

Μεταπτυχιακή εργασία

Σχεδιασμός, διασύνδεση και λειτουργία ηλεκτρονικών διατάξεων έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Αράπης Εμμανουήλ - Τσαμπίκος
Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε.

Ηράκλειο 2018



Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Κρήτης

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα

Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής

Επιβλέπων Καθηγητής: Καθ., Δρ. Βιδάκης Νεκτάριος

Masters' Thesis on

**Design, interconnection and operation of
electronics' system of Smart Percussion
Carving Tool**

Arapis Emmanouil - Tsampikos
Electrical Engineer

Heraklion 2018



Technological Educational Institute of Crete

Graduate Program

Advanced Production, Automation and Robotic Systems

Supervisor: Professor, Dr. Vidakis Nectarios



ΤΕΙ Κρήτης

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βιδάκης Νεκτάριος
Καθηγητής Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή:

.....
Δρ. Βιδάκης Νεκτάριος
Καθηγητής
Τ.Ε.Ι. Κρήτης

.....
Δρ. Πετούσης Μάρκος
Επίκουρος Καθηγητής
Τ.Ε.Ι. Κρήτης

.....
Δρ. Σφακιωτάκης Μιχαήλ
Αναπληρωτής Καθηγητής
Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Ημερομηνία
..... / / 2018



ΤΕΙ Κρήτης



Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω το μέντορά μου και επιβλέποντα της μεταπτυχιακής εργασίας, καθηγητή του τμήματος Μηχανολογίας του Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης, Δρ. Βιδάκη Νεκτάριο, ο οποίος με τις εμπειρίες, γνώσεις, αντιλήψεις, ιδέες και υποδείξεις του, καθοδήγησε με καταλυτικό ρόλο όλη την πορεία της παρούσας μελέτης. Τον ευχαριστώ επίσης για τις πολύτιμες γνώσεις και εμπειρίες που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια των μεταπτυχιακών σπουδών μου. Ακόμη, θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για την υποστήριξη και εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου, γιατί χωρίς τη δική του συμβολή δεν θα ήταν εφικτή η ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ευχαριστώ τον Δρ. Πετούση Μάρκο, Μηχανολόγο Μηχανικό, καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης για τις γνώσεις που μου μετέδωσε, αλλά και για τη βοήθειά του και τις υποδείξεις του όσο αναφορά τη χρήση του εργαστηριακού εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια αυτής της μελέτης.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω τον σπουδαστή του τμήματος Μηχανολογίας του Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης, κ. Κόντε Γεώργιο για τη πολύτιμη βοήθεια που προσέφερε στο κατασκευαστικό κομμάτι αυτής της εργασίας καθώς και τον σπουδαστή του τμήματος Μηχανολογίας Μουντάκη Νικόλαο για τη βοήθεια του στο κομμάτι του μηχανολογικού σχεδιασμού. Ένα μεγάλο ευχαριστώ στη συνάδελφο και φίλη Μανιάδη Αθηνά Μηχανολόγο Μηχανικό Τ.Ε. - Msc, για την εμπιστοσύνη της και τη βοήθειά της καθώς και για την άψογη συνεργασία της κατά τη διάρκεια της εν λόγω εργασίας.

Ευχαριστώ θερμά όλους αυτούς τους ανθρώπους για την εμπιστοσύνη που έδειξαν στο πρόσωπό μου και για το χρόνο τους που μου αφιέρωσαν. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους καθηγητές του Διατμηματικού Μεταπτυχιακού προγράμματος (ΔΠΜΣ) «Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής» του Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης, για τις πολύτιμες εμπειρίες και γνώσεις που μου πρόσφεραν.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και κυρίως τη Καλλιόπη Παπαγιαννάκη, τη Σεβαστή Αράπη και τον Ιωάννη Δριχούτη για την στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	6
Περιεχόμενα εικόνων.....	9
Περιεχόμενα εικόνων σύνοψης.....	9
Summary Figures.....	9
Περιεχόμενα εικόνων κειμένου.....	9
Επιτελική Σύνοψη.....	13
Executive Summary.....	18
1. Εισαγωγή.....	23
Μέρος Α΄.....	26
2. Εξέλιξη των εργαλείων μέσα από τα στάδια της γλυπτικής διαδικασίας.....	27
2.1 Επιλογή λίθου λάξευσης.....	28
2.2 Κατεργασία εκχόνδρισης.....	29
2.2.1 Κατεργασία εκχόνδρισης με παραδοσιακά εργαλεία.....	29
2.2.2 Κατεργασία εκχόνδρισης με σύγχρονα εργαλεία.....	30
2.3 Διαδικασία του εξευγενισμού του γλυπτού.....	31
2.3.1 Διαδικασία του εξευγενισμού με παραδοσιακά εργαλεία.....	32
2.3.2 Διαδικασία του εξευγενισμού με σύγχρονα εργαλεία.....	33
2.4 Κατεργασία λείανσης.....	33
2.4.1 Κατεργασία λείανσης με παραδοσιακά εργαλεία.....	34
2.4.2 Κατεργασία λείανσης με σύγχρονα εργαλεία.....	34
2.5 Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών.....	35
2.5.1 Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών με τη μέθοδο σημείου.....	35
2.5.2 Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών με συστήματα αριθμητικού ελέγχου.....	37
3. Εργαλεία γλυπτικής.....	40
3.1 Παραδοσιακά εργαλεία χειρός.....	40
3.1.1 Αξίνες.....	40
3.1.2 Πριόνι.....	40
3.1.3 Αξίνα του γλύπτη ‘Sculptor’s pick’.....	41
3.1.4 Μεταλλικές σφήνες.....	41
3.1.5 Σφυριά χειρός.....	42
3.1.6 Σμίλη σημείου.....	43
3.1.7 Σμίλη οδοντωτή.....	44
3.1.8 Σμίλη επίπεδη.....	45
3.1.9 Σμίλη κυρτή τύπου roundel.....	46
3.1.10 Σμίλη στενής αυλάκωσης.....	46
3.1.11 Εργαλεία χειρός για σκληρότερους λίθους.....	47
3.1.12 Φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός.....	48
3.1.13 Λίμες και λειαντικά εργαλεία.....	49
3.2 Ηλεκτρικά εργαλεία.....	50
3.2.1 Ηλεκτρικά τρυπάνια χειρός.....	50
3.2.1.1 Κρουστικά.....	50
3.2.1.2 Δράπανα.....	51
3.2.2 Ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί.....	52
3.2.2.1 Εναλλάξιμοι δίσκοι κοπής.....	54
3.2.2.2 Εναλλάξιμοι δίσκοι λείανσης.....	55
3.2.3 Ειδικού τύπου λειαντικά εξαρτήματα.....	57
3.2.4 Ηλεκτρικό περιστροφικό εργαλείο ακριβείας Dremel.....	58
3.3 Πνευματικά εργαλεία.....	58
3.3.1 Πνευματικά τρυπάνια χειρός.....	58
3.3.2 Πνευματικοί περιστροφικοί τροχοί.....	59
3.3.3 Πνευματικά σφυριά.....	60
3.3.4 Ειδικού τύπου εργαλεία.....	61
3.4 Όργανα μέτρησης στη γλυπτική.....	61
3.4.1 Μετρική δαγκάνα γλυπτικής.....	62
3.4.2 Όργανο μέτρησης γωνιών ενενήντα μοιρών.....	62
3.4.3 Μετρική κλίμακα.....	63
3.4.4 Όργανο μέτρησης σημείου.....	63



4.	Στάθμη γνώσεων έξυπνων εργαλείων.....	65
5.	Τα κυριότερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη και οι φυσικές ιδιότητές τους.....	67
5.1	Πυριγενή πετρώματα	67
5.1.1	Γρανίτης.....	68
5.2	Ϊζηματογενή πετρώματα.....	68
5.2.1	Ψαμμίτης.....	69
5.2.2	Ασβεστόλιθος	70
5.3	Μεταμορφωσιγενή πετρώματα.....	70
5.3.1	Μάρμαρο.....	71
5.3.2	Σαπωνόλιθος.....	72
5.3.3	Αλάβαστρο.....	73
Μέρος Β΄	74
6.	Προδιαγραφές έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης	75
6.1	Εργονομία	75
6.2	Προβλεπόμενα φορτία.....	75
6.3	Ηλεκτρονικές διατάξεις και εξαγόμενα μεγέθη	76
6.4	Αυτονομία.....	77
7.	Στάδια εξέλιξης μηχανολογικού σχεδιασμού του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης.....	79
7.1	Σχεδίαση και κατασκευή του αρχικού έξυπνου εργαλείου	81
7.2	Σχεδίαση και κατασκευή της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου	82
7.2.1	Σχεδίαση και κατασκευή εξωτερικών τμημάτων της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου	82
7.2.2	Σχεδίαση και κατασκευή εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	83
7.3	Σχεδίαση και κατασκευή της προ τυποποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	83
7.3.1	Σχεδίαση και κατασκευή εξωτερικών τμημάτων της προ τυποποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	84
7.3.2	Σχεδίαση και κατασκευή εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της προ τυποποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	86
7.4	Σχεδίαση και κατασκευή της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	86
7.4.1	Σχεδίαση και κατασκευή εξωτερικών τμημάτων της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	87
7.4.2	Σχεδίαση και κατασκευή εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.....	89
8.	Ηλεκτρονικές διατάξεις που ενσωματώθηκαν στην πρώιμη έκδοση του έξυπνου εργαλείου	91
8.1	Κεντρική μονάδα επεξεργασίας με 8bit μικροελεγκτή	91
8.2	Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU)	93
8.3	Μονάδα για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD.....	94
8.4	Αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας	94
8.5	Ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα (Strain gauges).....	95
8.6	Σχεδιασμός πλακέτας ενίσχυσης σημάτων	96
8.7	Σχεδιασμός πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας	99
8.8	Σχεδιασμός πλακέτας διασύνδεσης τύπου micro USB	100
8.9	Συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης ηλεκτρονικών.....	100
8.10	Προβλήματα έκδοσης	102
9.	Ηλεκτρονικές διατάξεις που ενσωματώθηκαν στην προ τυποποιημένη και στη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης	104
9.1	Μονάδα κεντρικής επεξεργασίας με 32bit μικροελεγκτή.....	105
9.2	Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU)	106
9.3	Μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth	108
9.4	Ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα (Strain gauges).....	108
9.5	Μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell.....	109
9.6	Σχεδιασμός πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του εργαλείου μέσω Modbus πρωτόκολλο	110
9.7	Σχεδιασμός πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή	112
9.8	Αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας.....	113
9.9	Πλακέτα διασύνδεσης και φόρτισης τύπου micro USB.....	113
9.10	Σχεδιασμός πλακέτας για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD	114
9.11	Μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης της μπαταρίας	114
9.12	Μπαταρία τεχνολογίας λιθίου ιόντων πολυμερούς Li-Po.....	115
9.13	Σχεδιασμός πλακετών κόμβου τάσεων και γείωσης	116
9.14	Συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης ηλεκτρονικών διατάξεων	116
10.	Αρχιτεκτονική λειτουργίας ηλεκτρονικών διατάξεων έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης	119
10.1	Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού πρώιμου έξυπνου εργαλείου.....	119



10.2	Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού προ τυποποιημένου και βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου	124
11.	Ανάπτυξη πρότυπου λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού του έξυπνου εργαλείου και καταγραφής των συλλεγόμενων δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο	135
11.1	Ανάλυση διαδικασίας μετατροπής διανύσματος τετραδόνιου (quaternion) σε γωνίες Euler	136
11.2	Περιγραφή σειράς αποστολής συλλεγόμενων μεγεθών έξυπνου εργαλείου	137
11.3	Αρχιτεκτονική λειτουργίας λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης και καταγραφής	138
12.	Διαδικασίες βαθμονόμησης αισθητήρων βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου	142
12.1	Διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας ενίσχυσης και μέτρησης (DCell)	142
12.2	Διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης (IMU)	144
13.	Έλεγχος και βελτιστοποίηση	146
14.	Κοστολόγηση ηλεκτρονικών διατάξεων έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης	147
	Μέρος Γ	149
15.	Σχεδιασμός και περάτωση πειραματικών διαδικασιών με σκοπό την επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης	150
15.1	Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-300 Newton	151
15.2	Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-300-0 Newton	152
15.3	Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-800-0 Newton	153
15.4	Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-600-0 Newton	154
15.5	Πειράματα κρούσης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-39,7-0 Newton	155
16.	Σχεδιασμός και περάτωση πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης σε λίθινα δοκίμια	157
16.1	Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο ασβεστόλιθου	158
16.2	Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο μαρμάρου Νάζου	159
16.3	Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο μαρμάρου Νέστου	160
16.4	Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο μαρμάρου Μαρμαρά	161
16.5	Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο γρανίτη	162
17.	Αξιοποίηση αποτελεσμάτων	164
18.	Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη	165
	Βιβλιογραφικές πηγές	167
	Άρθρα	167
	Βιβλία και διδακτικά συγγράμματα	167
	Ιστοσελίδες	167
	Παράρτημα-Α: Σχηματικά διαγράμματα	169
A.1.	Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρονικών διατάξεων για το πρώτο έξυπνο εργαλείο	169
A.1.1.	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας ενίσχυσης σημάτων	170
A.1.2.	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας	175
A.1.3.	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας διασύνδεσης micro USB	180
A.2.	Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρονικών διατάξεων για το προ τυποποιημένο και βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο	183
A.2.1.	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με την μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου	184
A.2.2.	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή	189
A.2.3.	Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης τύπου micro SD	192
	Παράρτημα-Β: Στιγμιότυπα της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου	197
	Πληροφορίες εγγράφου	203



Περιεχόμενα εικόνων

Περιεχόμενα εικόνων σύνοψης

Εικόνα σύνοψης 1: Τα στάδια σχεδιασμού του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, από την αρχική σχεδίαση του (1) έως και την τελική έκδοση (4), συμπεριλαμβανομένων και των δύο ενδιάμεσων σχεδιασμών (2) και (3).	13
Εικόνα σύνοψης 2: Το πρωτότυπο βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης σε διάφορα στάδια συναρμολόγησης. Από το στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης μορφής του, με εμφανή από τη μία όψη τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (1), ενώ από την άλλη όψη διακρίνεται η μονάδα αδρανειακής μέτρησης, η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας και η μπαταρία (2), τοποθετημένες στο πλαστικό τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων. Επίσης, παρουσιάζεται η πλήρως συναρμολογημένη διάταξη του εργαλείου (4) και το ενδιάμεσο βήμα της μερικής ανεπτυγμένης μορφής του (3).	15
Εικόνα σύνοψης 3: Παρουσίαση του πρότυπου λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του έξυπνου εργαλείου (1), όπου αριστερά βρίσκεται ο πίνακας ενεργειών και το τρισδιάστατο μοντέλο του εργαλείου και δεξιά τα γραφήματα των συλλεγόμενων μεγεθών. Επίσης, στις (2), (3) και (4) παρουσιάζονται διάφορα στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του προγράμματος. ..	16
Εικόνα σύνοψης 4: Οι διαδικασίες πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή εφέλκυσμού: α) με σενάριο φόρτισης του έξυπνου εργαλείου (1) και το γράφημα με τα αποτελέσματα από τη μετρούμενη δύναμη (2) καθώς και β) το σενάριο φόρτισης δοκιμίου – έξυπνου εργαλείου (3), με τα αποτελέσματα του (4).	17

Summary Figures

Figure 1: The design stages of the smart tool for percussion carving, from the initial design (1) until the optimized version (4), including the two intermediate builds (2) and (3).....	18
Figure 2: The optimized smart tool for percussion carving prototype in various assembly steps. From the step of the fully expanded form, illustrating the front face with the Bluetooth unit and the central processing unit (1), while the buck face illustrates the inertial measurement unit, the central power unit and the battery (2), which has been installed into the electronics module. Also, presented the fully assemble smart tool (4) and the sum expanded form of intermediate step (3).	20
Figure 3: The three-dimensional visualization software for smart tool (1), at the left located the operations panel and the three-dimensional model of the tool, I the other hand at the right are the individual charts of the measurements. Also, at (2), (3) and (4) are highlights during operation.	21
Figure 4: The experimental measurements procedures performed in the tensile/compressing machine: a) by smart tools compression scenario (1) and the results graph with the measured force (2) as well as b) the compression scenario of smart tool-limestone specimen (3) and the results graph (4).	22

Περιεχόμενα εικόνων κειμένου

Εικόνα 1.1: Γλυπτά λαξευμένα σε μάρμαρο, το σύμπλεγμα του Λαοκόωντος και των υιών του (1), η φτερωτή θεά Νίκη(2).	23
Εικόνα 2.1: Τα τέσσερα στάδια της γλυπτικής διαδικασίας, η επιλογή του λίθου κατεργασίας (1), η κατεργασία εκχόνδρισης (2), η διαδικασία εξευγενισμού (3) και λείανσης του (4).....	27
Εικόνα 2.2: Τα λατομεία μαρμάρου της Νάξου (1) και της Τήνου (2).	28
Εικόνα 2.3: Κατεργασία εκχόνδρισης με παραδοσιακά εργαλεία γλυπτικής, σμίλη σημείου σε συνδυασμό με στρογγυλό σφυρί (1) και σμίλη σημείου σε συνδυασμό με τετράγωνο (2).	30
Εικόνα 2.4: Οι διαδικασίες εκχόνδρισης με σύγχρονα εργαλεία, όπως η κοπή περιττών κομματιών με angle grinder (1) και η σμίλευση με συνδυασμό πνευματικού σφυριού – σμίλης σημείου (2).	31
Εικόνα 2.5: Η διαδικασία εξευγενισμού με παραδοσιακά εργαλεία, όπως συνδυασμός οδοντωτής σμίλης - στρογγυλό σφυρί (1) και συνδυασμός επίπεδης σμίλης - στρογγυλό σφυρί (2).	32
Εικόνα 2.6: Η διαδικασία εξευγενισμού με σύγχρονα εργαλεία, και στις δύο περιπτώσεις ο γλύπτης χρησιμοποιεί την οδοντωτή σμίλη σε συνδυασμό με το πνευματικό σφυρί (1), (2).	33
Εικόνα 2.7: Η διαδικασία λείανσης με παραδοσιακά εργαλεία, όπως λίμες γλυπτικής (1) και λειαντικές πέτρες (2).	34
Εικόνα 2.8: Η διαδικασία λείανσης με σύγχρονα εργαλεία, όπως die grinders σε συνδυασμό με ειδικού τύπου λίμες (1) και angle grinders με δίσκους λείανσης (2).	35



Εικόνα 2.9: Η διαδικασία μέτρησης σημείου, με τη μέθοδο three -calliper, από τον γλύπτη.	36
Εικόνα 2.10: Η διαδικασία μέτρησης σημείου, με το μηχανισμό μέτρησης σημείου, κατά τη διάρκεια (1) και αφού έχουν αντιγραφεί αρκετά σημεία (2).	36
Εικόνα 2.11: Η διαδικασία αντιγραφής γλυπτών από συστήματα CNC σε λίθους, όπως κατεργασία εξευγενισμού (1) & (2), διαδικασία λείανσης (3) και κατεργασία εκχόνδρισης (4).	38
Εικόνα 3.1: Ο τρόπος κατεργασίας του λίθου με την αξίνα.	40
Εικόνα 3.2: Τα διάφορων τύπων πριόνια για λίθους, όπως ηλεκτροκίνητα με επιμήκεις λάμες (1) & (3), τα ηλεκτροκίνητα περιστροφικά με δίσκους κοπής (2) και τα επίμηκες χειροκίνητα (4).	40
Εικόνα 3.3: Η τεχνική χρήσης της αξίνας του γλύπτη.....	41
Εικόνα 3.4: Οι διάφοροι τύποι μεταλλικών σφηνών (1), το κυρίως σώμα και τα φτερά τους (2), η τοποθέτηση τους στις σπές του λίθου (3) και η βέλτιστη διάταξή τους στο λίθο (4).	42
Εικόνα 3.5: Οι διάφοροι τύποι μεταλλικών σφυριών (1) και το σφυρί φινιρίσματος bush hammer (2).	43
Εικόνα 3.6: Η σμίλη σημείου σε διάφορες διαστάσεις.	43
Εικόνα 3.7: Η οδοντωτή σμίλη σε διάφορες διαστάσεις.....	44
Εικόνα 3.8: Η επίπεδη σμίλη σε διάφορες διαστάσεις.	45
Εικόνα 3.9: Η κυρτή σμίλη σε διάφορες διαστάσεις.....	46
Εικόνα 3.10: Η σμίλη στενής αυλάκωσης σε δύο μεγέθη.	47
Εικόνα 3.11: Διάφορες διαστάσεις της επίπεδης σμίλης και μια σμίλη σημείου με επικάλυψη καρβιδίου.....	47
Εικόνα 3.12: Το φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός με σχοινί (1) και με ξύλινο πήχη (2).....	48
Εικόνα 3.13: Διαφόρων ειδών λίμες (1) και ο τρόπος κατεργασίας με λίθο λείανσης (2).	49
Εικόνα 3.14: Διαφόρων ειδών κρουστικά τρυπάνια, όπως μόνο κρουστικής μετάδοσης (3), τρυπάνια με πολλαπλές λειτουργίες κρούσης (1) & (2) και με ενσωματωμένη μπαταρία (4).	51
Εικόνα 3.15: Ηλεκτρικά δράπανα χειρός με μόνο περιστροφική λειτουργία (1) & (2).	52
Εικόνα 3.16: Διάφοροι τύποι angle grinders , όπως της μεγάλης κατηγορίας για κοπή - λείανση (1), της μικρής κατηγορίας για κοπή – λείανση (2), άλλος ένας της μικρής κατηγορίας με ενσωματωμένη μπαταρία για κοπή – λείανση (3) και ένας εξειδικευμένος για κατεργασίες στίλβωσης (4).	53
Εικόνα 3.17: Δύο die grinders (1) & (2), για κατεργασίες διαμόρφωσης λεπτομεριών και λείανσης.....	54
Εικόνα 3.18: Διάφοροι τύποι εναλλάξιμων δίσκων κοπής, όπως μεταλλικοί με πλέγμα διαμαντιού (1), (2) και (3) ή τύπου fiberglass με κόκκους κοπής – λείανσης (4).	55
Εικόνα 3.19: Διάφοροι τύποι εναλλάξιμων δίσκων λείανσης, όπως από fiberglass με κόκκους λείανσης (1), άλλοι είναι με προσαρτημένα πτερύγια (2), άλλοι με επιφάνεια Velcro (3) και άλλοι τύπου cup wheel (4).	56
Εικόνα 3.20: Τύποι εναλλάξιμων λειαντικών εξαρτημάτων είναι, οι τύπου λίμες (1), τα λειαντικά με επιφάνεια από διαμάντι (2) και τα λειαντικά με πέτρες λείανσης (3).	57
Εικόνα 3.21: Το ηλεκτρικό περιστροφικό εργαλείο ακριβείας dremel (1) και ο πρόσθετος εύκαμπτος άξονας μετάδοσής του (2).....	58
Εικόνα 3.22: Πνευματικό τρυπάνι με λειτουργία μόνο περιστροφικής κίνησης.....	59
Εικόνα 3.23: Διάφορα είδη πνευματικών περιστροφικών τροχών, όπως τα τύπου angle grinders (1) & (2) και τα τύπου die grinders (3) & (4).....	59
Εικόνα 3.24: Τα μεγέθη του πνευματικού σφυριού τύπου Cuturi (1) και οι διάφορων τύπων σμίλες που δέχεται (2).	60
Εικόνα 3.25: Οι ειδικού τύπου σμίλες (1) και διάφορα μεγέθη της σμίλης πολλών σημείων (2).	61
Εικόνα 3.26: Η μετρική δαγκάνα γλυπτικής, από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη.	62
Εικόνα 3.27: Η χρήση του οργάνου μέτρησης 90° για τη μέτρηση ενός σημείου στο γλυπτό.....	62
Εικόνα 3.28: Η μετρική κλίμακα κατασκευασμένη από ξύλο.	63
Εικόνα 3.29: Το όργανο μέτρησης σημείου με τη ξύλινη βάση του (1) και η τοποθέτησή του (2).	63
Εικόνα 5.1: Ο γρανίτης σε μερικές από τις αποχρώσεις του (1) και η εφαρμογή του (2).	68
Εικόνα 5.2: Ο ψαμμίτης (1) και η χρήση του στη γλυπτική τέχνη (2).	69
Εικόνα 5.3: Ο ασβεστόλιθος (1) και ένα παράδειγμά του στη γλυπτική (2).	70
Εικόνα 5.4: Μερικές από τις αποχρώσεις του μαρμάρου (1) και ένα παράδειγμα εφαρμογής του στη γλυπτική (2).	71
Εικόνα 5.5: Ο σαπωνόλιθος (1) και παράδειγμα χρήσης του στη γλυπτική τέχνη (2).....	72
Εικόνα 5.6: Οι χρωματισμοί του αλάβαστρου (1) και παραδείγματά του στη γλυπτική (2).....	73
Εικόνα 7.1: Το τρισδιάστατο μοντέλο του αρχικού σχεδιασμού του έξυπνου εργαλείου, σε πλήρως συναρμολογημένη μορφή (1), σε τομή του οπίσθιου τμήματος (2), σε συναρμολογημένη μορφή με	



το τμήμα των ηλεκτρονικών διατάξεων σε ανεπτυγμένη μορφή (3) και το τμήμα των ηλεκτρονικών διατάξεων μόνο του σε ανεπτυγμένη μορφή (4).....	81
Εικόνα 7.2: Το πρώιμο πρωτότυπο του σε τρισδιάστατο μοντέλο.....	82
Εικόνα 7.3: Τα τρισδιάστατα μοντέλα των εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων, εμπρόσθιο (1) & οπίσθιο (2), οπίσθιο με τοποθετημένες τις ηλεκτρονικές διατάξεις (3) και η συνολική διάταξη (4).....	83
Εικόνα 7.4: Το τρισδιάστατο μοντέλο (1) και το πραγματικό (2), της προ τυποποιημένης έκδοσης του, σε αναπτυγμένη μορφή.....	84
Εικόνα 7.5: Τα εξωτερικά τμήματα της προ τυποποιημένης έκδοσης, το πίσω τμήμα (1), το εμπρόσθιο τμήμα (2), το κάλυμμα του εμπρόσθιου τμήματος και το οπίσθιο τμήμα κρούσης (3) και το τμήμα της εναλλάξιμης σμίλης (4).....	85
Εικόνα 7.6: Τα τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών της προ τυποποιημένης έκδοσης του, εμπρόσθιο τμήμα (1) και οπίσθιο τμήμα (2).....	86
Εικόνα 7.7: Η βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, το τρισδιάστατο μοντέλο του σε ανεπτυγμένη μορφή (1), σε πλήρως συναρμολογημένη μορφή (2) και το πραγματικό πρωτότυπο του σε ανεπτυγμένη μορφή (3) και σε πλήρως συναρμολογημένη μορφή (4).....	87
Εικόνα 7.8: Τα εξωτερικά τμήματα που απαρτίζουν τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου (1), το πίσω τμήμα (2), το εμπρόσθιο τμήμα (3), τα καπάκια του εμπρόσθιου τμήματος (4), η εναλλάξιμη σμίλη (5) και το οπίσθιο τμήμα κρούσης (6).....	88
Εικόνα 7.9: Τα εσωτερικά τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, σε τρισδιάστατα μοντέλα, εμπρόσθιο (1) και οπίσθιο (2), όπως και τα πραγματικά πρωτότυπά τους, (3) και (4), αντίστοιχα.....	89
Εικόνα 8.1: Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας Arduino Nano, που χρησιμοποιήθηκε στη πρώιμη έκδοση του έξυπνου εργαλείου.....	92
Εικόνα 8.2: Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης MPU6050, του πρώιμου έξυπνου εργαλείου.....	93
Εικόνα 8.3: Η μονάδα εισαγωγής της πρόσθετης αποθηκευτικής μνήμης micro SD.....	94
Εικόνα 8.4: Το αισθητήριο μέτρησης της θερμοκρασίας Maxim-Dallas DS18S20.....	94
Εικόνα 8.5: Το strain gauges πλήρους γέφυρας και η συνδεσμολογία του.....	95
Εικόνα 8.6: Ο IC ενισχυτής σημάτων INA121 (1) και η εσωτερική συνδεσμολογία του.....	96
Εικόνα 8.7: Η συνδεσμολογία του μετατροπέα διπολικού σήματος σε μονοπολικό.....	97
Εικόνα 8.8: Κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα τάσης DC-DC.....	98
Εικόνα 8.9: Η πάνω (1) και κάτω (2) όψη της πλακέτας ενίσχυσης σημάτων.....	99
Εικόνα 8.10: Η όψη (1) και το κυκλωματικό διάγραμμα (2) της πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας.....	99
Εικόνα 8.11: Η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB.....	100
Εικόνα 8.12: Το συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, όπου (1) η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, (2) η μονάδα IMU, (3) η μονάδα micro SD, (4) η μονάδα micro USB, (5) η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, (6) το αισθητήριο θερμοκρασίας, (7) η μονάδα ενίσχυσης σημάτων, (8) το RGB LED και (9) το push button.....	101
Εικόνα 9.1: Η αναπτυξιακή πλατφόρμα Teensy 3.2, στις δύο όψεις της, εμπρόσθια (1) και οπίσθια (2).....	106
Εικόνα 9.2: Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU, BNO055.....	107
Εικόνα 9.3: Η μονάδα Bluetooth, BlueSMiRF.....	108
Εικόνα 9.4: Το strain gauges μισής γέφυρας (1) και η συνδεσμολογία του (2).....	109
Εικόνα 9.5: Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell.....	109
Εικόνα 9.6: Η μονάδα RS485 και η συνδεσμολογία της.....	111
Εικόνα 9.7: Η μονάδα RS232 -RS485 που κατασκευάστηκε.....	112
Εικόνα 9.8: Η συνδεσμολογία των επιμέρους ηλεκτρονικών στοιχείων που απαρτίζουν τη μονάδα RS232 – RS485.....	113
Εικόνα 9.9: Η μονάδα micro SD που κατασκευάστηκε (1) και η συνδεσμολογία της.....	114
Εικόνα 9.10: Η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, PowerBoost500C.....	114
Εικόνα 9.11: Η μπαταρία Tigers 600 mA ιόντων λιθίου πολυμερούς.....	115
Εικόνα 9.12: Η συνδεσμολογία της πλακέτας κόμβων.....	116
Εικόνα 9.13: Το συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων της προ τυποποιημένης και βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, όπου (1) η κεντρική μονάδα επεξεργασίας, (2) η μονάδα DCell, (3) η μονάδα IMU, (4) η μονάδα RS485, (5) η μονάδα Bluetooth, (6) η μονάδα micro SD, (7) η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, (8) η μπαταρία LiPo, (9) η μονάδα micro USB, (10)	



ο διακόπτης ενεργοποίησης - απενεργοποίησης, (11) το push button, (12) το RGB LED και (13) το αισθητήριο θερμοκρασίας.	117
Εικόνα 10.1: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού που κατασκευάστηκε για την πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου.....	120
Εικόνα 10.2: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας StrainGauge, για την επίτευξη μέτρησης των strain gauges.	121
Εικόνα 10.3: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας getTemp, για την επίτευξη λήψης της θερμοκρασίας από το αισθητήριο.....	122
Εικόνα 10.4: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SaveData, για την επίτευξη αποθήκευσης των δεδομένων.	123
Εικόνα 10.5: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού για τη προ τυποποιημένη και βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, μέρος Α'.	125
Εικόνα 10.6: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού για την προ τυποποιημένη και βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, μέρος Β'.	126
Εικόνα 10.7: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας buttonRead, για την επίτευξη επιλογής λειτουργίας.	127
Εικόνα 10.8: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αίτησης της επιθυμητής λειτουργίας που καλείται να ολοκληρώσει η μονάδα DCell.....	128
Εικόνα 10.9: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας MMB, για την επίτευξη του πρωτόκολλου Modbus.	129
Εικόνα 10.10: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας crc, για την επίτευξη του πρωτόκολλου Modbus.	130
Εικόνα 10.11: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SMBM, για την επίτευξη του πρωτοκόλλου Modbus.....	131
Εικόνα 10.12: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας RMBM, για την επίτευξη του πρωτοκόλλου Modbus.	131
Εικόνα 10.13: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SUBSDF, για την επίτευξη της αποστολής των δεδομένων... ..	132
Εικόνα 10.14: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SaveData, για την επίτευξη αποθήκευσης των δεδομένων στη micro SD.....	134
Εικόνα 11.1: Το σχηματικό διάγραμμα των τρόπων διασύνδεσης του έξυπνου εργαλείου, με το λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης.....	135
Εικόνα 11.2: Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης.....	138
Εικόνα 11.3: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του έξυπνου εργαλείου.	140
Εικόνα 11.4: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας εξυπηρέτησης της σειριακής θύρας, Serial port interrupt.	141
Εικόνα 12.1: Το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης της μονάδας DCell με εξωτερικό Η/Υ.....	143
Εικόνα 12.2: Τα βήματα της διαδικασίας βαθμονόμησης της μονάδας IMU.	144
Εικόνα 15.1: Το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης για την πειραματική διάταξη (1) και η πραγματική πειραματική διάταξη (2).	150
Εικόνα 15.2: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δευτέρου (2) πειράματος θλίψης 0-300 N.	151
Εικόνα 15.3: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δευτέρου (2) πειράματος θλίψης 0-300-0 N.	152
Εικόνα 15.4: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δευτέρου (2) πειράματος θλίψης 0-800-0 N.	153
Εικόνα 15.5: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δευτέρου (2) πειράματος θλίψης 0-600-0 N.	154
Εικόνα 15.6: Το σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (1) και τα γραφήματα του πρώτου (2) και δευτέρου (3) πειράματος κρούσης – φόρτισης 0-39.7-0 N.....	155
Εικόνα 16.1: Το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης της πειραματικής διάταξης (1) και δύο από τις πραγματικές πειραματικές διατάξεις για δοκίμιο ασβεστόλιθου (2) και γρανίτη (3).....	157
Εικόνα 16.2: Η πειραματική διάταξη για ασβεστόλιθο Κρήτης (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1 ^ο και 2 ^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.	158
Εικόνα 16.3: Η πειραματική διάταξη για μάρμαρο Νάξου (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1 ^ο και 2 ^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.	159
Εικόνα 16.4: Η πειραματική διάταξη για μάρμαρο Νέστου (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1 ^ο και 2 ^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.	160
Εικόνα 16.5: Η πειραματική διάταξη για μάρμαρο Μαρμαρά (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1 ^ο και 2 ^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.	161
Εικόνα 16.6: Η πειραματική διάταξη για γρανίτη Ιταλίας (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1 ^ο και 2 ^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.....	162



Επιτελική Σύνοψη

Αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η διασύνδεση και η ορθή λειτουργία ηλεκτρονικών διατάξεων και λογισμικού ενός έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης. Το έξυπνο εργαλείο θα πρέπει να είναι σε θέση, να συλλέγει και να καταγράφει δεδομένα από τους αισθητήρες των ηλεκτρονικών διατάξεων, κατά τη διάρκεια κατεργασίας ψαθυρών υλικών, όπως μάρμαρο, ασβεστόλιθο και άλλους φυσικούς λίθους που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη. Έως τώρα, η κατεργασία των φυσικών λίθων, πραγματοποιείται είτε με κρουστικά εργαλεία χειρός είτε με εργαλεία εκχόνδρισης. Τα εργαλεία αυτά δεν ενσωματώνουν ηλεκτρονικές διατάξεις ικανές να μετρήσουν, να εξάγουν και να αποθηκεύσουν δεδομένα από τη διαδικασία κρουστικής λάξευσης. Αφήνοντας, έως και σήμερα, άγνωστες τις τεχνολογικές παραμέτρους που την απαρτίζουν.

Με γνώμονα την εύρεση των τεχνολογικών αυτών παραμέτρων που συντελούν τη διαδικασία κρουστικής λάξευσης, επιλέχθηκαν οι ηλεκτρονικές διατάξεις του έξυπνου εργαλείου. Θεωρήθηκε ότι οι βασικοί παράμετροι που έπρεπε να ταυτοποιηθούν είναι η δύναμη που ασκείται, οι γραμμικές επιταχύνσεις, ο προσανατολισμός και η θερμοκρασία. Επομένως, το έξυπνο εργαλείο θα πρέπει να έχει τα ανάλογα τεχνικά χαρακτηριστικά, ώστε να μετράει τη δύναμη που του ασκείται από το σφυρί του γλύπτη, ή από το πνευματικό σφυρί, καθώς και να μετράει τις γραμμικές επιταχύνσεις που αναπτύσσει το εργαλείο, να αντιλαμβάνεται τον προσανατολισμό που έχει στον χώρο την εκάστοτε στιγμή και να μετράει την εσωτερική θερμοκρασία που έχει αναπτύξει κατά τη λειτουργία του.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι, η πορεία εξέλιξης, που αφορά το μηχανολογικό σχεδιασμό του έξυπνου εργαλείου διακρίνεται σε τέσσερα στάδια (εικόνα σύνοψης 1). Πάραυτα, ο σχεδιασμός των ηλεκτρονικών διατάξεων εξελίχθηκε σε δύο στάδια: ο πρώτος χρησιμοποιήθηκε στα δύο πρώιμα εργαλεία (εικόνας σύνοψης 1, σχήμα 1 & σχήμα 2), ενώ ο δεύτερος στο προ τυποποιημένο (εικόνα σύνοψης 1, σχήμα 3) και στο βελτιστοποιημένο (εικόνα σύνοψης 1, σχήμα 4) έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης.

Τα στάδια εξέλιξης του έξυπνου εργαλείου

Η εξελικτική πορεία από τα αρχικά βήματα έως και το βελτιστοποιημένο εργαλείο



Εικόνα σύνοψης 1: Τα στάδια σχεδιασμού του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, από την αρχική σχεδίαση του (1) έως και την τελική έκδοση (4), συμπεριλαμβανομένων και των δύο ενδιάμεσων σχεδιασμών (2) και (3).



Με βάση τα παραπάνω, στα αρχικά στάδια εξέλιξης του έξυπνου εργαλείου ενσωματώθηκαν ηλεκτρονικές διατάξεις που πληρούν όλες τις προϋποθέσεις, προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέτρηση, αποστολή και καταγραφή των βασικών παραμέτρων που συντελούν τη διαδικασία της κρουστικής λάξευσης. Οι προϋποθέσεις αυτές είναι η δυνατότητα μέτρησης της δύναμης που ασκείται στο έξυπνο εργαλείο, ο υπολογισμός του προσανατολισμού που επιτυγχάνει, η μέτρηση του διανύσματος της επιτάχυνσης και η μέτρησης της θερμοκρασίας. Η πρώτη ηλεκτρονική διάταξη που ενσωματώθηκε στο εργαλείο είναι η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, η οποία αποτελείται από ένα μικροελεγκτή 8-bit αρχιτεκτονικής RISC (reduced instruction set computing), χρονισμένο στα 16 MHz. Ο μικροελεγκτής διαθέτει ενσωματωμένη μονάδα μετατροπής αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (analog to digital converter, ADC), ώστε να επιτυγχάνεται η μέτρηση των αισθητήρων.

Για την καταγραφή της δύναμης που ασκείται στο εργαλείο τοποθετήθηκαν ηλεκτρικά μηχανοσκόπετρα σε διάταξη γέφυρας Wheatstone. Το σήμα στην έξοδο της γέφυρας είναι πάρα πολύ ασθενές και μη ανιχνεύσιμο από τη μονάδα μέτρησης ADC του μικροελεγκτή. Για το λόγο αυτό, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πλακέτα ικανή να ενισχύει τα σήματα στα επιθυμητά επίπεδα. Η μέτρηση της θέσης πραγματοποιείται από τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης (inertial measurement unit, IMU), που ενσωματώθηκε στο έξυπνο εργαλείο, η οποία μετράει τις γωνιακές ταχύτητες και τις γωνιακές επιταχύνσεις.

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκε αισθητήριο θερμοκρασίας ικανό να μετράει, να μετατρέπει και να αποστέλλει τη θερμοκρασία σε βαθμούς κελσίου στο μικροελεγκτή, χωρίς να χρειάζεται διαδικασίες βαθμονόμησης. Επίσης, στο εργαλείο ενσωματώθηκε ηλεκτρονική διάταξη διασύνδεσης αποθηκευτικής μνήμης τύπου micro SD, για την καταγραφή των δεδομένων κατά τη λειτουργία του έξυπνου εργαλείου.

Κατά τις πρώτες δοκιμές του πρώιμου έξυπνου εργαλείου διαπιστώθηκαν αρκετά προβλήματα, όπως ο θόρυβος στο ενισχυμένο σήμα των ηλεκτρικών μηχανοσκόπετρων, τα οποία κατέγραφε ο μικροελεγκτής. Ένα σημαντικό πρόβλημα ήταν ο μεγάλος χρόνος δειγματοληψίας που απαιτούσε ο μικροελεγκτής για να πραγματοποιήσει όλες τις απαραίτητες διεργασίες για τη μέτρηση, λήψη, επεξεργασία, αποθήκευση και αποστολή όλων των δεδομένων. Ακόμα ένα πρόβλημα ήταν η αυτονομία της συσκευής και αυτό έγκειται στο κύκλωμα τροφοδοσίας, το οποίο είχε αρκετά μεγάλες απαιτήσεις κατανάλωσης, με αποτέλεσμα η ενσωματωμένη μπαταρία να μην τις καλύπτει και να χρειάζεται εξωτερική τροφοδοσία για τη λειτουργία του.

Η επίλυση αυτών των προβλημάτων επήλθε από τον επανασχεδιασμό του εργαλείου. Στη νεότερη σχεδίαση του βελτιστοποιημένου πλέον εργαλείου επιλέχθηκαν πιο αξιόπιστες ηλεκτρονικές διατάξεις. Τη προηγούμενη κεντρική μονάδα επεξεργασίας αντικατέστησε μια ταχύτερη μονάδα, η οποία βασίζεται σε ένα επεξεργαστή 32-bit αρχιτεκτονικής ARM (advanced RISC machine), με συχνότητα λειτουργίας στα 72 MHz. Επιλέχθηκε μια βιομηχανοποιημένη μονάδα μέτρησης και μετατροπής του σήματος σε μονάδες δύναμης, η οποία είναι ικανή να μετρήσει αρκετά ασθενή σήματα με ικανοποιητική ακρίβεια, να τα ψηφιοποιήσει και να τα αποστείλει στη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου.

Η εν λόγω μονάδα, διαθέτει επιπρόσθετες λειτουργίες, για μεγαλύτερη ακρίβεια στη μέτρηση. Η μία εξ' αυτών είναι η λειτουργία ψηφιακού φίλτρου του αναλογικού σήματος, διορθώνοντας με τον τρόπο αυτό τυχόν σφάλματα στη μέτρηση. Μια ακόμα λειτουργία είναι η δυνατότητα διασύνδεσης συγκεκριμένου τύπου αισθητήρα θερμοκρασίας, τον οποίο χρησιμοποιεί για τη διόρθωση της μετρούμενης δύναμης, αλλά και για τη μέτρηση της θερμοκρασίας που εν τέλει αποστέλλεται στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας.



Παράλληλα, σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν δύο ηλεκτρονικές διατάξεις: Η πρώτη επιτρέπει την επικοινωνία της μονάδας μέτρησης και μετατροπής (DCell) με τον κεντρικό επεξεργαστή του εργαλείου, μέσω πρωτοκόλλου τύπου Modbus. Ενώ η δεύτερη δεν ενσωματώνεται στο εργαλείο και επιτρέπει την επικοινωνία της μονάδας με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η χρήση της γίνεται μόνο όταν χρειάζεται βαθμονόμηση ή αποσφαλμάτωση.

Μια σημαντική βελτίωση αφορά τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU (inertial measurement unit), όπου στο νέο έξυπνο εργαλείο χρησιμοποιήθηκε μια σαφώς καλύτερη από τη μονάδα της προηγούμενης σχεδίασης. Η νέα αυτή μονάδα παρέχει τη δυνατότητα μέτρησης των γωνιακών ταχυτήτων, των γωνιακών επιταχύνσεων, των γραμμικών επιταχύνσεων, τη μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε κάθε άξονα και τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Επίσης, παρέχει τη δυνατότητα υπολογισμού του προσανατολισμού απ' ευθείας σε γωνίες Euler ή για μεγαλύτερη ακρίβεια σε διάνυσμα τετραδονίου (quaternion).

Επιπροσθέτως, εκτός από ηλεκτρονική διάταξη αποθηκευτικής μνήμης micro SD, στη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, εγκαταστάθηκε και μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth. Η μονάδα Bluetooth προσδίδει ευκολότερη χρήση από τον χειριστή, αφού δεν προϋποθέτει ενσύρματη ζεύξη για τη λειτουργία του.

Το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης

Τα επιμέρους τμήματα και οι ηλεκτρονικές διατάξεις που το απαρτίζουν το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο



Εικόνα σύνοψης 2: Το πρωτότυπο βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης σε διάφορα στάδια συναρμολόγησης. Από το στάδιο της πλήρως ανεπτυγμένης μορφής του, με εμφανή από τη μία όψη τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας και τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (1), ενώ από την άλλη όψη διακρίνεται η μονάδα αδρανειακής μέτρησης, η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας και η μπαταρία (2), τοποθετημένες στο πλαστικό τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων. Επίσης, παρουσιάζεται η πλήρως συναρμολογημένη διάταξη του εργαλείου (4) και το ενδιάμεσο θήμα της μερικός ανεπτυγμένης μορφής του (3).

Από μηχανολογικής απόψεως, το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο (εικόνα σύνοψης 2) σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε, να επιτυγχάνεται η μέγιστη εργονομία και να προσφέρει εύκολη και γρήγορη συναρμολόγηση ή αντικατάσταση σε οποιοδήποτε εξάρτημα του.

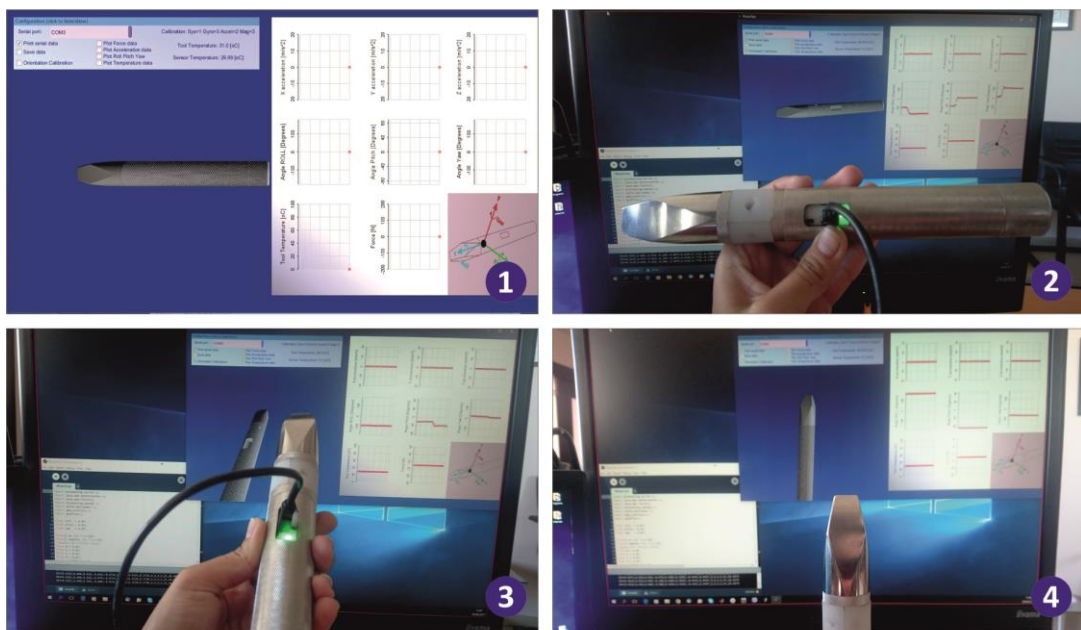


Αποτελείται από συνολικά έξι τμήματα τα οποία παρουσιάζονται στην εικόνα σύνοψης 2 και σχήμα 1, όπου το εργαλείο βρίσκεται στο πλήρως ανεπτυγμένο στάδιο και είναι το τμήμα εναλλάξιμης σμίλης, το εμπρόσθιο τμήμα, τα καπάκια εμπρόσθιου τμήματος, το κύριο εξωτερικό τμήμα, ο οπίσθιος δίσκος κρούσης και το τμήμα συγκράτησης ηλεκτρονικών διατάξεων (όπου στο σχήμα είναι προσαρτημένο στο εμπρόσθιο τμήμα). Ως επί το πλείστον τα τμήματα είναι κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα, με εξαίρεση αυτό της συγκράτησης των ηλεκτρονικών που είναι από πλαστικό τύπου ertacetel.

Ένα ακόμα βήμα εξέλιξης επιτεύχθηκε μέσω της ανάπτυξης ενός πρότυπου λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού του έξυπνου εργαλείου, στο προγραμματιστικό περιβάλλον processing IDE, το οποίο διαθέτει τη δικιά του γλώσσα προγραμματισμού. Το πρότυπο αυτό λογισμικό κατασκευάστηκε με κεντρική ιδέα την εύκολη διαχείριση και εποπτεία της λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου από τον χρήστη. Παρουσιάζει σε τρισδιάστατη απεικόνιση τη θέση στο χώρο που έχει το εργαλείο καθώς και γραφήματα με τα μετρούμενα μεγέθη. Διαθέτει λειτουργίες έναρξης και παύσης της καταγραφής των συλλεγόμενων δεδομένων και η λειτουργία του επιτυγχάνεται σε πραγματικό χρόνο. Η επικοινωνία με το λογισμικό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε συνδέοντας το έξυπνο εργαλείο στο υπολογιστή με καλώδιο τύπου USB, είτε συνδέοντας το ασύρματα μέσω Bluetooth.

Το πρότυπο λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης

Παρουσίαση κατά τη λειτουργία του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης



Εικόνα σύνοψης 3: Παρουσίαση του πρότυπου λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του έξυπνου εργαλείου (1), όπου αριστερά βρίσκεται ο πίνακας ενεργειών και το τρισδιάστατο μοντέλο του εργαλείου και δεξιά τα γραφήματα των συλλεγόμενων μεγεθών. Επίσης, στις (2), (3) και (4) παρουσιάζονται διάφορα στιγμιότυπα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του προγράμματος.

Στο σχήμα 1 της παρακάτω εικόνας παρουσιάζεται το λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης, το οποίο διαθέτει λειτουργία αναπαράστασης του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, σε τρισδιάστατο μοντέλο και επιτυγχάνει την παρακολούθηση της θέσης του στον χώρο σε πραγματικό χρόνο. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που ενσωματώθηκε είναι ο πίνακας ενεργειών, όπου παρέχει τη δυνατότητα αλληλεπίδρασης του χρήστη με τις λειτουργίες του προγράμματος, όπως την έναρξη/παύση της εγγραφής των συλλεγόμενων δεδομένων σε αρχείο και την έναρξη ή παύση της παρουσίασης των



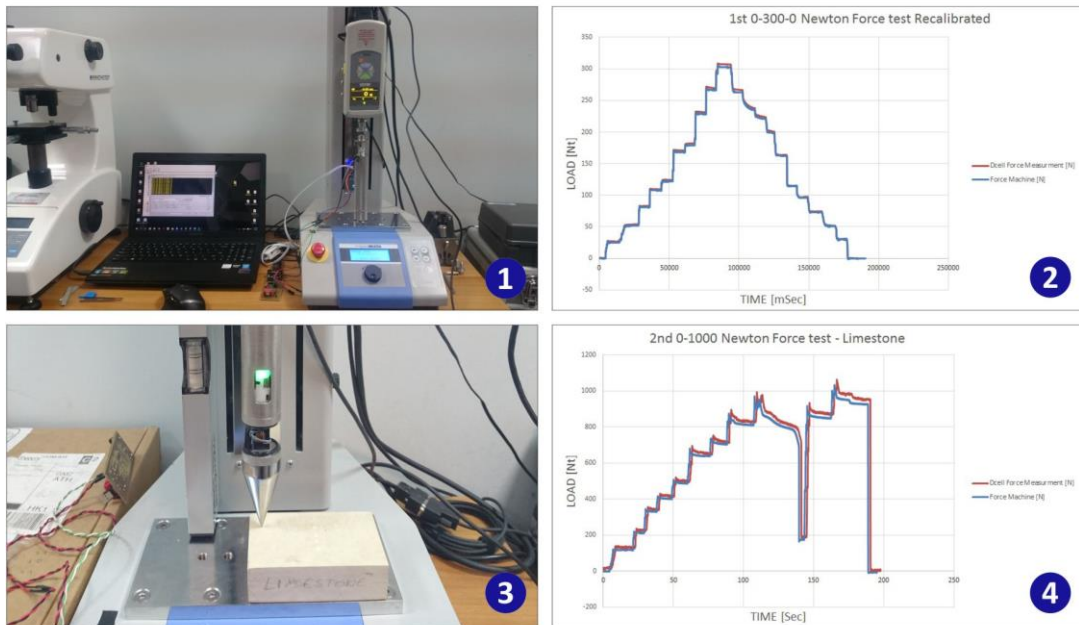
μετρούμενων μεγεθών στα επιμέρους γραφήματα. Τα σχήματα 2, 3 και 4, είναι στιγμιότυπα κατά τη λειτουργία του λογισμικού, από τα οποία μπορεί αν επιβεβαιωθεί η ικανοποιητική παρακολούθηση της θέσης του εργαλείου από το τρισδιάστατο μοντέλο του.

Τέλος, πραγματοποιήθηκαν πειράματα επαλήθευσης της ορθής λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, υποβάλλοντάς το σε σενάρια θλίψης. Για την περάτωση των πειραμάτων αυτών, χρησιμοποιήθηκε μια μηχανή εφελκυσμού και θλίψης, η οποία μπορεί να ασκήσει μηχανικά φορτία, έως και 2500 Newton ή κατά προσέγγιση 250 κιλά. Το κάθε πείραμα προσχεδιάστηκε με συγκεκριμένο σενάριο φόρτισης, όπου καταγράφονταν οι μετρήσεις δύναμης που αντιλαμβάνονταν το έξυπνο εργαλείο και οι μετρήσεις της ασκούμενης δύναμης από το μηχανή. Επίσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές με φυσικούς λίθους, όπου δοκιμάστηκαν σενάρια φόρτισης του υποκείμενου λίθου, κατά τα οποία η παραπάνω μηχανή ασκούσε πίεση στο έξυπνο εργαλείο.

Στα επιμέρους σχήματα της παρακάτω εικόνας, παρουσιάζεται η τοπολογία των μηχανημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την επίτευξη των πειραματικών διαδικασιών, τόσο για τα πειράματα επαλήθευσης της μετρούμενης δύναμης (εικόνα σύνοψης 4, σχήμα 1), όσο και για τα πειράματα φόρτισης σε λίθους, εικόνα σύνοψης 4, σχήμα 3. Ακόμα, στην εικόνα σύνοψης 4 σχήμα 2, παρατίθεται το γράφημα με το αποτέλεσμα για μία από τις διαδικασίες επαλήθευσης, όπου μπορεί να διαπιστωθεί η πολύ καλή παρακολούθηση της μετρούμενης δύναμης που καταγράφει το έξυπνο εργαλείο, εν συγκρίσει με τη δύναμη που ασκείται από το μηχανήμα εφελκυσμού. Επιπλέον, παρουσιάζεται και ένα από τα γράφημα με τις πειραματικές μετρήσεις σε δοκίμιο ασβεστόλιθου (limestone), εικόνα σύνοψης 4 στο σχήμα 4.

Διαδικασίες πειραματικών μετρήσεων

Διαδικασίες και αποτελέσματα πειραμάτων θλίψης του εργαλείου



Εικόνα σύνοψης 4: Οι διαδικασίες πειραματικών μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στη μηχανή εφελκυσμού: α) με σενάριο φόρτισης του έξυπνου εργαλείου (1) και το γράφημα με τα αποτελέσματα από τη μετρούμενη δύναμη (2) καθώς και β) το σενάριο φόρτισης δοκίμιου – έξυπνου εργαλείου (3), με τα αποτελέσματα του (4).



Executive Summary

The objective of this master thesis is the design, construction, interconnection and proper functioning of electronic devices and software in a novel tool used for percussion carving. The smart tool should be able to collect and record data from the sensors of the electronic devices, while processing brittle materials such as marble, limestone and other natural stones used in sculpture art. Until now, the processing of natural stone was performed, either by percussion hand tools or by roughing tools. These tools do not incorporate electronic devices able to measure, extract and store data of the percussion carving process. Leaving unknown, until today, the technological parameters that compose the sculpturing art.

Driven by finding these technological parameters that contribute to percussion carving process, the electronic devices of the smart tool were selected. The key parameters considered were required to be identified are the exerted force, linear acceleration, orientation and temperature. Therefore, the smart tool should be able to measure the exercised force by the sculptor's hammer, or the pneumatic hammer and the linear accelerations developed within by the tool, the orientation at the current time and the internal temperature, developed by the tool, during operation.

At this point, it should be mentioned that the development procedure, related to smart tools mechanical design is distinguished in four unique stages depicted in figure 1.5 (picture 1, 2, 3 and 4, respectively). However, the design of electronics devices was developed into two stages: the first has been used in the two earlier prototypes of the smart tool (figure 1.5, picture 1 & picture 2), while the second design was incorporated to the pre-standard (figure 1.5, picture 3) and the optimized (figure 1.5, picture 4) smart percussion carving tool prototypes.

Smart engraving tool development stages

Development procedure form early stages to optimized smart tool



Figure 1: The design stages of the smart tool for percussion carving, from the initial design (1) until the optimized version (4), including the two intermediate builds (2) and (3).



Based on the above, at the initial stages of the smart tool development, electronic devices that meet all the requirements were integrated. The first electronic device incorporated in the tool is the central processing unit, which consists of a microcontroller 8-bit RISC architecture (reduced instruction set computing), clocked at 16 MHz. This microcontroller has built-in analogue to digital converter unit ADC, to achieve measuring sensors. For the measurement of the applied force to the tool, an electrical strain gauge in Wheatstone bridge configuration was placed.

The signal at the output of the bridge was too weak and undetectable by the ADC unit of the microcontroller, by its self. For this reason, another module capable of amplifying the signals at the desired level was designed and manufactured. The position measurement is performed by the inertial measurement unit IMU, that was incorporated in the smart tool, which measures the angular velocities and angular accelerations. A temperature sensor able to measure, convert and send the temperature in degrees Celsius to the microcontroller, without calibration procedures, was implemented. Also, the smart tool integrates electronic storage device of micro SD memory type, for recording data during operation.

During the initial tests of the early smart tool several problems were identified, such as noise in the amplified signal of the strain gauges output recorded by the microcontroller. A major issue was the large sampling time required by the microcontroller to carry out all the necessary processes for measuring, receiving, processing, storing and sending the data. Another problem was the autonomy of the device and regarding the battery supply circuit, which requires a quite large power consumption that the built-in battery could not provide, as result an external power supply was used.

The solution to those problems came from the redesign of the entire smart tool. In the optimized tool devices with improved reliability were selected. The previous CPU was replaced by a faster device, based on a 32-bit ARM processor architecture (advanced RISC machine), that operates at frequency of 72 MHz. An industrialized module was selected for measuring and converting the signal into force units, which can measure weak signals with sufficient accuracy, digitize and transfer to the central processing unit of the smart tool.

This module has additional functions for more precise measurements. One of them is the digital filter function of the analog signal, correcting this way, high frequency errors in the measurement. Another feature is the ability to interconnect a specific type of temperature sensor, used to correct the measured applied force, but also for measuring the internal temperature that is sent to the microcontroller device.

Furthermore, two electrical modules were designed and constructed: The first allows the communication of the measurement and conversion unit (DCell) with the central processor of the tool via Modbus protocol. While the latter is not incorporated into the tool and allows communication of the unit with an external computer. It is used only when calibration or debugging is required.

A significant improvement was the inertial measurement unit, where a clearly better one was used. This new module enables the measurement of the angular velocities, the angular acceleration, the linear acceleration, the measurement of the magnetic field in each axis and the temperature measurement. It also enables calculation of the orientation directly into Euler angles, or more precisely into quaternion vector.

In addition, besides the micro SD electronic module, in the optimized version of the smart tool a wireless communication Bluetooth type module is installed. The Bluetooth module offers effortless use by the operator, since it doesn't require a wired link to function.



The optimized smart percussion engraving tool

Optimized smart tool individual parts and electronic devices



Figure 2: The optimized smart tool for percussion carving prototype in various assembly steps. From the step of the fully expanded form, illustrating the front face with the Bluetooth unit and the central processing unit (1), while the back face illustrates the inertial measurement unit, the central power unit and the battery (2), which has been installed into the electronics module. Also, presented the fully assembled smart tool (4) and the sum expanded form of intermediate step (3).

From the engineering point of view, the optimized smart tool (figure 1.2) was designed and implemented in a way that achieves maximum ergonomics and to offer easy and quick assembly or replacement of any component. It consists of a total six sections illustrated in the figure 1.2 and picture 1, the interchangeable chisel section, the front section, the front section covers, the main part, the rear impact disc and the electronic module retaining section (where in picture is mount to the front section). Essentially the sections are manufactured by stainless steel, with an exclusion made for the electronic module retaining section, which is made of ertacetal.

