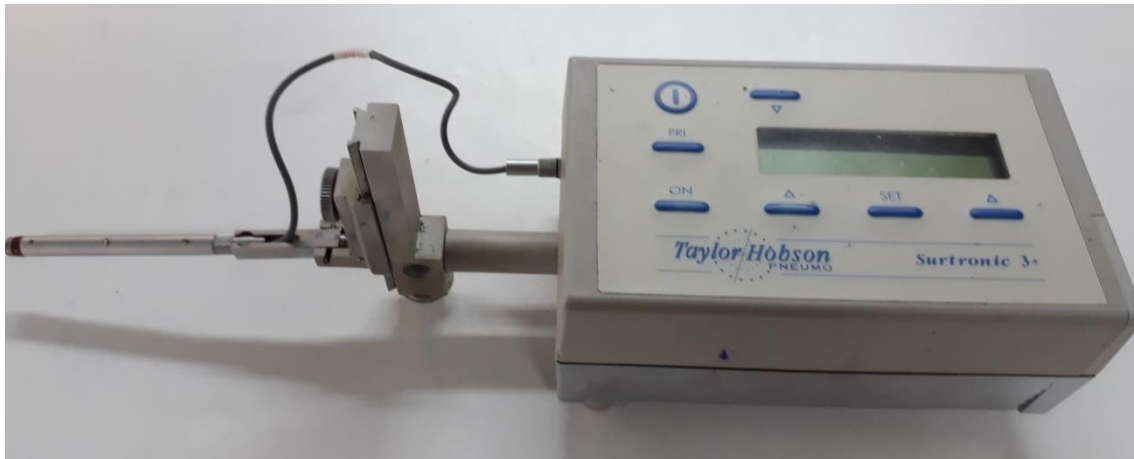


Εικόνα 6-10: Μανέλλα με τοποθετημένο πλακίδιο κοπής

#### 6.6. Δυναμόμετρο

Οι δυνάμεις κοπής που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων κατεργασίας, μετρήθηκαν με το δυναμόμετρο τριών αξόνων 9257A της εταιρίας Kistler, σε συνδυασμό με δύο ενισχυτές 5011B και έναν 5006 της ίδιας εταιρίας, τα οποία παρατίθεται στην [εικόνα 6-11](#) και στην [εικόνα 6-12](#), αντίστοιχα. Το δυναμόμετρο λειτουργεί μέσω πιεζοηλεκτρικών κρυστάλλων, οι οποίοι μετατρέπουν τις δυνάμεις που δέχονται σε ηλεκτρικά αναλογικά σήματα και κατ' αυτό τον τρόπο πραγματοποιούνται οι μετρήσεις των δυνάμεων που εμφανίζονται κατά την κοπή. Κατά την τόννευση, το δυναμόμετρο 9257A μετρά την κύρια συνιστώσα της δύναμης κοπής  $F_s$ , τη δύναμη πρόωσης  $F_v$  και τη δύναμη απώθησης του εργαλείου  $F_R$ , οι οποίες δυνάμεις συμπίπτουν με τις δυνάμεις  $F_x$ ,  $F_y$  και  $F_z$ , που αντιστοιχούν στους κύριους άξονες X, Y, Z. Οι μονοκάναλοι ενισχυτές που είναι συνδεδεμένοι με το δυναμόμετρο και αντιστοιχούν ένας σε κάθε άξονα μέτρησης (X, Y, Z), λαμβάνουν τις ηλεκτρικές φορτίσεις που παράγονται από το δυναμόμετρο και τις μετατρέπουν σε αναλογικά σήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να μετρηθούν τελικά οι δυνάμεις κοπής. Τέλος, στο [Παράρτημα Β](#), παρατίθεται ένα τετρασέλιδο στο οποίο αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δυναμόμετρου 9257A, ένα δίφυλλο που συνοδεύει τους ενισχυτές 5011B και στο οποίο αναγράφονται και τα τεχνικά τους χαρακτηριστικά και ένα μέρος του συνοδευτικού εγχειριδίου χρήστη για τον ενισχυτή 5006, με τα τεχνικά του χαρακτηριστικά.





Εικόνα 6-13: Τραχύμετρο Taylor-Hobson Surtronic 3+

Χαρακτηριστικά	Μονάδες	Τιμές
Ακτίνα καμπυλότητας της ακίδας	μm	2,5
Διαδρομή της ακίδας	mm	0,25-25
Εγκάρσια ταχύτητα	mm/sec	1
Μήκη αποκοπής	mm	0,08, 0,25, 0,8, 2,5
Διαστάσεις LxWxH	mm	170x100x60

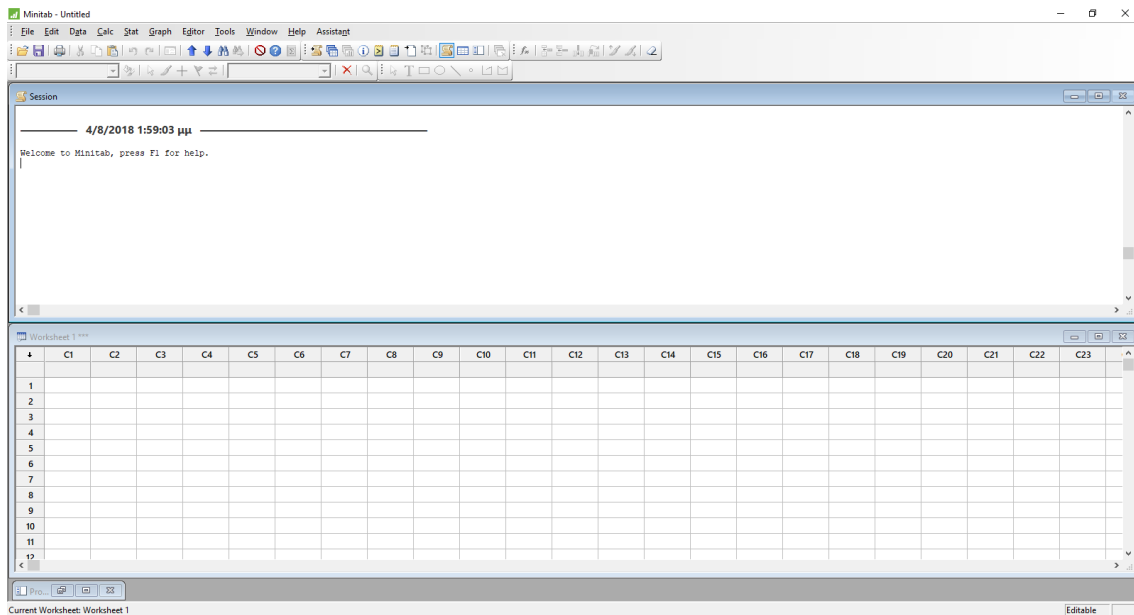
Πίνακας 6-2: Χαρακτηριστικά του τραχυμέτρου Taylor-Hobson Surtronic 3+

### 6.8. Πρόγραμμα ανάλυσης Minitab

Το Minitab είναι ένα πρόγραμμα ανάλυσης, το οποίο περιέχει πακέτα στατιστικής ανάλυσης και λειτουργεί υπέρ της αυτοματοποίησης των υπολογισμών και της δημιουργίας γραφημάτων και γραφικών παραστάσεων. Οι βασικές δυνατότητες που παρέχει το Minitab είναι:

- Ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis)
- Σχεδιασμό πειραμάτων (Design of experiments – DOE)
- Ανάλυση συστημάτων μέτρησης (Measurement systems analysis)
- Ανάλυση ικανότητας (Capability analysis)
- Γραφική ανάλυση (Graphical analysis)
- Δοκιμές υποθέσεων (Hypothesis tests)
- Διαγράμματα ελέγχου (Control charts)

Στην εικόνα 6-14 παρουσιάζεται το αρχικό παράθυρο λειτουργίας του προγράμματος Minitab 17, στο οποίο διακρίνονται δύο κύρια παράθυρα. Το πάνω παράθυρο είναι το «session window», στο οποίο παρουσιάζονται τα στατιστικά αποτελέσματα των αναλύσεων των δεδομένων. Στο κάτω παράθυρο, το «worksheet window», υπάρχουν κελιά για την καταχώρηση των τιμών των προς επεξεργασία δεδομένων. Τέλος, όταν δημιουργηθεί μία γραφική παράσταση ανοίγει το παράθυρο «graph window», στο οποίο αναπαριστάται η προσφάτως σχεδιασμένη γραφική.



Εικόνα 6-14: Αρχικό παράθυρο λειτουργίας του προγράμματος Minitab 17

### 6.9. Μέτρα ατομικής προστασίας (ΜΑΠ)

Καθώς η επικινδυνότητα του γραφενίου ως υλικού είναι υψηλή, για την αποφυγή επαφής με το δέρμα, της εισπνοής και της επαφής με τα μάτια χρησιμοποιήθηκαν τα Μέτρα Ατομικής Προστασίας (ΜΑΠ) που αναφέρονται παρακάτω. Για την προστασία των ματιών και του προσώπου, χρησιμοποιήθηκε ένα ζευγάρι γυαλιών εργασίας και μία μάσκα μισού προσώπου με διπλό φίλτρο τύπου ΑΒΕΚ(2)-Ρ(3). Για να αποφευχθεί η επαφή με τα χέρια και τα ρούχα χρησιμοποιήθηκαν πλαστικά γάντια και μία ρόμπα εργασίας. Επίσης, για την αποφυγή εισπνοής των αερίων παραγόντων του πολυαιθυλενίου κατά τη διαδικασία της εκβολής, χρησιμοποιήθηκε μέσα από τη μάσκα νανοσωματιδίων μία απλή μάσκα σκόνης – καπνού μισού προσώπου. Τα Μέτρα Ατομικής Προστασίας παρουσιάζονται στην εικόνα 6-15.



Εικόνα 6-15: Μέτρα ατομικής προστασίας

## 7. Πειραματική διαδικασία

### 7.1. Προετοιμασία πρώτων υλών

Πριν την έναρξη της προετοιμασίας του μείγματος HDPE-γραφένιου, λόγω της επικινδυνότητας των επί μέρους υλικών και κυρίως του γραφένιου, ληφθήκανε τα απαραίτητα μέτρα ατομικής προστασίας. Αυτά περιλαμβάνανε ένδυση με ρόμπα εργασίας και γάντια μίας χρήσης, ώστε να αποφευχθεί η επαφή του γραφένιου με τα ρούχα και το δέρμα. Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν γυαλιά εργασίας, καθώς και μάσκα μισού προσώπου με διπλό φίλτρο ABEK(2)-P(3), παράλληλα με απλή μάσκα εργασίας μισού προσώπου μίας χρήσης.

Στη συνέχεια, το HDPE τοποθετήθηκε σε γυάλινο σκεύος, το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 7-1 και ζυγίστηκε στο ζυγό ακριβείας. Στην περίπτωση της μηδενικής περιεκτικότητας σε γραφένιο, η διαδικασία προχώρησε απευθείας στο στάδιο της εκβολής. Στην περίπτωση μη μηδενικής περιεκτικότητας σε γραφένιο, αφού πρώτα ζυγίστηκαν ξεχωριστά HDPE και γραφένιο, προστέθηκε η απαιτούμενη ποσότητα γραφένιου στο HDPE, σε ποσοστό 1% ή 2% ή 3% w/w και το μείγμα αναδεύτηκε με γυάλινο αναδευτήρα, μέχρις ότου αποκτήσει μία ικανοποιητική ομοιογένεια. Η χρήση γυάλινου σκεύους και γυάλινου αναδευτήρα δεν ήταν τυχαία, διότι το γυαλί παραμένει σχετικά αδρανές κατά την επαφή του με το γραφένιο, συνεπώς αποφεύχθηκε η προσκόλληση του γραφένιου σε τρίτο σώμα (εκτός του HDPE). Όταν κρίθηκε ικανοποιητική η ομοιογένεια του μείγματος HDPE-γραφένιου, η πειραματική διαδικασία πέρασε στο στάδιο της εκβολής.



Εικόνα 7-1: Γυάλινο σκεύος που χρησιμοποιήθηκε για ζύγιση και για την ανάμιξη του γραφένιου με το HDPE

### 7.2. Εκβολή

Αρχικά, πριν τοποθετηθεί το μείγμα HDPE-γραφένιου εντός της χοάνης για κάθε διαφορετική περιεκτικότητα σε γραφένιο, ο εκβολέας έπρεπε να προθερμανθεί για τριάντα λεπτά και στη συνέχεια να καθαριστεί, χρησιμοποιώντας καθαρό HDPE, ώστε να απομακρυνθούν παραμένουσες παλαιότερες προσμίξεις, οι οποίες είτε είχαν υπερθερμανθεί (καεί), είτε είχαν διαφορετική σύνθεση από το μείγμα. Όταν η ροή του εκβολέα σταθεροποιήθηκε, παράγοντας καθαρό HDPE, τοποθετήθηκε με προσοχή και από κοντινή απόσταση, εντός της χοάνης τροφοδοσίας, το μείγμα HDPE-γραφένιου. Έπειτα, συ-

μπληρώθηκε καθαρό HDPE στη χοάνη τροφοδοσίας, για την αποφυγή εισαγωγής αέρα εντός του κοχλία κατά τη διάρκεια της παραγωγής, καθώς θα δημιουργούσε κενά και πόρους στο τελικό προϊόν της εκβολής.

Στη συνέχεια, αν και το μείγμα ομογενοποιήθηκε πλήρως με την ανάμιξη εντός του εκβολέα, τα πρώτα 5 μέτρα δεν χρησιμοποιήθηκαν, καθώς η ροή δεν ήταν ομαλή, αλλά και το ποσοστό του γραφενίου παρουσίαζε αυξομειώσεις. Όταν η ροή του εκβαλλόμενου υλικού ομαλοποιήθηκε και το ποσοστό του διεσπαρμένου γραφενίου στη μήτρα HDPE σταθεροποιήθηκε στις επιθυμητές τιμές, το εκβαλλόμενο προϊόν τοποθετήθηκε πάνω σε ειδικά διαμορφωμένες ράγες αλουμινίου, όπως φαίνεται στο πάνω μέρος της εικόνας 7-2. Οι ράγες συνέβαλαν στη διατήρηση του κυλινδρικού σχήματος του προϊό-ντος, καθώς και στην πιο ομαλή ψύξη του. Τέλος, οι ράβδοι του σύνθετου υλικού, πριν τεμαχιστούν στις επιθυμητές διαστάσεις, αφήθηκαν μία ημέρα, όπως η ράβδος στο κάτω μέρος της εικόνας 7-2, ώστε να παγώσουν πλήρως έως τον πυρήνα τους και να αποβάλλουν τις παραμένουσες τάσεις που είχε δημιουργήσει η διαδικασία της εκβολής.



Εικόνα 7-2: Διαδικασία εκβολής σύνθετου υλικού (πάνω) και σύνθετο υλικό που έχει αφεθεί να έρθει σε θερμοκρασία δωματίου (κάτω)

### 7.3. Τόρνευση

Για την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών επιλέχθηκαν αρχικά οι παράμετροι της κοπής, οι οποίες θα μεταβάλλονταν, δηλαδή το βάθος κοπής, η πρόωση και η ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, επιλέχθηκαν τέσσερα διαφορετικά επίπεδα για κάθε παράμετρο, όπως φαίνεται και στον πίνακα 7-1. Έπειτα, με τη χρήση του προγράμματος Minitab, δημιουργήθηκε ένας ορθογώνιος  $L_{16}$  πίνακας πειραμάτων Taguchi, ο οποίος παρατίθεται ως πίνακας 7-2 και βάσει του οποίου διεξήχθησαν τα πειράματα κοπής.

Επίπεδο	Βάθος κοπής α (mm)	Ταχύτητα περιστροφής n (rpm)	Πρόωση f (mm/rev)
1	1	500	0,05
2	2	1000	0,1
3	3	1500	0,15
4	4	2000	0,2

Πίνακας 7-1: Οι παράμετροι κοπής και τα επίπεδά τους, που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία

Πείραμα	Βάθος κοπής α (mm)	Ταχύτητα περιστροφής n (rpm)	Πρόωση f (mm/rev)
1	1	500	0,05
2	1	1000	0,1
3	1	1500	0,15
4	1	2000	0,2
5	2	500	0,1
6	2	1000	0,05
7	2	1500	0,2
8	2	2000	0,15
9	3	500	0,15
10	3	1000	0,2
11	3	1500	0,05
12	3	2000	0,1
13	4	500	0,2
14	4	1000	0,15
15	4	1500	0,1
16	4	2000	0,05

Πίνακας 7-2: Πίνακας πειραμάτων Taguchi

Αφού οι ράβδοι του σύνθετου υλικού κρύωσαν, τεμαχίστηκαν με τον δισκοτόμο, ώστε όλα τα δοκίμια να έχουν μήκος εκατόν πενήντα χιλιοστά (150 mm), όπως αυτό που εμφανίζεται στο πάνω μέρος της εικόνας 7-3. Έπειτα, για να αποκτήσουν τα δοκίμια ομοιόμορφη κυκλική διατομή με διάμετρο έντεκα χιλιοστών (11 mm), χρησιμοποιήθηκε για τη διαμόρφωσή τους ένας συμβατικός τόρνος Fritz Kern K.G. D18L. Εκτός της ομοιόμορφης κυκλικής διατομής, ο συμβατικός τόρνος χρησιμοποιήθηκε για να δημιουργηθεί μία οπή βάθους περίπου πέντε χιλιοστών (5 mm) στη μία πλευρά των δοκιμίων, η οποία γίνεται ορατή στο δοκίμιο στο κάτω μέρος της εικόνας 7-3. Η ύπαρξη της οπής λειτούργησε θετικά στη μείωση των ταλαντώσεων κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, καθώς βελτιώθηκε με αυτό τον τρόπο η τοποθέτηση της πόντας. Το δοκίμιο στερεώθηκε στο τσοκ του τόρνου με τρόπο τέτοιο, ώστε να υπάρχουν εκατό χιλιοστά ωφέλιμου κατεργάσιμου μήκους και η πόντα ακούμπησε στην οπή, χωρίς να δημιουργηθούν πιέσεις στο δοκίμιο.



Εικόνα 7-3: Στο πάνω μέρος παρουσιάζεται ένα δοκίμιο σύνθετου υλικού πριν τον καθαρισμό, ενώ στο κάτω μέρος εμφανίζεται μετά τον καθαρισμό και τη δημιουργία οπής στο ένα άκρο του

Για να μετρηθούν οι δυνάμεις κατά την κατεργασία των δοκιμίων, το δυναμόμετρο τοποθετήθηκε πάνω στον εργαλειοφορέα και πάνω σε αυτό δέθηκε κατάλληλα το κοπτικό εργαλείο, κάτι που γίνεται καλύτερα κατανοητό μέσω της [εικόνας 7-4](#). Το δυναμόμετρο συνδέθηκε με τους ενισχυτές, οι οποίοι είχαν συνδεθεί με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι ενισχυτές ρυθμίστηκαν κατάλληλα, ώστε οι διαφοροποιήσεις των δυνάμεων κατά την κοπή να είναι εμφανείς.





Εικόνα 7-4: Πειραματική διάταξη για κατεργασία του δοκιμίου και μέτρηση των παραγόμενων δυνάμεων κατά την τórνευση

Τέλος, το πρόγραμμα της κοπής το οποίο παρατίθεται στο [Παράρτημα Γ](#), δημιουργήθηκε απευθείας στον υπολογιστή της εργαλειομηχανής HAAS TL-1 SL20 χρησιμοποιώντας εντολές G-κώδικα. Σε κάθε δοκίμιο πραγματοποιήθηκαν δύο δοκιμές κοπών, με κάθε μία να έχει μήκος κατεργασμένης επιφάνειας 20 mm. Για πρακτικούς λόγους διεξαγωγής των πειραμάτων, τα δύο πειράματα σε κάθε δοκίμιο είχαν ίδιο βάθος κοπής. Στην αρχή του προγράμματος δίδεται η εντολή στο κοπτικό εργαλείο, αφού έχει ξεκινήσει να περιστρέφεται το κατεργαζόμενο τεμάχιο, να μεταβεί σε μία θέση κοντά στο δεξιό άκρο του τελευταίου. Στη συνέχεια αρχίζει να πλησιάζει και να εισέρχεται εντός του τεμαχίου και έπειτα να προχωράει προς τα αριστερά, μέχρι το σημείο όπου θα ξεκινήσει η κοπή του πρώτου πειράματος. Η διαδικασία αυτή της δημιουργίας ενός σκαλοπατιού, πριν το σημείο της έναρξης του πρώτου πειράματος, επαναλαμβάνεται έως ότου το σκαλοπάτι αποκτήσει βάθος τέτοιο, όσο το βάθος κοπής των εκάστοτε πειραμάτων στο κάθε δοκίμιο. Αφού δημιουργηθεί το απαιτούμενο σκαλοπάτι, το κοπτικό αρχίζει να πραγματοποιεί την κοπή του πρώτου πειράματος. Όταν αυτή τελειώσει, εάν έχει οριστεί, θα αλλάξουν οι στροφές και θα συνεχίσει στην κοπή του δεύτερου πειράματος, με ίδια ή διαφορετική πρόωση. Τέλος, αφού τελειώσει η κοπή και του δεύτερου πειράματος, το κοπτικό εξέρχεται σε απόσταση ασφαλείας από το δοκίμιο και σταματάει η περιστροφή του τελευταίου.

Με το πέρας κάθε πειραματικής δοκιμής, ταξινομούνται σε φακέλους στον υπολογιστή οι καταγεγραμμένες δυνάμεις κοπής, συλλεγόταν το απόβλιπτο σε ειδικό φάκελο και αφαιρούνταν το δοκίμιο από την εργαλειομηχανή, το οποίο και αποθηκευόταν ομοίως σε άλλο ειδικό φάκελο, ώστε στη συνέχεια να γίνει η τραχυμέτρηση της κατεργασμένης επιφάνειάς του. Ένα κατεργασμένο δοκίμιο μαζί με τα δύο απόβλιπτα που παράχθηκαν παρουσιάζεται στην [εικόνα 7-5](#) παρακάτω, ενώ στο [Παράρτημα Δ](#) παρατίθενται τα δοκίμια με τα παραγόμενα απόβλιπτα από όλες τις περιεκτικότητες γραφενίου (0%, 1%, 2%, 3%), τα οποία κατεργάστηκαν σύμφωνα με τις τιμές των παραμέτρων που ορίστηκαν για τα πειράματα 13 και 14.



Εικόνα 7-5: Κατεργασμένο δοκίμιο, με το πείραμα 13 στο δεξί άκρο και το πείραμα 14 στο αριστερό και με τα αντίστοιχα παραχθέντα απόβλητα

#### 7.4. Τραχυμέτρηση

Για να πραγματοποιηθεί η τραχυμέτρηση της κατεργασμένης επιφάνειας των δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε αυτοκόλλητη πάστα και στις δύο άκρες των δοκιμίων, γεγονός που τα διατήρησε απόλυτα σταθερά, όπως γίνεται εμφανές στην εικόνα 7-6. Το τραχύμετρο ρυθμίστηκε εξ αρχής κατάλληλα με μήκος αποκοπής (cut-off length)  $L_c=0,80$  mm, μήκος αξιολόγησης (evaluation length)  $L_n=4,00$  mm και εύρος τιμών  $--.2$   $\mu\text{m}$ .

Οι παράμετροι της τραχύτητας που καταγράφηκαν ήταν οι  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$ ,  $S_m$ . Οι τιμές των παραμέτρων καταγράφηκαν σε πίνακες στο πρόγραμμα Microsoft Excel, ώστε να δεχθούν στη συνέχεια κατάλληλη επεξεργασία.



Εικόνα 7-6: Διαδικασία τραχυμέτρησης

#### 7.5. Ανάλυση των δεδομένων

Τα τελικά δεδομένα τα οποία εξήχθησαν από την πειραματική διαδικασία ήταν οι δυνάμεις που μετρήθηκαν κατά την κοπή και οι παράμετροι της τραχύτητας της επιφάνειας. Από τις δυνάμεις που μετρήθηκαν, αυτές που χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω στην ανάλυση ήταν οι δυνάμεις του άξονα Z στη μέγιστη τιμή τους, δηλαδή το  $F_{Zmax}$ . Ακόμα, οι παράμετροι της τραχύτητας  $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_t$  και  $S_m$  χρησιμοποιήθηκαν όλες στην ανάλυση που ακολούθησε.

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Minitab και αφού είχε δημιουργηθεί ο πίνακας Taguchi με τις παραμέτρους των πειραμάτων, σχεδιάστηκαν τα διάγραμμα κύριων επιδράσεων (main effects plot) για κάθε μία από τις παραμέτρους της τραχύτητας και για την  $F_{Z_{max}}$ . Στη συνέχεια, έγινε ανάλυση της διακύμανσης (Analysis of Variance-ANOVA) για κάθε μία από τις παραμέτρους της τραχύτητας και για την  $F_{Z_{max}}$ . Τέλος, χρησιμοποιήθηκε η ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis) για κάθε μία από τις παραμέτρους της τραχύτητας και για την  $F_{Z_{max}}$ .

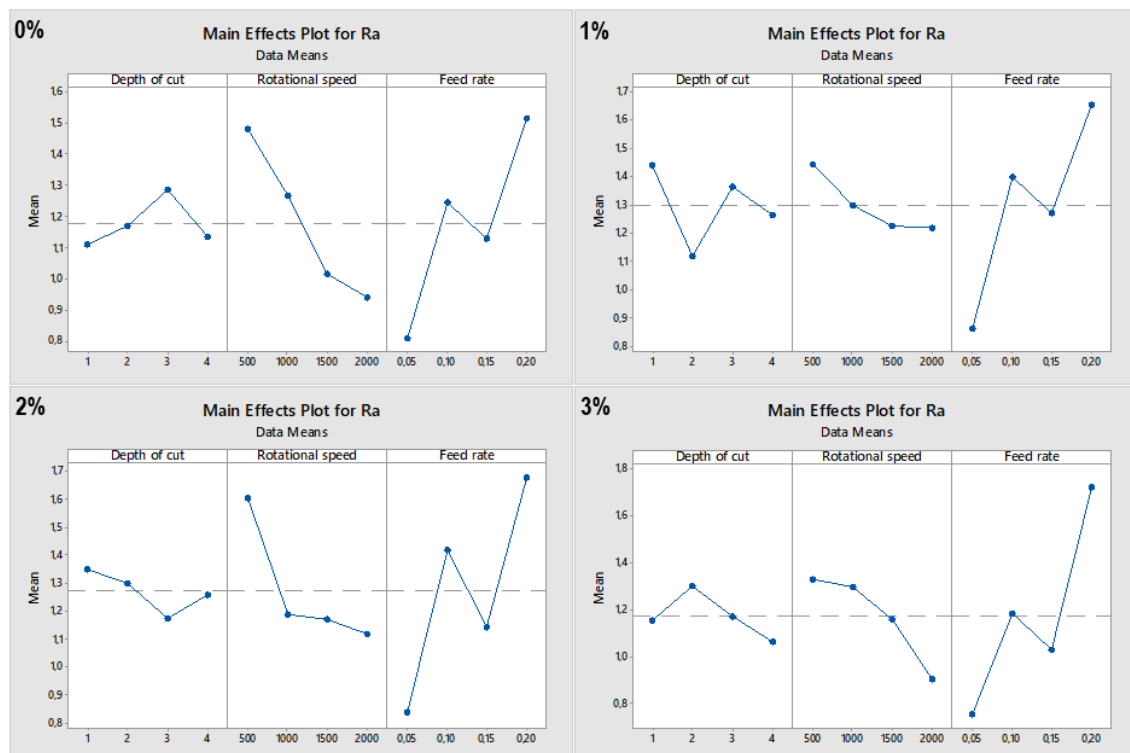
## 8. Αποτελέσματα πειραματικής διαδικασίας

### 8.1. Διαγράμματα κύριων επιδράσεων (Main effects plots)

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα ανάλυσης δεδομένων Minitab, εξήχθησαν τα διαγράμματα κύριων επιδράσεων για κάθε παράμετρο της πειραματικής διαδικασίας, τα οποία παρατίθενται και θα αναλυθούν στα παρακάτω υποκεφάλαια.

#### 8.1.1. Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα $R_a$

Βάσει των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-1, στα κατεργασμένα δοκίμια υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) χωρίς προσμίξεις γραφενίου, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_a=1,1\mu\text{m}$ ,  $R_a=0,9\mu\text{m}$  και  $R_a=0,8\mu\text{m}$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_a=1,1\mu\text{m}$ ,  $R_a=1,2\mu\text{m}$  και  $R_a=0,9\mu\text{m}$ , για το δεύτερο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=2\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, τα κατεργασμένα δοκίμια εμφανίζουν ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_a=1,15\mu\text{m}$ ,  $R_a=1,1\mu\text{m}$  και  $R_a=0,85\mu\text{m}$ , για το τρίτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=3\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η ελάχιστη τραχύτητα που λαμβάνεται είναι ίση με  $R_a=1,05\mu\text{m}$ ,  $R_a=0,9\mu\text{m}$  και  $R_a=0,75\mu\text{m}$ , για το τέταρτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=4\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα.



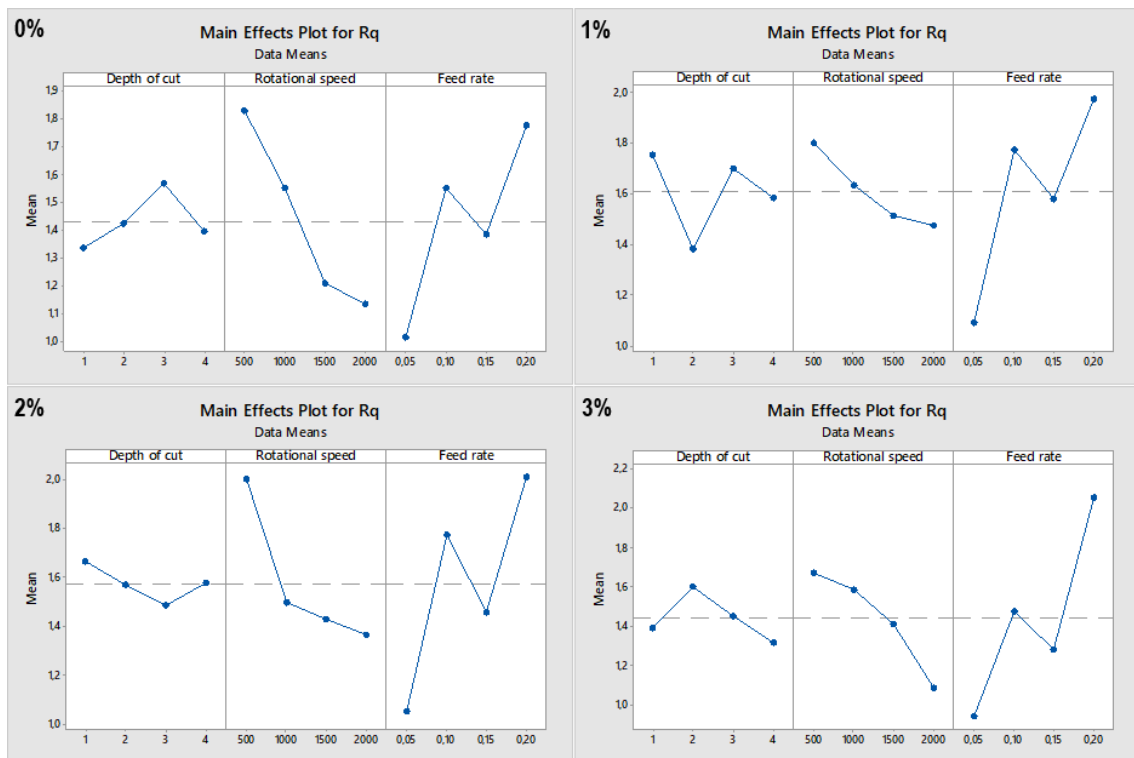
Εικόνα 8-1: Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραμέτρων της κοπής στην  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Μια πιο μακροσκοπική παρατήρηση δείχνει ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό γραφενίου, η ελάχιστη τραχύτητα εντοπίζεται σε μεγαλύτερα βάθη κοπής, αλλά παραμένει σχεδόν

αμετάβλητη και ίση με  $R_a=1,1\mu\text{m}$  περίπου. Παράλληλα, η αρχική προσθήκη γραφενίου επιδρά αρνητικά στην ελάχιστη τραχύτητα που οφείλεται στην ταχύτητα περιστροφής, καθώς αυξάνεται κατά  $0,3\mu\text{m}$ , αλλά η μέγιστη περιεκτικότητα γραφενίου που εξετάστηκε έχει θετικές συνέπειες, διότι η τραχύτητα πέφτει κάτω και από την τραχύτητα του σκέτου HDPE. Επίσης, η ελάχιστη τραχύτητα που οφείλεται στην πρόωση δείχνει να παραμένει σχετικά σταθερή και να μην μεταβάλλεται λόγω προσθήκης γραφενίου στο HDPE, με εξαίρεση την περίπτωση της περιεκτικότητας 3%, όπου παρατηρείται μικρή πτώση κάτω και από την τιμή του σκέτου HDPE. Τέλος, η ελάχιστη τραχύτητα επιτυγχάνεται σε κάθε περιεκτικότητα γραφενίου, με χρήση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και της ελάχιστης πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), ενώ όσο αυξάνεται το ποσοστό γραφενίου, η ελάχιστη τραχύτητα επιτυγχάνεται για μεγαλύτερα βάθη κοπής.

### **8.1.2. Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα $R_q$**

Βάσει των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-2, στα κατεργασμένα δοκίμια υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) χωρίς προσμίξεις γραφενίου, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_q=1,3\mu\text{m}$ ,  $R_q=1,1\mu\text{m}$  και  $R_q=1,0\mu\text{m}$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_q=1,4\mu\text{m}$ ,  $R_q=1,5\mu\text{m}$  και  $R_q=1,1\mu\text{m}$ , για το δεύτερο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=2\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, τα κατεργασμένα δοκίμια εμφανίζουν ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_q=1,5\mu\text{m}$ ,  $R_q=1,4\mu\text{m}$  και  $R_q=1,0\mu\text{m}$ , για το τρίτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=3\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Τέλος με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η ελάχιστη τραχύτητα που λαμβάνεται είναι ίση με  $R_q=1,3\mu\text{m}$ ,  $R_q=1,1\mu\text{m}$  και  $R_q=1,0\mu\text{m}$ , για το τέταρτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=4\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), αντίστοιχα.



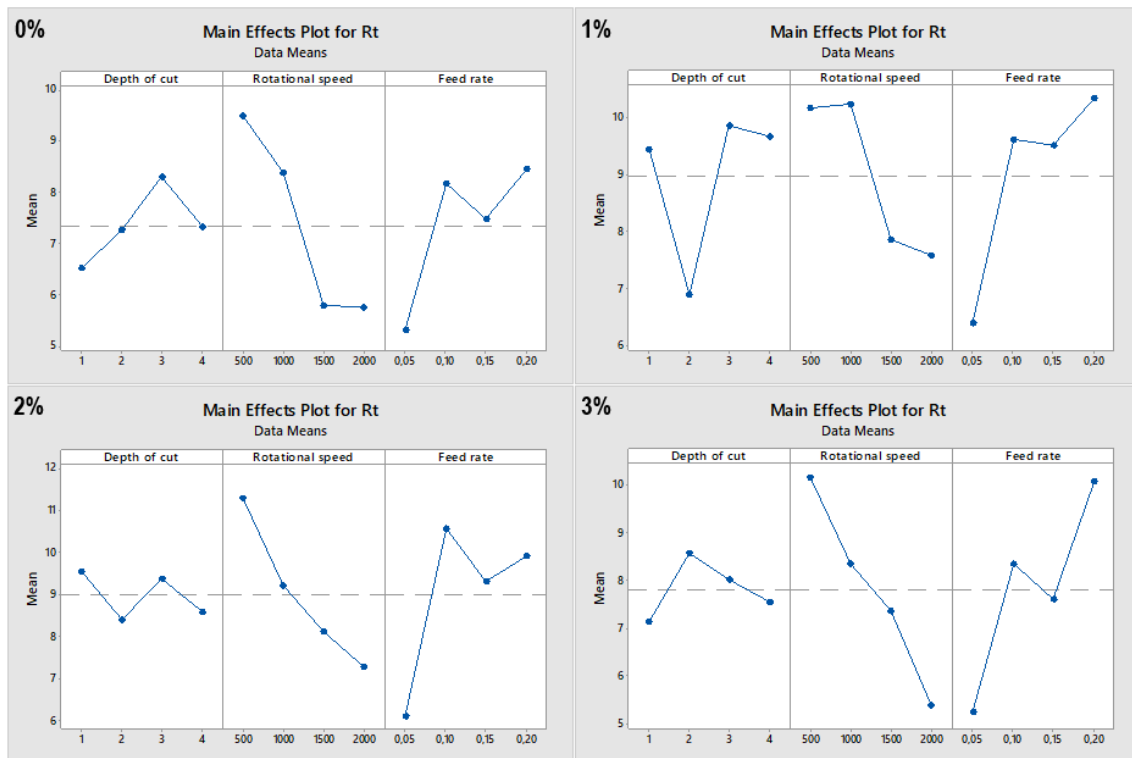
Εικόνα 8-2: Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραμέτρων της κοπής στην  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Μια πιο μακροσκοπική παρατήρηση δείχνει ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό γραφενίου, η ελάχιστη τραχύτητα εντοπίζεται σε μεγαλύτερα βάθη κοπής, αλλά παραμένει σταθερά μεταξύ  $R_a=1,3\mu\text{m}$  και  $R_a=1,4\mu\text{m}$  περίπου. Παράλληλα, η αρχική προσθήκη γραφενίου επιδρά αρνητικά στην ελάχιστη τραχύτητα που οφείλεται στην ταχύτητα περιστροφής, καθώς αυξάνεται έως και  $0,4\mu\text{m}$ , αλλά η μέγιστη περιεκτικότητα γραφενίου που εξετάστηκε έχει θετικές συνέπειες, διότι η τραχύτητα πέφτει κάτω και από την τραχύτητα του σκέτου HDPE. Επίσης, η ελάχιστη τραχύτητα που οφείλεται στην πρόωση δείχνει να παραμένει σχετικά σταθερή και να μην μεταβάλλεται λόγω προσθήκης γραφενίου στο HDPE, με εξαίρεση την περίπτωση της περιεκτικότητας 3%, όπου παρατηρείται μικρή πτώση κάτω και από την τιμή του σκέτου HDPE. Τέλος, η ελάχιστη τραχύτητα επιτυγχάνεται σε κάθε περιεκτικότητα γραφενίου, με χρήση της μέγιστης ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και της ελάχιστης πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), ενώ όσο αυξάνεται το ποσοστό γραφενίου, η ελάχιστη τραχύτητα επιτυγχάνεται για μεγαλύτερα βάθη κοπής.

### 8.1.3. Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα $R_t$

Βάσει των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-3, στα κατεργασμένα δοκίμια υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) χωρίς προσμίξεις γραφενίου, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_t=6,5\mu\text{m}$ ,  $R_t=5,5\mu\text{m}$  και  $R_t=5,0\mu\text{m}$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_t=7,0\mu\text{m}$ ,  $R_t=7,5\mu\text{m}$  και  $R_t=6,5\mu\text{m}$ , για το δεύτερο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=2\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, τα κατεργασμένα δοκίμια εμφανίζουν ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $R_t=8,5\mu\text{m}$ ,  $R_t=7,0\mu\text{m}$  και  $R_t=6,0\mu\text{m}$ , για το δεύτερο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=2\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης

σης ( $f=0,05$  mm/rev), αντίστοιχα. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η ελάχιστη τραχύτητα που λαμβάνεται είναι ίση με  $R_t=7,0\mu\text{m}$ ,  $R_t=5,0\mu\text{m}$  και  $R_t=5,0\mu\text{m}$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05$  mm/rev), αντίστοιχα.



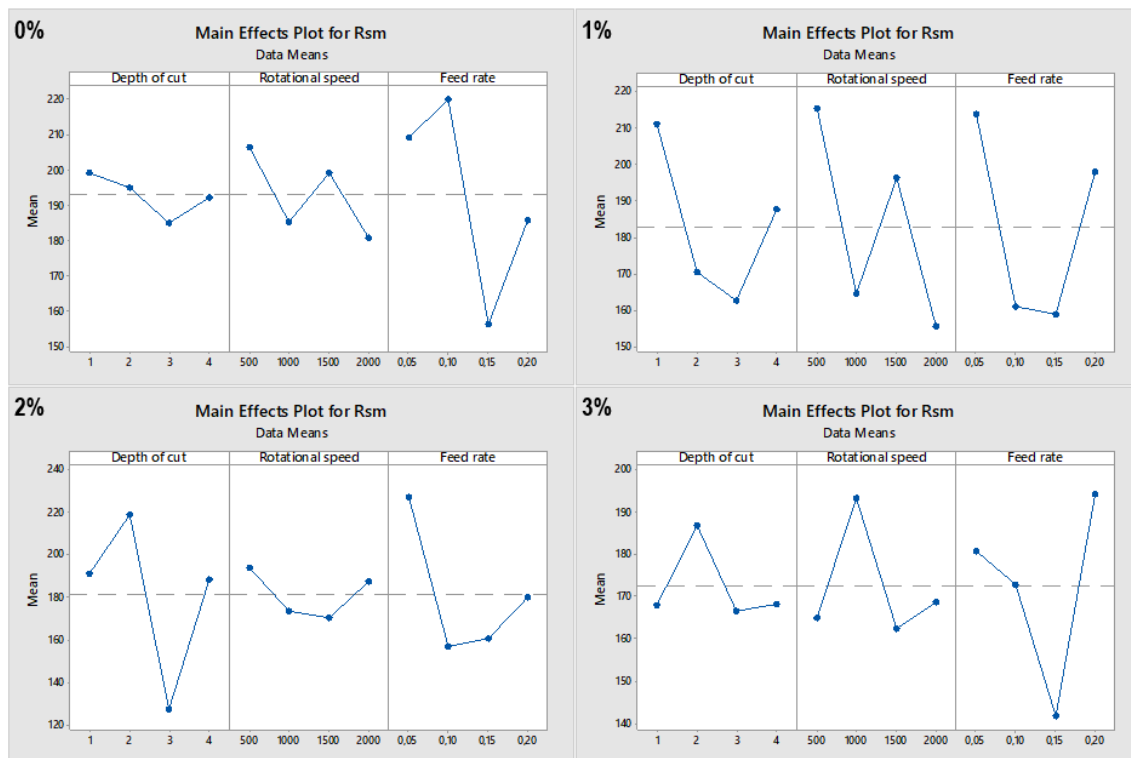
Εικόνα 8-3: Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραμέτρων της κοπής στην  $R_t$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Αντικρίζοντας μακροσκοπικά τα διαγράμματα στο σύνολο τους μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι τα δύο πρώτα επίπεδα του βάθους κοπής δίνουν τις μικρότερες τραχύτητες, με την ελάχιστη να είναι στο καθαρό HDPE και αμέσως μετά στο σύνθετο υλικό με περιεκτικότητα 3% σε γραφένιο. Επίσης, η αρχική προσθήκη γραφενίου επιδρά αρνητικά στην επίδραση που έχουν στην τραχύτητα οι ταχύτητες πρόωσης και περιστροφής, καθώς αμφότερες στο σύνθετο με περιεκτικότητα 1% παρουσιάζουν αύξηση στην ελάχιστη τραχύτητα που επιτυγχάνουν, ενώ στην περιεκτικότητα 3% η τραχύτητα που οφείλεται σε αυτούς τους δύο παράγοντες έχει πέσει οριακά κάτω από το επίπεδο του καθαρού HDPE.

#### 8.1.4. Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για την τραχύτητα $S_m$

Βάσει των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-4, στα κατεργασμένα δοκίμια υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) χωρίς προσμίξεις γραφενίου, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $S_m=185\mu\text{m}$ ,  $S_m=180\mu\text{m}$  και  $S_m=160\mu\text{m}$ , για το τρίτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=3\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το τρίτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,15$  mm/rev), αντίστοιχα. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, επιτυγχάνεται ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $S_m=160\mu\text{m}$ ,  $S_m=155\mu\text{m}$  και  $S_m=160\mu\text{m}$ , για το τρίτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=3\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το τρίτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,15$  mm/rev), αντίστοιχα. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, τα κατεργασμένα δοκίμια εμφανίζουν ελάχιστη τραχύτητα ίση με  $S_m=130\mu\text{m}$ ,  $S_m=170\mu\text{m}$  και  $S_m=155\mu\text{m}$ , για το τρίτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=3\text{mm}$ ),

για το τρίτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=1500\text{rpm}$ ) και για το δεύτερο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,10\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η ελάχιστη τραχύτητα που λαμβάνεται είναι ίση με  $S_m=165\mu\text{m}$ ,  $S_m=160\mu\text{m}$  και  $S_m=140\mu\text{m}$ , για το τρίτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=3\text{mm}$ ), για το τρίτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=1500\text{rpm}$ ) και για το τρίτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,15\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα.



Εικόνα 8-4: Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραμέτρων της κοπής στην  $S_m$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

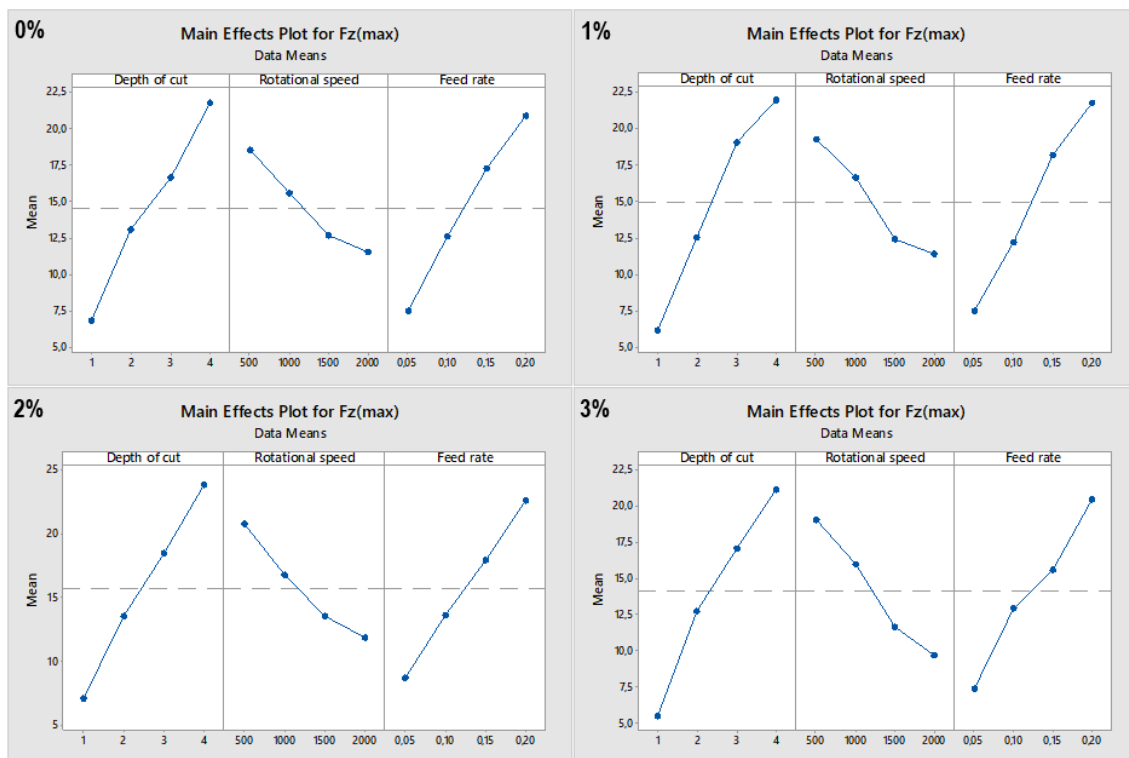
Αντικρίζοντας μακροσκοπικά τα διαγράμματα στο σύνολο τους μπορεί να παρατηρήσει κανείς ότι η ελάχιστη τιμή της παραμέτρου της τραχύτητας  $S_m$  που οφείλεται στο βάθος κοπής εντοπίζεται για όλες τις περιεκτικότητες στο τρίτο επίπεδο ( $a=3\text{mm}$ ), ενώ παράλληλα μειώνεται με την προσθήκη γραφενίου στο HDPE, μέχρι την ελάχιστη τιμή της ( $S_m=130\mu\text{m}$ ) για περιεκτικότητα 2% σε γραφένιο και για περιεκτικότητα 3% αυξάνεται και πάλι παραμένοντας όμως κάτω από την τιμή που είχε για το σκέτο HDPE. Επίσης, η μικρότερη  $S_m$  για την ταχύτητα περιστροφής, μειώνεται με την προσθήκη γραφενίου στο HDPE και παραμένει σχετικά σταθερή στα  $160\mu\text{m}$ , κάτι που επιτυγχάνεται από το τέταρτο επίπεδο ( $n=2000\text{rpm}$ ) για ποσοστά 0% και 1% και στη συνέχεια από το τρίτο επίπεδο ( $n=1500\text{rpm}$ ) για ποσοστά 2% και 3%. Ακόμα, η ελάχιστη  $S_m$  για την πρόωση εντοπίζεται στο τρίτο επίπεδο ( $f=0,15\text{mm/rev}$ ) για όλες τις περιεκτικότητες σε γραφένιο, πλην της 2%, που εντοπίζεται στο δεύτερο επίπεδο ( $f=0,10\text{mm/rev}$ ) και ενώ για 0%, 1% και 2% είναι σταθερή στα  $160\mu\text{m}$ , στην περιεκτικότητα του 3% μειώνεται στα  $140\mu\text{m}$ .

### 8.1.5. Διαγράμματα κύριων επιδράσεων για τη δύναμη $F_{z_{\max}}$

Βάσει των διαγραμμάτων κύριων επιδράσεων, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-5, στα κατεργασμένα δοκίμια υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλενίου (HDPE) χωρίς προσμίξεις γραφενίου, επιτυγχάνεται ελάχιστη δύναμη κοπής ίση με  $F_{z_{\max}}=7\text{N}$ ,  $F_{z_{\max}}=11\text{N}$  και  $F_{z_{\max}}=7,5\text{N}$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1\text{mm}$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000\text{rpm}$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05\text{ mm/rev}$ ), αντίστοιχα. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο



υλικό HDPE-γραφένιο, επιτυγχάνεται ελάχιστη δύναμη κοπής ίση με  $F_{z_{max}}=6N$ ,  $F_{z_{max}}=11,5N$  και  $F_{z_{max}}=7,5N$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1mm$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000rpm$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05 mm/rev$ ), αντίστοιχα. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, τα κατεργασμένα δοκίμια εμφανίζουν ελάχιστη δύναμη κοπής ίση με  $F_{z_{max}}=7N$ ,  $F_{z_{max}}=11N$  και  $F_{z_{max}}=8N$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1mm$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000rpm$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05 mm/rev$ ), αντίστοιχα. Τέλος με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η ελάχιστη δύναμη κοπής που μετρείται είναι ίση με  $F_{z_{max}}=5,5N$ ,  $F_{z_{max}}=9N$  και  $F_{z_{max}}=7N$ , για το πρώτο επίπεδο βάθους κοπής ( $a=1mm$ ), για το τέταρτο επίπεδο της ταχύτητας περιστροφής ( $n=2000rpm$ ) και για το πρώτο επίπεδο πρόωσης ( $f=0,05 mm/rev$ ), αντίστοιχα.



Εικόνα 8-5: Διαγράμματα κύριων επιδράσεων των παραμέτρων της κοπής στην  $F_{z_{max}}$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

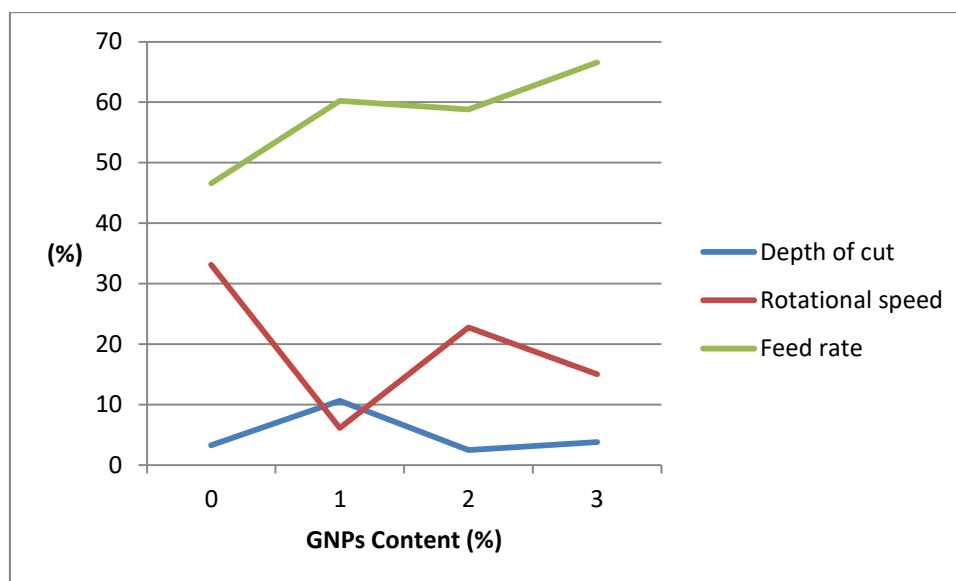
Αντικρίζοντας μακροσκοπικά τα διαγράμματα μπορεί να γίνει η παρατήρηση ότι όσο και αν αυξήθηκε το ποσοστό του γραφενίου, οι ελάχιστη δύναμη κοπής παρέμεινε σχετικά αμετάβλητη, με μία μικρή πτώση μόνο στην περιεκτικότητα του 3%, όπου είναι 1-2 N πιο χαμηλή, για το βάθος κοπής και την ταχύτητα περιστροφής. Η ελάχιστη τραχύτητα που οφείλεται στην πρόωση δεν επηρεάζεται από την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλες τις περιεκτικότητες τα επίπεδα των παραμέτρων που έδιναν την ελάχιστη τραχύτητα ήταν τα ίδια, δηλαδή το μικρότερο χρησιμοποιούμενο βάθος κοπής ( $a=1mm$ ), η υψηλότερη ταχύτητα περιστροφής ( $n=2000rpm$ ) και η ελάχιστη πρόωση ( $f=0,05mm/rev$ ).

## 8.2. Ανάλυση διακύμανσης (Analysis of variance-ANOVA)

### 8.2.1. Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $R_a$

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση της διακύμανσης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$ , δημιουργούνται οι πίνακες του [Παραρτήματος Ε](#), από τους οποίους εξάγονται τα παρακάτω δεδομένα. Αρχικά, στα κατεργασμένα δοκίμια πολυαιθυλενίου υψηλής πυ-

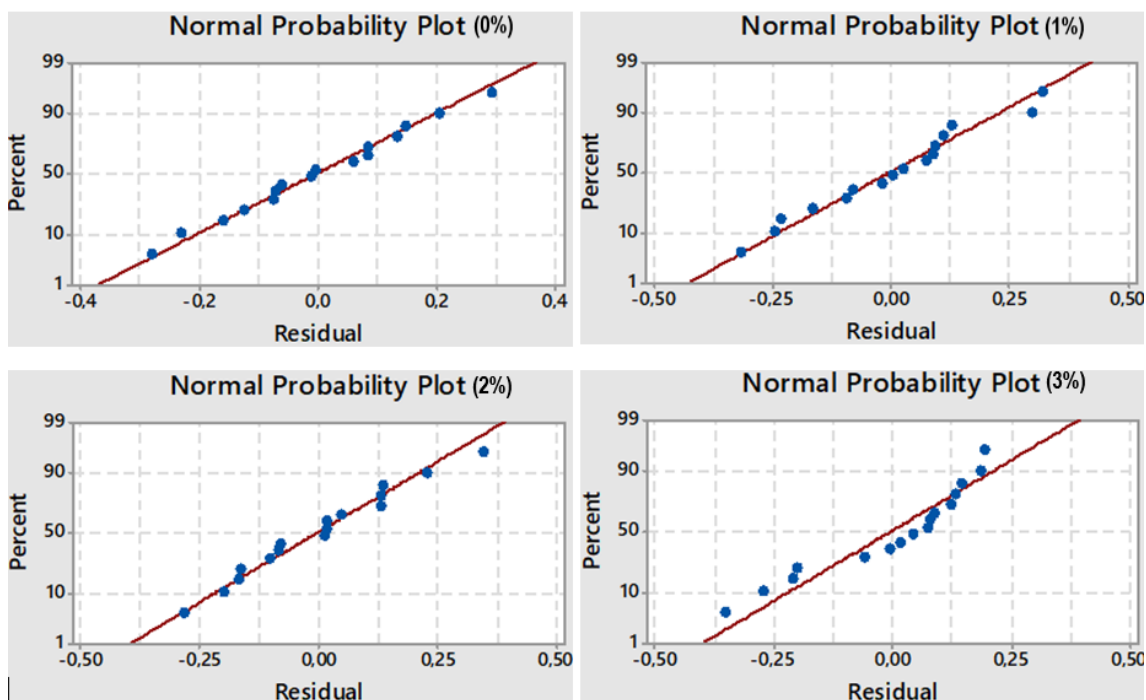
κνότητας χωρίς ενίσχυση γραφενίου (0% περιεκτικότητα σε γραφένιο), η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $R_a$  είναι η πρόωση σε ένα ποσοστό 46,56%, με δεύτερη να είναι η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 33,12% και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστό 3,27%. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, από την ανάλυση διακύμανσης προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $R_a$  είναι η πρόωση με ποσοστό 60,22%, με δεύτερη να είναι το βάθος κοπής με ποσοστό 10,60% και τελευταία την ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 6,10%. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, η βασική παράμετρος που επηρεάζει την  $R_a$  είναι η πρόωση σε ποσοστό 58,80%, με δεύτερη την ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 22,72% και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστό 2,47%. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τις μεταβολές της τραχύτητας  $R_a$  παραμένει η πρόωση, με ποσοστό 66,61%, δεύτερη έρχεται η ταχύτητα περιστροφής και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστά 15,02% και 3,79% αντίστοιχα. Οι παραπάνω διακυμάνσεις παρουσιάζονται γραφικά στην εικόνα 8-6.