Another step forward was achieved through the development of an innovative three-dimensional visualization system of the smart tool orientation software. This software was built to provide easier management and observation during the operation of the smart tool by the user. It presents a three-dimensional representation that the tool achieves in space and illustrates the measured data in individual graphs. It includes features for start and stop data recording operations and the process is accomplished in real time. The communication of the tool with the software can be performed either by connecting it to a computer with a USB cable, or wirelessly via Bluetooth.

The first picture in figure 3 presents the three-dimensional visualization software, which can visualize the smart tool for percussion carving, using a three-dimensional model and accomplishes orientation tracking in real time. Another build-in feature is the operations panel, which enables user's interaction with the software functions, such as the obtain data recording start/stop and enable or disable the illustrated measurements in individual charts. Pictures 2, 3 and 4, there are highlights taken during the operation of smart tool's visualization software, which confirms the excellent orientation tracking by the three-dimensional model.



The standard three-dimensional visualization software

A presentation of the three-dimensional visualization software

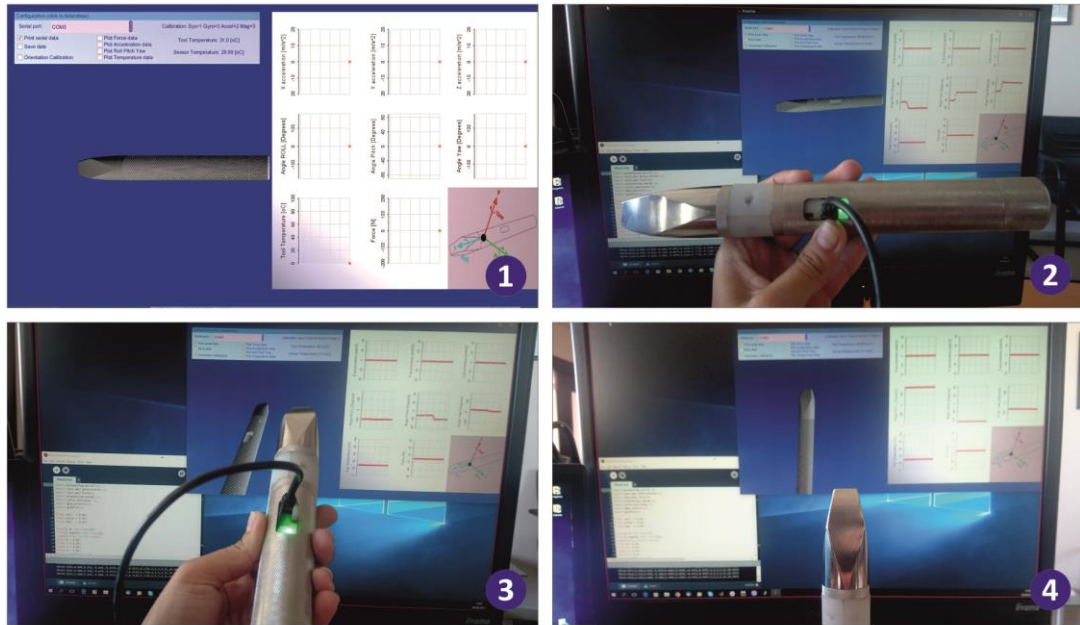


Figure 3: The three-dimensional visualization software for smart tool (1), at the left located the operations panel and the three-dimensional model of the tool, I the other hand at the right are the individual charts of the measurements. Also, at (2), (3) and (4) are highlights during operation.

In conclusion, experiments were performed to verify the measured value with the applied force. For the completion of these tests, a tension and compression machine was used, which can exert mechanical loads up to 2500 Newton or approximately 250 kilos. Each experiment was designed with a specific charging scenario. In those scenarios two measurements were compared, the first was the measurement that the smart tool collected and the other was the force exerted by the machine. Also, the smart tool was tested with natural stones. In these tests, the above machine applied force to a system with the smart tool on top of a stone.

The pictures in the figure below (fig.) presents the measurements machines topology which used for the experimental measurement procedures, both for the measured force verification experiments (figure 1.4, picture 1) and the nature stones compression experiments, figure 1.4, picture 3. Even more, in the figure 1.4 and picture 2, is given the result graph for one of the force verification procedures, where the excellent observation of measured force which records the smart tool can be noted, compared with the exerted force by the tensile machine. In addition, figure 1.4 in picture 4, is shown and one of the graph from the experimental measurements in limestone specimen.



Experimental measurement procedures

Procedures and results from compression experiments of the smart tool

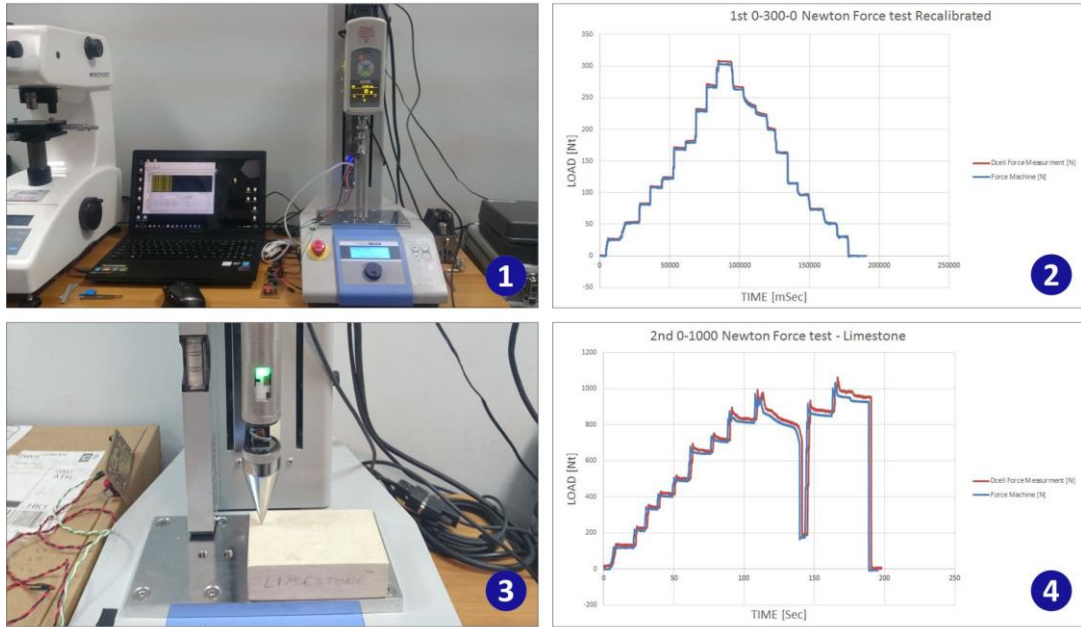


Figure 4: The experimental measurements procedures performed in the tensile/compressing machine: a) by smart tools compression scenario (1) and the results graph with the measured force (2) as well as b) the compression scenario of smart tool-limestone specimen (3) and the results graph (4).



1. Εισαγωγή

Από τους αρχαίους πολιτισμούς μέχρι και τους συγχρόνους, η γλυπτική τέχνη αποτελεί, αφενός, αναπόσπαστο κομμάτι της εξέλιξης των πολιτισμών και αφετέρου ένα μέσο ένδειξης του πνευματικού επιπέδου του εκάστοτε πολιτισμού που τίθεται προς διερεύνηση. Τα γλυπτά βρίσκουν χρήση σε συγκεκριμένες λειτουργίες του κοινωνικού βίου όπως, παραδείγματος χάριν, λατρευτικά αγάλματα που απεικονίζουν θεότητες, προτομές που δηλώνουν το ρόλο και την κοινωνική θέση του εικονιζόμενου και πολλά άλλα. Όπως γίνεται αντιληπτό, αυτά τα έργα τέχνης θα πρέπει να έχουν φιλοτεχνηθεί με τις υψηλότερου επιπέδου, για τη εποχή, τεχνικές καλλιτεχνικής κατεργασίας, οι οποίες να προσδίδουν με κάθε λεπτομέρεια σε αυτά το τρέχον στυλ [B1].

Αρχαιοελληνικά γλυπτά

Γλυπτά σμιλευμένα σε μάρμαρο



Εικόνα 1.1: Γλυπτά λαξευμένα σε μάρμαρο, το σύμπλεγμα του Λαοκόωντος και των υιών του (1), η φτερωτή θεά Νίκη(2).

Δύο εξέχοντα παραδείγματα γλυπτών της ελληνοιστικής εποχής απεικονίζονται στα σχήματα της εικόνας 1.1. Το πρώτο παριστάνει το σύμπλεγμα του Λαοκόωντος και των υιών του (1), σμιλευμένο σε λευκό μάρμαρο. Το γλυπτό αυτό φιλοτεχνήθηκε από τρεις ρόδιους καλλιτέχνες τον Αγήσανδρο, τον Αθηνόδωρο και τον Πολύδωρο. Αυτό το έργο, χρονολογείται μεταξύ του 200 – 150 π.Χ. και το πρωτότυπό του φιλοξενείται στο μουσείο του Βατικανού, στο Βατικανό [11]. Το δεύτερο παρουσιάζει τη φτερωτή θεά Νίκη (2) και είναι λαξευμένο σε λευκό μάρμαρο, από τα λατομεία της Πάρου. Σήμερα η Νίκη της Σαμοθράκης εκτίθεται στο μουσείο του Λούβρου στη Γαλλία και εκτιμάται ότι φιλοτεχνήθηκε μεταξύ του 200 έως 190 π.Χ. [12].

Έως τώρα, οι γλύπτες για τις κατεργασίες εκχόνδρισης ψαθυρών υλικών, όπως μάρμαρο, ασβεστόλιθο, σαπωνόλιθο, γρανίτη κ.α., χρησιμοποιούσαν σμιλεύτηκα εργαλεία χειρός. Η διεργασία επιτυγχάνονταν με συνεχόμενες κρούσεις από ξύλινο ή μεταλλικό σφυρί στο οπίσθιο μέρος της σμίλης και με το εμπρόσθιο άκρο της τοποθετημένο στο σημείο που ήθελαν να αφαιρέσουν υλικό από το λίθο.

Ο όγκος του αποκομμένου υλικού καθώς και το μορφολογικό αποτύπωμα, που άφηνε στον υπό κατεργασία λίθο, καθορίζονταν κυρίως από τη γεωμετρία του εμπρόσθιου άκρου της σμίλης, την κλίση που τη τοποθετούσαν, τη δύναμη που ασκούσαν για την παραγωγή της κρούσης και τη συχνότητα επανάληψης της. Η περάτωση του γλυπτού γινόταν στο επόμενο στάδιο, όπου με λειαντικά εργαλεία (όπως λίμες, ράσες, λειαντικές πέτρες, ιδιικού τύπου σφυριά κ.α.) επιτυγχανόταν η τεχνοτροπία που ήθελαν να του αποδώσουν.

Η εξέλιξη των παραδοσιακών εργαλείων επήλθε μέσω της ανάπτυξης της τεχνολογίας των πνευματικών και ηλεκτρικών μηχανημάτων χειρός, όπου πλέον σήμερα, υπάρχει μια πληθώρα τέτοιου τύπου εργαλείων στη διάθεση του γλύπτη. Τα σύγχρονα αυτά εργαλεία επιτρέπουν στους καλλιτέχνες την εύκολη και ταχύτατη αφαίρεση υλικού από τον υπό επεξεργασία φυσικό λίθο. Είναι ικανά να προσαρτούν διαφόρων τύπου σμίλες όπως καλέμια, βελόνια, οδοντωτές σμίλες, κυρτές σμίλες και πολλά άλλα, επιτυγχάνοντας την επιθυμητή από τον γλύπτη τεχνοτροπία. Η λειτουργία



τους έγκειται στις συνεχόμενες παλινδρομικές κινήσεις που παράγουν, οι οποίες προξενούν την αποκοπή μικρών θραυσμάτων από την επιφάνεια του κατεργαζόμενου υλικού με ομαλά και αλληπάλληλα κρουστικά χτυπήματα.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας δεν έχει αφήσει ανέπαφο και τον τομέα των εργαλείων λείανσης, όπου πέραν των υπαρχόντων κλασικών εργαλείων (λίμες, ράσπες, πέτρες λείανσης), έχουν αναπτυχθεί ηλεκτρικά και πνευματικά περιστροφικά εργαλεία, τα οποία φέρουν δίσκους με επιφάνειες από υαλόχαρτα, μαλακές και σκληρές λειαντικές βούρτσες, στιλβωτικές πέτρες κ.α.. Παρέχοντας, στο γλύπτη τη δυνατότητα επιλογής από μια μεγάλη ποικιλία τεχνοτροπιών φινιρίσματος, με σκοπό το ολοκληρωμένο γλυπτό να αποδίδει με πιστότητα το επιθυμητό αποτέλεσμα που θέλει να εκφράσει.

Βέβαια, ακόμα και με όλη αυτή την εξέλιξη που υπάρχει στον τομέα των κρουστικών εργαλείων (είτε πνευματικών, είτε ηλεκτρικών), η βασική κατεργασία εκχόνδρισης δεν διαφέρει κατά πολύ, ως διαδικασία, από αυτή που προϋπήρχε με τα παραδοσιακά εργαλεία. Αφού ο γλύπτης κατευθύνει τον προσανατολισμό του εργαλείου (είτε το παραδοσιακό σύστημα σφυριού – σμίλης, είτε ηλεκτρικό ή πνευματικό κρουστικό εργαλείο) στο σημείο του κατεργαζόμενου υλικού που θέλει να αφαιρέσει και με εμπειρική μέθοδο επιλέγει τη βέλτιστη δύναμη που θα ασκήσει, ώστε να αποκοπεί μόνο ο επιθυμητός όγκος.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατεργασία φυσικών λίθων για τη παραγωγή γλυπτών απαιτεί εμπειρία, ικανότητα και δεξιότητα από τη μεριά του γλύπτη. Ο έμπειρος και δεξιότηχνης γλύπτης, γνωρίζει το κατάλληλο σημείο και την κλίση που πρέπει να τοποθετήσει τη άκρη της σμίλης, αλλά και το ποσοστό δύναμης, επιτάχυνσης και επανάληψης που θα τη χτυπήσει με το σφυρί, ώστε να αφαιρέσει το κομμάτι που επιθυμεί χωρίς να τραυματίσει το υπόλοιπο γλυπτό.

Για το λόγο αυτό, είναι αρκετά δύσκολη η αναπαραγωγή αντίγραφου από κάποιο πρωτότυπο γλυπτό. Οι αρχαίοι Έλληνες, είχαν αναπτύξει τεχνικές μέτρησης, με τις οποίες ο τεχνητής μπορούσε να διαστασιολογήσει το πρωτότυπο με τη μέθοδο μέτρησης σημείου και να αναπαράγει ένα αρκετά πιστό αντίγραφο [B2]. Αυτές οι μέθοδοι, επιτρέπουν τη μεταφορά ενός καλλιτεχνήματος από ένα ίδιων διαστάσεων μοντέλο (συνήθως το μοντέλο είναι κατασκευασμένο από πηλό) στο κυρίως γλυπτό, όπου οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα από αρκετούς γλύπτες.

Έχουν πραγματοποιηθεί φιλότιμες προσπάθειες για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας παραγωγής γλυπτών με εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου (computer numerical control, CNC). Αλλά οι εργαλειομηχανές αυτού του τύπου περιορίζονται μόνο σε μεθόδους κατεργασίας με αφαίρεση υλικού μέσω περιστροφικής κίνησης του κοπτικού εργαλείου. Η κατεργασία κρουστικής λάξευσης παραμένει ακόμα μια άγνωστη (ως προς τις παραμέτρους που την απαρτίζουν) και εμπειρική μέθοδος.

Πέραν όμως, όλης αυτής της τεχνογνωσίας και ανάπτυξης, των τεχνικών κατεργασίας και των εργαλείων, δεν έχει επιτευχθεί, έως πρότινος, κάποια μελέτη για την εύρεση των παραμέτρων που συντελούν την κρουστική λάξευση. Αφενός, η φύση των ίδιων των πετρωμάτων καθιστά δύσκολη την εξαγωγή δεδομένων από τη διαδικασία λάξευσης τους. Αυτό γιατί, οι λίθοι παρουσιάζουν μια ανομοιόμορφη κατανομή μηχανικών ιδιοτήτων. Αφετέρου δε, δεν έχει αναπτυχθεί κάποιο εργαλείο, το οποίο μπορεί να μετράει και να καταγράφει δεδομένα από την κατεργασία.

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής εργασίας αναπτύχθηκε ένα εργαλείο κρουστικής λάξευσης, το οποίο μπορεί να συλλέγει και να καταγράφει δεδομένα, μέσω αισθητήριων διατάξεων που ενσωματώνει, κατά τη διάρκεια της κρουστικής λάξευσης των λίθων. Ο πρωταρχικός σκοπός της εργασίας είναι ο σχεδιασμός, κατασκευή και διασύνδεση των ηλεκτρονικών διατάξεων αυτού του πρότυπου



εργαλείου κρουστικής λάξευσης, καθώς και η ανάπτυξη της αρχιτεκτονικής λειτουργίας του υλικολογισμικού που ενσωματώθηκε.



Μέρος Α΄

Ερευνητικό πλαίσιο & ανάλυση των εργαλείων που χρησιμοποιούνται στις παραδοσιακές και μοντέρνες διαδικασίες κρουστικής λάξευσης



2. Εξέλιξη των εργαλείων μέσα από τα στάδια της γλυπτικής διαδικασίας

Από την Κλασική περίοδο της Ελληνικής ιστορίας μέχρι και περίπου τις τελευταίες δεκαετίες του δέκατου ένατου αιώνα, τα εργαλεία που χρησιμοποιούσαν οι γλύπτες στα στάδια της γλυπτικής διαδικασίας, παρέμεναν τα ίδια. Η τεχνολογική ανάπτυξη ηλεκτρικών και πνευματικών εργαλείων συνετέλεσε δυναμικά στη εξέλιξη των παραδοσιακών εργαλείων λάξευσης, που χρησιμοποιούνται σε όλα τα στάδια της διαδικασίας παραγωγής γλυπτών. Τα σύγχρονα αυτά εργαλεία επιτυγχάνουν σημαντική βελτίωση στην ευκολία κατεργασίας ψαθυρών υλικών, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του χρόνου αποπεράτωσης ενός γλυπτού.

Με τα παραδοσιακά αυτά εργαλεία η κατεργασία ενός μεγάλης κλίμακας γλυπτού μπορεί να απαιτούσε αρκετά μεγάλο χρόνο παραγωγής, μεγαλύτερο των 12 μηνών. Πλέον με τα σύγχρονα εργαλεία οι γλύπτες επιτυγχάνουν τη παραγωγή γλυπτών μέσα σε μόλις μερικές εβδομάδες. Το εντυπωσιακό είναι ότι ακόμα και σήμερα αρκετοί γλύπτες χρησιμοποιούν αυτά τα κλασικά εργαλεία γλυπτικής, όταν επιθυμούν να αποδώσουν στα υπό-κατεργασία γλυπτά την ιδιαίτερη τεχνοτροπία, που προσφέρουν.

Όπως αναλύεται εκτενέστερα στα επόμενα επιμέρους κεφάλαια η γλυπτική διαδικασία συγκροτείται από τέσσερα βασικά στάδια:

- Επιλογή λίθου λάξευσης
- Κατεργασία εκχόνδρισης
- Διαδικασία εξευγενισμού
- Κατεργασία λείανσης

Τα στάδια της γλυπτικής διαδικασίας

Τα τέσσερα στάδια λάξευσης ενός γλυπτού, από την επιλογή του λίθου έως τη λείανση του



Εικόνα 2.1: Τα τέσσερα στάδια της γλυπτικής διαδικασίας, η επιλογή του λίθου κατεργασίας (1), η κατεργασία εκχόνδρισης (2), η διαδικασία εξευγενισμού (3) και λείανσης του (4).



Τα σχήματα της εικόνας 2.1 παρουσιάζουν τα στάδια κατεργασιών που ακολουθεί ο γλύπτης, με σκοπό την ολοκλήρωση ενός γλυπτού [13]. Το πρώτο στάδιο είναι η επιλογή του λίθου (1), όπου επιλέγεται ο λίθος κατεργασίας. Στην εικόνα διακρίνεται και το πρώτο σκαρίφημα του γλυπτού που έχει σχεδιάσει ο γλύπτης. Στη κατεργασία εκχόνδρισης (2), ο γλύπτης, αφαιρεί τους περιττούς όγκους λίθου και εμφανίζεται σε αυτόν μια πρώτη μορφή του γλυπτού, με βαθιές αυλακώσεις. Η διαδικασία εξευγενισμού (3), έχει ως σκοπό στην εξομάλυνση της επιφάνειας. Το τελευταίο στάδιο είναι η λείανση της επιφάνειας (4), ώστε να επιτευχθεί ένα λείο φινίρισμα της.

2.1 Επιλογή λίθου λάξευσης

Η επιλογή λίθου λάξευσης ίσως είναι η κυριότερη προεργασία που καλείται να ολοκληρώσει ένας γλύπτης. Βασικά κριτήρια που λαμβάνει υπόψιν στην επιλογή του αυτή είναι η σκληρότητα, το χρώμα και το κόστος αγοράς [14] [15]. Αυτή η προεργασία, χρήζει μεγάλης προσοχής, διότι βάσει της επιλογής του θα κριθεί: (α) ο χρόνος επεξεργασίας που θα διαθέσει για να τελειοποιήσει το γλυπτό, (β) οι τεχνικές και τα εργαλεία που θα χρησιμοποιήσει για την επίτευξη των κατεργασιών και τέλος (γ) η αποδιδόμενη έκφρασή του στο γλυπτό.

Εξόρυξη μαρμάρου

Λατομία μαρμάρου στη Νάξο και Τήνο



Εικόνα 2.2: Τα λατομία μαρμάρου της Νάξου (1) και της Τήνου (2).

μαλακότερα πετρώματα ο γλύπτης δεν εφαρμόζει ποτέ το εργαλείο κάθετο στο σημείο που επιθυμεί να αφαιρέσει υλικό, αλλά πάντοτε υπό κλίση. Η κλίση της σμίλης μπορεί να ποικίλει, ανάλογα με το πόσο υλικό επιθυμεί να αφαιρέσει ο γλύπτης.

Ο χρόνος και η αφοσίωση του γλύπτη που θα αφιερώσει σε ένα γλυπτό θα εξαρτηθεί κυρίως από το υλικό κατεργασίας και τις μηχανικές ιδιότητες που διαθέτει. Μηχανικά κατώτεροι λίθοι όπως ο σαπωνόλιθος είναι πιο εύκολο να σμιλευτούν και απαιτούν λιγότερο χρόνο και προσοχή. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται από μαθητευόμενους ή και από άπειρους γλύπτες. Σκληρότερα πετρώματα όπως το μάρμαρο και ο γρανίτης χρήζουν μεγάλης προσοχής κατά την κατεργασία τους και θέλουν περισσότερο χρόνο για να λαξευτούν, για αυτό και τα επιλέγουν συνήθως πιο έμπειροι γλύπτες.

Όπως ειπώθηκε παραπάνω η τεχνική και τα εργαλεία που θα χρησιμοποιήσει ο γλύπτης εξαρτώνται από το λίθο λάξευσης που θα επιλέξει. Για παράδειγμα, σε πετρώματα όπως ο γρανίτης που παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα, ο γλύπτης θα πρέπει να τοποθετεί τη σμίλη σε κλίση 90 μοιρών κατά την κατεργασία εκχόνδρισης. Αυτό γιατί, ένα τόσο σκληρό πέτρωμα πρέπει να θραυσθεί για να αποκοπεί ο επιθυμητός όγκος υλικού. Επίσης, ο γρανίτης απαιτεί ειδικού τύπου επικαλυμμένα εργαλεία κατεργασίας. Στα

Κάτι ακόμα, που θα πρέπει να έχει υπόψιν ο γλύπτης κατά την επιλογή λίθου λάξευσης, είναι η επιθυμητή απόδοση του γλυπτού, η οποία απαρτίζεται από δύο σκέλη. Το πρώτο σκέλος είναι το χρώμα και η καθαρότητα το πετρώματος. Τα πετρώματα με μεγάλη καθαρότητα διαθέτουν πιο ομοιογενές μηχανικές ιδιότητες και παρουσιάζουν καλύτερη συμπεριφορά κατά τη διάρκεια των



κατεργασιών σμίλευσης, με λιγότερες αστοχίες και μικρορωγμές, που θα μπορούσαν να καταστρέψουν το γλυπτό.

Στα σχήματα της εικόνας 2.2 απεικονίζονται στιγμιότυπα από Ελληνικά λατομεία μαρμάρου, της Νάξου (1) και της Τήνου (2). Στη Νάξου εξορύσσεται μάρμαρο σε λευκό χρώμα με αρκετά έντονα νερά σε κίτρινες και κόκκινες αποχρώσεις. Το μάρμαρο της Τήνου διαθέτει ένα ιδιαίτερο και έντονο πράσινο χρώμα, με ευδιάκριτα νερά σε άσπρες και γκριζες αποχρώσεις. Βέβαια και από δύο λατομεία μπορεί να παρατηρηθεί ότι ανάλογα με το κομμάτι λίθου που θα επιλεγεί τα νερά θα είναι διαφορετικά.

Οι λίθοι με περισσότερα νερά και ρωγμές παρουσιάζουν μια ανομοιόμορφη κατανομή μηχανικών ιδιοτήτων, καθιστώντας τους δύσκολους στη μεταχείριση τους. Αυτοί οι λίθοι απαιτούν μεγάλη προσοχή κατά τη κατεργασία τους. Ενώ το δεύτερο είναι το σχήμα που θέλει να απεικονίσει στο λίθο. Η μορφή του γλυπτού, λοιπόν, παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον στην επιλογή λίθου, γιατί πολλές φορές πολύ περίπλοκες μορφές με λεπτότερα μέρη σε θεμελιώδεις σημεία είναι δύσκολες στην κατεργασία τους και μπορεί να παρουσιάσουν ελαττώματα στο μέλλον, όταν σμιλευτούν σε πετρώματα με ανομοιόμορφη κατανομή μηχανικών ιδιοτήτων.

2.2 Κατεργασία εκχόνδρισης

Η κατεργασία εκχόνδρισης είναι το δεύτερο στάδιο της γλυπτικής διαδικασίας [14]. Εδώ ο γλύπτης θα προσπαθήσει να αφαιρέσει τους περιττούς όγκους από το λίθο. Αυτό επιτυγχάνεται προσεγγίζοντας σταδιακά τις διαστάσεις που έχει ορίσει, αποτυπώνοντας στο λίθο το πρώιμο σχήμα του γλυπτού.

Η αφαίρεση των περιττών κομματιών επιτυγχάνεται είτε τεμαχίζοντας το λίθο με ειδικού τύπου πριόνι ή τροχούς κοπής, είτε διαχωρίζοντας τον με σφήνες, είτε κρουστικά με σμίλες (εικόνα 2.3). Η επιλογή της τεχνικής που θα ακολουθηθεί βασίζεται κυρίως στο μέγεθος του όγκου που επιθυμεί να αποκόψει. Συνήθως, στη κατεργασία εκχόνδρισης οι γλύπτες πρώτα χρησιμοποιούν τις δύο πρώτες τεχνικές για να αφαιρέσουν τα μεγαλύτερα κομμάτια και στη συνέχεια κατεργάζονται με τη σμίλη σημείου για να φτάσουν το γλυπτό στο επιθυμητό επίπεδο.

Αυτό το στάδιο της γλυπτικής διαδικασίας, τις περισσότερες φορές οι γλύπτες επιλέγουν να το πραγματοποιήσουν στο χώρο του λατομείου, αφενός για να μειώσουν τον όγκο του λίθου για ευκολότερη μεταφορά, αφετέρου γιατί το πέτρωμα είναι μαλακότερο κατά την εξόρυξη του καθιστώντας το πιο κατεργάσιμο.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2.1, η μορφή που επιθυμεί να αποδώσει ο γλύπτης στο γλυπτού παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον όχι μόνο στην επιλογή του λίθου, αλλά έχει και καθοριστικό ρόλο στη κατεργασία εκχόνδρισης. Ο γλύπτης πριν ξεκινήσει να αφαιρεί τους περιττούς όγκους πρέπει να εποπτεύσει το λίθο και να ανιχνεύσει τη ροή των νερών, ώστε εμπειρικά να ορίσει το βέλτιστο προσανατολισμό που θα πραγματοποιηθούν οι κατεργασίες. Μια λανθασμένη επιλογή προσανατολισμού θα μπορούσε να οδηγήσει σε σφάλματα ή και πιθανή καταστροφή του γλυπτού.

Η λάξευση θα πρέπει να πραγματοποιείται ακολουθώντας τη ροή των νερών του λίθου, διότι με την τεχνική αυτή επιτυγχάνεται ευκολότερα και ασφαλέστερα η διαδικασία. Η κάθετη κατεργασία στις γραμμές των νερών αποφεύγεται γιατί μπορεί να προκαλέσει ακανόνιστα σπασίματα στο γλυπτό.

2.2.1 Κατεργασία εκχόνδρισης με παραδοσιακά εργαλεία

Ο αρχικός λίθος κατεργασίας έχει ένα ακανόνιστο σχήμα, με τις πλευρές του να μην διαμορφώνουν ευθείες επιφάνειες και ο συνολικός όγκος του να είναι αρκετά μεγαλύτερος από αυτόν που θα πρέπει να έχει το γλυπτό. Το πρώτο βήμα που καλείται να πραγματοποιήσει ο γλύπτης είναι να εποπτεύσει το λίθο, ώστε να επιλέξει τον κατάλληλο προσανατολισμό που θα σμιλεύσει το γλυπτό.



Κατεργασία εκχόνδρισης

Κατεργασίες εκχόνδρισης με παραδοσιακά εργαλεία



Εικόνα 2.3: Κατεργασία εκχόνδρισης με παραδοσιακά εργαλεία γλυπτικής, σμίλη σημείου σε συνδυασμό με στρογγυλό σφυρί (1) και σμίλη σημείου σε συνδυασμό με τετράγωνο (2).

Βάσει αυτών, ο γλύπτης θα προσπαθήσει να μικρύνει τον όγκο του αφαιρώντας με το πριόνι, τα περιττά κομμάτια από τις επιφάνειες που επιθυμεί να έχουν μια αρκετά επίπεδη επιφάνεια, μετά την κατεργασία. Συνήθως, είναι η επιφάνεια που ορίζεται ως η κάτω βάση του γλυπτού. Για τις υπόλοιπες σημαδεύει και ανοίγει οπές, ώστε να τοποθετήσει σε αυτές σφήνες. Με τις σφήνες αποκόπτονται τα μεγάλα περιττά κομμάτια του λίθου, αφήνοντας μια σχετικά επίπεδη επιφάνεια, ώστε ο γλύπτης να αρχίσει να το διαμορφώνει.

Στη συνέχεια και αφού έχει διαμορφώσει το αρχικό ακανόνιστο σχήμα του λίθου, σε ένα πιο κοντά στις διαστάσεις του γλυπτού που επιθυμεί να σμιλεύσει (αφαιρώντας τα πολύ μεγάλα περιττά κομμάτια με τις προηγούμενες κατεργασίες), περνάει στην κυρίως κατεργασία εκχόνδρισης. Η κατεργασία εκχόνδρισης πραγματοποιείται με τις σμίλες σημείου. Ο γλύπτης, χρησιμοποιώντας την κατάλληλη σμίλη σημείου επεξεργάζεται το λίθο, δημιουργώντας παράλληλες αυλακώσεις, κατά μήκος της επιφάνειας που εργάζεται. Η κατεργασία εκχόνδρισης ολοκληρώνεται, όταν όλη η επιφάνεια του λίθου έχει δουλευτεί με τη σμίλη σημείου και έχει δημιουργηθεί ένα μεγαλύτερων

διαστάσεων χονδροειδές σχήμα του γλυπτού, όπου με την επόμενη κατεργασία θα έρθει στις τελικές διαστάσεις του.

Τα σχήματα της εικόνα 2.3 παρουσιάζουν στιγμιότυπα από κατεργασίες εκχόνδρισης με παραδοσιακά εργαλεία γλυπτικής. Στο σχήμα 1, ο γλύπτης αφαιρεί υλικό από το λίθο με τη σμίλη σημείου και με στρογγυλό σιδερένιο σφυρί, ακολουθώντας με ιδιαίτερη προσοχή τις γραμμές που έχει χαράξει. Ενώ στο σχήμα 2, ο γλύπτης, κατεργάζεται το λίθο χρησιμοποιώντας τη σμίλη σημείου σε συνδυασμό με πιο βαρύ σφυρί από χάλυβα, λόγω της μεγαλύτερης σκληρότητας του πετρώματος. Επίσης, είναι εμφανής και η περισσότερη δύναμη που ασκεί στη σμίλη κατά τις κρούσεις και κατ' επέκταση στο λίθο.

2.2.2 Κατεργασία εκχόνδρισης με σύγχρονα εργαλεία

Το σύγχρονο εργαλείο που χρησιμοποιείται αρχικά είναι ο ηλεκτρικός περιστροφικός τροχός, με προσαρτημένο τον κατάλληλο δίσκο κοπής, ώστε να επεξεργαστεί την επιφάνεια που ορίστηκε ως βάση, μετατρέποντας το σε ένα ευθύ επίπεδο. Για την αφαίρεση των πολύ μεγάλων όγκων από το λίθο, ο γλύπτης είναι πλέον στη θέση να επιλέξει την τεχνική και εργαλείο που του είναι πιο εύχρηστο.

Σε αυτό το σημείο, μπορεί να εργαστεί με τις παραδοσιακές σφήνες, ανοίγοντας πρώτα οπές με το ηλεκτρικό τρυπάνι κρουστικής κίνησης σε συνδυασμό με το κατάλληλου τύπου και μεγέθους κοπτικό ή μπορεί να χρησιμοποιήσει το ηλεκτρικό τρυπάνι κρουστικής κίνησης σε συνδυασμό με σμίλες ή μπορεί να εργαστεί με το ηλεκτρικό περιστροφικό τροχό σε συνδυασμό με δίσκο κοπής [16]. Αφού επιλέγει, το εργαλείο με το οποίο θα εργαστεί, κατεργάζεται το λίθο ώστε να αφαιρεθούν τα πολύ μεγάλα περιττά κομμάτια και να δημιουργηθούν οι επιθυμητές επιφάνειες.



Κατεργασία εκχόνδρισης

Κατεργασίες εκχόνδρισης με σύγχρονα εργαλεία



Εικόνα 2.4: Οι διαδικασίες εκχόνδρισης με σύγχρονα εργαλεία, όπως η κοπή περιττών κομματιών με angle grinder (1) και η σμίλευση με συνδυασμό πνευματικού σφυριού – σμίλης σημείου (2).

τον κατασκευαστή (ώστε να έχει πάντα τον καλύτερο δυνατό έλεγχο), να τον απενεργοποιεί πάντα μόλις τελειώνει την κατεργασία, να εργάζεται πάντα σε όρθια θέση και άλλα. Οι κανόνες αυτοί έχουν οριστεί, ώστε να αποφευχθούν τυχόν ατυχήματα, λόγω της αυξημένης επικινδυνότητας του εργαλείου. Φυσικά εκτός από τους κανόνες αυτούς, ο γλύπτης θα πρέπει να φέρει και τον κατάλληλο εξοπλισμό προστασίας του, όπως γάντια και γυαλιά για βαριές κατεργασίες κ.α..

Η κύρια κατεργασία εκχόνδρισης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2 της εικόνας 2.4, επιτυγχάνεται από τη σμίλη σημείου σε συνδυασμό με το πνευματικό σφυρί. Σε αυτή, ο γλύπτης κρατά το πνευματικό σφυρί με το ένα χέρι και με το άλλο τη σμίλη, ώστε να μην φύγει από την ειδική υποδοχή του σφυριού. Έτσι και με τα δύο χέρια κατευθύνει το σύστημα σμίλης – πνευματικού σφυριού στο σημείο που επιθυμεί να αφαιρέσει υλικό από το λίθο. Βέβαια, οι κατεργασίες με τα εργαλεία αυτά πάντα πρέπει να ακολουθούν τους κανόνες ασφαλείας που ορίζεται για το κάθε εργαλείο.

2.3 Διαδικασία του εξευγενισμού του γλυπτού

Το επόμενο βήμα της γλυπτικής διαδικασίας είναι το στάδιο εξευγενισμού του γλυπτού. Στο στάδιο αυτό ο γλύπτης θα εξομαλύνει την επιφάνεια του γλυπτού, από το χονδροειδές σχήμα με την τραχεία επιφάνεια που έχει αφήσει η προηγούμενη διαδικασία. Κατά τη διαδικασία αυτή, ο γλύπτης θα προσπαθήσει να τελειοποιήσει τη μορφή, αφήνοντας μόνο κάποιες λεπτομέρειες για το επόμενο στάδιο [14] [16].

Ο γλύπτης σε αυτό το στάδιο κατεργασίας, εργάζεται με τα παραδοσιακά σφυριά μαζί με τις οδοντωτές σμίλες, τις επίπεδες σμίλες, τις κυρτές σμίλες και με κάποιες από τις λίμες. Κυρίως τις λίμες

Μετά τη διαμόρφωση των επιφανειών του λίθου, ο γλύπτης θα περάσει στη καθ' εαυτού διαδικασία εκχόνδρισης με τη σμίλη σημείου σε συνδυασμό με το πνευματικό σφυρί. Η τεχνική κατεργασία που ακολουθεί είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που ακολουθεί με τα παραδοσιακά εργαλεία γλυπτικής, αλλά με την ευκολία που προσφέρει η χρήση του πνευματικού σφυριού. Έτσι, ο γλύπτης θα αρχίσει να διαμορφώνει το λίθο, σχηματίζοντας παράλληλες αυλακώσεις σε όλη την επιφάνεια του. Έως ότου έχει αφαιρεθεί ο επιθυμητός όγκος υλικού και σχηματιστεί μια χονδροειδής μορφή του γλυπτού.

Στο σχήμα 1 της εικόνας 2.4, παρουσιάζεται η αφαίρεση υλικού από το λίθο κατεργασίας με τη χρήση ηλεκτρικού περιστροφικού τροχού με σύστημα μετάδοσης της κίνησης σε γωνία 90°, ή angle grinder. Σε αυτόν το περιστροφικό τροχό έχει προσαρτηθεί δίσκος κοπής για λίθους, προκειμένου να κατεργαστεί με ευκολία τον υπό κατεργασία λίθο.

Κατά τη διάρκεια χρήσης, του περιστροφικού τροχού, ο γλύπτης θα πρέπει να τηρεί κάποιους κανόνες ασφαλείας, όπως να τον κρατά πάντα και με τα δύο χέρια στις προβλεπόμενες θέσεις από



ή ράσες που διαθέτουν πιο τραχιές επιφάνειες και αφαιρούν περισσότερο υλικό από το λίθο. Από τα πιο σύγχρονα εργαλεία χρησιμοποιεί τα πνευματικά σφυριά ή τα κρουστικά τρυπάνια σε συνδυασμό με τις παραπάνω τύπου σμίλες και τους περιστροφικούς τροχούς.

2.3.1 Διαδικασία του εξευγενισμού με παραδοσιακά εργαλεία

Μετά την κατεργασία εκχόνδρισης και εφόσον ο λίθος έχει πάρει μια χονδροειδές μορφή του γλυπτού, με βαθιές παράλληλες αυλακώσεις σε όλη την επιφάνεια του, ο γλύπτης περνάει στη διαδικασία εξευγενισμού. Αρχικά, ο γλύπτης θα κατεργαστεί τις αυλακώσεις που έχει αφήσει η σμίλη σημείου, με την οδοντωτή. Η οδοντωτή σμίλη αφαιρεί τις βαθιές αυλακώσεις και δημιουργεί στη θέση τους, μικρότερες και πιο στενές αυλακώσεις, εξομαλύνοντάς τες. Ο αριθμός των αυλακώσεων εξαρτάται από τις οδοντώσεις που διαθέτει η σμίλη.

Διαδικασία Εξευγενισμού

Διαδικασία Εξευγενισμού με παραδοσιακά εργαλεία



Εικόνα 2.5: Η διαδικασία εξευγενισμού με παραδοσιακά εργαλεία, όπως συνδυασμός οδοντωτής σμίλης - στρογγυλό σφυρί (1) και συνδυασμός επίπεδης σμίλης - στρογγυλό σφυρί (2).

κατεργασία του λίθου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η οδοντωτές σμίλες αφήνουν μικρές παράλληλες αυλακώσεις στην επιφάνεια του λίθου, οι οποίες είναι ευδιάκριτες σε αυτό στο σχήμα.

Το επόμενο βήμα της διαδικασίας εξευγενισμού παρουσιάζεται στο σχήμα 2, εικόνα 2.5, όπου ο γλύπτης εργάζεται με την επίπεδη σμίλη σε συνδυασμό με το παραδοσιακό σφυρί. Σε αυτό γίνεται εμφανής, η πιο ομαλή επιφάνεια που αφήνει στο λίθο, μετά την κατεργασία. Επίσης, από αυτά τα σχήματα, μπορεί να παρατηρηθεί η μικρή γωνία κλίσης που τοποθετεί ο γλύπτης τη σμίλη στην επιφάνεια του λίθου.

Συνήθως, πρώτα χρησιμοποιούνται οι οδοντωτές σμίλες με μεγάλες και μυτερές οδοντώσεις, οι οποίες αφήνουν στο λίθο μικρές αλλά εμφανής αυλακώσεις. Για την καλύτερη κατεργασία του γλυπτού, οι γλύπτες, ξανά κατεργάζονται την επιφάνεια με άλλου τύπου οδοντωτές σμίλες, οι οποίες διαθέτουν μικρότερη και πιο επίπεδη ακμή στην οδόντωση τους. Αυτού του τύπου οδοντωτές σμίλες, αφήνουν μια πιο επίπεδη επιφάνεια, με λιγότερο ευδιάκριτες αυλακώσεις.

Στη συνέχεια, χρησιμοποιούνται οι επίπεδες σμίλες, για την περαιτέρω εξομάλυνση της επιφάνειας του γλυπτού. Η επίπεδη σμίλη θα αφαιρέσει τις πολλές παράλληλες αυλακώσεις που έχει αφήσει η οδοντωτή, αφήνοντας μικρές παράλληλες επίπεδες γραμμές, ανάλογες με το πλάτος της ακμής της. Αφού κατεργαστεί όλο το γλυπτό με την επίπεδη σμίλη, ο γλύπτης έχει ολοκληρώσει τη βασική μορφή του γλυπτού, αφήνοντας μόνο τις κατεργασίες για τα χαρακτηριστικά και το στάδιο λείανσης του γλυπτού.

Το σχήμα 1 της εικόνας 2.5, παρουσιάζει τον τρόπο που ο γλύπτης χρησιμοποιεί την οδοντωτή σμίλη σε συνδυασμό με το παραδοσιακό σφυρί, για τη



2.3.2 Διαδικασία του εξευγενισμού με σύγχρονα εργαλεία

Διαδικασία Εξευγενισμού

Διαδικασία Εξευγενισμού με σύγχρονα εργαλεία



Εικόνα 2.6: Η διαδικασία εξευγενισμού με σύγχρονα εργαλεία, και στις δύο περιπτώσεις ο γλύπτης χρησιμοποιεί την οδοντωτή σμίλη σε συνδυασμό με το πνευματικό σφυρί (1), (2).

Στη διαδικασία εξευγενισμού με σύγχρονα εργαλεία χρησιμοποιείται ή ίδια μέθοδος με αυτήν των παραδοσιακών εργαλείων, με τη διαφοροποίηση ότι ο γλύπτης εργάζεται κυρίως με το πνευματικό σφυρί μαζί με τις ανάλογες σμίλες και όχι με το συνδυασμό σμίλες - παραδοσιακά σφυριά γλυπτικής.

Όπως προηγουμένως, ο γλύπτης θα ξεκινήσει να εξομαλύνει την επιφάνεια με τις βαθιές παράλληλες αυλακώσεις, έως ότου φτάσει το γλυπτό στις επιθυμητές διαστάσεις και με την επιφάνεια να είναι έτοιμη για την επόμενη κατεργασία λείανσης. Για να το επιτύχει αυτό, χρησιμοποιεί το πνευματικό σφυρί, όπου προσαρμόζει τις ακόλουθες σμίλες με σειρά εργασίας: την οδοντωτή σμίλη με μυτερές ακμές, την οδοντωτή σμίλη με τετραγωνισμένες ακμές και τελευταία την επίπεδη σμίλη.

Στα σχήματα της εικόνας 2.6 παρουσιάζονται στιγμιότυπα από τη κατεργασία λείανσης με σύγχρονα εργαλεία. Ο γλύπτης στο σχήμα 1 κατευθύνει το σύστημα οδοντωτής σμίλης – πνευματικό σφυρί, σε όλη την επιφάνεια του λίθου, που επιθυμεί να κατεργαστεί, με προσεκτικές συνεχόμενες κινήσεις. Βέβαια και στο

σχήμα 2, ο γλύπτης κατεργάζεται το λίθο, όπως και προηγουμένως με το σύστημα σμίλης – πνευματικού σφυριού. Επίσης, στο σχήμα 2 είναι ευκρινέστερες οι βαθιές αυλακώσεις που έχει αφήσει η προηγούμενη σμίλη σημείου.

2.4 Κατεργασία λείανσης

Το τελευταίο στάδιο της γλυπτικής διαδικασίας είναι η κατεργασία λείανσης του γλυπτού. Στο στάδιο αυτό, ο γλύπτης αφού έχει κατορθώσει με τις προηγούμενες διαδικασίες να τελειοποιήσει τη γενική μορφή του γλυπτού, περνάει στη κατεργασία των λεπτομερειών και στη λείανση της επιφάνειας του γλυπτού [14] [16].

Οι λεπτομέρειες ενός γλυπτού είναι τα λεπτά χαρακτηριστικά του προσώπου, τα μαλλιά, τα ρούχα, διάφορα αντικείμενα που το στολίζουν (όπως κάποια αντικείμενα που κρατάει, η κοσμήματα που φορούσε) και άλλα πολλά. Τα παραδοσιακά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αυτών των λεπτομερειών είναι οι κυρτές σμίλες τύπου roundel, τα φυγοκεντρικά τρυπάνια χειρός και οι λήμες. Από το πιο σύγχρονα εργαλεία χρησιμοποιούνται τα μικρών διαστάσεων πνευματικά σφυριά με τις σμίλες τύπου roundel η και τις ειδικού τύπου σμίλες, οι μικρών διαστάσεων περιστροφικοί τροχοί (κυρίως οι τροχοί με ομοαξονική περιστροφή του τερματικού εργαλείου ή die grinders) και το περιστροφικό εργαλείο ακριβείας dremel.

Η λείανση και στίλβωση του γλυπτού είναι διεργασίες που πραγματοποιούνται, με σκοπό την εξομάλυνση σε μεγαλύτερο βαθμό της επιφάνειας του. Ένα λείο φινίρισμα του γλυπτού, αναδεικνύει τα χρώματα και την υφή του λίθου, χαρίζοντας του την αίγλη που του αναλογεί. Τα παραδοσιακά



εργαλεία που χρησιμοποιούνται είναι κυρίως οι λίμες, και οι λειαντικοί λίθοι. Ενώ τα σύγχρονα εργαλεία για τη λείανση της επιφάνειας είναι οι περιστροφικοί τροχοί με λειαντικούς δίσκους, το περιστροφικό εργαλείο dremel με τα ειδικού τύπου λειαντικά τερματικά εργαλεία. Βέβαια, η απόδοση της επιθυμητής λείανσης του γλυπτού, μπορεί να είναι μια χρονοβόρα διαδικασία και να απαιτεί αρκετές επαναλήψεις της κατεργασίας αυτής.

Για τη στίλβωση της επιφάνειας οι αρχαίοι Έλληνες γλύπτες χρησιμοποιούσαν ένα μίγμα λιωμένου κεριού, στο οποίο πρόσθεταν ελαιόλαδο [B2]. Το μίγμα αυτό από τη μία προστάτευε το μάρμαρο, από τις καιρικές συνθήκες και από την άλλη ενίσχυε τη λάμψη του. Οι σύγχρονοι γλύπτες χρησιμοποιούν διάφορα στίλβωτικά υλικά, τα συνηθέστερα είναι τα οξειδία του κασσίτερου και του σιδήρου, τα οποία προσδίδουν μια ιδιαίτερη γυαλάδα στην επιφάνεια του λίθου.

2.4.1 Κατεργασία λείανσης με παραδοσιακά εργαλεία

Ο γλύπτης πριν περάσει στο στάδιο λείανσης, πρέπει να κατεργαστεί τα ειδικά χαρακτηριστικά του γλυπτού, όπως μάτια, μαλλιά κ.α., ανάλογα με το θέμα που απεικονίζει. Για τις κατεργασίες αυτές χρησιμοποιεί ένα ελαφρύ σφυρί σε συνδυασμό με τις κυρτές σμίλες και λίμες, στα οποία εργάζεται με ιδιαίτερη προσοχή και λεπτή τεχνική.

Κατεργασία λείανσης

Κατεργασία λείανσης με παραδοσιακά εργαλεία



Εικόνα 2.7: Η διαδικασία λείανσης με παραδοσιακά εργαλεία, όπως λίμες γλυπτικής (1) και λειαντικές πέτρες (2).

λειαντικές πάστες, συνήθως είναι κάποια είδη οξειδίων που χαρίζουν στο γλυπτό μια πάρα πολύ λαμπερή επιφάνεια.

Μόλις τελειώσει τη κατασκευή των χαρακτηριστικών περνάει στη κυρίως λείανση της επιφάνειας του γλυπτού. Στην πρώτη φάση λείανσης χρησιμοποιούνται οι λίμες με τις πιο τραχιές επιφάνειες, οι οποίες αφαιρούν και περισσότερο υλικό από το λίθο, σχήμα 1, εικόνα 2.7. Στις επόμενες φάσεις ο γλύπτης επιλέγει λίμες με όλο και μικρότερης τραχύτητας επιφάνειες, τη φορά, μέχρι η επιφάνεια είναι έτοιμη για το επόμενο στάδιο λείανσης.

Στην επόμενη φάση, ο γλύπτης, κατεργάζεται την επιφάνεια με λειαντικές πέτρες γλυπτικής (εικόνα 2.7, σχήμα 2). Όπως και οι λίμες, οι λειαντικές πέτρες έχουν τραχύτητα και πάντα δουλεύονται με σειρά, από τις πιο τραχιές στις λιγότερο. Έτσι, ο γλύπτης θα αρχίσει να επεξεργάζεται όλη την επιφάνεια του γλυπτού με τις πιο τραχιές πέτρες και σε κάθε επανάληψη θα μειώνει την τραχύτητά της, έως ότου η επιφάνεια του γλυπτού είναι στο επιθυμητό επίπεδο λείανσης και έχει αναδειχθεί η φυσική ομορφιά του λίθου.

Η τελευταία φάση της διαδικασίας αυτής είναι στίλβωση του γλυπτού. Η στίλβωση επιτυγχάνεται περνώντας την όλη την επιφάνεια του γλυπτού με

2.4.2 Κατεργασία λείανσης με σύγχρονα εργαλεία

Η ανάπτυξη των πνευματικών και ηλεκτρικών εργαλείων έχει βοηθήσει κατά πολύ την ευκολία κατεργασιών, όπως τις κατεργασίες των λεπτομερειών ενός γλυπτού καθώς και τις κατεργασίες



Κατεργασία λείανσης

Κατεργασία λείανσης με σύγχρονα εργαλεία



Εικόνα 2.8: Η διαδικασία λείανσης με σύγχρονα εργαλεία, όπως die grinders σε συνδυασμό με ειδικού τύπου λίμες (1) και angle grinders με δίσκους λείανσης (2).

λείανσης του. Πλέον, ο γλύπτης χρησιμοποιεί το εργαλείο ακριβείας dremel ή τους ηλεκτρικούς περιστροφικούς τροχούς die grinders (βλ. Κεφάλαιο 3.2.2), με προσαρμοσμένα τα ειδικού τύπου κοπτικά εργαλεία (εικόνα 2.8, σχήμα 1), ώστε να επιτύχει με ευκολία και ακρίβεια τη κατεργασία των ειδικών χαρακτηριστικών και των ευαίσθητων σημείων του γλυπτού.

Στη συνέχεια, και αφού έχει τελειώσει με τις κατεργασίες των χαρακτηριστικών και των ευαίσθητων περιοχών, περνάει στη λείανση του γλυπτού. Η κατεργασία λείανσης, κυρίως πραγματοποιείται με την άλλη κατηγορία ηλεκτρικών ή πνευματικών περιστροφικών τροχών angle grinders, προσαρτώντας της επιθυμητής τραχύτητας λειαντικό δίσκο. Η πρώτη κατεργασία λείανσης πραγματοποιείται με λειαντικό δίσκο μεγάλης τραχύτητας. Στις επόμενες επαναλήψεις ο γλύπτης θα μειώνει την τραχύτητα του δίσκου, έως ότου το αποτέλεσμα λείανσης είναι ικανοποιητικό, σχήμα 2, εικόνα 2.8.

Το επόμενο στάδιο είναι λείανση με ειδικού τύπου λειαντικές πέτρες, που προσαρτώνται στο εργαλείο dremel ή και σε die grinders. Όπου και πάλι κατεργάζεται όλη την επιφάνεια του γλυπτού,

επαναλαμβάνοντας τη διεργασία, μέχρι να αποδώσει το αποτέλεσμα λείανσης που επιθυμεί και σε κάθε επανάληψη μεταβαίνει σε μικρότερης τραχύτητας λειαντική πέτρα.

2.5 Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών

Οι γλύπτες μπορούν να προσεγγίσουν την παραγωγή ενός γλυπτού, με δύο στρατηγικές σμίλευσης. Η μία μέθοδος αφήνει πιο ελεύθερο το γλύπτη να εργαστεί απ' ευθείας πάνω στο λίθο, χωρίς να προεργαστεί την ιδέα του είτε σε σκίτσο, είτε σε κάποιο αρχικό μοντέλο από εύπλαστο υλικό. Από την άλλη, η δεύτερη στρατηγική απαιτεί από το γλύπτη τη βαθύτερη ωρίμανση της ιδέας του. Ο γλύπτης καλείται πρώτα να σκισάρει την ιδέα του σε χαρτί, έπειτα να κατασκευάσει ένα πρωτότυπο σε πραγματικές διαστάσεις από εύπλαστο υλικό όπως ο πηλός, ο γύψος ή το κερί και στη συνέχεια να σμιλεύσει το λίθο βάση του πρωτότυπου. Ο γλύπτης χρησιμοποιεί ένα όργανο μέτρησης σημείου για να μετρήσει «σημεία κλειδιά» του πρωτότυπου, είτε αυτό είναι ένα μοντέλο από εύπλαστο υλικό, είτε αυτό είναι ένα μαρμάρινο γλυπτό, και να τα μεταφέρει στο γλυπτό που εργάζεται [B5][17][18][19].

2.5.1 Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών με τη μέθοδο σημείου

Μελέτες σε γλυπτά έχουν υποδείξει ότι η αντιγραφή ενός πρωτοτύπου, είτε μοντέλου, είτε μαρμάρινου γλυπτού, έχει αναπτυχθεί από τους αρχαίους χρόνους. Αν και οι τεχνικές αναπαραγωγής γλυπτών ήταν γνωστές από την αρχαϊκή περίοδο στην Ελλάδα, δεν πολύ χρησιμοποιήθηκαν μέχρι τις αρχές του πρώτου αιώνα Π.Χ., όπου εκείνη τη περίοδο αυξήθηκε κατά πολύ η ζήτηση από τους Ρωμαίους [B2].

Ο γλύπτης κατασκευάζει το μοντέλο από κάποιο εύπλαστο υλικό της επιλογής του, στην αρχαιότητα κυρίως ήταν ο πηλός, πάνω σε μια ξύλινη βάση, στην οποία έχει τοποθετήσει τρία καρφιά, όπου αυτά



Μέθοδος με τις τρεις - δαγκάνες

Η μέθοδος μέτρησης σημείου με τις τρεις - δαγκάνες



Εικόνα 2.9: Η διαδικασία μέτρησης σημείου, με τη μέθοδο three-calliper, από τον γλύπτη.

τα χρησιμοποιεί ως σημεία αναφοράς στη μέτρηση. Στη συνέχεια και εφόσον έχει ολοκληρωθεί το μοντέλο του γλυπτού, ο γλύπτης υπολογίζει όποιο σημείο επιθυμεί, χρησιμοποιώντας τρεις διαβήτες γλυπτικής από τα σημεία αναφοράς. Αφού ο γλύπτης μετρήσει το σημείο, το μεταφέρει στον υπό καταργασία λίθο χρησιμοποιώντας τους ίδιους διαβήτες και ακολουθώντας την αρχή του τριγωνισμού. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται μέθοδος με τις τρεις - δαγκάνες (three - calliper method) και πραγματοποιείται για τη μέτρηση ενός σημείου τη φορά [B2]. Ένα στιγμιότυπο από τη διαδικασία αυτής της μεθόδου παρουσιάζεται στην εικόνα 2.9, όπου είναι εμφανή και τα τρία σημεία που επέλεξε ως σημεία αναφοράς για το πρωτότυπο, στα οποία, για μεγαλύτερη ευκολία έχει

τοποθετήσει καρφιά.

Μετά τον 18^ο αιώνα, οι γλύπτες χρησιμοποιούσαν για την αντιγραφή γλυπτού ή μοντέλου, το όργανο μέτρησης σημείου. Το όργανο αυτό είναι ένας μηχανισμός που διαθέτει μία πτυσσόμενη βελόνα, η οποία οδηγείται και σταθεροποιείται στο σημείο μέτρησης από ένα σύστημα συνδέσμων - αρθρώσεων, βλ. κεφάλαιο 3.4.4.

Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών

Διαδικασία αντιγραφής με το όργανο μέτρησης σημείου



Εικόνα 2.10: Η διαδικασία μέτρησης σημείου, με το μηχανισμό μέτρησης σημείου, κατά τη διάρκεια (1) και αφού έχουν αντιγραφεί αρκετά σημεία (2).

Για τη βέλτιστη αντιγραφή ενός πρωτότυπου με το όργανο μέτρησης σημείου, ο γλύπτης πρέπει να ακολουθήσει μία καθοριστική προεργασία. Αρχικά, πρέπει να καθορίσει τρία σημεία αναφοράς στο πρωτότυπο και να υπολογίσει τα αντίστοιχα στον ακατέργαστο λίθο. Συνήθως, τα δύο σημεία επιλέγονται να είναι στο κάτω μέρος της όψης του μοντέλου, παράλληλα στο επίπεδο της βάσης του και σε μία απόσταση μεταξύ τους, η οποία καθορίζεται από τη βάση του οργάνου. Το τρίτο σημείο τοποθετείτε στο επάνω μέρος του. Αν η εργασία δεν πραγματοποιηθεί σωστά, τότε υπάρχει πιθανότητα το τελικό γλυπτό να έχει μια διαφοροποίηση ως προς την κλίση, σε σχέση με το πρωτότυπο.

Στα σημεία αναφοράς που έχουν καθοριστεί τόσο στο πρωτότυπο όσο και στο λίθο, στερεώνονται μεταλλικές βάσεις στήριξης στις οποίες προσαρτάται η βάση του οργάνου, η οποία στα περισσότερα είναι ξύλινη και έχει ένα χαρακτηριστικό σχήμα σταυρού (T - shape). Δουλεύοντας αρχικά στο πρωτότυπο, τοποθετείται η βάση του οργάνου και πάνω σε αυτή το όργανο μέτρησης. Αφού επιλεγθεί το σημείο που επιθυμείται να μετρηθεί από τον γλύπτη, προσαρμόζονται και σταθεροποιούνται οι



αρθρώσεις του οργάνου, έτσι ώστε η βελόνα να είναι κάθετη σε αυτό και να το ακουμπάει ακριβώς. Μόλις η βελόνα προσεγγίσει ακριβώς το σημείο, χρησιμοποιείται ο σφικτήρας τερματισμού που διαθέτει.

Στη συνέχεια, μετακινείται το όργανο μέτρησης με τη βάση του και τοποθετείται στις τρεις βάσεις στήριξης του λίθου προς κατεργασία. Αφού στερεωθεί καλά, ο γλύπτης μετακινεί τη βελόνα η οποία είναι ελεύθερη να κινηθεί στον άξονα συμμετρίας της, έως ότου ακουμπήσει την επιφάνεια του λίθου ή τη σταματήσει ο σφικτήρας τερματισμού. Μόλις η βελόνα έρθει σε επαφή με την επιφάνεια του λίθου, ο γλύπτης σημαδεύει το σημείο και παρατηρεί τη θέση του τερματικού σφικτήρα, ώστε να κάνει μία πρώτη εκτίμηση για το πόσο υλικό πρέπει να αφαιρεθεί.

Μετά τη εκτίμηση για το βάθος που πρέπει να επιτύχει στο σημείο που σημαδεύτηκε από τη βελόνα, ο γλύπτης, την απομακρύνει από την επιφάνεια του λίθου, με προσοχή. Όταν η βελόνα απομακρυνθεί σε μια ικανοποιητική απόσταση, ο γλύπτης θα αρχίσει να αφαιρεί υλικό από το σημείο που σημαδεύτηκε. Αφού αφαιρέσει όσο υλικό υπολόγισε θα επανατοποθετήσει τη βελόνα, ώστε να επαληθεύσει αν χρειάζεται να αφαιρεθεί και άλλο υλικό. Αυτό επαναλαμβάνεται έως ότου η βελόνα έρθει σε επαφή με την επιφάνεια και ο τερματικός σφικτήρας είναι στη τερματική θέση. Τότε έχει αντιγραφεί το σημείο με απόλυτη ακρίβεια από το πρωτότυπο στον υπό κατεργασία λίθο.

Η διαδικασία αυτή αφορά τη μέτρηση και μεταφορά ενός μόνου σημείου από το πρωτότυπο στο λίθο. Ο γλύπτης θα πρέπει να την επαναλάβει μέχρι να επιτύχει τη μεταφορά ενός ικανοποιητικού αριθμού σημείων, ώστε να έχει αντιγραφεί πλήρως το πρωτότυπο.

Τα σχήματα 1 και 2 της εικόνας 2.10, παρουσιάζουν στιγμιότυπα από τη μέθοδο αντιγραφής με το όργανο μέτρησης σημείου [110]. Το σχήμα 1 είναι στιγμιότυπο κατά τη διάρκεια της αντιγραφής μιας προτομής ανδρός από το γύψινο πρωτότυπο στο λίθο. Το σχήμα 2 απεικονίζει το ίδιο γλυπτό με το γύψινο πρωτότυπο του, αφού ο γλύπτης όμως έχει τελειώσει με την αντιγραφή της μίας όψης του. Από τα δύο αυτά σχήματα, μπορούν να διακριθούν τα σημεία στο γύψινο πρωτότυπο, που επέλεξε να αντιγράψει ο γλύπτης. Τα σημεία αυτά έχουν σημειωθεί με κόκκινο χρώμα.

Εδώ αξίζει να επισημανθεί ότι, και οι δύο τεχνικές που περιγράφηκαν, έχουν ως βάση την ίδια αρχή λειτουργίας. Επιτυγχάνουν τη μέτρηση σημείου σε τρεις διαστάσεις από σημεία αναφοράς, μέσω τριγωνισμού του. Και οι δύο αυτές τεχνικές μπορούν να επιτύχουν μεγάλη ακρίβεια στην αντιγραφή ενός γλυπτού και αυτό εξαρτάται από το πλήθος των σημείων που θα μετρηθούν. Όσο περισσότερα σημεία μεταφερθούν στο λίθο τόσο πιο ακριβές θα είναι το αντίγραφο. Αξιοθαύμαστο βέβαια είναι το γεγονός ότι και οι δύο χρησιμοποιούνται ακόμα και σήμερα από αρκετούς γλύπτες.

Η ποιότητα αντιγραφής του γλυπτού εξαρτάται κυρίως από τη δεξιότητα του γλύπτη, για το λόγο ότι και οι δύο τεχνικές αντιγραφής, θα αντιγράψουν την ακριβής βασική μορφή του γλυπτού.

2.5.2 Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών με συστήματα αριθμητικού ελέγχου

Με όλη αυτή την ανάπτυξη της τεχνολογίας, υπάρχουν πλέον μηχανήματα και συνθέτες τεχνικές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αντιγραφή γλυπτών, ή ακόμα και για τη βιομηχανική παραγωγή τους. Μεγάλο πλεονέκτημα τους είναι η σχετικά γρήγορη παραγωγή ενός αντίγραφου που επιτυγχάνουν και η μεγάλη ακρίβεια αντιγραφής. Μια εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου (ή αλλιώς CNC, Computer Numerically Controlled) εξασφαλίζει ακρίβεια επαναληψιμότητας κάτι μικρομέτρων, στην κατεργασία [19]. Από μία άποψη, αυτά τα σύγχρονα μηχανήματα και τεχνικές, θα μπορούσαν να διαφυλάξουν την πολιτιστική μας κληρονομιά, εφόσον με αυτά είναι εφικτή η ακριβής αντιγραφή ενός σημαντικού μνημείου, ώστε να φυλαχτεί σε ασφαλέστερο περιβάλλον.



Η διαδικασία αντιγραφής γλυπτών με συστήματα αριθμητικού ελέγχου, ακολουθεί τη μέθοδο αντίστροφης μηχανικής, η οποία βασίζεται στην αναπαραγωγή ενός αντικειμένου, απ' ευθείας από το πρωτότυπο του. Όπως γίνεται αντιληπτό, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του φυσικού πρωτότυπου πρέπει να περιγραφούν σε ψηφιακή μορφή, ώστε να γίνει εφικτή η παραγωγή του από τις εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου. Το πρόβλημα αυτό επιλύεται από τη μέθοδο της αντίστροφης μηχανικής, η οποία απαρτίζεται από τέσσερα βήματα [B3][B4].

Στο πρώτο βήμα είναι η τρισδιάστατη σάρωση του πρωτότυπου, ώστε να ληφθούν όλα τα απαραίτητα γεωμετρικά χαρακτηριστικά που το απαρτίζουν. Η λήψη και καταγραφή των δεδομένων αυτών, πραγματοποιείται μέσω ενός μηχανήματος σάρωσης. Το μηχάνημα αυτό μετράει και καταγραφεί ένα νέφος σημείων από την επιφάνεια του αντικειμένου που σαρώνει [A1].

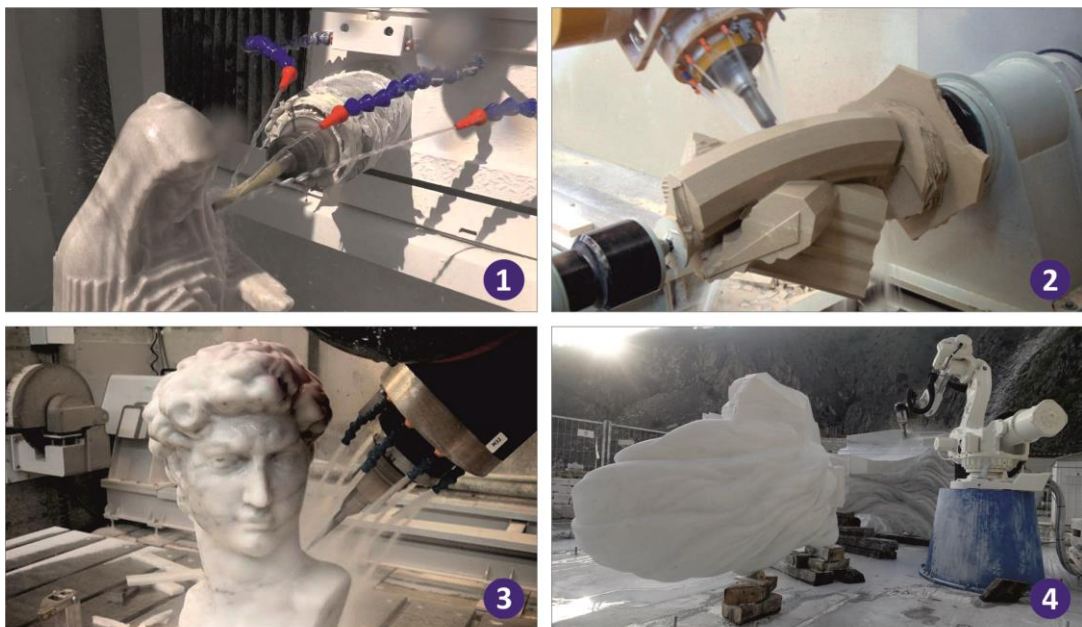
Στη δεύτερη φάση τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από το σαρωτή, επεξεργάζονται στον υπολογιστή. Αν ο χειριστής κρίνει ότι δεν είναι ικανοποιητικό το νέφος σημείων που καταγράφηκε, επαναλαμβάνει τη σάρωση, έως ότου υπάρχει τουλάχιστον ένα κατάλληλο δείγμα.

Στη συνέχεια, το δείγμα αυτό επεξεργάζεται περαιτέρω, ώστε να προκύψει ένα τρισδιάστατο μοντέλο στο οποίο η περιγραφή της επιφάνειας του απαρτίζεται από πλήθος τριγώνων και όλα αυτά τα τρίγωνα έχουν ένα κοινό πλαίσιο συντεταγμένων αναφοράς. Αυτή είναι η τρίτη φάση της μεθόδου και αφορά την κατασκευή ενός πολυγωνικού – τριγωνικού πλέγματος από το αρχικό δείγμα του νέφους σημείων.

Η τελευταία φάση της μεθόδου αυτής, είναι η μετατροπή του πολυγωνικού τρισδιάστατου μοντέλου σε επιφάνειες που περιγράφονται από τη μαθηματική μέθοδο NURBS (Nonuniform Rational B-Spline). Με την ολοκλήρωση της μετατροπής, έχει επιτευχθεί η κατασκευή ενός ψηφιακού τρισδιάστατου αντιγράφου από το πραγματικό πρωτότυπο.

Διαδικασία αντιγραφής γλυπτών από συστήματα αριθμητικού ελέγχου

Κατεργασίες σε λίθους με συστήματα αριθμητικού ελέγχου



Εικόνα 2.11: Η διαδικασία αντιγραφής γλυπτών από συστήματα CNC σε λίθους, όπως κατεργασία εξευγενισμού (1) & (2), διαδικασία λείανσης (3) και κατεργασία εκχόνδρισης (4).



Μετά την ολοκλήρωση της μεθόδου αντίστροφης μηχανικής, το ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο, επεξεργάζεται περαιτέρω σε συστήματα CAD (Computer Aided Design), ώστε να διορθωθούν μικρολεπτομέρειες, ατέλειες και τυχών σφάλματα. Αφού το μοντέλο επεξεργαστεί, εμποτεύεται και αν κριθεί κατάλληλο περνάει στο στάδιο παραγωγής. Όπου, αρχικά θα χρησιμοποιηθεί ένα σύστημα CAM (Computer Aided Manufacturing), στο οποίο θα οριστούν όλες οι απαιτούμενες παράμετροι κατεργασιών της εργαλειομηχανής. Κάποιες από αυτές είναι ο όγκος του λίθου, τα κοπτικά εργαλεία που θα χρησιμοποιήσει η εργαλειομηχανή, το βάθος κοπής, η πρόωση του κοπτικού εργαλείου και πολλές άλλες.

Επίσης τα συστήματα CAM παρέχουν τη δυνατότητα προσημείωσης όλης της κατεργασίας που θα πραγματοποιηθεί στην εργαλειομηχανή και βάσει αυτής μπορεί να εμποτευθούν και να διορθωθούν τυχών σφάλματα που θα μπορούσαν να προκαλέσουν αλλοίωση ή καταστροφή του αντίγραφου. Μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία αυτή το μοντέλο εξάγεται σε κατάλληλη μορφή και εισάγεται στην εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου, ώστε να ξεκινήσουν οι κατεργασίες κατασκευής και να παραχθεί το αντίγραφο.

Αν και η διαδικασία παραγωγής αντίγραφου με συστήματα αριθμητικού ελέγχου μπορεί να επιτύχει μεγάλη ακρίβεια, δεν μπορεί να μεταφερθεί καλή πιστότητα αντιγραφής της υφής της κατεργασμένης επιφάνειας. Αυτό οφείλεται στο ότι, οι εργαλειομηχανές κατεργάζονται την επιφάνεια με περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου και όχι με κρουστική κατεργασία όπως έχουν δουλευτεί τα πρωτότυπα. Από την άλλη είναι σαφές ότι, αυτή η διαδικασία δεν εφαρμόζεται από γλύπτες που ενστερνίζονται την παραδοσιακή τέχνη της γλυπτικής.

Αυτού του είδους η κατεργασία με περιστροφή του κοπτικού εργαλείου, από εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου, παρουσιάζεται στα σχήματα της εικόνας 2.11. Τα σχήματα 1, 2 και 3 είναι στιγμιότυπα από αντιγραφή μικρής κλίμακας γλυπτών σε λίθους. Ενώ στο σχήμα 4 χρησιμοποιείται ένας βραχίονας, όπου στο άκρο του φέρει το μηχανισμό περιστροφής του κοπτικού εργαλείου. Έτσι, επιτυγχάνεται η κατεργασία λίθου μεγάλης κλίμακας, με σκοπό την αντιγραφή σε αυτόν, ενός πελώριου γλυπτού.



3. Εργαλεία γλυπτικής

3.1 Παραδοσιακά εργαλεία χειρός

3.1.1 Αξίνες

Αξίνες

Αξίνες για κατεργασίες σε λίθους



Εικόνα 3.1: Ο τρόπος κατεργασίας του λίθου με την αξίνα.

Οι αξίνες είναι εργαλεία με τη μία τους μεριά να καταλήγει σε σημείο, ενώ η άλλη τους σε λεπτή αμβλύ άκρη η οποία μπορεί να είναι και οδοντωτή. Η κεφαλή του εργαλείου αυτού είναι κατασκευασμένη από μαλακό χάλυβα προσαρτημένη σε ξύλινη λαβή [A2][I12]. Το εργαλείο αυτό συνήθως χρησιμοποιείται για την απομάκρυνση περιττών κομματιών σε μαλακά πετρώματα όπως σαπωνόλιθο και ασβεστόλιθο.

Στην εικόνα 3.1, απεικονίζεται ένας τεχνίτης που κατεργάζεται ένα κομμάτι λίθου χρησιμοποιώντας την αξίνα. Συγκεκριμένα επιθυμεί να αφαιρέσει τα περιττά εξογκώματα που έχει ο ακατέργαστος λίθος και για να το επιτύχει, τα θραύει με την πλατιά ακμή της.

3.1.2 Πριόνι

Είναι μεγάλες κατασκευές όπου πάνω τους προσαρτιέται μια μακριά λάμα, η οποία έχει πάχος πάνω από 5 χιλ. και πολλές φορές μακρύτερη των 2 μέτρων. Το σύστημα προσδίδει ένα βαθμό ελευθερίας στη λάμα, ώστε να κινείται προς τα μπροστά και προς τα πίσω αξονικά για μερικά εκατοστά κίνησης και τις περισσότερες φορές χρειάζεται δύο άτομα για την καθοδήγηση της.

Πριόνια

Χειροκίνητα και μηχανοκίνητα πριόνια για κοπή λίθων



Εικόνα 3.2: Τα διάφορων τύπων πριόνια για λίθους, όπως ηλεκτροκίνητα με επιμήκεις λάμες (1) & (3), τα ηλεκτροκίνητα περιστροφικά με δίσκους κοπής (2) και τα επιμήκεις χειροκίνητα (4).



Για την κοπή του εκάστοτε λίθου τοποθετείται η κατάλληλη λάμα στο μηχάνημα. Τα μαλακά πετρώματα όπως ο σαπωνόλιθος μπορούν να κοπούν με οδοντωτές λάμες. Ενώ τα πιο σκληρά πετρώματα κόβονται με επίπεδη λάμα χωρίς οδοντώσεις, όπου μεταξύ της λάμας και της επιφάνειας του λίθου προστίθεται ένα μίγμα κοπής λίθων διαλυμένο σε νερό. Η λάμα παρασέρνει το διάλυμα κατά την αξονική κίνηση της τρίβοντας το λίθο με αποτέλεσμα να αφαιρεί στρώση υλικού. Αυτός ο τρόπος κοπής που χρησιμοποιείται στα πιο σκληρά πετρώματα, αφήνει σημάδια κοπής σαν ραβδώσεις από την κίνηση της λάμας και μια πολύ λεία επιφάνεια [A2].

Στα πολύ μεγάλα πριόνια τοποθετούνται πρόσθετα βάρη και στήριξη ώστε η λάμα να αιωρείται σε ελάχιστο ύψος πάνω από το λίθο, αφήνοντας το απαραίτητο κενό για το διάλυμα. Το σύστημα αυτό εξασφαλίζει μια ευκολία στους χειριστές, οι οποίοι εστιάζουν στη κίνηση της λάμας μονό (εικόνα 3.2, σχήμα 4). Στη σημερινή εποχή τα μηχανήματα αυτά κινούνται πλέον από ηλεκτρικούς κινητήρες (σχήμα 1, 2 και 3, εικόνα 3.2) και είναι εφοδιασμένα με αυτοματοποιημένα συστήματα ροής του διαλύματος στο σημείο κοπής. Επίσης, έχουν κατασκευαστεί και άλλα μηχανήματα βαρέως τύπου υδροκοπής, τα οποία εκτοξεύουν το διάλυμα υπό μεγάλη πίεση στο λίθο.

3.1.3 Αξίνα του γλύπτη ‘Sculptor’s pick’

Αξίνα του γλύπτη

Η αξίνα του γλύπτη ή ‘Sculptor’s pick’



Εικόνα 3.3: Η τεχνική χρήση της αξίνας του γλύπτη.

Η αξίνα του γλύπτη είναι μια μικρότερη έκδοση της αξίνας με την άκρη της να τελειώνει σε σημείο, η οποία χρησιμοποιείται για την γρήγορη απομάκρυνση κομματιών από το δοκίμιο κατά τα αρχικά στάδια της διαμόρφωσης του γλυπτού. Είναι ένα καλό εργαλείο για αρχάριους γλύπτες, ώστε να μάθουν τη φύση του κάθε πετρώματος.

Το μήκος της δεν ξεπερνά ποτέ τα 60 cm, ενώ οι περισσότερες είναι κοντά στα 30 με 40 cm [A2]. Συνήθως, ο γλύπτης το δουλεύει κρατώντας το και με τα δύο χέρια, για καλύτερο έλεγχο στις κινήσεις του και φέρει χτυπήματα με την άκρη της στο σημείο που επιθυμεί να κατεργαστεί. Τα σημάδια που αφήνει στο λίθο είναι αντίστοιχα με αυτά που αφήνει η σμίλη σημείου όταν δουλεύεται κάθετη

στην επιφάνεια του λίθου (εικόνα 3.3).

3.1.4 Μεταλλικές σφήνες

Ο διαχωρισμός λίθου με σφήνες είναι ευκολότερος και γρηγορότερος τρόπος και μπορεί να πραγματοποιηθεί από αρκετά μικρά τμήματα έως και σε τεραστίου μεγέθους κομμάτια. Είναι ακόμα και σήμερα μία αρκετά διαδεδομένη μέθοδος διαχωρισμού, η οποία ήταν γνωστή και χρησιμοποιούσαν από τους αρχαίους χρόνους. Βέβαια, εκτός από τις μεταλλικές χρησιμοποιούσαν και ξύλινες σφήνες τις οποίες τις έβρεχαν με νερό για να διογκωθούν, ώστε με τη διαστολή τους να διαχωριστεί ο λίθος [A2][13].

Οι μεταλλικές σφήνες απαρτίζονται από ένα σύστημα ενός μεταλλικού τύπου επιμήκους τραπεζίου όπου στις δύο πλατιές επιφάνειες προσαρτώνται δύο μεταλλικά φτερά, σχήμα 2, εικόνα 3.4. Τα φτερά βοηθούν την σφήνα να διεισδύσει με μεγαλύτερη ευκολία στο λίθο, χωρίς να τον τραυματίσει στο σημείο επαφής. Το μέγεθος της σφήνας (σχήμα 1, εικόνα 3.4) μπορεί να ποικίλει ανάλογα με το μέγεθος του λίθου που επιθυμείται να χωριστεί. Σήμερα στο εμπόριο μπορεί να βρεθούν σφήνες με πάχος από 1 χιλιοστό έως και κάποια εκατοστά.



Μεταλλικές σφήνες

Οι μεταλλικές σφήνες και οι χρήσεις τους



Εικόνα 3.4: Οι διάφοροι τύποι μεταλλικών σφηνών (1), το κυρίως σώμα και τα φτερά τους (2), η τοποθέτησή τους στις οπές του λίθου (3) και η βέλτιστη διάταξή τους στο λίθο (4).

Αρχικά ο γλύπτης σημαδεύει το τμήμα που θέλει να αποκολλήσει από τον υπόλοιπο λίθο και ανά κάποια εκατοστά σημαδεύει τις οπές που θα τοποθετήσει τις σφήνες σε διάταξη σειράς (σχήμα 3 και σχήμα 4, εικόνα 3.4). Με τη βοήθεια τρυπανιού ανοίγει αυτές τις οπές και τοποθετεί τις σφήνες. Τα ηλεκτρικά τρυπάνια που χρησιμοποιούν οι μοντέρνοι γλύπτες, μπορούν να ανοίξουν τρύπες πολύ βαθιά στο λίθο επιλέγοντας το κατάλληλο μήκος.

Αυτό δεν είναι επιθυμητό σε πολλές περιπτώσεις αφού ο λίθος αποδυναμώνεται και θα αρχίσει να χωρίζεται ακανόνιστα. Η οπή θα πρέπει να έχει μικρό βάθος διείσδυσης, όσο χρειάζεται το μέγεθος της σφήνας που χρησιμοποιείται, για την καλύτερη δυνατή χρήση της με λιγότερα σφάλματα. Παλιότερα, οι έμπειροι γλύπτες άνοιγαν τις οπές χρησιμοποιώντας σμίλες σημείου.

Η εισχώρηση τους θα πρέπει να γίνεται σταδιακά στο λίθο, ανά κάποια εκατοστά τη φορά. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν έχουν τοποθετηθεί τρεις σφήνες σε μια σειρά και μόνο η μια από αυτές τοποθετηθεί σε αρκετά μεγαλύτερο βάθος, ο λίθος θα αποκολληθεί ακανόνιστα μόνο σε εκείνο το σημείο και με πιθανή καταστροφή του τμήματος που θα δουλευθεί. Επομένως, οι γλύπτες θα πρέπει να είναι πολύ προσεκτικοί στη τοποθέτηση των σφηνών.

3.1.5 Σφυριά χειρός

Σήμερα υπάρχει μια πληθώρα σφυριών χειρός σε διάφορα σχήματα και μεγέθη εκπληρώνοντας τις εκάστοτε απαιτήσεις του γλύπτη, σχήμα 1, εικόνα 3.5. Αν και η επιλογή σφυριού είναι καθαρά θέμα προτίμησης του γλύπτη, η κάθε εργασία που καλείτε να ολοκληρώσει απαιτεί συγκεκριμένο είδος σφυριού.

Υπάρχουν δύο βασικές κατηγορίες σφυριών, όσον αφορά το υλικό κατασκευής τους, τα μεταλλικά και τα ξύλινα σφυριά. Εκτός από το υλικό που είναι κατασκευασμένα, σημαντικό ρόλο στην



Σφυριά χειρός

Διάφοροι τύποι σφυριών χειρός



Εικόνα 3.5: Οι διάφοροι τύποι μεταλλικών σφυριών (1) και το σφυρί φινιρίσματος bush hammer (2).

κατεργασία που πραγματοποιούν παρουσιάζει το σχήμα της κύριας κεφαλής τους και το μήκος της λαβής τους.

Το παραδοσιακό σφυρί γλυπτικής απαρτίζεται από τετράγωνη σιδερένια κεφαλή με κοντή ξύλινη λαβή από 15 έως 20 εκ. (η αγγλική του ονομασία είναι Square hammer ή Club hammer). Αυτό το εργαλείο χρησιμοποιείται ευρέως στην Ευρώπη και κυρίως στην Ιταλία. Στην Αγγλία και τη Γαλλία επιλέγουν κατά κόρων τα στρογγυλά σφυριά (Round mallets) είτε με μεταλλική κεφαλή, είτε με ξύλινη κεφαλή [A2][I11][I12].

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει ένας τύπος σφυριού, το οποίο ονομάζεται Bush hammer (σχήμα 2, εικόνα 3.5) και το χρησιμοποιούν ως εργαλείο φινιρίσματος, για το ιδιαίτερο στυλ που προσδίδει στα γλυπτά. Η ιδιομορφία του έγκειται στο σχήμα της κεφαλής του, το οποίο είναι τετραγωνικής μορφής, με τις δύο απέναντι πλευρές εργασίας να ενσωματώνουν ένα δίκτυο από πολλούς μικρούς κώνους ή πυραμίδες.

3.1.6 Σμίλη σημείου

Η σμίλη σημείου είναι το πιο απαραίτητο εργαλείο στη μαρμαρογλυπτική τέχνη. Σχεδόν το 85% του λίθου αφαιρείται με αυτό το εργαλείο. Προσφέρει, γρήγορη και ελεγχόμενη απομάκρυνση υλικού από το λίθο κατεργασίας και χρησιμοποιείται κατά κόρων στη διαδικασία εκχόνδρισης.

Σμίλη σημείου

Διάφορες σμίλες σημείου



Εικόνα 3.6: Η σμίλη σημείου σε διάφορες διαστάσεις.

Το πολύτιμο αυτό εργαλείο είναι κατασκευασμένο από μεταλλικό άξονα με το ένα άκρο του να καταλήγει σε σημείο ή σε μια κωνική μορφή. Οι διαστάσεις του ποικίλλουν με τη διάμετρο του να κυμαίνεται από 1 έως 2,5 εκ. και το μήκος του στα 20 έως 30 εκ., εικόνα 3.6. Η επιλογή του μήκους της σμίλης εξαρτάται από το λίθο εργασίας που έχει επιλεγεί [A2][I11][I12].

Για το μάρμαρο και τα μεσαίας σκληρότητας πετρώματα η άκρη της σμίλης έχει πυραμοειδή σχήμα με πιο μυτερή άκρη. Ενώ στα πιο σκληρά πετρώματα, όπως τον γρανίτη, η μύτη είναι πιο στρογγυλεμένη με επικάλυψη καρβιδίου, για μεγαλύτερη ανθεκτικότητα. Άλλο ένα είδος σμίλης σημείου που χρησιμοποιείται μόνο για κατεργασία σε πολύ σκληρά πετρώματα, είναι

αυτές που στην άκρη τους ενσωματώνουν στρογγυλεμένες μύτες από καρβίδιο.



Η τεχνική με την οποία χρησιμοποιείται η σμίλη σημείου διαφέρει ανάλογα με το υλικό κατεργασίας και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Όταν ο λίθος κατεργασίας είναι ο γρανίτης ή άλλοι λίθοι μεγάλης σκληρότητας η σμίλη πρέπει να δουλεύεται κάθετη στη επιφάνεια του λίθου. Σε τέτοια γωνία κρούσης η επιφάνεια του λίθου θραύεται με αποτελεσματικότητα. Σε αυτούς τους πολύ σκληρούς λίθους εάν δουλευτεί σε μικρότερη γωνία κρούσης, η σμίλη απλά θα ολισθήσει στην επιφάνεια χωρίς να προκαλέσει κάποια θραύση.

Βέβαια υπάρχει και μια τεχνική που αφορά την κατεργασία μαρμάρου, το οποίο είναι μεσαίας σκληρότητας λίθος, με σμίλη σημείου σε κλίση 90° μοιρών [A2]. Η κατεργασία αυτή χρησιμοποιείται μόνο σε δύο περιπτώσεις: στη περίπτωση που είναι θεμιτό να απομακρυνθεί πολύ μεγάλος όγκος από το λίθο και στη περίπτωση ενός γρήγορου χονδροειδούς τετραγωνισμού του.

Ειδικά στο μάρμαρο, είναι προϋπόθεση η σμίλη σημείου να δουλεύεται από τις 70° και κάτω, ώστε να επιτευχθεί μία κομψή σμίλευση του γλυπτού [A2]. Στις μοίρες αυτές η σμίλη θα κόψει την επιφάνεια αλλά δεν θα την θραύσει. Σε αυτά τα μεσαίας σκληρότητας πετρώματα αν δουλευτεί η σμίλη σε μεγαλύτερη γωνία υπάρχει πιθανότητα να θραυτεί όχι μόνο η επιφάνεια του, αλλά και πολύ βαθύτερες στρώσεις του, με αποτέλεσμα να καταστραφεί το γλυπτό.

Ο γλύπτης με τη σμίλη σημείου είναι σε θέση να απομακρύνει μεγάλες ποσότητες υλικού με ευκολία και ταχύτητα όταν εργάζεται με επαναλαμβανόμενες κρούσεις της από το επιλεγμένο σφυρί κατεργασίας. Ανάμεσα στα χτυπήματα, ο γλύπτης θα πρέπει να ανασηκώνει τη σμίλη, ώστε να σμιλεύσει σειρές από μικρές αυλακώσεις, σε όλη την επιφάνεια του λίθου.

Μια ακόμα τεχνική που χρησιμοποιούν οι γλύπτες, είναι η αλληπάλληλη κρούση της σμίλης σε γωνία 45° μοιρών [A2]. Η τεχνική αυτή διευκολύνει τη δημιουργία παράλληλων γραμμών και προσφέρει καλύτερο έλεγχο στο βάθος κοπής της αυλακώσης. Ένα ακόμα υπέρ της εν λόγω τεχνικής είναι ο αυξημένος έλεγχος στην αφαίρεσης υλικού σε ευθεία τροχιά, επιτρέποντας στο γλύπτη τον καλύτερο δυνατό παραλληλισμό των αυλακώσεων. Εκτός από τη γωνία εργασίας της σμίλης, ο γλύπτης στη κατεργασία αυτή δεν την επανατοποθετεί, ανάμεσα στις κρούσεις, όπως προηγουμένως.

3.1.7 Σμίλη οδοντωτή

Σμίλη οδοντωτή

Διάφορες οδοντωτές σμίλες



Εικόνα 3.7: Η οδοντωτή σμίλη σε διάφορες διαστάσεις.

Η οδοντωτή σμίλη (ή Claw chisel) είναι το δεύτερο κατά σειρά εργαλείο που επιλέγει να εργαστεί ο γλύπτης. Βρίσκει χρήση αμέσως μετά τη σμίλη σημείου, όπου έχει αφαιρέσει τα περιττά κομμάτια λίθου και ο γλύπτης περνάει στη διαδικασία εξευγενισμού του γλυπτού. Η σμίλη αυτή δουλεύεται με μεταλλικό ή και ξύλινο σφυρί, ανάλογα με την προτίμηση του [A2][I11][I12].

Από κατασκευαστικής απόψεως, η οδοντωτή σμίλη αποτελείται από μεταλλικό άξονα διαμέτρου από 1 έως 2 εκ. και το μήκος της κυμαίνεται από 16 έως 22 εκ. [A2]. Στη μία άκρη της διαθέτει οδοντωτή ακμή πλάτους από 0,5 έως 10 εκ., όπου ανάλογα με αυτό κυμαίνεται και ο αριθμός των δοντιών που διαθέτει. Οι συνηθέστερες οδοντωτές σμίλες παρουσιάζουν

αριθμό δοντιών από τρία έως και πέντε, εικόνα 3.7. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει μια οδοντωτή σμίλη η οποία διαθέτει μόνο δύο δόντια στην ακμή της και η οποία έχει πρωτοπαρουσιαστεί στην Ιταλία, φέροντας την ονομασία Dente di Cane.



Όπως προαναφέρθηκε η οδοντωτή σμίλη χρησιμοποιείται αφού ο λίθος έχει κατεργαστεί με τη σμίλη σημείου. Η σμίλη σημείου μετά την χρήση της αφήνει μία επιφάνεια με έντονες τροχιές που σχηματίζουν διαδοχικές σειρές από κορυφές και βαθιές κοιλάδες στο λίθο. Για την εξομάλυνση αυτής της τραχιάς επιφάνειας, ο γλύπτης κατεργάζεται το λίθο με τη οδοντωτή σμίλη. Η κατεργασία με αυτή επιτυγχάνει μια πιο ομαλή επιφάνεια αφαιρώντας τις βαθιές κορυφές και αυλακώσεις, αφήνοντας πολλές μικρότερες αυλακώσεις.

Το σχήμα της άκρης των δοντιών της σμίλης έχει δύο παραλλαγές, στη μία καταλήγουν σε λεπτές μύτες ενώ στην άλλη σε πιο παχιές τετραγωνοειδείς ακμές. Σαφέστατα, το σχήμα των δοντιών διαφοροποιεί το αποτύπωμα της σμίλης που αφήνει στην επιφάνεια του λίθου και είναι καθαρά στην προτίμηση του γλύπτη με ποια θα εργαστεί.

Η γωνία εργασίας αυτής της σμίλης κυμαίνεται από 35-60°, αλλά υπάρχουν και περιπτώσεις που δουλεύεται σε μεγαλύτερη γωνία κοντά στις 90° προσφέροντας ένα πιο βαθύ κόψιμο του λίθου [A2]. Στις μικρές γωνίες η σμίλη αφήνει, μετά την κατεργασία, στο λίθο, μια επιφάνεια με πολλές παράλληλες σειρές από πολύ ρηχές και στενές αυλακώσεις.

Η οδοντωτή σμίλη χρησιμοποιείται κατά κόρων στη σμίλευση μαρμάρου. Δεν βρίσκει εφαρμογή στη κατεργασία του γρανίτη, διότι τα πολύ σκληρά πετρώματα προκαλούν θραύση στις οδοντώσεις της. Από την άλλη, στους πιο μαλακούς λίθους, όπως ασβεστόλιθος, η χρήση της είναι καθαρά στον τρόπο εργασίας που επιθυμεί ο γλύπτης. Οι περισσότεροι γλύπτες προτιμούν να περάσουν απευθείας στην κατεργασία με την επίπεδη σμίλη, παρακάμπτοντας την οδοντωτή, κερδίζοντας έτσι σημαντικό χρόνο στην τελειοποίηση του γλυπτού.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της είναι, ότι τα δόντια της χρειάζονται ακόνισμα λόγω φθοράς από την πολύ χρήση της. Το ακόνισμα τους είναι μια εξαιρετικά δύσκολη διαδικασία γιατί μπορεί να υπάρχει σταδιακή αποχώρηση τους.

3.1.8 Σμίλη επίπεδη

Όπως και οι προηγούμενες σμίλες, η επίπεδη σμίλη είναι κατασκευασμένη από μεταλλικό άξονα διαμέτρου από 1 έως 2 εκ. και το μήκος της μπορεί να κυμαίνεται από 15 μέχρι και 25 εκ.. Στη σμίλη αυτού του τύπου το ένα άκρο καταλήγει σε μια επίπεδη ακμή, με το πλάτος της να έχει διαστάσεις από 0,5 έως και 10 εκ. [A2], όπου τις πολύ πλατιές τις χρησιμοποιούν για τη διαμόρφωση μια πιο επίπεδης επιφάνειας, εικόνα 3.8.

Σμίλη επίπεδη

Διάφορες επίπεδες σμίλες



Εικόνα 3.8: Η επίπεδη σμίλη σε διάφορες διαστάσεις.

Οι επίπεδες σμίλες βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα κατεργασιών, όπως στην τελική διαμόρφωση του γλυπτού (με σκοπό το επόμενο βήμα να είναι το φινίρισμα του), στις κατεργασίες λεπτομερειών (με χρήση των πιο μικρών σε πλάτος ακμής σμίλες) και στην εξομάλυνση της επιφάνειας (μέσω τις πιο πλατιές σμίλες).

Η συνήθης γωνία εργασίας της επίπεδης σμίλης είναι μεταξύ των 35° έως και 60° [A2] στην κατεργαζόμενη επιφάνεια του λίθου. Όπως και οι υπόλοιπες σμίλες μπορούν να χρησιμοποιηθούν με διάφορους τρόπους και σε διαφορετικές γωνίες, ανάλογα με το είδος του λίθου που θα κατεργαστούν, αν ο γλύπτης την χρησιμοποιεί για να εργαστεί με πολύ προσοχή τις λεπτομέρειες του



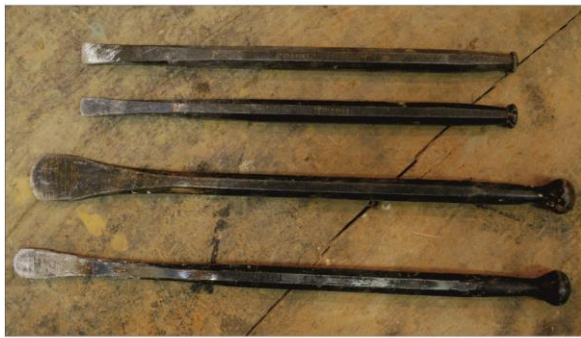
γλυπτού ή αν επιθυμεί μια γρήγορη διαμόρφωση του σχήματος, όπου και θα την χρησιμοποιήσει όχι με τόση φροντίδα αλλά με ταχύτητα. Τα ίχνη που θα αφήσει η σμίλη σημείου μετά την χρήση της στο γλυπτό τείνουν να απαρτίζονται από σχεδόν στρωτές σειρές παράλληλων γραμμών. Σε περιπτώσεις όπου ο γλύπτης έχει εργαστεί με εξαιρετική προσοχή κατά την κατεργασία αυτή, τα εν λόγω ίχνη δεν διακρίνονται με ευκολία.

3.1.9 Σμίλη κυρτή τύπου roundel

Η κυρτή σμίλη τύπου roundel αποτελείται, όπως και οι προηγούμενες, από ένα μεταλλικό άξονα μήκους 15 έως 20 εκ. και διαμέτρου από 1 έως 2 εκ. με τη μία άκρη της να διαθέτει μια πλατιά επιφάνεια (όπως οι επίπεδες σμίλες) όπου η αιχμή της καταλήγει σε τοξοειδή μορφή. Όπως και στις επίπεδες σμίλες, το πλάτος της καμπύλης είναι μεταξύ 0,5 εκ. έως και 10 εκ.. Στην εικόνα 3.9 παρουσιάζεται η σμίλη αυτού του τύπου σε διάφορα μεγέθη. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό είναι ότι, οποιαδήποτε επίπεδη σμίλη μπορεί πολύ εύκολα να μετατραπεί σε τύπου roundel [A2][I11][I12].

Κυρτή σμίλη

Διάφορες κυρτές σμίλες τύπου roundel



Εικόνα 3.9: Η κυρτή σμίλη σε διάφορες διαστάσεις.

Η κυρτές σμίλες δουλεύονται συνήθως σε μικρές γωνίες όπως οι οδοντωτές και οι επίπεδες σμίλες, με την γωνία εργασίας τους να ποικίλει από 35° έως και 60° σε σχέση με την επιφάνεια του λίθου [A2]. Κατεργασίες με τις κυρτές σμίλες πραγματοποιούνται στα χαμηλής σκληρότητας πετρώματα και στο μάρμαρο. Για τους πιο σκληρούς λίθους, όπως ο γρανίτης, δεν χρησιμοποιούνται, διότι η σκληρότητα του υλικού φθείρει την καμπυλοειδή ακμή της σμίλης.

Οι εν λόγω σμίλες βρίσκουν χρήση σε τεχνικές πρόχειρης κατεργασίας του λίθου, άλλα και σε πιο επιδέξιες εργασίες που απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή. Η κύρια και πιο αποδοτική χρήση τους, είναι η σμίλευση ιδιάζουσών περιοχών και

βαθουλωμάτων, εφόσον το σχήμα της ταιριάζει στη θεμιτή από τον γλύπτη καμπυλότητα, που επιλέγει να δώσει σε εκείνα τα σημεία του γλυπτού.

Μερικές από τις ιδιάζουσες περιοχές ενός λίθινου ανδριάντα είναι τα χαρακτηριστικά του προσώπου του, οι λεπτομέρειες της κόμης του, οι λεπτομέρειες της γενειάδας του, οι λεπτομέρειες στα δάκτυλα του και άλλα πολλά. Αν το γλυπτό έχει διαφορετική θεματική ενότητα, όπως την αναπαράσταση κάποιου φυσικού χώρου (π.χ. κάποιο δάσος ή ακτή), η σμίλη αυτή χρησιμοποιείται για τη σμίλευση των δέντρων, των κυμάτων της θάλασσας, των βράχων κ.α. [A2].

3.1.10 Σμίλη στενής αυλάκωσης

Μια πληθώρα τύπων σμίλης θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως εργαλεία που μπορούν να χαράξουν στενές αυλακώσεις σε λίθο. Μερικά από αυτά τα εργαλεία είναι οι πολύ στενές επίπεδες σμίλες και οι στενές τύπου roundel, με πλάτος ακμής κάτω του ενός εκατοστού [A2].

Εκτός από αυτές τις σμίλες, έχει κατασκευαστεί και μια σμίλη ειδικού τύπου, εξιδεικευμένη για αυτή την χρήση, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 3.10. Η σμίλη στενής αυλάκωσης αποτελείται από μεταλλικό άξονα, με μήκος από 15 έως 25 εκ. και διάμετρο από 0,5 έως και 1 εκ., ενώ η ακμή της κυμαίνεται και αυτή από 0,5 έως περίπου 1 εκ..



Σμίλη στενής αυλάκωσης

Διάφορες σμίλες στενής αυλάκωσης



Εικόνα 3.10: Η σμίλη στενής αυλάκωσης σε δύο μεγέθη.

με πτυχές ή στις αυλακώσεις της κόμης, αφού έχει ολοκληρωθεί η κατεργασία με το φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός ή ακόμα και σε διάφορα αντικείμενα με βαθιές αυλακώσεις και κοιλότητες.

Αν και στη μία μεριά το σχήμα της ακμής της είναι αντίστοιχο με αυτό της επίπεδης, διαφοροποιείται στην άλλη με ξεχωριστό τρόπο. Η διαφοροποίηση της σμίλης στενής αυλάκωσης έγκειται στο ότι το σχήμα των δύο πλευρών της ακμής είναι επίπεδο και οι άλλες δυο πλευρές ξεκινούν από τη βάση της ακμής να φαρδαινούν σταδιακά, περίπου μέχρι τη μέση της και από εκείνο το σημείο ξεκινούν και μειώνουν φάρδος, έως ότου αυτό μηδενιστεί στην άκρη.

Αυτό το ιδιαίτερο σχήμα της ακμής που διαθέτει, του παρέχει τη δυνατότητα κατεργασιών σε βαθιές ρωγμές και κοιλότητες. Έτσι το εργαλείο αυτό χρησιμοποιείται για τη σμίλευση χαρακτηριστικών του γλυπτού, όπως υφασμάτων

3.1.11 Εργαλεία χειρός για σκληρότερους λίθους

Εργαλεία χειρός για σκληρότερους λίθους

Διάφορες σμίλες για σκληρότερους λίθους



Εικόνα 3.11: Διάφορες διαστάσεις της επίπεδης σμίλης και μια σμίλη σημείου με επικάλυψη καρβιδίου.

επίπεδες σμίλες, διακρίνεται και από μία σμίλη ακμής τους είναι επικαλυμμένες με καρβίδιο.

Η κατεργασία σκληρότερων λίθων όπως ο γρανίτης, κάποιοι τύποι μαρμάρων και ο ψαμμίτης, απαιτεί τη χρήση σκληρότερων εργαλείων. Αυτοί οι σκληρότεροι τύποι εργαλείων είναι συνήθως εργαλεία με επικάλυψη της ακμής με καρβίδιο του βολφραμίου ή εργαλεία στα οποία υπάρχει υποδοχή για να τοποθετηθεί μύτη εξ ολοκλήρου από καρβίδιο [A2][I11][I12].

Το καρβίδιο είναι τρεις φορές σκληρότερο και πυκνότερο από το χάλυβα και το τιτάνιο. Το γεγονός αυτό το καθιστά πιο εύθραυστο αν χρησιμοποιηθεί με λάθος τεχνική από τον γλύπτη, κατά την κατεργασία των σκληρών λίθων ή από άλλο εργαλείο καρβιδίου.

Όλα αυτά τα εργαλεία είτε είναι με επικάλυψη, είτε με εξολοκλήρου μύτες καρβιδίου χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής, όταν εργάζεται ο γλύπτης με αυτά και βέβαια επιζητούν μεγάλη προσοχή στη συντήρησή τους, για να μην καταστραφούν.

Στα σχήματα της εικόνας 3.11, παρουσιάζονται οι τύπου επίπεδες σμίλες σε διάφορα μεγέθη με επικάλυψη καρβιδίου του βολφραμίου στις ακμές τους. Επίσης και στα δύο σχήματα εκτός από της σημείου, μικρού μεγέθους, όπου και σε αυτές οι



3.1.12 Φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός

Ένα εργαλείο αρκετά έξυπνης κατασκευής είναι το φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός, εικόνα 3.12 και σχήμα 1. Το τρυπάνι αυτό είναι ένα από τα λίγα μηχανικά εργαλεία που μοιράζεται μεγάλη ιστορία με την κατεργασία λίθων. Η κύρια χρήση του είναι η επίτευξη οπών στο λίθο, οι οποίες διαθέτουν μία ομοιόμορφη διάμετρο σε όλο το μήκος τους. Συνήθως, δουλεύεται σε γωνία 90° αναφορικά με την επιφάνεια κατεργασίας του λίθου [A2][B2][I13].

Κατά τη Ρωμαϊκή περίοδο, η βασική μορφή του τρυπανιού λειτουργούσε είτε με λουρί, είτε με χορδή. Απαρτιζόταν από ένα μεταλλικό εργαλείο με αιχμή, το οποίο έμοιαζε με μεταλλική σμίλη και τοποθετούνταν σε ένα στέλεχος, όπου ήταν συνδεδεμένο σε μία ξύλινη λαβή. Η ξύλινη λαβή άφηνε το στέλεχος να περιστρέφεται ελεύθερα στον άξονα του. Για την επίτευξη της περιστροφής, οι τεχνίτες οδηγούσαν το στέλεχος του τρυπανιού τραβώντας μπρος-πίσω μία χορδή, η οποία ήταν τυλιγμένη γύρω του αρκετές φορές.

Η λειτουργία του φυγόκεντρου τρυπανιού χειρός απαιτεί δύο χειριστές, ένας ο οποίος θα χειρίζεται τη χορδή ή το λουρί και ένας που θα καθοδηγεί το τρυπάνι, επιλέγοντας τη σωστή τοποθέτηση της ακμής του εργαλείου στο λίθο και τη διαχείριση της απαιτούμενης δύναμης στη λαβή που θα πρέπει να καταβάλλει, ώστε να επιτύχει το θεμιτό αποτέλεσμα. Βέβαια, εκτός από την ασκούμενη δύναμη σημαντικό ρόλο στην κατεργασία αυτή, παρουσιάζει και η διαχείριση των στροφών που εφαρμόζεται στο εργαλείο, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με την εργασία.

Φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός

Διάφορα φυγοκεντρικά τρυπάνια χειρός



Εικόνα 3.12: Το φυγοκεντρικό τρυπάνι χειρός με σχοινί (1) και με ξύλινο πήχη (2).

Έχουν κατασκευαστεί και άλλες παραλλαγές του εν λόγω εργαλείου, μία από αυτές είναι το φυγόκεντρο τρυπάνι με τοξωτό οδηγό (ή Bow drill), όπου οι δύο άκρες της χορδής είναι προσαρτημένες σε ένα ξύλινο πήχη (εικόνα 3.12, σχήμα 2), σχηματίζοντας ένα τόξο, εξού και η ονομασία του. Αν και αυτή η παραλλαγή του εργαλείου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί από μόνο ένα άτομο, δεν είναι τόσο καλό στην χρήση του, γιατί δεν παρέχει τον καλύτερο έλεγχο, όπως το αρχικό.

Το αρχικό εργαλείο είναι περισσότερο διαχειρίσιμο την ώρα της κατεργασίας, για το λόγο ότι χειρίζεται από δύο άτομα και ο καθοδηγητής του έχει και τα δύο χέρια ελεύθερα να το κατευθύνει και να ασκήσει την ακριβή δύναμη που χρειάζεται, για τη διάνοιξη της οπής.

Το εργαλείο αυτό, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ένα μεγάλο εύρος εργασιών. Μία από αυτές τις εργασίες, περιλαμβάνει τη δημιουργία οπών μεγαλύτερου βάθους για την εισαγωγή συνδετικών πείρων ή μεταλλικών συνδέσμων, όπου το γλυπτό χρήζει συναρμολόγησης ή στερέωσης. Πάραυτα, το φυγόκεντρο τρυπάνι,

αρχικά, δημιουργήθηκε για να επιτύχουν οι γλύπτες τα απαραίτητα βάθη σε πολύ ευαίσθητες περιοχές του γλυπτού, που η χρήση σμίλης θα μπορούσε να δημιουργήσει ανεπανόρθωτη ζημιά.



Έτσι, οι γλύπτες το χρησιμοποιούσαν για να δώσουν το απαραίτητο βάθος στις οπές των ρουθουνιών, στις οπές των αυτιών, στην κατεργασία στων σγουρών μαλλιών, για να δημιουργήσουν τις κόρες των ματιών, για να αποδώσουν την ιδιαίτερη υφή των ρούχων ή για να δώσουν έμφαση σε ιδιαίτερες περιοχές του ολοκληρωμένου γλυπτού [A2].

Μια ακόμα ενδιαφέρουσα τεχνική για την οποία χρησιμοποιούσαν το τρυπάνι ήταν η δημιουργία βαθιών αυλακώσεων. Οι τεχνίτες δημιουργούσαν μια σειρά από τρύπες, η μια δίπλα στην άλλη, πάντα σε γωνία κλίσης 90° από την επιφάνεια του γλυπτού [A2]. Στη συνέχεια, για να αφαιρέσουν τα περιττά υπολείμματα που άφηναν οι οπές μεταξύ τους, χρησιμοποιούσαν την επίπεδη σμίλη ή τη σμίλη στενής αυλάκωσης, στην ανάλογη διάσταση του καναλιού.

3.1.13 Λίμες και λειαντικά εργαλεία

Οι λίμες υπάρχουν σε όλα τα σχήματα και μεγέθη, αλλά όλες υπακούν στη βασικού τύπου κατεργασία λείανσης. Η βασική μορφή της λίμας είναι ένα μακρόστενο μεταλλικό εργαλείο με τις δύο απέναντι ακμές της να σχηματίζουν επιφάνειες οι οποίες διαθέτουν σύμπλεγμα οδοντώσεων ή αιχμηρών σημείων, σχήμα 1, εικόνα 3.13. Το σχήμα της επιφάνειας των ακμών ποικίλει και μπορεί να είναι τετράγωνο, καμπυλωτό, στρογγυλεμένο ή και αιχμηρό. Το μήκος αυτών των εργαλείων κυμαίνεται από 12 έως και 40 εκ., ανάλογα με την κατεργασία λείανσης που επιθυμεί ο γλύπτης να αποδώσει στο γλυπτό [A2][I11][I12].

Λίμες και λειαντικά εργαλεία

Διάφορες λίμες και λειαντικά εργαλεία



Εικόνα 3.13: Διαφόρων ειδών λίμες (1) και ο τρόπος κατεργασίας με λίθο λείανσης (2).

Η πυκνότητα των οδοντώσεων που διαθέτουν οι λίμες μπορεί να διαφέρει σημαντικά από λίμα σε λίμα. Είναι σαφές ότι το μέγεθος της λίμας, το σχήμα της και η πυκνότητα των οδοντώσεων καθορίζει το αποτέλεσμα της λείανσης στην επιφάνεια. Ο γλύπτης μπορεί να επιτύχει διαφορετικές υφές στην επιφάνεια του γλυπτού ανάλογα με τη λίμα που θα χρησιμοποιήσει για την κατεργασία λείανσης.

Η λίμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλη την επιφάνεια του γλυπτού, εξού και τα διάφορα σχήματα ακμών που υπάρχουν. Έτσι ώστε, ο γλύπτης να έχει τη δυνατότητα να κατεργαστεί τα πιο δύσκολα και ευαίσθητα σημεία του γλυπτού. Η λειτουργία της είναι η εξομάλυνση της επιφάνειας του γλυπτού, από τα πιθανά ίχνη κατεργασιών που άφησαν οι προηγούμενες διαδικασίες.

Το υλικό που κατεργάζονται είναι κυρίως το μάρμαρο και οι πιο μαλακοί λίθοι, με μία απλή αλλά χρονοβόρα εργασία. Η τεχνική που χρησιμοποιούν οι γλύπτες βασίζεται στη συνεχή τριβή της επιφάνειας του γλυπτού, από τις οδοντωτές ακμές της λίμας.

Έτσι ο γλύπτης, τοποθετεί την ακμή με τις οδοντώσεις της λίμας πάνω στην επιφάνεια του γλυπτού που θα κατεργαστεί, πιέζοντας την ελαφριά. Με προσοχή και με συνεχόμενη κίνηση, ο γλύπτης μετακινεί τη λίμα μπρος και πίσω, έχοντας πάντα υπό πίεση την ακμή στην κατεργαζόμενη επιφάνεια.



Ωστόσο, στο γρανίτη δεν χρησιμοποιούνται οι λίμες, διότι η σκληρότητα του τις καθιστά ανίκανες να τον κατεργαστούν.

Οι γλυπτές χρησιμοποιούν λειαντικά εργαλεία, όπως λειαντικούς λίθους (σχήμα 2, εικόνα 3.13), για τη δημιουργία μίας πολύ λείας επιφάνειας του γλυπτού. Οι λειαντικοί λίθοι έχουν μια τετράγωνη μορφή και ποικίλουν από σκληροί σε μαλακοί, όπως ο μαλακός ψαμμίτης και η ελαφρόπετρα. Ο γλύπτης επιλέγει τη σκληρότητα του λειαντικού λίθου που θα χρησιμοποιήσει. Συνήθως, στην πρώτη κατεργασία λείανσης επιλέγει πιο σκληρό λειαντικό λίθο και στις επόμενες εργάζεται με μικρότερης σκληρότητας, βαθμιδωτά.

Η χρήση των εν λόγω υλικών επιτυγχάνεται μέσω της τριβής τους σε όλη την επιφάνεια του γλυπτού. Κατά την κατεργασία τους, η επιφάνεια του γλυπτού είναι απαραίτητο έχει μια υποτυπώδη υγρασία. Η υγρασία βοηθά στην απομάκρυνση των κόκκων που δημιουργούνται από την τριβή των δύο λίθων. Για το λόγο αυτό, οι γλύπτες προσθέτουν συχνά νερό στην υπό κατεργασία περιοχή του γλυπτού.

3.2 Ηλεκτρικά εργαλεία

3.2.1 Ηλεκτρικά τρυπάνια χειρός

Τα ηλεκτρικά τρυπάνια χειρός έχουν μια ευρεία χρήση στη γλυπτική διαδικασία (εικόνα 3.14). Έχουν απλουστεύσει τις άλλοτε χρονοβόρες και κοπιαστικές εργασίες, όπως το άνοιγμα οπών για την τοποθέτηση συνδέσμων ή σφηνών ή και τις διάφορες κατεργασίες (όπως τις οπές για τις κόρες των ματιών, τις οπές στα αυτιά, τις οπές στα ρουθούνια κ.α.) που γίνονταν με το χειροκίνητο φυγοκεντρικό τρυπάνι. Όλα τα εργαλεία αυτού του είδους, όπως υποδεικνύει και η ονομασία τους, μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε κινητική, μέσω ενός ηλεκτροκινητήρα [111][114].

Ο ηλεκτροκινητήρας που ενσωματώνουν είναι τύπου Universal motor, ο οποίος μπορεί να λειτουργήσει με εναλλασσόμενο αλλά και με συνεχές ρεύμα. Επιλέγονται αυτού του τύπου κινητήρες, γιατί παρουσιάζουν μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση τους, μπορούν να εργαστούν σε αρκετά μεγάλες στροφές και είναι ελαφριές, συμμαζευμένες κατασκευές.

Στην αγορά πλέον ο γλύπτης μπορεί να βρει μια πληθώρα αυτών των εργαλείων και να επιλέξει το κατάλληλο για την κατεργασία που επιθυμεί. Τα εργαλεία αυτά ενσωματώνουν τεχνολογίες μετάδοσης της κινητικής ενέργειας, που τα καθιστούν ικανά να εφαρμοστούν σε πολλές διαφορετικές κατεργασίες. Βάσει της τεχνολογίας μετάδοσης μπορούν να διακριθούν στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:

- ηλεκτρικά τρυπάνια ή δράπανα με περιστροφική μετάδοση
- ηλεκτρικά τρυπάνια με περιστροφική και με λειτουργία κρουστικής μετάδοσης
- και ηλεκτρικά τρυπάνια με μόνο κρουστική μετάδοση

3.2.1.1 Κρουστικά

Όπως προαναφέρθηκε, τα ηλεκτρικά τρυπάνια χειρός μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, ανάλογα με τη τεχνολογία μετάδοσης που φέρουν. Η ενότητα αυτή, ασχολείται με τη δεύτερη και τρίτη κατηγορία των εργαλείων αυτών, τα οποία διαθέτουν την ικανότητα να παράγουν κρουστική κίνηση. Είτε παράγουν κρουστική σε συνδυασμό με περιστροφική κίνηση του κοπτικού εργαλείου, είτε εξολοκλήρου κρουστική.

Σε όλα τα ηλεκτρικά τρυπάνια αυτού του τύπου, με κρουστική λειτουργία, υπάρχει μια πληθώρα προσαρτώμενων εργαλείων στη διάθεση του χειριστή τους. Προσαρμόζουν από κοπτικά εργαλεία,



όπως διαφόρων μεγεθών τρυπάνια για τη διάνοιξη οπών, μέχρι και διαφόρων τύπου σμίλες, καθιστώντας τα ικανά για τις διάφορες κατεργασίες της γλυπτικής διαδικασίας.

Ηλεκτρικά τρυπάνια χειρός

Διάφορα ηλεκτρικά τρυπάνια χειρός με κρουστική λειτουργία



Εικόνα 3.14: Διαφόρων ειδών κρουστικά τρυπάνια, όπως μόνο κρουστικής μετάδοσης (3), τρυπάνια με πολλαπλές λειτουργίες κρούσης (1) & (2) και με ενσωματωμένη μπαταρία (4).

Τα καθ' εαυτού κρουστικού τύπου τρυπάνια (σχήμα 3, εικόνα 3.14), προσφέρουν δυνατότερο χτύπημα κατά τις κρούσεις, λόγω του διαφορετικού μηχανισμού μετάδοσης που διαθέτουν. Ενδείκνυται, για κατεργασίες με σμίλες, όπου ο γλύπτης θέλει να αφαιρέσει μεγάλα περιττά κομμάτια από το γλυπτό. Μερικά, από τα τρυπάνια με κρουστική και περιστροφική κίνηση, διαθέτουν την επιλογή λειτουργίας μόνο κρούσης της προσαρτώμενης σμίλης, αποσυνπλέκοντας τη περιστροφική κίνηση (εικόνα 3.14, σχήμα 1, 2 και 4). Με αυτή την επιλογή λειτουργίας, ο γλύπτης μπορεί να εργαστεί με οποιαδήποτε είδους σμίλη επιθυμεί. Ακόμα και για να επιτύχει λεπτές κατεργασίες στο γλυπτό.

Ειδικά για την επίτευξη οπών μεγάλου βάθους ή και διάτρησης ενός μαρμαρίνου γλυπτού, απαιτεί την χρήση εργαλείου, με κρουστική σε συνδυασμό με περιστροφική κίνηση, έως ένα ορισμένο βάθος. Ενώ, η υπόλοιπη διεργασία πραγματοποιείται με τη χρήση μόνο περιστροφικής κίνησης. Αυτό, για να μην τραυματιστεί η επιφάνεια του μαρμάρου κατά τη διάτρηση, λόγω των επαναλαμβανόμενων κρούσεων. Για αυτή τη διαδικασία ενδείκνυται τα τρυπάνια με εναλλαγή των χαρακτηριστικών κίνησης της δεύτερης κατηγορίας.

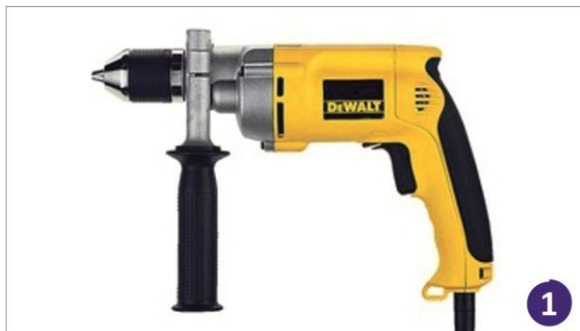
3.2.1.2 Δράπανα

Τα δράπανα είναι ηλεκτρικά εργαλεία χειρός με μόνο περιστροφική λειτουργία (σχήμα 1 & 2, εικόνα 3.15), ώστε να επιτυγχάνουν κατεργασίες τρυπήματος σε πληθώρα υλικών, όπως ξύλο, μέταλλα, πλαστικά και πετρώματα κ.α.. Συνήθως, διαθέτουν μόνο ένα σύστημα μείωσης στροφών, το οποίο αυξάνει την αποδιδόμενη ροπή του.



Ηλεκτρικά δράπανα χειρός

Διάφορα δράπανα



Εικόνα 3.15: Ηλεκτρικά δράπανα χειρός με μόνο περιστροφική λειτουργία (1) & (2).

Επίσης, είναι εξοπλισμένα με ηλεκτρονικό σύστημα ρύθμισης των στροφών, όπου επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίσει τις επιθυμητές στροφές λειτουργίας, ώστε να μπορεί να επιτύχει το βέλτιστο αποτέλεσμα. Εφόσον πολλές κατεργασίες απαιτούν χαμηλές στροφές εργασίας ενώ άλλες πολύ υψηλότερες.

Οι γλύπτες τα επιλέγουν για κατεργασίες που απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή, για την αποφυγή τυχόν καταστροφής του γλυπτού, για το λόγο ότι δεν παρέχει κρουστική κίνηση, αποτρέποντας τους κραδασμούς κατά τη λειτουργία του. Βέβαια, η κατεργασία πετρωμάτων με αυτά τα περιστροφικά εργαλεία, είναι περισσότερο χρονοβόρα και σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί ειδικό υγρό για την καλύτερη κατεργασία του πετρώματος αλλά και σαν ψυκτικό στο κοπτικό εργαλείο.