Εικόνα 8-6: Γράφημα ανάλυσης της διακύμανσης των παραμέτρων κοπής για την  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Αντικρίζοντας μακροσκοπικά το ποσοστό που κάθε παράμετρος κοπής επηρεάζει την  $R_a$ , μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η πρόωση έχει διαρκώς το μεγαλύτερο ποσοστό, το οποίο αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε γραφένιο στο σύνθετο υλικό, ακουμπώντας τη μέγιστη τιμή του 66,61% για 3% γραφένιο. Η ταχύτητα περιστροφής αν και έχει πολύ μεγάλο αρχικό ποσοστό (33,12%) όταν δεν υπάρχει καθόλου γραφένιο (0%), σε περιεκτικότητα 1% πέφτει στο 6,1% ποσοστό επηρεασμού, το οποίο είναι κάτω και από το βάθος κοπής, το οποίο για αυτή την περιεκτικότητα αυξάνεται στο 10,6%. Όταν αυξήθηκε κι άλλο η περιεκτικότητα σε γραφένιο, δηλαδή 2% και στη συνέχεια 3%, το βάθος κοπής επέστρεψε στα αρχικά χαμηλά επίπεδα (2,5%-4% περίπου), ενώ η ταχύτητα περιστροφής είχε πιο ασταθή πορεία, με αύξηση μέχρι το 22,72% και εκ νέου μείωση στο 15,02%.

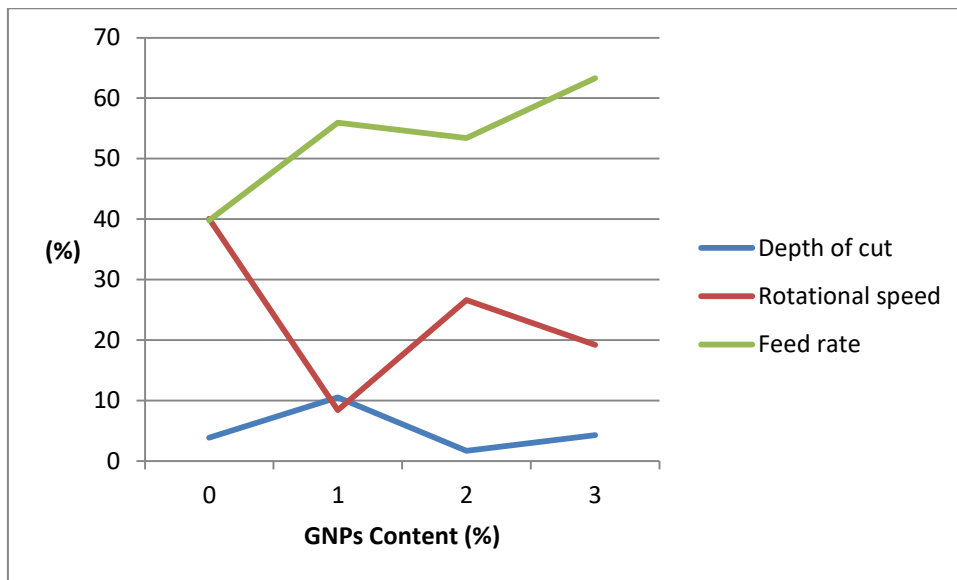
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της κανονικής πιθανότητας (normal probability plots) για κάθε περιεκτικότητα σε γραφένιο, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-7, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση των παραμέτρων της κοπής με τις εξόδους που εξετάζονται.



Εικόνα 8-7: Διαγράμματα κανονικής πιθανότητας των υπολειμάτων των δεδομένων της  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

### 8.2.2. Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $R_a$

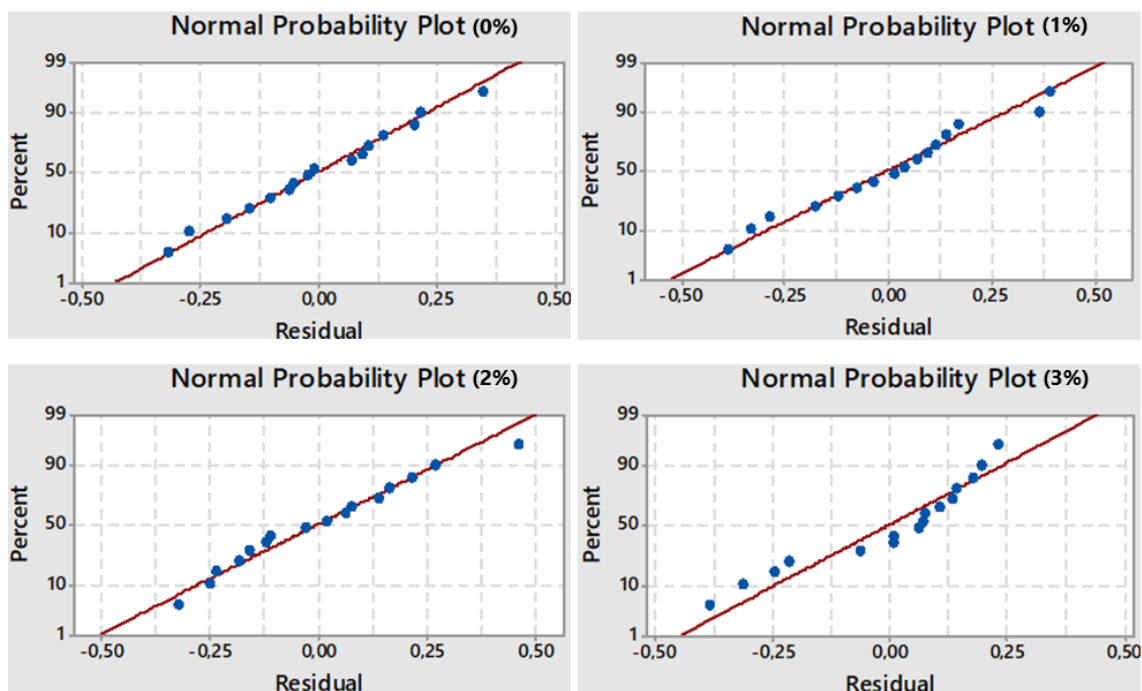
Χρησιμοποιώντας την ανάλυση της διακύμανσης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_a$ , δημιουργούνται οι πίνακες του [Παραρτήματος Ε](#), από τους οποίους εξάγονται τα παρακάτω δεδομένα. Αρχικά, στα κατεργασμένα δοκίμια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας χωρίς ενίσχυση γραφενίου (0% περιεκτικότητα σε γραφένιο), προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $R_a$  είναι η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 40,05%, οριακά δεύτερη η πρόωση με ποσοστό 39,77% και τρίτη αρκετά πιο κάτω με ποσοστό 3,86% το βάθος κοπής. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, από την ανάλυση διακύμανσης προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $R_a$  είναι η πρόωση με ποσοστό 55,93%, με δεύτερη να είναι το βάθος κοπής με ποσοστό 10,53% και τελευταία την ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 8,38%. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, η βασική παράμετρος που επηρεάζει την  $R_a$  είναι η πρόωση σε ποσοστό 53,39%, με δεύτερη την ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 26,62% και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστό 1,69%. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τις μεταβολές της τραχύτητας  $R_a$  παραμένει η πρόωση, με ποσοστό 63,29%, δεύτερη έρχεται η ταχύτητα περιστροφής και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστά 19,21% και 4,27% αντίστοιχα. Οι παραπάνω διακυμάνσεις παρουσιάζονται γραφικά στην [εικόνα 8-8](#).



Εικόνα 8-8: Γράφημα ανάλυσης της διακύμανσης των παραμέτρων κοπής για την  $R_q$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Αντικρίζοντας μακροσκοπικά το ποσοστό που κάθε παράμετρος κοπής επηρεάζει την  $R_q$ , μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η πρόωση έχει το μεγαλύτερο ποσοστό, εκτός από την περίπτωση της μηδενική (0%) σε γραφένιο περιεκτικότητας, το οποίο αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας σε γραφένιο στο σύνθετο υλικό, ακουμπώντας τη μέγιστη τιμή του 63,29% για 3% γραφένιο. Η ταχύτητα περιστροφής αν και έχει πολύ μεγάλο αρχικό ποσοστό (40,05%) όταν δεν υπάρχει καθόλου γραφένιο (0%), σε περιεκτικότητα 1% πέφτει στο 8,38%, το οποίο είναι κάτω και από το βάθος κοπής, το οποίο για αυτή την περιεκτικότητα αυξάνεται στο 10,53%. Όταν αυξήθηκε κι άλλο η περιεκτικότητα σε γραφένιο, δηλαδή 2% και στη συνέχεια 3%, το βάθος κοπής επέστρεψε στα αρχικά χαμηλά επίπεδα (μεταξύ 1,5% και 4,5%), ενώ η ταχύτητα περιστροφής είχε πιο ασταθή πορεία, με αύξηση μέχρι το 26,62% και εκ νέου μείωση στο 19,21%.

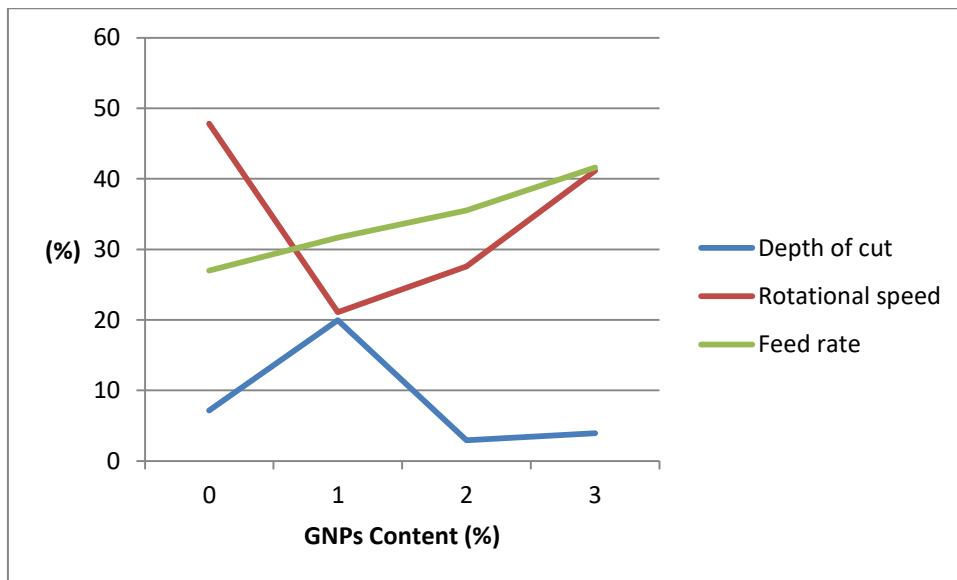
Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της κανονικής πιθανότητας (normal probability plots) για κάθε περιεκτικότητα σε γραφένιο, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-9, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση των παραμέτρων της κοπής με τις εξόδους που εξετάζονται.



Εικόνα 8-9: Διαγράμματα κανονικής πιθανότητας των υπολειμάτων των δεδομένων της  $R_t$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

### 8.2.3. Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $R_t$

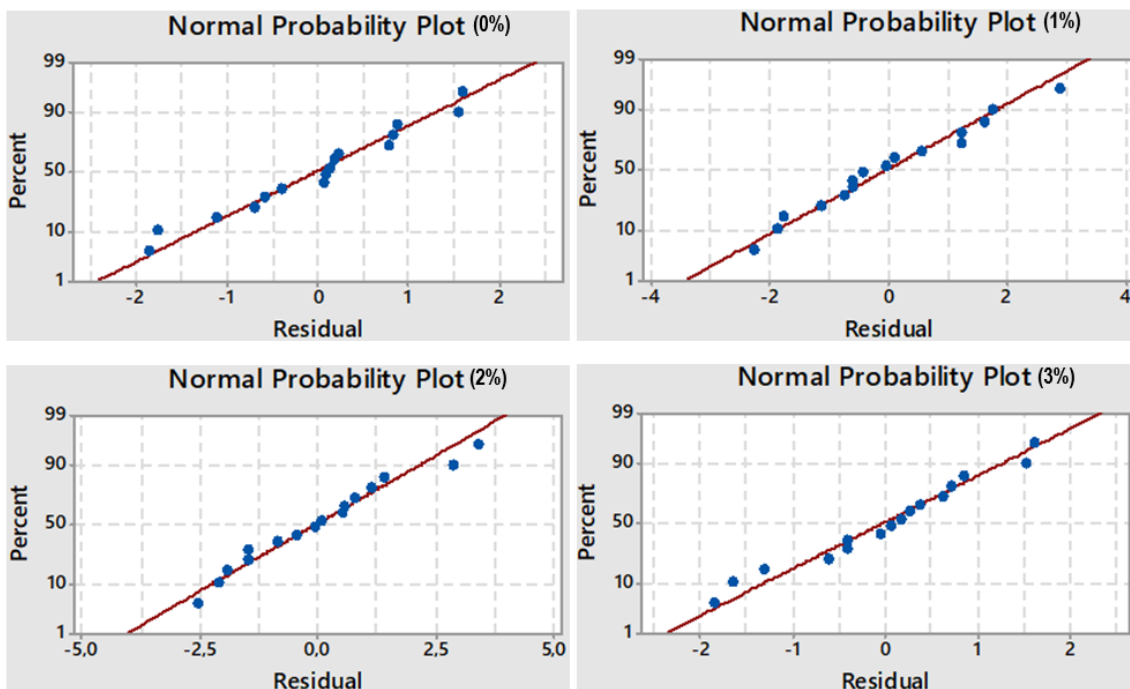
Χρησιμοποιώντας την ανάλυση της διακύμανσης για την παράμετρο της τραχύτητας  $R_t$ , δημιουργούνται οι πίνακες του [Παραρτήματος Ε](#), από τους οποίους εξάγονται τα παρακάτω δεδομένα. Αρχικά, στα κατεργασμένα δοκίμια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας χωρίς ενίσχυση γραφενίου (0% περιεκτικότητα σε γραφένιο), προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $R_t$  είναι η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 47,81%, δεύτερη η πρόωση με ποσοστό 27% και τρίτη με ποσοστό 7.14% το βάθος κοπής. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, από την ανάλυση διακύμανσης προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $R_t$  είναι η πρόωση με ποσοστό 31,64%, με δεύτερη να είναι η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 21,1% και τελευταία το βάθος κοπής με ποσοστό 19,95%. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, η βασική παράμετρος που επηρεάζει την  $R_t$  είναι η πρόωση σε ποσοστό 35,52%, με δεύτερη την ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 27,59% και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστό 2,92%. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τις μεταβολές της τραχύτητας  $R_t$  παραμένει η πρόωση, με ποσοστό 41,6%, οριακά δεύτερη έρχεται η ταχύτητα περιστροφής και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστά 41,16% και 3,93% αντίστοιχα. Οι παραπάνω διακυμάνσεις παρουσιάζονται γραφικά στην [εικόνα 8-10](#).



Εικόνα 8-10: Γράφημα ανάλυσης της διακύμανσης των παραμέτρων κοπής για την  $R_t$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Αντικρίζοντας μακροσκοπικά το ποσοστό που κάθε παράμετρος κοπής επηρεάζει την  $R_t$ , μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το βάθος κοπής αν και αυξάνει απότομα μέχρι σχεδόν 20%, όταν το ποσοστό του γραφενίου είναι 1%, στις υπόλοιπες περιεκτικότητες μένει μεταξύ 7,2% και 3,9%, ενώ ποτέ δεν ξεπερνάει κάποια άλλη παράμετρο κοπής. Η πρόωση ενώ ξεκινάει δεύτερη με 27% για 0% γραφένιο, αυξάνει σταθερά το ποσοστό της και στις υπόλοιπες περιεκτικότητες βρίσκεται πρώτη με τελικό ποσοστό 41,6% για 3% γραφένιο. Η ταχύτητα περιστροφής ενώ βρίσκεται πρώτη με ποσοστό 47,81% για 0% γραφένιο, πέφτει και για 1% γραφένιο βρίσκεται ελαφρώς παραπάνω από τελευταίο βάθος κοπής με ποσοστό 21,1% και στη συνέχεια μεγαλώνει εκ νέου το ποσοστό της ακουμπώντας σχεδόν την πρώτη πρόωση με ποσοστό 41,16%.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της κανονικής πιθανότητας (normal probability plots) για κάθε περιεκτικότητα σε γραφένιο, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-11, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση των παραμέτρων της κοπής με τις εξόδους που εξετάζονται.



Εικόνα 8-11: Διαγράμματα κανονικής πιθανότητας των υπολειμάτων των δεδομένων της  $R_t$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

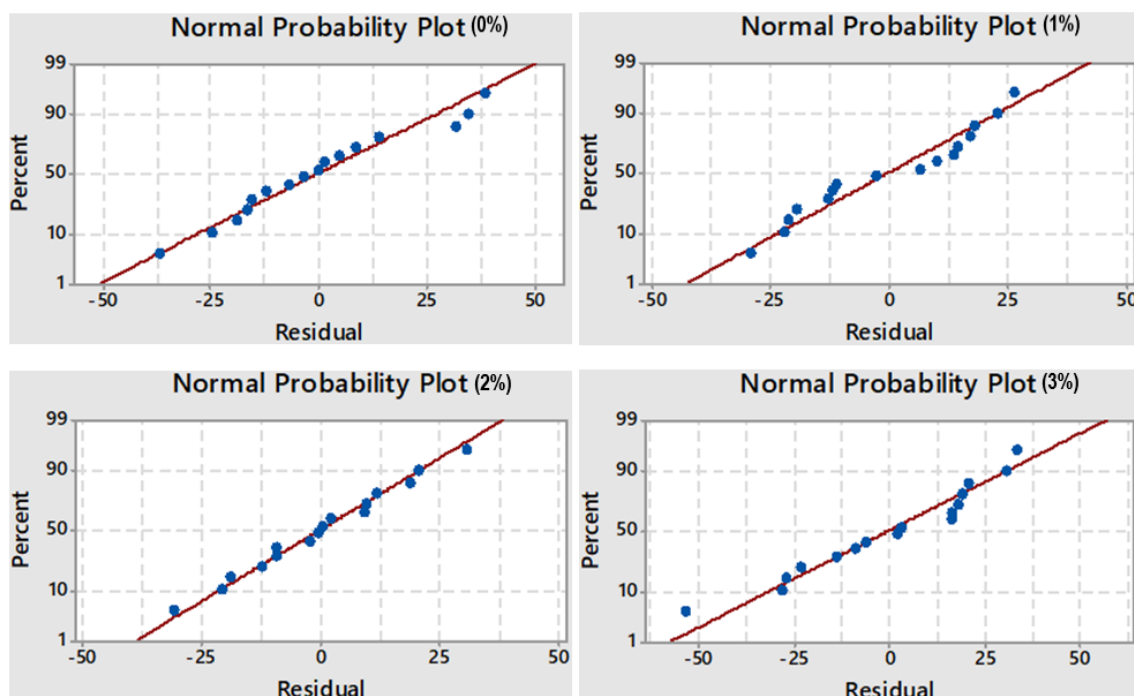
#### 8.2.4. Ανάλυση διακύμανσης για την τραχύτητα $S_m$

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση της διακύμανσης για την παράμετρο της τραχύτητας  $S_m$ , δημιουργούνται οι πίνακες του [Παραρτήματος Ε](#), από τους οποίους εξάγονται τα παρακάτω δεδομένα. Αρχικά, στα κατεργασμένα δοκίμια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας χωρίς ενίσχυση γραφενίου (0% περιεκτικότητα σε γραφένιο), προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $S_m$  είναι η πρόωση σε ποσοστό 51%, ακολουθεί από μακριά η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 8,97% και τρίτη είναι το βάθος κοπής με ποσοστό 2,22%. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, από την ανάλυση διακύμανσης προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την παράμετρο της τραχύτητας  $S_m$  είναι η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 32,12%, δεύτερη είναι η πρόωση με 31,12% και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστό 19,25%. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, η βασική παράμετρος που επηρεάζει την τραχύτητα  $S_m$  είναι το βάθος κοπής με ποσοστό 49,62%, δεύτερη έρχεται η πρόωση με ποσοστό 34,69% και τρίτη η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 4,18%. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο την τραχύτητα  $S_m$  είναι η πρόωση με ποσοστό 32,27%, δεύτερη είναι η ταχύτητα περιστροφής με 13,04% και τρίτη το βάθος κοπής με ποσοστό 6,02%.

Αντικρίζοντας μακροσκοπικά το ποσοστό που κάθε παράμετρος κοπής επηρεάζει την  $S_m$ , μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η πρόωση αν και ξεκινάει πρώτη ποσοστιαία με 51%, στη συνέχεια πέφτει και διατηρείται στο 32% περίπου, καταλήγοντας παρόλα αυτά πάλι με το υψηλότερο ποσοστό μεταξύ των παραμέτρων κοπής. Το βάθος κοπής αν και ξεκινάει από πολύ χαμηλά με ποσοστό μόλις 2,22%, αυξάνει ραγδαία και για την περιεκτικότητα 2% έχει φτάσει στο 49,62%, ενώ στη συνέχεια για περιεκτικότητα 3% πέφτει πάλι χαμηλά, περίπου στο 6%. Επίσης, η ταχύτητα περιστροφής έχει αυξομειώσεις πολύ έντονες, καθώς ξεκινάει κάτω από 10% και για την περιεκτικότητα 1% φτάνει το 32,12%, ενώ στη συνέχεια πέφτει πάλι γύρω στο 5-10%.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της κανονικής πιθανότητας (normal probability plots) για κάθε περιεκτικότητα σε γραφένιο, τα οποία παρουσιάζονται στην [εικόνα 8-12](#),

παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση των παραμέτρων της κοπής με τις εξόδους που εξετάζονται..

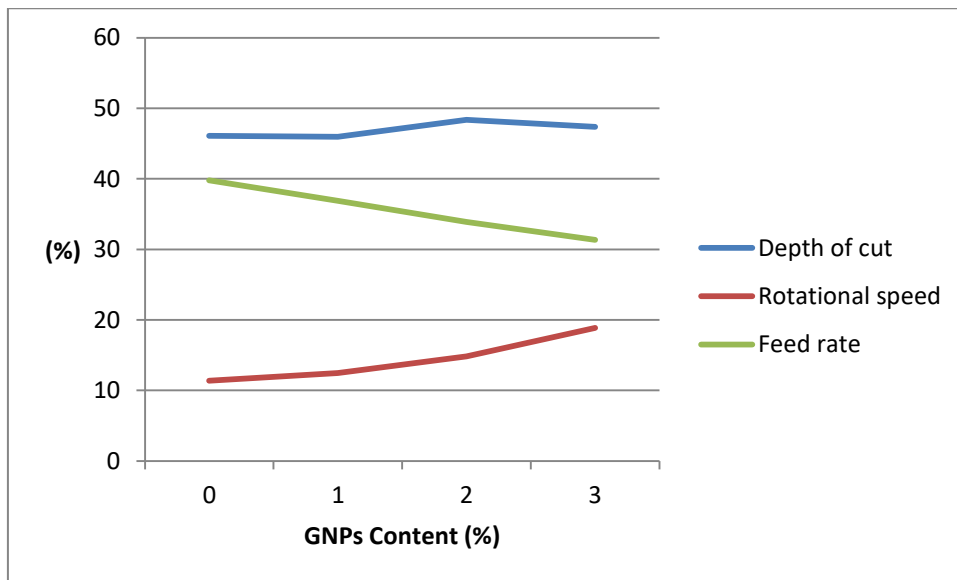


Εικόνα 8-12: Διαγράμματα κανονικής πιθανότητας των υπολειμάτων των δεδομένων της  $S_m$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

### 8.2.5. Ανάλυση διακύμανσης για τη δύναμη $F_{z_{max}}$

Χρησιμοποιώντας την ανάλυση της διακύμανσης για την παράμετρο της τραχύτητας  $F_{z_{max}}$ , δημιουργούνται οι πίνακες του [Παραρτήματος Ε](#), από τους οποίους εξάγονται τα παρακάτω δεδομένα. Αρχικά, στα κατεργασμένα δοκίμια πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας χωρίς ενίσχυση γραφενίου (0% περιεκτικότητα σε γραφένιο), προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει την  $F_{z_{max}}$  είναι το βάθος κοπής σε ποσοστό 46,11%, ακολουθεί από κοντά η πρόωση με ποσοστό 39,79% και τρίτη έρχεται η ταχύτητα περιστροφής με 11,38%. Αφού προστέθηκε 1% γραφένιο και δημιουργήθηκε το σύνθετο υλικό HDPE-γραφένιο, από την ανάλυση διακύμανσης προκύπτει ότι η κύρια παράμετρος κοπής που επηρεάζει τη δύναμη κοπής  $F_{z_{max}}$  είναι το βάθος κοπής με ποσοστό 45,95%, ακολουθεί με 36,87% η πρόωση και τρίτη έρχεται η ταχύτητα περιστροφής με ποσοστό 12,47%. Με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό σε 2%, η βασική παράμετρος που επηρεάζει τη δύναμη κοπής συνεχίζει να είναι το βάθος κοπής σε ποσοστό 48,38%, η πρόωση έχει ποσοστό 33,86% και η ταχύτητα περιστροφής 14,84%. Τέλος, με την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο μέγιστο εξεταζόμενο ποσοστό του 3%, η παράμετρος που επηρεάζει περισσότερο τη μεταβολή της δύναμης κοπής παραμένει το βάθος κοπής με ποσοστό 47,36%, δεύτερη έρχεται η πρόωση με 31,33% και τρίτη η ταχύτητα περιστροφής με 18,86%. Οι παραπάνω διακυμάνσεις παρουσιάζονται γραφικά στην [εικόνα 8-13](#).

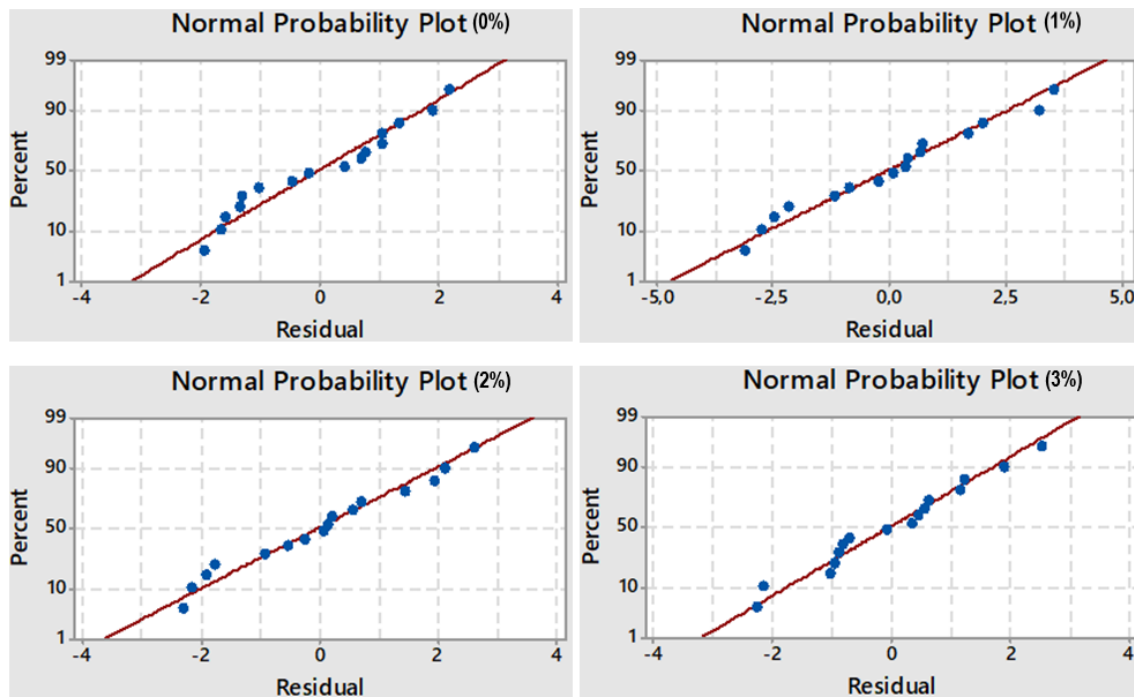




Εικόνα 8-13: Γράφημα ανάλυσης της διακύμανσης των παραμέτρων κοπής για την  $Fz_{max}$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

Αντικρίζοντας μακροσκοπικά το ποσοστό που κάθε παράμετρος κοπής επηρεάζει τη δύναμη κοπής  $Fz_{max}$ , γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι το βάθος κοπής έχει τον κυρίαρχο ρόλο με ποσοστό σχετικά σταθερό μεταξύ 46% και 48,5% καθώς αυξάνει η περιεκτικότητα σε γραφένιο. Παράλληλα, το ποσοστό της πρόωσης μειώνεται από 39,79% σε 31,33%, παραμένοντας πάντα στη δεύτερη θέση σημαντικότητας, ενώ το ποσοστό της ταχύτητας περιστροφής αν και αυξάνεται από το αρχικό 11,38% για 0% γραφένιο, στο τελικό 18,86% για 3% γραφένιο στο HDPE, συνεχίζει να βρίσκεται στην τρίτη θέση.

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα της κανονικής πιθανότητας (normal probability plots) για κάθε περιεκτικότητα σε γραφένιο, τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα 8-14, παρατηρείται ισχυρή συσχέτιση των παραμέτρων της κοπής με τις εξόδους που εξετάζονται.