Έτσι, η κύρια χρήση του είναι στη κατεργασία δύσκολων περιοχών του γλυπτού, όπως οι κόρες των ματιών, οι διαβαθμίσεις βάθους και οι οπές στην περιοχή των μύτης, οι αυλακώσεις και οι οπές για την ολοκλήρωση των αφτιών, η κατεργασία για την επίτευξη των σγουρών

μαλλιών και πολλές άλλες, ανάλογα με το επιθυμητό αποτέλεσμα, που θέλει να αποδώσει ο γλύπτης.

3.2.2 Ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί

Ένα πολύ διαδεδομένο εργαλείο που χρησιμοποιούν κατά κόρων οι γλύπτες είναι οι ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί (εικόνα 3.16). Αυτά τα ηλεκτρικά εργαλεία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν, από την κατεργασία κοπής μέχρι και τις κατεργασίες λείανσης. Οι ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί είναι φαινομενικά εύχρηστοι σε κατεργασίες της γλυπτικής διαδικασίας, όπως η αφαίρεση υλικού με κοπή και η εξομάλυνση της επιφάνειας του γλυπτού ακόμα και σε δύσκολα/ευαίσθητα σημεία. Μια ακόμα κατεργασία είναι η επίτευξη ενός λείου φινιρίσματος του γλυπτού.

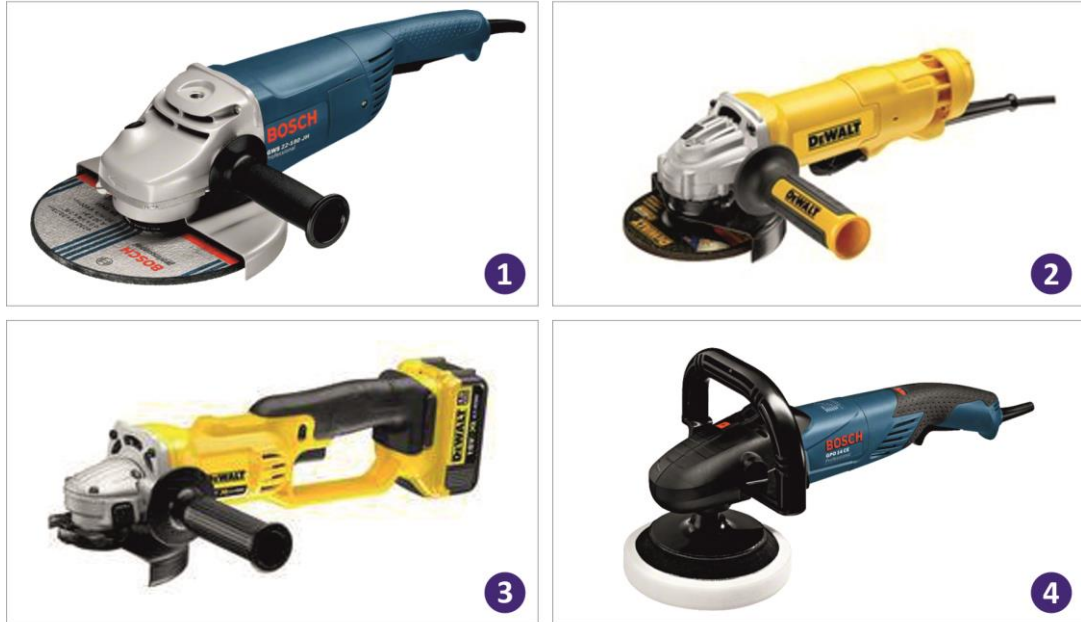
Ο γλύπτης μπορεί να επιλέξει τον κατάλληλο ηλεκτρικό τροχό για την εκάστοτε κατεργασία που επιθυμεί να πραγματοποιήσει. Υπάρχουν διαφόρων τύπων ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί που θα επιτύχουν την εκάστοτε κατεργασία. Οι συνηθέστεροι φέρουν το δίσκο σε 90° με το σώμα του εργαλείου, στο οποίο είναι ενσωματωμένος ο ηλεκτρικός κινητήρας με ένα σύστημα μετάδοσης της κίνησης 90° (ονομάζονται και angle grinders). Αλλά υπάρχουν και περιστροφικοί τροχοί που περιστρέφουν το δίσκο στον ίδιο άξονα με το άξονα περιστροφής του ηλεκτρικού κινητήρα (ονομάζονται και die grinders). Το μέγεθος τους ποικίλλει από πολύ μικρούς σε αρκετά μεγάλους και συνήθως των 90° έχουν και δεύτερη λαβή για σταθερότερο κράτημα [111][114].

Τα σχήματα της εικόνα 3.16 παρουσιάζουν τους διάφορους τύπους των ηλεκτρικών περιστροφικών τροχών με σύστημα μετάδοσης της κίνησης 90°. Το σχήμα 1 αφορά τη μεγάλη κατηγορία των εργαλείων αυτών, στα οποία μπορούν να προσαρμοστούν δίσκοι διαμέτρου από 180 έως και 230 χιλ.. Το συγκεκριμένο εργαλείο δέχεται δίσκο 180 χιλιοστών και η ισχύς του ηλεκτρικού κινητήρα του είναι στα 2200 Watt, ο οποίος μπορεί να περιστρέψει το δίσκο στις 8500 στροφές ανά λεπτό.



Ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί

Διάφοροι ηλεκτρικοί τροχοί με σύστημα μετάδοσης 90° ή angle grinders



Εικόνα 3.16: Διάφοροι τύποι angle grinders, όπως της μεγάλης κατηγορίας για κοπή - λείανση (1), της μικρής κατηγορίας για κοπή - λείανση (2), άλλος ένας της μικρής κατηγορίας με ενσωματωμένη μπαταρία για κοπή - λείανση (3) και ένας εξειδικευμένος για κατεργασίες στίλβωσης (4).

Τα σχήματα 2 και 3 αφορούν τη μικρή κατηγορία των εργαλείων αυτών τα οποία φέρουν μέχρι δίσκους διαμέτρου 125 χιλ. Ο ηλεκτρικός περιστροφικός δίσκος που απεικονίζεται στο σχήμα 2 δέχεται δίσκους έως και 125 χιλ. και διαθέτει ηλεκτροκινητήρα ισχύς 1200 Watt, ο οποίος μπορεί να επιτύχει 11000 στροφές ανά λεπτό.

Αντίστοιχα, ο ηλεκτρικός περιστροφικός τροχός στο σχήμα 3 δέχεται δίσκους έως και 125 χιλ., με τον ηλεκτροκινητήρα του να αποδίδει 405 Watt, ο οποίος περιστρέφει το δίσκο με 7000 στροφές ανά λεπτό. Επίσης, διαθέτει αποσπώμενη μπαταρία τύπου ιόντων λιθίου (Lithium ion, Li-ion), η χωρητικότητα της οποίας είναι 4.0 Ah και η τάση της στα 18 Volt.

Από την άλλη, ο περιστροφικός ηλεκτρικός τροχός που παρουσιάζεται στο σχήμα 4, ανήκει σε μια εντελώς διαφορετική κατηγορία. Στη κατηγορία αυτή είναι οι περιστροφικοί τροχοί στίλβωσης, οι οποίοι φέρουν ειδικού τύπου βούρτσες και άλλα συναφή τερματικά εργαλεία εξειδικευμένα για κατεργασίες στίλβωσης. Το συγκεκριμένο εργαλείο ενσωματώνει ηλεκτροκινητήρα ισχύς 1400 Watt και μπορεί να επιτύχει περιστροφή από 750 έως και 3000 στροφές το λεπτό, ενώ τα εργαλεία στίλβωσης που δέχεται έχουν διάμετρο από 100 έως και 180 χιλιοστά.

Επιπρόσθετα υπάρχουν angle grinder τα οποία διαθέτουν ενσωματωμένα συστήματα παροχής για τη συνεχή ροή νερού ή ειδικού τύπου λειαντικού υγρού, ώστε να επιτυγχάνεται με αυτά η βέλτιστη επεξεργασία της επιφάνειας το λίθου. Βέβαια, υπάρχουν και ανεξάρτητες τέτοιες μονάδες, για τη συνεχή ροή υγρού, που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο γλύπτης.



Ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί

Διάφοροι ηλεκτρικοί τροχοί ή die grinders



1



2

Εικόνα 3.17: Δύο die grinders (1) & (2), για κατεργασίες διαμόρφωσης λεπτομεριών και λείανσης.

Τα σχήματα 1 και 2 της εικόνας 3.17, αφορούν το δεύτερο τύπο ηλεκτρικών περιστροφικών τροχών, που περιστρέφουν το τερματικό εργαλείο στον ίδιο άξονα περιστροφής. Το εργαλείο που παρουσιάζεται στο σχήμα 1 ενσωματώνει ηλεκτροκινητήρα ισχύς 650 Watt, ο οποίος μπορεί να επιτύχει ταχύτητα περιστροφής του τερματικού εργαλείου έως και 30000 στροφές το λεπτό.

Το εργαλείο αυτό διαθέτει δυνατότητα επιλογής στροφών λειτουργία, από τον χρήστη. Ενώ το εργαλείο του σχήματος 2 διαθέτει ηλεκτροκινητήρα 750 Watt και οι στροφές λειτουργίας κυμαίνονται από 2500 έως και 8000 στροφές ανά λεπτό, όπου και σε αυτό ορίζονται από τον χρήστη.

Για τον γρανίτη και τους μεγάλης σκληρότητας λίθους, χρησιμοποιούνται ηλεκτρικοί περιστροφικοί τροχοί βαρέως τύπου. Τόσο για κατεργασίες κοπής και διαμόρφωσης του γλυπτού, όσο και για διαδικασίες λείανσης και φινιρίσματος.

αυτά τα ηλεκτρικά εργαλεία χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής κατά τη λειτουργία τους και θα πρέπει να παίρνονται ορισμένες προφυλάξεις για την ασφάλεια του χειριστή.

Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι, όλα

3.2.2.1 Εναλλάξιμοι δίσκοι κοπής

Στην αγορά υπάρχουν πλέον διάφορων ειδών εναλλάξιμοι δίσκοι κοπής, για να εκπληρώσουν και τις πιο μεγάλες απαιτήσεις του γλύπτη. Η λειτουργία τους είναι αντίστοιχη με αυτή των κυκλικών πριονιών. Αν και τα περισσότερα διαθέτουν οδοντώσεις, η κοπή επιτυγχάνεται από την τριβή της ακμής του δίσκου στο λίθο [11][14].

Οι δίσκοι αυτοί είναι κατασκευασμένοι είτε από μέταλλο, με ένα ενσωματωμένο πλέγμα διαμαντιού ή καρβιδίου, είτε από ένα δίσκο από πλέγμα ινών υαλοβάμβακα (fiberglass), εμποτισμένο με ρητίνη, όπου στις δύο επιφάνειες του εναποτίθεται ένα μίγμα κοπής. Το μίγμα κοπής μπορεί να περιέχει οξειδίο του αργιλίου (aluminum oxide, Al_2O_3), καρβίδιο του πυριτίου (silicon carbide, SiC) και άλλα ορυκτά. Όλοι οι αυτοί οι τύποι δίσκων είναι ικανοί να κατεργαστούν οποιοδήποτε είδος λίθου. Ειδικά οι δίσκοι κοπής με το πλέγμα διαμαντιού μπορούν να κατεργαστούν με ευκολία, ακόμα και τα πιο σκληρά πετρώματα, σαν τον γρανίτη. Σε κάποιους τύπους δίσκων κοπής είναι απαραίτητο να υπάρχει συνεχής ροή ειδικού υγρού κατά τη κατεργασία.

Ο δίσκος κοπής που απεικονίζεται στην εικόνα 3.18, σχήμα 1, περιέχει τμήματα με διαμάντι στο χείλος του, όπου του παρέχουν τη δυνατότητα κατεργασίας ακόμα και του σκληρότερου λίθου. Ο διάμετρος του κυμαίνεται από 115 χιλ. μέχρι και 230 χιλ. Ο δίσκος στο σχήμα 2 έχει περιμετρικά στην ακμή του μια μεγάλη επικάλυψη με διαμάντια, ενώ η διάμετρος του είναι από 100 έως 125 χιλ. και χρησιμοποιείται για την κατεργασία μαλακών και μέτριας σκληρότητας λίθων (όπως ασβεστόλιθοι και μάρμαρα). Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε σκληρότερους λίθους, όταν επιθυμείται γρήγορη και χονδροειδής κατεργασία.



Εναλλάξιμοι δίσκοι κοπής

Διάφοροι τύποι εναλλάξιμων δίσκων κοπής



Εικόνα 3.18: Διάφοροι τύποι εναλλάξιμων δίσκων κοπής, όπως μεταλλικοί με πλέγμα διαμαντιού (1), (2) και (3) ή τύπου fiberglass με κόκκους κοπής – λείανσης (4).

Αντίστοιχα, και ο δίσκος του σχήματος 3 είναι της ίδια κατηγορίας με τον προηγούμενο, με τη διαφοροποίηση ότι, στην ακμή του περιέχει οδοντώσεις και η επικάλυψη με τα διαμάντια είναι μόνο στα οδοντωτά τμήματα. Η διαστάσεις του κυμαίνονται μεταξύ 115 και 230 χιλ.. Από την άλλη, ενώ και οι τρεις δίσκοι κοπής των σχημάτων 1, 2 και 3 είναι μεταλλικοί, ο δίσκος του σχήματος 4 αποτελείται από πλέγμα ινών υαλοβάμβακα και από επιφάνειες με λειαντικούς κόκκους. Ο δίσκος αυτός έχει διάφορες διαστάσεις από 100 χιλ. έως και 300 χιλ. και μπορεί να κατεργαστεί μαλακούς λίθους.

3.2.2.2 Εναλλάξιμοι δίσκοι λείανσης

Για τη κατεργασία λείανσης, ο γλύπτης μπορεί να χρησιμοποιήσει τον ηλεκτρικό περιστροφικό τροχό, προσαρτώντας τον κατάλληλο εναλλάξιμο δίσκο λείανσης, ανάλογα με το αποτέλεσμα που επιθυμεί να αποδώσει σε αυτό. Υπάρχουν διάφορων ειδών δίσκοι, με διαφορετική υφή, από την οποία εξαρτάται το αποτέλεσμα που αφήνουν στην επιφάνεια του γλυπτού.

Ένα είδος εναλλάξιμων δίσκων λείανσης είναι οι ελαστικοί δίσκοι λείανσης, οι οποίοι είναι κατασκευασμένοι από σκληρό πλαστικοποιημένο χαρτόνι και η επιφάνεια τους που χρησιμοποιείται είναι επικαλυμμένη με λειαντικό υλικό. Ο τύπος δίσκου αυτός, χρησιμοποιείται για τις διαδικασίες λείανσης σε επιφάνειες μαλακών λίθων.

Ο δίσκος κοπής της εικόνας 3.19, σχήμα 1, είναι αντίστοιχος με το δίσκο κοπής του σχήματος 4 της εικόνας 3.18, αλλά χρησιμοποιείται για κατεργασίες λείανσης της επιφάνειας των λίθων. Όπως και ο αντίστοιχος του για κατεργασίες κοπής, είναι κατασκευασμένος από ίνες υαλοβάμβακα εμποτισμένο σε ρητίνη. Η διαφοροποίηση τους έγκειται αφενός στο ότι η επιφάνεια του δίσκου διαθέτει λειαντικό υλικό μόνο στη μία επιφάνειά του, αφετέρου δε στο ότι σε αυτούς χρησιμοποιείται μόνο καρβίδιο



του πυριτίου ως λειαντικός κόκκος, για το λόγο ότι προσφέρει καλύτερα αποτελέσματα στη κατεργασία λείανσης.

Εναλλάξιμοι δίσκοι λείανσης

Διάφοροι τύποι εναλλάξιμων δίσκων λείανσης



Εικόνα 3.19: Διάφοροι τύποι εναλλάξιμων δίσκων λείανσης, όπως από fiberglass με κόκκους λείανσης (1), άλλοι είναι με προσαρτημένα περύγια (2), άλλοι με επιφάνεια Velcro (3) και άλλοι τύπου cup wheel (4).

Στο σχήμα της εικόνας 3.19, απεικονίζονται οι δίσκοι που διαθέτουν περύγια (ή flap wheels). Τα περύγια αυτά κατασκευάζονται από πεπλεγμένο χαρτόνι ή από ύφασμα, το οποίο από τη μία επιφάνεια καλύπτεται από επίστρωση με λειαντικούς κόκκους. Για το βέλτιστο αποτέλεσμα στην κατεργασία λείανσης της επιφάνειας των λίθων, προτείνεται οι λειαντικοί κόκκοι να είναι από καρβίδιο του πυριτίου.

Αυτά τα περύγια λείανσης, είναι προσαρμοσμένα πάνω στην επιφάνεια ενός δίσκου βάσης, διαμέτρου από 100 χιλ. μέχρι 180 χιλ., ακτινωτά, έτσι ώστε το ένα να επικαλύπτει το αμέσως επόμενο. Ο δίσκος βάσης, είναι κατασκευασμένος είτε από υαλοβάμβακα, είτε από πλαστικό, είτε από αλουμίνιο και η πυκνότητα των περυνγιών σε αυτόν καθορίζει και το τελικό αποτέλεσμα, που αφήνει στην επιφάνεια του λίθου.

Ένας ακόμα τύπος δίσκου λείανσης παρουσιάζεται στο σχήμα 3 της παραπάνω εικόνας. Αυτός ο τύπος δίσκου διαθέτει μια επιφάνεια από ειδικό ύφασμα (velcro), το οποίο μπορεί να συγκρατήσει ένα άλλο ύφασμα όταν έρθουν σε επαφή. Έτσι, υπάρχουν δευτερεύοντα ύφασμα τα οποία διαθέτουν μια επιφάνεια με λειαντικούς κόκκους, ενώ η άλλη προσαρτάται στην επιφάνεια του δίσκου.

Οι λειαντικοί δίσκοι τύπου ποτηριού (cup grinding wheel) που παρουσιάζονται στο σχήμα 4 της εικόνας 3.19, είναι μεταλλικοί δίσκοι που έχουν το λειαντικό υλικό στο χείλος τους. Η ονομασία προέρχεται από το σχήμα τους, το οποίο μοιάζει με ποτήρι και χρησιμοποιούνται για κατεργασίες εξομάλυνσης της επιφάνειας του γλυπτού. Υπάρχουν διαφορετικοί τέτοιοι δίσκοι, ανάλογα με την κατεργασία και το υλικό [11][14].



3.2.3 Ειδικού τύπου λειαντικά εξαρτήματα

Ειδικού τύπου λειαντικά εξαρτήματα

Διάφορα ειδικού τύπου εναλλάξιμα λειαντικά εξαρτήματα



Εικόνα 3.20: Τύποι εναλλάξιμων λειαντικών εξαρτημάτων είναι, οι τύπου λίμες (1), τα λειαντικά με επιφάνεια από διαμάντι (2) και τα λειαντικά με πέτρες λείανσης (3).

Οι ηλεκτρικοί τροχοί, ή die grinders, που στρέφουν το τερματικό εργαλείο ομοαξονικά με τον ηλεκτροκινητήρα, εκτός από δίσκους μπορούν να φέρουν και μια πληθώρα ειδικού τύπου λειαντικών εργαλείων. Αυτά τα ειδικού τύπου λειαντικά εξαρτήματα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες, αναλόγως με την κατεργασία που επιφέρουν. Οι κατηγορίες είναι, τα τύπου λίμες, τα τύπου λειαντικά με επιφάνεια από διαμάντια και τα λειαντικά με πέτρες.

Τα τύπου λίμες (σχήμα 1, εικόνα 3.20), είναι μεταλλικοί ράβδοι όπου η αιχμή του εργαλείου μπορεί να έχει διάφορα σχήματα, όπως κύλινδρο ή κώνο (ή και πιο σύνθετες γεωμετρίες) και η επιφάνεια του διαθέτει ρίκνωση, όπως λίμες ή αιχμηρά εξογκώματα κατά μήκος του. Τα καλύτερης ποιότητας είναι εξολοκλήρου από καρβίδιο του βολφραμίου και είναι σε θέση να κατεργαστούν με ευκολία πετρώματα, από τα πιο μαλακά μέχρι και κάποιο σκληρότερα [115].

Τα λειαντικά με επιφάνεια από διαμάντι (σχήμα 2, εικόνα 3.20), υπάρχουν στα αντίστοιχα σχήματα και μεγέθη με τα τύπου λίμες, αλλά αντί το εργαλείο να έχει ρίκνωση, διαθέτουν μια τραχιά επιφάνεια, η οποία απαρτίζεται από κόκκους διαμαντιού. Αυτή η τραχιά επιφάνεια, τα καθιστά ιδανικά για κατεργασίες λείανσης. Μπορούν να κατεργαστούν με ευκολία τους περισσότερους λίθους και είναι εξαιρετικά ανθεκτικά [114].

Τα τύπου λειαντικά με πέτρες (σχήμα 3, εικόνα 3.20) είναι συνήθως συμπαγείς κατασκευές από καρβίδιο του πυριτίου ή οξείδιο του αργιλίου ή από άλλα υλικά που χρησιμοποιούνται για

λείανση. Οπτικά μοιάζουν με πέτρωμα και συνήθως είναι τοποθετημένα σε ένα μεταλλικό άξονα για να μπορούν να προσαρτηθούν με ευκολία στον περιστροφικό τροχό [114].

Όπως και τα παραπάνω ειδικού τύπου εξαρτήματα κατασκευάζονται σε διάφορα σχήματα και μεγέθη, αλλά σε αντίθεση με τα προηγούμενα, φθείρονται και αλλοιώνεται το σχήμα τους. Τα καρβίδια του πυριτίου χρησιμοποιούνται κυρίως για τις κατεργασίες λείανσης σε γρανίτη και πολύ σκληρά πετρώματα [111][114].



3.2.4 Ηλεκτρικό περιστροφικό εργαλείο ακριβείας Dremel

Εργαλείο ακριβείας Dremel

Ηλεκτρικό περιστροφικό εργαλείο ακριβείας Dremel



Εικόνα 3.21: Το ηλεκτρικό περιστροφικό εργαλείο ακριβείας dremel (1) και ο πρόσθετος εύκαμπτος άξονας μετάδοσής του (2).

Το ηλεκτρικό εργαλείο dremel, εικόνα 3.21 και σχήμα 1, ανήκει στη μικρή κατηγορία των ηλεκτρικών περιστροφικών τροχών, ή die grinders. Είναι ένα πολύ αξιόπιστο εργαλείο, το οποίο μπορεί να παρέχει στον χρήστη του ευκολία και ευελιξία για οποιαδήποτε κατεργασία το χρησιμοποιεί. Ένα χαρακτηριστικό του dremel είναι οι εκπληκτική ανάπτυξη στροφών που παρέχει, όπου κυμαίνονται από 3000 έως και 37000 rpm, τις οποίες ρυθμίζει ο χρήστης.

Στην εικόνα 3.21 και σχήμα 2, παρουσιάζεται ένα πρόσθετο εργαλείο, το οποίο προσαρτάται στο dremel και του προσδίδει ακόμα μεγαλύτερη ευελιξία και χρησιμότητα. Το εργαλείο αυτό αποτελείται από μία τερματική λαβή, η οποία διαθέτει και σύστημα συγκράτησης, για την τοποθέτηση τερματικού εργαλείου κατεργασίας καθώς και από έναν εύκαμπτο άξονα, που μεταδίδει την περιστροφική κίνηση από το dremel στο τερματικό εργαλείο. Έτσι το εργαλείο με τον εύκαμπτο άξονα μετάδοσης, μειώνει το βάρος και τον όγκο που κρατά στα χέρια του γλύπτη, επιτρέποντάς του, κατεργασίες με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Επίσης, το σύστημα συγκράτησης των εργαλείων κατεργασίας που διαθέτει η τερματική λαβή του εύκαμπτου άξονα, δέχεται όλα τα εργαλεία που δέχεται και το dremel, όπως δίσκους κοπής ή λείανσης και τα ειδικού τύπου λειαντικά εξαρτήματα, τα οποία παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 3.2.3. Έτσι το dremel μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μια πληθώρα εργασιών προσθέτοντας το κατάλληλο τερματικό εργαλείο. Το μικρό του μέγεθος το καθιστά αρκετά ευέλικτο στη χρήση του. Ενδεικτικά, χρησιμοποιείται για διάτρηση, κοπή, λείανση - στίλβωση κ.α. και στη γλυπτική χρησιμοποιείται για τη κατεργασία λεπτομερειών του γλυπτού [114].

3.3 Πνευματικά εργαλεία

Όλα τα πνευματικά εργαλεία διαθέτουν μηχανισμούς που παράγουν είτε περιστροφική, είτε παλινδρομική κίνηση από την πίεση του αέρα. Η απαραίτητη πίεση αέρα επιτυγχάνεται από ένα συμπιεστή αέρος, ο οποίος τον αποθηκεύει υπό πίεση σε μια κυλινδρική αεροστεγής δεξαμενή. Η μονάδα συμπιεστή – δεξαμενής υπάρχει σε διάφορες κατηγορίες, αναλόγως με τις απαιτήσεις των εργαλείων που χρησιμοποιεί ο γλύπτης. Τυπικά, τα χαμηλής πίεσης να κυμαίνονται περίπου στα 150 psi, τα μεσαίας κατηγορίας από 150 έως 1000 psi και τα βαριάς χρήσης από 1000 psi και πάνω.

3.3.1 Πνευματικά τρυπάνια χειρός

Τα πνευματικά τρυπάνια χειρός, όπως και τα ηλεκτρικά, βρίσκονται με δύο λειτουργίες την περιστροφική και την περιστροφική με κρούση. Σε διαφοροποίηση από τα ηλεκτρικά, τα πνευματικά δεν διαθέτουν πολλαπλές λειτουργίες και δεν μπορούν να μετάβουν από περιστροφική σε περιστροφική με κρούση. Διαθέτουν μόνο μία λειτουργία και είναι αυτή που έχουν εκ κατασκευής.



Πνευματικό τρυπάνι

Το πνευματικό τρυπάνι χειρός



Εικόνα 3.22: Πνευματικό τρυπάνι με λειτουργία μόνο περιστροφικής κίνησης.

ηλεκτρικού τύπου, για τη διάνοιξη διαμερών οπών ή για οπές μεγάλου βάθους κ.α..

Τα τρυπάνια με μόνο περιστροφική κίνηση του τερματικού κοπτικού εργαλείου, εικόνα 3.22, χρειάζονται πίεση αέρα περίπου 90 psi. Η στροφές λειτουργίας του είναι από 950 έως και 3700 rpm και ρυθμίζονται από την πίεση που του παρέχεται. Οι γλύπτες το χρησιμοποιούν για τη δημιουργία οπών ή για τη χάραξη αυλακώσεων σε ρούχα κ.α..

Τα τρυπάνια με περιστροφική και κρουστική κίνηση έχουν πίεση λειτουργίας συνήθως από 90 έως 120 psi. Οι στροφές που μπορούν να κινήσουν το κοπτικό εργαλείο είναι από 625 έως και 3900 rpm και οι κρούσεις που πραγματοποιούν κατά την περιστροφή μπορεί να φτάσουν έως και τις 3000 κρούσεις ανά λεπτό. Στη γλυπτική μπορεί να χρησιμοποιηθεί, όπως και τα αντίστοιχα

3.3.2 Πνευματικοί περιστροφικοί τροχοί

Όπως και οι ηλεκτρικού τύπου περιστροφικοί τροχοί υπάρχουν και οι αντίστοιχοι πνευματικού τύπου, οι οποίοι λειτουργούν με την πίεση του αέρα από ένα σύστημα παροχής, συμπιεστή - δεξαμενής αποθήκευσης. Είναι ελαφρύτερα εργαλεία από τα αντίστοιχα ηλεκτρικά επιτρέποντας στο χειριστή την ευκολότερη εργασία. Κατασκευάζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, οι περιστροφικοί τροχοί με ομοαξονική περιστροφή του τερματικού εργαλείου (σχήμα 3 & 4, εικόνα 3.23) και υπό γωνία 90° μοιρών (σχήμα 1 & 2, εικόνα 3.23).

Πνευματικοί περιστροφικοί τροχοί

Διάφοροι τύποι πνευματικών περιστροφικών τροχών



Εικόνα 3.23: Διάφορα είδη πνευματικών περιστροφικών τροχών, όπως τα τύπου angle grinders (1) & (2) και τα τύπου die grinders (3) & (4).



Αν και περιστρέφουν το τερματικό εργαλείο σε υψηλότερες στροφές, έως και 25000 στροφές το λεπτό, δεν είναι για βαριές κατεργασίες, όπως κοπής μεγάλου όγκου από το λίθο. Η πίεση αέρα που απαιτούν για τη λειτουργία τους είναι στα 90 psi, όπου και της μικρής κατηγορίας συμπιεστές τα καλύπτουν. Τα εργαλεία αυτά είναι ιδανικά για κατεργασίες λεπτομερειών και λείανσης του γλυπτού. Μπορούν να φέρουν, ανάλογα τον τύπο τους, όλα τα τερματικά εργαλεία που χρησιμοποιούν και στα αντίστοιχα ηλεκτρικά.

3.3.3 Πνευματικά σφυριά

Η ανάπτυξη των πνευματικών εργαλείων έφερε στο προσκήνιο ένα εξαιρετικά εύχρηστο εργαλείο στην γλυπτική τέχνη, το πνευματικό σφυρί. Η ευρεσιτεχνία του πνευματικού σφυριού ανήκει στην Ιταλική εταιρία Cuturi, με έδρα την πόλη Massa της κεντρικής Ιταλίας, η οποία το κατασκευάζει από το 1870. Μερικές δεκαετίες αργότερα, έφερε στην αγορά ένα παρόμοιου τύπου πνευματικό εργαλείο η εταιρία Trow & Holden, η οποία εδρεύει στο Vermont της Αμερικής [115][116].

Πνευματικό σφυρί

Διάφορα μεγέθη του πνευματικού σφυριού



Εικόνα 3.24: Τα μεγέθη του πνευματικού σφυριού τύπου Cuturi (1) και οι διαφόρων τύπων σμίλες που δέχεται (2).

κατεργασίες (όπως αφαίρεση μεγάλων όγκων κατά τη διαδικασία εκχόνδρισης του λίθου) που απαιτείται περισσότερη δύναμη άλλα και πιο μεγάλη σμίλη, εφόσον το μεγαλύτερο έμβολο και η μακρύτερη διαδρομή που καλύπτει, αποδίδουν πιο δυνατές κρούσεις.

Τα μεσαίου μεγέθους είναι για τις κατεργασίες που απαιτείται να αφαιρεθεί μικρότερος όγκος λίθου κατά τα στάδια που μορφοποιείται ο λίθος στην τελική μορφή του γλυπτού. Ενώ τα μικρότερα πνευματικά σφυριά βρίσκουν χρήση σε εργασίες που χρήζουν σμίλευση εξαιρετικής ακρίβειας, όπως η κατεργασία λεπτομερειών του γλυπτού ή η κατεργασία ευαίσθητων τμημάτων του γλυπτού.

Αν και το μέγεθος και η διαδρομή του εμβόλου επηρεάζει θετικά την ένταση της κρούσης που παράγει το εργαλείο, έχει αντίστροφη επίδραση στην περιοδικότητα των κρούσεων. Τα μεγαλύτερα σε



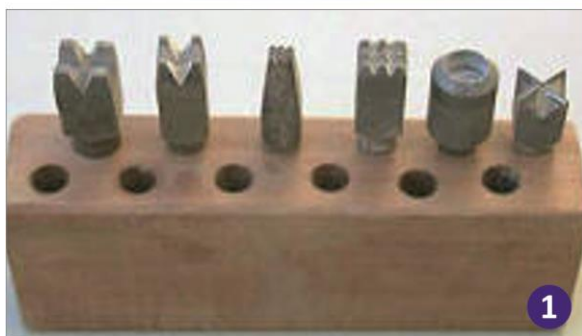
διαστάσεις κρουστικά σφυριά παράγουν από 4100 έως και 5500 κρούσεις το λεπτό, με το μεγαλύτερο να επιτυγχάνει τις λιγότερες. Τα μεσαίας κατηγορίας, λειτουργούν από 6000 έως και 7000 κρούσεις το λεπτό και τα πιο μικρά επιτυγχάνουν από 7200 έως και 8500 κρούσεις το λεπτό [I15].

Επίσης, τα μεγαλύτερα ενδείκνυνται για κατεργασίες με σκληρότερους λίθους, όπως ο γρανίτης, λόγω της μεγαλύτερης έντασης στην κρούση που παράγουν. Βέβαια, τα κρουστικά σφυριά χρησιμοποιούνται για κατεργασίες σε όλες τις κατηγορίες λίθων, επιλέγοντας το κατάλληλο μέγεθος και την ανάλογη σμίλη. Οι σμίλες που χρησιμοποιούνται με τα πνευματικά σφυριά, είναι ειδικής κατασκευής, όπου στη μεριά της κρούσης είναι διαμορφωμένες έτσι ώστε να μπορούν να τοποθετηθούν στην υποδοχή που διαθέτουν. Στο σχήμα 2 της εικόνας 3.24, παρουσιάζονται αυτού του τύπου ειδικές σμίλες με το πνευματικό σφυρί.

3.3.4 Ειδικού τύπου εργαλεία

Ειδικού τύπου εργαλεία

Διάφορες ειδικού τύπου σμίλες



Εικόνα 3.25: Οι ειδικού τύπου σμίλες (1) και διάφορα μεγέθη της σμίλης πολλών σημείων (2).

Εκτός από τις κλασικές μορφές σμίλης (όπως σμίλη σημείου, οδοντωτή, επίπεδη, κυρτή κ.α.), έχουν κατασκευαστεί ειδικού τύπου σμίλες, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ειδικές κατεργασίες. Αυτές η ειδικού τύπου είναι οι σμίλες πολλών σημείων, οι σταυρωτές, οι τύπου frosting, οι τύπου κυπέλου ή cup, εικόνα 3.25, σχήμα 1 & 2 [I11][I14][I16].

Κάποιες από αυτές χρησιμοποιούνται για σμίλευση σε γρανίτη, αφού είναι ικανές να θραύσουν τις κρυσταλλικές δομές που εμπεριέχονται στο γρανίτη. Οι σμίλες για αυτή τη διαδικασία ανήκουν στην κατηγορία των σμιλών πολλών σημείων, και έχουν συνήθως τέσσερις οδοντώσεις σε σχηματισμό τετραγώνου. Υπάρχουν και σμίλες με έξι αλλά και με εννέα οδοντώσεις, όπου και αυτές είναι ικανές να επεξεργαστούν του κρυστάλλους του γρανίτη.

Οι σμίλες τύπου σταυρωτές χρησιμοποιούνται όταν ο γλύπτης επιθυμεί να αναπαραστήσει υφάσματα, την επιφάνεια του νερού κ.α.. Η σμίλη τύπου κυπέλου χρησιμοποιείται για τη δημιουργία κοιλοτήτων στην επιφάνεια του γλυπτού. Από την άλλη η σμίλη frosting αφήνει μια ιδιαίτερη υφή στην επιφάνεια που κατεργάζεται.

3.4 Όργανα μέτρησης στη γλυπτική

Εκτός από τα περισσότερα εργαλεία που αναφέρθηκαν παραπάνω, από την εργαλειοθήκη του γλύπτη, δεν πρέπει να λείπουν και τα όργανα μέτρησης. Αυτά τα όργανα βοηθούν το γλύπτη να δώσει τις απαραίτητες διαστάσεις στο γλυπτό και να ελέγχει τις επιθυμητές αναλογίες. Όπως γίνεται αντιληπτό, ο γλύπτης θα πρέπει να είναι σε θέση να γνωρίζει πώς να χρησιμοποιεί τα όργανα αυτά καθ' όλη τη διαδικασία σμίλευσης ενός γλυπτού.

Τα βασικά όργανα μέτρησης που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική είναι η μετρική δαγκάνα γλυπτικής (ή διαβήτη γλυπτικής), το όργανο μέτρησης γωνιών ενενήντα μοιρών, η μετρική κλίμακα και το



όργανο μέτρησης σημείου. Τα περισσότερα από αυτά υπάρχουν σχεδόν αναλλοίωτα από τους αρχαίους γλύπτες μέχρι και τους σύγχρονους [A2].

3.4.1 Μετρική δαγκάνα γλυπτικής

Μετρική δαγκάνα γλυπτικής

Η μετρική δαγκάνα γλυπτικής σε διάφορα μεγέθη



Εικόνα 3.26: Η μετρική δαγκάνα γλυπτικής, από τη μικρότερη στη μεγαλύτερη.

απλοϊκό τρόπο. Ο γλύπτης τοποθετεί τη μία ακμή του ενός επιμήκους τμήματος της δαγκάνας, σε ένα σημείο το οποίο έχει καθορίσει ως σημείο αναφοράς. Στη συνέχεια τοποθετεί τη δεύτερη ακμή του άλλου επιμήκους τμήματος στο σημείο το οποίο επιθυμεί να μετρήσει, χωρίς να μετακινήσει την πρώτη ακμή από το σημείο αναφοράς .

Η μετρική δαγκάνα γλυπτικής ή διαβήτη γλυπτικής είναι ένα όργανο μέτρησης, το οποίο βοηθάει τον γλύπτη να επιτύχει από την πιο απλή μέχρι και την πιο σύνθετη διαστασιολόγηση στο γλυπτό [A2][117]. Κατασκευαστικά στην πιο απλή μορφή του είναι ένα απλό και χρήσιμο εργαλείο, αποτελείται από δύο επιμήκεις άξονες όπου στη μία άκρη τους ενώνονται με έναν σύνδεσμο, παρέχοντας του κίνηση ενός βαθμού ελευθερίας.

Οι πιο σύνθετες μορφές του διαθέτουν σε μία απόσταση από το σύνδεσμο, ένα μηχανισμό συγκράτησης, τον οποίο μπορεί να χρησιμοποιήσει ο γλύπτης, ώστε να σταθεροποιήσει τα δύο επιμήκη τμήματα στη συγκεκριμένη απόσταση που μετράει, όποτε είναι αυτό θεμιτό. Η χρήση της επιτυγχάνεται με αρκετά

3.4.2 Όργανο μέτρησης γωνιών ενενήντα μοιρών

Όργανο μέτρησης γωνιών ενενήντα μοιρών

Το όργανο μέτρησης γωνιών 90° και ο τρόπος χρήσης του



Εικόνα 3.27: Η χρήση του οργάνου μέτρησης 90° για τη μέτρηση ενός σημείου στο γλυπτό.

αυτή (όπου διέρχεται από το σημείο αναφοράς και τέμνει τον κάθετο άξονα).

Το όργανο μέτρησης γωνιών ενενήντα μοιρών το χρησιμοποιεί ο γλύπτης, για να επιβεβαιώσει τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ δύο πλευρών ή να επαληθεύσει κατά πόσο είναι επίπεδη μια επιφάνεια. Το όργανο αυτό είναι πολύ απλό στην κατασκευή του, αποτελείται από δύο μεταλλικές επιμήκεις ράβδους οι οποίες είναι πακτωμένες στο ένα άκρο τους, σχηματίζοντας ορθή γωνία [A2].

Στην εικόνα 3.27, ο γλύπτης, πραγματοποιεί τη μέτρηση της απόστασης της ακμής του σαγονιού της προτομής, από το σημείο αναφοράς (το οποίο έχει οριστεί στο επάνω μέρος της κεφαλής), στον οριζόντιο άξονα. Για να επιτύχει αυτή τη μέτρηση, πρέπει να ορίσει έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο της βάσης (ο οποίος διέρχεται από το σημείο της ακμής του πιγουνιού) και ένα άξονα παράλληλο σε

Βάσει αυτών, ο γλύπτης, τοποθετεί το όργανο μέτρησης γωνιών 90°, έτσι ώστε να είναι κάθετο στο επίπεδο της βάσης και να προσεγγίζει το σημείο στην ακμή του πιγουνιού της προτομής και με ένα δεύτερο όργανο μέτρησης γωνιών 90° βρίσκει το τεμνόμενο σημείο. Χρησιμοποιώντας τη μετρική



δαγκάνα γλυπτικής, μετράει την απόσταση που επιθυμεί, μεταξύ των σημείων, του σημείου αναφοράς και του τεμνόμενου.

3.4.3 Μετρική κλίμακα

Μετρική κλίμακα

Η μετρική κλίμακα για τη μέτρηση μήκους



Εικόνα 3.28: Η μετρική κλίμακα κατασκευασμένη από ξύλο.

Βέβαια χρησιμοποιείται και σε άλλα στάδια κατά τη διάρκεια των κατεργασιών, ώστε να επαληθεύσει τις διαστάσεις που πρέπει να έχει το γλυπτό.

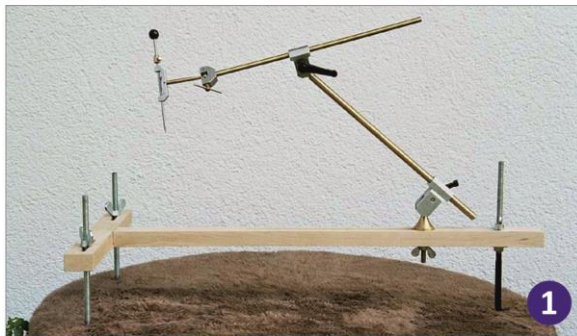
Η μετρική κλίμακα ή μέτρο (εικόνα 3.28) είναι μια θεμελιώδης μονάδα μέτρησης μήκους και την χρησιμοποιούν οι γλύπτες για τη διαστασιολόγηση του γλυπτού. Στην αγορά πλέον μπορεί να βρεθεί μια πληθώρα από μετρικές κλίμακες σε διάφορες διαστάσεις, οι οποίες μπορεί να είναι από μεταλλική, ξύλινη ή πλαστική κατασκευή και είναι καθαρά στη προτίμηση του γλύπτη ποιά θα χρησιμοποιήσει [18]. Συνήθως, επιλέγεται η κλίμακα των δύο μέτρων.

Το όργανο μέτρησης αυτό, το χρησιμοποιεί ο γλύπτης κυρίως κατά τα αρχικά βήματα της γλυπτικής διαδικασίας, όπου σημαδεύει στον ακατέργαστο λίθο, ένα προσχέδιο του γλυπτού, ώστε να προχωρήσει στη κατεργασία εκχόνδρισης.

3.4.4 Όργανο μέτρησης σημείου

Όργανο μέτρησης σημείου

Το όργανο μέτρησης σημείου και ο τρόπος χρήσης του



Εικόνα 3.29: Το όργανο μέτρησης σημείου με τη ξύλινη βάση του (1) και η τοποθέτησή του (2).

Ο μηχανισμός μέτρησης σημείου είναι όργανο μέτρησης, το οποίο χρησιμοποιείται από τον γλύπτη για να επιτύχει ακριβής μεταφορά στο λίθο, του πρωτότυπου μοντέλου, που συνήθως έχει προκατασκευάσει από πηλό, γύψο ή κερί. Αν και η ευρεσιτεχνία του οργάνου αυτού αποδίδεται σε δύο γλύπτες του 18^{ου} αιώνα, το Γάλλο Nicolas – Marie Gatteaux και τον Βρετανό John Bacon [17][18], η βασική τεχνική με μέτρηση σημείων που χρησιμοποιεί το όργανο είναι αρκετά αρχαιότερη. Ευρήματα σε γλυπτά, έχουν υποδείξει ότι οι αρχαίοι Έλληνες χρησιμοποιούσαν τη μέθοδο μέτρησης σημείου, όπου έχοντας ορίσει τρία σημεία αναφοράς (συνήθως έβαζαν καρφιά στα σημεία αυτά για να τα σημαδέψουν) μετρούσαν όποιο σημείο επιθυμούσαν με τρεις διαβήτες γλυπτικής [B2].

Αν και υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτού του οργάνου, στη βασική του μορφή που παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 3.29, αποτελείται από μία πτυσσόμενη βελόνα, η οποία μπορεί να σταθεροποιηθεί στο σημείο που θέλει να μετρήσει ο γλύπτης. Αυτή η βελόνα οδηγείται στο σημείο μέτρησης από ένα σύστημα συνδέσμων – αρθρώσεων (πρισματικού και



περιστροφικού τύπου), οι οποίες διαθέτουν και μηχανισμούς συγκράτησης (συνήθως σφικτήρες), ώστε ο χειριστής να μπορεί να τις σταθεροποιήσει. Οι σύνδεσμοι και οι αρθρώσεις είναι κατασκευασμένες είτε από ορείχαλκο, είτε στα πιο μοντέρνα από χάλυβα. Ο μηχανισμός αυτός διαθέτει και βάση στήριξης, συνήθως ξύλινης κατασκευής. Η βάση στήριξης τοποθετείται πάντα παράλληλα στα σημεία του γλυπτού που επιθυμεί να μετρήσει και με την τοποθέτηση αυτή διευκολύνει τη βελόνα να είναι πάντα κάθετη σε αυτά. Το σύστημα των αρθρώσεων προσδίδει στο όργανο αρκετούς βαθμούς ελευθερίας, για να επιτυγχάνεται η μέτρηση οπουδήποτε σημείου.



4. Στάθμη γνώσεων έξυπνων εργαλείων

Σήμερα, δεν υπάρχει στην αγορά κάποιο έξυπνο εργαλείο, που να μπορεί να κατεργαστεί με κρουστική λάξευση τους λίθους, ώστε να χρησιμοποιηθεί στις κατεργασίες της γλυπτικής διαδικασίας. Τα σύγχρονα εργαλεία που χρησιμοποιούνται κατά κόρων στην γλυπτική τέχνη είναι τα ηλεκτρικά περιστροφικά τρυπάνια, τα πνευματικά σφυριά, οι ηλεκτρικοί και πνευματικοί περιστροφικοί τροχοί κ.α., τα οποία αναλύθηκαν εκτενέστερα στο Κεφάλαιο 3.

Η λειτουργία των περισσότερων από αυτών των εργαλείων βασίζεται στην περιστροφή των κοπτικών ή των λειαντικών τερματικών εργαλείων που φέρουν, με εξαίρεση τη λειτουργία των ηλεκτρικών κρουστικών τρυπανιών και του πνευματικού σφυριού, τα οποία παράγουν κρούσεις. Βέβαια, κανένα από αυτά δεν φέρει ηλεκτρονικές διατάξεις ικανές να μετρήσουν τα φαινόμενα που δημιουργούνται κατά τη λειτουργία τους και δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως έξυπνα εργαλεία.

Ακόμα και οι εργαλειομηχανές αριθμητικού ελέγχου, που θεωρούνται το αποκορύφωμα της τεχνολογίας στον τομέα των εργαλείων, δεν διαθέτουν λειτουργίες κρουστικής κατεργασίας. Η κατεργασία που πραγματοποιούν στο τεμάχιο, επιτυγχάνεται μέσω περιστροφικής κίνησης του τερματικού εργαλείου. Οι εργαλειομηχανές αυτές, έχουν κατασκευαστεί για κατεργασίες κυρίως σε μέταλλα, αλλά μπορούν να κατεργαστούν μια πληθώρα υλικών, όπως πλαστικά (το πολυβινυλοχλωρίδιο ή Polyvinyl chloride ή PVC, η πολυακετάλη ή polyoxymethylene ή POX, είναι γνωστή και ως ertacetal κ.α.), ξύλο, ακόμα και μικρότερου όγκου λίθους.

Από κατασκευαστικής απόψεως οι εργαλειομηχανές είναι στιβαρές κατασκευές, οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα για βαρέως τύπου κατεργασίες και μπορούν να ανταπεξέλθουν στα φορτία που αναπτύσσονται κατά τη λειτουργία τους. Συνήθως, διαθέτουν ένα τραπέζι το οποίο είναι ελεύθερο να κινηθεί κατά τον X και Y άξονα και το οποίο κατευθύνεται από δύο ηλεκτροκινητήρες, ένα για κάθε άξονα.

Στον Z άξονα, διαθέτει ένα στιβαρό μηχανισμό κίνησης, κατευθυνόμενο από ένα τρίτο ηλεκτροκινητήρα. Στο μηχανισμό κίνησης του άξονα Z υπάρχει προσαρτημένο το σύστημα κίνησης και συγκράτησης του κοπτικού τερματικού εργαλείου. Αν και όλοι οι ηλεκτροκινητήρες της εργαλειομηχανής είναι τύπου brushless, ο ηλεκτροκινητήρας του συστήματος κίνησης του κοπτικού εργαλείου είναι διαφορετικής κατασκευής, ο οποίος μπορεί και αναπτύσσει πολύ υψηλότερες στροφές από τους υπόλοιπους.

Η εργαλειομηχανή κατά τη λειτουργία της μετακινεί το τραπέζι στις συντεταγμένες X και Y που επιθυμεί να γίνει αφαίρεση υλικού από το τεμάχιο, το οποίο έχει στερεωθεί με μηχανισμούς συγκράτησης πάνω σε αυτό. Στη συνέχεια αφαιρεί υλικό περιστρέφοντας το κοπτικό στις επιθυμητές στροφές κατεργασίας και τοποθετώντας στο βάθος κοπής που έχει οριστεί, κατά τον άξονα Z. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται έως ότου έχει ολοκληρωθεί η κατεργασία όλης της κάθετης επιφάνειας προς το κοπτικό εργαλείο. Για την κατεργασία και των υπόλοιπων επιφανειών του τεμαχίου, ο χειριστής, ξανά τοποθετεί το τεμάχιο, έτσι ώστε η επιφάνεια που επιθυμεί να κατεργαστεί να είναι κάθετη στο κοπτικό και κατ' επέκταση στον άξονα Z.

Υπάρχουν και πρόσθετοι μηχανισμοί που προσδίδουν τέσσερις ή και περισσότερους άξονες κατεργασίας, οι οποίοι τοποθετούνται και στηρίζονται πάνω στην επιφάνεια του τραπεζιού της εργαλειομηχανής. Αυτοί οι μηχανισμοί όμως μειώνουν και άλλο τον όγκο κατεργασίας της εργαλειομηχανής, αλλά βοηθούν στην επίτευξη λιγότερου χρόνου κατεργασίας του τεμαχίου. Σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι η κατεργασία δύσκολων σημείων του τεμαχίου και η επίτευξη μιας περίπλοκης επιφάνειας του.



Βέβαια, οι στιβαρές αυτές εργαλειομηχανές έχουν ένα περιορισμένο εύρος στον όγκο κατεργασίας τους και προσθέτοντας τους μηχανισμούς περισσότερων αξόνων, περιορίζεται ακόμα περισσότερο. Δεν είναι εφικτή σε αυτές η κατασκευή πρωτότυπων ή αντίγραφων γλυπτών μεγάλης κλίμακας. Από την άλλη στα μικρότερης κλίμακας γλυπτά, οι εργαλειομηχανές μπορούν να επιτύχουν εξαιρετικής ακρίβειας αντιγραφή, όσον αφορά τις διαστάσεις και τη βασική μορφή του, αλλά η τελική υφή της επιφάνειας του γλυπτού θα έχει διαφοροποίηση. Λόγω του ότι, το πρωτότυπο έχει δουλευτεί με κρουστική λάξευση και όχι με τη περιστροφική κίνηση του κοπτικού, που εργάζεται η εργαλειομηχανή.

Με γνώμονα τα προηγούμενα στοιχεία, μελετήθηκαν, φτιάχτηκαν και κατατέθηκαν διπλώματα ευρεσιτεχνίας, με σκοπό την ανάπτυξη ενός μηχατρονικού γλύπτη (parent patent) και ενός έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης (child patent).

Ο μηχατρονικός γλύπτης θα είναι μια εργαλειομηχανή στιβαρής κατασκευής, η οποία θα έχει κατά πολύ μεγαλύτερο χώρο εργασίας και πρόσθετες λειτουργίες, από αυτά που προσφέρουν οι συμβατικές. Η βάση (αντίστοιχη του τραπεζιού των συμβατών εργαλειομηχανών) που διαθέτει ο μηχατρονικός γλύπτης και σταθεροποιείται το ακατέργαστο λίθινο τεμάχιο, έχει τρεις βαθμούς ελευθερίας. Δηλαδή, εκτός από την κίνηση στους Χ και Υ άξονες, διαθέτει και οριζόντια περιστροφή 360° σε αυτούς, επιτρέποντας την εργασία σε όλες τις επιφάνειες του λίθου, εκτός από το κάτω επίπεδο βάσης.

Σε αντίθεση με τις υπάρχουσες εργαλειομηχανές, ο Ζ άξονας είναι παράλληλος στο λίθο, και επιτρέπει την κατακόρυφη κίνηση σε όλο το ύψος του λίθου, εξασφαλίζοντας έτσι την κατεργασία σε όλη την επιφάνεια του. Ο μηχανισμός που προσαρτάται το τερματικό εργαλείο σμίλευσης είναι τοποθετημένος σε αυτόν τον κατακόρυφο άξονα και είναι κατασκευασμένος έτσι ώστε να μπορεί να οδηγήσει την άκρη του κρουστικού εργαλείου με 6 βαθμούς ελευθερίας, από μόνος του. Επίσης, διαθέτει σύστημα τύπου πνευματικού σφυριού στο οποίο και προσαρτάται το τερματικό κρουστικό εργαλείο, ώστε να παράγει τις απαραίτητες κρούσεις για την κατεργασία του λίθου.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η οδήγηση του μηχατρονικού γλύπτη πραγματοποιείται από δική του πλατφόρμα CAM, διότι η πολυπλοκότητα της κατεργασίας δεν μπορεί να επεξεργαστεί από τις συμβατικές. Ο μηχατρονικός γλύπτης θα λειτουργεί διαφορετικά από τις συνηθισμένες εργαλειομηχανές αφαίρεσης υλικού, γιατί θα διαθέτει περισσότερους άξονες λειτουργίας και η κατεργασία που θα πραγματοποιεί επέρχεται από κρούσεις του τερματικού εργαλείου.

Το έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης είναι μία σμίλη από ανοξείδωτο χάλυβα η οποία στο εσωτερικό της ενσωματώνει ηλεκτρονικές και αισθητήριες διατάξεις, ικανές να μετρήσουν, να αποστείλουν και να καταγράψουν δεδομένα από την κατεργασία κρουστικής λάξευσης. Τα δεδομένα αυτά θα χρησιμοποιούνται είτε για την περεταίρω επεξεργασία, ώστε να εξαχθούν τεχνολογικά μεγέθη που περιγράφουν τη διαδικασία κρουστικής λάξευσης, είτε για την άμεση αποστολή των δεδομένων στο μηχατρονικό γλύπτη, ο οποίος θα τα αξιοποιήσει για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής κατεργασίας του λίθου.

Η σχεδίαση του έξυπνου εργαλείου είναι τέτοια ώστε να γίνεται εφικτή η αλλαγή της απόληξης του, συνδυάζοντας έτσι σε ένα εργαλείο όλους τους τύπους σμίλης. Επίσης, η σχεδίαση του, του επιτρέπει να χρησιμοποιηθεί, έκτος από το συνδυασμό του με το παραδοσιακό σφυρί γλυπτικής και με το πνευματικό σφυρί ή να τοποθετηθεί στο μηχατρονικό γλύπτη.



5. Τα κυριότερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη και οι φυσικές ιδιότητές τους

Εκτός από τις τεχνικές και τα εργαλεία, που θα χρησιμοποιήσει ο γλύπτης, θεμελιώδες στοιχείο στη σμίλευση ενός γλυπτού είναι το είδος του λίθου κατεργασίας. Οι φυσικοί λίθοι είναι στερεά σώματα, που έχουν σχηματιστεί από πετρώματα, ιζήματα και άλατα στο φλοιό της γης, όπου η εξόρυξη τους γίνεται σε λατομία.

Τα πετρώματα μπορούν να χωριστούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, όπου στην κατηγοριοποίηση αυτή το σημαντικότερο ρόλο παρουσιάζει ο τρόπος με τον οποίο σχηματίστηκαν [B6][B7][B8][I19]. Οι κατηγορίες πετρωμάτων είναι:

- τα πυριγενή,
- τα ιζηματογενή
- και τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα.

Βάσει αυτών η κατάταξη των φυσικών λίθων που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη είναι η ακόλουθη: Στα πυριγενή πετρώματα κατατάσσεται ο γρανίτης, στα ιζηματογενή πετρώματα ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος, ενώ στα μεταμορφωσιγενή πετρώματα το μάρμαρο, ο σαπωνόλιθος και το αλάβαστρο. Οι γενικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων αυτών, βρίσκονται συγκεντρωτικά στο παρακάτω πίνακα.

Γενικές ιδιότητες φυσικών λίθων							
Γενικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες φυσικών λίθων που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη							
Φυσικός λίθος	Πυκνότητα		Μέτρο ελαστικότητας		Αντοχή σε θλίψη	Σκληρότητα	
	ρ	[$\times 10^3 \text{kg/m}^3$]	E	[GPa]	σ_0	[MPa]	[Mohs]
Γρανίτης	2.6	2.82	10	77	140	434	6 - 7
Ψαμμίτης	2.3	2.48	18	20.2	5	80	6.5 - 7
Ασβεστόλιθος	2.5	2.7	10	77	60	170	3 - 4
Μάρμαρο	2.64	3.02	24	103	38	280	3 - 4
Σαπωνόλιθος	2.9	3.0	70	100	17.5	24.1	1 - 4
Αλάβαστρο	2.3	2.33	1.585	2.574	87	90	1.5 - 2

Πίνακας 1: Οι γενικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των φυσικών λίθων που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη, ταξινομημένοι βάσει της κατηγορίας σχηματισμού τους.

5.1 Πυριγενή πετρώματα

Πετρώματα όπως τα πυριγενή (ή διαφορετικά εκρηξιγενή) έχουν σχηματιστεί από τη ψύξη και στερεοποίηση του μάγματος. Αυτά μπορεί να είναι: α) τα πλουτώνια πετρώματα (όπως ο γρανίτης

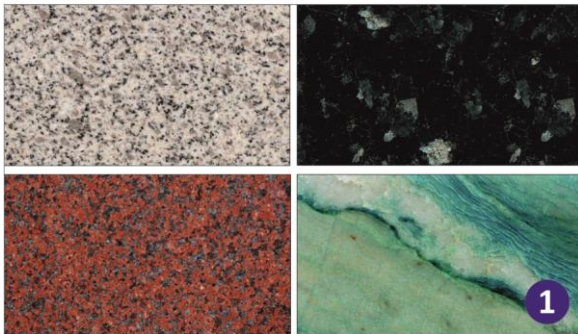


κ.α.), τα οποία σχηματίζονται σε μεγάλο βάθος, β) τα φλεβιτικά πετρώματα (όπως οι πορφυρίτες κ.α.), που σχηματίζονται σε ρήγματα και γ) τα ηφαιστειακά πετρώματα (όπως ο βασάλτης κ.α.), που σχηματίζεται στην επιφάνεια της γης [B6][B7][B8][I20][I21]. Στην γλυπτική χρησιμοποιείται κυρίως ο γρανίτης για την κατασκευή ενός γλυπτού και κάποια ηφαιστειακά πετρώματα ως λειαντικά μέσα, όπως η ελαφρόπετρα (ή κίσηρη).

5.1.1 Γρανίτης

Γρανίτης

Διάφορες αποχρώσεις του γρανίτη



Εικόνα 5.1: Ο γρανίτης σε μερικές από τις αποχρώσεις του (1) και η εφαρμογή του (2).

Ο γρανίτης (ή granite), όπως προαναφέρθηκε, ανήκει στα πλουτώνια πυριγενή πετρώματα και σχηματίζεται σε μεγάλα βάθη από την στερεοποίηση και κρυστάλλωση του μάγματος. Στη σύνθεσή του, αποτελείται κυρίως από άστριους και χαλαζία, αλλά περιέχουν και σιδηρομαγνησιούχα υλικά, όπως μαρμαρυγίες κ.α.. Η σύσταση του καθορίζει και το χρώμα του, το οποίο μπορεί να είναι λευκό, πορφυρό, ροζ, γκρι, μαύρο και άλλα. Το σχήμα 1 της εικόνας 5.1 παρουσιάζει διάφορες αποχρώσεις του γρανίτη, μεταξύ λευκού, μαύρου, πορφυρού και γαλάζιου.

Ο γρανίτης διαθέτει μια χαρακτηριστική μορφή, η οποία απαρτίζεται από συμπλέγματα κρυσταλλικών δομών. Οι φυσικές ιδιότητες του το κατατάσσουν ως ένα υλικό μεγάλης σκληρότητας, 6 με 7 βαθμούς στη κλίμακα Mohs (βλ. πίνακα 1, κεφάλαιο 5) και παρουσιάζει εξαιρετική μηχανική αντοχή σε θλίψη, από 140 έως 434 MPa.

Το πορώδες του κυμαίνεται από 0.4% έως 1.5%, το οποίο είναι ένα αρκετά χαμηλό ποσοστό και σε συνδυασμό με την αυξημένη πυκνότητα που διαθέτει, του επιτρέπει να διατηρεί τις μηχανικές του ιδιότητες, στις διάφορες μεταβολές των

καιρικών συνθηκών που επικρατούν στον περιβάλλοντα χώρο [I21].

Λόγω της μεγάλης σκληρότητάς του, ο γρανίτης, απαιτεί ειδικού τύπου εργαλεία που είναι είτε εξολοκλήρου είτε με επικάλυψη καρβιδίου. Εκτός από αυτά τα ειδικού τύπου εργαλεία, ο γλύπτης χρησιμοποιεί και διαφορετικές τεχνικές κατεργασίας, από αυτές που θα ακολουθούσε για τους μικρότερης σκληρότητας λίθους. Μια τέτοια τεχνική είναι η γωνία κλίσης της σμίλης, όπου στον γρανίτη πρέπει να είναι σε γωνία 90° με την επιφάνεια κατεργασίας, για να τη συνθλίβει. Στο σχήμα 2 της εικόνας 5.1, παρουσιάζεται ένα γλυπτό μοντέρνας τέχνης από μαύρο γρανίτη.