Εικόνα 8-14: Διαγράμματα κανονικής πιθανότητας των υπολειμάτων των δεδομένων της  $Fz_{max}$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

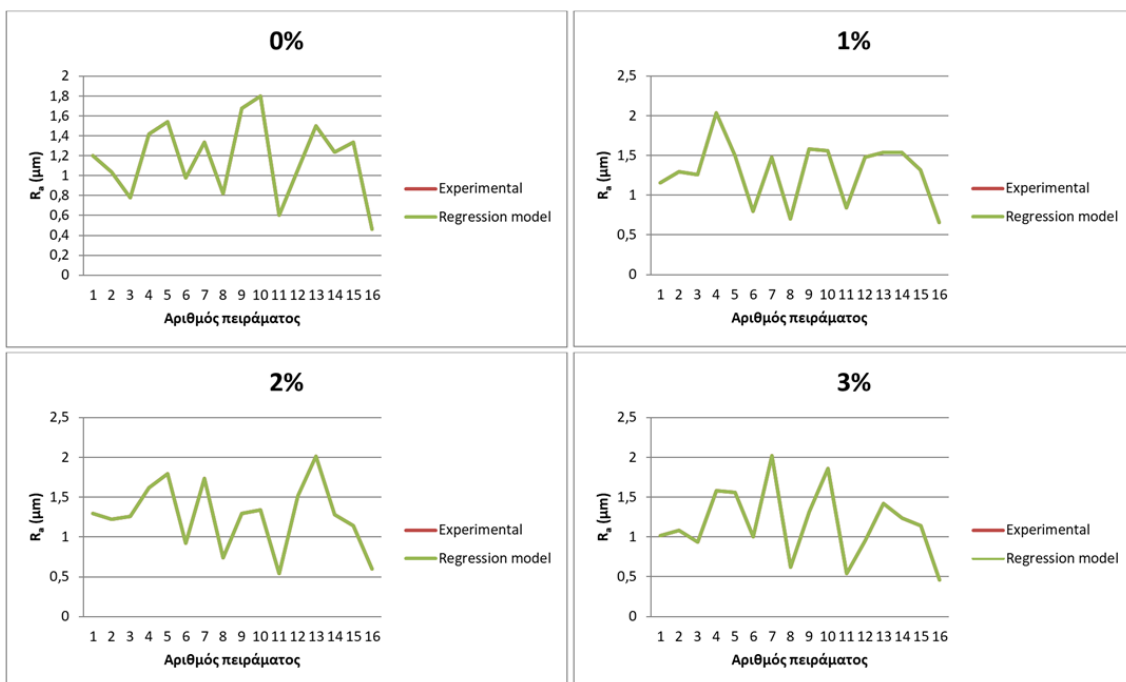
### 8.3. Ανάλυση παλινδρόμησης (Regression analysis)

Με το μοντέλο ανάλυσης παλινδρόμησης (regression analysis model) που χρησιμοποιείται στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη της κατεργασιμότητας του σύνθετου υλικού μήτρας HDPE και ενίσχυσης GNPs, με ποσοστό επιτυχίας 100%. Στις υποενοότητες του κεφαλαίου εξετάζεται ξεχωριστά η ανάλυση παλινδρόμησης για κάθε μία από τις πέντε διαφορετικές παραμέτρους κατεργασιμότητας που μετρήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία. Επίσης, οι εξισώσεις παλινδρόμησης που δημιουργήθηκαν μέσω της ανάλυσης παλινδρόμησης, για να γίνουν πιο ευανάγνωστες πραγματοποιήθηκαν οι εξής αντικαταστάσεις όρων:

- Το “Depth of cut” (βάθος κοπής) αντικαταστάθηκε με το “Α”.
- Το “Rotational speed” (ταχύτητα περιστροφής) αντικαταστάθηκε με το “Β”.
- Και το “Feed rate” (πρόωση) αντικαταστάθηκε με το “Γ”.

#### 8.3.1. Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $R_a$

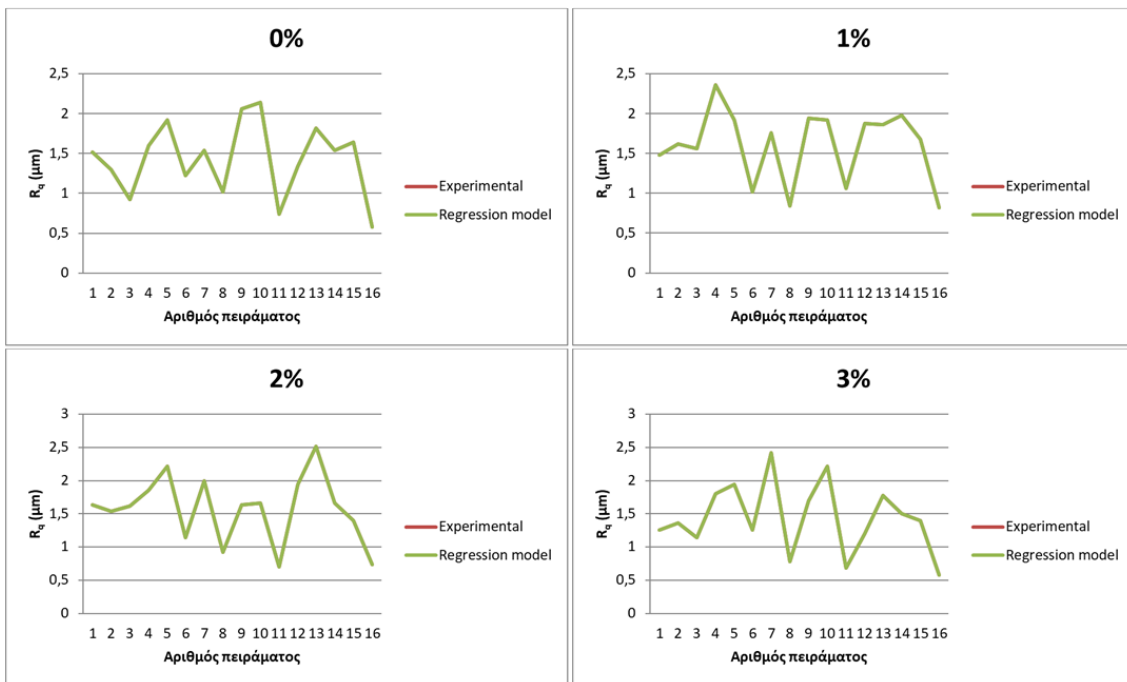
Διεξάγοντας ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα  $R_a$ , προκύπτουν οι τιμές βάρους για κάθε μεταβλητή και για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών, που δίνονται στον αντίστοιχο πίνακα κάθε περιεκτικότητας, οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Αποτέλεσμα των βαρών που καταγράφηκαν στους πίνακες είναι οι εξισώσεις παλινδρόμησης (μια για κάθε περιεκτικότητα), οι οποίες παρατίθενται μαζί με τους πίνακες στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Οι εξισώσεις παλινδρόμησης προβλέπουν με ποσοστό ακρίβειας 100% τις τιμές της τραχύτητα  $R_a$ , όπως φαίνεται και στα διαγράμματα στην [εικόνα 8-15](#), όπου για όλες τις περιεκτικότητες, το διάγραμμα των πειραματικών τιμών ταυτίζεται απόλυτα με το διάγραμμα των τιμών που προέβλεψε το μοντέλο παλινδρόμησης.



Εικόνα 8-15: Διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών τιμών της  $R_a$ , με τις τιμές που προέβλεψε το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης για την  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

### 8.3.2. Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $R_q$

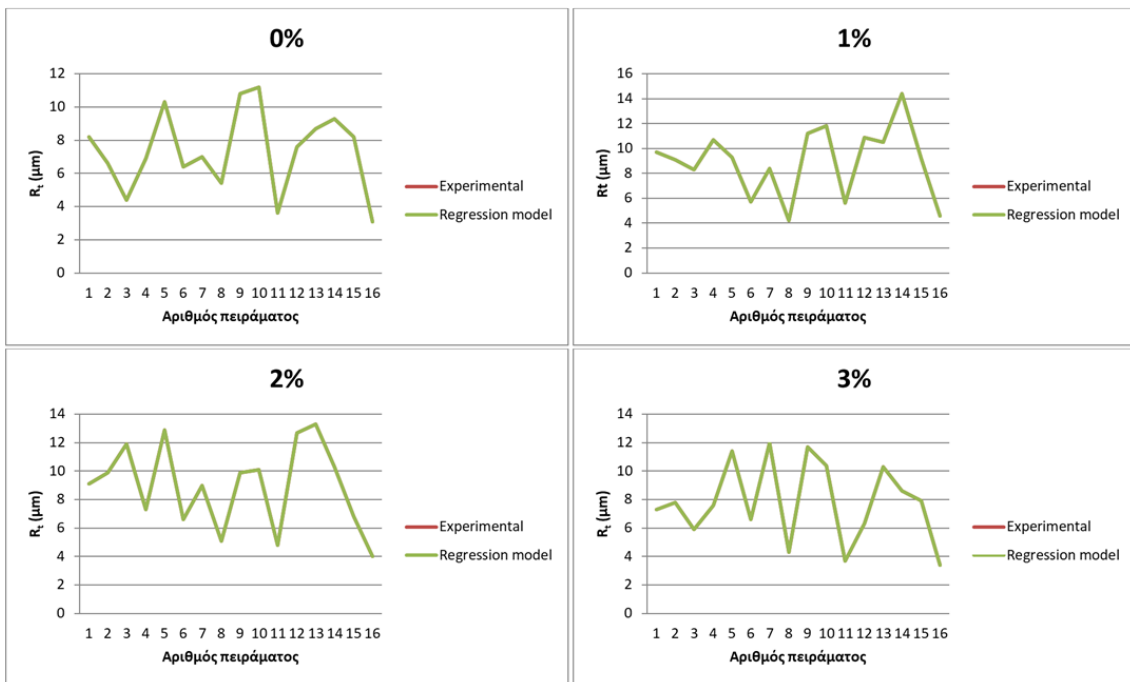
Διεξάγοντας ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα  $R_q$ , προκύπτουν οι τιμές βάρους για κάθε μεταβλητή και για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών, που δίνονται στον αντίστοιχο πίνακα κάθε περιεκτικότητας, οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Αποτέλεσμα των βαρών που καταγράφηκαν στους πίνακες είναι οι εξισώσεις παλινδρόμησης (μια για κάθε περιεκτικότητα) οι οποίες παρατίθενται μαζί με τους πίνακες στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Οι εξισώσεις παλινδρόμησης προβλέπουν με ποσοστό ακρίβειας 100% τις τιμές της τραχύτητα  $R_q$ , όπως φαίνεται και στα διαγράμματα στην [εικόνα 8-16](#), όπου για όλες τις περιεκτικότητες, το διάγραμμα των πειραματικών τιμών ταυτίζεται απόλυτα με το διάγραμμα των τιμών που προέβλεψε το μοντέλο παλινδρόμησης.



Εικόνα 8-16: Διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών τιμών της  $R_a$ , με τις τιμές που προέβλεψε το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης για την  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

### 8.3.3. Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $R_t$

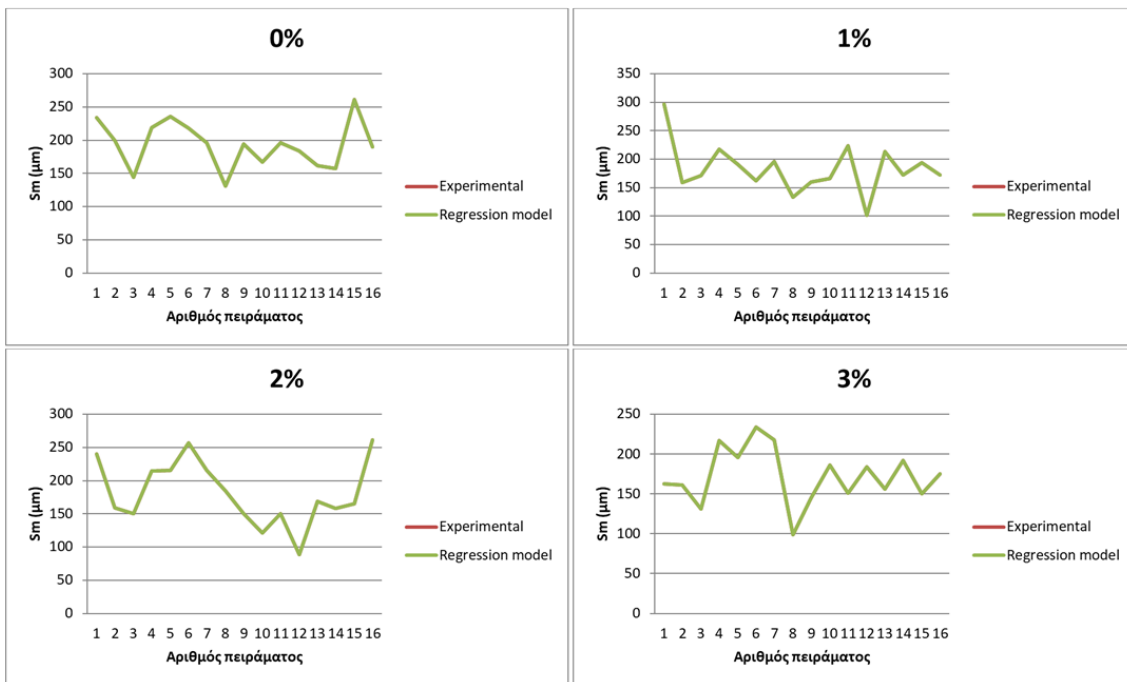
Διεξάγοντας ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα  $R_t$ , προκύπτουν οι τιμές βάρους για κάθε μεταβλητή και για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών, που δίνονται στον αντίστοιχο πίνακα κάθε περιεκτικότητας, οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Αποτέλεσμα των βαρών που καταγράφηκαν στους πίνακες είναι οι εξισώσεις παλινδρόμησης (μια για κάθε περιεκτικότητα) οι οποίες παρατίθενται μαζί με τους πίνακες στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Οι εξισώσεις παλινδρόμησης προβλέπουν με ποσοστό ακρίβειας 100% τις τιμές της τραχύτητα  $R_t$ , όπως φαίνεται και στα διαγράμματα στην [εικόνα 8-17](#), όπου για όλες τις περιεκτικότητες, το διάγραμμα των πειραματικών τιμών ταυτίζεται απόλυτα με το διάγραμμα των τιμών που προέβλεψε το μοντέλο παλινδρόμησης.



Εικόνα 8-17: Διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών τιμών της  $R_t$ , με τις τιμές που προέβλεψε το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης για την  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

#### 8.3.4. Ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα $S_m$

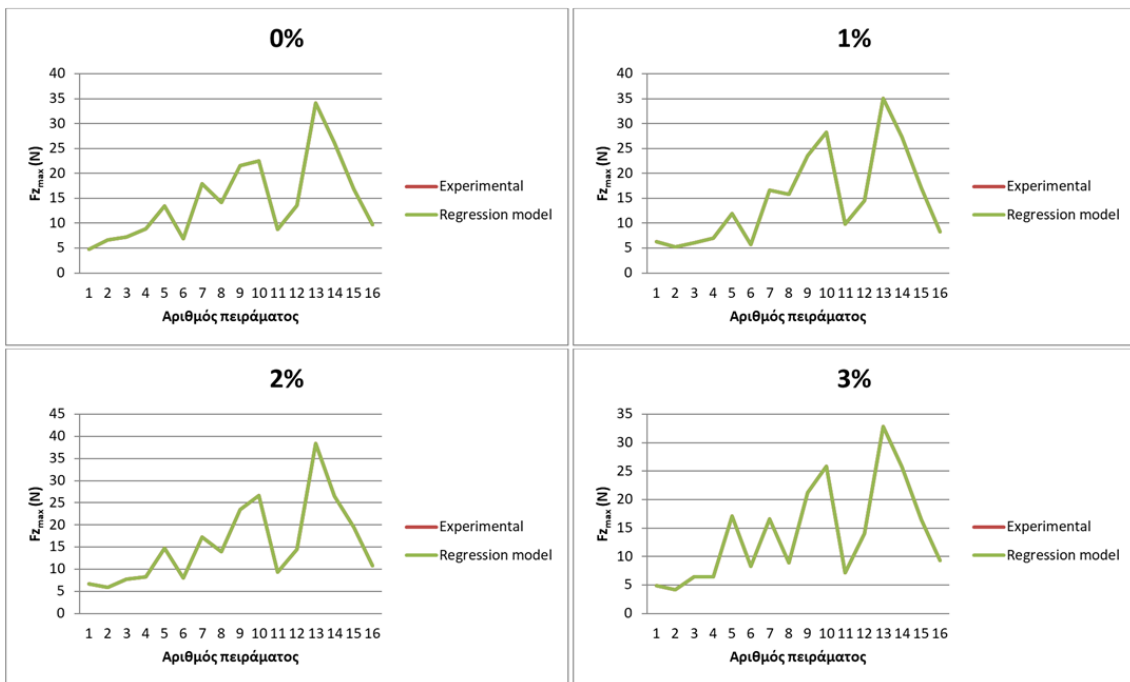
Διεξάγοντας ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα  $S_m$ , προκύπτουν οι τιμές βάρους για κάθε μεταβλητή και για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών, που δίνονται στον αντίστοιχο πίνακα κάθε περιεκτικότητας, οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο Παράρτημα ΣΤ. Αποτέλεσμα των βαρών που καταγράφηκαν στους πίνακες είναι οι εξισώσεις παλινδρόμησης (μια για κάθε περιεκτικότητα) οι οποίες παρατίθενται μαζί με τους πίνακες στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Οι εξισώσεις παλινδρόμησης προβλέπουν με ποσοστό ακρίβειας 100% τις τιμές της τραχύτητα  $S_m$ , όπως φαίνεται και στα διαγράμματα στην [εικόνα 8-18](#), όπου για όλες τις περιεκτικότητες, το διάγραμμα των πειραματικών τιμών ταυτίζεται απόλυτα με το διάγραμμα των τιμών που προέβλεψε το μοντέλο παλινδρόμησης.



Εικόνα 8-18: Διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών τιμών της  $S_m$ , με τις τιμές που προέβλεψε το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης για την  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

### 8.3.5. Ανάλυση παλινδρόμησης για τη δύναμη $Fz_{max}$

Διεξάγοντας ανάλυση παλινδρόμησης για την τραχύτητα  $Fz_{max}$ , προκύπτουν οι τιμές βάρους για κάθε μεταβλητή και για τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών, που δίνονται στον αντίστοιχο πίνακα κάθε περιεκτικότητας, οι οποίοι συμπεριλαμβάνονται στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Αποτέλεσμα των βαρών που καταγράφηκαν στους πίνακες είναι οι εξισώσεις παλινδρόμησης (μια για κάθε περιεκτικότητα) οι οποίες παρατίθενται μαζί με τους πίνακες στο [Παράρτημα ΣΤ](#). Οι εξισώσεις παλινδρόμησης προβλέπουν με ποσοστό ακρίβειας 100% τις τιμές της τραχύτητα  $Fz_{max}$ , όπως φαίνεται και στα διαγράμματα στην [εικόνα 8-19](#) όπου για όλες τις περιεκτικότητες, το διάγραμμα των πειραματικών τιμών ταυτίζεται απόλυτα με το διάγραμμα των τιμών που προέβλεψε το μοντέλο παλινδρόμησης.



Εικόνα 8-19: Διαγράμματα σύγκρισης των πειραματικών τιμών της  $F_{z_{max}}$ , με τις τιμές που προέβλεψε το μοντέλο της ανάλυσης παλινδρόμησης για την  $R_a$ , για τις περιεκτικότητες 1%, 2% και 3% σε γραφένιο του σύνθετου υλικού, καθώς και για τα δοκίμια καθαρού HDPE

## 9. Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

### 9.1. Σύνοψη πειραματικών συμπερασμάτων

Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ([Κεφάλαιο 2](#)), τα νανοϋλικά αναπτύσσονται με υψηλούς ρυθμούς, με αποτέλεσμα το γραφένιο που ανακαλύφθηκε επίσημα το 2004, να χρησιμοποιείται ήδη εργαστηριακά, αλλά και βιομηχανικά. Για το λόγο αυτό, εντοπίστηκε η ανάγκη διερεύνησης της κατεργασιμότητας του σύνθετου υλικού με μήτρα πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (HDPE) και ενίσχυση πολυστρωματικού γραφενίου (GNPs), σε κατεργασία τόννευσης. Εξετάστηκαν δοκίμια σύνθετου υλικού HDPE-GNPs τριών διαφορετικών περιεκτικότητας κατά βάρος σε γραφένιο (1%, 2% και 3%), καθώς και δοκίμια καθαρού HDPE, με διάφορες συνθήκες κοπής, ο συνδυασμός των οποίων σχημάτισε ένα πίνακα 16 πειραμάτων. Αναλύοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν παραθέτονται παρακάτω.

Η πρόωση αποτελεί αρχικά τη βασική παράμετρο κοπής που επηρεάζει την ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας, ενώ παράλληλα παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται το ποσοστό του γραφενίου εντός του συνθέτου, αυξάνεται και το ποσοστό επηρεασμού της έναντι της τραχύτητας της επιφάνειας. Επίσης, η ταχύτητα περιστροφής αν και αρχικά επηρεάζει σε μικρό βαθμό την τελική επιφάνεια του κατεργασμένου δοκιμίου, καθώς αυξάνεται το ποσοστό του γραφενίου, αυξάνεται και το ποσοστό συνεισφοράς της στην ποιότητα της κατεργασμένης επιφάνειας. Τέλος, η τραχύτητα της τελικής επιφάνειας δείχνει να επηρεάζεται λιγότερο από το βάθος κοπής, ποσοστό το οποίο μειώνεται περαιτέρω καθώς αυξάνεται το ποσοστό του γραφενίου εντός του συνθέτου υλικού.

Όσον αφορά τη δύναμη κοπής, το βάθος κοπής αποτελεί τη βασικότερη παράμετρο και παραμένει σταθερό κατά την αύξηση του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό. Ακόμα, η ταχύτητα περιστροφής που επηρεάζει τη δύναμη κοπής λιγότερο από όλες τις παραμέτρους κοπής, έχει ανοδική πορεία όσο αυξάνεται το ποσοστό του γραφενίου, ενώ η πρόωση που τα ποσοστά επίδρασής της επί της δύναμης κοπής την κατατάσσουν δεύτερη αρχικά, μειώνεται. Τέλος, υπάρχει μία γραμμική συσχέτιση με τα πειραματικά αποτελέσματα, μεταξύ της αύξησης της τιμής των παραμέτρων και της αύξησης του ποσοστού του γραφενίου στο σύνθετο υλικό.

Παράλληλα, το προτεινόμενο μοντέλο πρόβλεψης παρουσιάζει πολύ μεγάλη ικανότητα πρόβλεψης. Οι τιμές των παραμέτρων της τραχύτητας και της δύναμης που προέβλεψε το μοντέλο επιβεβαιώθηκαν σε ποσοστό 100% από τα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ το σφάλμα πρόβλεψης ήταν 0%, για όλες τις περιεκτικότητες σε GNPs που εξετάστηκαν.

### 9.2. Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Καθότι η κατεργασία νανοσύνθετων υλικών δεν έχει αναπτυχθεί ακόμα στο βαθμό που βρίσκονται οι κατεργασίες άλλων υλικών, όπως κυρίως τα μέταλλα, το πεδίο έρευνας είναι εξαιρετικά μεγάλο. Συνεπώς, περιορίζοντας το αχανές πεδίο των κατεργασιών, θα αναφερθούν κάποιες προτάσεις για την κατεργασία και το υλικό που εξετάστηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, δηλαδή την κατεργασία τόννευσης και το νανοσύνθετο υλικό μήτρας HDPE με ενίσχυση GNPs.

Αρχικά, χρήσιμη θα ήταν η εκτέλεση περισσότερων πειραμάτων για την εξέταση της επίδρασης μεγαλύτερου εύρους τιμών των βασικών παραμέτρων κοπής, δηλαδή του βάθους κοπής, της ταχύτητας περιστροφής και της πρόωσης. Επιπλέον, θα μπορούσαν να εξεταστούν και σύνθετα υλικά με διαφορετικές περιεκτικότητες σε γραφένιο. Ακόμα, παραπάνω παράμετροι κοπής θα μπορούσαν να εξεταστούν, όπως η γεωμετρία του κοπτικού εργαλείου, καθώς και η επίδραση των συνθηκών κοπής στη διάρκεια ζωής του κοπτικού. Τέλος, μία μελλοντική έρευνα πάνω στην κατεργασία τόννευσης του συγκεκριμένου νανοσύνθετου υλικού, θα μπορούσε να συμπεριλάβει και το πεδίο της ψύξης του συστήματος τεμάχιο-κοπτικό-απόβλιπτο.



## Βιβλιογραφία

- [1] Πετρόπουλος Π. Γ., Μηχανουργική τεχνολογία-Τεχνολογία Κατεργασιών Κοπής των Μετάλλων - Τόμος II -1, Θεσσαλονίκη, Εκδόσεις Ζήτη, 1998
- [2] Μούρλας Α., «Εργαστήριο τριβολογίας», Σημειώσεις εργαστηριακών ασκήσεων, ΤΕΙ Πειραιά, Τμήμα Μηχανολογίας, 2011
- [3] Αντωνιάδης Θ. Α., Μηχανουργική Τεχνολογία – Τόμος Β' «Κατεργασίες Κοπής», Εκδόσεις Τζιόλα, 2011
- [4] Gadelmawla E.S., Koura M.M., Maksoud T.M.A., Elewa I.M. και Soliman H.H., Roughness parameters, Journal of Materials Processing Technology 123, Pages 133 – 145, 2002
- [5] ISO3274: 1996, “Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Nominal characteristics (stylus) instruments”, International Standard
- [6] Davim J.P., Mata F., Influence of cutting parameters on surface roughness in turning glass-fiber-reinforced plastics using statistical analysis, Industrial Lubrication and Tribology, Volume 56, Number 5, Pages 270 – 274, 2004
- [7] Παντελής Ι. Δ., Μη Μεταλλικά Τεχνικά Υλικά, Έκδοση Δεύτερη, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, 2008
- [8] Giles H.F. Jr., Wagner J.R. Jr., Mount E.M. III, Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook, William Andrew Publishing, 2005
- [9] Vlachopoulos J., Strutt D., Polymer Processing, Materials Science and Technology, Volume 19, Issue 9: Polymer morphology and processing, 2003
- [10] Μητσούλης Ε., Βασικές αρχές μορφοποίησης πολυμερών, Τρίτη Έκδοση, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006
- [11] [www.taylor-hobson.com](http://www.taylor-hobson.com)
- [12] Νικολός Ι.Κ., Τσουρβελούδης Ν.Χ., Σημειώσεις τεχνολογίας παραγωγής, ΔΙ.Ε.ΕΡΓΑ., Πολυτεχνείο Κρήτης Χανιά, 2009
- [13] Μανωλάκος Δ. Ε., Κατεργασίες Γ-πρόχειρες σημειώσεις, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Τομέας Τεχνολογίας των Κατεργασιών, Αθήνα, 2018
- [14] Merchant M. E., Mechanics of the metal cutting process I: Orthogonal cutting and a type 2 chip, Journal of Applied Physics, Volume 16, number 5, Pages 267-275, 1945
- [15] Merchant M. E., Mechanics of the metal cutting process I: Plasticity Conditions in Orthogonal Cutting, Journal of Applied Physics, Volume 16, Pages 318-324, 1945
- [16] Sheikh-Ahmad J.Y., Machining of Polymer Composites, Springer, United Arab Emirates, 2009
- [17] Ferreira J.R., Coppini N.L., Miranda G.W.A., Machining optimization in carbon fibre reinforced composites materials, Journal of Materials Processing Technology, Volume 92-93, Pages 135-140, 1999
- [18] DIN ISO 1832: Wendeschneidplatten fur Zerspanwerkzeuge, Bezeichnung, Deutsches Institut fur Normung (Hrsg.), Berlin: Beuth Verlag, 2005
- [19] Liew P.J., Shaaroni A., Sidik N.A.C., Yan J., An overview of current status of cutting fluids and cooling techniques of turning hard steel, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 114, Pages 380-394, 2017
- [20] Siller A., Steininger A., Bleicher F., Heat Dissipation in Turning Operation by Means of Internal Cooling, Procedia Engineering, Volume 100, Pages 1116-1123, 2015
- [21] Taylor-Hobson, Surtronic 3+ OPERATING INSTRUCTIONS
- [22] [int.haascnc.com](http://int.haascnc.com)
- [23] Taniguchi N., On the Basic Concept of “Nano-Technology”, Proceeding of the Production Engineering International Conference, Part II, Japan Society of Precision Engineering, Tokyo, 1974
- [24] Feynman R., Theory of Fundamental Processes, Volume I, 1<sup>st</sup> Edition, Addison Wesley Publishing Company, New York, 1961