5.2 Ιζηματογενή πετρώματα

Τα ιζηματογενή είναι πετρώματα τα οποία σχηματίστηκαν από τη συσσώρευση διαλυμένου υλικού στην επιφάνεια της γης, το οποίο μεταφέρθηκε από την αρχική τοποθεσία διαλυμένο σε νερό (π.χ. να το μετέφερε η ροή ενός ποταμού) ή στον αέρα σε μορφή σκόνης ή το μετέφερε η βροχή. Αυτή η συσσώρευση διαλυμένων υλικών σε πιθανά σημεία εναπόθεσης που αναφέρονται παρακάτω, επέρχεται μια διαδικασία στερεοποίησής τους, η οποία ονομάζεται διαγένεση ή λιθοποίηση και έχει διάρκεια μερικά εκατομμύρια χρόνια [B6][B7][B8][I23][I24].



Συνήθως εμφανίζονται σε λίμνες, σε εκβολές ποταμών, σε πρόποδες βουνών και άλλα σημεία στην επιφάνεια της γης και βρίσκονται σε χαρακτηριστική διάταξη επάλληλων στρωμάτων. Τα ιζηματογενή πετρώματα που χρησιμοποιούνται στην γλυπτική είναι ο ψαμμίτης και ο ασβεστόλιθος.

5.2.1 Ψαμμίτης

Ο ψαμμίτης (ή sandstone) είναι ιζηματογενές πέτρωμα που αποτελείται κυρίως από κόκκους άμμου, με χαλαζία και άστριους και με προσμίξεις άλλων κόκκων από πετρώματα. Η σύνθεση τους μεταβάλλει το χρώμα και τα χαρακτηριστικά του, σχηματίζοντας διαφορετικά είδη ψαμμίτη. Τα βασικότερα είδη ψαμμίτη είναι ο χαλικοψαμμίτης, οι αργιλοί ψαμμίτες, οι ασβεστολιθικοί και οι μαργαϊκοί [125].

Ψαμμίτης

Η υφή και η απόχρωση του ψαμμίτη



Εικόνα 5.2: Ο ψαμμίτης (1) και η χρήση του στη γλυπτική τέχνη (2).

Ο χαλικοψαμμίτης έχει συνήθως λευκή απόχρωση και παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα και ανθεκτικότητα. Οι αργιλοί ψαμμίτες έχουν ποικιλία αποχρώσεων και είναι μικρής σκληρότητας και αντοχής. Οι ασβεστολιθικοί έχουν κυρίως κίτρινες αποχρώσεις και παρουσιάζουν μικρή σκληρότητα και ανθεκτικότητα. Οι μαργαϊκοί ψαμμίτες, οι οποίοι είναι σχετικά μικρής σκληρότητας και αντοχής.

Στο σχήμα 1 της εικόνας 5.2, παρουσιάζεται η υφή και το χρώμα του ψαμμίτη. Επίσης, μπορεί να διακριθεί και χαρακτηριστική διάταξη των αλληπάλληλων στρωμάτων από τη εναπόθεση των ιζημάτων κατά τη διαδικασία σχηματισμού του. Αυτά τα στρώματα ξεχωρίζουν από τις χρωματικές διαβαθμίσεις του λίθου και υποδεικνύουν και τη διαφορετική σύσταση που διαθέτουν. Ένα γλυπτό, μοντέρνας τέχνης, κατεργασμένο σε ψαμμίτη, από τον γλύπτη James Bayliss το έτος 2012, σχήμα 2.

Από τον πίνακα 1, κεφαλαίο 5, μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο ψαμμίτης παρουσιάζει μεγάλη σκληρότητα από 6.5 έως 7 βαθμούς της κλίμακας Mohs, περίπου όπως και ο γρανίτης. Από την άλλη ο ψαμμίτης είναι ένα υλικό, το οποίο δεν έχει καλή

συμπεριφορά σε θλιπτικά φορτία, περίπου 1 έως 9 MPa, ενώ ο γρανίτης παρουσιάζει μηχανική αντοχή από 140 έως 434 MPa. Αυτή η μικρή αντοχή που παρουσιάζει, όταν του ασκηθούν μηχανικές τάσεις, τον καθιστά ένα αρκετά εύκολο υλικό για κατεργασίες λάξευσης.

Το μεγάλο πορώδες που διαθέτει και η μικρή πυκνότητα του, επιτρέπει στο ψαμμίτη να μεταβάλλει τις μηχανικές ιδιότητές του, από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλοντα χώρο. Αυτή η ιδιότητά του δεν είναι πάντα θεμιτή, όταν ο λίθος αυτός πρόκειται να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός γλυπτού.

Αφενός, το να αλλάζει μηχανικές ιδιότητες ένα υλικό κατά τη διάρκεια της κατεργασίας του είναι ανεπιθύμητο, για το λόγο ότι, θα μπορούσε να οδηγήσει σε κάποιο πιθανό σφάλμα. Αφετέρου δε, η μακροχρόνια έκθεση του σε μεταβολές της θερμοκρασίας και της υγρασίας, μπορεί να οδηγήσει σε αλλοιώσεις ή και σε καταστροφή του. Ενδεικτικά, το πορώδες του είναι από 7% μέχρι 34%. Αυτό σημαίνει ότι, από το συνολικό του όγκο το 7% μέχρι 34% (ανάλογος με τη σύστασή του) είναι όγκος κενών (πόροι).



5.2.2 Ασβεστόλιθος

Ασβεστόλιθος

Η υφή και η απόχρωση του ασβεστόλιθου



Εικόνα 5.3: Ο ασβεστόλιθος (1) και ένα παράδειγμά του στη γλυπτική (2).

Οι ασβεστόλιθοι (ή limestone) συναντιούνται συνήθως σε δύο κατηγορίες τους πορώδεις και τους συμπαγείς. Οι πορώδεις ασβεστόλιθοι κατατάσσονται στους μαλακούς λίθους και έχουν μεγάλο πορώδες, δηλαδή πολλά κενά στη μάζα τους. Επίσης, παρουσιάζουν καλή, μονωτική συμπεριφορά στη θερμοκρασία. Ενώ οι συμπαγείς ασβεστόλιθοι έχουν λιγότερα κενά (μικρότερο πορώδες) και διαθέτουν μεγαλύτερη σκληρότητα. Οι κατεργασίες σε πορώδεις ασβεστόλιθους είναι εξαιρετικά εύκολη, ενώ οι συμπαγείς δουλεύονται πιο δύσκολα [26].

Είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται αρκετά στην γλυπτική και ειδικότερα κατά τα αρχικά βήματα εκμάθησης του γλύπτη, με σκοπό να μάθει τις τεχνικές κατεργασίας και τη χρήση των εργαλείων της γλυπτικής τέχνης. Αυτό γιατί είναι ένας αρκετά μαλακός λίθος και μπορεί να δουλευτεί πολύ εύκολα.

Η σκληρότητα που παρουσιάζει, σύμφωνα με τα στοιχεία του πίνακα 1 κεφάλαιο 5, κυμαίνεται στις 3 με 4 μονάδες της κλίμακας Mohs και το πορώδες του είναι μεταξύ 0.7% έως 3.0%. Από την άλλη, παρουσιάζει σχετικά καλή αντοχή σε θλιπτικά

φορτία, περίπου 60 με 170 MPa, αλλά είναι ένα υδροπερατό πέτρωμα και διαβρώνεται αρκετά εύκολα με το νερό.

Η υφή και η απόχρωση του ασβεστόλιθου απεικονίζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 5.3. Ενώ το σχήμα 2 παρουσιάζει, ένα γλυπτό σμιλεμένο σε ασβεστόλιθο. Το γλυπτό, αυτό χρονολογείται την περίοδο της Ελληνιστικής εποχής, περίπου το 325 μέχρι το 300 π.Χ. και βρέθηκε στην Σπαρτιατική αποικία της Μεγάλης Ελλάδας, την πόλη Τάραντα, σημερινό Taranto, που βρίσκεται στη νότια Ιταλία. Στο γλυπτό αναπαρίστανται ένας νέος πολεμιστής και μια γυναίκα, σε όρθια θέση μέσα σε ένα βωμό, οι οποίοι θρηνούν το νεκρό τους. Επίσης, εικάζεται ότι μπορεί να απεικονίζει μια σκηνή πιθανότατα από κάποια αρχαία Ελληνική τραγωδία [127].

5.3 Μεταμορφωσιγενή πετρώματα

Τα μεταμορφωσιγενή πετρώματα, όπως εικάζει και η ονομασία τους, είναι πετρώματα που έχουν προκύψει από την αλλαγή μορφής κάποιου προϋπάρχοντος, όταν βρεθεί υπό συνεχείς συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Το αρχικό πέτρωμα συνήθως ανήκει στα ιζηματογενή ή στα πυριγενή πετρώματα, άλλα μπορεί να είναι και κάποιο παλιότερο μεταμορφωσιγενές. Τα κύρια είδη μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική είναι το μάρμαρο, ο σαπωνόλιθος και το αλάβαστρο [B6][B7][B8][128][129].

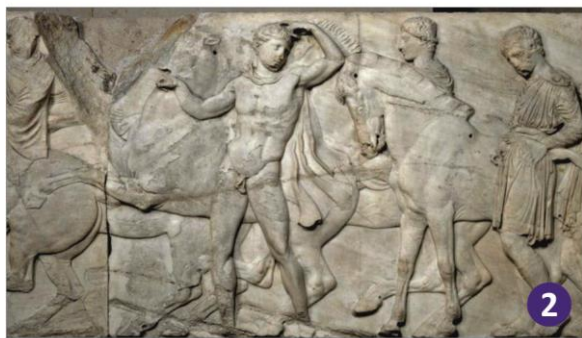
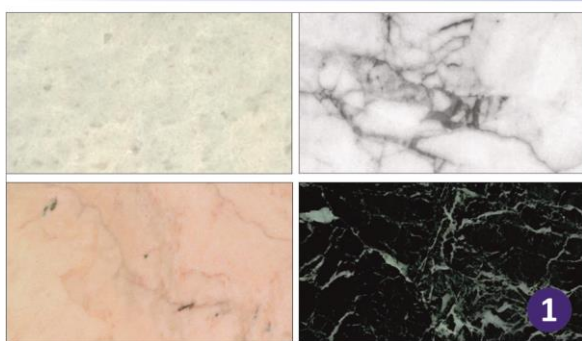


5.3.1 Μάρμαρο

Το μάρμαρο (ή marble) είναι ένα μεταμορφωσιγενές πέτρωμα, το οποίο προέρχεται από τη μεταποίηση του ασβεστόλιθου, όταν βρεθεί υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης. Ίσως, είναι το πιο σημαντικό υλικό στη γλυπτική τέχνη. Χρησιμοποιείται κατά κόρων για την κατασκευή γλυπτών, διότι είναι ένα υλικό που διαμορφώνεται με σχετικά εύκολη κατεργασία λάξευσης, μπορεί να λειανθεί και να σιλιβωθεί εύκολα, αποδίδοντας του μια εξαιρετικής λάμψης επιφάνεια και αναδεικνύοντας τη φυσική του ομορφιά. Επίσης, ένα ακόμα χαρακτηριστικό είναι η ποικιλία χρωμάτων του που καλύπτει όλες τις αποχρώσεις [130].

Μάρμαρο

Διάφορες αποχρώσεις του μαρμάρου



Εικόνα 5.4: Μερικές από τις αποχρώσεις του μαρμάρου (1) και ένα παράδειγμα εφαρμογής του στη γλυπτική (2).

Στο σχήμα 1, παρουσιάζονται συνοπτικά τρεις από τις πιο αντιπροσωπευτικές αποχρώσεις των Ελληνικών μαρμάρων και ένα Πορτογαλικής προέλευσης. Στα αριστερά και πάνω του εν λόγω σχήματος, απεικονίζεται η υφή του λευκού μαρμάρου της Νάξου, η οποία διαθέτει πολλούς χαρακτηριστικούς κρυστάλλους. Άλλο ένα μάρμαρο σε λευκή απόχρωση είναι στα δεξιά πάνω του σχήματος και έχει προέλευση από τη Μακεδονία. Το μάρμαρο αυτό διαθέτει έντονα κριζωπά νερά.

Πέραν των λευκών αποχρώσεων στο σχήμα 1, αριστερά και κάτω, παρουσιάζεται ένα σε ροζ, του οποίου η προέλευση είναι από τη πόλη Εστρεμόζ της Πορτογαλίας. Το τέταρτο και τελευταίο μάρμαρο που παρουσιάζεται στο σχήμα (κάτω δεξιά) έχει προέλευση από την Τήνο και βρίσκεται σε σκούρες πράσινες αποχρώσεις, με έντονα ανοικτά πράσινα έως τελείως λευκά νερά.

Στο σχήμα 2 της εικόνας 5.4, παρουσιάζεται τμήμα της ζωφόρου του Παρθενώνα, το οποίο είναι κατασκευασμένο σε λευκό μάρμαρο από τα ορυχεία της Πεντέλης. Το συγκεκριμένο γλυπτό κοσμούσε το βόρειο τμήμα του ναού. Το 1806 μ.Χ. αφαιρέθηκαν από τον Thomas Bruce, 7^ο κόμη του

Έλγιν και μεταφέρθηκαν στο Βρετανικό μουσείο του Λονδίνου, όπου παραμένουν έως και σήμερα. Όλη η ζωφόρος απεικονίζει ένα πραγματικό γεγονός, την πομπή των Παναθηναίων, που ήταν η μεγαλύτερη θρησκευτική γιορτή εκείνη τη περίοδο στην Αθήνα. Το έργο αυτό χρονολογείται το 438 με 432 π.Χ. και σχεδιάστηκε από το γλύπτη Φειδία [131].

Από τις μηχανικές και φυσικές ιδιότητες του μαρμάρου, που παρουσιάζονται στο πίνακα 1, κεφάλαιο 5, παρατηρείται ότι το μάρμαρο διαθέτει τη μεγαλύτερη πυκνότητα από τους λίθους που μελετήθηκαν, από 2.64 έως 3.02 επί 10^3 kg/m^3 και χαμηλό πορώδες από 0.2% έως 3.0%. Επίσης, η σκληρότητα του κυμαίνεται από 3 μέχρι 4 μονάδες της κλίμακας Mohs και η αντοχή σε μηχανικά φορτία θλίψης είναι από 38 – 280 MPa. Αυτές οι τεράστιες αποκλίσεις στα εύρη των τιμών, οφείλονται στο ότι υπάρχουν πολλά είδη μαρμάρων και το καθένα παρουσιάζει διαφορετικά χαρακτηριστικά.



5.3.2 Σαπωνόλιθος

Σαπωνόλιθος

Η υφή και η απόχρωση του σαπωνόλιθου



Εικόνα 5.5: Ο σαπωνόλιθος (1) και παράδειγμα χρήσης του στη γλυπτική τέχνη (2).

Ο σαπωνόλιθος (ή στεατίτης και με Αγγλική ονομασία soapstone) είναι ένας μικρής σκληρότητας και μεγάλης πυκνότητας λίθος, με καλή ανθεκτικότητα κυρίως στη θερμοκρασία [132]. Αποτελείται κυρίως από τάλκη με διάφορες προσμίξεις, όπως ο χλωρίτης, οι αμφίβολοι και άλλες. Λόγω της μικρής σκληρότητας που διαθέτει, είναι ένα υλικό που μπορεί να δουλευτεί αρκετά εύκολα από τον γλύπτη.

Ο σαπωνόλιθος μπορεί να βρεθεί σε διάφορες αποχρώσεις όπως μαύρο, σκούρο πράσινο, πράσινο και γκριζό. Στο σχήμα 1 της εικόνας 5.5, παρουσιάζεται η υφή του σε μαύρη απόχρωση. Στο εν λόγω σχήμα διακρίνονται και τα νερά που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος, τα οποία είναι σε σκούρες αποχρώσεις του γκρι. Άλλοι σαπωνόλιθοι με διαφορετική απόχρωση στο βασικό τους χρώμα, παρουσιάζουν άλλες χρωματικές συνθέσεις στα νερά τους, όπως πράσινες.

Το σχήμα 2 της εικόνας 5.5, απεικονίζει ένα γλυπτό μιας φιγούρας δελφινιού, η οποία έχει σμιλευτεί από τον γλύπτη Max Sexsmith. Το γλυπτό αυτό είναι κατεργασμένο σε σαπωνόλιθο, με σκούρα πράσινη απόχρωση και διαθέτει ιδιαίτερα νερά σε

ανοικτό πράσινο και γκρι συνδυασμούς. Η επιφάνεια του γλυπτού έχει λειανθεί με φυσικό κερί, το οποίο του έχει προσδώσει ένα εξαιρετικά λείο και γυαλιστερό φινίρισμα, αναδεικνύοντας έτσι τη φυσική ομορφιά του λίθου.

Πέρα από τις καλαισθητες αποχρώσεις του, ο σαπωνόλιθος παρουσιάζει μεγάλη πυκνότητα, περίπου 2.9 με 3.0 επί 10^3 kg/m^3 και σκληρότητα 1 μέχρι 4 της κλίμακας Mohs (πίνακας 1, κεφάλαιο 5). Αυτό το μεγάλο εύρος τιμών σκληρότητας είναι ένα χαρακτηριστικό που δεν το εμφανίζουν σε τέτοιο βαθμό τα υπόλοιπα πετρώματα που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία και οφείλεται στο ποσοστό της τάλκης και των αλάτων που διαθέτει το κάθε είδος του.

Από την άλλη, ο σαπωνόλιθος παρουσιάζει τη μικρότερη αντοχή σε μηχανικά φορτία κατά τη θλίψη, περίπου 17.5 με 24.1 MPa και σε συνδυασμό με τη χαμηλή σκληρότητά του, κατατάσσεται ως ένας από τους μαλακότερους λίθους. Το γεγονός αυτό, τον καθιστά ως ένα υλικό το οποίο είναι εύκολα κατεργάσιμο, αφού μπορεί να χαραχθεί ακόμα και με μαχαίρι και χρησιμοποιείται αρκετά στην γλυπτική τέχνη.

Ένα χαρακτηριστικό του λίθου αυτού, είναι το μικρό πορώδες που διαθέτει και κυμαίνεται στο ποσοστό του 0.08% έως και 0.1%, το οποίο είναι και από τα μικρότερα, πάντα σε σύγκριση με τους λίθους που μελετήθηκαν.



5.3.3 Αλάβαστρο

Αλάβαστρο

Η υφή και η απόχρωση του αλάβαστρου



Εικόνα 5.6: Οι χρωματισμοί του αλάβαστρου (1) και παραδείγματά του στη γλυπτική (2).

χρησιμοποιούσαν για την αποθήκευση και συντήρηση των σημαντικότερων εσωτερικών οργάνων κατά τη διάρκεια της ταρίχευσης. Το κάθε αγγείο απεικόνιζε στο πώμα του τη θεότητα προστάτη του οργάνου (ένα από τους τέσσερεις γιούς του θεού Ώρους) που θα φιλοξενούσε. Έτσι η θεότητα Ντουαμουτέφ που είχε κεφάλι τσακαλιού ήταν προστάτης του στομαχιού, η θεότητα Χαπί ο οποίος είχε κεφάλι μπαμπουΐνου προστάτευε τον πνεύμονα, η θεότητα Ιμσέτ με ανθρώπινο κεφάλι προστάτευε το συκώτι και ο τελευταίος ήταν ο Κεμπεχσενούφ που είχε κεφάλι γερακιού και προστάτευε το σπλάχνα. Τα εν λόγω αγγεία χρονολογούνται κατά τη διάρκεια της 26^{ης} Δυναστείας της Αιγύπτου, περίπου το 664 με 525 π.Χ. [134].

Το αλάβαστρο διαθέτει από τις μικρότερες πυκνότητες, των λίθων που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη, περίπου 2.3 έως 2.33 επί 10³ kg/m³. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό του είναι η μικρή σκληρότητα 1.5 με 2 της κλίμακας Mohs και η μηχανική του αντοχή σε φορτία θλίψης κυμαίνεται από 87 μέχρι 90 MPa. Επίσης, διαθέτει μικρό πορώδες, από 3.52 μέχρι 4.69%.

Το αλάβαστρο (ή alabaster) είναι ένα μεταμορφωσιγενές πέτρωμα, αρκετά διαδεδομένο στη γλυπτική. Τα πετρώματα αυτά απαντώνται σε μεγάλες ποσότητες στην Αίγυπτο και είναι ένας ημιδιάφανος καλσίτης σε ανοικτόχρωμους τόνους. Η σκληρότητα του είναι αρκετά μικρή και κατατάσσεται στους εύκολης κατεργασίας λίθους. Χρησιμοποιείται για τη κατασκευή αγαλμάτων και διαφόρων περίτεχνων αντικειμένων, όπως μυροδοχεία. Η ιδιαιτερότητα της ημιδιάφανης επιφάνειάς του, χαρίζει εξαιρετική ομορφιά στα γλυπτά και είναι από τους πιο ακριβούς λίθους που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική [133][A3].

Η εντυπωσιακή υφή και απόχρωση που διαθέτει ο αλάβαστρος παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 5.6. Η απόχρωσή του είναι κυρίως πορτοκαλή αλλά βρίσκεται και σε λευκή. Ο λίθος αυτός διαθέτει περίτεχνα συμπλέγματα νερών, τα οποία έχουν λευκούς τόνους.

Το σχήμα 2 απεικονίζει τη συμπληρωμένη συλλογή αρχαίων Αιγυπτιακών κανωπικών αγγείων κατασκευασμένα από αλάβαστρο. Τα κανωπικά αγγεία ήταν πάντα τέσσερα σε αριθμό και τα



Μέρος Β΄

Περιγραφή, σχεδιασμός και κατασκευή του έξυπνου εργαλείου κρουστικής
λάξευσης



6. Προδιαγραφές έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Στο πρώτο βήμα υλοποίησης του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, μελετώνται οι προδιαγραφές, ώστε από μια αρχική ιδέα να περάσει στο στάδιο σχεδίασής του και μετέπειτα στη παραγωγή του. Η κύρια προδιαγραφή που τέθηκε, αφορά τη λειτουργικότητά του, εφόσον θα πρέπει να είναι εύχρηστο είτε με την παραδοσιακή τεχνική κατεργασίας (όπου ο γλύπτης το δουλεύει σε συνδυασμό με το παραδοσιακό σφυρί), είτε με τη σύγχρονη τεχνική (όπου ο γλύπτης το χρησιμοποιεί προσαρτημένο σε πνευματικό σφυρί), είτε με τις πιο τεχνολογικά ανεπτυγμένες μεθόδους (όπου προσαρτίζεται σε εργαλειομηχανή κρουστικής λάξευσης).

Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται οι προδιαγραφές που τέθηκαν, για την σχεδίαση του πρότυπου έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης. Οι εν λόγω προδιαγραφές χωρίζονται στις παρακάτω τέσσερις βασικές κατηγορίες και είναι η εργονομία (κατηγορία 1), τα προβλεπόμενα φορτία (κατηγορία 2), οι ηλεκτρονικές διατάξεις και τα εξαγόμενα μεγέθη (κατηγορία 3) και η αυτονομία (κατηγορία 4), οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα στα επιμέρους κεφάλαια που ακολουθούν.

6.1 Εργονομία

Όπως γίνεται αντιληπτό, το έξυπνο εργαλείο θα πρέπει να διαθέτει σχεδίαση τέτοια ώστε να προσφέρει άνεση κατά τη χρήση του, όταν αυτή γίνεται με τις χειρωνακτικές μεθόδους λάξευσης, αλλά και να επιτρέπει την ενσωμάτωση του σε αυτοματοποιημένες μεθόδους, με εργαλειομηχανές κρουστικής λάξευσης. Επομένως, η σχεδίαση του πρέπει να είναι στιβαρή, εργονομική και ευέλικτη, ώστε να ανταποκρίνεται σε οποιαδήποτε μέθοδο κατεργασίας επιθυμεί να ακολουθήσει ο γλύπτης.

Με βάση τις παραπάνω ιδιότητες, το έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης πρέπει να διαθέτει τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- Ικανοποιητικές διαστάσεις και βάρος, να μην διαθέτει κατά πολύ μεγαλύτερες διαστάσεις από τις παραδοσιακές σμίλες χειρός. Μια μεγάλη διαφοροποίηση στις διαστάσεις και το βάρος του, θα το καθιστούσε δύσχρηστο στα χέρια του γλύπτη.
- Στιβαρή κατασκευή, ώστε να μπορεί να διαχειριστεί όλες τις καταπονήσεις που θα επιφέρουν σε αυτό οι κρουστικές κατεργασίες, χωρίς να παρουσιάσει βλάβες ή κάποια ανεπανόρθωτη ζημιά στα επιμέρους τμήματά του, που θα το καθιστούσαν μη λειτουργικό.
- Ταχύτερη και ποιοτικά ανώτερη κατεργασία, ο γλύπτης, να μπορεί με αυτό να κατεργαστεί το λίθο σε μικρότερη χρονική διάρκεια, αλλά και με καλύτερη ακρίβεια στην κατεργασία, από τις παραδοσιακές σμίλες.
- Τέλος, η ασφάλεια χρήσης, να είναι ένα ασφαλές εργαλείο για τον γλύπτη.

Ένα πρόσθετο χαρακτηριστικό που δόθηκε στο εργαλείο, προσδίδοντας του ένα πρόσθετο βήμα ευελιξίας, είναι η δυνατότητα εναλλαγής της εμπρόσθιας ακμής του. Το χαρακτηριστικό αυτό, καθιστά το έξυπνο εργαλείο ικανό να συνδυάσει όλων των τύπων σμίλες σε αυτό. Έτσι, ο γλύπτης, μπορεί να ολοκληρώσει όλες τις τεχνικές λάξευσης, με μόνο αυτό το εργαλείο, απλά αλλάζοντας την ακμή όταν το επιθυμεί.

6.2 Προβλεπόμενα φορτία

Τα μηχανικά φορτία που ασκούνται στο έξυπνο εργαλείο, κατά τη κατεργασία λάξευσης, είναι σημαντικοί παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψιν στη σχεδίαση και την επιλογή υλικού κατασκευής του. Βέβαια, στο σημείο αυτό παρουσιάζεται ένα σημαντικό ζήτημα, εφόσον τα μηχανικά αυτά φορτία, τα οποία αναπτύσσονται στη σμίλη, όταν κατεργάζεται λίθους με τη διαδικασία κρουστικής λάξευσης, δεν έχουν βρεθεί και τεκμηριωθεί, έως τώρα. Επομένως, έπρεπε να ακολουθηθεί διαφορετικός τρόπος σχεδίασης του.



Με βάση το παραπάνω ζήτημα, η σχεδίαση και η επιλογή υλικού κατεργασίας, πραγματοποιήθηκε με επίκεντρο τις μηχανικές ιδιότητες των λίθων που θα κατεργάζεται. Επιλέχθηκε, ο γρανίτης, ο οποίος είναι μεγάλης σκληρότητας και διαθέτει μεγάλη αντοχή σε θλιπτικά φορτία. Ο γρανίτης, παρουσιάζει μέγιστη αντοχή κατά τη θλίψη του, κοντά στα 435 MPa, ενώ οι υπόλοιποι λίθοι έχουν όριο θραύσης περίπου στα 250 MPa. Έτσι, ο γρανίτης κατατάσσεται, ως ο ανθεκτικότερος λίθος σε θλιπτικά φορτία.

Ορίζοντας, λοιπόν, ως κατώτερο κατώφλι μηχανικής αντοχής για το έξυπνο εργαλείο, το όριο θραύσης του γρανίτη, σχεδιάζεται ένα αρκετά ανθεκτικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να κατεργαστεί κρουστικά όλους του λίθους που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη. Τυπικά, το εργαλείο θα πρέπει να ανταπεξέρχεται σε φορτία μεγαλύτερα των 600 MPa κυρίως στις εναλλάξιμες ακμές και στο πίσω τμήμα του που δέχονται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις κατά τις κρούσεις, αλλά και σε όλα τα τμήματά του.

6.3 Ηλεκτρονικές διατάξεις και εξαγόμενα μεγέθη

Μία ακόμα βασική προδιαγραφή που τέθηκε, αφορά τη διερεύνηση των τεχνολογικών μεγεθών που απαρτίζουν τη διαδικασία της κρουστικής λάξευσης. Αυτά τα τεχνολογικά μεγέθη και οι μεταβλητές που περιγράφουν την κρουστική μέθοδο κατεργασίας για τη σμίλευση σε λίθους, παραμένουν έως και σήμερα άγνωστα. Η ίδια η κρουστική μέθοδος λάξευσης, αποτελεί μια κατεργασία που βασίζεται στη τεχνική, την εμπειρία και τη δεξιοτεχνία του κάθε γλύπτη ξεχωριστά. Επομένως, όλες οι παράμετροι που ορίζουν το αποτέλεσμά της επιτυγχάνονται εμπειρικά από τον γλύπτη.

Με σκοπό τη διερεύνηση αυτών των τεχνολογικών μεγεθών που απαρτίζουν τη διαδικασία κρουστικής λάξευσης, ορίστηκε ως προδιαγραφή, το έξυπνο εργαλείο να φέρει στο εσωτερικό του κυρίως τμήματός του, τις κατάλληλες ηλεκτρονικές διατάξεις και αισθητήρια, προκειμένου αυτά τα μεγέθη να μετρηθούν και να καταγραφούν από αυτές. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που επιλέχθηκαν να ενσωματωθούν στο έξυπνο εργαλείο, με σκοπό τη μέτρηση των τεχνολογικών μεγεθών είναι η μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας, ή μονάδα μέτρησης μηχανικού φορτίου και ένα αισθητήριο θερμοκρασίας.

Έτσι, οι μονάδες μέτρησης που αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορούν να μετρήσουν, σε πραγματικό χρόνο, τα παρακάτω μεγέθη:

- Μέτρηση μηχανικού φορτίου σε Newton, μέσω της μονάδας μέτρησης μηχανικού φορτίου.
- Μέτρηση θερμοκρασίας σε βαθμούς κελσίου, δύο διαφορετικές μετρήσεις, μία από το αισθητήριο θερμοκρασίας και η άλλη από τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας.
- Μέτρηση της μεταβολής των γωνιών για τρεις άξονες (x,y,z) σε μοίρες.
- Μέτρηση των γωνιακών ταχυτήτων για τους τρεις άξονες (x,y,z) σε rad/sec, από τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας.
- Μέτρηση των επιταχύνσεων για τους τρεις άξονες (x,y,z) σε m/sec², από τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας.
- Μέτρηση των γραμμικών επιταχύνσεων για του τρεις άξονες (x,y,z) σε m/sec², από τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας.
- Μέτρηση του μαγνητικού πεδίου σε micro Tesla, από τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας.
- Μέτρηση της επιτάχυνσης της βαρύτητας για τους τρεις άξονες (x,y,z), σε m/sec², από τη μονάδα μέτρησης αδρανειακής μάζας.

Τα παραπάνω μετρούμενα μεγέθη αποστέλλονται, χρονικά, στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας που ενσωματώθηκε στο έξυπνο εργαλείο, όπου είναι διασυνδεδεμένες όλες οι μονάδες μέτρησης. Η



κεντρική μονάδα επεξεργασίας του εργαλείου αποστέλλει τα δεδομένα είτε σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (από την ενσύρματη ζεύξη του εργαλείου μέσω της θήρας USB ή από την ασύρματη ζεύξη μέσω της ενσωματωμένης μονάδας Bluetooth), είτε τα αποθηκεύει σε πρόσθετη μνήμη αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD, η οποία τοποθετείται στην ενσωματωμένη μονάδα εισαγωγής της.

Βέβαια, όλες αυτές οι ηλεκτρονικές διατάξεις που ενσωματώνει το έξυπνο εργαλείο, διαθέτουν φυσικό όγκο, ο οποίος καθόρισε και τον σχεδιασμό του. Διότι, όλες οι ηλεκτρονικές διατάξεις, τοποθετήθηκαν στο εσωτερικό μέρος του και αυτό επηρέασε τις τελικές διαστάσεις του μήκους του και ιδιαίτερα της διατομής του.

6.4 Αυτονομία

Η αυτονομία του έξυπνου εργαλείου κρουστική λάξευσης είναι μια σημαντική προδιαγραφή της σχεδίασης του, αφού το μεγάλο χρονικό διάστημα αυτόνομης λειτουργίας το καθιστά εξαιρετικά εύχρηστο. Επίσης, αυξάνει το ρυθμό παραγωγής ενός γλυπτού, αφήνοντας το γλύπτη να εκφράσει ελεύθερα την ιδέα του στο λίθο, χωρίς να αποσπάται κατά τη διάρκεια της κατεργασίας για να το φορτίσει.

Βάσει των παραπάνω, το έξυπνο εργαλείο θα πρέπει να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη διάρκεια λειτουργίας. Αυτό είναι ένα μείζων θέμα, γιατί η μπαταρία θα πρέπει να έχει διαστάσεις τέτοιες ώστε, να μπορεί να φιλοξενηθεί στο εσωτερικό του και έτσι περιορίζεται η επιλογή της σε μικρής χωρητικότητας. Από την άλλη, η αυτονομία δεν περιγράφει μόνο την μπαταρία, αλλά και τις λειτουργίες που έχει να εκπληρώσει. Έτσι, θα πρέπει να διαθέτει ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες θα μπορούν να αποθηκεύσουν τα δεδομένα σε μονάδα αποθήκευσης ή και να τα αποστείλουν ασύρματα ή ενσύρματα σε κάποιο εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Αυτές οι απαιτήσεις αυτονομίας που θα πρέπει να πληροί το έξυπνο εργαλείο, εκπληρώνονται επιλέγοντας τις παρακάτω ηλεκτρονικές διατάξεις:

- Μπαταρία πολυμερών λιθίου Lipo σε τάση 3.7 Volt και χωρητικότητας 600 mAh, όπου και τροφοδοτεί τις ηλεκτρονικές διατάξεις του εργαλείου για τρεις συνεχόμενες ώρες λειτουργίας.
- Μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης της μπαταρίας, η μονάδα αυτή επιτυγχάνει τη σωστή φόρτιση της μπαταρίας αλλά και αυξάνει την τάση της ώστε να ικανοποιηθούν οι ηλεκτρικές απαιτήσεις των υπόλοιπων ηλεκτρονικών διατάξεων, που απαιτούν 5 Volt.
- Μονάδα εισαγωγής πρόσθετης αποθηκευτικής μνήμης τύπου micro SD, τη διασύνδεση πρόσθετης μνήμης, για την αυτόνομη αποθήκευση των δεδομένων εν ώρα λειτουργίας.
- Μονάδα Bluetooth, με αυτή τη μονάδα επιτυγχάνεται η ασύρματη διασύνδεση του έξυπνου εργαλείου, με κάποιο εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να αποσταλούν τα δεδομένα κατά τη λειτουργία του, όπου στη συνέχεια θα αποθηκευτούν σε αυτόν. Αν και η μέγιστη απόσταση ζεύξης είναι τα 10 μέτρα, για λόγους ασφαλείας (όπως να χαθούν μερικά δεδομένα λόγω απώλειας σήματος) δεν θα πρέπει η απόσταση να είναι πολύ μεγαλύτερη των 5 μέτρων.

Βέβαια, η σχεδίαση του εργαλείου επιτρέπει την ενσύρματη χρήση του, μέσω θήρας micro usb. Αυτή η ενσύρματη επικοινωνία επιτρέπει την αποστολή των δεδομένων στον εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή και ταυτόχρονα παρέχει την απαιτούμενη ισχύ για τη κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων των ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου, αλλά και τη φόρτιση της



μπαταρίας του. Μειονέκτημα αυτής της διασύνδεσης είναι το μήκος του καλωδίου, το οποίο δεν πρέπει να ξεπερνάει τα 10 μέτρα, ώστε να μην έχει απώλειες στη λήψη των δεδομένων.



7. Στάδια εξέλιξης μηχανολογικού σχεδιασμού του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Μετά το πέρας του πρώτου βήματος για την υλοποίηση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, το οποίο περιγράφηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο και αφορά τις προδιαγραφές που πρέπει να διαθέτει, ακολουθεί το βήμα σχεδίασης των μηχανολογικών εξαρτημάτων του. Για ένα καινοτόμο αντικείμενο όπως το έξυπνο εργαλείο, το βήμα σχεδίασης των εξαρτημάτων του μπορεί να έχει αρκετά στάδια εξέλιξης, ώστε να προκύψει ένα προϊόν, λειτουργικό και έτοιμο, με σκοπό τη βιομηχανική παραγωγή του.

Στα στάδια εξέλιξης της σχεδίασης ενός αντικειμένου, από την αρχική ιδέα μέχρι το τελικό βιομηχανοποιημένο προϊόν, απαιτείται η σχεδίαση και κατασκευή αρκετών εκδόσεών του. Όπου στη κάθε μεταγενέστερη έκδοση έχουν βελτιστοποιηθεί τα προβληματικά χαρακτηριστικά της προϋπάρχουσας, έως ότου να πληρούνται όλες οι επιθυμητές προδιαγραφές που έχουν τεθεί. Οι βελτιώσεις αυτές των προβληματικών χαρακτηριστικών μια έκδοσης μπορεί να είναι:

- κοσμητικά χαρακτηριστικά,
- κατασκευαστικές ατέλειες,
- λανθασμένη σχεδίαση εξαρτημάτων που εμποδίζουν τη λειτουργικότητα και τη χρηστικότητα του,
- εσφαλμένη ή ελλιπή επιλογή και σχεδίαση ηλεκτρικών διατάξεων και πολλά άλλα.

Βάσει των παραπάνω, η εξέλιξη του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης επιτεύχθηκε σε τέσσερα στάδια, όπου στο καθένα από αυτά τα στάδια βελτιστοποίησης, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μία νέα έκδοσή του, διορθώνοντας έτσι τα προβληματικά χαρακτηριστικά της προϋπάρχουσας έκδοσης.

Τα στάδια ανάπτυξης του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Η εξέλιξη του έξυπνου εργαλείου από την αρχική σχεδίαση του μέχρι και τη βελτιστοποιημένη έκδοσή του

A/A	Στάδια εξέλιξης	Εξωτερικά - Εσωτερικά τμήματα	Προβληματικά χαρακτηριστικά	Βελτιστοποιήσεις
1.	Αρχικό έξυπνο εργαλείο	Αρχικός σχεδιασμός	Αυξημένη πολυπλοκότητα εσωτερικού τμήματος ηλεκτρονικών	
2.	Πρώιμο έξυπνο εργαλείο	Δεύτερος σχεδιασμός	<ul style="list-style-type: none"> • καμπυλότητα strain gauges • ελλιπή ενσωμάτωση ηλεκτρονικών διατάξεων 	Απλοποίηση της σχεδίασης των εσωτερικών τμημάτων
3.	Προ τυποποιημένο έξυπνο εργαλείο	Τρίτος σχεδιασμός	<ul style="list-style-type: none"> • μεγάλες συνολικές διαστάσεις • πολλά επιμέρους τμήματα 	<ul style="list-style-type: none"> • σχεδίαση ειδικού χώρου για τα strain gauges • ενσωμάτωση όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων
4.	Βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο	Τέταρτος σχεδιασμός		<ul style="list-style-type: none"> • ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών σε ένα εσωτερικό τμήμα • ελάττωση συνολικών διαστάσεων

Πίνακας 2: Τα στάδια εξέλιξης του έξυπνου εργαλείου από την αρχική σχεδίασή του μέχρι και τη βελτιστοποιημένη έκδοσή του, με τα προβληματικά χαρακτηριστικά που παρουσίασε η κάθε έκδοση καθώς και οι βελτιστοποιήσεις τους.



Στο πίνακα 2 παρουσιάζονται τα τέσσερα στάδια εξέλιξης του έξυπνου εργαλείου τα οποία είναι: (1) το στάδιο του αρχικού έξυπνου εργαλείου, (2) το στάδιο του πρώιμου έξυπνου εργαλείου, (3) το στάδιο του προ τυποποιημένου έξυπνου εργαλείου και (4) το στάδιο του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου. Επίσης, παρουσιάζονται τα προβληματικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε έκδοσης καθώς και οι βελτιστοποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να διορθωθούν. Οι βελτιστοποιήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν στη σχεδίαση της εκάστοτε μεταγενέστερης έκδοσης.

Έτσι, στον αρχικό σχεδιασμό του έξυπνου εργαλείου ήταν επιθυμητό να σχεδιαστεί και να κατασκευαστεί ένα εργαλείο σμίλευσης, το οποίο θα έφερε τις ηλεκτρονικές διατάξεις (βάσει των προδιαγραφών που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 6), μέσα σε ένα αποσπώμενο τμήμα, προκειμένου να γίνει εφικτή η εύκολη πρόσβαση σε αυτές. Το αποσπώμενο τμήμα που σχεδιάστηκε τοποθετούνταν στο οπίσθιο τμήμα του αρχικού έξυπνου εργαλείου από μια οπή (βλ. εικόνα 7.1) και η κατασκευή του ήταν αυξημένης πολυπλοκότητας, αφού αποτελούνταν από 9 μικρότερα τμήματα.

Η αυξημένη πολυπλοκότητα που διέθετε το τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της αρχικής σχεδίασης του έξυπνου εργαλείου, το καθιστούσε ως προβληματικό χαρακτηριστικό, το οποίο βελτιστοποιήθηκε στην δεύτερη σχεδίασή του. Η βελτιστοποίηση αυτή επιτεύχθηκε επανασχεδιάζοντας εξ ολοκλήρου το έξυπνο εργαλείο. Στη νέα αυτή σχεδίαση το έξυπνο εργαλείο απαρτιζόταν από τέσσερα τμήματα, δύο εξωτερικά και δύο εσωτερικά, όπου στα εσωτερικά τμήματα ενσωματώνονταν οι ηλεκτρονικές διατάξεις του (βλ. εικόνα 7.3).

Το πρώτο προβληματικό χαρακτηριστικό της δεύτερης σχεδίασης ήταν τα strain gauges, τα οποία τοποθετήθηκαν απ' ευθείας υπό κλίση στο κοίλο εσωτερικό του εμπρόσθιου τμήματός του, με αποτέλεσμα να παρουσιάζεται αυξημένος θόρυβος στη μέτρηση του σήματός τους και να επηρεάζεται ο υπολογισμός της μετρούμενης δύναμης. Το δεύτερο προβληματικό χαρακτηριστικό ήταν η ελλiptής ενσωμάτωση των ηλεκτρονικών διατάξεων (όπως στη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth) λόγω του αυξημένου χώρου που καταλάμβαναν οι υπόλοιπες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Η επίλυση των δύο αυτών προβληματικών χαρακτηριστικών της δεύτερης σχεδίασης του έξυπνου εργαλείου επήλθε από τον επανασχεδιασμό, στην τρίτη σχεδίαση του, τόσο των μηχανολογικών τμημάτων, όσο και των ηλεκτρονικών διατάξεών του, προκειμένου να ενσωματωθούν πιο αποδοτικές και αξιόπιστες μονάδες (βλ. κεφάλαιο 9) αλλά και να τοποθετηθούν στα νέα ειδικά διαμορφωμένα εσωτερικά τμήματα συγκράτησής τους.

Επιπροσθέτως, στο εμπρόσθιο εξωτερικό τμήμα διαμορφώθηκε ειδικός χώρος από παράλληλες επιφάνειες προκειμένου να τοποθετηθούν σε αυτές τα strain gauges (βλ. κεφάλαιο 7.3.1), επιλύοντας το πρόβλημα με τη καμπυλότητα τους.

Εκτός από αυτές τις βελτιστοποιήσεις στην τρίτη σχεδίαση του έξυπνου εργαλείου προστέθηκαν χαρακτηριστικά που προσδίδουν την καλύτερη εργονομία και αποδοτικότητα του. Ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά είναι η εναλλάξιμη σμίλη, όπου πλέον στο έξυπνο εργαλείο μπορούν να προσαρτηθούν διάφορες ακμές, όπως η σμίλη σημείου ή η οδοντωτή ή η επίπεδη ή τύπου frosting και άλλες ή ακόμα να αντικατασταθεί κάποια από αυτές εάν φθαρεί. Ένα άλλο χαρακτηριστικό είναι ο οπίσθιος εναλλάξιμος δίσκος κρούσης, ο οποίος επιτρέπει την γρήγορη αντικατάστασή του και είναι αυτός που δέχεται τις μεγαλύτερες καταπονήσεις από τις κρούσεις του σφυριού.

Στην τρίτη σχεδίαση διαπιστώθηκε ότι το έξυπνο εργαλείο διέθετε αρκετά μεγάλες διαστάσεις και απαρτιζόταν από πολλά επιμέρους τμήματα (συνολικά οκτώ, έξι εξωτερικά και δύο εσωτερικά), τα οποία ανεβάζουν το κόστος παραγωγής του.



Τα προβληματικά χαρακτηριστικά της τρίτης σχεδίασης βελτιστοποιήθηκαν επανασχεδιάζοντας το έξυπνο εργαλείο. Στη νέα σχεδίαση τα δύο εσωτερικά τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων ενσωματώθηκαν σε ένα ενιαίο τμήμα. Έτσι, μειώθηκε ο αριθμός των τμημάτων που το απαρτίζουν από οκτώ σε επτά αλλά και οι συνολικές διαστάσεις του. Βέβαια, η νέα σχεδίαση βελτιστοποιεί την εργονομία και τη λειτουργικότητα του έξυπνου εργαλείου, αφού παρέχει εύκολη και γρήγορη πρόσβαση στα εσωτερικά τμήματα των ηλεκτρονικών διατάξεων αλλά και λόγω των σημαντικά μειωμένων διαστάσεων.

Το κάθε ένα από αυτά τα στάδια εξέλιξης παρουσιάζονται σε ξεχωριστά κεφάλαια. Επίσης, στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, η εκτενέστερη ανάλυση των σταδίων αυτών δεν συμπεριλαμβάνεται στη παρούσα εργασία καθώς και όλα τα πρωτότυπα τρισδιάστατα μοντέλα σχεδιάστηκαν με τη βοήθεια της σχεδιαστικής πλατφόρμας CAD, Creo 3.0 της εταιρίας PTC.

7.1 Σχεδίαση και κατασκευή του αρχικού έξυπνου εργαλείου

Όπως προαναφέρθηκε στο πρώτο στάδιο του βήματος σχεδίασης του έξυπνου εργαλείου βρίσκεται η αρχική σχεδίαση του, η οποία παρουσιάζεται στα σχήματα της εικόνας 7.1. Στην αρχική σχεδίαση του, το έξυπνο εργαλείο απαρτίζεται από δύο εξωτερικά τμήματα και ένα αποσπώμενο τμήμα που περικλείει και προστατεύει τις ηλεκτρονικές διατάξεις. Τα δύο εξωτερικά τμήματα του εργαλείου είναι το εμπρόσθιο τμήμα που ενσωματώνει την ακμή της σμίλης και το πίσω τμήμα του που διαθέτει υποδοχή για την προσάρτηση του τμήματος που φέρει τις ηλεκτρονικές διατάξεις.

Η αρχική σχεδίαση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Η τρισδιάστατη απεικόνιση του αρχικού σχεδιασμού του εργαλείου και του τμήματος συγκράτησης των ηλεκτρονικών



Εικόνα 7.1: Το τρισδιάστατο μοντέλο του αρχικού σχεδιασμού του έξυπνου εργαλείου, σε πλήρως συναρμολογημένη μορφή (1), σε τομή του οπίσθιου τμήματος (2), σε συναρμολογημένη μορφή με το τμήμα των ηλεκτρονικών διατάξεων σε ανεπτυγμένη μορφή (3) και το τμήμα των ηλεκτρονικών διατάξεων μόνο του σε ανεπτυγμένη μορφή (4).

Μετά την ολοκλήρωση της σχεδίασης του, ακολουθεί ο έλεγχός του, για τη διόρθωση τυχόν σφαλμάτων, ώστε να περάσει στο επόμενο βήμα, όπου θα κατασκευαστεί σε φυσικό πρωτότυπο



μοντέλο. Έτσι κατασκευάστηκε το πρωτότυπο φυσικό μοντέλο του αρχικού έξυπνου εργαλείου σε θερμοπλαστικό πολυμερές υλικό τύπου ABS (Acrylonitrile butadiene styrene ή ακρυλονιτρίλιο βουταδιενίου στυρενίου), μέσω τρισδιάστατου εκτυπωτή.

Στη συνέχεια το πλαστικό πρωτότυπο πέρασε στο βήμα ελέγχου του, με σκοπό τη διαπίστωση της πλήρωσης των στόχων σχεδίασης και τυχών σφάλματα σχεδίασης που δεν έγιναν αντιληπτά στο προηγούμενο βήμα. Έτσι κατά το βήμα αυτό, διαπιστώθηκε ότι το τμήμα που φέρει τις ηλεκτρονικές διατάξεις (εικόνα 7.1 και σχήμα 4) δεν πληρούσε τη προδιαγραφή που αναφέρεται στην εύκολη πρόσβαση και επιδιόρθωση των ηλεκτρονικών, λόγω της αυξημένης πολυπλοκότητας της όλης κατασκευής.

Ένα ακόμα μειονέκτημα αυτής της σχεδίασης ήταν πως, λόγω των πολλών εξαρτημάτων που απαρτίζουν το εν λόγω τμήμα που φέρει τις ηλεκτρονικές διατάξεις, θα ήταν δαπανηρό σε κόστος άλλα και χρονοβόρο εξάρτημα για τη μετέπειτα παραγωγή του σε βιομηχανικό επίπεδο.

7.2 Σχεδίαση και κατασκευή της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Η διαπίστωση των σφαλμάτων της προηγούμενης σχεδίασης (αρχική έκδοση του έξυπνου εργαλείου, βλ. κεφάλαιο 7.1) έγινε σχετικά γρήγορα, αφού το σφάλμα διαπιστώθηκε στο βήμα κατασκευής και το εργαλείο δεν πέρασε στο επόμενο βήμα ανάπτυξής του. Για τη διόρθωση των προβληματικών χαρακτηριστικών αναθεωρήθηκε η αρχική του σχεδίαση και τέθηκαν νέες παράμετροι για αυτή.

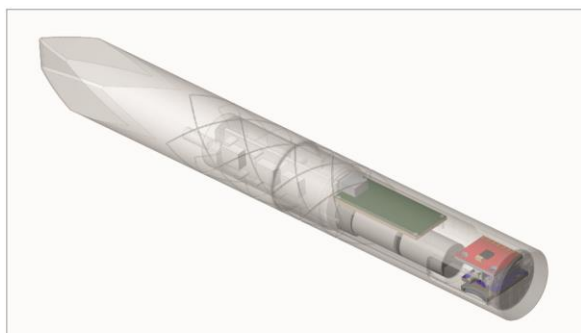
Έτσι, η αρχική ιδέα σχεδίασης του εργαλείου που είχε ως παράμετρο, τη σχεδίαση ενός τμήματος που θα ήταν ενσωματωμένες όλες οι ηλεκτρονικές διατάξεις και θα προσαρτάται στο εργαλείο μέσω μια υποδοχής στο πλάγιο τμήμα του, επαναπροσδιορίστηκε με βάση την σχεδίαση δύο εσωτερικών τμημάτων που θα φέρουν αυτές τις ηλεκτρονικές διατάξεις.

Αυτή η σημαντική αλλαγή στη σχεδίαση του έξυπνου εργαλείου, εκτός απ' ότι απλοποίησε τη περίπλοκη κατασκευή του τμήματος συγκράτησης των ηλεκτρονικών, έδωσε και το πλεονέκτημα μεγαλύτερου χώρου, ο οποίος στο προηγούμενο ήταν αρκετά περιορισμένος.

7.2.1 Σχεδίαση και κατασκευή εξωτερικών τμημάτων της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Το πρώιμο έξυπνο εργαλείο

Το τρισδιάστατο μοντέλο του πρώιμου εργαλείου



Εικόνα 7.2: Το πρώιμο πρωτότυπο του σε τρισδιάστατο μοντέλο.

Το πρώιμο έξυπνο εργαλείο (εικόνα 7.2) απαρτίζεται από δύο μεταλλικά τμήματα, το εμπρόσθιο τμήμα που διαθέτει τη ακμή της σμίλης και το πίσω τμήμα του που διαθέτει μια επίπεδη επιφάνεια στην άκρη, ώστε να δέχεται χτυπήματα από σφυρί.

Το υλικό κατασκευής τους είναι ανοξείδωτος χάλυβας τύπου 304, ώστε να προσδίδει την επιθυμητή μηχανική αντοχή στο έξυπνο εργαλείο. Τα δύο αυτά τμήματα έχουν αντίστοιχα σπειρώματα, ώστε να επιτυγχάνεται η ένωσή τους και το συνολικό μήκος του εργαλείου είναι 260 mm με εξωτερική διάμετρο τα 30 mm.

Στο εσωτερικό τους τα δύο αυτά τμήματα του εργαλείου έχουν κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο ώστε να τοποθετούνται τα δύο τμήματα που φέρουν τις ηλεκτρονικές διατάξεις.



7.2.2 Σχεδίαση και κατασκευή εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Τα εσωτερικά τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου είναι δύο και κατασκευάστηκαν από ertacetal, μέσω συστημάτων αριθμητικού ελέγχου. Ως υλικό επιλέχθηκε το μη αγώγιμο ertacetal, για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων των ηλεκτρονικών διατάξεων, αλλά και για την καλή μηχανική αντοχή που παρουσιάζει.

Το πλαστικό τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων που τοποθετείται στον εσωτερικό διαμορφωμένο χώρο του εμπρόσθιου τμήματος του έξυπνου εργαλείου, έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε να ενσωματώνει το αισθητήριο θερμοκρασίας, την πλακέτα ενίσχυσης σημάτων και την πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας, με κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους.

Στο δεύτερο πλαστικό τμήμα, το οποίο τοποθετείται στο πίσω μέρος του εργαλείου, οι χώροι του διαμορφώθηκαν με τέτοιο τρόπο, ώστε να φιλοξενούνται η κεντρική μονάδα επεξεργασίας με 8bit μικροελεγκτή, το αισθητήριο αδρανειακής μέτρησης, η μονάδα της πρόσθετης μνήμης τύπου micro SD, η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB, το μπουτόν ελέγχου επιλογής λειτουργιών και το ενδεικτικό led λειτουργίας. Επίσης διαθέτει και έναν ειδικά διαμορφωμένο χώρο για την εισαγωγή μπαταρίας.

Το πρώιμο έξυπνο εργαλείο

Τα τρισδιάστατα μοντέλα των δύο εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων του εργαλείου



Εικόνα 7.3: Τα τρισδιάστατα μοντέλα των εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων, εμπρόσθιο (1) & οπίσθιο (2), οπίσθιο με τοποθετημένες τις ηλεκτρονικές διατάξεις (3) και η συνολική διάταξη (4).

7.3 Σχεδίαση και κατασκευή της προ τυποποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

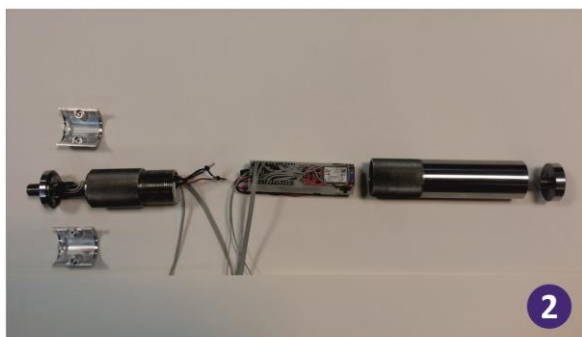
Το επόμενο στάδιο εξέλιξης του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, επήλθε από την απαίτηση περισσότερων και πιο αξιόπιστων ηλεκτρονικών διατάξεων, προκειμένου να ικανοποιηθούν όλες οι προδιαγραφές που τέθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.



Αφενός μεν, η προηγούμενη έκδοση του εργαλείου δεν διαθέτε όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις που είχαν προδιαγραφεί, όπως τη διάταξη της ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth.

Το προ τυποποιημένο έξυπνο εργαλείο

Το τρισδιάστατο μοντέλο και το πρωτότυπο του



Αφετέρου δε, κατά τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το πρώιμο έξυπνο εργαλείο διαπιστώθηκε ότι η μονάδα ενίσχυσης παρουσίαζε θόρυβο στη μέτρηση, με αποτέλεσμα να έχει απόκλιση μεταξύ της μετρούμενης και της πραγματικής δύναμης που ασκούνταν στο εργαλείο.

Βάσει αυτών, όλες οι ηλεκτρονικές διατάξεις επαναπροσδιορίστηκαν με πιο αξιόπιστες και ακριβέστερες μονάδες, οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα στο κεφάλαιο 9. Όπως γίνεται αντιληπτό έπρεπε να επανασχεδιαστούν τα εσωτερικά τμήματα, ώστε να τοποθετούνται σε αυτά οι καινούργιες ηλεκτρονικές διατάξεις.

Αυτό οδήγησε στον επανασχεδιασμό και των εξωτερικών τμημάτων του, ώστε να διαμορφωθεί κατάλληλα ο εσωτερικός χώρος τους. Η σχεδίαση του προ τυποποιημένου έξυπνου εργαλείου καθώς και το φυσικό πρωτότυπο του σε ανεπτυγμένη μορφή, παρουσιάζεται στα σχήματα 1 & 2, της εικόνα 7.4.

Εικόνα 7.4: Το τρισδιάστατο μοντέλο (1) και το πραγματικό (2), της προ τυποποιημένης έκδοσης του, σε αναπτυγμένη μορφή.

Επίσης στη καινούργια σχεδίαση του έξυπνου εργαλείου πραγματοποιήθηκαν και τρεις μείζονες βελτιστοποιήσεις στα δύο εξωτερικά τμήματα. Η πρώτη αφορά τη διαμόρφωση ειδικού χώρου ώστε να τοποθετηθούν τα ηλεκτρικά μηκυνσιόμετρα σε ευθείες επιφάνειες και όχι υπό κλίση στο εσωτερικό καμπύλο τμήμα, όπως στο προηγούμενο εργαλείο.

Στη δεύτερη αλλαγή πραγματοποιήθηκε η απλούστευση του τρόπου προσάρτησης της εναλλάξιμης ακμής της σμίλης, όπου πλέον η ακμή δεν είναι ένα ενιαίο τμήμα του εμπρόσθιου κομματιού (όπως στη προηγούμενη σχεδίαση), αλλά είναι ξεχωριστό τμήμα το οποίο τοποθετείται στο εμπρόσθιο τμήμα του εργαλείου, μέσω των κατάλληλων σπειρωμάτων.

Ενώ η τρίτη νέα αλλαγή στη σχεδίαση, αφορά την κατασκευή εναλλάξιμου οπίσθιου τμήματος, που θα δέχεται τις κρούσεις από το σφυρί, ή θα αφαιρείται με σκοπό την προσάρτησή του σε πνευματικό σφυρί. Το οπίσθιο τμήμα κρούσης τοποθετείται μέσω των κατάλληλων σπειρωμάτων στο πίσω μέρος του εργαλείου.

7.3.1 Σχεδίαση και κατασκευή εξωτερικών τμημάτων της προ τυποποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Τα εξωτερικά τμήματα της νέας σχεδίασης του προ τυποποιημένου πλέον έξυπνου εργαλείου, απαρτίζονται από τα παρακάτω έξι κομμάτια:

- το πίσω τμήμα,
- το εμπρόσθιο τμήμα,



- τα δύο κομμάτια, το δεξί και το αριστερό κάλυμμα του εμπρόσθιου τμήματος που φιλοξενεί τα ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα,
- το οπίσθιο τμήμα κρούσης,
- και το τμήμα της εναλλάξιμης σμίλης.

Το προ τυποποιημένο έξυπνο εργαλείο

Οι τρισδιάστατες απεικονίσεις των εξωτερικών τμημάτων που απαρτίζουν το προ τυποποιημένο έξυπνο εργαλείο



Εικόνα 7.5: Τα εξωτερικά τμήματα της προ τυποποιημένης έκδοσης, το πίσω τμήμα (1), το εμπρόσθιο τμήμα (2), το κάλυμμα του εμπρόσθιου τμήματος και το οπίσθιο τμήμα κρούσης (3) και το τμήμα της εναλλάξιμης σμίλης (4).

Στο σχήμα 1 της εικόνας 7.5 παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη απεικόνιση το πίσω τμήμα του προ τυποποιημένου έξυπνου εργαλείου. Το μήκος που διαθέτει το τμήμα αυτό ανέρχεται στα 122 mm με εξωτερική διάμετρο τα 30 mm και με εσωτερική διάμετρο στα 25,5 mm, ώστε να διαμορφώνεται ο απαιτούμενος χώρος για τη τοποθέτηση του πίσω τμήματος που φιλοξενεί τις ηλεκτρονικές διατάξεις. Ένα ακόμα χαρακτηριστικό που διαθέτει το πίσω τμήμα του εργαλείου είναι η σπή οπτικής και φυσικής αλληλεπίδρασης του χρήστη, από την οποία μπορεί:

- να αναγνωρίσει τις ενδείξεις λειτουργίας του εργαλείου από το led ένδειξης,
- να ενεργοποιήσει/απενεργοποιήσει τη λειτουργία του εργαλείου από το διακόπτη ενεργοποίησης/απενεργοποίησης,
- να μεταβεί σε διαφορετική λειτουργία (ή mode), μέσω του button,
- να εισάγει/εξάγει την πρόσθετη μνήμη τύπου Micro sd,
- και να συνδέσει το εργαλείο με εξωτερικό υπολογιστή για τη μεταφορά δεδομένων και παράλληλης φόρτισης της ενσωματωμένης μπαταρίας, μέσω της θύρας τύπου micro USB.