- [25] Kroto H.W., Heath J.R., O'Brien S.C., Curl R.F., Smalley R.E., C60: Buckminsterfullerene, *Nature*, Volume 318, Pages 162-163, 1985
- [26] [en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology](http://en.wikipedia.org/wiki/Nanotechnology)
- [27] Ajayan P.M., Schadler L.S., Braun P.V., *Nanocomposite Science and Technology*, Wiley Editions, 2003
- [28] Δρακόπουλος Ε., Κατασκευή-μοντελοποίηση και μελέτη της φυσικής και μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ενισχυμένης με νανοσωλήνες άνθρακα, ΔΠΜΣ Επιστήμη και Τεχνολογία Πολυμερών, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2010
- [29] Τρανταφύλλου Π., Έλεγχος της επίδρασης νανοδομών γραφενίου στις μηχανικές ιδιότητες μήτρας πολυαιθυλενίου, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2016
- [30] Choi W., Lahiri I., Seelaboyina R., Kang Y.S., *Synthesis of Graphene and Its Applications: A Review*, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, Volume 35, Pages 52-71, 2010
- [31] Novoselov K.S., Jiang D., Schedin F., Booth T.J., Khotkevich V.V., Morozov S.V. and Geim G., *Two-Dimensional Atomic Crystals*, *Proceeding of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Volume 102, Pages 10451-10453, 2005
- [32] Nemes-Incze P., Osvath Z., Kamaras K., Biro L.P., *Anomalies in thickness measurement of graphene and few layer graphite crystals by tapping mode atomic force microscopy*, *Carbon*, Volume 46, Pages 1435-1442, 2008
- [33] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V. Grigorieva I.V., Firsov A.A., *Electric field effect in atomically thin carbon films*, *Science*, Volume 306, Pages 666-669, 2004
- [34] Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Lau C.N., *Superior thermal conductivity of single layer graphene*, *Nanoletters*, Volume 8, Number 3, Pages 902-907, 2008
- [35] Cai W., Moore A.L., Zhu Y., Li X., Chen S., Shi L., Ruoff R.S., *Thermal transport in suspended and supported monolayer graphene grown by chemical vapor deposition*, *Nanoletters*, Volume 10, Pages 1645-1651, 2010
- [36] Los J.H., Zakharchenko K.V., Katsnelson M.I., Fasolino A., *Melting temperature of graphene*, *Physical Review B*, Volume 91, Issue 4, Pages 4-15, 2015
- [37] Lee C., Wei X., Kysar J.W., Hone J., *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene*, *Science*, Volume 321, Pages 385-388, 2008
- [38] Zhang P., Ma L., Fan F., Zeng Z., Peng C., Loya P.E., Zheng L., Gong Y., Zhang J., Zhang X., Ajayan P.M., Zhu T., Lou J., *Fracture toughness of graphene*, *Nature Communications*, Volume 5, Number 5, 2014
- [39] Somani P.R., Somani S.P., Umeno M., *Planer nano-graphenes from camphor by CVD*, *Chemical Physics Letters*, Volume 430, Pages 56-59, 2006
- [40] Batzill M., *The surface science of graphene: Metal interface, CVD synthesis, nanoribbons, chemical modifications, and defects*, *Surface Science Reports*, Volume 67, Pages 83-115, 2012
- [41] Paton K.R., et al., *Scalable production of large quantities of defect-free few-layer graphene by shear exfoliation in liquids*, *Nature Materials*, Volume 13, Pages 624-630, 2014
- [42] Schedin F., Geim A.K., Morozov S.V., Hill E.W., Blake P., Katsnelson M.I., Novoselov K.S., *Detection of individual gas molecules absorbed on graphene*, *Nature Materials*, Volume 6, Pages 652-655, 2007
- [43] Iijima S., *Helical microtubules of graphitic carbon*, *Nature*, Volume 354, Pages 56-58, 1991
- [44] Iijima S., Ichihashi T., *Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter*, *Nature*, Volume 363, Pages 603-605, 1993
- [45] Ma P., Siddiqui N.A., Marom G., Kim J., *Dispersion and functionalization of carbon nanotubes for polymer-based nanocomposites: A review*, *Composites: Part A*, Volume 41, Pages 1345-1367, 2010

- [46] Coleman J.N., Khan U., Blau W.J., Gun'ko Y.K., Small but strong: A review of the mechanical properties of carbon nanotube-polymer composites, *Carbon*, Volume 44, Pages 1624-1652, 2006
- [47] Pop E., Mann D., Wang Q., Goodson K., Dai H., Thermal conductance of an individual Single-wall carbon nanotube above room temperature, *Nanoletters*, Volume 6, Number 1, Pages 96-100, 2006
- [48] Sinha S., Barjami S., Iannacchione G, Schwab A., Muench G, Off-axis thermal properties of carbon nanotubes films, *Journal of nanoparticle research*, Volume 7, Pages 651-657, 2005



# SABIC® HDPE B5823

HIGH DENSITY POLYETHYLENE

### DESCRIPTION

SABIC® HDPE B5823 is typically used for blow moulding of consumer packaging up to 5 l, combining high stiffness and a good ESCR level. This grade is typically used for packaging the majority of household and industrial chemicals, such as detergents, cleaners, shampoos and cosmetics, as well as food packaging.

This product is not intended for and must not be used in any pharmaceutical/medical applications.

### TYPICAL PROPERTY VALUES

Revision 20180228

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
<b>POLYMER PROPERTIES</b>			
<b>Melt Flow Rate</b>			
at 190 °C and 2.16 kg	0.16	dg/min	ISO 1133
at 190 °C and 5 kg	0.89	dg/min	ISO 1133
at 190 °C and 21.6 kg	23	dg/min	ISO 1133
<b>Density <sup>(1)</sup></b>	958	kg/m <sup>3</sup>	ASTM D1505
<b>MECHANICAL PROPERTIES</b>			
<b>Tensile test <sup>(2) (3)</sup></b>			
stress at yield	28	MPa	ISO 527-2
stress at break	22	MPa	ISO 527-2
strain at break	1000	%	ISO 527-2
tensile modulus	1150	MPa	ISO 527-2
<b>Flexural test</b>			
Flexural modulus	1400	MPa	ISO 178
Flexural strength	29	MPa	ISO 178
<b>Izod impact notched</b>			
at 23 °C	12	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/A
at -30 °C	6	kJ/m <sup>2</sup>	ISO 180/A
<b>Hardness Shore D</b>	63	-	ISO 868
<b>ESCR (10% Igepal CO-630), F50</b>	45	h	ASTM D1693B
<b>THERMAL PROPERTIES</b>			
<b>Heat deflection temperature <sup>(4)</sup></b>			
at 0.45 MPa (HDT/B)	85	°C	ISO 75-2
<b>Vicat Softening Temperature</b>			
at 10 N (VST/A)	128	°C	ISO 306

PROPERTIES	TYPICAL VALUES	UNITS	TEST METHODS
<b>DSC test</b>			
melting point	133	°C	ISO 11357-3
enthalpy change	215	°C	ISO 11357-3

- (1) Compression moulding of test specimen according to ISO 1872-2
- (2) Speed of testing: 50 mm/min
- (3) Test specimen according to ISO 527-2 type 1BA, thickness 2 mm
- (4) Conditioning of test specimen: temp. 23 °C, relative humidity 50 %, 24 hours

## ENVIRONMENT AND RECYCLING

The environmental aspects of any packaging material do not only imply waste issues but have to be considered in relation with the use of natural resources, the preservations of foodstuffs, etc. SABIC Europe considers polyethylene to be an environmentally efficient packaging material. Its low specific energy consumption and insignificant emissions to air and water designate polyethylene as the ecological alternative in comparison with the traditional packaging materials. Recycling of packaging materials is supported by SABIC Europe whenever ecological and social benefits are achieved and where a social infrastructure for selective collecting and sorting of packaging is fostered. Whenever 'thermal' recycling of packaging (i.e. incineration with energy recovery) is carried out, polyethylene -with its fairly simple molecular structure and low amount of additives- is considered to be a trouble-free fuel.

## STORAGE AND HANDLING

Polyethylenes resins (in pelletised or powder form) should be stored in such a way that it prevents exposure to direct sunlight and/or heat, as this may lead to quality deterioration. The storage location should also be dry, dust free and the ambient temperature should not exceed 50 °C. Not complying with these precautionary measures can lead to a degradation of the product which can result in colour changes, bad smell and inadequate product performance. It is also advisable to process polyethylene resins (in pelletised or powder form) within 6 months after delivery, this because also excessive aging of polyethylene can lead to a deterioration in quality.

## HEALTH, SAFETY AND FOOD CONTACT REGULATIONS

Detailed information is provided in the relevant Material Safety Datasheet and or Standard Food Declaration, available on the Internet ([www.SABIC-europe.com](http://www.SABIC-europe.com)). Additional specific information can be requested via your local Sales Office.

## QUALITY

SABIC Europe is fully certified in accordance with the internationally accepted quality standard ISO 9001.

## DISCLAIMER

Any sale by SABIC, its subsidiaries and affiliates (each a "seller"), is made exclusively under seller's standard conditions of sale (available upon request) unless agreed otherwise in writing and signed on behalf of the seller. While the information contained herein is given in good faith, SELLER MAKES NO WARRANTY, EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING MERCHANTABILITY AND NONINFRINGEMENT OF INTELLECTUAL PROPERTY, NOR ASSUMES ANY LIABILITY, DIRECT OR INDIRECT, WITH RESPECT TO THE PERFORMANCE, SUITABILITY OR FITNESS FOR INTENDED USE OR PURPOSE OF THESE PRODUCTS IN ANY APPLICATION. Each customer must determine the suitability of seller materials for the customer's particular use through appropriate testing and analysis. No statement by seller concerning a possible use of any product, service or design is intended, or should be construed, to grant any license under any patent or other intellectual property right.

# Παράρτημα Β: Διάταξη δυναμόμετρου

## I. Δυναμόμετρο

KISTLER

Piezo-Messtechnik
Type **9257A**  
(9403)
Nr. 6.9257
Ed. 4,77
Fol. 1

**3-KOMPONENTEN-DYNAMOMETER  $F_x, F_y, F_z$**   
**DYNAMOMETRE A 3 COMPOSANTES  $F_x, F_y, F_z$**   
**3-COMPONENT DYNAMOMETER  $F_x, F_y, F_z$**

Quarzkristall - Dreikomponenten - Dynamometer zum Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft. Das Dynamometer besitzt eine grosse Steifheit und demzufolge eine hohe Eigenfrequenz, sein grosses Auflösungsvermögen ermöglicht das Messen von kleinsten dynamischen Änderungen grosser Kräfte.

Dynamomètre à cristal de quartz à trois composantes pour la mesure des trois composantes orthogonales d'une force. Celui-ci possède une grande rigidité et par conséquent une fréquence propre élevée; de plus, sa résolution très importante permet de mesurer les moindres variations de forces nominales importantes.

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has great rigidity and consequently a high natural frequency, while its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.

150 10  
25  
60±0.3  
15  
20 30 30 20  
20 95 20  
120 140  
20 25 25 25 25 25  
170

1 : 4

TECHNISCHE DATEN	DONNEES TECHNIQUES	TECHNICAL DATA
<b>Bereich:</b> $F_x, F_y, F_z$ $F_z$ bei $F_x$ und $F_y \leq 0,5 F_z$	<b>Gamme:</b> $F_x, F_y, F_z$ $F_z$ pour $F_x$ et $F_y \leq 0,5 F_z$	<b>Range:</b> $F_x, F_y, F_z$ kN -5 ... 5 *) $F_z$ for $F_x$ and $F_y \leq 0,5 F_z$ kN 0 ... 10 (**)
<b>Überlast:</b> $F_x, F_y, F_z$ $F_z$ bei $F_x$ und $F_y \leq 0,5 F_z$	<b>Surcharge:</b> $F_x, F_y, F_z$ $F_z$ pour $F_x$ et $F_y \leq 0,5 F_z$	<b>Overload:</b> $F_x, F_y, F_z$ kN -7,5/7,5 $F_z$ for $F_x$ and $F_y \leq 0,5 F_z$ kN 15
<b>Ansprechschwelle</b>	<b>Seuil de réponse</b>	<b>Threshold</b>
<b>Empfindlichkeit:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Sensibilité:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Sensitivity:</b> $F_x, F_y$ pC/N -7,5 $F_z$ pC/N -3,5
<b>Linearität</b>	<b>Linéarité</b>	<b>Linearity</b> %FSO $\pm 1$
<b>Hysteresis</b>	<b>Hystérésis</b>	<b>Hysteresis</b> %FSO $\pm 0,5$
<b>Übersprechen</b>	<b>Cross talk</b>	<b>Cross talk</b> %FSO $\pm 2$
<b>Steifheit:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Rigidité:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Rigidity:</b> $F_x, F_y$ kN/ $\mu$ m $\approx 1$ $F_z$ kN/ $\mu$ m $\approx 0,35$
<b>Eigenfrequenz</b>	<b>Fréquence propre</b>	<b>Natural frequency</b> kHz $> 4$
<b>Betriebstemperaturbereich</b>	<b>Gamme de température d'utilisation</b>	<b>Operating temperature range</b> °C 0 ... 70
<b>Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit</b>	<b>Coefficient de température de la sensibilité</b>	<b>Temperature coefficient of sensitivity</b> %/°C -0,02
<b>Kapazität</b>	<b>Capacité</b>	<b>Capacitance</b> pF $\approx 140$
<b>Isolationswiderstand</b>	<b>Résistance d'isolement</b>	<b>Insulation resistance</b> T $\Omega$ $> 10$
<b>Anschlussstecker</b>	<b>Connecteur</b>	<b>Connector</b> Type TNC, neg.
<b>Gewicht</b>	<b>Poids</b>	<b>Weight</b> kg 6,9

\*) Kraftangriff innerhalb und max. 25 mm oberhalb der Deckfläche.      \*) Le point d'application de force au dedans et max. 25 mm au-dessus de la plaque supérieure.

\*\*\*) Bereich beim Drehen, Kraftangriff bei Punkt A.      \*\*\*) Gamme lors du tournage, point d'application au point A.

1 N (Newton) = 1 kg  $\cdot$  m  $\cdot$  s $^{-2}$  = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 kp = 1 kgf = 9,80665 N; 1 lbf = 4,448... N, 1 inch = 25,4 mm; 1 T $\Omega$  (Teraohm) = 10 $^{12}$   $\Omega$

KIAG SWISS® Kistler Instrumente AG, CH-8408 Winterthur/Schweiz

## BESCHREIBUNG

Das Dynamometer besteht aus vier Dreikomponenten-Kraftaufnehmern, die unter hoher Vorspannung zwischen eine Grundplatte und eine Deckplatte eingebaut sind. Die Kraftaufnehmer enthalten je drei Quarzkristall-Plattenpaare, wovon das eine auf Druck in der z-Richtung und die beiden anderen auf Schub in der x- bzw. y-Richtung empfindlich sind. Die Kraftkomponenten werden praktisch weglos gemessen und die entstehenden Ladungen an TNC-Anschlüsse geleitet. Das Dynamometer ist rostbeständig und gegen das Eindringen von Spritzwasser bzw. Kühlmittel geschützt.

## ANWENDUNGEN

Dynamisches und quasistatisches Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft.

### Anwendungsbeispiele

- Schnittkraftmessungen beim Drehen, Fräsen und Schleifen etc.
- Messungen an Modellen im Windkanal etc.
- Ergonomische Messungen

Die Abbildung unten zeigt die Aufzeichnung einer Schnittkraftmessung beim Drehen von SiMn-90-Stahl (Festigkeit = 900 N/mm<sup>2</sup>). Die Vorschubkraft  $F_x$  und die Rückkraft  $F_y$  sind dem Anstellwinkel von 45° entsprechend gleich gross. Der rechte Teil des Diagramms wurde mit einer Papiervorschubgeschwindigkeit von 2 m/s aufgenommen; es sind Frequenzen bis über 2 kHz erkennbar.

## MONTAGE

Das Dynamometer kann mit Schrauben oder Pratzen auf jede plangeschliffene saubere Montagefläche wie z.B. auf einen Werkzeugmaschinen Tisch montiert werden. Es ist zu beachten, dass durch unebene Auflageflächen innere Verspannungen auftreten können, welche die einzelnen Messelemente zusätzlich stark belasten sowie das Übersprechen vergrössern können.

Zum Aufspannen der kraftleitenden Teile, wie Drehstähle und Werkstücke, stehen in der Deckplatte elf M8 x 1,25 Sackgewinde zur Verfügung. Die Auflageflächen der kraftleitenden Teile müssen plangeschliffen sein, damit eine gute mechanische Ankopplung an die Deckplatte erreicht wird.

Für eine einwandfreie Montage von Drehstählen bis zu einem Schaftquerschnitt von 26 x 26 mm<sup>2</sup> kann der Stahlhalter Typ 9403 verwendet werden. Der Stahlhalter ist im Lieferumfang nicht enthalten, er muss separat bestellt werden.

## ELEKTRONIK

Ein Dreikomponenten-Kraftmesssystem enthält neben dem Dynamometer noch drei Ladungsverstärker, welche die Ladungssignale des Dynamometers in Ausgangsspannungen umwandeln, die proportional zu den auftretenden Kräften sind. Das Vollbereichssignal des Standardverstärkers Typ 5001 beträgt 10 V. Die Ladungsverstärker sind im Lieferumfang nicht enthalten, sie sind separat zu bestellen, siehe Datenblatt 11.5001 bzw. 11.5051.

## DESCRIPTION

Le dynamomètre se compose de quatre capteurs de force à trois composantes montés sous précontrainte élevée entre une plaque de base et une plaque supérieure. Les capteurs de force comprennent chacun trois paires de plaques en cristal de quartz; l'une de ces paires est sensible à la pression selon l'axe de z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon l'axe des x resp. des y. Les composantes de force sont mesurées pratiquement sans déformation et les charges engendrées amenées aux connecteurs TNC. Le dynamomètre est protégé contre la corrosion et contre les infiltrations d'eau ou de produit de refroidissement.

## APPLICATION

Mesures dynamiques et quasi-statiques des trois composantes orthogonales d'une force.

### Exemples d'application

- Mesures des forces de coupe lors du tournage, du fraisage, du rectifiage, etc.
- Mesures sur des modèles en soufflerie etc.
- Mesures ergonométriques

La figure ci-dessous montre l'enregistrement de la mesure d'une force de coupe lors du tournage d'acier SiMn-90 (résistance = 900 N/mm<sup>2</sup>). La force d'avancement  $F_x$  et la force de réaction  $F_y$  sont, conformément à l'angle d'incidence de 45°, de mêmes grandeurs. La partie droite du diagramme a été enregistrée à une vitesse de déroulement du papier de 2 m/s; les fréquences jusqu'à quelques 2 kHz y sont identifiables.

## MONTAGE

Le dynamomètre peut être fixé au moyen de vis ou de brides sur toute surface plane rectifiée comme, par exemple, sur un plateau de machine-outil. Toutes les irrégularités ou irrégularités de la surface de montage peuvent avoir pour conséquence des tensions internes engendrant ainsi des sollicitations supplémentaires sur les divers éléments de mesure ainsi qu'un accroissement du cross talk. La plaque supérieure possède onze taraudages borgnes M8 x 1,25 pour la fixation de la pièce introduisant la force telle que l'outil de coupe ou la pièce à usiner. Les faces d'appui des pièces introduisant l'effort doivent également être planes et rectifiées afin de garantir une liaison mécanique parfaite avec la plaque supérieure.

Pour assurer un montage parfait des outils de coupe jusqu'à une section de 26 x 26 mm<sup>2</sup> il est recommandé d'utiliser le porte-outil Type 9403. Ce porte-outil ne fait pas partie de la fourniture et doit donc être commandé séparément.

## ELECTRONIQUE

Outre le dynamomètre, une installation de mesure de force à trois composantes comprend encore trois amplificateurs de charge qui transforment les signaux de charge du dynamomètre en tensions de sortie proportionnelles aux forces appliquées. Le signal de pleine gamme de l'amplificateur standard Type 5001 est de 10 V. Les amplificateurs de charge ne sont pas compris dans la fourniture et doivent être commandés séparément; voir notice 11.5001 resp. 11.5051.

## DESCRIPTION

The dynamometer consists of four three-component force transducers fitted under high preload between a baseplate and a cover plate. Each transducer contains three pairs of quartz plates, one sensitive to pressure in the z direction and the other two responding to shear in the x and y directions respectively. The force components are measured practically without displacement, and the resulting charges are led to TNC connectors. The dynamometer is rustproof and is protected against the ingress of splashing water or coolant.

## APPLICATION

Dynamic and quasistatic measurement of the three orthogonal components of a force.

### Application examples

- Measuring cutting force when turning, milling and grinding etc.
- Measurements on wind tunnel models etc.
- Ergonomic measurements

The recorder chart shown below plots a cutting force when turning SiMn-90 steel (tensile strength = 900 N/mm<sup>2</sup>). The feed force  $F_x$  and the thrust reaction  $F_y$  are equal, in accordance with the approach angle of 45°. The right-hand part of the diagram was plotted with a paper feed of 2 m/s; frequencies in excess of 2 kHz can be recognized.

## MOUNTING

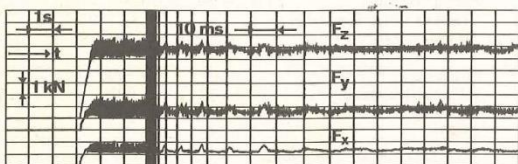
The dynamometer may be mounted with screws or claws on any clean, face-ground supporting surface, such as the table of a machine tool for example. Uneven supporting surfaces may set up internal stresses, which will impose severe additional loads on the individual measuring elements and may also increase cross-talk.

For mounting the force-introducing components, such as lathe tools and workpieces, there are eleven M8 x 1,25 mm blind tap holes in the cover plate. The supporting surfaces for the force-introducing parts must be face-ground to obtain good mechanical coupling to the cover plate.

For satisfactory mounting of lathe tools up to 26 x 26 mm shank cross section, the toolholder Type 9403 may be used. This holder is not included in the standard accessories and must therefore be ordered separately.

## ELECTRONICS

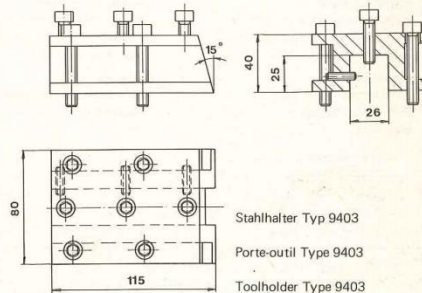
Besides the dynamometer a three-component force measuring system also contains three charge amplifiers, which convert the dynamometer charge signals into output voltages proportional to the forces sustained. Full-range signal of the standard amplifier Type 5001 is 10 V. The charge amplifiers are not included in the supply and must be ordered separately, see data sheet 11.5001 or 11.5051 as the case may be.



Schnittkraftverlauf beim Drehen von SiMn-90-Stahl

Evolution de la force de coupe lors du tournage d'acier SiMn-90

Cutting force plot while turning SiMn-90 steel



compo.  
0. printed  
Each  
1955

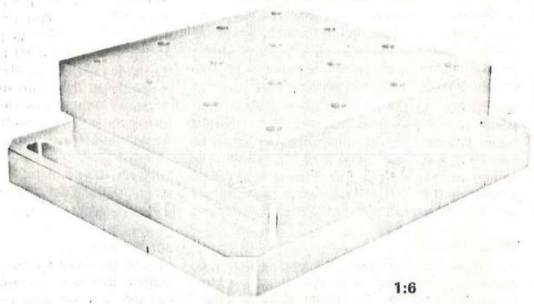
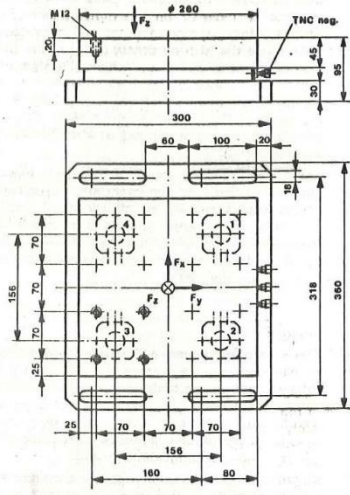
**3-KOMPONENTEN-DYNAMOMETER  $F_x, F_y, F_z$**   
**DYNAMOMETRE A 3 COMPOSANTES  $F_x, F_y, F_z$**   
**3-COMPONENT DYNAMOMETER  $F_x, F_y, F_z$**

9255 6.9255 4.70 1

Quarzkristall - Dreikomponenten - Dynamometer zum Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft. Das Dynamometer besitzt eine grosse Steifheit und demzufolge eine hohe Eigenfrequenz, sein grosses Auflösungsvermögen ermöglicht das Messen von kleinsten dynamischen Änderungen grosser Kräfte.

Dynamomètre à cristal de quartz à trois composantes pour la mesure des trois composantes orthogonales d'une force. Celui-ci possède une grande rigidité et par conséquent une fréquence propre élevée; de plus, sa résolution très importante permet de mesurer les moindres variations de forces nominales importantes.

Quartz three-component dynamometer for measuring the three orthogonal components of a force. The dynamometer has great rigidity and consequently a high natural frequency, while its high resolution enables the smallest dynamic changes in large forces to be measured.



1:6

**TECHNISCHE DATEN**

**DONNEES TECHNIQUES**

**TECHNICAL DATA**

<b>Bereich:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Gamme:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Range:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	kN -20 ... 20 *) kN -10 ... 40 *)
<b>Kalibrierte Teilbereiche:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Gamme partielle étalonnée:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Calibrated partial range:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	kN 0 ... 2 kN 0 ... 4
<b>Überlast:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Surcharge:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Overload:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	kN $\pm 24$ kN -12/48
<b>Ansprechschwelle</b>	<b>Seuil de réponse</b>	<b>Threshold</b>	N <0,01
<b>Empfindlichkeit:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Sensibilité:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	<b>Sensitivity:</b> $F_x, F_y$ $F_z$	pC/N -8 pC/N -3,7
<b>Linearität</b> } für Bereich und <b>Hysteresis</b> } Teilbereich	<b>Linéarité</b> } pour gamme et <b>Hystérésis</b> } gamme partielle	<b>Linearity</b> } for range and <b>Hysteresis</b> } partial range	%FSO $\leq \pm 1$ %FSO $\leq 0,5$
<b>Übersprechen:</b> $F_z \rightarrow F_{x,y}$ $F_x \rightleftharpoons F_y$ $F_{x,y} \rightarrow F_z$	<b>Cross talk:</b> $F_z \rightarrow F_{x,y}$ $F_x \rightleftharpoons F_y$ $F_{x,y} \rightarrow F_z$	<b>Cross talk:</b> $F_z \rightarrow F_{x,y}$ $F_x \rightleftharpoons F_y$ $F_{x,y} \rightarrow F_z$	% $\leq \pm 1$ % $\leq \pm 2$ % $\leq \pm 2$
<b>Steifheit</b>	<b>Rigidité</b>	<b>Rigidity</b>	kN/nm $\approx 2$
<b>Eigenfrequenz</b>	<b>Fréquence propre</b>	<b>Natural frequency</b>	kHz 1,5
<b>Betriebstemperaturbereich</b>	<b>Gamme de température d'utilisation</b>	<b>Operating temperature range</b>	°C 0 ... 70
<b>Anschluss</b>	<b>Connecteur</b>	<b>Connector</b>	Type TNC, neg.
<b>Kapazität</b>	<b>Capacité</b>	<b>Capacitance</b>	nF <2
<b>Isolationswiderstand</b>	<b>Résistance d'isolement</b>	<b>Insulation resistance</b>	T $\Omega$ >10
<b>Gewicht</b>	<b>Poids</b>	<b>Weight</b>	kg $\approx 40$

\*) Kraftangriff innerhalb und max. 100mm oberhalb der Deckfläche

\*) Le point d'application de force au-dedans et max. 100mm au-dessus de la plaque supérieure.

\*) Application of force inside and max. 100mm above top plate area.

1 N (Newton) = 1 kg  $\cdot$  m  $\cdot$  s<sup>-2</sup> = 0,1019... kp = 0,2248... lbf; 1 kp = 1 kgf = 9,80665 N; 1 lbf = 4,448... N, 1 inch = 25,4 mm; 1 T $\Omega$  (Teraohm) = 10<sup>12</sup>  $\Omega$



## BESCHREIBUNG

Das Dynamometer besteht aus vier Dreikomponenten-Kraftaufnehmern, die unter hoher Vorspannung zwischen einer Grundplatte und einer Deckplatte eingebaut sind. Die Kraftaufnehmer enthalten je drei Quarzkristall-Plattenpaare, wovon das eine auf Druck in der z-Richtung und die beiden anderen auf Schub in der x- bzw. y-Richtung empfindlich sind. Die Kraftkomponenten werden praktisch weglos gemessen und die entstehenden Ladungen an TNC-Anschlüsse geleitet. Das Dynamometer ist rostbeständig und gegen das Eindringen von Spritzwasser bzw. Kühlmittel geschützt.

## ANWENDUNGEN

Dynamisches und quasistatisches Messen der drei orthogonalen Komponenten einer Kraft.

### Anwendungsbeispiele

Schnittkraftmessungen beim Drehen, Fräsen und Schleifen an grösseren Maschinen und Bearbeitungszentren. Hohe Steifheit und Eigenfrequenz gewährleisten realistische Schnittbedingungen, d.h. der Unterschied, ob man ein Werkstück direkt auf dem Maschinentisch oder auf dem Dynamometer aufspannt, ist vernachlässigbar. Die hohe Empfindlichkeit und die niedere Ansprechschwelle lassen in Verbindung mit dem kalibrierten Teilbereich auch exakte Messungen an kleinen Werkzeugen und beim Schleifen zu.

Die Abbildung unten zeigt die bei einer Fräsarbeit aufgenommenen Schnittkräfte. Deutlich lassen sich die Eingriffe der einzelnen Zähne erkennen. Die starken periodischen Schwankungen weisen auf ein Schlagen der Fräsachse hin. Ausserdem sind überlagerte Schwingungen erkennbar, die teilweise vom Winkelgetriebe herrühren.

## MONTAGE

Das Dynamometer kann mit Schrauben oder Patzen auf jede plangeschliffene, saubere Montagefläche wie z.B. auf einen Werkzeugmaschinentisch montiert werden. Es ist zu beachten, dass durch unebene Auflageflächen innere Verspannungen auftreten können, welche die einzelnen Messelemente zusätzlich stark belasten sowie das Übersprechen vergrössern können.

Zum Aufspannen der krafteinleitenden Teile, vorwiegend Werkstücke, stehen in der Deckplatte 16 Sackgewinde M12 zur Verfügung. Die Auflageflächen müssen plangeschliffen sein, damit eine gute mechanische Ankopplung an die Deckplatte erreicht wird.

## ELEKTRONIK

Eine Dreikomponenten-Kraftmessanlage benötigt neben dem Dynamometer noch drei Ladungsverstärker, welche die Ladungssignale des Dynamometers in Ausgangsspannungen umwandeln, die proportional zu den auftretenden Kräften sind.

## DESCRIPTION

Le dynamomètre se compose de quatre capteurs de force à trois composantes montés sous précontrainte élevée entre une plaque de base et une plaque supérieure. Les capteurs de force comprennent chacun trois paires de plaques en cristal de quartz; l'une de ces paires est sensible à la pression selon l'axe de z alors que les deux autres sont sensibles au cisaillement selon l'axe des x resp. des y. Les composantes de force sont mesurées pratiquement sans déformation et les charges engendrées amenées aux connecteurs TNC. La dynamomètre est protégé contre la corrosion et contre les infiltrations d'eau ou de produit de refroidissement.

## APPLICATION

Mesures dynamiques et quasi-statiques des trois composantes orthogonales d'une force.

### Exemples d'application

Mesures des forces de coupe lors du tournage, fraisage et rectifiage sur grosses machines et centres de travail. Une grande stabilité et une fréquence propre élevée garantissent des conditions d'usinage proche de la réalité. La grande sensibilité et le seuil de réponse bas, alliés à la gamme de mesure partielle étalonnée permettent également des mesures exactes sur les petits outils ou lors de rectifiage.

La photo ci-dessous montre les forces de coupe enregistrées lors d'un usinage par fraisage. Les attaques provoquées au passage des différents dents de la fraises sont parfaitement reconnaissables. Les fortes oscillations périodiques sont l'indice d'un débattement de l'axe de la fraise. De plus, des oscillations additionnelles provenant partiellement des pignons coniques sont nettement mises en évidence.

## MONTAGE

Le dynamomètre peut être fixé au moyen de vis ou de brides sur toute surface plane rectifiée comme, par exemple, sur un plateau de machine-outil. Toutes les irrégularités ou irrégularités de la surface de montage peuvent avoir pour conséquence des tensions internes engendrant ainsi des sollicitations supplémentaires sur des divers éléments de mesure ainsi qu'un accroissement du cross talk.

La plaque supérieure possède seize taraudages borgnes M12 pour la fixation de la pièce à usiner. Les faces d'appui des pièces introduisant l'effort doivent également être planes et rectifiées afin de garantir une liaison mécanique parfaite avec la plaque supérieure.

## ELECTRONIQUE

Outre le dynamomètre, une installation de mesure de force à trois composantes comprend encore trois amplificateurs de charge qui transforment les signaux de charge du dynamomètre en tensions de sortie proportionnelles aux forces appliquées.

## DESCRIPTION

The dynamometer consists of four three-component force transducers fitted under high preload between a baseplate and a cover plate. Each transducer contains three pairs of quartz plates, one sensitive to pressure in the z direction and the other two responding to shear in the x and y directions respectively. The force components are measured practically without displacement, and the resulting charges are led to TNC connectors. The dynamometer is rustproof and is protected against the ingress of splashing water or coolant.

## APPLICATION

Dynamic and quasistatic measurement of the three orthogonal components of a force.

### Application examples

Cutting force measurements while turning, and grinding on larger machines and machining centers. High rigidity and natural frequency ensure realistic cutting conditions, i.e. the difference between fixing a workpiece straight on the machine table or on the dynamometer is negligible. In conjunction with the calibrated partial range the high sensitivity and low threshold allow exact measurements on small tools and when grinding too.

The picture below shows the cutting forces recorded during a milling operation. The entries of the individual teeth are clearly recognizable. Wobbling of the cutter spindle is indicated by the marked cyclic variations. In addition superimposed vibrations are evident, originating partly from the angular gear.

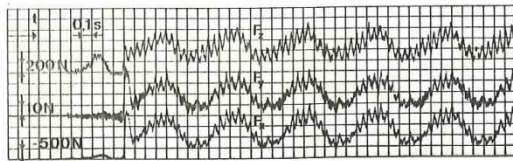
## MOUNTING

The dynamometer may be mounted with screws or claws on any clean, face-ground supporting surface, such as the table of a machine tool for example. Uneven supporting surfaces may set up internal stresses, which will impose severe additional loads on the individual measuring elements and may also increase crosstalk.

For mounting the force-introducing components, mainly workpieces, there are sixteen M12 blind tap holes in the cover plate. The supporting surfaces for the force-introducing parts must be face-ground to obtain good mechanical coupling to the cover plate.

## ELECTRONICS

Besides the dynamometer a three-component force measuring system also needs three charge amplifiers, which convert the dynamometer charge signals into output voltages proportional to the forces sustained.



Schnittkraftverlauf beim Gegenlauffräsen.

Evolution de la force de coupe lors fraisage en sens opposé.

Cutting force plot resulting of an up milling operation.

## II. Ενισχυτές 5011B

Piezo-Instrumentation

# KISTLER

Nr. 11.5011 Ed. 11.96 P. 1...4

Type

5011B...

### Ladungsverstärker Amplificateur de charge Charge Amplifier

Der netzbetriebene, mikroprozessorgesteuerte, einkanalige Ladungsverstärker Typ 5011B wandelt die von piezoelektrischen Sensoren abgegebene Ladung in proportionale Spannung um.

Hauptsächlichster Einsatzbereich ist das Messen mechanischer Grössen, z.B. Druck, Kraft oder Beschleunigung.

Wesentliche Merkmale des Gerätes sind die kontinuierliche Einstellbarkeit des Messbereichs von  $\pm 10$  bis  $\pm 999\,000$  pC und die komfortable Einstellung der Parameter über eine zweizeilige LC-Anzeige. Die eingegebenen Werte bleiben auch bei einer Netzunterbrechung erhalten.

L'amplificateur de charge type 5011B monocal, alimenté par secteur et commandé par microprocesseur transforme la charge électrique engendrée d'un capteur piézoélectrique en une tension proportionnelle.

Cet amplificateur est essentiellement utilisé pour mesurer de grandeurs mécaniques, par exemple de pressions, de forces ou d'accélération.

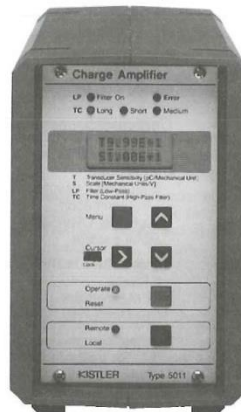
Les principales caractéristiques de cet appareil sont le réglage continu de la plage de mesure de  $\pm 10$  à  $\pm 999\,000$  pC ainsi que le réglage des paramètres par l'intermédiaire d'un affichage à cristaux liquides à deux chiffres. En cas de coupure du courant, les paramètres restent mémorisés.

The mains-operated, microprocessor controlled one-channel charge amplifier Type 5011B converts the electrical charge yielded by piezoelectric sensors into a proportional voltage signal.

This amplifier serves mainly to measure mechanical quantities, e.g. pressure, force or acceleration.

The main features of the instrument are its continuous measuring range adjustment facility from  $\pm 10$  to  $\pm 999\,000$  pC and convenient adjustment of the parameters with a two-line LC display. The values entered are retained in the event of an interruption in the power supply.

- Grosser Messbereich  
Gamme de mesure étendue  
Large measuring range
- Weiter Frequenzbereich  
Gamme de fréquence étendue  
Wide frequency range
- Automatische Nullpunkt Korrektur  
Correction automatique du zéro  
Automatic zero correction
- Tiefpassfilter und Zeitkonstante einstellbar  
Possibilité de réglage du filtre passe-bas et des constantes de temps  
Adjustable low-pass filter and time constant
- Optimale Anpassung an das Messproblem durch verschiedene Optionen und Modifikationen  
Adaptation optimale aux conditions de mesure par le biais de différentes options et modifications  
Various options and modifications provide optimum adaptation to the measuring problem
- CE - konform  
Conforme au CE  
Conforming to CE



Als Option ist eine eingebaute IEEE-488 Parallel-Schnittstelle oder eine serielle Schnittstelle RS-232C erhältlich. Damit können alle Einstellwerte eingegeben bzw. abgefragt werden. Messdaten-Übertragung ist nicht möglich.

Mit der Zusatzbezeichnung ...Y38 hat das Gerät zusätzlich einen Kalibrieringang und ist auch für den Anschluss von Niederimpedanz-Sensoren (Piezotronsensoren, ICP) geeignet.

Die Abmessungen des Gerätes sind nach DIN genormt, es kann in einem Tischgehäuse eingebaut oder ohne Gehäuse zum Einbau in ein Racksystem geliefert werden.

L'appareil est disponible en option avec une interface parallèle de type IEEE-488 incorporée ou une interface sérielle de type RS-232C. Ces interfaces permettent l'entrée ou l'appel de toutes les valeurs de consigne. Un transfert des données de mesure n'est pas possible.

Sous la référence 5011B complétée de ...Y38, cet amplificateur est équipé en supplément d'une entrée d'étalonnage, il a été par ailleurs modifié de manière à permettre le branchement de capteurs de basse impédance (système Piezotron, ICP).

Les dimensions de l'appareil sont conformes aux normes DIN. Il peut être livré dans un boîtier de table ou sans boîtier pour montage en rack.

A built-in IEEE-488 parallel interface or a serial RS-232C interface is available as an option. This enables all set values to be entered or queried. Transmission of data measured is not possible.

The additional designation ...Y38 indicates that the instrument also has a calibration input and is modified for the connection of low-impedance sensors (Piezotron system, ICP).

The instrument dimensions are DIN standardized and it can be supplied in a table-mounted case or a case for mounting in a rack system.

### Prinzip: Messen ohne Rechnen

- Sensorempfindlichkeit einstellen
- Anzeige-Massstab wählen
- Sensorempfindlichkeit und Massstab werden angezeigt
- Am Signalausgang angeschlossene Anzeige-geräte (Schreiber, Oszilloskop...) auf z.B. 1 V/Einheit (1 V/cm) einstellen
- Die Anzeige erfolgt gemäss des eingestellten Anzeige-Massstabs direkt in mechanischen Einheiten

### Principe: Mesurer sans calcul

- Régler la sensibilité du capteur
- Sélectionner l'échelle d'affichage
- La sensibilité du capteur et l'échelle s'affichent
- Régler l'instrument d'affichage (enregistreur, oscilloscope...) branché sur la sortie du signal sur 1 V/unité (1 V/cm) par exemple
- L'affichage s'effectue alors directement en unités mécaniques conformément à l'échelle préalablement sélectionnée

### Principle: Measurement without Calculation

- Set sensor sensitivity
- Select display scale
- Sensor sensitivity and scale are displayed
- Set the signal output of the indicator device connected (recorder, oscilloscope...), for example to 1 V/unit (1 V/cm)
- The display appears directly in mechanical units according to the display scale selected

Kistler Instrumente AG Winterthur, CH-8408 Winterthur, Switzerland, Tel. (052) 2241111 Kistler Instrument Corp., Amherst, NY 14228-2171, USA, Phone (716) 691-5100

**Technische Daten**

**Données techniques**

**Technical Data**

<b>Grundgerät</b>	<b>Appareil de base</b>	<b>Basic unit</b>	
<b>Messbereich</b> , für 10 V FS	<b>Gamme de mesure</b> , pour à 10 V FS	<b>Measuring range</b> , for 10 V FS	pC ±10 ... 999'000
<b>Sensorempfindlichkeit</b> Modifikation Y38, zusätzlich M.U. = Mechanische Einheiten, N, g	<b>Sensibilité du capteur</b> Modification Y38, en supplément unités mécaniques bar, N, g	<b>Sensor sensitivity</b> Modification Y38, in addition Mechanical Units e.g. bar, N, g)	pC/M.U. 0,01 ... 9990 mV/M.U. 0,01 ... 9990
<b>Massstab</b>	<b>Echelle</b>	<b>Scale</b>	M.U./V 0,001 ... 9'990'000
<b>Ausgangsspannung</b>	<b>Tension de sortie</b>	<b>Output voltage</b>	V ±10
<b>Ausgangsstrom</b> , max. (kurzschlussicher)	<b>Courant de sortie</b> , maximal (protégé contre les court-circuits)	<b>Output current</b> , max. (short-circuit protected)	mA ±5
<b>Ausgangswiderstand</b>	<b>Impédance de sortie</b>	<b>Output impedance</b>	Ω 10
<b>Frequenzbereich</b> (-3dB, Filter "OFF")	<b>Gamme de fréquence</b> (-3dB, Filter "OFF")	<b>Frequency limit</b> (-3dB, Filter "OFF")	kHz =0 ... 200
<b>Tiefpassfilter</b> obere Grenzfrequenz -3dB Butterworth 2-pol., 8-stufig (10, 30, 100...)	<b>Filter passe-bas</b> Seuil de fréquence supérieur -3dB Butterworth à 2 pôles, à 8 étages (10, 30, 100...)	<b>Low-pass filter</b> upper cutoff frequency -3dB Butterworth, 2 pol., 8 stages (10, 30, 100...)	kHz (%) 0,01 ... 30 (±10)
<b>Zeitkonstante</b> (Hochpassfilter) <i>Long</i> <i>Medium</i> (T=R <sub>g</sub> • C <sub>g</sub> ) <i>Short</i> (T=R <sub>g</sub> • C <sub>g</sub> )	<b>Constante de temps</b> (filtre passehaut) <i>Long</i> <i>Medium</i> (T=R <sub>g</sub> • C <sub>g</sub> ) <i>Short</i> (T=R <sub>g</sub> • C <sub>g</sub> )	<b>Time constant</b> (high-pass filter) <i>Long</i> <i>Medium</i> (T=R <sub>g</sub> • C <sub>g</sub> ) <i>Short</i> (T=R <sub>g</sub> • C <sub>g</sub> )	- s 1 ... 10'000 s 0,01 ... 100
<b>Fehler</b> <±100 pC FS (max./typ.) ≥±100 pC FS (max./typ.)	<b>Erreur</b> <±100 pC FS (max./typ.) ≥±100 pC FS (max./typ.)	<b>Error</b> <±100 pC FS (max./typ.) ≥±100 pC FS (max./typ.)	% <±3 / <±2 % <±1 / <±0,5
<b>Linearität</b>	<b>Linéarité</b>	<b>Linearity</b>	% ≤±0,05
<b>Ausgangssrönsignal</b> 9,99 pC/V (1 pC/V)	<b>Intérence à la sortie</b> 9,99 pC/V (1 pC/V)	<b>Output interference</b> 9,99 pC/V (1 pC/V)	mV <sub>rms</sub> <0,5 (<1,5) mV <sub>pp</sub> <4 (<8) pC <sub>rms</sub> /pF <2 • 10 <sup>-5</sup>
<b>Störsignal durch Eingangskabelkapazität</b>	<b>Intérence due à la capacité d'entrée du câble</b>	<b>Interference due to cable capacitance</b>	pC/s <±0,03
<b>Drift bei 25 °C</b>	<b>Dérive à 25 °C</b>	<b>Drift at 25 °C</b>	
<b>Allgemeine Daten</b>	<b>Caractéristiques générales</b>	<b>General Data</b>	
<b>Betriebstemperaturbereich</b>	<b>Gamme de température de service</b>	<b>Operating temperature range</b>	°C 0 ... 50
<b>Anschlüsse</b> Messeingang / Signalausgang Fernsteuerung (Operate, Overload, ...) Netzstecker	<b>Connexions</b> Entrée de mesure/Sortie du signal Télécommande (Operate, Overload, ...) Fiche secteur	<b>Connections</b> Measuring input / signal output Remote control (Operate, Overload, ...) Power plug	BNC negativ Buchse 6-pol. DIN 45322 IEC 320 C 14
<b>Konformität mit EG-Richtlinien</b> Sicherheit EMV - Störaussendung EMV - Störimmunität	<b>Conformité à la Directive CE</b> Sécurité CEM Emission CEM Immunité	<b>Conformity to EC Directive</b> Safety EMC Interference Emission EMC Interference Immunity	EN 61010-1 EN 50081-1 / EN 50081-2 EN 50082-1 / EN 50082-2
<b>Netzanschluss</b> , umschaltbar (Schutzklasse I)	<b>Réseau</b> , commutable (Classe de protection I)	<b>Mains</b> , switchable (Protection class I)	V AC (%) 230/115 (-22/+15) Hz/VA 48 ... 62/20
<b>Spannung zwischen Schutz- und Messerde</b>	<b>Tension entre terre de protection et terre de mesure</b>	<b>Voltage between protection and measuring ground</b>	V <sub>rms</sub> <50
<b>Abmessungen</b> mit Tischgehäuse Typ 5747A1 ohne Tischgehäuse Frontplatte, gemäss DIN 41494 (Teil 5)	<b>Dimensions</b> Boîtier de table type 5747A1 sans boîtier Platine avant, conforme à la norme DIN 41494 (Partie 5)	<b>Dimensions</b> with table-mount. case Type 5747A1 without case Front panel according to DIN 41494 (Part 5)	mm ca. 94x151x195 mm 70,9x128,7x169,5 HE/TE 3 / 14
<b>Gewicht</b> (inkl. IEEE-488 oder RS-232C)	<b>Poids</b> (IEEE-488 ou RS-232C incl.)	<b>Weight</b> (incl. IEEE-488 or RS-232C)	kg =2
<b>Modifikation Y38 (Piezotron- und Kalibrier-Eingang, umschaltbar)</b>	<b>Modification Y38 (entrée Piezotron et entrée d'étalonnage, commutable)</b>	<b>Modification Y38 (Piezotron and calibration input, switchable)</b>	
<b>Anschluss</b>	<b>Connexion</b>	<b>Connection</b>	BNC negativ
<b>Als Piezotron-Eingang:</b> Stromversorgung für Piezotronsensoren	<b>Entrée Piezotron:</b> Alimentation en courant pour capteur Piezotron	<b>As Piezotron input:</b> Power supply for Piezotron sensor	mA (%) 4,3 (±10)
<b>Als Kalibrier-Eingang:</b> Kalibrierkondensator eingebaut Empfindlichkeit Kalibr. Eingang Eingangsspannung	<b>Entrée d'étalonnage:</b> Condensateur d'étalonnage incorporé Sensibilité de l'entrée d'étalonnage Tension d'entrée	<b>As calibration input:</b> Calibration capacitor built in Sensitivity calib. input Input voltage	pF (%) 1000 (±0,5) pC/mV (%) 1 (±0,5) V ≤±30

**Funktion**

(siehe Funktionsschema)

Das zu messende Ladungssignal (Charge Input) wird dem invertierenden Verstärker (OP1) zugeführt, der sich durch hohe innere Verstärkung und extrem hohe Eingangsisolation auszeichnet. OP1 ist mit C<sub>g</sub> kapazitiv gegengekoppelt und wirkt dadurch als Integrator für die zu messende Ladung. Der Kapazitätswert von C<sub>g</sub> bestimmt dabei den Ladungsmessbereich nach der Näherungsformel Q = C<sub>g</sub> • U<sub>1</sub>.

**Fonctionnement**

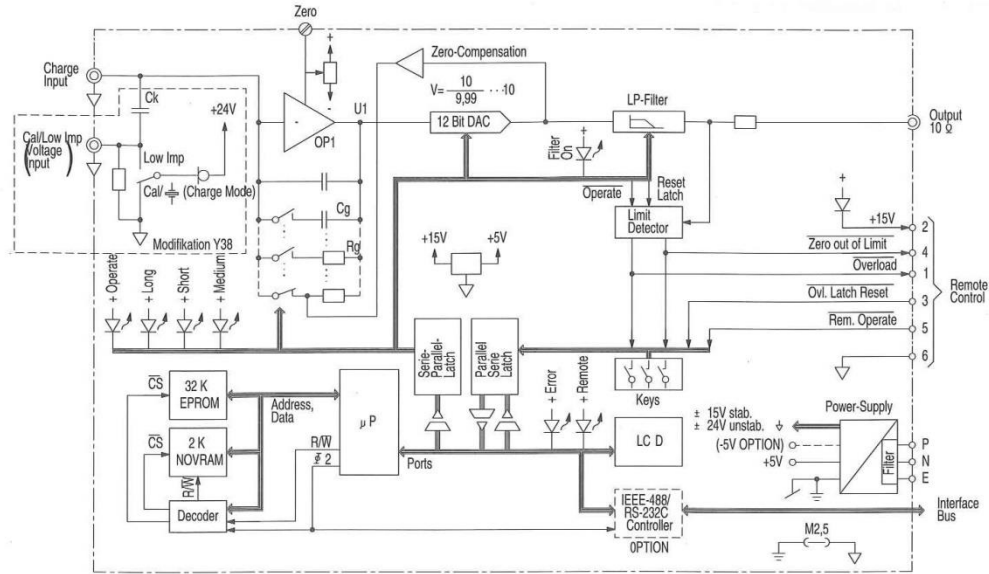
(voir schéma de fonctionnement)

Le signal de charge à mesurer (Charge Input) est acheminé à l'amplificateur inverseur (OP1). Cet amplificateur se distingue par une haute amplification interne et par un isolement d'entrée extrêmement élevé. OP1 est monté en contre-réaction avec le condensateur C<sub>g</sub> et fonctionne de ce fait comme circuit d'intégration pour la charge à mesurer. La valeur de la capacité de C<sub>g</sub> détermine la plage de mesure de la charge selon la formule d'approximation Q = C<sub>g</sub> • U<sub>1</sub>.

**Function**

(see function diagram)

The charge signal to be measured (Charge Input) is fed to the inverting amplifier (OP1), which features high internal gain and extremely high input insulation. OP1 is negatively coupled to C<sub>g</sub> and thus acts as an integrator for the charge to be measured. The C<sub>g</sub> capacitance determines the charge measuring range according to the approximation formula Q = C<sub>g</sub> • U<sub>1</sub>.



Am Ausgang von OP1 erscheint dann eine der Ladung und damit der mechanischen Messgrösse proportionale Spannung U1.

Wenn es sich um eine rein-dynamische Messung handelt, kann parallel zum Bereichskondensator Cg einer der beiden Zeitkonstantenwiderstände Rg eingeschaltet sein. Damit werden Driftprobleme, wie sie bei quasistatischen Messungen auftreten können, vermieden.

Ein Relaiskontakt im Gegenkopplungsweig von OP1 dient dazu, den Bereichskondensator Cg zu entladen und damit das Gerät für eine neue Messung vorzubereiten (Reset-Funktion, U1 → 0). Eine eventuell verbleibende Nullpunktabweichung wird von einer speziellen Schaltung (Zero-Compensation) im Reset-Zustand kompensiert. Mit einem digitalen Spannungsteiler (12 Bit DAC) wird das Spannungssignal U auf den vom Gerät berechneten Wert gebracht.

Das in 8 Stufen einstellbare Tiefpassfilter (LP-Filter) erlaubt eine Reduktion der oberen Grenzfrequenz, falls die Applikation dies erfordert.

Eine 8-Bit Mikroprozessorschaltung (μP) steuert und überwacht das gesamte Gerät. Die Software ist in einem EPROM gespeichert, die Einstellwerte in einem batteriegepufferten NOVRAM.

Über die Fernsteueranschlüsse (Remote Control) sind, ohne optionelle Schnittstelle, folgende Funktionen möglich:

- Umschaltung Reset/Operate
- Overload-Signal zurücksetzen
- Anzeige: Overload
- Anzeige: Zero out of Limit

Das modifizierte Gerät 5011BxxY38 hat zusätzlich einen BNC-Signaleingang für Piezotronsensoren (Low Imp./Cal.), einen Umschalter "Low Imp./Cal.", eine 4,3 mA Stromquelle sowie einen 1 nF Kalibrierkondensator. Dieser Kondensator dient einerseits der Umsetzung des Spannungssignals eines Piezotronsensors in ein Ladungssignal, andererseits kann mit Hilfe einer externen Spannungsquelle die Kalibrierung des Gerätes überprüft werden.

A la sortie d'OP1 apparaît alors une tension U1 proportionnelle à la charge et donc à la grandeur mécanique à mesurer.

S'il s'agit d'une mesure purement dynamique, l'une des deux résistances de la constante de temps Rg peut être montée en parallèle avec le condensateur de plage Cg. Ceci permet d'éviter les problèmes de dérive du type de ceux susceptibles d'apparaître dans les mesures quasi-statiques.

Le contact d'un relais monté sur le circuit de contre-réaction d'OP1 sert à la décharge du condensateur de plage Cg et donc à la préparation de l'appareil pour une nouvelle mesure (fonction Reset, U1 → 0). Une éventuelle déviation résiduelle du point zéro est compensée par un circuit spécial (compensation du zéro) à l'état Reset. Un diviseur de tension numérique (convertisseur analogique/numérique à 12 bits) porte le signal de tension U à la valeur calculée par l'appareil.

Un filtre passe-bas réglable sur 8 positions permet une réduction du seuil supérieur de fréquence lorsque l'application l'exige.

Un microprocesseur à 8 bits (μP) assure la commande et la surveillance de l'instrument. Le logiciel est enregistré sur un EPROM, les valeurs de consigne sur un NOVRAM à batterie-tampon.

La télécommande (Remote Control) permet - sans interface optionnelle - d'assurer les fonctions suivantes :

- Commutation Reset/Operate
- Remise à 0 du signal Overload
- Affichage : Overload
- Affichage : Zero out of Limit

L'appareil modifié de type 5011BxxY38 est doté par ailleurs d'une entrée de signal BNC pour capteurs Piezotron (Low Imp./Cal.), d'un commutateur "Low Imp./Cal.", d'une source de courant de 4,3 mA ainsi que d'un condensateur d'étalonnage de 1 nF. Ce condensateur sert à la conversion du signal de tension des capteurs Piezotron en un signal de charge. Il permet d'autre part le contrôle de l'étalonnage de l'appareil à l'aide d'une source de tension externe.

A voltage U1 then appears at the output of OP1 proportional to the charge and thus to the mechanical measurand.

When a purely dynamic measurement is involved, one of the two time constant resistors Rg can be connected in parallel with the range capacitor Cg. This avoids problems of drift such as can occur in quasi-static measurements.

A relay contact in the negative feedback branch of OP1 is used to discharge the range capacitor Cg thereby preparing the instrument for a new measurement (Reset function, U1 → 0). Any remaining zero deviation is compensated by a special circuit (zero compensation) in the Reset condition. The voltage signal U is brought to the value calculated by the instrument with a digital voltage divider (12 bit DAC).

The adjustable 8-stage low-pass filter (LP filter) allows a reduction in the upper frequency limit if this is required by the application.

An 8 bit microprocessor circuit (μP) controls and monitors the entire instrument. The software is stored in an EPROM; the set values in a battery-backed NOVRAM.

The following functions are available through the remote control connections (Remote Control) without optional interface:

- Reset/Operate switching
- Reset overload signal
- Display: Overload
- Display: Zero out of Limit

The modified version of the instrument 5011BxxY38 also has a BNC signal input for Piezotron sensors (Low Imp./Cal.), a selector Low Imp./Cal., a 4,3 mA current source and a 1 nF calibration capacitor. This capacitor is used on the one hand to convert the voltage signal of a Piezotron sensor to a charge signal, and on the other hand the instrument calibration can be checked using an external voltage source.

**Option: Parallele Schnittstelle IEEE-488  
Typ 5605A**

Standardisierte Schnittstelle, mit IEC-625-1 elektrisch kompatibel, zur Feineinstellung und -abfrage sämtlicher Parameter. Messdaten werden nicht übertragen.

**Option: Interface parallèle IEEE-488  
Type 5605A**

Interface standardisée, compatible électriquement avec IEC-625-1 pour le réglage et l'appel à distance de tous les paramètres. Les données de mesure ne sont pas transmises.

**Option: Parallel Interface IEEE-488  
Type 5605A**

Standardized interface with IEC 625-1 electrically compatible for remote control and checking of all parameters. Measured data are not transmitted.

**Technische Daten**

**Données techniques**

**Technical Data**

<b>Verwendeter Standard</b>	<b>Standard utilisé</b>	<b>Standard used</b>	IEEE-488-1978
<b>Abstand zwischen 2 Geräten</b>	<b>Distance entre 2 appareils</b>	<b>Distance between 2 instruments</b>	max. 2 m
<b>Maximallänge des Bus</b>	<b>Longueur maximale du bus</b>	<b>Maximum bus length</b>	20 m
<b>Maximale Anzahl Geräte am Bus</b>	<b>Nombre maximal d'appareils sur le bus</b>	<b>Maximum number of instruments on the bus</b>	15
<b>Adressbereich</b>	<b>Domaine d'adressage</b>	<b>Address range</b>	0 ... 30
<b>Funktionen</b>	<b>Fonctions</b>	<b>Functions</b>	Listener, Talker

**Option: Serielle Schnittstelle RS-232C Typ 5611A**

Standardisierte Schnittstelle, zur Feineinstellung und -abfrage sämtlicher Parameter. Messdaten werden nicht übertragen.