Το σχήμα 2 της εικόνας 7.5 απεικονίζει το εμπρόσθιο τμήμα του έξυπνου εργαλείου. Το μήκος του είναι στα 120 mm με 30 mm διάμετρο και εσωτερική διάμετρο 22.5 mm. Επίσης μπορεί να παρατηρηθεί και ο ειδικά διαμορφωμένος χώρος για την τοποθέτηση των ηλεκτρικών μηχανοσκόμμετρων. Για την προστασία των μηχανοσκόμμετρων, τοποθετούνται και τα δύο ειδικά καλύμματα, όπου το ένα εξ αυτών παρουσιάζεται στα αριστερά του σχήματος 3, στην εικόνα 7.5.



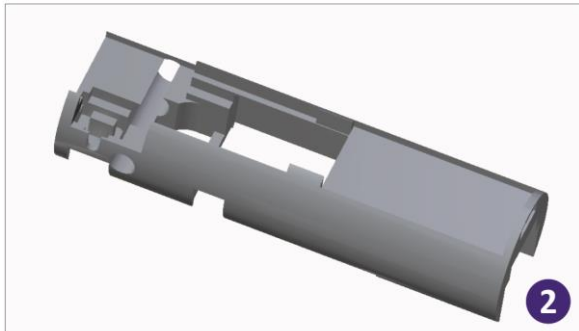
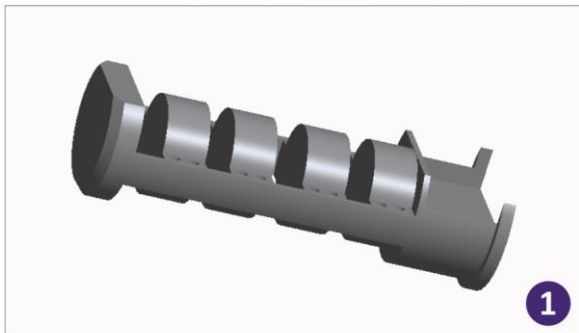
Επίσης στα δεξιά του ίδιου σχήματος παρουσιάζεται και το οπίσθιο τμήμα κρούσης. Το έκτο κομμάτι του έξυπνου εργαλείου απεικονίζεται στο σχήμα 4, εικόνα 7.5 και είναι το τμήμα της εναλλάξιμης σμίλης, το οποίο διαθέτει μια οπή με το ανάλογο σπείρωμα, ώστε να γίνεται εφικτή η προσάρτηση της στο εμπρόσθιο τμήμα του εργαλείου.

7.3.2 Σχεδίαση και κατασκευή εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της προ τυποποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Τα εσωτερικά τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων του προ τυποποιημένου έξυπνου εργαλείου, όπως και στις προηγούμενες εκδόσεις τους, είναι κατασκευασμένα από ertacetal, σε κέντρα κατεργασίας CNC.

Το προ τυποποιημένο έξυπνο εργαλείο

Τα τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών του



Εικόνα 7.6: Τα τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών της προ τυποποιημένης έκδοσης του, εμπρόσθιο τμήμα (1) και οπίσθιο τμήμα (2).

Στο σχήμα 1 της εικόνας 7.6, παρουσιάζεται το εμπρόσθιο τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων, το οποίο τοποθετείται στο εσωτερικό του εμπρόσθιου εξωτερικού τμήματος του έξυπνου εργαλείου. Στις τέσσερις παράλληλες θυρίδες αυτού του τμήματος, φιλοξενούνται οι δύο διατάξεις μέτρησης DCell με τις απαραίτητες γέφυρες Wheatstone για τη μέτρηση των σημάτων από τα ηλεκτρικά μηχανοσκόμμετρα, καθώς και η πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας των μονάδων DCell με τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μέσω πρωτοκόλλου Modbus. Επίσης, στο τμήμα αυτό τοποθετήθηκε και το αισθητήριο θερμοκρασίας.

Ενώ στο σχήμα 2 απεικονίζεται το πίσω τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών, στο οποίο φιλοξενούνται η κεντρική μονάδα επεξεργασίας με 32bit μικροελεγκτή, η μονάδα αδρανειακής μέτρησης, η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth, η πλακέτα πρόσθετης μνήμης τύπου micro SD, η πλακέτα διασύνδεσης και φόρτισης τύπου micro USB, το LED ενδείξεων λειτουργίας, ο διακόπτης

ενεργοποίησης/απενεργοποίησης, το button επιλογής λειτουργίας, η μονάδα κεντρική τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης της μπαταρίας και η μπαταρία LiPo.

7.4 Σχεδίαση και κατασκευή της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Η προ τυποποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου κρίθηκε στο στάδιο της επαλήθευσης ως μια επιτυχημένη και λειτουργική έκδοση. Βέβαια πέραν αυτών έπρεπε να μελετηθεί η βελτιστοποίηση του, όπως η μείωση των διαστάσεων του και η απλοποίηση της συναρμολόγησής του, με σκοπό την αύξηση της εργονομίας του και τη μείωση του κόστους παραγωγής του σε βιομηχανικό επίπεδο.

Με γνώμονα τις βελτιστοποιήσεις αυτές το έξυπνο εργαλείο επανασχεδιάστηκε εξ ολοκλήρου. Το πρώτο βήμα στη σχεδίαση αυτή ήταν η συγχώνευση των δύο εσωτερικών πλαστικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων, σε ένα τμήμα, απλουστεύοντας έτσι τη διαδικασία

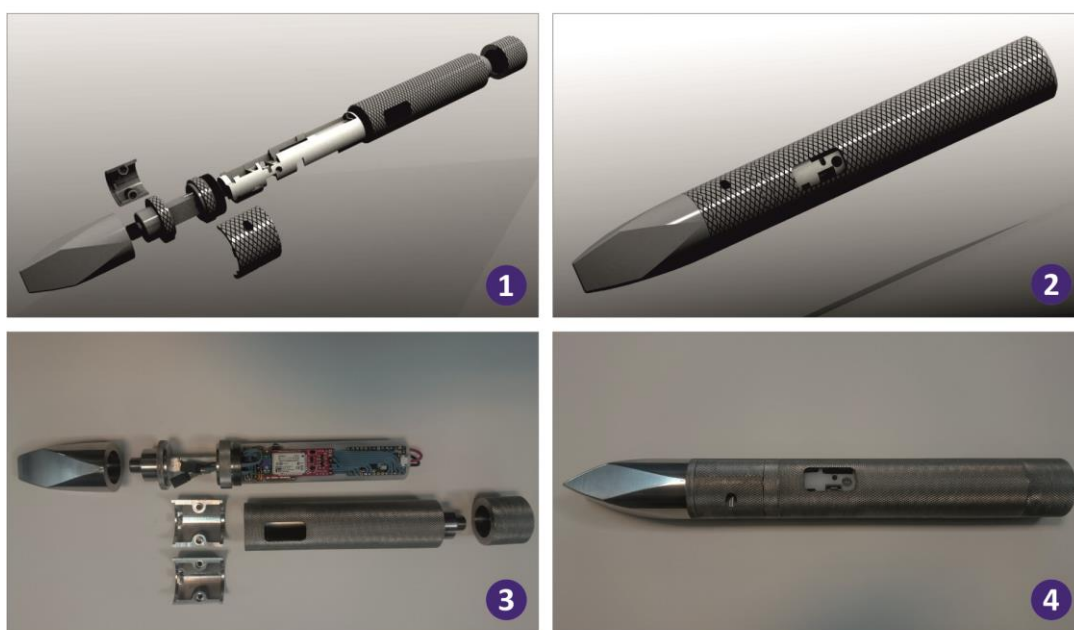


συναρμολόγησης του και την αποφυγή εσφαλμένης σύνδεσης ή κάποιας καταστροφής των ενδιάμεσων καλωδίων.

Επίσης, ενώ στην προηγούμενη έκδοση του εργαλείου υπήρχαν δύο διατάξεις των μονάδων ενίσχυσης προκειμένου να μετρούνται οι ασκούμενες δυνάμεις σε δύο άξονες, στη νέα σχεδίαση επιλέχθηκε η χρήση μόνο μίας μονάδας ενίσχυσης DCell, με σκοπό τη μέτρηση της ασκούμενης δύναμης μόνο στον κάθετο άξονα του εργαλείου, μειώνοντας σημαντικά τον απαιτούμενο χώρο του τμήματος συγκράτησης.

Το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο

Οι τρισδιάστατες απεικονίσεις του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου και το πρωτότυπο του



Εικόνα 7.7: Η βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, το τρισδιάστατο μοντέλο του σε ανεπτυγμένη μορφή (1), σε πλήρως συναρμολογημένη μορφή (2) και το πραγματικό πρωτότυπο του σε ανεπτυγμένη μορφή (3) και σε πλήρως συναρμολογημένη μορφή (4).

Το επόμενο βήμα ήταν η σχεδίαση του πίσω τμήματος που περικλείει το ενιαίο πλέον τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών, στο οποίο αυξήθηκε το μήκος του στα 135 mm. Από την άλλη στη νέα σχεδίαση του εμπρόσθιου τμήματος, μειώθηκε το μήκος του από 120 mm στα 68 mm. Στα υπόλοιπα τμήματα υπήρξαν μικρές αλλαγές στη σχεδίαση.

Η νέα σχεδίαση του βιομηχανοποιημένου έξυπνου εργαλείου παρουσιάζεται στα σχήματα 1 και 2 της εικόνας 7.7, με το σχήμα να απεικονίζει το τρισδιάστατο μοντέλο του σε ανεπτυγμένη μορφή και το σχήμα 2 στη πλήρως συναρμολογημένη. Από την άλλη στα σχήματα 3 και 4 παρουσιάζεται το φυσικό πρωτότυπο που κατασκευάστηκε σε ανεπτυγμένη μορφή και σε πλήρως συναρμολογημένη, αντίστοιχα.

7.4.1 Σχεδίαση και κατασκευή εξωτερικών τμημάτων της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Όπως και στη προηγούμενη έκδοση, η βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου απαρτίζεται από έξι τμήματα, το τμήμα της εναλλάξιμης σμίλης, το εμπρόσθιο τμήμα, τα δύο καλύμματα του εμπρόσθιου τμήματος, το πίσω τμήμα και το οπίσθιο τμήμα κρούσης.



Το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο

Τα μηχανολογικά τμήματα που απαρτίζουν το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο



Εικόνα 7.8: Τα εξωτερικά τμήματα που απαρτίζουν τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου (1), το πίσω τμήμα (2), το εμπρόσθιο τμήμα (3), τα καπάκια του εμπρόσθιου τμήματος (4), η εναλλάξιμη σμίλη (5) και το οπίσθιο τμήμα κρούσης (6).

Στο σχήμα 1 της εικόνας 7.8, παρουσιάζονται και τα έξι τμήματα του βιομηχανοποιημένου έξυπνου εργαλείου κατασκευασμένα από ανοξείδωτο χάλυβα. Το πίσω τμήμα (σχήμα 2) το οποίο πλέον διαθέτει ρίκνωση σε όλη την επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον χρήστη, για τη βέλτιστη εργονομία κατά τη χρήση του εργαλείου και την οπή οπτικής και φυσικής αλληλεπίδρασης να έχει μεταφερθεί πιο κοντά στο εμπρόσθιο τμήμα.

Στο εμπρόσθιο τμήμα (εικόνα 7.8, σχήμα 3) έχει ενισχυθεί η βάση του σπειρώματος για στιβαρότερη προσάρτηση της εναλλάξιμης σμίλης. Η αντίστοιχη ενίσχυση της βάσης του σπειρώματος έχει γίνει και στο πίσω τμήμα για την καλύτερη τοποθέτηση του οπίσθιου τμήματος κρούσης. Ενώ στα σχήματα 4, 5 και 6 παρουσιάζονται τα φυσικά πρωτότυπα των δύο καλυμμάτων του εμπρόσθιου τμήματος, η εναλλάξιμη σμίλη και το οπίσθιο τμήμα κρούσης.

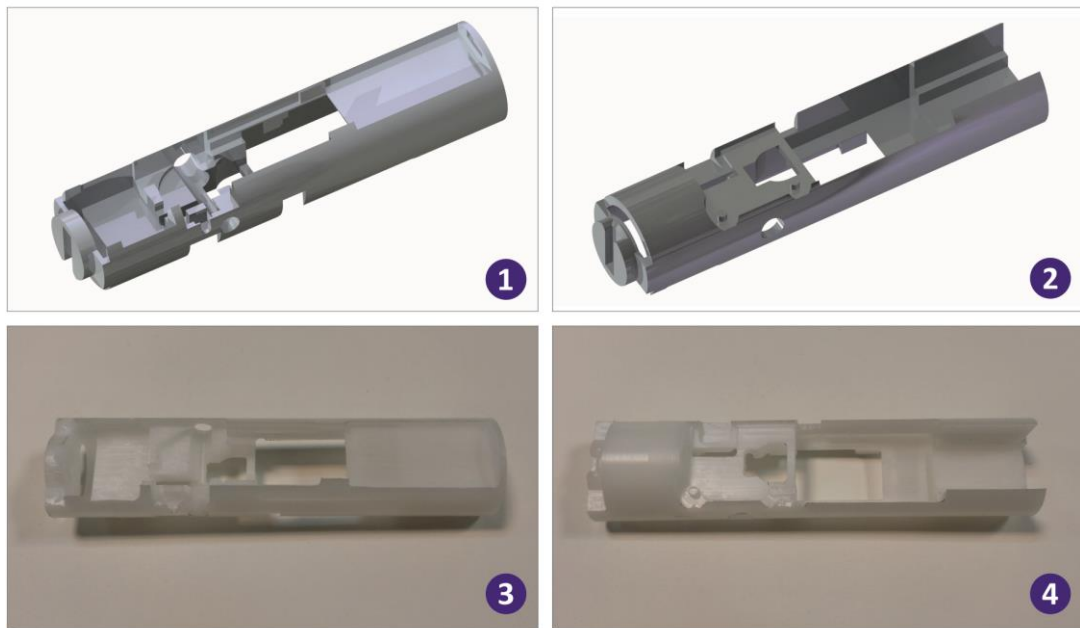


7.4.2 Σχεδίαση και κατασκευή εσωτερικών τμημάτων συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Όπως προαναφέρθηκε η σχεδίαση του εσωτερικού τμήματος συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων, βασίστηκε στη κατασκευή ενός μόνο τμήματος, το οποίο θα φιλοξενεί στους κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους του, όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις του εργαλείου. Επίσης, προαναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ότι η δεύτερη μονάδα μέτρησης DCell αφαιρείται, λόγω του ότι επιθυμείται να μετράται μόνο η δύναμη που ασκείται στον κάθετο άξονα του εργαλείου.

Το βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο

Το εσωτερικό τμήμα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων του βελτιστοποιημένου εργαλείου



Εικόνα 7.9: Τα εσωτερικά τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, σε τρισδιάστατα μοντέλα, εμπρόσθιο (1) και οπίσθιο (2), όπως και τα πραγματικά πρωτότυπά τους, (3) και (4), αντίστοιχα.

Στα σχήματα 1 & 2 της εικόνας 7.9 παρουσιάζονται οι δύο όψεις του τρισδιάστατου μοντέλου του τμήματος συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων. Ενώ στα σχήματα 3 & 4, οι αντίστοιχες όψεις του φυσικού πρωτότυπου μοντέλου του.

Βάσει των παραπάνω σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε σε ertacetal, ένα τμήμα με τους κατάλληλα διαμορφωμένους χώρους, ώστε να ενσωματωθούν οι παρακάτω ηλεκτρονικές διατάξεις:

- η μονάδα μέτρησης DCell,
- η πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας DCell με τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μέσω πρωτοκόλλου Modbus,
- το αισθητήριο θερμοκρασίας,
- η κεντρική μονάδα επεξεργασία με 32bit μικροελεγκτή,
- η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU,
- η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth,
- η πλακέτα πρόσθετης μνήμης τύπου micro SD,
- η πλακέτα διασύνδεσης και φόρτισης τύπου micro USB,



- το LED ενδείξεων λειτουργίας,
- ο διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης,
- το push button επιλογής λειτουργίας,
- η μονάδα κεντρική τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης της μπαταρίας
- και η μπαταρία LiPo.



8. Ηλεκτρονικές διατάξεις που ενσωματώθηκαν στην πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου

Η επιλογή των ηλεκτρονικών διατάξεων του πρώιμου έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, βασίστηκε στη δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του, σε κατεργασίες σμίλευσης λίθων. Έτσι το στοιχειώδες φαινόμενο που τέθηκε προς διερεύνηση ήταν το φαινόμενο κρούσης, οι δυνάμεις δηλαδή που αναπτύσσονται στιγμιαία στο εργαλείο, όταν αυτό κρούσται από κάποιο σφυρί. Επιπροσθέτως ήταν επιθυμητό να επιτυγχάνεται η μέτρηση της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στο εσωτερικό του εργαλείου, αλλά και ο προσανατολισμός που επιτυγχάνει χρονικά στο χώρο.

Προκειμένου να επιτυγχάνεται η μέτρηση αυτών των δυνάμεων που ασκούνται στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο, χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη από ηλεκτρικά μηχανοσώμετρα, πλήρους γέφυρας (strain gauge full bridge), από την εταιρία Phidgets, της οποίας τα ασθενή σήματα εξόδου οδηγούνταν στη μονάδα ενίσχυσης σημάτων. Τα ενισχυμένα σήματα από τη μονάδα ενίσχυσης εισάγονταν στις θύρες του ενσωματωμένου μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό (ADC, Analog to Digital Converter), που διαθέτει η κεντρική μονάδα επεξεργασίας με 8-bit μικροελεγκτή, Arduino Nano.

Ο προσανατολισμός στο χώρο που επιτυγχάνει το έξυπνο εργαλείο, υπολογίζεται από τις μετρούμενες τιμές της γωνιακή ταχύτητας σε συνδυασμό με τις μετρούμενες τιμές της γωνιακής επιτάχυνσης. Οι μέτρηση των τιμών αυτών πραγματοποιείται από τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU, MPU-6050, της εταιρίας InvenSense), οι οποίες αποστέλλονται στη μονάδα της κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου, μέσω του πρωτοκόλλου επικοινωνίας I2C.

Το αισθητήριο για τη μέτρηση της θερμοκρασίας DS18S20 της εταιρία Maxim Integrated, που χρησιμοποιήθηκε στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο, διαθέτει ενσωματωμένη μονάδα μέτρησης με διακριτική ικανότητα 9-bit, η οποία εξάγει την τιμή της θερμοκρασίας σε βαθμούς Κελσίου. Το αισθητήριο αυτό χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο επικοινωνίας One-Wire Bus για να αποστείλει τη μετρούμενη τιμή της θερμοκρασίας στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας του εργαλείου.

Οι παραπάνω λειτουργίες υλοποιούνται μέσω του κατάλληλου προγράμματος, το οποίο εκτελείται στο μικροελεγκτή 8-bit αρχιτεκτονικής (Atmel, ATmega328p) που διαθέτει η κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Arduino Nano). Η μονάδα αυτή επιτρέπει και τη διασύνδεση του μικροελεγκτή με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω σειριακού πρωτοκόλλου, με σκοπό τη μεταφορά των δεδομένων, για περεταίρω αποθήκευση και επεξεργασία.

Επιπρόσθετα, στη μονάδα κεντρική επεξεργασίας έχει διασυνδεθεί και μια μονάδα εισαγωγής πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD, με σκοπό την καταγραφή των δεδομένων απ' ευθείας στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο. Η μονάδα αυτή χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SPI για την αμφίδρομη επικοινωνία της με τη μονάδα του μικροελεγκτή.

Όλες οι ηλεκτρονικές διατάξεις είναι τοποθετημένες στα τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών και βρίσκονται στο εσωτερικό του πρώιμου έξυπνου εργαλείου.

8.1 Κεντρική μονάδα επεξεργασίας με 8bit μικροελεγκτή

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας του πρώιμου έξυπνου εργαλείου που επιλέχθηκε για την υλοποίηση όλων των λειτουργιών που προαναφέρθηκαν (πρωτόκολλα επικοινωνίας και δυνατότητα μέτρησης με μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό), είναι η αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Nano (εικόνα 8.1), η οποία διαθέτει το μικροελεγκτή ATmega328p της εταιρίας Atmel.

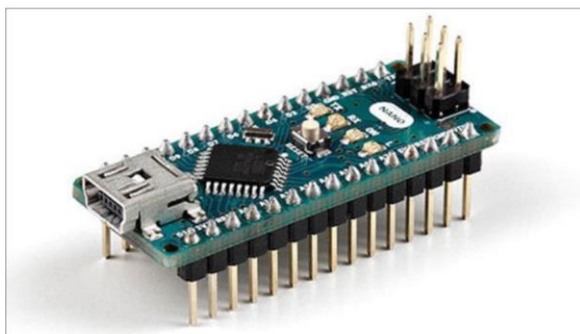


Τα χαρακτηριστικά της εν λόγω αναπτυξιακής πλατφόρμας είναι:

- Μικροελεγκτής ATmega328p, με αρχιτεκτονική 8-bit τύπου RISC
- Η συχνότητα του κρύσταλλου χρονισμού του είναι στα 16MHz
- Η μνήμη Flash που διαθέτει ανέρχεται στα 32kB, από τα οποία τα 2kB δεσμεύονται από τον bootloader
- 2kB μνήμη SRAM
- 1kB μνήμη EEPROM
- 2 χρονιστές 8-bit
- 1 χρονιστή 16-bit
- 6 έξοδοι PWM
- 1 μονάδα 10-bit ADC, 8 αναλογικές εισοδοί
- 1 μονάδα σειριακής διασύνδεσης USART
- Υποστηρίζει πρωτόκολλα επικοινωνίας SPI, I2C, OneWire
- Τάση λειτουργίας 5.5 Volt
- Εύρος τάσης αναπτυξιακής πλατφόρμας 7 - 12 Volt
- Ο προγραμματισμός του επιτυγχάνεται μέσω USB/Bootloader

Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας

Η αναπτυξιακή πλατφόρμα Arduino Nano



Εικόνα 8.1: Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας Arduino Nano, που χρησιμοποιήθηκε στη πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου.

πρωτόκολλου I2C και λαμβάνει τις τιμές των τριών γωνιακών ταχυτήτων και επιταχύνσεων, αντίστοιχα για κάθε άξονα), την επικοινωνία με το αισθητήριο θερμοκρασίας (μέσω του πρωτόκολλου OneWire και λαμβάνει τη μέτρηση της θερμοκρασίας), τη μέτρηση των ενισχυμένων σημάτων από τη μονάδα ενίσχυσης των strain gauges χρησιμοποιώντας τις δύο από τις 8 αναλογικές εισόδους του ενσωματωμένου μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADC (είσοδος 1, pin A0 και είσοδος 2, Pin A1). Επίσης, ο μικροελεγκτής επιτυγχάνει την επικοινωνία με τη μονάδα της micro SD, μέσω του πρωτοκόλλου SPI και καταγράφει όλες τις μετρούμενες τιμές από τα αισθητήρια σε αρχείο txt μορφής.

Επιπρόσθετα, ο μικροελεγκτής με τη χρήση τριών ανεξάρτητων παλμών διαμορφωμένου εύρους PWM (Pulse Width Modulation) ελέγχει το RGB led ενδείξεων λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου. Συγκεκριμένα, έχει οριστεί η είσοδος του κόκκινου χρώματος του led να ελέγχεται από τον Timer-2 (έξοδος OCR2B), η είσοδος του πράσινου χρώματος από τον Timer-0 (έξοδος OCR0B) και η είσοδος του μπλε χρώματος από τον χρονιστή Timer-0 (έξοδος OCR0A).

Η επιλογή της συγκεκριμένης πλατφόρμας πραγματοποιήθηκε αφενός μεν για το λόγο ότι πληροί τις απαιτήσεις για τα απαραίτητα πρωτόκολλα επικοινωνίας που απαιτούν οι υπόλοιπες μονάδες καθώς και τη δυνατότητα μέτρησης αναλογικού σήματος με διακριτική ικανότητα 10-bit, μέσω της ενσωματωμένης μονάδας ADC. Αφετέρου δε, οι μικρές διαστάσεις που διαθέτει, ευνοούν τη τοποθέτηση της στον περιορισμένο χώρο που διαθέτει το εσωτερικό μέρος του πρώιμου έξυπνου εργαλείου.

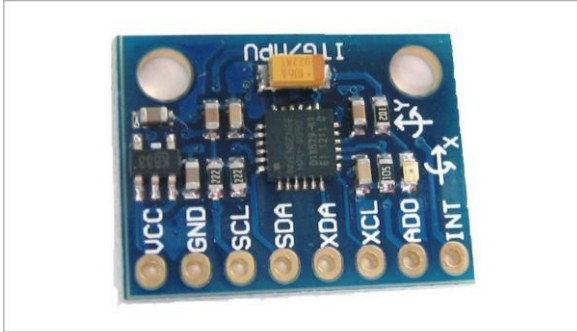
Ειδικότερα, ο μικροελεγκτής με το κατάλληλο λειτουργικό πρόγραμμα που αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον Arduino IDE, επιτυγχάνει την επικοινωνία με τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU (μέσω του



8.2 Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU)

Μονάδα αδρανειακής μέτρησης

Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU, MPU-6050



Εικόνα 8.2: Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης MPU6050, του πρώιμου έξυπνου εργαλείου.

αισθητηρίων, αυξάνει ικανοποιητικά την ακρίβεια των εξαγόμενων μεγεθών.

Οι μονάδες αδρανειακής μέτρησης (ή Inertial Measurement Unit, IMU) είναι συσκευές που μετρούν και εξάγουν γωνιακές ταχύτητες και επιταχύνσεις που αναπτύσσονται σε πραγματικό χρόνο, όταν αυτές κινούνται στο χώρο και κατ'επέκταση τις γωνιακές ταχύτητες και επιταχύνσεις των αντικείμενων που έχουν ενσωματωθεί. Για να επιτύχουν τη μέτρηση αυτών των φαινομένων, χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό από αισθητήρια μέτρησης, όπως γυροσκόπιο ή gyroscope (για τη μέτρηση γωνιακών ταχυτήτων), επιταχυνσιόμετρο ή accelerometer (για τη μέτρηση των γωνιακών επιταχύνσεων). Επιπρόσθετα σε πιο ακριβείς μονάδες IMU συνδυάζονται και αισθητήρια μαγνητόμετρων (magnetometer) ή και πυξίδων (compass). Η χρήση των πρόσθετων αυτών

Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης που επιλέχθηκε να ενσωματωθεί στις ηλεκτρονικές διατάξεις της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου είναι η IMU MPU-6050 (εικόνα 8.2), την οποία κατασκευάζει η εταιρία InvenSense και διαθέτει τεχνολογία μικροηλεκτρομηχανικών συστημάτων (ή Microelectromechanical Systems, MEMS). Τα βασικά χαρακτηριστικά της είναι:

- Αισθητήρας γυροσκοπικός τριών αξόνων, τύπου MEMS, με 16-bit ADC
- Αισθητήρας επιτάχυνσης τριών αξόνων, τύπου MEMS, με 16-bit ADC
- Ψηφιακό επεξεργαστή κίνησης (Digital Motion Processor, DMP)
- Κύριο κανάλι σειριακής διασύνδεσης/επικοινωνίας I2C πρωτόκολλου
- Δευτερεύον κανάλι σειριακής διασύνδεσης/επικοινωνίας I2C πρωτόκολλου, για τη διασύνδεση πρόσθετων αισθητηρίων, όπως μαγνητόμετρο ή πυξίδα
- Μονάδα χρονισμού
- Καταχωρητές δεδομένων για τα συλλεγόμενα δεδομένα από τα εσωτερικά αισθητήρια
- Καταχωρητή FIFO 1024-byte
- Ενσωματωμένα Interrupts
- Μέτρηση της θερμοκρασίας με το ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας
- Διαθέτει διεργασίες αυτοέλεγχου για τη βέλτιστη λειτουργία στα αισθητήρια γυροσκοπίου και επιταχυνσιόμετρο
- Διαθέτει ρυθμιστή τάσης τύπου LDO (Low-Drop Out regulator), ο οποίος ρυθμίζει τη τάση στα επιθυμητά επίπεδα ακόμα και αν η είσοδος είναι πολύ κοντά στη τιμή της εξόδου.

Ειδικότερα, η ενσωματωμένη μονάδα γυροσκοπίου αποτελείται από τρεις διαφορετικές διατάξεις μικροηλεκτρομηχανικών γυροσκοπίων τύπου MEMS, τα οποία μετρούν το ρυθμό περιστροφής γύρω από τους X, Y και Z άξονες. Το εύρος ανίχνευσης τους μπορεί να προγραμματιστεί από ± 250 , ± 500 , ± 1000 έως τις ± 2000 μοίρες το λεπτό (ή degrees per second, dps). Επίσης, ο ρυθμός δειγματοληψίας του ADC μετατροπέα μπορεί να ρυθμιστεί από 3.9 έως τα 8000 δείγματα το δευτερόλεπτο.

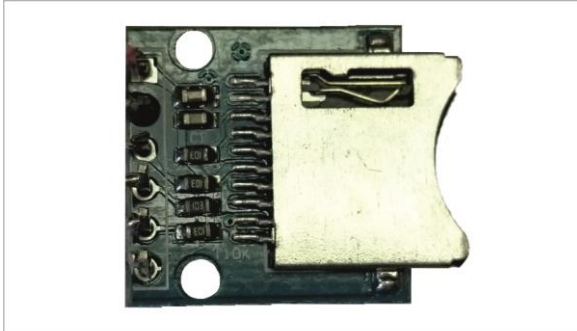
Η μονάδα του επιταχυνσιόμετρο αποτελείται και αυτή από τρεις ανεξάρτητες διατάξεις επιταχυνσιόμετρων τύπου MEMS, ένα για κάθε άξονα. Την κάθε μία από αυτές τις τρεις διατάξεις μετράει ένας ADC μετατροπέας τύπου Sigma-Delta και το εύρος μέτρησης μπορεί να ρυθμιστεί από $\pm 2g$, $\pm 4g$, ± 8 έως $\pm 16g$.



8.3 Μονάδα για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD

Μονάδα micro SD

Η μονάδα εισαγωγής μνήμης τύπου micro SD



Εικόνα 8.3: Η μονάδα εισαγωγής της πρόσθετης αποθηκευτικής μνήμης micro SD.

Πρόκειται για μια μονάδα η οποία διαθέτει την κατάλληλη υποδοχή για την εισαγωγή κάρτας τύπου micro SD, ώστε τα συλλεγόμενα δεδομένα να αποθηκεύονται σε αυτή, όταν το εργαλείο λειτουργεί σε αυτόνομο mode (να μην υπάρχει διασύνδεση με κάποιο εξωτερικό ηλεκτρονικό επεξεργαστή) ή σε mode όπου αποθηκεύονται και σε αυτή και σε εξωτερικό υπολογιστή, όποτε είναι αυτό επιθυμητό.

Επίσης, επιτρέπει τη διασύνδεση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου με τη κάρτα micro SD μέσω σειριακού πρωτοκόλλου επικοινωνίας SPI (Serial Peripheral Interface Bus). Το πρωτόκολλο επικοινωνίας SPI είναι τύπου master – slave σύστημα και επιτρέπει τη αμφίδρομη διασύνδεση πολλαπλών συσκευών,

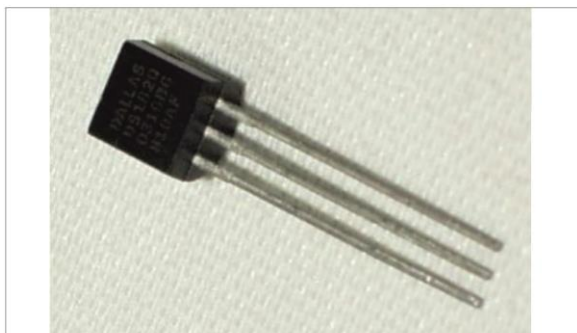
όπου η συσκευή ελέγχου (master) είναι πάντα μία και διαχειρίζεται τις υπόλοιπες slave συσκευές. Η ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων που επιτυγχάνεται από το μικροελεγκτή είναι 16.000.000 BPS (Bytes per Second), λόγω της συχνότητας χρονισμού του 16 MHz.

Για τη διασύνδεση μίας μόνο slave συσκευής, όπως στο σύστημα κεντρικής μονάδας επεξεργασίας – μονάδα micro SD του πρώιμου έξυπνου εργαλείου, όπου η κεντρική μονάδα επεξεργασίας έχει το ρόλο της Master συσκευής και η μονάδα micro SD είναι η μία slave συσκευή, απαιτούνται τέσσερες γραμμές επικοινωνίας, η γραμμή χρονισμού (SCK), η γραμμή όπου η master συσκευή στέλνει στη slave συσκευή τι να εκτελέσει (MOSI, Master Output Slave Input), η γραμμή όπου η slave συσκευή αποστέλλει στη master το αποτέλεσμα που ζήτησε (MISO, Master Input Slave Output) και η γραμμή επιλογή συσκευής (SS, Slave Select ή CS, Chip Select).

8.4 Αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας

Αισθητήριο Θερμοκρασίας

Το αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας Dallas DS18S20



Εικόνα 8.4: Το αισθητήριο μέτρησης της θερμοκρασίας Maxim-Dallas DS18S20.

Το αισθητήριο θερμοκρασίας που ενσωματώθηκε στις ηλεκτρονικές διατάξεις του πρώιμου έξυπνου εργαλείου είναι το DS18S20 (εικόνα 8.4) το οποίο κατασκευάζει η εταιρία Maxim Integrated. Τα εν λόγω αισθητήρια είναι μια ιδανική λύση για συστήματα που ακολουθούν τη διαδικασία rapid prototyping και που απαιτούν καλή αξιοπιστία και ακρίβεια στη μέτρηση.

Επίσης αποτελεί μια μικρή κατασκευή με ενσωματωμένο μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADC διακριτικής ικανότητας 9-bit. Το αισθητήριο είναι προ βαθμονομημένο από τον κατασκευαστή, με εύρος μέτρησης από -55 °C έως +125°C, με ακρίβεια μέτρησης ± 0.5 °C και αποστέλλει τη μετρούμενη τιμή ψηφιοποιημένη

σε βαθμούς κελσίου, χωρίς να χρειάζεται η περαιτέρω εξεργασία της .

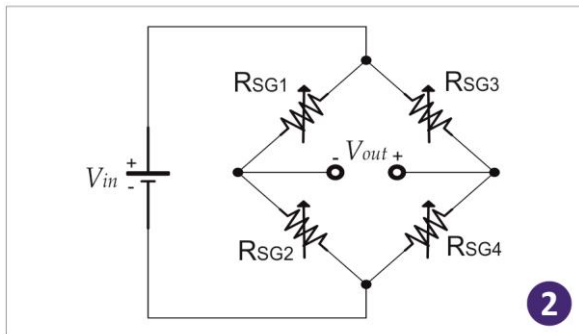
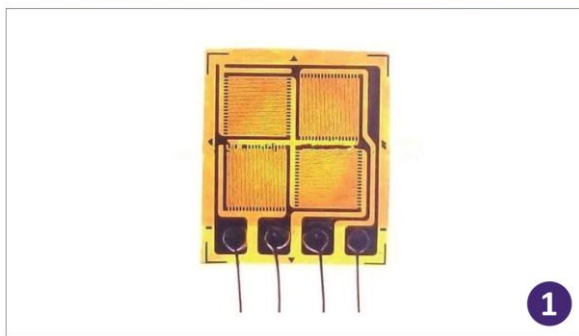


Η επικοινωνία του με τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας του πρώιμου έξυπνου εργαλείου επιτυγχάνεται μέσω του πρωτόκολλου One-Wire (ή OneWire) το οποίο απαιτεί τη χρήση μιας μόνο γραμμής αμψίδρομης επικοινωνίας και επιτρέπει τη διασύνδεση πολλαπλών συσκευών. Δηλαδή, μπορούν να συνδεθούν πολλαπλές μονάδες στην ίδια γραμμή επικοινωνίας, ακόμα και πολλαπλά αισθητήρια θερμοκρασίας DS18S20, αφού ο κατασκευαστής τα έχει εξοπλίσει με μοναδική ονομασία για το καθένα, κωδικοποίησης 64-bit.

8.5 Ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα (Strain gauges)

Ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα

Το ηλεκτρικό μηχανισιόμετρο πλήρους γέφυρας



Εικόνα 8.5: Το strain gauges πλήρους γέφυρας και η συνδεσμολογία του.

Στο κεφάλαιο 6.3, αναφέρεται ότι μια βασική προδιαγραφή που θα πρέπει να πληροί το έξυπνο εργαλείο είναι η δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής των δυνάμεων που του εφαρμόζονται, όταν χρησιμοποιείται σε κατεργασίες κρουστικής λάξευσης. Για τη μέτρηση αυτών των φαινομένων επιστρατεύθηκαν διατάξεις από ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα (ή strain gauges).

Το strain gauges είναι ένα λεπτό μεταλλικό φύλλο, από το οποίο έχουν αφαιρεθεί τα περιττά τμήματα, ώστε να διαμορφώνει ένα συγκεκριμένο μοτίβο παράλληλων γραμμών που ενώνονται εναλλάξ οι ακμές τους (zig-zag pattern of parallel lines). Αυτό το μεταλλικό μοτίβο είναι προσαρτημένο πάνω σε ένα άλλο λεπτό φύλλο βάσης από ελαστικό μονωτή.

Το μεταλλικό μοτίβο του strain gauge συμπεριφέρεται ως αντίσταση ακριβείας με συγκεκριμένη ονομαστική τιμή αντίστασης, όμως τα υλικά και ο σχεδιασμός του, επιτρέπουν να μεταβάλλει τη τιμή της αντίστασης του όταν επέλθει σε αυτό ελαστική παραμόρφωση.

Η χρήση του βασίζεται στη παραμόρφωση ε (strain) που παθαίνει ένα σώμα όταν του ασκηθεί εξωτερική δύναμη, είτε αυτή είναι θλιπτική, είτε εφελκυστική. Η παραμόρφωση θα μεταβάλει το μήκος L του σώματος, το οποίο είναι στην ίδια κατεύθυνση με την ασκούμενη δύναμη, κατά ΔL , για κάποιο χρονικό διάστημα. Βέβαια η εν λόγω μεταβολή μήκους είναι αρκετά μικρή και μετρείται σε microstrain ($\mu\varepsilon$).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1)$$

Επομένως, τοποθετώντας και στερεώνοντας το strain gauge σε ένα σώμα, μέσω κατάλληλου συγκολλητικού υλικού (όπως κυανοακρυλικά ή cyanoacrylate, τα οποία επιτρέπουν στο strain gauge να κληρονομεί τις μεταβολές του μήκους που επέρχονται στο σώμα αυτό) μπορεί να προσεγγιστεί η παραμόρφωση ε και κατ' επέκταση η εξωτερική δύναμη που ασκείται στο σώμα, εφόσον η μεταβολή του μήκους θα αλλάξει την αντίσταση του κατά ΔR . Ο συσχετισμός της μεταβολής της αντίστασης ΔR του strain gauge με τη μεταβολή του μήκους του σώματος ΔL , βρίσκεται από τη παράμετρο gauge factor GF , την οποία δίνει ο κατασκευαστής του.



$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (2)$$

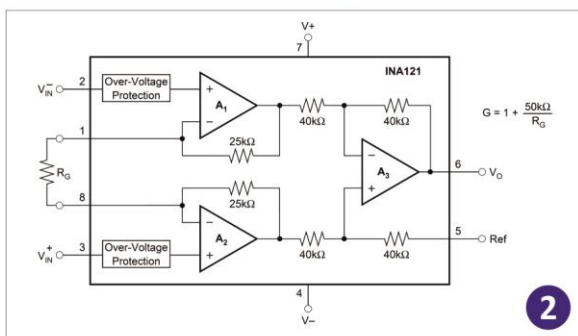
Όπως προαναφέρθηκε η παραμόρφωση ε που παθαίνει το σώμα είναι εξαιρετικά μικρή και από τον παραπάνω τύπο (2), γίνεται αντιληπτό ότι και η μεταβολή της αντίστασης θα είναι αντίστοιχα μικρή. Η μέτρηση της τιμής της αντίστασης επιτυγχάνεται τοποθετώντας το strain gauge σε διάταξη γέφυρας Wheatstone (εικόνα 8.5, σχήμα 2) η οποία απαρτίζεται από συνολικά τέσσερις αντιστάσεις ή strain gauges ή συνδυασμό τους και θα μετατρέψει αυτές τις μικρές αλλαγές της αντίστασης σε ανάλογο σήμα τάσης.

Στην αγορά υπάρχουν διάφορα είδη strain gauges που καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Οι κυριότερες διατάξεις είναι η μονή, η μισής γέφυρας και η πλήρους γέφυρας (single ή quarter bridge, half bridge και full bridge). Στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο επιλέχθηκε η full bridge διάταξη (εικόνα 8.5 και σχήμα 1), η οποία εμπεριέχει τέσσερα strain gauge διασυνδεδεμένα σε γέφυρα Wheatstone, στην ίδια διάταξη. Η ονομαστική αντίσταση του είναι στα 1000 Ω και το gain factor (GF) είναι 3.

8.6 Σχεδιασμός πλακέτας ενίσχυσης σημάτων

Ενισχυτής σημάτων

Ο ενισχυτής σημάτων INA121



Εικόνα 8.6: Ο IC ενισχυτής σημάτων INA121 (1) και η εσωτερική συνδεσμολογία του.

υπολογίζεται βάση της εξίσωσης (3) να είναι $G = 1001$. Η επιλογή αυτής της τιμής κέρδους έγινε βάσει δύο προϋποθέσεων: Η πρώτη αφορά τα σήματα να ενισχυθούν σε ικανοποιητικό επίπεδο για να ψηφιοποιηθούν από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας. Ενώ η δεύτερη να κρατηθεί το κέρδος σε χαμηλές τιμές για την αποφυγή πρόσθετου θορύβου στο ενισχυμένο σήμα. Το σήμα εξόδου του ενισχυτή μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση (4).

$$V_{out} = G * (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \quad (4)$$

Ο σχεδιασμός της πλακέτας ενίσχυσης σημάτων βασίστηκε στην ανάγκη ενίσχυσης της τάσης εξόδου της γέφυρας Wheatstone, προκειμένου να ενισχυθούν τα ασθενή σήματα των strain gauges, ώστε να φτάσουν στα επιθυμητά όρια και να μετρηθούν από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του πρώιμου εργαλείου κρουστικής λάξευσης.

Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένας ειδικού τύπου ενισχυτής σημάτων, εξειδικευμένος για τέτοιου είδους εφαρμογές, ο INA121, σχήμα 1, εικόνα 8.6. Ο INA121, χρησιμοποιεί μια διάταξη ενίσχυσης από τρεις τελεστικούς ενισχυτές όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 2 της εικόνας 8.6, όπου το κέρδος (gain, G) είναι εφικτό να ρυθμιστεί από την επιλογή της τιμής της αντίστασης R_G και υπολογίζεται από την παρακάτω συνάρτηση:

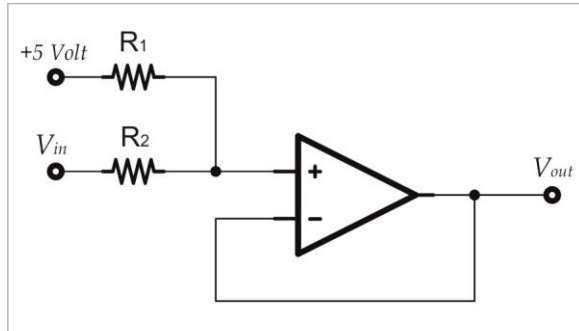
$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G} \quad (3)$$

Η τιμή της αντίστασης επιλέχθηκε να είναι $R_G = 50 \Omega$ και το συνολικό κέρδος του ενισχυτή



Μετατροπέας διπολικού σήματος

Μετατροπέας διπολικού σήματος σε μονοπολικό



Εικόνα 8.7: Η συνδεσμολογία του μετατροπέα διπολικού σήματος σε μονοπολικό.

ενσωματώθηκε στην πλακέτα ενίσχυσης σημάτων του πρώιμου έξυπνου εργαλείου και του οποίου το σχηματικό διάγραμμα παρουσιάζεται στην εικόνα 8.7. Ο μετατροπέας δέχεται σήμα εισόδου με εύρος τιμών από -5 Volt έως +5 Volt και το ανακατατάσσει σε εύρος τιμών από 0 έως 5 Volt, όπου πλέον το σήμα είναι στα επιθυμητά εύρη τιμών τάσης, τα οποία μπορεί να μετρήσει ο μετατροπέας ADC που διαθέτει η κεντρική μονάδα επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου.

Ο υπολογισμός της τάσης εξόδου $V_{out,Con}$ του μετατροπέα βρίσκεται από την παρακάτω εξίσωση.

$$V_{out,Con} = \left(V_{in,Con} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) + \left(5 \text{ Volt} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) \quad (5)$$

Οι αντιστάσεις R_1 , R_2 επιλέχθηκαν να είναι ίσες και με τιμή αντίστασης 10 KΩ, άρα η εξίσωση (5) μπορεί να πάρει την παρακάτω μορφή.

$$V_{out,Con} = \left(V_{in,Con} \cdot \frac{1}{2} \right) + \left(5 \text{ Volt} \cdot \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

Για το υπολογισμό της δύναμης θα πρέπει αρχικά να υπολογιστεί η τάση εξόδου $V_{out,Bridge}$ της γέφυρας Wheatstone, η οποία είναι η τάση εισόδου $V_{in,INA}$ στον ενισχυτή INA121. Όμως, η τάση που καταγράφεται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας είναι η τάση εξόδου του μετατροπέα $V_{out,Con}$, από την οποία μπορεί να υπολογιστεί η τάση εισόδου του μετατροπέα $V_{in,Con}$, που είναι η τάση εξόδου $V_{out,INA}$ του ενισχυτή INA121, μετασχηματίζοντας την εξίσωση (6).

$$V_{in,Con} = (2 \cdot V_{out,Con}) - 5 \text{ Volt} \quad (7)$$

Επιλύοντας την εξίσωση (4), ως προς τη τάση εισόδου $V_{in,INA}$ του ενισχυτή INA121 και συνδυάζοντας την με την εξίσωση (7) προκύπτει η παρακάτω σχέση.

$$V_{in,INA} = \frac{(2 \cdot V_{out,Con}) - 5 \text{ Volt}}{G} \quad (8)$$

Η παραμόρφωση ε αναφορικά με την τάση εξόδου, για διάταξη strain gauges πλήρους γέφυρας δίνεται από τον παρακάτω τύπο.



$$\varepsilon = -\frac{V_{out,Bridge}}{V_{in,Bridge} \cdot GF} \quad (9)$$

Από τη σχέση (8) και (9) προκύπτει, αφού η τάση εξόδου της γέφυρας Wheatstone $V_{out,Bridge}$ είναι η τάση εισόδου $V_{out,INA}$ του ενισχυτή INA121.

$$\varepsilon = -\frac{(2 \cdot V_{out,Con}) - 5 \text{ Volt}}{G \cdot V_{in,Bridge} \cdot GF} \quad (10)$$

Παρακάτω παρουσιάζεται η συσχέτιση της παραμόρφωσης ε με τη δύναμη F .

$$F = E \cdot \varepsilon \cdot A \quad (11)$$

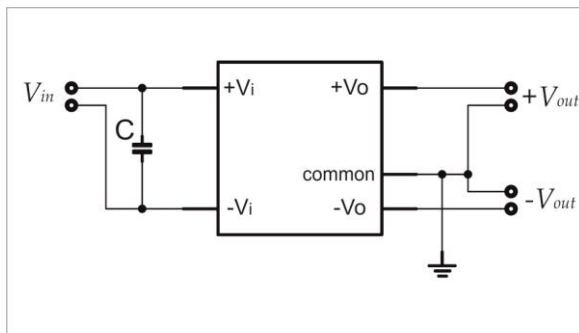
Όπου το E είναι το μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus), η οποία για χάλυβα τύπου 304 είναι 195000 Μρα και A είναι διατομή του πρώιμου έξυπνου εργαλείου, η οποία υπολογίστηκε στα 309.25 mm². Από το συνδυασμό των εξισώσεων (10) και (11) έχουμε τη συνολική σχέση υπολογισμού της ασκούμενης δύναμης στο πρώιμο εργαλείο.

$$F = -E \cdot A \cdot \frac{(2 \cdot V_{out,Con}) - 5 \text{ Volt}}{G \cdot V_{in,Bridge} \cdot GF} \quad (12)$$

Ένα ακόμα στοιχείο που ενσωματώθηκε στη πλακέτα ενίσχυσης σημάτων είναι ο μετατροπέας DC - DC, προκειμένου να καλυφθούν οι απαιτήσεις τάσης για την οδήγηση των όλων των ολοκληρωμένων στοιχείων της. Οι απαιτήσεις αυτές οφείλονται στον ενισχυτή INA121 που απαιτεί τάση πόλωσης από -12 έως +12 Volt, ώστε να αποδώσει τα απαιτούμενα εύρη τάσης εξόδου.

Μετατροπέας DC - DC

Μετατροπέας τάσης DC - DC



Εικόνα 8.8: Κυκλωματικό διάγραμμα του μετατροπέα τάσης DC-DC.

Η απαίτηση αυτή δεν είναι εφικτή από τη τάση τροφοδοσίας του πρώιμου έξυπνου εργαλείου που είναι στα 12 Volt, τα οποία τροφοδοτούνται από εξωτερικό τροφοδοτικό ή από μπαταρία και σταθεροποιούνται στη πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας του. Για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να ενσωματωθεί ένας μετατροπέας DC - DC που να μετατρέπει τη συνεχή τάση των 5 Volt σε συνεχή τάση ± 12 Volt.

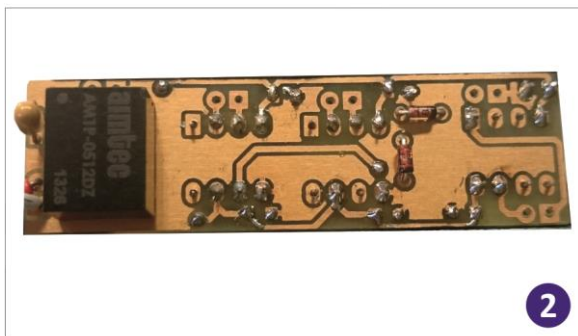
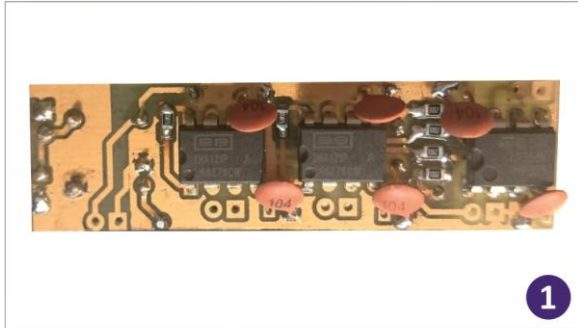
Ο μετατροπέας DC - DC που χρησιμοποιήθηκε είναι ο AM1P-0512DZ και κατασκευάζεται από την εταιρία Aimtec. Η τοπολογία συνδεσμολογίας του παρουσιάζεται στην εικόνα 8.8. Η τάση στην είσοδο του μετατροπέα πρέπει να κυμαίνεται από 4.5 έως και 5.5 Volt και η τάση στην έξοδο του είναι ± 12 Volt, όπου και ικανοποιεί τις απαιτήσεις

τροφοδοσίας του ενισχυτή INA121. Επιπρόσθετα, ο κατασκευαστής αναφέρει ότι η απόδοση του είναι 80% και το μέγιστο ρεύμα εξόδου του είναι στα ± 42 mA, τα οποία είναι και υπεραρκετά για τις απαιτήσεις ρεύματος του ενισχυτή INA121, που χρειάζεται ± 4 mA ρεύμα τροφοδοσίας.



Πλακέτα ενίσχυσης σημάτων

Η πλακέτα ενίσχυσης σημάτων των Strain gauges



Εικόνα 8.9: Η πάνω (1) και κάτω (2) όψη της πλακέτας ενίσχυσης σημάτων.

Στα σχήματα 1 & 2 της εικόνας 8.9 παρουσιάζονται οι δύο όψεις της πλακέτας ενίσχυσης σημάτων που κατασκευάστηκε για την ενίσχυση των σημάτων εξόδου της γέφυρας Wheatstone, που είναι διατεταγμένα τα strain gauges, προκειμένου να μετρηθούν από τον ADC μετατροπέα της κεντρική μονάδας επεξεργασίας, ώστε να υπολογιστεί και να καταγραφεί η δύναμη που ασκείται στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο κατά τη χρήση του σε διαδικασίες κρουστικής λάξευσης.

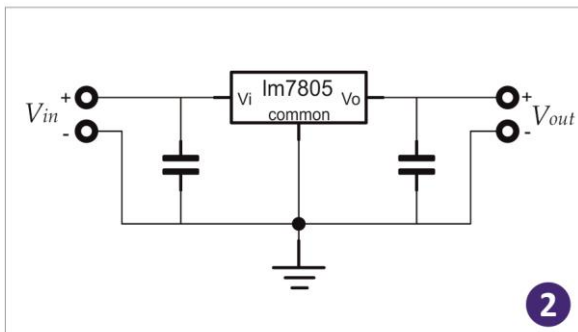
Στην πάνω όψη (σχήμα 1) διακρίνονται οι δύο ενισχυτές σημάτων INA121 (ένας για κάθε μία από τις δύο διατάξεις γέφυρας Wheatstone, που χρησιμοποιήθηκαν) και το LM358N που χρησιμοποιήθηκε ως μετατροπέας διπολικού σήματος σε μονοπολικό.

Στην κάτω όψη της πλακέτας ενίσχυσης παρουσιάζεται ο μετατροπέας DC – DC που ενσωματώθηκε.

8.7 Σχεδιασμός πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας

Πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας

Η πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας με το LM7805



Εικόνα 8.10: Η όψη (1) και το κυκλωματικό διάγραμμα (2) της πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας.

Για τη πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας του πρώιμου έξυπνου εργαλείου (σχήμα 2, εικόνα 8.10) χρησιμοποιήθηκε ο σταθεροποιητής τάσης L7805ABD2T της εταιρίας ST microelectronics, ο οποίος σταθεροποιεί την τάση εξόδου στα 5 Volt, ώστε να τροφοδοτηθούν με ασφάλεια όλες οι διατάξεις που ενσωματώθηκαν στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο.

Αυτός ο σταθεροποιητής τάσης δέχεται τάση εισόδου από 5 Volt έως και 18 Volt και τα σταθεροποιεί στα 5 Volt στην έξοδο του. Το μέγιστο όριο ρεύματος λειτουργίας του είναι στα 1,5 A και μπορεί να τροφοδοτήσει όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων που τροφοδοτεί.

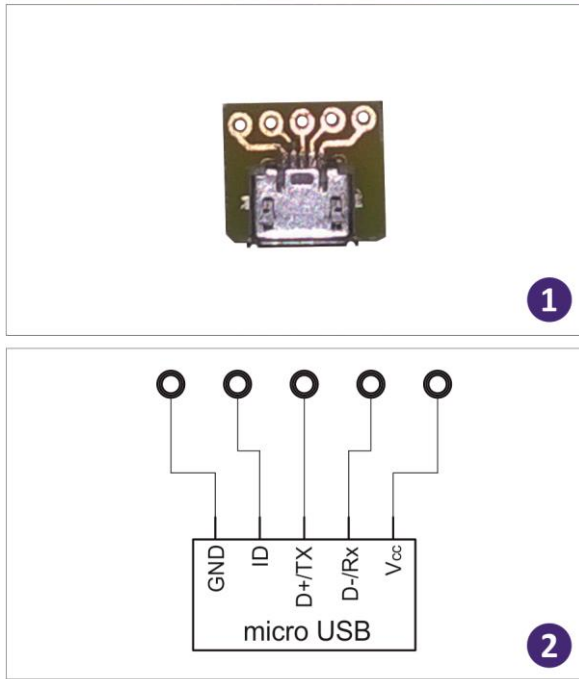
Η συνδεσμολογία που υλοποιήθηκε στην πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας παρουσιάζεται στο σχήμα 2 της εικόνας 8.10 και πρόκειται για ένα αρκετά απλό κύκλωμα που χρησιμοποιεί δύο πυκνωτές εξομάλυνσης, ένα για την τάση εισόδου και ένα για τη τάση εξόδου.



8.8 Σχεδιασμός πλακέτας διασύνδεσης τύπου micro USB

Micro USB

Η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB



Εικόνα 8.11: Η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB.

Η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB, που παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 8.11, κατασκευάστηκε με σκοπό τη διασύνδεση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας του πρώιμου έξυπνου εργαλείου, με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η διασύνδεση αυτή επιτυγχάνει την επικοινωνία προκειμένου να μεταφερθούν όλα τα συλλεγόμενα δεδομένα των αισθητηρίων, για την καταγραφή τους και την περαιτέρω επεξεργασία τους σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Στο σχήμα 2 απεικονίζεται το διάγραμμα της συνδεσμολογίας που υλοποιήθηκε στην πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB. Όπως μπορεί να παρατηρηθεί, η πλακέτα επιτρέπει την ευκολότερη διασύνδεση των επαφών του micro USB με τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας.

8.9 Συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης ηλεκτρονικών

Στην εικόνα 8.12 παρουσιάζεται το συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων που ενσωματώθηκαν στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης. Στην παρακάτω αρίθμηση παρουσιάζονται οι ηλεκτρονικές διατάξεις της εικόνας.

1. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας
2. Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης
3. Η μονάδα για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD
4. Πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB
5. Η πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας
6. Το αισθητήριο μέτρησης της θερμοκρασίας
7. Η πλακέτα ενίσχυσης σημάτων
8. Το RGB LED ένδειξης λειτουργίας
9. Το push button επιλογής λειτουργίας

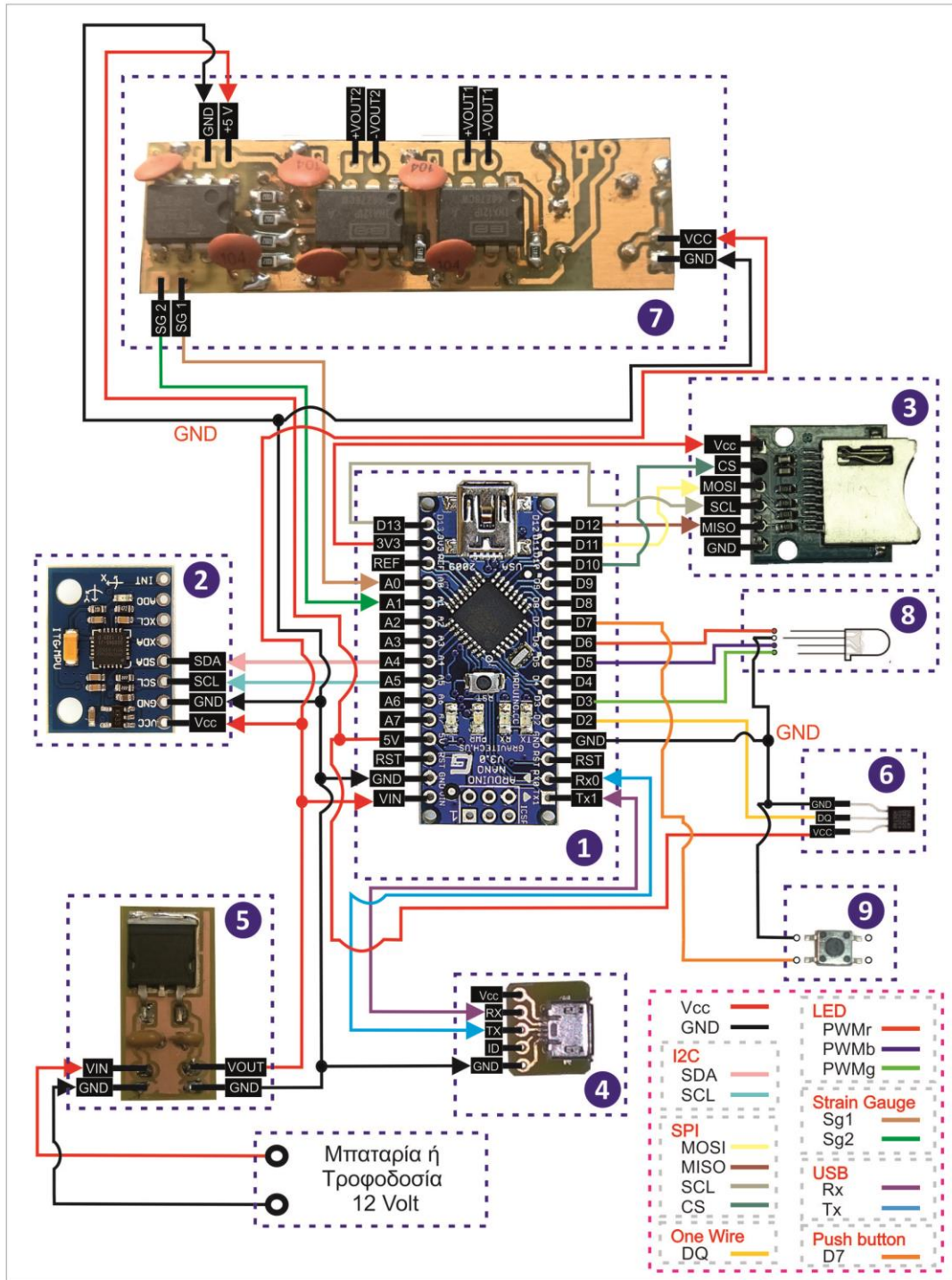
Στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (1) συνδέονται, οι δύο έξοδοι σημάτων της πλακέτας ενίσχυσης (7) σε δύο εισόδους που αντιστοιχούν στο μετατροπέα ADC, οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με I2C πρωτόκολλο της μονάδας IMU (2), οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με SPI πρωτόκολλο της μονάδας micro SD (3), οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με σειριακό πρωτόκολλο της μονάδας micro USB (4), η είσοδος/έξοδος επικοινωνίας με OneWire πρωτόκολλο του αισθητηρίου θερμοκρασίας (6), τρεις ψηφιακές έξοδοι με δυνατότητα PWM (Pulse Width Modulation) παλμού για την οδήγηση του RGB LED (8) και μια ψηφιακή είσοδο για την αναγνώριση κατάστασης του push button (9). Επίσης η κεντρική μονάδα επεξεργασίας τροφοδοτεί με 3.3 Volt τη μονάδα IMU (2) και micro SD (3), ενώ η



πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας (5) τροφοδοτεί την κεντρική μονάδα επεξεργασίας (1), τη μονάδα ενίσχυσης (7) και το αισθητήριο θερμοκρασίας (6) με 5 Volt.

Συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης ηλεκτρονικών διατάξεων

Το διάγραμμα διασύνδεσης των ηλεκτρονικών διατάξεων του πρώιμου έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης



Εικόνα 8.12: Το συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, όπου (1) η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, (2) η μονάδα IMU, (3) η μονάδα micro SD, (4) η μονάδα micro USB, (5) η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, (6) το αισθητήριο θερμοκρασίας, (7) η μονάδα ενίσχυσης σημάτων, (8) το RGB LED και (9) το push button.



8.10 Προβλήματα έκδοσης

Στις πρώτες πειραματικές δοκιμές, με σενάρια θλίψης σε μηχανή εφελκυσμού, του πρώιμου έξυπνου εργαλείου διαπιστώθηκαν κάποια προβλήματα που αφορούσαν τις ηλεκτρονικές διατάξεις του. Τα προβλήματα αυτά αναφέρονται παρακάτω, τα κυριότερα εκ των οποίων αφορούν το θόρυβο που παρουσίαζαν τα μετρούμενα σήματα από τις διατάξεις των strain gauges και το μεγάλο χρόνο που απαιτεί ο μικροελεγκτής για να ολοκληρώσει ένα κύκλο προγράμματος.

Η συνολική διάταξη για τη μέτρηση της παραμόρφωσης (κατ' επέκταση τον υπολογισμό της αξονικής δύναμης που ασκείται στο έξυπνο εργαλείο), όπου απαρτίζεται από τη διάταξη γέφυρας Wheatstone των strain gauges, τη πλακέτα ενίσχυσης σημάτων και τον ενσωματωμένο μετατροπέα ADC της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας, παρουσίασαν προβλήματα με αποτέλεσμα η καταγραφή των σημάτων να μην είναι ικανοποιητική. Αρχικά, τα strain gauges τοποθετήθηκαν υπό κάμψη, στο εσωτερικό καμπύλο τμήμα του πρώιμου έξυπνου εργαλείου, αυτό είχε ως αποτέλεσμα η γέφυρα Wheatstone να μην είναι σε κατάσταση ισορροπίας, όταν το σύστημα ήταν σε αδράνεια, επηρεάζοντας έτσι τα σήματα εξόδου της.

Η πλακέτα ενίσχυσης εισήγαγε παραπάνω από το επιθυμητό, θόρυβο, στις μετρούμενες τιμές, με αποτέλεσμα τα συλλεγόμενα δεδομένα να μην είναι ικανοποιητικά για τη περεταίρω επεξεργασία τους, αλλά και να μην πραγματοποιείται ακριβής μέτρηση. Αν και στο υλικολογισμικό λειτουργίας του πρώιμου έξυπνου εργαλείου είχε αναπτυχθεί ένα χαμηλοπερατό φίλτρο για την εξομάλυνση των συλλεγόμενων δεδομένων, παραταύτα δεν επιτύχανε την εξομάλυνση του θορύβου, σε τέτοιο επίπεδο, ώστε να είναι αξιοποιήσιμα.

Επίσης, λόγω της μετατροπής του διπολικού σήματος σε μονοπολικό, αυξήθηκε η μικρότερη μετρούμενη τιμή. Δηλαδή, το διπολικό σήμα έχει εύρος τάσης 10 Volt από -5 έως +5 Volt, μετατρέποντας το σε μονοπολικό το εύρος τάσης μειώθηκε σε 5 Volt από 0 έως 5 Volt. Επομένως, χάθηκε ακρίβεια στη ψηφιοποίηση του αρχικού σήματος, από τη μονάδα ADC.

Μείζον πρόβλημα παρουσίασε και η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, όπου παρατηρήθηκε ότι ο μικροελεγκτής απαιτούσε μεγάλο χρόνο για να εκτελέσει όλες τις εντολές. Αυτό οφειλόταν κυρίως στην micro SD και στο αισθητήριο θερμοκρασίας που καθυστερούσαν τις υπόλοιπες διεργασίες. Αν και η micro SD που χρησιμοποιεί το πρωτόκολλο SPI, το οποίο επιτυγχάνει πολύ υψηλή ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων 16.000.000 BPS, απαιτούσε μεγάλο χρόνο για να ανοίξει το αρχείο που αποθήκευε τα δεδομένα. Επίσης, και το αισθητήριο θερμοκρασίας ήθελε αρκετό χρόνο για να αποστείλει τη μετρούμενη τιμή που συνέλλεγε, στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας.

Ακόμα ένα, από τα προβλήματα που παρουσιάστηκαν στο πρώιμο έξυπνο εργαλείο ήταν η μπαταρία. Αν και είχε μελετηθεί η εισαγωγή αλκαλικής μπαταρίας Pb – Hg, 12 Volt τύπου A27 και είχαν διαμορφωθεί οι κατάλληλοι χώροι για την εισαγωγή της στα εσωτερικά τμήματα συγκράτησης των ηλεκτρονικών διατάξεων, η επιλογή της δεν ήταν καλή αφού δεν μπορούσε να τροφοδοτήσει με την απαραίτητη ενέργεια τα ηλεκτρονικά, με αποτέλεσμα να λειτουργεί με τον περιορισμένο χρόνο των 2 λεπτών.

Επομένως απορρίφθηκε και αφαιρέθηκε από τη συνολική διάταξή του, με αποτέλεσμα το έξυπνο εργαλείο να τροφοδοτείται από εξωτερικό τροφοδοτικό. Στα αρχικά πλάνα δεν συμπεριλήφθηκε κύκλωμα επιτήρησης φόρτισης της μπαταρίας γιατί η επαναφόρτισή της, επιλέχθηκε να επιτυγχάνεται, αφαιρώντας την από το έξυπνο εργαλείο και τοποθετώντας την σε εξωτερική μονάδα φόρτισης.



Άλλο ένα ζήτημα ήταν ότι δεν μελετήθηκε η ενσωμάτωση ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth του έξυπνου εργαλείου με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Αυτό το ζήτημα μαζί με το πρόβλημα της μπαταρίας καθιστούσαν το έξυπνο εργαλείο ως συσκευή περιορισμένης εργονομίας και αυτονομίας, για τη χρήση του σε διαδικασίες σμίλευσης.



9. Ηλεκτρονικές διατάξεις που ενσωματώθηκαν στην προτυποποιημένη και στη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Η καινούργια σχεδίαση των ηλεκτρονικών διατάξεων του εργαλείου κρουστικής λάξευσης, η οποία χρησιμοποιήθηκε στην προτυποποιημένη και βελτιστοποιημένη έκδοσή του, έλυσε αρκετά από τα προβλήματα της προηγούμενης σχεδίασης. Προτεραιότητα στην σχεδίαση αυτή δόθηκε στη βελτιστοποίηση της συνολικής διάταξης μέτρησης των εξωτερικών ασκούμενων δυνάμεων, στην ελαχιστοποίηση του χρόνου λειτουργίας και στην αυτονομία του.

Για τη νέα συνολική διάταξη μέτρησης των εξωτερικών δυνάμεων επιλέχθηκε μια μονάδα ενίσχυσης, μέτρησης και ψηφιοποίησης των σημάτων εξόδου της γέφυρας Wheatstone. Η μετρούμενη τιμή αποστέλλεται στη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, μέσω πρωτόκολλου επικοινωνίας Modbus. Η μονάδα αυτή είναι βιομηχανικού τύπου με εξαιρετικά μικρές διατάξεις, ιδανική για να τοποθετηθεί στο εσωτερικό του έξυπνου εργαλείου και διαθέτει διακριτική ικανότητα ανάλογη των 18-bit. Για την επίτευξη της επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης και μέτρησης των σημάτων με τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485, η οποία επιτρέπει τη λειτουργία του πρωτοκόλλου Modbus.

Η νέα μονάδα κεντρικής επεξεργασίας διαθέτει ένα ARM Cortex-M4 μικροελεγκτή, αρχιτεκτονικής 32-bit, χρονισμένο στα 72 MHz. Ο μικροελεγκτής αυτός είναι περίπου τέσσερις φορές γρηγορότερος από αυτόν της προηγούμενης σχεδίασης του έξυπνου εργαλείου και απαιτεί πολύ λιγότερο χρόνο για την ολοκλήρωση όλων των διεργασιών. Διαθέτει όλα τα απαραίτητα πρωτόκολλα για την επίτευξη της επικοινωνίας του με τη μονάδα IMU (I2C) και micro SD (SPI). Επιπρόσθετα, διαθέτει τρεις διαφορετικές μονάδες σειριακής επικοινωνίας (UART), η μια απ' τις οποίες χρησιμοποιείται από τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth και η άλλη από τη μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485, για την υλοποίηση του πρωτοκόλλου Modbus.

Όσον αφορά την αυτονομία του έξυπνου εργαλείου η σχεδίαση της συνολικής διάταξης άλλαξε ριζικά από την προηγούμενη, προσθέτοντας χαρακτηριστικά που επιτύγχαναν την αυτόνομη λειτουργία του, για πάνω από τρεις ώρες, χωρίς διακοπή. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι η μπαταρία ιόντων λιθίου πολυμερούς LiPo, η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας και η μονάδα Bluetooth. Η μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε έχει τάση 3.7 Volt και χωρητικότητα 600 mAh με μέγιστο ρεύμα 15 A, η οποία καλύπτει τις ενεργειακές απαιτήσεις όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου.

Η νέα μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας που ενσωματώθηκε στη διάταξη επιτυγχάνει τη τροφοδοσία όλων των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων, από την μπαταρία ή από εξωτερική τροφοδοσία, μέσω του micro USB. Διαθέτει έναν DC – DC boost converter, ο οποίος αναλαμβάνει την ανύψωση της τάσης της μπαταρίας από τα 3.7 Volt στα 5.2 Volt, τα οποία μπορούν να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων. Επιπρόσθετα ενσωματώνει έναν επιτηρητή φόρτισης για μπαταρία, επηρεάζοντας θετικά την εργονομία του εργαλείου, αφού πλέον μπορεί να φορτιστεί συνδέοντας το εργαλείο σε εξωτερική τροφοδοσία, με την micro USB υποδοχή.

Η μονάδα Bluetooth που επιλέχθηκε (BlueSMiRF Gold της εταιρίας Sparkfun) διαθέτει μεγάλη εμβέλεια διασύνδεσης (έως 100 m) και επιτυγχάνει την ασύρματη διασύνδεση του έξυπνου εργαλείου με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, προκειμένου να αποσταλούν σε αυτόν, για αποθήκευση και περαιτέρω επεξεργασία τα συλλεγόμενα δεδομένα από τις αισθητήριες διατάξεις του. Η εμβέλεια του φτάνει τα 10 μέτρα και προδίδει αυξημένη εργονομία, χρηστικότητα και αυτονομία στο έξυπνο εργαλείο, αφού ο γλύπτης θα μπορεί να το χρησιμοποιήσει στις κατεργασίες που επιθυμεί, χωρίς να παρεμποδίζεται από κάποιο συνδεδεμένο καλώδιο.



Από τη νέα σχεδίαση, ανέπαφη δεν έμεινε και η μονάδα αδρανειακή μέτρησης IMU, όπου επιλέχθηκε μια ανώτερη μονάδα, η οποία επιτυγχάνει ακριβέστερες μετρήσεις. Αυτή η μονάδα διαθέτει γυροσκοπικό αισθητήρα, αισθητήρα επιτάχυνσης, αισθητήρα μαγνητικού πεδίου και αισθητήρα θερμοκρασίας και μπορεί να εξάγει πιο ακριβή δεδομένα, για τον προσανατολισμό που επιτυγχάνει το έξυπνο εργαλείο.

Επίσης, στη διάταξη προστέθηκε και ένας διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου. Αυτός ο διακόπτης επιτρέπει στο χρήστη του να ενεργοποιήσει/απενεργοποιήσει το έξυπνο εργαλείο, όταν αυτό είναι επιθυμητό, χωρίς να χρειάζεται να αποσυναρμολογήσει το εργαλείο για να αφαιρέσει τη μπαταρία.

9.1 Μονάδα κεντρικής επεξεργασίας με 32bit μικροελεγκτή

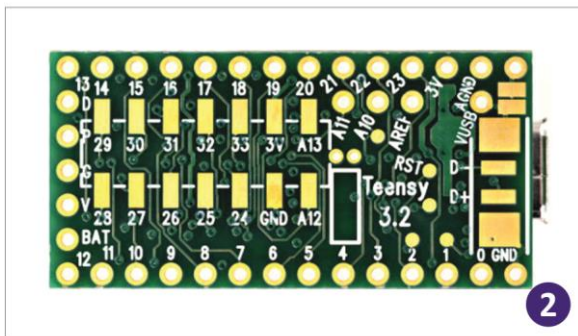
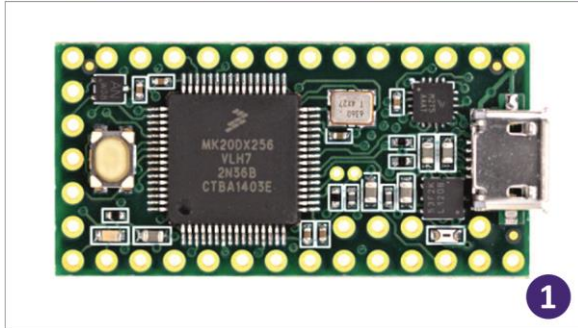
Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας που είναι υπεύθυνη για όλες τις λειτουργίες, όπως συλλογή, αποστολή και καταγραφή των μετρούμενων μεγεθών, ενσωματώθηκε και στις δύο εκδόσεις τη προτυποποιημένη και τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξυσης. Αυτή η κεντρική μονάδα επεξεργασίας απαρτίζεται από την αναπτυξιακή πλατφόρμα Teensy 3.2, της οποίας οι δύο όψεις παρουσιάζονται στα σχήματα της εικόνας 9.1 και διαθέτει ένα μικροελεγκτή αρχιτεκτονικής 32-bit, με ονομασία Cortex-M4, ο οποίος ανήκει στην οικογένεια των ARM μικροεπεξεργαστών. Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτής της αναπτυξιακής πλατφόρμας είναι:

- Ο μικροελεγκτής MK20DX256VLH7 Cortex-M4, οικογένειας ARM, με 32-bit αρχιτεκτονική
- Η συχνότητα κρυστάλλου χρονισμού του είναι στα 72 MHz και μπορεί να υπερχρονιστεί στα 96 MHz
- Η μνήμη τύπου Flash memory είναι 256 kBytes, με ταχύτητα μεταφοράς διαύλου δεδομένων bandwidth 192 MBytes per sec και το Cache της είναι 256 Bytes
- Η μνήμη RAM που διαθέτει είναι 64 kBytes
- Η μνήμη EEPROM είναι 2 kBytes
- Διαθέτει απευθείας πρόσβαση μνήμης (Direct Memory Access) 16 καναλιών
- 34 ψηφιακοί έξοδοι/είσοδοι (Digital I/O)
- 21 αναλογικές εισόδους, τις οποίες διαχειρίζονται 2 ADC, διακριτική ικανότητας 16-bit
- 2 Operational Amplifier με προγραμματιζόμενο κέρδος
- 1 αναλογική έξοδος από το μετατροπέα ψηφιακού σήματος σε αναλογικό (Digital to Analog Converter, DAC), διακριτικής ικανότητας 12-bit
- 12 έξοδοι PWM
- 3 χρονιστές τύπου FTM (Flex Timer Module)
- 1 χρονιστή τύπου PDB (Programmable Delay Block)
- 1 χρονιστή τύπου CTM (Compare Match Timer)
- 1 χρονιστή τύπου LPTMR (Low Power Timer)
- 4 χρονιστές τύπου PIT (Programmable Interval Timer)
- 1 χρονιστή τύπου Systic (Systems Tick Time)
- 1 μονάδα USB
- 3 μονάδες σειριακής επικοινωνίας UART
- Υποστηρίζει 1 διασύνδεση με πρωτόκολλο SPI
- Υποστηρίζει 2 διασυνδέσεις με πρωτόκολλο I2C
- Υποστηρίζει 1 διασύνδεση με πρωτόκολλο CANBus
- Τάση λειτουργίας 3.3 Volt
- Εύρος τάσης αναπτυξιακής πλατφόρμας 3.7 – 5.5 Volt
- Ο προγραμματισμός πραγματοποιείται μέσω USB/Bootloader



Η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας

Η αναπτυξιακή πλατφόρμα Teensy 3.2



Εικόνα 9.1: Η αναπτυξιακή πλατφόρμα Teensy 3.2, στις δύο όψεις της, εμπρόσθια (1) και οπίσθια (2).

Η συγκεκριμένη αναπτυξιακή πλατφόρμα επιλέχθηκε ως μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου, γιατί συνδυάζει υψηλές επιδόσεις σε χρονισμούς, διαθέτει όλα τα κατάλληλα πρωτόκολλα επικοινωνίας που απαιτούν οι επιμέρους ηλεκτρονικές διατάξεις και είναι εξαιρετικά μικρών διαστάσεων. Οι μικρές αυτές διαστάσεις είναι μήκος 35.56 mm και πλάτος 17.78 mm, όπου μπορεί να τοποθετηθεί με ευκολία στον περιορισμένο εσωτερικό χώρο του έξυπνου εργαλείου, αφήνοντας περισσότερο χώρο για τις υπόλοιπες ηλεκτρονικές διατάξεις του.

Ο μικροελεγκτής μέσω του κατάλληλου υλικολογισμικού που κατασκευάστηκε επιτυγχάνει την επικοινωνία με τη μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell (χρησιμοποιώντας τη σειριακή μονάδα διασύνδεσης Serial 1), την επικοινωνία με τη μονάδα ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth (χρησιμοποιώντας τη σειριακή μονάδα διασύνδεσης Serial 3), την επικοινωνία με τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU (μέσω πρωτόκολλου I2C), την επικοινωνία με τη μονάδα micro SD (μέσω πρωτόκολλου SPI) και την επικοινωνία με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή

μέσω της μονάδας διασύνδεσης micro USB.

Αναλυτικότερα, ο μικροελεγκτής λαμβάνει από τη μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell τη μετρούμενη δύναμη και τη μέτρηση της θερμοκρασίας. Από τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης λαμβάνει τις τέσσερις τιμές του τετραδονίου που περιγράφουν τον προσανατολισμό του εργαλείου στο χώρο, τις τρεις τιμές της γραμμικής επιτάχυνσης (μία για κάθε άξονα x, y, z), τέσσερις τιμές που αφορούν την κατάσταση του κάθε αισθητήρα (σύστημα, γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο και μαγνητόμετρο) και τη θερμοκρασία που μετράει η μονάδα IMU.

Τα συλλεγόμενα δεδομένα αποστέλλονται ενσύρματα μέσω του micro USB και ασύρματα μέσω του Bluetooth. Επιπρόσθετα αν το σύστημα αναγνωρίσει κάποια παρούσα αποθηκευτική μνήμη micro SD τα καταγράφει και σε ένα αρχείο σε αυτή.

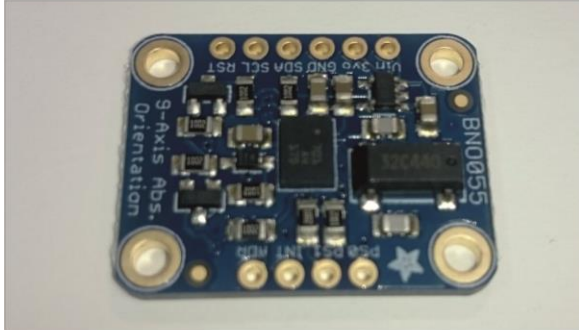
9.2 Μονάδα αδρανειακής μέτρησης (IMU)

Ο υπολογισμός του προσανατολισμού που επιτυγχάνει ένα σώμα στο χώρο είναι ένα εξαιρετικά δύσκολο πρόβλημα, όπου για την επίλυση του επιστρατεύονται μονάδες αδρανειακής μέτρησης, οι οποίες διαθέτουν αισθητήρια, όπως γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρο, μαγνητόμετρα και άλλα. Βέβαια και η μετατροπή των συλλεγόμενων δεδομένων αυτών των αισθητηρίων, στο πραγματικό προσανατολισμό του χώρου, είναι ένα δύσκολο πρόβλημα για επίλυση. Υπάρχουν αλγόριθμοι αυξημένης πολυπλοκότητας που συνδυάζουν τα συλλεγόμενα δεδομένα και από τα τρία αισθητήρια προκειμένου να επιτύχουν τον υπολογισμό του πραγματικού προσανατολισμού του σώματος που έχουν ενσωματωθεί.



Μονάδα αδρανειακής μέτρησης

Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης BNO055



Εικόνα 9.2: Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU, BNO055.

αναλαμβάνει το συνδυασμό τους, μέσω των κατάλληλων αλγορίθμων, προκειμένου να εξάγει ακριβή δεδομένα για τον προσανατολισμό.

Με σκοπό τη χρήση της συγκεκριμένης IMU, επιλέχθηκε η πλακέτα Adafruit BNO055 Absolute Orientation Sensor (εικόνα 9.2), η οποία ενσωματώνει την IMU μαζί με τα απαραίτητα κυκλώματα που απαιτεί για να λειτουργήσει. Η πλακέτα αυτή κατασκευάζεται από την εταιρία Adafruit, η οποία προσφέρει και μια βιβλιοθήκη για την ευκολότερη ανάπτυξη υλικολογισμικού διασύνδεσης της IMU. Τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι:

- Γυροσκοπικός αισθητήρας τριών αξόνων, με διακριτική ικανότητα 16-bit, τύπου MEMS
- Αισθητήρας επιτάχυνσης τριών αξόνων, με διακριτική ικανότητα 14-bit, τύπου MEMS
- Αισθητήρας μαγνητικού πεδίου τριών αξόνων, με ακρίβεια $\sim 0.3 \mu\text{T}$, τύπου MEMS
- 32-bit ARM μικροελεγκτή ως μονάδα ψηφιακής επεξεργασίας κίνησης DMP
- Κανάλι σειριακής διασύνδεσης/επικοινωνίας I2C πρωτόκολλου
- Κανάλι επανέναρξης (reset) της IMU
- Κανάλι εξόδου interrupt
- Κανάλι αλλαγής της διεύθυνσης 8-bit της IMU, ώστε να τοποθετηθούν δύο μονάδες IMU στην ίδια I2C διασύνδεση
- Κανάλι αλλαγής mode της IMU

Τα δεδομένα που μπορεί να εξάγει και να αποστείλει στη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας είναι τα ακόλουθα:

- Διάνυσμα απόλυτου προσανατολισμού σε γωνίες Euler (Absolute Orientation Euler vector)
- Διάνυσμα απόλυτου προσανατολισμού σε τετραδόνιο (Absolute Orientation Quaternion vector)
- Διάνυσμα γωνιακής ταχύτητας σε rad/sec (Angular velocity vector)
- Διάνυσμα επιτάχυνσης σε m/sec^2 μαζί με την επιτάχυνση της βαρύτητας (Acceleration vector, gravity plus linear motion)
- Διάνυσμα έντασης μαγνητικού πεδίου σε μT (Magnetic field strength vector)
- Διάνυσμα γραμμικής επιτάχυνσης σε m/sec^2 (Linear acceleration vector)
- Διάνυσμα της επιτάχυνσης της βαρύτητας σε m/sec^2 (Gravity vector)
- Και η μέτρηση της θερμοκρασία σε $^{\circ}\text{C}$



Ειδικότερα η μονάδα γυροσκοπίου διαθέτει δύο εύρη ανίχνευσης ανά άξονα στις ± 125 °/sec και ± 2000 °/sec. Για τη βελτιστοποίηση των μετρήσεων διαθέτει και ένα χαμηλοπερατό φίλτρο bandwidth 523 Hz – 12Hz. Το επιταχυνσιόμετρο διαθέτει εύρη ανίχνευσης ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g και ± 16 g, με χαμηλοπερατό φίλτρο bandwidth 1 kHz – 8Hz. Η μονάδα του μαγνητόμετρου διαθέτει εύρη ανίχνευσης ± 1300 μ T και ± 2500 μ T, με την ακρίβεια μέτρησης να φτάνει τα 0.3 μ T.

9.3 Μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth

Μονάδα Bluetooth

Η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth, BlueSMiRF



Εικόνα 9.3: Η μονάδα Bluetooth, BlueSMiRF.

Η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στις διατάξεις του προ τυποποιημένου και βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου είναι η μονάδα με ονομασία BlueSMiRF Gold της κατασκευάστριας εταιρίας Sparkfun. Το BlueSMiRF Gold ενσωματώνει μια μονάδα Bluetooth κατηγορίας class 1, η οποία είναι η RN41-3 της εταιρίας Roving Networks inc..

Η συσκευή αυτή μπορεί να επιτύχει ασύρματη μετάδοση των δεδομένων από το έξυπνο εργαλείο σε κάποιον εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω σειριακού πρωτόκολλου επικοινωνίας και επιτυγχάνει ταχύτητες μετάδοσης των δεδομένων από 2400 μέχρι 115200 bps (bits per second). Η

συχνότητα που χρησιμοποιεί κυμαίνεται από 2.401 έως 2.480 GHz.

Κατά τον κατασκευαστή του η εμβέλεια που επιτυγχάνει ανέρχεται στο μέγιστο των 100 m σε ανοικτό χώρο, γεγονός που το καθιστά μια πολύ δυνατή μονάδα ασύρματης επικοινωνίας, αλλά στη πρακτική εφαρμογή του παρατηρήθηκε ότι η εμβέλεια μειώθηκε αισθητά στα 10 m, η οποία είναι ικανοποιητική για τη λειτουργία του έξυπνου εργαλείου. Η μείωση τις εμβέλειας οφείλεται κυρίως στο ότι μονάδα Bluetooth ενσωματώθηκε στο εσωτερικό του έξυπνου εργαλείου, μαζί με τις υπόλοιπες ηλεκτρονικές διατάξεις, στα εσωτερικά τμήματα συγκράτησης τους. Το παχύ μεταλλικό εξωτερικό κέλυφος του εργαλείου παρεμποδίζει τη μετάδοση σημάτων, με αποτέλεσμα την εν λόγω μείωση της εμβέλειας.

9.4 Ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα (Strain gauges)

Για τα ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν στις εκδόσεις του προ τυποποιημένου και βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου επιλέχθηκαν πιο αξιόπιστα, κατασκευαστικά ανώτερα από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στις διατάξεις της πρώιμης έκδοσης του. Έτσι επιλέχθηκαν τα strain gauges με ονομασία SGD-3/350-XY11 που κατασκευάζει η εταιρία OMEGA, τα οποία είναι τύπου μισής γέφυρας (Half bridge). Δηλαδή η κάθε ροζέτα περιέχει δύο strain gauges διατρεγμένα σε κλήση 90° μεταξύ τους (εικόνα 9.4 και σχήμα 1). Τα κύρια χαρακτηριστικά της ροζέτας δύο stain gauges είναι:

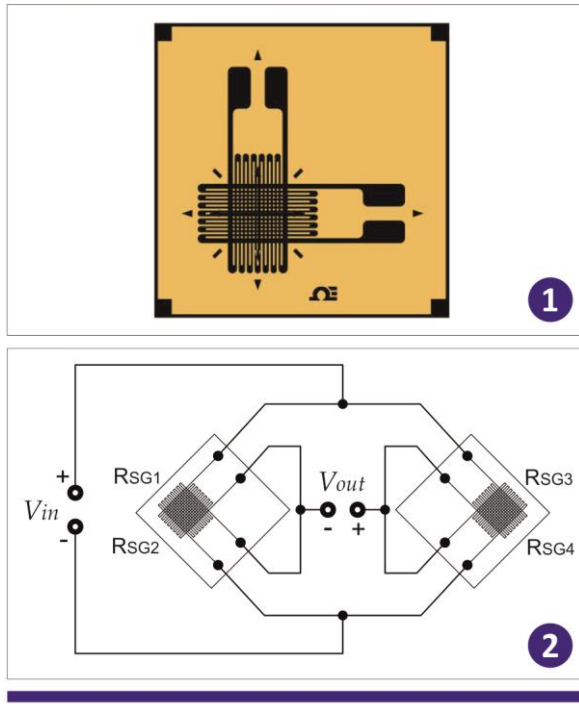
- Ονομαστική τιμή αντίστασης του κάθε ένα strain gauge είναι στα 350 Ω
- Μέγιστη μέση τιμή της τάσης λειτουργίας είναι 7.5 Volt
- Διαστάσεις του strain gauge είναι μήκος 3 mm και πλάτος 1.7 mm (Active gauge length and width)
- Διαστάσεις του φύλλου βάσης είναι μήκος 7.1 mm και πλάτος 7.1 mm (Carrier length and width)



- Σε κάθε επαφή των strain gauges υπάρχουν προ τοποθετημένα ειδικού τύπου καλώδια (Ribbon Leads), ώστε να επιτρέπεται η ασφαλέστερη επίτευξη της συνδεσμολογίας τους
- Τα συγκεκριμένα strain gauges είναι μελετημένα και κατασκευασμένα για εφαρμογές σε χάλυβα

Ηλεκτρικά μηχανισιόμετρα

Το ηλεκτρικό μηχανισιόμετρο μισής γέφυρας



Εικόνα 9.4: Το strain gauges μισής γέφυρας (1) και η συνδεσμολογία του (2).

Η διάταξη της γέφυρας Wheatstone με τα δύο Half bridge strain gauges, που χρησιμοποιήθηκε στο προ τυποποιημένο και βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο, παρουσιάζεται στο σχήμα 2 της εικόνας 9.4.

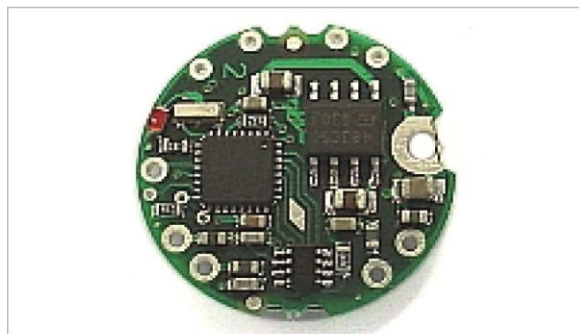
Πρόκειται για μια απλή συνδεσμολογία όπου η τάση εισόδου της γέφυρας Wheatstone τροφοδοτείται απευθείας από τη μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell, η οποία σταθεροποιεί την τάση στα 5 Volt, ώστε να παρέχεται συνεχής και ακριβής τάση, χωρίς διακυμάνσεις, με σκοπό την καλύτερη δυνατή μέτρηση.

Επίσης, λόγω της νέας σχεδίασης στο εξωτερικό τμήμα του προ τυποποιημένου και του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου, όπου διαμορφώθηκε ειδικός χώρος τοποθέτησης των strain gauges, με ευθείες επιφάνειες, αντί της προηγούμενης τοποθέτησης (στη πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου), η οποία ήταν σε κυλινδρική επιφάνεια, η γέφυρα Wheatstone είναι σε κατάσταση ισορροπίας, όταν το σύστημα βρίσκεται σε αδράνεια. Αυτό επηρεάζει θετικά την ακρίβεια της μέτρησης που επιτυγχάνεται.

9.5 Μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell

Μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης

Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell



Εικόνα 9.5: Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell.

Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 9.5, είναι ένας υψηλής ακρίβειας μετατροπέας (high – precision Converter) εξειδικευμένος για τη μέτρηση σημάτων από διατάξεις strain gauges και κατασκευάζεται από την εταιρία Mantracourt. Η μονάδα αυτή ενσωματώνει ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες ενισχύουν, ψηφιοποιούν και μεταφράζουν σε δύναμη, τα ασθενή σήματα εξόδου της γέφυρας Wheatstone, που έχουν τοποθετηθεί τα strain gauges τύπου half bridge.

Η διακριτική ικανότητα της μονάδας DCell είναι 18-bit, όπου της επιτρέπει υψηλή ακρίβεια στη μέτρηση των σημάτων. Η συχνότητα δειγματοληψίας που μπορεί να επιτύχει είναι



αρκετά υψηλή, μέχρι 500 Hz και οι υπόλοιπες επιλογές της είναι 1, 2, 5, 10, 20, 50, 60, 100, 200, 300 Hz.

Επίσης, οι ηλεκτρονικές διατάξεις της, επιτρέπουν την αποστολή της ψηφιοποιημένης πλέον τιμής της ασκούμενης δύναμης στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου μέσω πρωτόκολλου Modbus αλλά και τη διασύνδεσή της, απευθείας με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (χρησιμοποιώντας τη πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας τύπου Modbus, που περιγράφεται στο κεφάλαιο 9.7). Η διασύνδεση της μονάδας DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή επιτυγχάνει τη διαχείριση και τον έλεγχο της, με το κατάλληλο λογισμικό που παρέχει η εταιρία.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι, το πρωτόκολλο Modbus επιτρέπει τη διασύνδεση πολλών συσκευών (μέχρι 32 συσκευές, αλλά η μονάδα DCell διαθέτει το φορτίο ενός τετάρτου σαν συσκευή, οπότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν έως και 128 μονάδες DCell) στην ίδια γραμμή επικοινωνίας και επομένως μπορεί να πραγματοποιηθεί η πολλαπλή μέτρηση, μέσω διαφορετικών μονάδων DCell. Έτσι σε περίπτωση που είναι επιθυμητό να τοποθετηθεί και δεύτερη ή και περισσότερες διατάξεις μέτρησης στο έξυπνο εργαλείο, δεν απαιτείται νέα σχεδίαση των ηλεκτρονικών διατάξεων, αφού μπορεί να επικοινωνήσουν, απλά διασυνδέοντας τες στην ίδια γραμμή επικοινωνίας.

Επιπροσθέτως, η μονάδα διαθέτει ειδικές λειτουργίες όπως τη διασύνδεση αισθητηρίου θερμοκρασίας (μόνο της κατηγορίας DS18S20, μέσω πρωτοκόλλου One-Wire), την αντιστάθμιση της μέτρησης με τη θερμοκρασία (Temperature compensation), την εισαγωγή δυναμικού χαμηλοπερατού φίλτρου στη μέτρηση, τη λειτουργία αυτοέλεγχου της (Self-diagnostics) και άλλες. Οι παράμετροι όλων αυτών των λειτουργιών ορίζονται από τον χρήστη, μέσα από το λειτουργικό διαχείρισης της.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με την επίτευξη επικοινωνίας της μονάδας DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, ο χρήστης μπορεί να τη διαχειριστεί, μέσω του λειτουργικού. Έτσι, επιτυγχάνεται η διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας, προκειμένου να μετατρέπεται η μέτρηση σε ποσά δύναμης, αλλά και ο ορισμός των επιθυμητών παραμέτρων, για τις ειδικές λειτουργίες της, όπως και η αποσφαλμάτωση της συσκευής, σε περίπτωση που έχει διαγνωστεί.

Η τάση λειτουργίας της είναι από 5.6 Volt μέχρι 18 Volt, όπου τροφοδοτεί και τη διάταξη της γέφυρα Wheatstone με 5 Volt, ενώ η κατανάλωση της ανέρχεται στα 40 mA.

9.6 Σχεδιασμός πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του εργαλείου μέσω Modbus πρωτόκολλο

Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell, η οποία παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, απαιτεί για τη διασύνδεση της, πρωτόκολλο τύπου Modbus RTU (Modicon Communication Bus Remote Terminal Unit). Το πρωτόκολλο Modbus συνιστάται από την αμφίδρομη επικοινωνία τοπολογίας διαύλου (bus topology), όπου κάθε συσκευή συνδέεται σε κόμβους ενός κεντρικού διαύλου επικοινωνίας. Η διασύνδεση που ακολουθείται είναι τύπου κύριας/υφιστάμενων συσκευών (master/slave devices).

Η βασική προϋπόθεση στο πρωτόκολλο αυτό είναι η ύπαρξη μια κύριας συσκευής ελέγχου (master device), η οποία θα ελέγχει τις υφιστάμενες εξαρτημένες συσκευές (slave devices), στέλνοντας τους κωδικοποιημένες οδηγίες για τη διεργασία την οποία επιθυμεί να ολοκληρώσουν. Μόλις ολοκληρωθεί η διεργασία, η υφιστάμενη εξαρτημένη συσκευή αποστέλλει το αποτέλεσμα της στην κύρια συσκευή ελέγχου.

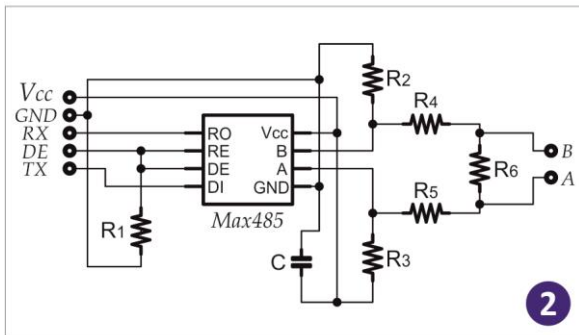
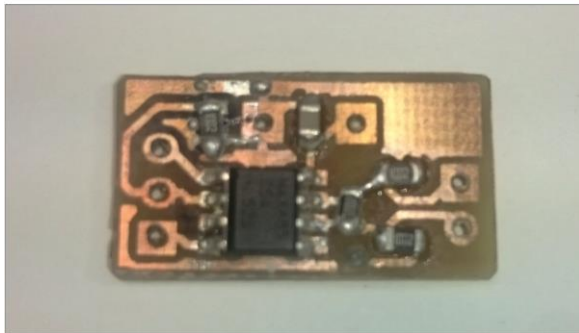


Μια άλλη προϋπόθεση του πρωτόκολλου Modbus αφορά το δίαυλο επικοινωνίας, ο οποίος πρέπει να είναι ισορροπημένης διαφορικής μετάδοσης (Differential Balance Transmission). Η μετάδοση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση δύο αγωγών (συνεστραμμένου ζεύγους), όπου ο ένας αγωγός μεταφέρει τη πληροφορία με την ορθή μετάδοση του σήματος (Data+, channel A), ενώ ο άλλος μεταφέρει τη πληροφορία με ανεστραμμένη μετάδοση του σήματος (Data-, channel B).

Αυτού του είδους ο δίαυλος επικοινωνίας προσφέρει μεγάλο εύρος στην απόσταση της διασύνδεσης (μέχρι και 1000 m), απλούστερη διασύνδεση με λιγότερους αγωγούς, αλλά και ασφαλέστερη μεταφορά των δεδομένων ακόμα και σε περιβάλλοντα με μεγάλο θόρυβο, τα οποία θα μπορούσαν να προκαλέσουν κάποια απώλεια δεδομένων.

Μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας

Η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485



Εικόνα 9.6: Η μονάδα RS485 και η συνδεσμολογία της.

Από την άλλη ο μικροελεγκτής της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου δεν υποστηρίζει την απευθείας επικοινωνία αυτού του τύπου πρωτόκολλου. Χρειάστηκε η σχεδίαση και κατασκευή μιας μονάδας αμφίδρομης επικοινωνίας, προκειμένου να πραγματοποιηθεί η διασύνδεση του μικροελεγκτή στο δίαυλο επικοινωνίας.

Η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας που παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 9.6, χρησιμοποιεί το ολοκληρωμένο κύκλωμα MAX485 το οποίο μετατρέπει τα δεδομένα που αποστέλλονται από την έξοδο (Transmitter Tx) της ενσωματωμένης μονάδας εκπομπής δεδομένων της σειριακής θήρας, την οποία διαθέτει ο μικροελεγκτής, σε διαφορικό σήμα δύο καναλιών (A⁺ & B⁻).

Στην αντίστροφη λειτουργία της αμφίδρομης επικοινωνίας, το ολοκληρωμένο αναλαμβάνει να μετατρέψει το εισερχόμενο διαφορικό σήμα του διαύλου, το οποίο στη συνέχεια θα το οδηγήσει στην είσοδο (receiver Rx) της μονάδας του δέκτη της σειριακής θύρας του μικροελεγκτή.

Το ολοκληρωμένο IC, MAX485, απαιτεί για τη βέλτιστη λειτουργία του τη συνδεσμολογία που παρουσιάζεται στο σχήμα 2 της εικόνας 9.6. Οι ενεργειακές του απαιτήσεις βρίσκονται σε εξαιρετικά χαμηλά επίπεδα, της τάξης των 120 μ A με 500 μ A και η τάση τροφοδοσίας του είναι στα 5 Volt. Η μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς δεδομένων που μπορεί να επιτύχει ανέρχεται έως και τα 250 Kbps και μπορεί να υποστηρίξει τη διασύνδεση μέχρι και 32 συσκευών στο δίαυλο.

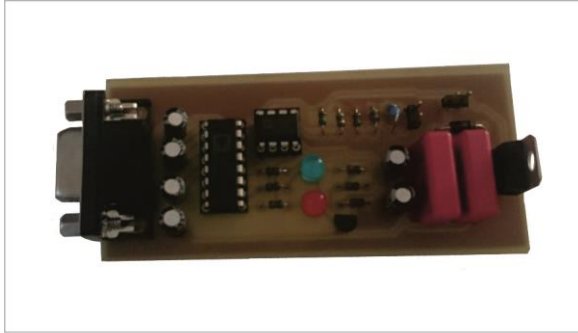
Βάσει των παραπάνω η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας επιτυγχάνει της διασύνδεση της μονάδας κεντρικής επεξεργασίας με τη μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell, μέσω πρωτόκολλου τύπου Modbus. Για τη διασύνδεση της μονάδας DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η διάταξη αυτή, λόγω του ότι απαιτείται και η χρήση του ολοκληρωμένου IC, RS232. Έτσι σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε η μονάδα που παρουσιάζεται στο επόμενο κεφάλαιο.



9.7 Σχεδιασμός πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή

Μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας

Η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS232 - RS485



Εικόνα 9.7: Η μονάδα RS232 -RS485 που κατασκευάστηκε.

Όπως προαναφέρθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, η μονάδα ενίσχυσης DCell χρησιμοποιεί για την επίτευξη αμφίδρομης επικοινωνίας, το πρωτόκολλο Modbus RTU. Το πρωτόκολλο Modbus για τη λειτουργία του απαιτεί τη μετατροπή της σειριακής μετάδοσης δεδομένων, σε διαφορικό σήμα.

Ο μετατροπέας αυτός λειτουργεί σε επίπεδο TTL (Transistor - Transistor Logic), το οποίο κυμαίνεται μεταξύ 0 Volt και Vcc, όπου το Vcc διαφέρει ανάλογα το ενσωματωμένο και μπορεί να είναι +3.3 Volt ή +5 Volt. Στην επικοινωνία αυτή το λογικό '1' αναπαρίσταται από τα +5 Volt ή τα +3.3 Volt, ενώ το λογικό '0' από τα 0 Volt.

Από την άλλη η σειριακή θύρα του ηλεκτρονικού υπολογιστή χρησιμοποιεί το πρότυπο σειριακό πρωτόκολλο, το οποίο δεν είναι συμβατό στο επίπεδο του Hardware με τις υπόλοιπες TTL ηλεκτρονικές διατάξεις, σε απευθείας διασύνδεση. Αυτό γιατί σε επίπεδο Hardware, το πρότυπο σειριακό πρωτόκολλο λειτουργεί στα ± 25 Volt ή στα ± 13 Volt, αναλόγως τη σειριακή θύρα του ηλεκτρονικού υπολογιστή, όπου το λογικό '1' κυμαίνεται από -3 μέχρι -25 Volt ή -13 Volt και το λογικό '0' από +3 μέχρι +25 Volt ή +13 Volt.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η άμεση διασύνδεση της μονάδας DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή είναι αδύνατη. Επομένως, έπρεπε να επιστρατευτούν δύο μετατροπείς για την επίτευξη της διασύνδεσης, ο πρώτος αναλαμβάνει τη μετατροπή του πρότυπου σειριακού πρωτόκολλου σε σειριακό πρωτόκολλο επιπέδου TTL, ενώ ο δεύτερος αναλαμβάνει τη μετατροπή από TTL σειριακό πρωτόκολλο σε διαφορικό σήμα πρωτόκολλου Modbus.

Ο μετατροπέας που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι ο ADM232L της εταιρίας Analog Devices και υλοποιεί το πρότυπο σειριακής επικοινωνίας RS232 (Recommended Standard 232), το οποίο αναλαμβάνει τη μετατροπή του σήματος από τη σειριακή θύρα σε TTL επίπεδο. Η συνδεσμολογία του παρουσιάζεται στην εικόνα 9.8, όπου το κύκλωμα του είναι μαρκαρισμένο με περιθώρια μοβ απόχρωσης, για την ευκολότερη αναγνώριση του.

Ο δεύτερος μετατροπέας που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί είναι ο ADM485A της εταιρίας Analog Devices και υλοποιεί το πρότυπο διαφορικής επικοινωνίας RS485 (Recommended Standard 485), το οποίο αναλαμβάνει τη μετατροπή του σήματος από το TTL επίπεδο σε διαφορικό σήμα. Με μπλε απόχρωση περιθωρίου στην εικόνα 9.8 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε.

Οι δύο αυτοί μετατροπείς τροφοδοτούνται με συνεχής τάση των 5 Volt, η οποία παρέχεται από τη διάταξη τροφοδοσίας που ενσωματώθηκε στο κύκλωμα, η οποία χρησιμοποιεί το σταθεροποιητή τάσης LM7805. Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη διάταξη τροφοδοσίας παρουσιάζεται στην εικόνα 9.8, με περιθώρια μαρκαρίσματος κόκκινης απόχρωσης.

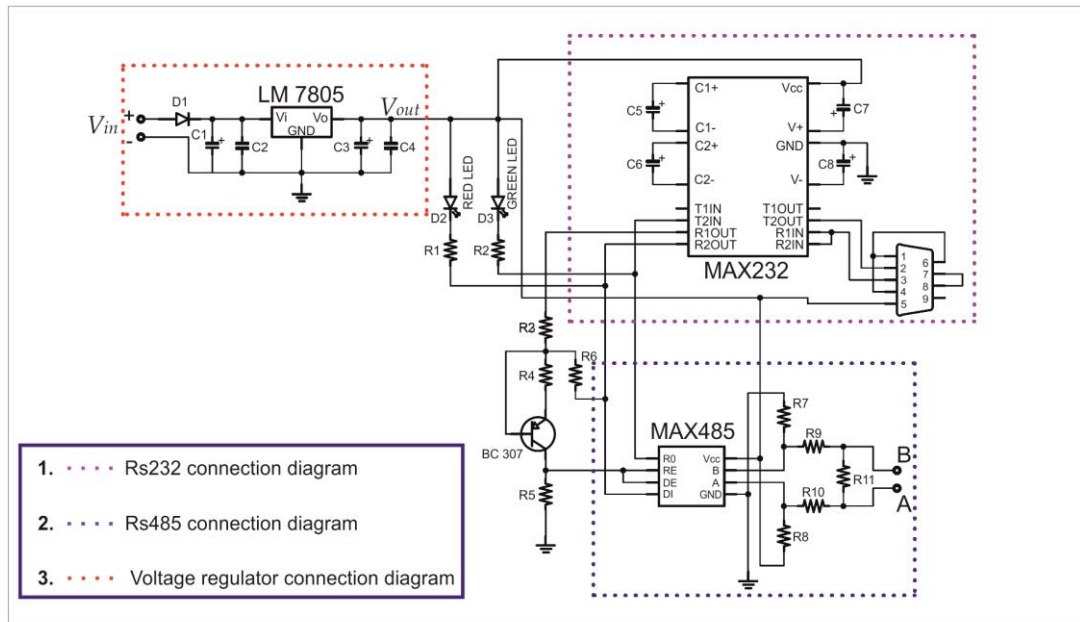
Βάσει των παραπάνω, για την επίτευξη της επικοινωνίας της μονάδας DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή κατασκευάστηκε η πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας RS232 – RS485, η οποία παρουσιάζεται στην εικόνα 9.7. Η πλακέτα αυτή ενσωματώνει όλες τις διατάξεις που



προαναφέρθηκαν (μετατροπέας επικοινωνίας RS232, μετατροπέας επικοινωνίας RS485 και σταθεροποιητής τάσης LM7805). Η συνολική συνδεσμολογία της παρουσιάζεται στην εικόνα 9.8.

Μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας Rs232 - Rs485

Το σχηματικό διάγραμμα της μονάδας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs232 - Rs485



Εικόνα 9.8: Η συνδεσμολογία των επιμέρους ηλεκτρονικών στοιχείων που απαρτίζουν τη μονάδα RS232 – RS485.

9.8 Αισθητήριο μέτρησης θερμοκρασίας

Το αισθητήριο θερμοκρασίας που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί στο προ τυποποιημένο και βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο είναι όπως και στη προηγούμενη σχεδίαση των ηλεκτρονικών διατάξεων της πρώιμης έκδοσης του, το DS18S2, με μια διαφοροποίηση στη χρήση του. Το συγκεκριμένο αισθητήριο θερμοκρασίας παρουσιάστηκε αναλυτικότερα στο κεφάλαιο 8.4.

Η διαφοροποίηση αφορά τη συνδεσμολογία του όπου πλέον συνδέθηκε στη μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης DCell, η οποία αναλαμβάνει να συλλέξει από αυτό τη μετρούμενη τιμή της θερμοκρασίας και να την αποστείλει στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (μειώνοντας έτσι τις διεργασίες που καλείται να πραγματοποιήσει ο μικροελεγκτής της) ή και να τη χρησιμοποιήσει στη διαδικασία αντιστάθμισης με θερμοκρασία, για βελτιστοποίηση της μέτρησης των σημάτων, από τη γέφυρα Wheatstone, που έχουν διαταχθεί τα strain gauges.

9.9 Πλακέτα διασύνδεσης και φόρτισης τύπου micro USB

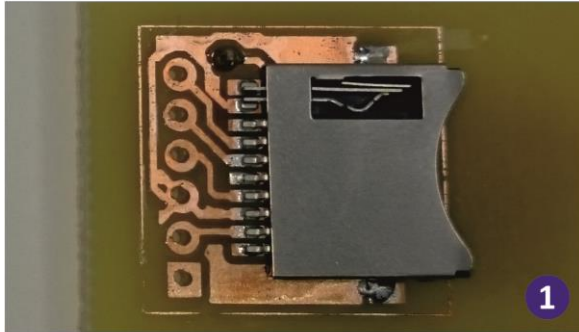
Η πλακέτα διασύνδεσης και φόρτισης τύπου micro USB που χρησιμοποιήθηκε στην προ τυποποιημένη και τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου είναι η ίδια με αυτή της προηγούμενης σχεδίασης που περιγράφεται στο κεφάλαιο 8.8. Μια διαφοροποίηση από την προηγούμενη σχεδίαση είναι ότι πλέον η μονάδα USB δεν χρησιμοποιείται μόνο για τη μεταφορά των δεδομένων σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή αλλά και για να τροφοδοτήσει με εξωτερική τροφοδοσία όλο το έξυπνο εργαλείο, προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις του αλλά και οι ανάγκες φόρτισης της ενσωματωμένης μπαταρίας τύπου LiPo.



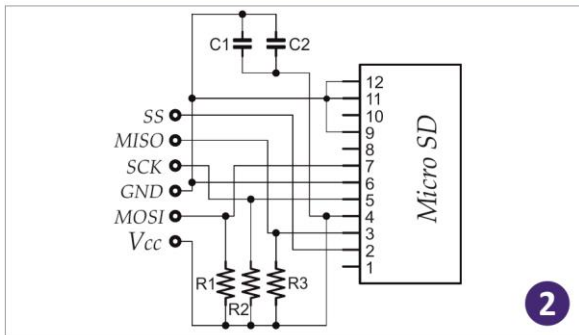
9.10 Σχεδιασμός πλακέτας για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD

Μονάδα micro SD

Η μονάδα εισαγωγής κάρτας micro SD



1



2

Εικόνα 9.9: Η μονάδα micro SD που κατασκευάστηκε (1) και η συνδεσμολογία της.

Η πλακέτα εισαγωγής πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης δεδομένων τύπου micro SD, η οποία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε για την ενσωμάτωσή της στην προ τυποποιημένη και τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου είναι αντίστοιχη με αυτή που χρησιμοποιήθηκε στην προηγούμενη έκδοση (κεφάλαιο 8.3).

Η μόνη διαφοροποίηση βρίσκεται στις συνολικές διαστάσεις τις πλακέτας, όπου η νέα είναι μικρότερων διαστάσεων. Έτσι η σχεδίαση αυτή επιτυγχάνει την τοποθέτηση της πλακέτας micro SD με μεγαλύτερη ευκολία, αλλά και καταναλώνοντας μικρότερο χώρο στο εσωτερικό του έξυπνου εργαλείου.

Η νέα μονάδα micro SD, χρησιμοποιεί, όπως και η προηγούμενη το πρωτόκολλο SPI για τη επίτευξη της αμφίδρομης επικοινωνίας με τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου, προκειμένου να μεταφερθούν τα δεδομένα προς αποθήκευση. Το διάγραμμα συνδεσμολογίας που απαιτεί η κάρτα micro SD για την επίτευξη του πρωτόκολλου SPI παρουσιάζεται στο σχήμα 2 της εικόνας 9.9.

9.11 Μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης της μπαταρίας

Μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας

Η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης



Εικόνα 9.10: Η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, PowerBoost500C.

Η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, η οποία επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί για να τροφοδοτήσει όλες τις ηλεκτρονικές διατάξεις του προ τυποποιημένου και του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, κατασκευάζεται από την εταιρία Adafruit και έχει ονομασία PowerBoost500C. Οι ηλεκτρονικές διατάξεις που διαθέτει είναι ικανές να καλύψουν όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις του έξυπνου εργαλείου είτε τροφοδοτείται μόνο από τη μπαταρία, είτε από εξωτερική πηγή τροφοδοσίας.

Αυτή η μονάδα επιτρέπει τη διασύνδεση μπαταρίας ενός Cell, τεχνολογίας ιόντων λιθίου (Li Ion, Lithium Ion) ή ιόντων λιθίου πολυμερούς (LiPo, Lithium Ion Polymer), με σκοπό την

αυτόνομη λειτουργία του έξυπνου εργαλείου, αλλά και την ταυτόχρονη τροφοδοσία των ηλεκτρονικών διατάξεων ενώ επιτηρεί τη βέλτιστη φόρτιση της, όταν διασυνδεθεί σε εξωτερική πηγή τροφοδοσίας, μέσω της κατάλληλης micro USB θύρας ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή.



Για να επιτύχει αυτές τις λειτουργίες, διαθέτει δύο ολοκληρωμένα IC, απ' τα οποία το ένα μετατρέπει την τάση της μπαταρίας στα επιθυμητά επίπεδα και το δεύτερο είναι ένας επιτηρητής φόρτισης μπαταριών. Ο μετατροπέας τάσης κατασκευάζεται από την εταιρία Texas Instruments και έχει ονομασία TPS61090, ενώ ο επιτηρητής φόρτισης είναι ο MCP73831, τον οποίο παράγει η εταιρία Microchip.

Όσο αναφορά το μετατροπέα τάσης, πρόκειται για ένα μετατροπέα ανύψωσης συνεχής τάσης σε συνεχή τάση (DC to DC converter) τύπου boost (boost ή step-up converter), ο οποίος δέχεται ως είσοδο συνεχή τάση από 1.8 Volt μέχρι τη μέγιστη τιμή των 5.5 Volt και στην έξοδο του τα ανυψώνει στο όριο των 5.2 Volt, παρέχοντας ρεύμα εξόδου της τάξης των 500 mA. Ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα αυτού είναι 96%, λόγω της σταθερής συχνότητας των PWM (Pulse Width Modulation) σημάτων που διαχειρίζονται τα διακοπτικά ημιαγωγικά στοιχεία του μετατροπέα.

Ο μετατροπέας αυτός είναι ιδανικός για εφαρμογές περιορισμένου χώρου, στις οποίες επιθυμείται η τροφοδοσία των υπόλοιπων ηλεκτρονικών διατάξεων, από μια μόνο μπαταρία. Αυτό γιατί η τάση ενός μόνο Cell μπαταρίας LiPo κυμαίνεται στα 3.7 Volt, ενώ οι απαιτήσεις τάσης των υπόλοιπων ηλεκτρονικών είναι στην τάξη των 5 Volt και ο μετατροπέας αυτός συνδυάζει όλες τις απαραίτητες διατάξεις, σε ένα αρκετά μικρών διατάξεων ολοκληρωμένο IC.

Από την άλλη, η απευθείας χρήση της μπαταρίας χωρίς κάποιο κύκλωμα επιτήρησης κυρίως για τη φόρτιση της, δεν συνιστάται, διότι μπορεί να οδηγήσει σε πιθανή καταστροφή της. Το πρόβλημα αυτό των ευπαθών LiPo μπαταριών επιλύει ο επιτηρητής φόρτισης που ενσωματώνει η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας.

Πρόκειται για ένα γραμμικό ελεγκτή διαχείρισης της φόρτισης ενός μόνο cell Lilon ή LiPo μπαταριών (Linear cell Lilon or LiPo battery charge management controller), ο οποίος ενσωματώνεται σε ένα εξαιρετικά μικρών διαστάσεων ολοκληρωμένο IC, καθιστώντας τον ιδανικό για χρήση σε εφαρμογές με περιορισμένο χώρο. Στα κύρια χαρακτηριστικά του διαθέτει αισθητήρα ρεύματος για τη ρύθμιση του ρεύματος φόρτισης, τέσσερις ρυθμίσεις για τη τάση φόρτισης (4.20, 4.35, 4.40 και 4.50 Volt), προστασία για την αναστροφή αποφόρτιση της μπαταρίας και προγραμματιζόμενη επιλογή του ορίου παύσης της διαδικασίας φόρτισης.

9.12 Μπαταρία τεχνολογίας λιθίου ιόντων πολυμερούς Li-Po

Μπαταρία Li-Po

Η μπαταρία λιθίου ιόντων πολυμερούς 3.7 Volt, 600 mA



Εικόνα 9.11: Η μπαταρία Tigers 600 mA ιόντων λιθίου πολυμερούς.

Η μπαταρία που ενσωματώθηκε στη νέα σχεδίαση των ηλεκτρονικών διατάξεων, που παρουσιάζεται στην εικόνα 9.11, είναι τεχνολογίας ιόντων λιθίου πολυμερούς (Lithium Ion Polymer, LiPo). Διαθέτει σχετικά μικρές διαστάσεις 5.7 mm μήκος, 1.1 mm πλάτος και 0.9 mm ύψος, που την καθιστούν ιδανική για τον περιορισμένο εσωτερικό χώρο του, χωρίς να θυσιάζονται τα απαιτούμενα ενεργειακά επίπεδα για τη τροφοδότηση των ηλεκτρονικών διατάξεων.

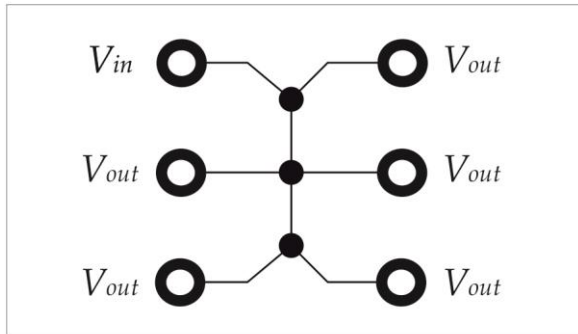
Η τάση της ανέρχεται στα 3.7 Volt και αποδίδει 600 mA, περίπου 2.1 Wh, με μέγιστο συνεχόμενο ρεύμα αποφόρτισης τα 15 A, οπού καλύπτει ικανοποιητικά τις ενεργειακές απαιτήσεις του έξυπνου εργαλείου για περίπου 3 ώρες συνεχόμενης λειτουργίας.