**Option: Interface sérielle RS-232C Type 5611A**

Interface standardisée pour réglage et appel à distance de tous les paramètres. Les données de mesure ne sont pas transmises.

**Option: Serial Interface RS-232C Type 5611A**

Standardized interface for remote control and checking of all parameters. Measured data not transmitted.

**Technische Daten**

**Données techniques**

**Technical Data**

<b>Verwendeter Standard</b>	<b>Standard utilisé</b>	<b>Standard used</b>	RS-232C resp. V24
<b>Maximallänge des Kabels</b>	<b>Longueur maximale du câble</b>	<b>Maximum cable length</b>	20 m (2500 pF)
<b>Baudraten</b>	<b>Vitesse de transfert en bauds</b>	<b>Baud rates</b>	50, 110, 250, 300, 600, 1200, 2400, 4800
<b>Anzahl Datenbit</b>	<b>Nombre de bit d'information</b>	<b>Number of data bit</b>	7 oder / ou / or 8
<b>Anzahl Stoppbit</b>	<b>Nombre de bit d'arrêt</b>	<b>Number of stop bit</b>	1 oder / ou / or 2
<b>Parität</b>	<b>Parité</b>	<b>Parity</b>	ohne, gerade od. ungerade sans, pair ou unpair without, even or odd
<b>Software-Protokoll</b>	<b>Protocole du logiciel</b>	<b>Software protocol</b>	XON /XOFF nicht zulässig / pas permis / not allowed

**Bestellbezeichnung**

**Références**

**Order Designation**

<b>Ladungsverstärker</b>	<b>Amplificateur de charge</b>	<b>Charge Amplifier</b>		<b>Type 5011B</b>
ohne Tischgehäuse	Sans boîtier de table	Without table-mounted case		0
mit Tischgehäuse	Avec boîtier de table	With table-mounted case		1
ohne Schnittstelle	Sans interface	Without interface		0
mit Parallel-Schnittstelle	Avec interface parallèle	With parallel interface	IEEE-488 (Type 5605A)	1
mit serieller Schnittstelle	Avec interface sérielle	With serial interface	RS-232C (Type 5611A)	2

Obige Bestellbezeichnung kann durch Modifikationen ergänzt sein. Zur Zeit sind folgende Modifikationen erhältlich:

- ...Y26 Ladungsverstärker auf 115 V AC Netzspannung eingestellt (Netzspannungsumschaltung anwenderseits jederzeit möglich).
- ...Y38 Ladungsverstärker, zusätzlich mit Piezotroneingang und Kalibriereingang.

**Beispiel:** Typ 5011B10Y26Y38  
Das ist ein Ladungsverstärker vom Grundtyp 5011B mit Gehäuse, ohne eingebaute Schnittstelle, auf 115 V AC Netzspannung eingestellt, mit zusätzlichem Piezotron- und Kalibriereingang.

La référence ci-dessus peut être complétée par des extensions. Actuellement les extensions suivantes sont disponibles :

- ...Y26 Amplificateur de charge réglé sur une tension secteur de 115 V AC (possibilité de commutation de la tension secteur à tout moment par l'utilisateur).
- ...Y38 Amplificateur de charge, avec entrée Piezotron et entrée d'étalonnage.

**Exemple:** type 5011B10Y26Y38  
Il s'agit d'un amplificateur de charge de type 5011B avec boîtier, sans interface incorporée, réglé sur une tension secteur de 115 V AC, doté en supplément d'une entrée Piezotron et d'étalonnage.

Above order designation can be supplemented by modifications. At present, the following modifications are available:

- ...Y26 Charge amplifier set to 115 V AC power supply (supply voltage setting can be changed by the user at any time).
- ...Y38 Charge amplifier additionally with Piezotron input and calibration input.

**Example:** Type 5011B10Y26Y38  
This is a charge amplifier of the basic type 5011B with case, without integral interface, set to 115 V AC supply with additional Piezotron and calibration input.

**Zubehör**

- Anschlusskabel für Fernsteuerung, Länge 5 m, Typ 1455A5 (Datenblatt 15.016)
- Fernsteuerkästchen Typ 5663 (Datenblatt 13.5663)
- Stecker für Fernsteueranschluss, Typ 1564, 6-polig, nach DIN 45322 (Datenblatt 15.016)
- RS-232C Kabel mit Hardwired-Handshake DB-25 P/DB-9S: Typ 1475A3
- RS-232C Adapter DB-9 P/DB-25 S: Typ 1469

**Accessoires**

- Câble de connexion pour télécommande, 5 m de longueur, type 1455A5 (fiche technique 15.016)
- Coffret de télécommande, type 5663 (fiche technique 13.5663)
- Fiche pour connexion de la télécommande, type 1564, à 6 pôles, selon DIN 45322 (fiche technique 15.016)
- RS-232C câble avec "Hardwired-Handshake" DB-25 P/DB-9S: type 1475A3
- RS-232C Adaptateur DB-9 P/DB-25 S: type 1469

**Accessories**

- Connecting cable for remote control, length 5 m, Type 1455A5 (Data Sheet 15.016)
- Remote control box Type 5663 (Data Sheet 13.5663)
- Connector for remote control connection, Type 1564, 6-pole, per DIN 45322 (Data Sheet 15.016)
- RS-232C cable with Hardwired-Handshake DB-25 P/DB-9S: Type 1475A3
- RS-232C Adaptor DB-9 P/DB-25 S: Type 1469

### III. Ενισχυτής 5006

B11.5006e

8.79

2r

#### 1.2. Technical data (table 1)

##### 1.2.1. Charge amplifier

<b>Measuring range</b> , 12 steps, divided 1 : 2 : 5	pC	±10...500'000	
<b>Transducer sensitivity</b> , 5 decades continuously adjustable in between	pC/M.U.	0,1...11'000	a)
<b>Accuracy</b> in setting <i>Medium</i> : in the two most sensitive measuring ranges	%	<±3	
in all others ranges	%	<±1	
<b>Error</b> caused by nonlinearity of multi-turn potentiometer	%	<±0,5	
<b>Calibration capacitor</b>	pF	1'000 ±0,5%	
<b>Calibration input, sensitivity</b>	pC/mV	1 ±0,5%	
<b>Input voltage</b> , maximum nondestructive voltage, pulse length pulse length <0,3 s	V	±125	
<b>Linearity</b>	%FSO	<±0,05	b)
<b>Frequency response</b> with standard filter 180 kHz at 50 kHz at 100 kHz	%	-1...+3	
	%	-5...+5	
<b>3-dB-frequency</b> with standard filter 180 kHz, input cable length up to 3 m	kHz	180 ±10%	
<b>Time constant resistor</b> , setting Long, ca.	Ω	10 <sup>14</sup>	
setting Medium, ca.	Ω	10 <sup>11</sup>	
setting Short, ca.	Ω	10 <sup>9</sup>	
<b>Time constant</b> , setting Long	s	1'000...100'000	
setting Medium	s	1...5'000	
setting Short	s	0,01...50	
<b>Voltage output</b> , indefinitely short circuit proof			
Nominal output voltage swing (FSO)	V	±10	
Nominal output current swing	mA	±5	
Output resistance	Ω	100 ±5%	
Saturation voltage, unloaded	V	±12...15	
<b>Cable noise</b> , per1000pF input capacitance	pC <sub>rms</sub>	<0,03	
<b>Hum and noise</b> , input shielded	mV <sub>rms</sub>	<0,3/<2	c)
<b>Zero offset</b> , during <i>Reset</i> during 10 hours	mV	<±1/<± 5	c)
<b>Zero offset error</b> , during <i>Reset</i> and with mains voltage excursions ±20%	mV	<±0,5/<±5	c)
<b>Thermal zero offset drift</b> , during <i>Reset</i> caused by temperature excursions	mV/°C	<±0,5/<±5	c)
<b>Drift</b> , caused by input stage <i>Mosfet</i> leakage current, at 20°C	pC/s	<±0,03	

##### 1.2.2. Charge amplifier and galvo amplifier

**Galvo output**, nominal output voltage swing (FSO)  
(corresponding 10 V at *Output* 100Ω),  
across R<sub>M</sub> (see fig. 2)

V ±1

**Adaptation to galvanometer** by means of measuring resistor  
R<sub>M</sub>, damping resistor R<sub>D</sub> and safety resistor R<sub>S</sub>

a) M.U. = Mechanical Unit, for example: bar, N, g

b) FSO = Full Scale Output

c) Dial for Transducer sensitivity setting reading 10-00, resp. 1-00

<b>Load</b> at 100 mA (mains voltage 220/110 +20% -10%)	$\Omega$	$\leq 45$	
at 60 mA (mains voltage 220/110 V $\pm 20\%$ )	$\Omega$	$\leq 80$	
at 20 mA	$\Omega$	$\leq 220$	
at 2 mA	$\Omega$	$\leq 1'000$	
<b>Limitation of output voltage</b> by zener diodes	V	$\pm 6,5$	
<b>Frequency response</b> , for amplitudes across $R_M$ in the range 0,5...1 V			
1% decrease at	kHz	$> 5$	
2% decrease at	kHz	$> 8$	
30% decrease at	kHz	$> 12$	
<b>Linearity</b> , at maximum permissible load	%FSO	$\leq \pm 0,1$	b)
<b>Spurious signal</b> , at output, input shielded	%FSO	$\leq \pm 0,05$	b)
<b>Thermal zero offset drift</b> , during <i>Reset</i>	%FSO/ $^{\circ}\text{C}$	$\leq \pm 0,01 / \leq \pm 0,05$	b)
<b>Position setting</b> , with potentiometer Galvo- <i>Zero</i> within	FSO	$\pm 50\%$	b)
<b>Calibration signal</b> , symmetric staircase function, ca. 2 Hz	FSO	$\pm 50\%$	
Accuracy	%	$\leq \pm 1$	
Temperature sensitivity	%/ $^{\circ}\text{C}$	$\leq \pm 0,02$	
<b>Output current swing</b> at			
mains voltage 220/110 V $\pm 20\%$	mA	$\pm 0,01 \dots \pm 60$	
mains voltage 220/110 V +20% -10%	mA	$\pm 0,01 \dots \pm 100$	
<b>Output resistance</b> , without $R_D$	k $\Omega$	$> 100$	

### 1.2.3. Monitoring circuit

<b>Signal trigger level</b> , at <i>Output 100<math>\Omega</math></i> resulting in display <i>Overload</i>	V	$\pm 10,5$	
<b>Signal trigger duration</b> , at <i>Output 100<math>\Omega</math></i> resulting in display <i>Overload</i>	ms	0,1	
<b>Zero offset trigger level</b> , at <i>Output 100<math>\Omega</math></i> resulting in display <i>Zero off Limits</i>	mV	$\pm 20$	

### 1.2.4. Digital inputs and outputs

<b>Connections</b> , on rear side connector <i>Remote Control</i> , functions and pin-out see 2.5. and 2.6.			
<b>Outputs</b> , open drain type, indefinitely short circuit proof against electronics ground "H"-level, minimum output voltage at output current 0,1 mA, with external 12 k $\Omega$ pull-up resistor to +15 V	V	$> 12,5$	
"L"-level, maximum output voltage at input current 10 mA	V	$< 1,3$	
<b>Inputs</b> , with internal pull-up resistors, activation voltages "H"-level, open inputs considered "H"	V	$> 12,5$	
"L"-level, maximum input voltage	V	$< 1,3$	
at output current 0,8 mA	V	$< 1,3$	
protected against DC voltages up to	V	$\leq \pm 85$	
pulses with durations $\leq 0,1$ s up to	V	$\leq \pm 700$	

b) FSO = Full Scale Output

<b>Input resistance</b> , at input voltages		
<±15 V, ca.	kΩ	20
≥0,15 V, ca.	kΩ	11
<b>Remote-Reset-Pulse</b> , duration	ms	≥5
<b>Reset-Overload-Pulse</b> , duration	ms	≥3
<b>+15 V-Output</b> , maximum current drain at galvo currents up to ±40 mA	mA	12

#### 1.2.5. *Miscellaneous*

<b>Temperatur range</b>		
for operation within specifications	°C	0...+50
for operation at all	°C	-10...+60
<b>Power supply</b> , mains voltage changeable by resoldering	V	220/110 ±20%
frequency range	Hz	48...62
<b>Connections</b>		
<i>Charge input</i>	Type	BNC neg.
<i>Calibration input</i>	Type	BNC neg.
<i>Output 100Ω</i>	Type	BNC neg.
<i>Galvo output</i> , 2receptacles	φmm	4
<i>Remote control</i> , 6-pole receptacle	Type	DIN 45322
Power connection, following standard CEE-22/IV ungrounded, according protection class II, test voltage 4 kV		
<b>Dimensions</b> without case cover	mm	74x145x210
<b>Weight</b> , ca.	kg	1,3



## Παράρτημα Γ: Πρόγραμμα τόνρευσης δοκιμίων

00301 ;  
G40 G18 G80 G90 G99 G56 G21 ;  
S1000 M03 T8 ;  
G00 Z68 ;  
G00 X10 ;  
G01 X-1.5 F0.01 ;  
G01 Z43. F0.15 ;  
G00 X10. ;  
G00 Z55. ;  
G01 X-3. F0.01 ;  
G01 Z43. F0.15 ;  
G01 Z23. F0.2 ;  
S500 M03 ;  
G01 Z3. F0.15 ;  
G00 X50. ;  
M05 ;  
M30 ;

Παράρτημα Δ: Κατεργασμένα δοκίμια και απόβλιττα πειραμάτων 13, 14

- 0%



- 1%



- 2%



- 3%



## Παράρτημα Ε: Πίνακες ΑΝΟΒΑ

### I. Πίνακες ΑΝΟΒΑ $R_a$

#### • 0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,0718	3,27%	0,0718	0,02393	0,38	0,769
Rotational speed	3	0,7278	33,12%	0,7278	0,2426	3,89	0,074
Feed rate	3	1,023	46,56%	1,023	0,341	5,46	0,038
Error	6	0,3746	17,05%	0,3746	0,06243		
Total	15	2,1972	100,00%				

#### • 1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,2297	10,60%	0,2297	0,07657	0,92	0,486
Rotational speed	3	0,1321	6,10%	0,1321	0,04403	0,53	0,679
Feed rate	3	1,3045	60,22%	1,3045	0,43483	5,22	0,041
Error	6	0,5	23,08%	0,5	0,08333		
Total	15	2,1663	100,00%				

#### • 2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,06568	2,47%	0,06567	0,02189	0,31	0,819
Rotational speed	3	0,60448	22,72%	0,60448	0,20149	2,84	0,128
Feed rate	3	1,56447	58,80%	1,56447	0,52149	7,34	0,02
Error	6	0,42615	16,02%	0,42615	0,07103		
Total	15	2,66078	100,00%				

#### • 3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,1125	3,79%	0,1125	0,0375	0,52	0,684
Rotational speed	3	0,4461	15,02%	0,4461	0,1487	2,06	0,207
Feed rate	3	1,9781	66,61%	1,9781	0,65937	9,14	0,012
Error	6	0,4328	14,57%	0,4328	0,07213		
Total	15	2,9695	100,00%				

## II. Πίνακες ANOVA R<sub>g</sub>

### • 0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,1195	3,86%	0,1195	0,03982	0,47	0,712
Rotational speed	3	1,2393	40,05%	1,2393	0,41309	4,91	0,047
Feed rate	3	1,2307	39,77%	1,2307	0,41022	4,87	0,048
Error	6	0,505	16,32%	0,505	0,08416		
Total	15	3,0944	100,00%				

### • 1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,3213	10,53%	0,3213	0,10709	0,84	0,521
Rotational speed	3	0,2557	8,38%	0,2557	0,08523	0,67	0,603
Feed rate	3	1,7061	55,93%	1,7061	0,56869	4,45	0,057
Error	6	0,7672	25,15%	0,7672	0,12786		
Total	15	3,0502	100,00%				

### • 2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,065	1,69%	0,065	0,02167	0,18	0,903
Rotational speed	3	1,0226	26,62%	1,0226	0,34087	2,91	0,123
Feed rate	3	2,0514	53,39%	2,0514	0,6838	5,84	0,033
Error	6	0,703	18,30%	0,703	0,11717		
Total	15	3,842	100,00%				

### • 3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	0,1753	4,27%	0,1753	0,05842	0,64	0,614
Rotational speed	3	0,7893	19,21%	0,7893	0,26309	2,9	0,123
Feed rate	3	2,6003	63,29%	2,6003	0,86676	9,57	0,011
Error	6	0,5436	13,23%	0,5436	0,09059		
Total	15	4,1084	100,00%				

### III. Πίνακες ANOVA $R_t$

- **0%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	6,357	7,14%	6,357	2,119	0,79	0,541
Rotational speed	3	42,542	47,81%	42,542	14,181	5,3	0,04
Feed rate	3	24,027	27,00%	24,027	8,009	2,99	0,117
Error	6	16,054	18,04%	16,054	2,676		
Total	15	88,979	100,00%				

- **1%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	23,32	19,95%	23,33	7,775	1,46	0,316
Rotational speed	3	24,67	21,10%	24,67	8,222	1,54	0,297
Feed rate	3	36,98	31,64%	36,98	12,328	2,32	0,175
Error	6	31,94	27,32%	31,94	5,323		
Total	15	116,91	100,00%				

- **2%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	3,847	2,92%	3,847	1,282	0,17	0,912
Rotational speed	3	36,322	27,59%	36,322	12,107	1,62	0,28
Feed rate	3	46,762	35,52%	46,762	15,587	2,09	0,203
Error	6	44,734	33,98%	44,734	7,456		
Total	15	131,664	100,00%				

- **3%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	4,535	3,93%	4,535	1,512	0,59	0,644
Rotational speed	3	47,525	41,16%	47,525	15,842	6,18	0,029
Feed rate	3	48,035	41,60%	48,035	16,012	6,25	0,028
Error	6	15,375	13,32%	15,375	2,563		
Total	15	115,47	100,00%				

#### IV. Πίνακες ANOVA Sm

• **0%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	417,7	2,22%	417,7	139,2	0,12	0,946
Rotational speed	3	1686,2	8,97%	1686,2	562,1	0,47	0,711
Feed rate	3	9584,2	51,00%	9584,2	3194,7	2,7	0,139
Error	6	7102,9	37,80%	7102,9	1183,8		
Total	15	18790,9	100,00%				

• **1%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	5491	19,25%	5491	1830,5	2,2	0,189
Rotational speed	3	9165	32,12%	9165	3055	3,67	0,082
Feed rate	3	8879	31,12%	8879	2959,5	3,55	0,087
Error	6	4997	17,51%	4997	832,8		
Total	15	28532	100,00%				

• **2%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	17683	49,62%	17683	5894,2	8,62	0,014
Rotational speed	3	1490	4,18%	1490	496,7	0,73	0,572
Feed rate	3	12361	34,69%	12361	4120,4	6,02	0,031
Error	6	4103	11,51%	4103	683,9		
Total	15	35637	100,00%				

• **3%**

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	1109	6,02%	1109	369,8	0,25	0,861
Rotational speed	3	2403	13,04%	2403	801,1	0,54	0,675
Feed rate	3	5947	32,27%	5947	1982,3	1,33	0,351
Error	6	8970	48,67%	8970	1495,1		
Total	15	18430	100,00%				

## V. Πίνακες ANOVA $F_{z_{max}}$

### • 0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	466,32	46,11%	466,32	155,44	33,88	0
Rotational speed	3	115,13	11,38%	115,13	38,377	8,37	0,015
Feed rate	3	402,45	39,79%	402,45	134,15	29,24	0,001
Error	6	27,53	2,72%	27,53	4,588		
Total	15	1011,43	100,00%				

### • 1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	596,46	45,95%	596,46	198,82	19,5	0,002
Rotational speed	3	161,92	12,47%	161,92	53,97	5,3	0,04
Feed rate	3	478,6	36,87%	478,6	159,53	15,65	0,003
Error	6	61,16	4,71%	61,16	10,19		
Total	15	1298,14	100,00%				

### • 2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	604,85	48,38%	604,85	201,617	33,23	0
Rotational speed	3	185,57	14,84%	185,57	61,856	10,2	0,009
Feed rate	3	423,38	33,86%	423,38	141,127	23,26	0,001
Error	6	36,4	2,91%	36,4	6,067		
Total	15	1250,2	100,00%				

### • 3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Depth of cut	3	535,25	47,36%	535,25	178,417	38,64	0
Rotational speed	3	213,18	18,86%	213,18	71,06	15,39	0,003
Feed rate	3	354,09	31,33%	354,09	118,03	25,56	0,001
Error	6	27,71	2,45%	27,71	4,618		
Total	15	1130,23	100,00%				



## Παράρτημα ΣΤ: Ανάλυση παλινδρόμησης

### I. Πίνακες και εξισώσεις παλινδρόμησης $R_a$

0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	2,1972	100,00%	2,1972	0,146480
Depth of cut	1	0,00722	0,33%	0,00917	0,009168
Rotational speed	1	0,69938	31,83%	0,01038	0,010379
Feed rate	1	0,8	36,41%	0,00095	0,000951
Depth of cut*Depth of cut	1	0,0441	2,01%	0,15145	0,151451
Rotational speed*Rotational speed	1	0,0196	0,89%	0,01987	0,019867
Feed rate*Feed rate	1	0,0025	0,11%	0,05312	0,053124
Depth of cut*Rotational speed	1	0,05891	2,68%	0,00243	0,002427
Depth of cut*Feed rate	1	0,0216	0,98%	0,00278	0,002776
Rotational speed*Feed rate	1	0,18969	8,63%	0,06518	0,065177
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,07593	3,46%	0,07225	0,072250
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,0444	2,02%	0,06084	0,060840
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,01309	0,60%	0,02025	0,020250
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,081	3,69%	0,081	0,081000
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,13689	6,23%	0,13689	0,136890
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,00289	0,13%	0,00289	0,002890
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	2,1972	100,00%		

$$\begin{aligned}
 R_a = & 0,1583 + 0,8333 A + 0,001773 B + 5,367 \Gamma \\
 & - 0,7317 A^2 - 0,000001 B^2 \\
 & + 173,3 \Gamma^2 + 0,000383 A^2 B \\
 & + 4,100 A^2 \Gamma - 0,03973 B^2 \Gamma \\
 & + 0,000283 A^2 A^2 B \\
 & + 2,600 A^2 A^2 \Gamma \\
 & - 0,000000 A^2 B^2 B \\
 & - 60,00 A^2 \Gamma^2 \Gamma \\
 & + 0,000016 B^2 B^2 \Gamma \\
 & - 0,02267 B^2 \Gamma^2 \Gamma
 \end{aligned}$$

1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	2,1663	100,00%	2,1663	0,144420
Depth of cut	1	0,01568	0,72%	0,00013	0,000132
Rotational speed	1	0,1125	5,19%	0,0017	0,001695
Feed rate	1	1,00352	46,32%	0,02163	0,021629
Depth of cut*Depth of cut	1	0,0484	2,23%	0,16956	0,169556
Rotational speed*Rotational speed	1	0,0196	0,90%	0,00116	0,001165
Feed rate*Feed rate	1	0,0225	1,04%	0,08429	0,084288
Depth of cut*Rotational speed	1	0,00143	0,07%	0,0809	0,080898
Depth of cut*Feed rate	1	0,09205	4,25%	0,0009	0,000899
Rotational speed*Feed rate	1	0,09956	4,60%	0,10964	0,109638
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,00004	0,00%	0,00036	0,000360
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,35284	16,29%	0,37249	0,372490
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,02535	1,17%	0,04624	0,046240
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,32041	14,79%	0,32041	0,320410
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,03721	1,72%	0,03721	0,037210
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,01521	0,70%	0,01521	0,015210
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	2,1663	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Ra = & 0,7142 - 0,1000 A - 0,000717 B + 25,60 \Gamma \\
 & - 0,7742 A*A + 0,000000 B*B \\
 & + 218,3 \Gamma*\Gamma + 0,002213 A*B \\
 & - 2,333 A*\Gamma - 0,05153 B*\Gamma \\
 & + 0,000020 A*A*B \\
 & + 6,433 A*A*\Gamma \\
 & - 0,000000 A*B*B \\
 & - 119,3 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000008 B*B*\Gamma \\
 & + 0,05200 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	2,66078	100,00%	2,66078	0,177385
Depth of cut	1	0,03121	1,17%	0,14808	0,148078
Rotational speed	1	0,43513	16,35%	0,006	0,006000
Feed rate	1	1,008	37,88%	0,05329	0,053290
Depth of cut*Depth of cut	1	0,01822	0,68%	0,22262	0,222625
Rotational speed*Rotational speed	1	0,13322	5,01%	0,0964	0,096405
Feed rate*Feed rate	1	0,00203	0,08%	0,04368	0,043676
Depth of cut*Rotational speed	1	0,03388	1,27%	0,01433	0,014334
Depth of cut*Feed rate	1	0,00092	0,03%	0,28099	0,280992
Rotational speed*Feed rate	1	0,01424	0,54%	0,00004	0,000039
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,02945	1,11%	0,03364	0,033640
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,75282	28,29%	0,77841	0,778410
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,11716	4,40%	0,10404	0,104040
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,03249	1,22%	0,03249	0,032490
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,036	1,35%	0,036	0,036000
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,016	0,60%	0,016	0,016000
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	2,66078	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Ra = & -1,162 + 3,349 A - 0,001348 B + 40,18 \Gamma \\
 & - 0,8871 A*A - 0,000002 B*B \\
 & + 157,2 \Gamma*\Gamma + 0,000932 A*B \\
 & - 41,25 A*\Gamma - 0,000967 B*\Gamma \\
 & - 0,000193 A*A*B \\
 & + 9,300 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000001 A*B*B \\
 & - 38,00 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000008 B*B*\Gamma \\
 & - 0,05333 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	2,9695	100,00%	2,9695	0,197967
Depth of cut	1	0,032	1,08%	0,09004	0,090044
Rotational speed	1	0,39762	13,39%	0,01901	0,019010
Feed rate	1	1,50152	50,56%	0,03192	0,031921
Depth of cut*Depth of cut	1	0,0625	2,10%	0,2024	0,202402
Rotational speed*Rotational speed	1	0,0484	1,63%	0,11378	0,113776
Feed rate*Feed rate	1	0,0676	2,28%	0,01258	0,012575
Depth of cut*Rotational speed	1	0,22019	7,42%	0,00007	0,000066
Depth of cut*Feed rate	1	0,09369	3,16%	0,05878	0,058781
Rotational speed*Feed rate	1	0,16364	5,51%	0,02936	0,029358
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,00553	0,19%	0,00625	0,006250
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,24205	8,15%	0,26569	0,265690
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,03895	1,31%	0,03249	0,032490
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,02601	0,88%	0,02601	0,026010
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,06724	2,26%	0,06724	0,067240
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,00256	0,09%	0,00256	0,002560
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	2,9695	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Ra = & -1,986 + 2,612 A + 0,002400 B + 31,10 \Gamma \\
 & - 0,8458 A*A - 0,000003 B*B \\
 & + 84,33 \Gamma*\Gamma + 0,000063 A*B \\
 & - 18,87 A*\Gamma - 0,02667 B*\Gamma \\
 & + 0,000083 A*A*B \\
 & + 5,433 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000000 A*B*B \\
 & - 34,00 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000011 B*B*\Gamma \\
 & + 0,02133 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

## II. Πίνακες αι εξισώσεις παλινδρόμησης R<sub>q</sub>

0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	3,09437	100,00%	3,09437	0,146480
Depth of cut	1	0,02113	0,68%	0,01318	0,009168
Rotational speed	1	1,17613	38,01%	0,01403	0,010379
Feed rate	1	0,89464	28,91%	0,00238	0,000951
Depth of cut*Depth of cut	1	0,07023	2,27%	0,22262	0,151451
Rotational speed*Rotational speed	1	0,04202	1,36%	0,02525	0,019867
Feed rate*Feed rate	1	0,02103	0,68%	0,06194	0,053124
Depth of cut*Rotational speed	1	0,09245	2,99%	0,00294	0,002427
Depth of cut*Feed rate	1	0,01237	0,40%	0,00455	0,002776
Rotational speed*Feed rate	1	0,26601	8,60%	0,09578	0,065177
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,11264	3,64%	0,10816	0,072250
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,06336	2,05%	0,08649	0,060840
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,01911	0,62%	0,02916	0,020250
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,11025	3,56%	0,11025	0,081000
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,19044	6,15%	0,19044	0,136890
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,00256	0,08%	0,00256	0,002890
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	3,09437	100,00%		

$$\begin{aligned}
 R_q = & 0,2479 + 0,9992 A + 0,002062 B + 8,483 \Gamma \\
 & - 0,8871 A*A - 0,000001 B*B \\
 & + 187,2 \Gamma*\Gamma + 0,000422 A*B \\
 & + 5,250 A*\Gamma - 0,04817 B*\Gamma \\
 & + 0,000347 A*A*B \\
 & + 3,100 A*A*\Gamma \\
 & - 0,000000 A*B*B \\
 & - 70,00 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000018 B*B*\Gamma \\
 & - 0,02133 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	3,05018	100,00%	3,05018	0,203345
Depth of cut	1	0,00761	0,25%	0,00026	0,000256
Rotational speed	1	0,23981	7,86%	0,00854	0,008537
Feed rate	1	1,19561	39,20%	0,03475	0,034753
Depth of cut*Depth of cut	1	0,06502	2,13%	0,2917	0,291698
Rotational speed*Rotational speed	1	0,01562	0,51%	0,00619	0,006190
Feed rate*Feed rate	1	0,08122	2,66%	0,11633	0,116332
Depth of cut*Rotational speed	1	0,00804	0,26%	0,12625	0,126251
Depth of cut*Feed rate	1	0,10604	3,48%	0,0041	0,004101
Rotational speed*Feed rate	1	0,162	5,31%	0,13713	0,137130
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,00029	0,01%	0,001	0,001000
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,59645	19,55%	0,62001	0,620010
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,0444	1,46%	0,07744	0,077440
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,47089	15,44%	0,47089	0,470890
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,036	1,18%	0,036	0,036000
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,02116	0,69%	0,02116	0,021160
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	3,05018	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Rq = & 0,9563 + 0,1392 A - 0,001608 B + 32,45 \Gamma \\
 & - 1,015 A*A + 0,000001 B*B \\
 & + 256,5 \Gamma*\Gamma + 0,002765 A*B \\
 & - 4,983 A*\Gamma - 0,05763 B*\Gamma \\
 & + 0,000033 A*A*B \\
 & + 8,300 A*A*\Gamma \\
 & - 0,000001 A*B*B \\
 & - 144,7 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000008 B*B*\Gamma \\
 & + 0,06133 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	3,842	100,00%	3,842	0,25613
Depth of cut	1	0,02312	0,60%	0,20737	0,20737
Rotational speed	1	0,79202	20,61%	0,02135	0,02135
Feed rate	1	1,3005	33,85%	0,06399	0,06399
Depth of cut*Depth of cut	1	0,0361	0,94%	0,34648	0,34648
Rotational speed*Rotational speed	1	0,1936	5,04%	0,07997	0,07997
Feed rate*Feed rate	1	0,0289	0,75%	0,06932	0,06932
Depth of cut*Rotational speed	1	0,03823	0,99%	0,02378	0,02378
Depth of cut*Feed rate	1	0,01711	0,45%	0,37995	0,37995
Rotational speed*Feed rate	1	0,00492	0,13%	0,00068	0,00068
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,03386	0,88%	0,03969	0,03969
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	1,13426	29,52%	1,156	1,156
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,12852	3,35%	0,11025	0,11025
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,06084	1,58%	0,06084	0,06084
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,02401	0,62%	0,02401	0,02401
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,02601	0,68%	0,02601	0,02601
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	3,842	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Rq = & -0,9167 + 3,963 A - 0,002543 B + 44,03 \Gamma \\
 & - 1,107 A*A - 0,000002 B*B \\
 & + 198,0 \Gamma*\Gamma + 0,001200 A*B \\
 & - 47,97 A*\Gamma + 0,004067 B*\Gamma \\
 & - 0,000210 A*A*B \\
 & + 11,33 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000001 A*B*B \\
 & - 52,00 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000007 B*B*\Gamma \\
 & - 0,06800 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	4,10837	100,00%	4,10837	0,273892
Depth of cut	1	0,02812	0,68%	0,12314	0,123141
Rotational speed	1	0,73345	17,85%	0,03864	0,038640
Feed rate	1	1,96564	47,84%	0,04353	0,043528
Depth of cut*Depth of cut	1	0,11903	2,90%	0,26141	0,261407
Rotational speed*Rotational speed	1	0,05523	1,34%	0,19863	0,198631
Feed rate*Feed rate	1	0,06003	1,46%	0,0187	0,018698
Depth of cut*Rotational speed	1	0,30489	7,42%	0,00008	0,000085
Depth of cut*Feed rate	1	0,11869	2,89%	0,07434	0,074336
Rotational speed*Feed rate	1	0,17756	4,32%	0,04361	0,043607
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,00511	0,12%	0,00576	0,005760
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,31111	7,57%	0,34596	0,345960
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,07858	1,91%	0,06724	0,067240
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,03844	0,94%	0,03844	0,038440
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,11025	2,68%	0,11025	0,110250
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,00225	0,05%	0,00225	0,002250
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	4,10837	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Rq = & -2,453 + 3,054 A + 0,003422 B + 36,32 \Gamma \\
 & - 0,9612 A*A - 0,000003 B*B \\
 & + 102,8 \Gamma*\Gamma - 0,000072 A*B \\
 & - 21,22 A*\Gamma - 0,03250 B*\Gamma \\
 & + 0,000080 A*A*B \\
 & + 6,200 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000001 A*B*B \\
 & - 41,33 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000014 B*B*\Gamma \\
 & + 0,02000 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$



### III. Πίνακες και εξισώσεις παλινδρόμησης $R_t$

0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	88,9794	100,00%	88,9794	5,93196
Depth of cut	1	2,3461	2,64%	0,5714	0,57142
Rotational speed	1	38,2261	42,96%	0,0895	0,08953
Feed rate	1	15,0511	16,92%	0,0414	0,0414
Depth of cut*Depth of cut	1	2,9756	3,34%	8,0283	8,0283
Rotational speed*Rotational speed	1	1,1556	1,30%	0,0174	0,01739
Feed rate*Feed rate	1	3,5156	3,95%	0,4644	0,46442
Depth of cut*Rotational speed	1	4,0773	4,58%	0,0012	0,00125
Depth of cut*Feed rate	1	0,0173	0,02%	0,5256	0,52561
Rotational speed*Feed rate	1	8,9809	10,09%	2,0377	2,03772
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	4,8091	5,40%	4,9702	4,97025
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	1,8851	2,12%	2,209	2,209
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	1,0215	1,15%	1,4063	1,40625
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	3,249	3,65%	3,249	3,249
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	1,444	1,62%	1,444	1,444
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,225	0,25%	0,225	0,225
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	88,9794	100,00%		

$$\begin{aligned}
 R_t = & 2,648 + 6,579 A + 0,005208 B + 35,42 \Gamma \\
 & - 5,327 A^*A + 0,000001 B^*B \\
 & + 512,5 \Gamma^*\Gamma - 0,000275 A^*B \\
 & + 56,42 A^*\Gamma - 0,2222 B^*\Gamma \\
 & + 0,002350 A^*A^*B \\
 & + 15,67 A^*A^*\Gamma \\
 & - 0,000002 A^*B^*B \\
 & - 380,0 A^*\Gamma^*\Gamma \\
 & + 0,000051 B^*B^*\Gamma \\
 & + 0,2000 B^*\Gamma^*\Gamma
 \end{aligned}$$

1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	116,91	100,00%	116,91	7,794
Depth of cut	1	2,665	2,28%	1,013	1,0127
Rotational speed	1	20,402	17,45%	0,756	0,7558
Feed rate	1	27,612	23,62%	0,02	0,0198
Depth of cut*Depth of cut	1	5,522	4,72%	7,12	7,1199
Rotational speed*Rotational speed	1	0,122	0,10%	5,456	5,4564
Feed rate*Feed rate	1	5,76	4,93%	2,807	2,8072
Depth of cut*Rotational speed	1	1,556	1,33%	2,478	2,4781
Depth of cut*Feed rate	1	0,198	0,17%	2,67	2,6705
Rotational speed*Feed rate	1	7,309	6,25%	3,408	3,4085
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,465	0,40%	0,784	0,784
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	12,145	10,39%	11,342	11,3422
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	3,691	3,16%	5,776	5,776
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	24,18	20,68%	24,18	24,1802
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,992	0,85%	0,992	0,9923
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	4,29	3,67%	4,29	4,2902
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	116,91	100,00%		

$$\begin{aligned}
 R_t = & 20,48 - 8,758 A - 0,01513 B - 24,50 \Gamma \\
 & - 5,017 A^*A + 0,000018 B^*B \\
 & + 1260 \Gamma^*\Gamma + 0,01225 A^*B \\
 & + 127,2 A^*\Gamma - 0,2873 B^*\Gamma \\
 & + 0,000933 A^*A^*B \\
 & + 35,50 A^*A^*\Gamma \\
 & - 0,000005 A^*B^*B \\
 & - 1037 A^*\Gamma^*\Gamma \\
 & - 0,000042 B^*B^*\Gamma \\
 & + 0,8733 B^*\Gamma^*\Gamma
 \end{aligned}$$

2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	131,664	100,00%	131,664	8,7776
Depth of cut	1	0,703	0,53%	7,159	7,1592
Rotational speed	1	34,716	26,37%	4,212	4,2121
Feed rate	1	20,503	15,57%	0,701	0,7011
Depth of cut*Depth of cut	1	0,141	0,11%	16,314	16,3139
Rotational speed*Rotational speed	1	1,501	1,14%	0,685	0,6852
Feed rate*Feed rate	1	14,631	11,11%	2,73	2,7297
Depth of cut*Rotational speed	1	1,2	0,91%	0,838	0,8383
Depth of cut*Feed rate	1	3,836	2,91%	8,528	8,5281
Rotational speed*Feed rate	1	5,809	4,41%	1,375	1,375
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,076	0,06%	0,144	0,144
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	40,809	30,99%	38,612	38,6123
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,465	0,35%	0,225	0,225
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	4,16	3,16%	4,16	4,1603
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	2,025	1,54%	2,025	2,025
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	1,089	0,83%	1,089	1,089
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	131,664	100,00%		

$$\begin{aligned}
 R_t = & 1,606 + 23,29 A - 0,03573 B + 145,8 \Gamma \\
 & - 7,594 A^*A + 0,000006 B^*B \\
 & + 1242 \Gamma^*\Gamma + 0,007125 A^*B \\
 & - 227,3 A^*\Gamma + 0,1825 B^*\Gamma \\
 & - 0,000400 A^*A^*B \\
 & + 65,50 A^*A^*\Gamma \\
 & + 0,000001 A^*B^*B \\
 & - 430,0 A^*\Gamma^*\Gamma \\
 & - 0,000060 B^*B^*\Gamma \\
 & - 0,4400 B^*\Gamma^*\Gamma
 \end{aligned}$$

3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	115,47	100,00%	115,47	7,698
Depth of cut	1	0,085	0,07%	0,993	0,99347
Rotational speed	1	46,818	40,55%	1,307	1,30696
Feed rate	1	37,812	32,75%	0,748	0,74753
Depth of cut*Depth of cut	1	3,61	3,13%	1,733	1,73299
Rotational speed*Rotational speed	1	0,023	0,02%	6,655	6,6547
Feed rate*Feed rate	1	0,423	0,37%	0,46	0,4599
Depth of cut*Rotational speed	1	6,738	5,83%	0,017	0,01651
Depth of cut*Feed rate	1	5,01	4,34%	0,473	0,47267
Rotational speed*Feed rate	1	2,64	2,29%	1,044	1,04371
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,201	0,17%	0,182	0,18225
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	3,179	2,75%	3,782	3,78225
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	4,34	3,76%	3,782	3,78225
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	1,64	1,42%	1,64	1,64025
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	2,916	2,53%	2,916	2,916
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,036	0,03%	0,036	0,036
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	115,47	100,00%		

$$\begin{aligned}
 R_t = & -7,800 + 8,675 A + 0,01990 B + 150,5 \Gamma \\
 & - 2,475 A^*A - 0,000019 B^*B \\
 & + 510,0 \Gamma^*\Gamma - 0,001000 A^*B \\
 & - 53,50 A^*\Gamma - 0,1590 B^*\Gamma \\
 & - 0,000450 A^*A^*B \\
 & + 20,50 A^*A^*\Gamma \\
 & + 0,000004 A^*B^*B \\
 & - 270,0 A^*\Gamma^*\Gamma \\
 & + 0,000072 B^*B^*\Gamma \\
 & + 0,08000 B^*\Gamma^*\Gamma
 \end{aligned}$$

#### IV. Πίνακες και εξισώσεις Sm

0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	18790,9	100,00%	18790,9	1252,73
Depth of cut	1	183	0,97%	77,7	77,68
Rotational speed	1	787,5	4,19%	394,9	394,91
Feed rate	1	3604,6	19,18%	131,7	131,68
Depth of cut*Depth of cut	1	126,6	0,67%	597	597,01
Rotational speed*Rotational speed	1	7,6	0,04%	2896,7	2896,67
Feed rate*Feed rate	1	351,6	1,87%	1014,9	1014,93
Depth of cut*Rotational speed	1	396,9	2,11%	283,8	283,75
Depth of cut*Feed rate	1	2719,6	14,47%	405,8	405,75
Rotational speed*Feed rate	1	3859,8	20,54%	886,9	886,92
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,7	0,00%	1,6	1,6
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	993	5,28%	1464,1	1464,1
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	108	0,57%	67,6	67,6
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	448,9	2,39%	448,9	448,9
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	4774,2	25,41%	4774,2	4774,22
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	429	2,28%	429	429,03
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	18790,9	100,00%		

$$\begin{aligned}
 S_m = & 62,23 + 76,71 A + 0,3459 B + 1997 \Gamma \\
 & - 45,94 A^2 - 0,000405 B^2 \\
 & + 23958 \Gamma^2 + 0,1311 A^2 B \\
 & - 1567 A^2 \Gamma - 4,635 B^2 \Gamma \\
 & - 0,001333 A^2 A^2 B \\
 & + 403,3 A^2 A^2 \Gamma \\
 & + 0,000017 A^2 B^2 B \\
 & - 4467 A^2 \Gamma^2 \Gamma \\
 & + 0,002913 B^2 B^2 \Gamma \\
 & - 8,733 B^2 \Gamma^2 \Gamma
 \end{aligned}$$

1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	28532	100,00%	28532	1902,13
Depth of cut	1	1201,3	4,21%	2239,9	2239,94
Rotational speed	1	4321,8	15,15%	4553,9	4553,93
Feed rate	1	490	1,72%	196,2	196,22
Depth of cut*Depth of cut	1	4290,3	15,04%	3289,7	3289,66
Rotational speed*Rotational speed	1	100	0,35%	743,1	743,07
Feed rate*Feed rate	1	8372,3	29,34%	913,8	913,8
Depth of cut*Rotational speed	1	14,8	0,05%	4284	4284,01
Depth of cut*Feed rate	1	377	1,32%	471,6	471,65
Rotational speed*Feed rate	1	3093,7	10,84%	617,2	617,25
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	3545,5	12,43%	3940,2	3940,22
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	42,7	0,15%	44,1	44,1
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	1347,5	4,72%	1265,6	1265,63
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	90	0,32%	90	90
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	2	0,01%	2	2,03
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	1243,2	4,36%	1243,2	1243,22
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	28532	100,00%		

$$\begin{aligned}
 S_m = & 1005 - 411,9 A - 1,175 B - 2438 \Gamma \\
 & + 107,8 A^2 + 0,000205 B^2 \\
 & + 22733 \Gamma^2 + 0,5093 A^2 B \\
 & - 1690 A^2 \Gamma + 3,867 B^2 \Gamma \\
 & - 0,06617 A^2 A^2 B \\
 & - 70,00 A^2 A^2 \Gamma \\
 & - 0,000075 A^2 B^2 B \\
 & + 2000 A^2 \Gamma^2 \Gamma \\
 & - 0,000060 B^2 B^2 \Gamma \\
 & - 14,87 B^2 \Gamma^2 \Gamma
 \end{aligned}$$

2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	35637,4	100,00%	35637,4	2375,83
Depth of cut	1	1970,1	5,53%	2820,3	2820,28
Rotational speed	1	99	0,28%	1137,5	1137,51
Feed rate	1	3740,1	10,49%	36,9	36,91
Depth of cut*Depth of cut	1	1105,6	3,10%	254,3	254,26
Rotational speed*Rotational speed	1	1387,6	3,89%	2681,4	2681,35
Feed rate*Feed rate	1	7965,6	22,35%	2237,8	2237,77
Depth of cut*Rotational speed	1	66	0,19%	6497,2	6497,22
Depth of cut*Feed rate	1	2811,7	7,89%	710,4	710,45
Rotational speed*Feed rate	1	2458,9	6,90%	1176,5	1176,51
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	231,3	0,65%	265,2	265,23
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	1011,1	2,84%	1071,2	1071,22
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	7225,2	20,27%	8439	8439,03
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	5313	14,91%	5313	5313,03
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	119	0,33%	119	119,02
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	133,2	0,37%	133,2	133,23
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	35637,4	100,00%		

$$\begin{aligned}
 S_m = & -101,2 + 462,2 A + 0,5871 B - 1057 \Gamma \\
 & + 29,98 A^*A - 0,000389 B^*B \\
 & - 35575 \Gamma^*\Gamma - 0,6273 A^*B \\
 & - 2074 A^*\Gamma + 5,338 B^*\Gamma \\
 & + 0,01717 A^*A^*B \\
 & - 345,0 A^*A^*\Gamma \\
 & + 0,000194 A^*B^*B \\
 & + 15367 A^*\Gamma^*\Gamma \\
 & - 0,000460 B^*B^*\Gamma \\
 & + 4,867 B^*\Gamma^*\Gamma
 \end{aligned}$$

3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	18429,8	100,00%	18429,8	1228,65
Depth of cut	1	76	0,41%	4006,7	4006,72
Rotational speed	1	76,1	0,41%	1918,8	1918,83
Feed rate	1	18	0,10%	145,3	145,31
Depth of cut*Depth of cut	1	289	1,57%	5835,9	5835,86
Rotational speed*Rotational speed	1	484	2,63%	1268,4	1268,39
Feed rate*Feed rate	1	3660,3	19,86%	52,5	52,52
Depth of cut*Rotational speed	1	80,4	0,44%	1782	1782,04
Depth of cut*Feed rate	1	974,4	5,29%	358,5	358,47
Rotational speed*Feed rate	1	1730,4	9,39%	529,1	529,12
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	981	5,32%	1276,9	1276,9
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	4958	26,90%	4906,2	4906,22
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	2444	13,26%	2190,4	2190,4
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	570	3,09%	570	570,03
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0	0,00%	0	0,02
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	2088	11,33%	2088	2088,02
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	18429,8	100,00%		

$$\begin{aligned}
 S_m = & -414,3 + 550,9 A + 0,7625 B + 2098 \Gamma \\
 & - 143,6 A*A - 0,000268 B*B \\
 & - 5450 \Gamma*\Gamma - 0,3285 A*B \\
 & - 1473 A*\Gamma - 3,580 B*\Gamma \\
 & + 0,03767 A*A*B \\
 & + 738,3 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000099 A*B*B \\
 & - 5033 A*\Gamma*\Gamma \\
 & - 0,000007 B*B*\Gamma \\
 & + 19,27 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$



## V. Πίνακες και εξισώσεις παλινδρόμησης $F_{z_{max}}$

0%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	1011,43	100,00%	1011,43	67,4285
Depth of cut	1	461,53	45,63%	0,23	0,2263
Rotational speed	1	111,26	11,00%	0,03	0,0286
Feed rate	1	400,17	39,56%	2,22	2,2238
Depth of cut*Depth of cut	1	1,24	0,12%	0,85	0,8511
Rotational speed*Rotational speed	1	3,35	0,33%	0,63	0,6268
Feed rate*Feed rate	1	2,22	0,22%	2,7	2,7017
Depth of cut*Rotational speed	1	1,67	0,17%	0,01	0,0126
Depth of cut*Feed rate	1	21,05	2,08%	0,73	0,7272
Rotational speed*Feed rate	1	0,05	0,01%	0	0,003
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	4,11	0,41%	3,71	3,7133
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,18	0,02%	0,16	0,1592
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	2,39	0,24%	2,74	2,742
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	1,36	0,13%	1,36	1,3597
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,03	0,00%	0,03	0,0319
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,8	0,08%	0,8	0,8037
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	1011,43	100,00%		

$$\begin{aligned}
 F_z(\max) = & -6,410 + 4,140 A - 0,002945 B + 259,6 \Gamma \\
 & + 1,734 A*A - 0,000006 B*B \\
 & - 1236 \Gamma*\Gamma + 0,000874 A*B \\
 & - 66,36 A*\Gamma + 0,008508 B*\Gamma \\
 & - 0,002031 A*A*B \\
 & + 4,205 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000003 A*B*B \\
 & + 245,8 A*\Gamma*\Gamma \\
 & - 0,000008 B*B*\Gamma \\
 & + 0,3780 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

1%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	1298,14	100,00%	1298,14	86,543
Depth of cut	1	581,31	44,78%	3,58	3,5841
Rotational speed	1	154,72	11,92%	4,3	4,3028
Feed rate	1	474,35	36,54%	0,09	0,0902
Depth of cut*Depth of cut	1	12,23	0,94%	1,46	1,4598
Rotational speed*Rotational speed	1	2,55	0,20%	7,86	7,8585
Feed rate*Feed rate	1	1,26	0,10%	0,08	0,0837
Depth of cut*Rotational speed	1	0,01	0,00%	3,14	3,1366
Depth of cut*Feed rate	1	59,56	4,59%	3,69	3,6929
Rotational speed*Feed rate	1	0,23	0,02%	0,01	0,0057
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,4	0,03%	0,35	0,3535
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	2,91	0,22%	3,21	3,2148
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	7,59	0,58%	7,59	7,5854
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,02	0,00%	0,02	0,0167
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,89	0,07%	0,89	0,8887
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,11	0,01%	0,11	0,1087
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	1298,14	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Fz(\max) = & 25,49 - 16,48 A - 0,03611 B - 52,28 \Gamma \\
 & + 2,272 A*A + 0,000021 B*B \\
 & - 217,6 \Gamma*\Gamma + 0,01378 A*B \\
 & + 149,5 A*\Gamma - 0,01176 B*\Gamma \\
 & - 0,000627 A*A*B \\
 & - 18,90 A*A*\Gamma \\
 & - 0,000006 A*B*B \\
 & - 27,28 A*\Gamma*\Gamma \\
 & - 0,000040 B*B*\Gamma \\
 & + 0,1390 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

2%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	1250,2	100,00%	1250,2	83,3467
Depth of cut	1	603,05	48,24%	1,81	1,8105
Rotational speed	1	179,66	14,37%	1,24	1,2352
Feed rate	1	423,06	33,84%	0	0,002
Depth of cut*Depth of cut	1	1,2	0,10%	0,2	0,1959
Rotational speed*Rotational speed	1	5,79	0,46%	0,05	0,0483
Feed rate*Feed rate	1	0,07	0,01%	0,24	0,2423
Depth of cut*Rotational speed	1	0,66	0,05%	0,01	0,014
Depth of cut*Feed rate	1	31,6	2,53%	1,21	1,2059
Rotational speed*Feed rate	1	0,14	0,01%	1,32	1,316
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	0,02	0,00%	0,1	0,1017
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	0,5	0,04%	0,55	0,5512
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,06	0,01%	0,13	0,1266
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	1,05	0,08%	1,05	1,0524
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	0,17	0,01%	0,17	0,1717
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	3,17	0,25%	3,17	3,1652
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	1250,2	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Fz(\max) = & 3,647 + 11,71 A - 0,01935 B + 7,729 \Gamma \\
 & - 0,8321 A*A - 0,000002 B*B \\
 & + 370,2 \Gamma*\Gamma + 0,000921 A*B \\
 & - 85,45 A*\Gamma + 0,1785 B*\Gamma \\
 & - 0,000336 A*A*B \\
 & + 7,826 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000001 A*B*B \\
 & + 216,3 A*\Gamma*\Gamma \\
 & + 0,000017 B*B*\Gamma \\
 & - 0,7501 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

3%

Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS
Regression	15	1130,23	100,00%	1130,23	75,3483
Depth of cut	1	523,48	46,32%	24,18	24,1811
Rotational speed	1	209,41	18,53%	2,06	2,0603
Feed rate	1	348,36	30,82%	1,14	1,1357
Depth of cut*Depth of cut	1	10,3	0,91%	21,27	21,272
Rotational speed*Rotational speed	1	1	0,09%	0,24	0,2445
Feed rate*Feed rate	1	0,53	0,05%	0,11	0,1134
Depth of cut*Rotational speed	1	1,81	0,16%	1,14	1,1377
Depth of cut*Feed rate	1	7,35	0,65%	8,45	8,4455
Rotational speed*Feed rate	1	0,46	0,04%	2,33	2,3315
Depth of cut*Depth of cut*Rotational speed	1	2,38	0,21%	2,3	2,2974
Depth of cut*Depth of cut*Feed rate	1	21,47	1,90%	19,86	19,8582
Depth of cut*Rotational speed*Rotational speed	1	0,95	0,08%	1,05	1,0524
Depth of cut*Feed rate*Feed rate	1	0,29	0,03%	0,29	0,2923
Rotational speed*Rotational speed*Feed rate	1	2,38	0,21%	2,38	2,3775
Rotational speed*Feed rate*Feed rate	1	0,04	0,00%	0,04	0,0395
Error	0	0	0,00%	0	*
Total	15	1130,23	100,00%		

$$\begin{aligned}
 Fz(\max) = & -19,86 + 42,80 A - 0,02499 B + 185,5 \Gamma \\
 & - 8,671 A*A + 0,000004 B*B \\
 & - 253,3 \Gamma*\Gamma - 0,008300 A*B \\
 & - 226,1 A*\Gamma + 0,2376 B*\Gamma \\
 & + 0,001598 A*A*B \\
 & + 46,97 A*A*\Gamma \\
 & + 0,000002 A*B*B \\
 & + 114,0 A*\Gamma*\Gamma \\
 & - 0,000065 B*B*\Gamma \\
 & - 0,08378 B*\Gamma*\Gamma
 \end{aligned}$$

## Βιογραφικό σημείωμα

### ΠΡΟΣΩΠΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Όνοματεπώνυμο	Δέδες Χ. Βλάσιος
Ημερομηνία γέννησης	01/08/1992
Τόπος γέννησης	Κιάτο Κορινθίας, Ελλάδα
Εθνικότητα	Ελληνική
Διεύθυνση κατοικίας	Δροσίνη 9, Κιάτο, ΤΚ 20200
Τηλέφωνο σταθερό	2742023259
Email	<a href="mailto:vlasis.dd@gmail.com">vlasis.dd@gmail.com</a>
Προσωπικός ιστότοπος	<a href="#">LinkedIn</a>

### ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ

2016 έως σήμερα	Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, ΔΠΜΣ «Επιστήμη και Τεχνολογία των Υλικών»
2010 έως 2016	Πολυτεχνείου Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης Βαθμός Διπλώματος: «Λίαν καλώς» (7,61) Διπλωματική εργασία: «Κατεργασία δοκιμίων μικρής κλίμακας με χάραξη με Laser»
02/2014 έως 06/2014	Στα πλαίσια του προγράμματος Erasmus <sup>+</sup> φοίτηση στο τμήμα Mechanical Engineering του Czech Technical University in Prague
2007 έως 2010	1 <sup>ο</sup> Γενικό Λύκειο Κιάτου

### ΕΠΑΓΓΕΛΜΑΤΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

2015 (Ιούλιος –Αύγουστος)	Στο πλαίσιο πρακτικής άσκησης, Τεχνικό γραφείο Πατεράκης Νικόλαος "PATERAKIS ENERGY", επίβλεψη κατασκευαστικού έργου, Χανιά
2010 έως 2018	Κατά τη διάρκεια της θερινής περιόδου απασχόληση στην εταιρεία «Χ. Β. ΔΕΔΕΣ» (Εμπόριο ηλεκτρικών εργαλείων και εργαλείων χειρός), ως υπεύθυνος πωλήσεων, μάρκετινγκ και ανεφοδιασμού, Κιάτο

### ΞΕΝΕΣ ΓΛΩΣΣΕΣ

Αγγλικά	Proficiency(C2), Edexcel (PASS with merit), λήψη πτυχίου 2012
---------	---

## ΓΝΩΣΕΙΣ Η/Υ

- Microsoft Office
- Πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης Pro Engineer
- Πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης Inventor
- Πρόγραμμα σχεδίαση CorelDRAW
- Πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης ArtCAM
- Γλώσσα προγραμματισμού C
- Γλώσσα προγραμματισμού MATLAB

## ΣΕΜΙΝΑΡΙΑ

02/2014 – 05/2014

Στο πλαίσιο του Erasmus+ πραγματοποιήθηκε παρακολούθηση μαθήματος σεμιναριακού τύπου CAD1 και CAD2 πάνω στο πρόγραμμα τρισδιάστατης σχεδίασης σε Η/Υ Inventor, τμήμα Mechanical Engineering του Czech Technical University in Prague (διάρκεια 30 ώρες).

## PROJECTS

- Εκπόνηση εργασίας με θέμα: «Σχεδίαση τιμητικής πλακέτας», στα πλαίσια του μαθήματος «Κατασκευαστικές τεχνολογίες σε μικροκλίμακα», (βαθμολογία 10)
- Εκπόνηση εργασίας με θέμα: «Ομοίωμα αναπτήρα Zippo», στα πλαίσια του μαθήματος «Μελέτη-Σχεδίαση με χρήση Η/Υ(CAD)», (βαθμολογία 10)
- Στα πλαίσια του μαθήματος «Τεχνολογία μη μεταλλικών υλικών», εκπόνηση 5 εργασιών εφ' όλης της ύλης (βαθμολογία 9,8)
- Στα πλαίσια του μαθήματος «Δομική μηχανική 2- Μηχανική των υλικών», εκπόνηση 9 εβδομαδιαίων εργασιών (βαθμολογία 7,35)

## ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΑ

Καλαθοσφαίριση(basket), ποδηλασία, κολύμβηση, pilates, θέατρο

05/10/2018