9.13 Σχεδιασμός πλακετών κόμβου τάσεων και γείωσης

Πλακέτα κόμβων τάσεων

Το σχηματικό διάγραμμα της πλακέτας κόμβων τάσεων



Εικόνα 9.12: Η συνδεσμολογία της πλακέτας κόμβων.

Πρόκειται για μια απλούστατη συνδεσμολογία κόμβου, όπως παρουσιάζεται στην εικόνα 9.12. Στη συνδεσμολογία αυτή η τάση εισόδου V_{in} συνδέεται με τις πέντε τάσεις εξόδου V_{out} .

Ο σχεδιασμός και η κατασκευή της πραγματοποιήθηκε για λόγους καλύτερης οργάνωσης και τακτοποίησης των καλωδίων αλλά και για τη βέλτιστη διασύνδεση όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων στον περιορισμένο χώρο του εσωτερικού του έξυπνου εργαλείου.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο από αυτές, η μία για τις ανάγκες διασύνδεσης της τροφοδοσίας των 5 Volt και η δεύτερη για τις ανάγκες των γειώσεων.

9.14 Συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης ηλεκτρονικών διατάξεων

Στην εικόνα 9.13 παρουσιάζεται το συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των ηλεκτρονικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο εκδόσεις του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης, την προτυποποιημένη και τη βελτιστοποιημένη έκδοση. Η χρωματική κωδικοποίηση των διασυνδέσεων που χρησιμοποιήθηκε στο διάγραμμα απεικονίζεται στον Πίνακα 3. Η αρίθμηση που ακολουθεί, αναφέρεται στην αρίθμηση των ηλεκτρονικών διατάξεων που δόθηκε στην εικόνα.

1. Η κεντρική μονάδα επεξεργασίας
2. Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell
3. Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU
4. Η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485, η οποία επιτυγχάνει τη διασύνδεση της μονάδας DCell με τη κεντρική μονάδα επεξεργασίας, μέσω πρωτόκολλου Modbus
5. Η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth
6. Η πλακέτα για εισαγωγή πρόσθετης αποθηκευτικής μνήμης τύπου micro SD
7. Η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας με επιτηρητή φόρτισης μπαταρίας
8. Η μπαταρία τεχνολογίας LiPo
9. Η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB
10. Ο διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου
11. Το push button επιλογής σεναρίου λειτουργίας
12. Το RGB LED ένδειξης της λειτουργίας
13. Το αισθητήριο μέτρησης της θερμοκρασίας

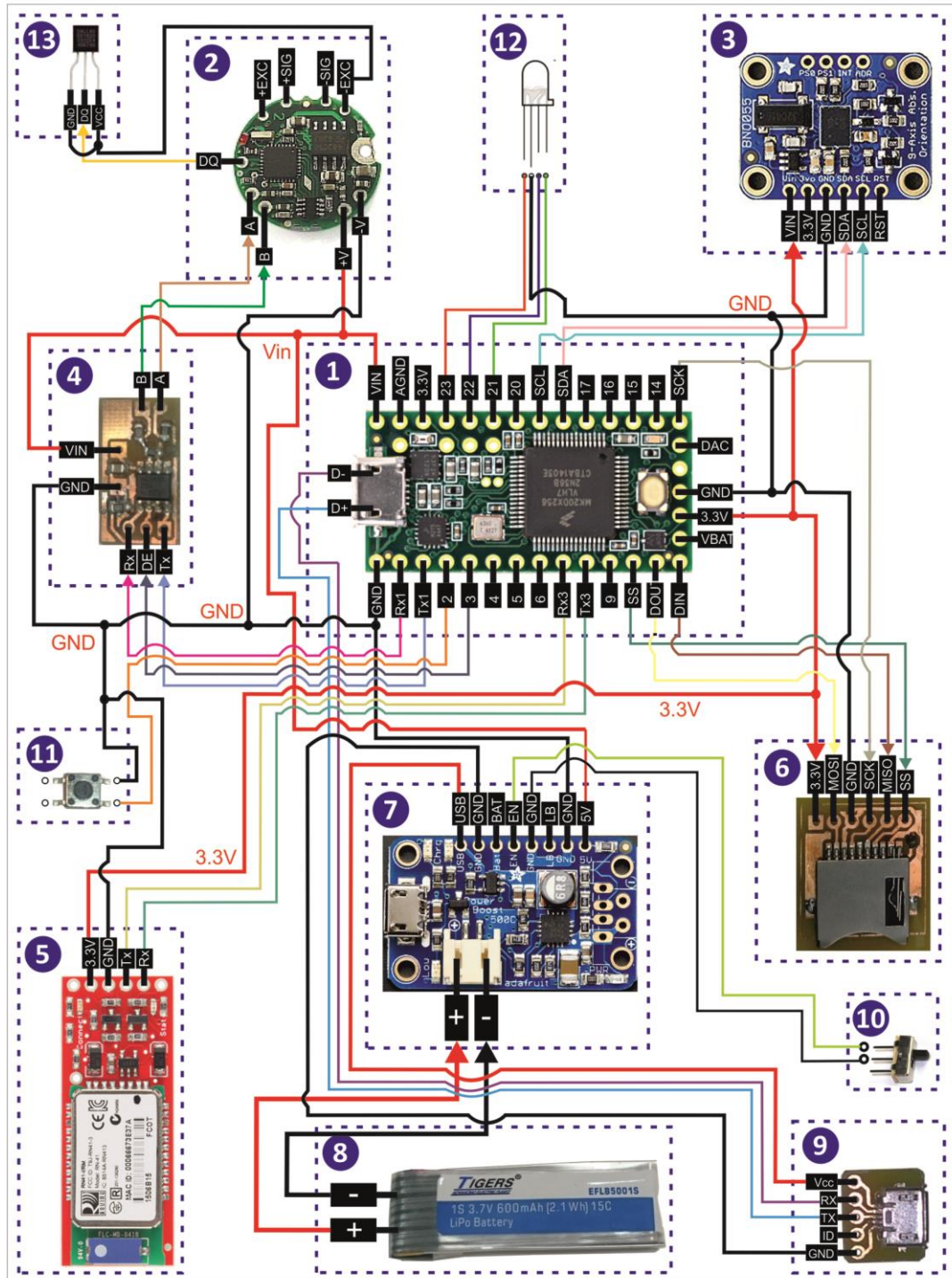
Στη κεντρική μονάδα τροφοδοσίας (7) έχουν διασυνδεθεί ως είσοδοι η μπαταρία (8) και οι έξοδοι τροφοδοσίας (V_{cc} , GND) της πλακέτας διασύνδεσης micro USB (9). Επίσης στη είσοδο EN (Enable) και στη έξοδο της γείωσης GND συνδέθηκε ο διακόπτης ενεργοποίησης/απενεργοποίησης της λειτουργίας (10). Η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας (7) είναι υπεύθυνη για την τροφοδότηση όλων των επιμέρους μονάδων, οι οποίες απαιτούν τάση τροφοδοσίας 5 Volt.

Αυτές οι συσκευές είναι η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (1), η μονάδα μέτρησης και ενίσχυσης σημάτων DCell (2) και η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485 (4). Επομένως, η έξοδος V_{out} και γείωσης GND της κεντρικής μονάδας τροφοδοσίας διασυνδέθηκε απευθείας με την είσοδο V_{cc} και GND της κάθε μία από τις προαναφερθείσες μονάδες.



Συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των ηλεκτρονικών διατάξεων

Το διάγραμμα διασύνδεσης των ηλεκτρονικών του προ τυποποιημένου και του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου



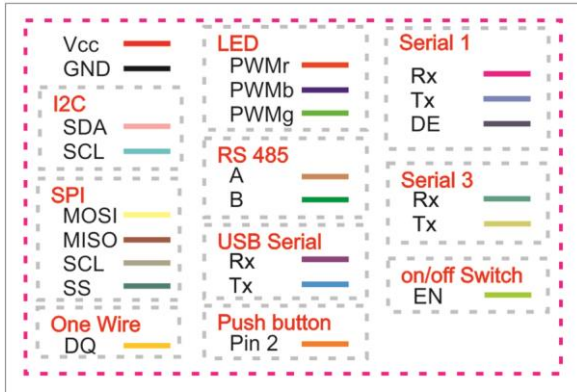
Εικόνα 9.13: Το συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων της προ τυποποιημένης και βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, όπου (1) η κεντρική μονάδα επεξεργασίας, (2) η μονάδα DCell, (3) η μονάδα IMU, (4) η μονάδα RS485, (5) η μονάδα Bluetooth, (6) η μονάδα micro SD, (7) η μονάδα κεντρικής τροφοδοσίας, (8) η μπαταρία LiPo, (9) η μονάδα micro USB, (10) ο διακόπτης ενεργοποίησης - απενεργοποίησης, (11) το push button, (12) το RGB LED και (13) το αισθητήριο θερμοκρασίας.

Όσον αφορά τις τροφοδοσίες των υπόλοιπων μονάδων, επιτυγχάνονται από την έξοδο των 3.3 Volt που διαθέτει η μονάδα κεντρικής επεξεργασίας (1), για το λόγο ότι απαιτούν χαμηλότερο επίπεδο



Πίνακας χρωματικού κώδικα

Ο χρωματικός κώδικας του διαγράμματος διασύνδεσης



Πίνακας 3: Ο πίνακας με τον χρωματικό κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στο συνολικό διάγραμμα διασύνδεσης των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων της προ τυποποιημένης και βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου.

τρεις ψηφιακές έξοδοι (21, 22, 23) με δυνατότητα PWM παλμού για την οδήγηση του RGB LED (12) και μια ψηφιακή είσοδο (2) για την αναγνώριση κατάστασης του push button.

Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell (2) δεν συνδέεται απευθείας στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (1), αλλά στη μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485 (4), στις εισόδους/εξόδους A+ και B-. Το αισθητήριο θερμοκρασίας (13) συνδέεται στην είσοδο DQ της μονάδας DCell (2).

τάσης για τη λειτουργία τους. Οι μονάδες αυτές είναι η μονάδα ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth (5), η μονάδα εισαγωγής πρόσθετης μνήμης τύπου micro SD (6) και η μονάδα αδρανειακή μέτρησης IMU (3). Έτσι η έξοδοι 3.3V και GND της μονάδας κεντρικής επεξεργασίας (1) συνδέθηκαν με τις εισόδους V_{cc} και GND όλων αυτών των μονάδων.

Στη κεντρική μονάδα επεξεργασίας (1) συνδέονται, οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με πρωτόκολλο I2C (SDA και SCL) της μονάδας αδρανειακής μέτρησης IMU (3), οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας του πρωτόκολλου Modbus (Rx, Tx, DE) της μονάδας αμφίδρομης επικοινωνίας RS485 (4), οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με πρωτόκολλο SPI (MOSI, MISO, SCK, SS) της μονάδας micro SD (6), οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με σειριακό πρωτόκολλο (Rx, Tx) της μονάδας ασύρματης επικοινωνίας τύπου Bluetooth (5), οι εισοδοί/έξοδοι επικοινωνίας με σειριακό πρωτόκολλο (D+, D-) της μονάδας micro USB (9),



10. Αρχιτεκτονική λειτουργίας ηλεκτρονικών διατάξεων έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Το κεφάλαιο αυτό αρχικά πραγματεύεται την αρχιτεκτονική του υλικολογισμικού που υλοποιήθηκε, με σκοπό τον έλεγχο και την επίτευξη της επιθυμητής λειτουργίας όλων των επιμέρους ηλεκτρονικών διατάξεων του πρώιμου έξυπνου εργαλείου, των οποίων τα χαρακτηριστικά και η διασύνδεση, παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 8. Το υλικολογισμικό αυτό ενσωματώνεται στο μικροελεγκτή αρχιτεκτονικής 8-bit της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας.

Στο δεύτερο σκέλος του κεφαλαίου αναλύεται η αρχιτεκτονική του υλικολογισμικού που κατασκευάστηκε, για τον έλεγχο και την επιθυμητή λειτουργία όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων που χρησιμοποιήθηκαν στις δύο μεταγενέστερες εκδόσεις του έξυπνου εργαλείου, την προτυποποιημένη και τη βελτιστοποιημένη έκδοση. Η διασύνδεση τους και τα κύρια χαρακτηριστικά που διαθέτουν, αναλύονται στο κεφάλαιο 9. Το εξελιγμένο υλικολογισμικό ενσωματώνεται στη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας με το μικροελεγκτή αρχιτεκτονικής 32-bit.

Οι δύο αυτές εκδόσεις του υλικολογισμικού αναπτύχθηκαν στο περιβάλλον προγραμματισμού που παρέχει η εταιρία Arduino. Πρόκειται για ένα λογισμικό ανοικτού κώδικα, το οποίο αποτελείται από ένα περιβάλλον προγραμματισμού IDE (Integrated Development Environment), για τον προγραμματισμό μικροελεγκτών οικογένειας AVR. Η γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιείται σε αυτό το περιβάλλον είναι C-Embedded, C/C++ και διαθέτει ένα compiler (avr-g++) που μεταφράζει το πρόγραμμα σε γλώσσα μηχανής, το οποίο στη συνέχεια γράφεται στο μικροελεγκτή, μέσω ενός bootloader.

Αν και το περιβάλλον προγραμματισμού Arduino software IDE, είναι επικεντρωμένο στους μικροελεγκτές AVR, ο κατασκευαστής της αναπτυξιακής πλατφόρμας Teensy, παρέχει τον κατάλληλο bootloader ώστε να επιτυγχάνεται ο προγραμματισμός του μικροελεγκτή αρχιτεκτονικής 32-bit και οικογένειας ARM, που διαθέτει, από το ίδιο περιβάλλον προγραμματισμού.

Ο χαρακτήρας ανοικτού κώδικα που διαθέτει το περιβάλλον προγραμματισμού Arduino software IDE, προσφέρει στους προγραμματιστές τη δυνατότητα να κατασκευάσουν νέες ή να μεταποιήσουν υπάρχουσες βιβλιοθήκες, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χρήσης τους. Έτσι με αυτό το περιβάλλον παρέχονται στον χρήστη μια πληθώρα βιβλιοθηκών, που θα τον διευκολύνουν να αναπτύξει γρήγορα το κατάλληλο κώδικα, που απαιτεί για τη λειτουργία της, η εφαρμογή, την οποία κατασκευάζει.

10.1 Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού πρώιμου έξυπνου εργαλείου

Η αρχιτεκτονική λειτουργίας του υλικολογισμικού της πρώιμης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου, βασίστηκε στην εναρμόνιση των διαδικασιών λειτουργίας των ηλεκτρονικών διατάξεων, ώστε να ολοκληρώνουν τις απαιτούμενες διεργασίες, με σκοπό τη μέτρηση, αποστολή και καταγραφή των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τις διαδικασίες κρουστικής λάξευσης. Τέτοια φαινόμενα είναι η δύναμη που ασκείται στο εργαλείο κατά τις κρούσεις, οι επιταχύνσεις που επιτυγχάνει, ο προσανατολισμός που διαθέτει και οι θερμοκρασίες που αναπτύσσει.

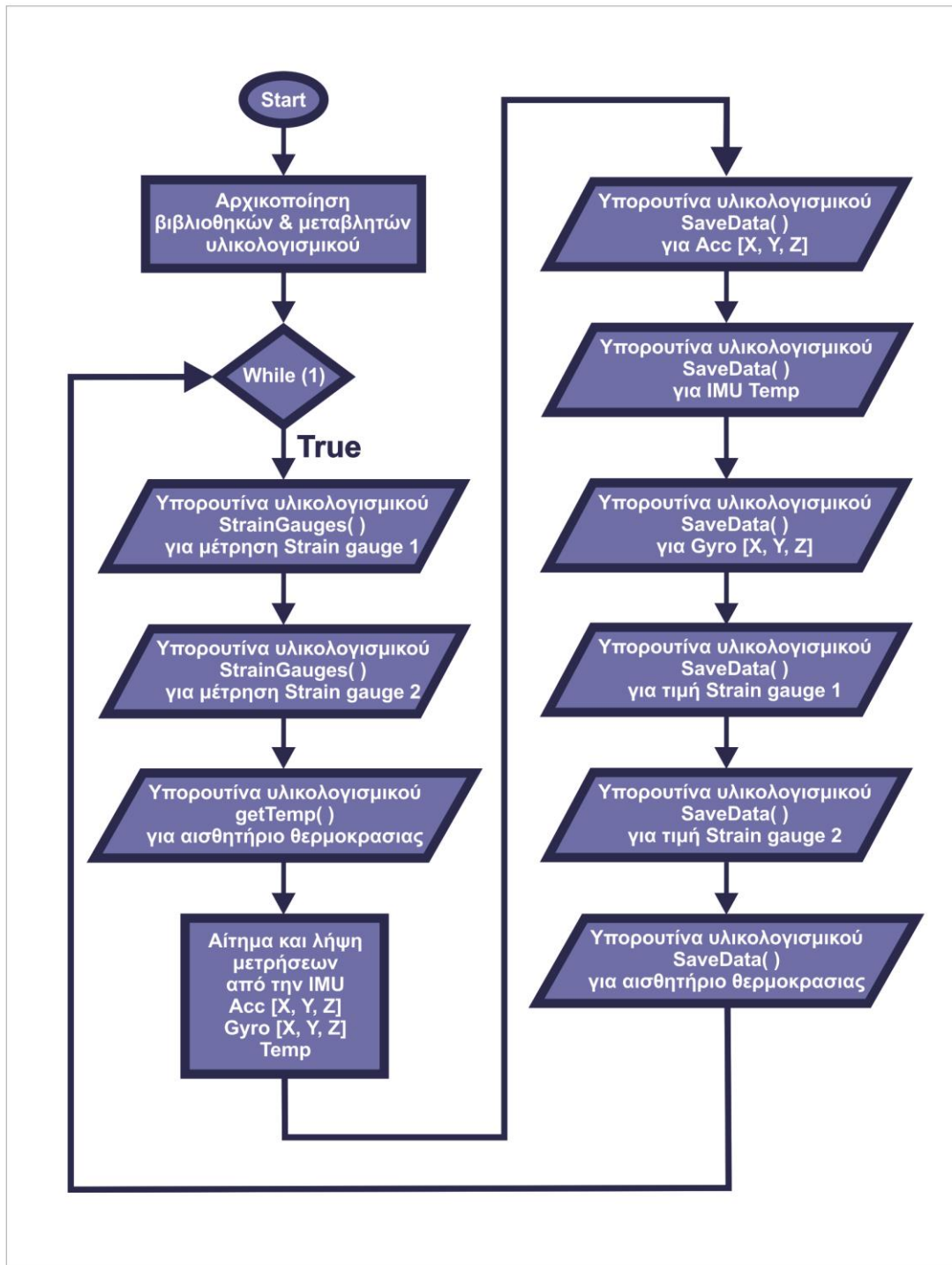
Έτσι η κεντρική μονάδα επεξεργασίας, που εκτελεί τις διεργασίες του υλικολογισμικού, είναι υπεύθυνη, για τη μέτρηση των σημάτων από τη γέφυρα Wheatstone που έχουν διασυνδεθεί τα strain gauges, για την επικοινωνία με τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU (ώστε να ληφθούν οι μετρήσεις από το γυροσκοπικό αισθητήρα, τον αισθητήρα επιτάχυνσης και το ενσωματωμένο αισθητήριο θερμοκρασίας), για τη λήψη της μέτρησης από το αισθητήριο θερμοκρασίας DS18S20. Τα δεδομένα αυτά, συγκεντρώνονται και η κεντρική μονάδα επεξεργασίας τα αποστέλλει σε εξωτερικό



ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω της σειριακής θύρας micro USB, αλλά και τα αποθηκεύει στη μνήμη micro SD. Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού που κατασκευάστηκε για το πρώιμο έξυπνο εργαλείο, το οποίο διαχειρίζεται όλες αυτές τις απαιτούμενες διεργασίες.

Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού του πρώιμου έξυπνου εργαλείου

Το διάγραμμα ροής του υλικολογισμικού που κατασκευάστηκε για το πρώιμο έξυπνο εργαλείο



Εικόνα 10.1: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού που κατασκευάστηκε για την πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου.



Βάσει του διαγράμματος ροής, κατά την εκκίνηση του πρώιμου εργαλείου, το υλικολογισμικό αναλαμβάνει την αρχικοποίηση των βιβλιοθηκών και των μεταβλητών που θα χρησιμοποιηθούν. Επίσης, αρχικοποιούνται οι παράμετροι αυτών των βιβλιοθηκών και επιτυγχάνονται όλες οι απαραίτητες λειτουργίες για το ξεκίνημα της σειριακής μονάδας, της μονάδας αδρανειακής μέτρησης και της μονάδας *micro SD*. Μόλις ολοκληρωθούν αυτές οι λειτουργίες ο μικροελεγκτής περιμένει έως ότου πατηθεί το *push button*, για να μεταβεί στις μετέπειτα διαδικασίες.

Όταν το *push button* πατηθεί έστω μία φορά από το χρήστη του έξυπνου εργαλείου, ο μικροελεγκτής περνάει στον κυρίως κώδικα, δηλαδή στον ατέρμονο βρόχο του. Όπου αρχικά καλείται η υπορουτίνα *StrainGauge()* που κατασκευάστηκε, ώστε να επιτυγχάνεται η μέτρηση από τη μονάδα του μετατροπέα *ADC*.

Η υπορουτίνα αυτή καλείται δύο φορές, μια για τη μέτρηση της πρώτης διάταξης της γέφυρας *Wheatstone*, της οποίας η έξοδος της εισέρχεται στη μονάδα ενίσχυσης σημάτων και η έξοδος αυτής στο κανάλι *A0* του μετατροπέα. Η δεύτερη φορά που καλείται η υπορουτίνα είναι για τη μέτρηση της δεύτερης διάταξης της γέφυρας *Wheatstone*, όπου το σήμα οδηγείται όπως και το προηγούμενο στη μονάδα ενίσχυσης και μετέπειτα στη είσοδο *A1* του μετατροπέα *ADC*.

Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας της υπορουτίνας *StrainGauge* παρουσιάζεται στην εικόνα 10.2, όπου η παράμετρος που εισάγεται είναι η επιλογή της εισόδου του μετατροπέα *ADC* που θα χρησιμοποιηθεί. Με την επιλογή της εισόδου, η υπορουτίνα περνάει στη διαδικασία κβαντοποίησης της τάσης που έχει την εν λόγω χρονική στιγμή. Η κβαντοποιημένη τάση, στη συνέχεια, μετατρέπεται σε τιμές τάσης, όπου και επιστρέφεται στο κυρίως κώδικα, ως αποτέλεσμα.

Υπορουτίνα *StrainGauge*

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας *StrainGauge*, για τη μέτρηση των σημάτων από τα *strain gauges*



Εικόνα 10.2: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας *StrainGauge*, για την επίτευξη μέτρησης των *strain gauges*.

Στην επόμενη διεργασία του υλικολογισμικού, καλείται η υπορουτίνα *getTemp()*, η οποία επιτυγχάνει την επικοινωνία της μονάδας κεντρικής επεξεργασίας με το αισθητήριο μέτρησης της θερμοκρασίας, μέσω του πρωτόκολλου *OneWire*. Για το πρωτόκολλο αυτό παρέχεται βιβλιοθήκη από την εταιρία



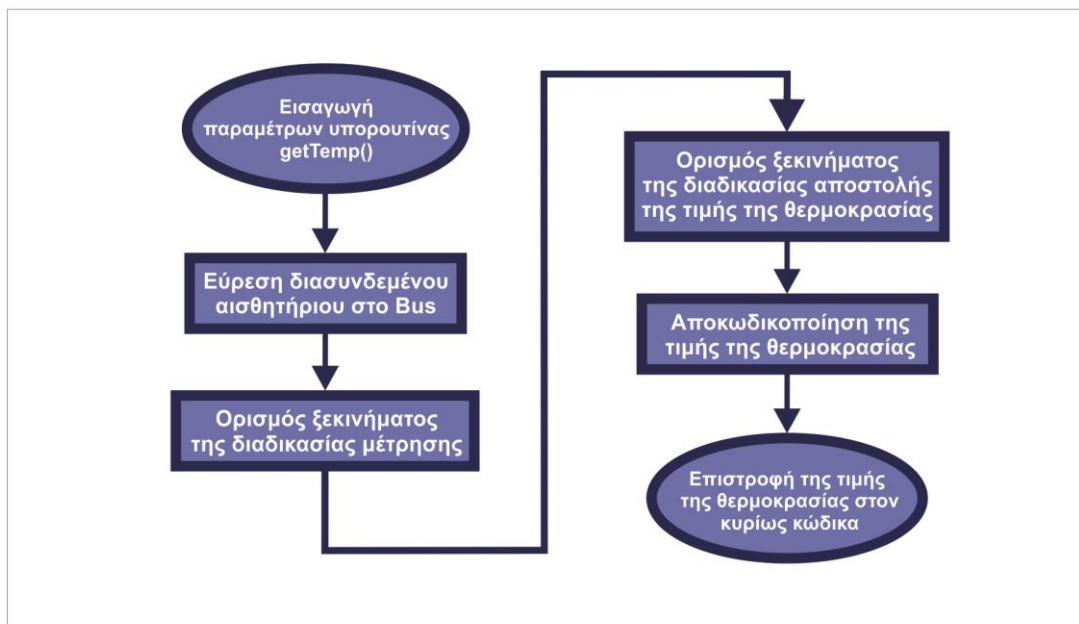
Arduino. Η βιβλιοθήκη, διαθέτει εντολές που επιτυγχάνουν όλες τις απαραίτητες διεργασίες που απαιτούνται για την επίτευξη της επικοινωνίας του μικροελεγκτή με τις συσκευές που είναι διασυνδεδεμένες στο δίαυλο.

Έτσι, με χρήση της κατάλληλης εντολής, ο μικροέλεγκτης αρχίζει την αναζήτηση για την εύρεση του διασυνδεδεμένου αισθητήριου θερμοκρασίας στο δίαυλο. Μόλις εντοπιστεί, του ορίζεται να αρχίσει τη διαδικασία μέτρησης της θερμοκρασίας και στο επόμενο βήμα, του ορίζεται να αρχίσει τη διαδικασία αποστολής της τιμής που μετρήσε.

Ο μικροελεγκτής μόλις ολοκληρώσει τη διαδικασία λήψης της μέτρησης, αρχίζει τη διαδικασία αποκωδικοποίησης της. Όταν η αποκωδικοποίηση της τιμής ολοκληρωθεί, η υπορουτίνα εξάγει τη τιμή αυτή στον κυρίως κώδικα.

Υπορουτίνα getTemp

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας getTemp, για την επικοινωνία με το αισθητήριο θερμοκρασίας



Εικόνα 10.3: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας getTemp, για την επίτευξη λήψης της θερμοκρασίας από το αισθητήριο.

Σειρά έχει η λήψη των μετρήσεων της μονάδας αδρανειακής μέτρησης IMU, όπου το πρωτόκολλο που υλοποιείται είναι το I2C, για το οποίο υπάρχει η ανάλογη βιβλιοθήκη λειτουργίας του. Μέσω αυτής της βιβλιοθήκης το υλικολογισμικό επιτυγχάνει την αμφίδρομη επικοινωνία με τη μονάδα IMU, χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες εντολές. Αρχικά, ζητείται από τη μονάδα να αρχίσει τη διαδικασία μέτρησης. Στη συνέχεια ορίζεται η αποστολή των δεκατεσσάρων καταχωρητών (η κάθε τιμή καταλαμβάνει δύο καταχωρητές τις μνήμης της μονάδας IMU) που καταχωρήθηκαν οι μετρήσεις.

Τα εισερχόμενα δεδομένα από τη μονάδα IMU, εισάγονται ανά δύο σε επτά διαφορετικές μεταβλητές, για την ευκολότερη επεξεργασία τους. Οι πρώτες τρεις μεταβλητές αφορούν το διάνυσμα της επιτάχυνσης, η τέταρτη είναι η μέτρηση της θερμοκρασίας της μονάδας IMU και οι τρεις τελευταίες αφορούν το διάνυσμα των γωνιακών ταχυτήτων.

Με την ολοκλήρωση εισαγωγής στις μεταβλητές των εισερχόμενων δεδομένων από τη μονάδα IMU, έχει επιτευχθεί η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων που αφορούν τη μέτρηση των



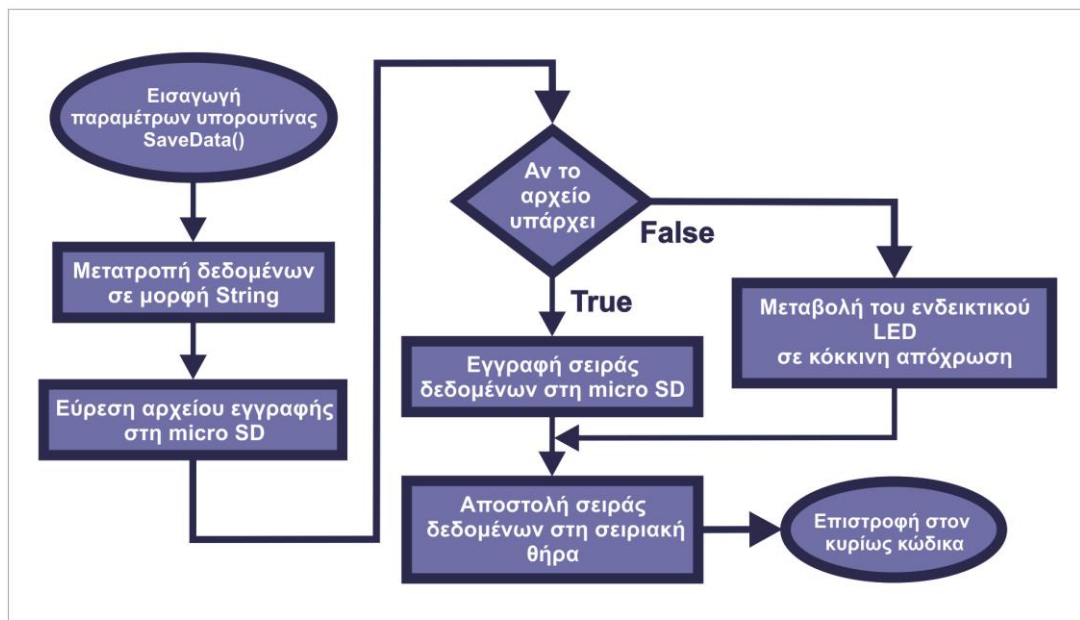
επιθυμητών μεγεθών και σειρά στις διεργασίες του υλικολογισμικού έχει η αποθήκευση των δεδομένων σε αρχεία στη micro SD, αλλά και η αποστολή τους σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Για τη βέλτιστη λειτουργία των διεργασιών αποθήκευσης και αποστολής των δεδομένων του υλικολογισμικού, κατασκευάστηκε η υπορουτίνα SaveData(), της οποίας το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στην εικόνα 10.4. Η υπορουτίνα αυτή στον κυρίως κώδικα καλείται έξι φορές, όπου η σειρά εκπλήρωσης των διεργασιών είναι η παρακάτω:

- Η πρώτη φορά αναλαμβάνει να αποθηκεύσει και να αποστείλει τα δεδομένα που αφορούν το διάνυσμα επιτάχυνσης, τα οποία αποτελούνται από τις τρεις τιμές της μετρούμενης επιτάχυνσης, μία για κάθε άξονα.
- Η δεύτερη αναλαμβάνει να αποθηκεύσει και να αποστείλει τη μέτρηση της θερμοκρασίας της μονάδας IMU
- Η τρίτη αναλαμβάνει να αποθηκεύσει και να αποστείλει τα δεδομένα του διανύσματος της γωνιακής ταχύτητας, το οποίο απαρτίζεται από τις τρεις τιμές της μετρούμενης γωνιακής ταχύτητας, ανά άξονα
- Η τέταρτη αναλαμβάνει να αποθηκεύσει και να αποστείλει τη μετρούμενη τιμή από την πρώτη διάταξη των Strain gauges
- Η πέμπτη αναλαμβάνει να αποθηκεύσει και να αποστείλει τη μετρούμενη τιμή από τη δεύτερη διάταξη των Strain gauges
- Και η έκτη και τελευταία φορά, αναλαμβάνει την αποθήκευση και αποστολή της μέτρησης της θερμοκρασίας από το αισθητήριο θερμοκρασίας DS18S20

Υπορουτίνα SaveData

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SaveData, για την αποθήκευση και την αποστολή των μετρήσεων



Εικόνα 10.4: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SaveData, για την επίτευξη αποθήκευσης των δεδομένων.

Η υπορουτίνα αρχικά δέχεται ως είσοδο τον πίνακα που διαθέτει τα δεδομένα της εκάστοτε φοράς που καλείται και το όνομα του αρχείου που θα τα αποθηκεύσει. Στη συνέχεια, τα μετατρέπει σε μια σειρά δεδομένων, μορφής string και επικοινωνεί με τη μονάδα micro SD, αιτώντας την εύρεση του συγκεκριμένου αρχείου αποθήκευσης αλλά και το άνοιγμά του σε διαδικασία εγγραφής, βάσει της



εισαγόμενης ονομασίας. Η micro SD επιστρέφει το αποτέλεσμα της διαδικασίας εύρεσης και αν το αρχείο υπάρχει αποστέλλει τα δεδομένα για εγγραφή. Αν το αρχείο δεν έχει βρεθεί ο μικροελεγκτής μεταβαλεί το χρώμα του LED ενδείξεων σε κόκκινη απόχρωση.

Η τελευταία διεργασία της υπορουτίνας αυτής είναι αποστολή της σειράς δεδομένων string στη σειριακή θύρα, ώστε να ληφθούν από το διασυνδεδεμένο ηλεκτρονικό υπολογιστή. Όταν η αποστολή των δεδομένων ολοκληρωθεί, το υλικολογισμικό εξέρχεται από την υπορουτίνα αποθήκευσης και αποστολής, για να συνεχίσει τις υπόλοιπες διεργασίες.

10.2 Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού προ τυποποιημένου και βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου

Όπως προαναφέρθηκε οι μεταγενέστερες εκδόσεις του έξυπνου εργαλείου (η προ τυποποιημένη και η βελτιστοποιημένη), οδήγησαν στη νέα σχεδίαση των ηλεκτρονικών διατάξεων του, έχοντας ως αποτέλεσμα την ολοκληρωτική αλλαγή της αρχιτεκτονικής του υλικολογισμικού λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου. Αυτό γιατί, το υλικολογισμικό που κατασκευάζεται για τη λειτουργία ενός μικροελεγκτή είναι αλληλένδετο με τη διασύνδεση των επιμέρους μονάδων και αφορά τη λειτουργία της συγκεκριμένη συνολική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε.

Επομένως, η χρήση νέων ηλεκτρονικών διατάξεων απαιτεί τη κατασκευή υλικολογισμικού που θα επιτυγχάνει την εναρμονισμένη λειτουργία τους. Η αρχιτεκτονική του νέου υλικολογισμικού περιγράφεται στο διάγραμμα ροής, το οποίο χωρίστηκε σε δύο μέρη (μέρος Α και μέρος Β), τα οποία παρουσιάζονται στις εικόνες 10.5 και 10.6, αντίστοιχα.

Αρχικά, ο χρήστης του έξυπνου εργαλείου το ενεργοποιεί μεταβάλλοντας τη θέση του διακόπτη ενεργοποίησης/απενεργοποίησης. Το υλικολογισμικό αναλαμβάνει να αρχικοποιήσει τις βιβλιοθήκες και τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργία του. Το επόμενο βήμα είναι η διεργασία αρχικοποίησης της κατάστασης των εισόδων/εξόδων IO (Input Output), δηλαδή ποιές θα οριστούν σαν είσοδο και ποιες σαν έξοδο.

Στη συνέχεια, αρχικοποιούνται οι παράμετροι για τη σειριακή μονάδα 0, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή διασύνδεση του έξυπνου εργαλείου με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω διασύνδεσης τύπου micro USB. Μετά, αρχικοποιεί τις παραμέτρους της σειριακής μονάδας 1, για την αμφίδρομη επικοινωνία της μονάδας κεντρικής επεξεργασίας με τη μονάδα μέτρησης DCell, υλοποιώντας πρωτόκολλο Modbus.

Η επόμενη διεργασία αφορά τη αρχικοποίηση της σειριακή μονάδας 3, η οποία επιτυγχάνει την αμφίδρομη επικοινωνία της μονάδας κεντρικής επεξεργασίας με τη μονάδα του Bluetooth, όπου και κατ' επέκταση υλοποιεί την ασύρματη διασύνδεση του έξυπνου εργαλείου με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Ακολουθεί η αρχικοποίηση της μονάδας αδρανειακής μέτρησης, όπου στο στάδιο αυτό επιτυγχάνεται ο ορισμός των παραμέτρων της αλλά και ο έλεγχος, αν υπάρχει η μονάδα διασυνδεδεμένη στο δίαυλο, του πρωτόκολλου I2C. Για τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης υπάρχει βιβλιοθήκη ανοικτού κώδικα την οποία παρέχει η εταιρία Adafruit και επιτυγχάνει τη διαχείριση και τη λειτουργία της.

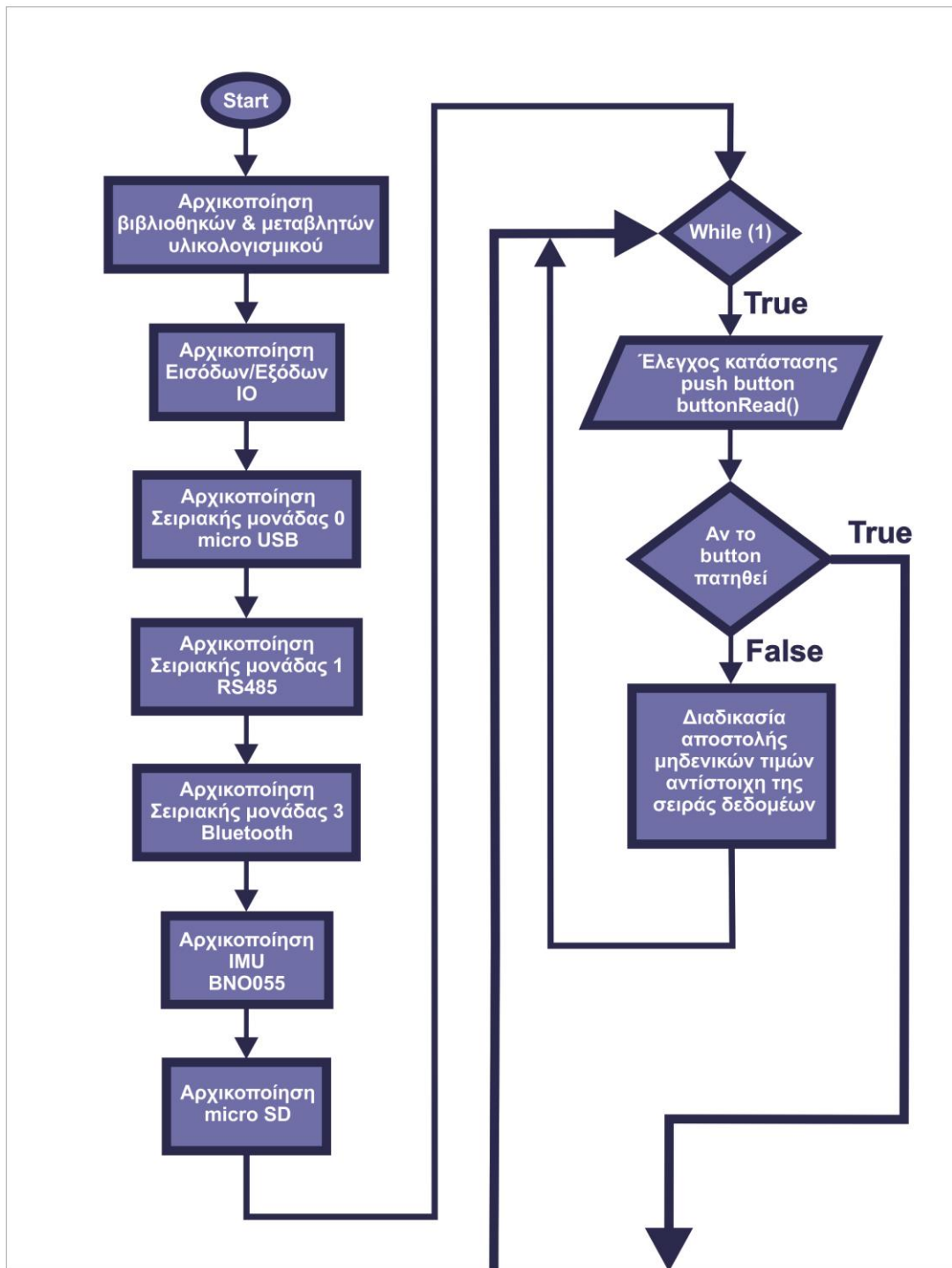
Η τελευταία διεργασία που ολοκληρώνει το υλικολογισμικό στο στάδιο των αρχικοποιήσεων, είναι ο ορισμός των παραμέτρων για τη βιβλιοθήκη που επιτυγχάνει την επικοινωνία του μικροελεγκτή με τη μονάδα της micro SD. Όπου επιτυγχάνεται και ο έλεγχος αν έχει εισαχθεί η μνήμη στη μονάδα.



Με την ολοκλήρωση των διεργασιών που προαναφέρθηκαν, το υλικολογισμικό περνάει στο κυρίως μέρος του, δηλαδή στον ατέρμονα βρόχο που φιλοξένη τις διαδικασίες λειτουργίας, οι οποίες υλοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου.

Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου

Το διάγραμμα ροής του υλικολογισμικού για το προ τυποποιημένο και βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο, μέρος Α

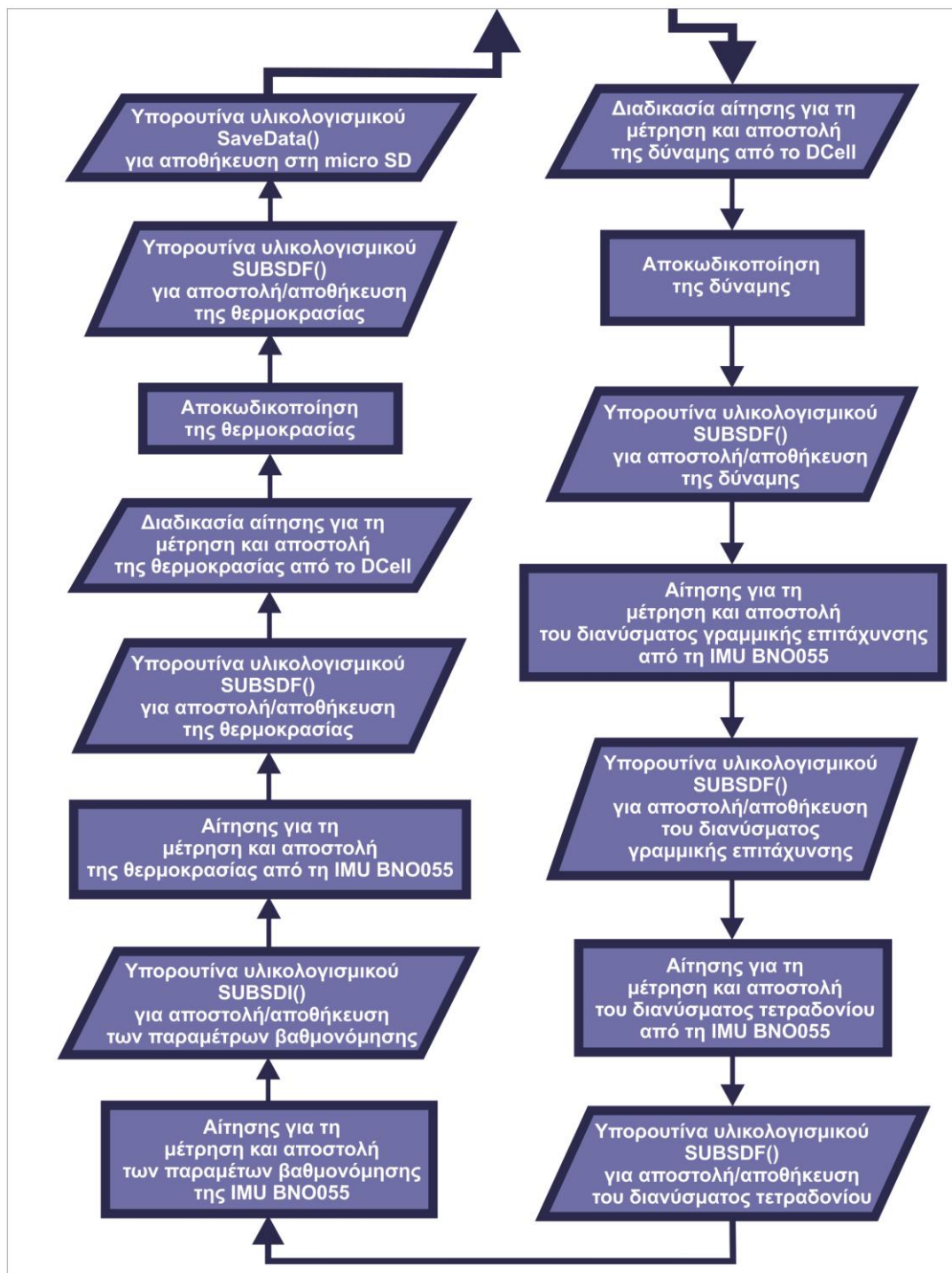


Εικόνα 10.5: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού για τη προ τυποποιημένη και βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, μέρος Α'.



Αρχιτεκτονική λειτουργίας υλικολογισμικού του βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου

Το διάγραμμα ροής του υλικολογισμικού για το προ τυποποιημένο και βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο, μέρος Β



Εικόνα 10.6: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του υλικολογισμικού για την προ τυποποιημένη και βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου, μέρος Β'.

Η πρώτη διεργασία που υλοποιείται κατά την εισαγωγή στον ατέρμονα βρόχο, είναι η υπορουτίνα `buttonRead()`, η οποία ελέγχει τη κατάσταση του `push button`. Το διάγραμμα ροής που περιγράφει τη λειτουργία αυτής της υπορουτίνας παρουσιάζεται στη εικόνα 10.7, όπου με την είσοδο στην



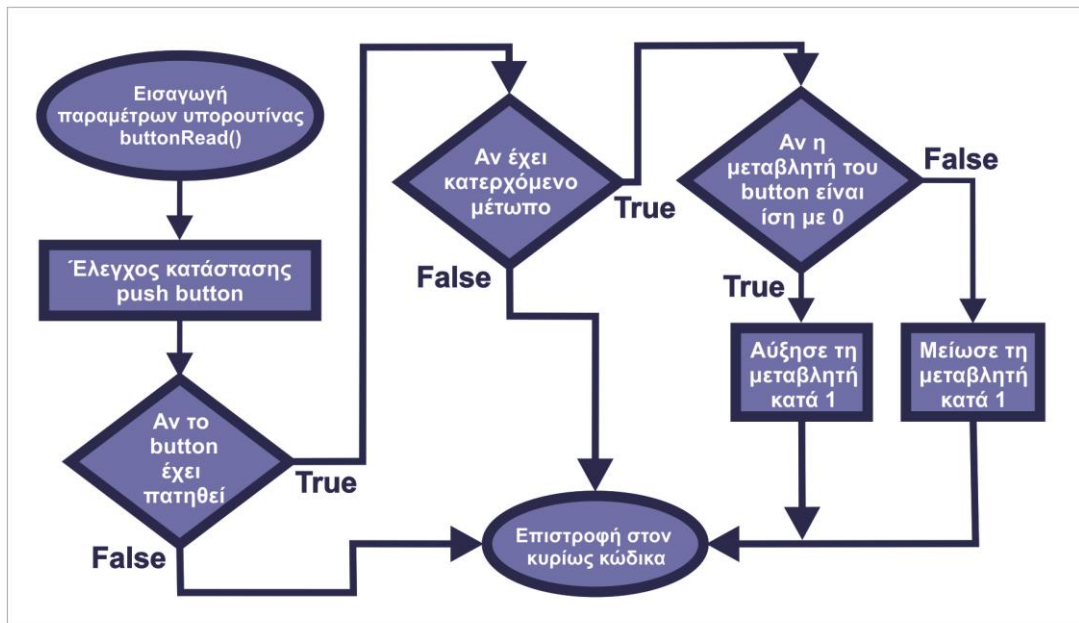
υπορουτίνα, ο μικροελεγκτής ελέγχει την κατάσταση που έχει η είσοδος, στην οποία έχει διασυνδεθεί το push button.

Αν το push button πατηθεί, ο μικροελεγκτής θα αντιληφθεί σαν κατάσταση χαμηλού δυναμικού (LOW) στην είσοδο και θα παρουσιάσει ένα κατερχόμενο μέτωπο από τα 5 Volt στα 0 Volt, όπου θα παραμείνει σε κατάσταση LOW μέχρι το push button να αφηθεί και να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση. Αν λοιπόν, ο μικροελεγκτής αντιληφθεί το κατερχόμενο μέτωπο, τότε θα ελέγξει, αν η μεταβλητή του button είναι ίση με το μηδέν. Αν η μεταβλητή είναι ίση με το μηδέν τότε θα την αυξήσει κατά ένα. Στη περίπτωση που η μεταβλητή είναι ίση με ένα, τότε θα μειώσει τη τιμή της μεταβλητής κατά ένα.

Μόλις ολοκληρωθούν όλες αυτές οι διεργασίες, ο μικροελεγκτής θα εξέλθει της υπορουτίνας και θα συνεχίσει την υπόλοιπη ροή του υλικολογισμικού.

Υπορουτίνα buttonRead

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας buttonRead, για την αναγνώριση πατήματος του push button



Εικόνα 10.7: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας buttonRead, για την επίτευξη επιλογής λειτουργίας.

Επιστρέφοντας από την υπορουτίνα στη ροή του υλικολογισμικού, σειρά έχει να ελεγχθεί, αν όντως το push button έχει πατηθεί, συγκρίνοντας τη τιμή της μεταβλητής του. Όσο το push button δεν έχει πατηθεί έστω για μια φορά, η συνθήκη αυτή είναι ψευδής και το υλικολογισμικό εισέρχεται στη διαδικασία αποστολής μηδενικών τιμών, που αντιπροσωπεύουν τα μετρούμενα μεγέθη, σε αντίστοιχη σειρά με αυτήν που θα αποστέλλονταν και η οποία παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 11.2.

Αν το push button πατηθεί έστω μια φορά, η συνθήκη θα βγει αληθής και το υλικολογισμικό θα περάσει στη διαδικασία αίτησης για τη μέτρηση και αποστολή της τιμής της δύναμης από τη μονάδα DCell. Η διαδικασία αυτή συνίσταται από την ολοκλήρωση των διεργασιών με συγκεκριμένη σειρά, η οποία ορίζεται από το πρωτόκολλο Modbus. Οι διεργασίες αυτές υλοποιούνται με τις υπορουτίνες που κατασκευάστηκαν. Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας παρουσιάζεται στην εικόνα 10.8, όπου αρχικά ορίζεται η διεύθυνση που διαθέτει η μονάδα DCell στο δίαυλο και στη μία μονάδα που διαθέτει το έξυπνο εργαλείο, του ορίστηκε η διεύθυνση 1.



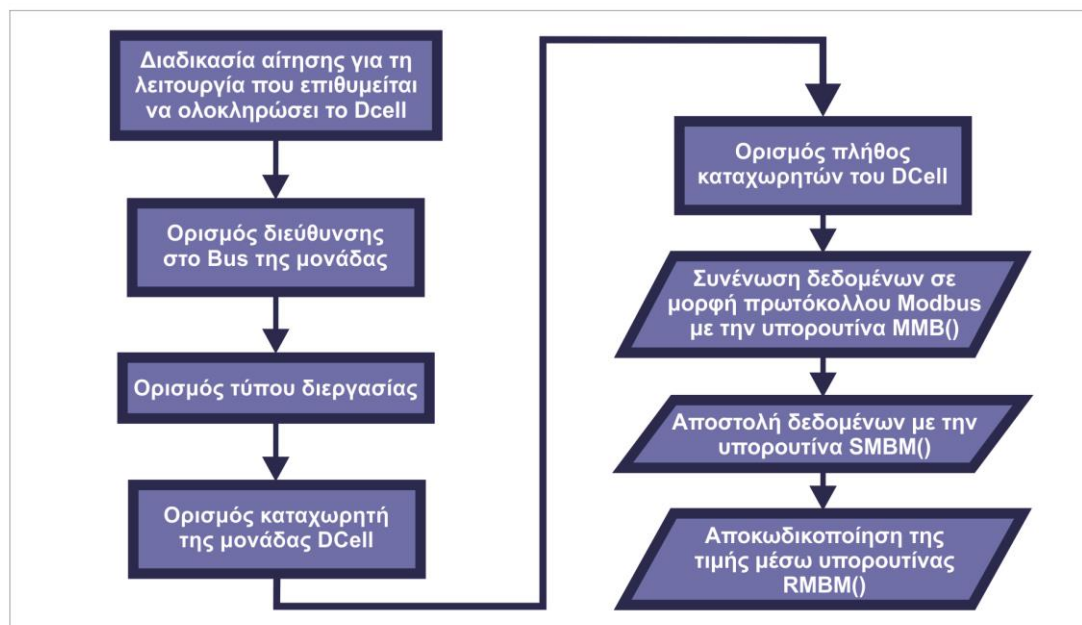
Το επόμενο βήμα της διαδικασίας είναι ο ορισμός του τύπου διεργασίας που επιθυμείται να ολοκληρώσει η μονάδα του DCell. Η μονάδα DCell υποστηρίζει μόνο δύο κωδικούς διεργασίας του πρωτοκόλλου Modbus, τη διεργασία Function 03 που επιτρέπει το διάβασμα ζεύγος καταχωριτών (read a register pair) και τη διεργασία Function 16 η οποία επιτρέπει την εγγραφή ζεύγος καταχωριτών (write a register pair) της μονάδας. Για το λόγο ότι επιθυμείται η λήψη της τιμής της μετρούμενης δύναμης από το DCell, ο τύπος διεργασίας που ορίζεται είναι η Function 03, ώστε να διαβαστούν τα δεδομένα από τους καταχωριτές στους οποίους έχει καταχωρηθεί.

Σειρά έχει ο ορισμός της διεύθυνση των καταχωριτών (register address) στους οποίους έχει αποθηκευτεί η τιμή και ακολουθεί ο ορισμός του πλήθους τους. Δηλαδή, η τιμή της δύναμης που επιθυμείται να διαβαστεί, αποθηκεύεται στους καταχωριτές με διεύθυνση 21 και 22. Επομένως, στον ορισμό της εντολής ζητείται να αρχίσει η αποστολή των δεδομένων από τον καταχωριτή 21, για εύρος καταχωριτών ίσο με δύο.

Αυτές οι τιμές που ορίστηκαν εισάγονται ως είσοδο στη υπορουτίνα MMB() η οποία αναλαμβάνει να κατασκευάσει τη κατάλληλη σειρά δεδομένων που αποστέλλονται στη μονάδα DCell και αφορούν τη διεργασία που επιθυμείται να ολοκληρώσει. Η σειρά δεδομένων του πρωτοκόλλου Modbus αποτελείται από οκτώ συνολικά byte, ένα byte το οποίο είναι η διεύθυνση της μονάδας, ένα byte που είναι ο τύπος διεργασίας, δύο byte που είναι η διεύθυνση του πρώτου καταχωριτή που επιθυμείται να διαβάσει, δυο byte που είναι το πλήθος των καταχωριτών που θα διαβάσει, ένα byte που είναι το πλήθος των byte που καταλαμβάνει η τιμή και δύο byte που αφορούν τον έλεγχο CRC.

Διαδικασία αίτησης λειτουργίας που επιθυμείται να ολοκληρώσει το DCell

Διάγραμμα ροής της διαδικασίας αίτησης λειτουργίας που επιθυμείται να ολοκληρώσει το DCell



Εικόνα 10.8: Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας αίτησης της επιθυμητής λειτουργίας που καλείται να ολοκληρώσει η μονάδα DCell.

Ο έλεγχος CRC (Cyclic Redundancy Check) είναι μια διαδικασία εντοπισμού σφάλματος των απεσταλμένων δεδομένων, όπου την πραγματοποιεί ο αποστολέας και στη συνέχεια ο δέκτης. Ο αποστολέας πραγματοποιεί τη διαδικασία αυτή ώστε να βρεθεί μια τιμή η οποία αποστέλλεται επιπρόσθετα στον παραλήπτη με τη μορφή δύο byte. Ο δέκτης ακολουθεί την ίδια διαδικασία και συγκρίνει την τιμή που υπολόγισε με αυτή που παρέλαβε, αν είναι ίση τότε η λήψη των δεδομένων



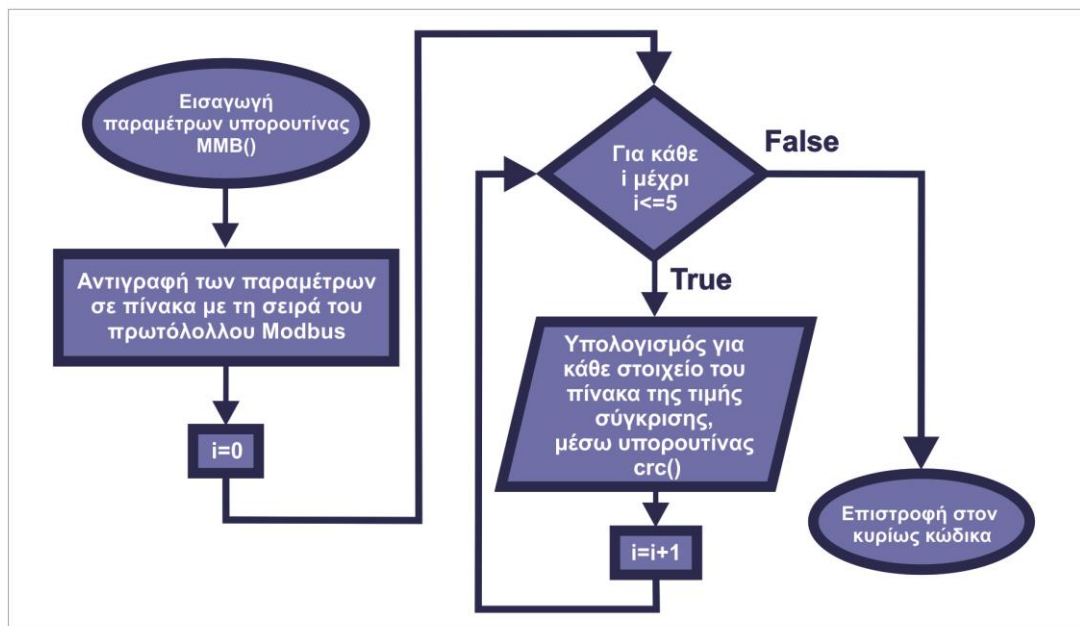
επιτεύχθηκε χωρίς κάποιο σφάλμα. Αν οι τιμές δεν είναι ίσες, τότε υπάρχει σφάλμα στα δεδομένα και ο δέκτης μπορεί να ζητήσει την επανάληψη της αποστολής.

Μετά την ολοκλήρωση κατασκευής της σειράς δεδομένων των οκτώ byte, για την αίτηση της επιθυμητής λειτουργίας που καλείται να ολοκληρώσει η μονάδα DCell, ακολουθεί η αποστολή της μέσω της υπορουτίνας SMBM(). Η τελευταία διεργασία της διαδικασίας αίτησης της λειτουργία του DCell επιτυγχάνεται με την υπορουτίνα RMBM() η οποία αναλαμβάνει τη λήψη και την αποκωδικοποίηση των δεδομένων απάντησης της μονάδας DCell, αφού έχει ολοκληρώσει την αίτηση λειτουργίας που του ζητήθηκε.

Η παρακάτω εικόνα παρουσιάζει το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας MMB(), η οποία είναι υπευθυνη για τη κατασκευή της σειράς δεδομένων που αποστέλλονται στη μονάδα DCell. Η υπορουτίνα έχει ως είσοδο τα δεδομένα που ορίζουν τη διεύθυνση της μονάδας, τον τύπο λειτουργίας, τον καταχωριτή που θα αρχίσει τη λειτουργία και την ποσότητα των καταχωριτών. Στη συνέχεια τα αρχειοθετεί με τη σειρά αποστολής σε ένα πίνακα και υπολογίζει την τιμή του ελέγχου CRC, χρησιμοποιώντας την υπορουτίνα crc() έξι φορές. Με την ολοκλήρωση της τιμής ελέγχου επιστρέφει το πίνακα με τη σειρά δεδομένων στον κυρίως κώδικα, αφού πρώτα την καταχωρίσει σε αυτόν.

Υπορουτίνα MMB

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας MMB, για κατασκευή της ορθής σειράς των δεδομένων της εντολής



Εικόνα 10.9: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας MMB, για την επίτευξη του πρωτόκολλου Modbus.

Για τον υπολογισμό της τιμής ελέγχου CRC πρέπει να εισαχθούν στην υπορουτίνα crc() ανά ένα με τη σειρά τα byte που έχουν καταχωρηθεί στο πίνακα αποστολής. Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας της υπορουτίνας crc() παρουσιάζεται στην εικόνα 10.10. Η υπορουτίνα δέχεται ένα byte από τον πίνακα και την προηγούμενη τιμή της, όπου η αρχική είναι μηδέν για κάθε φορά που καλείται για να υπολογίσει την τιμή ελέγχου μιας καινούργιας σειράς δεδομένων αποστολής.

Στη συνέχεια αρχίζει μια διαδικασία, όπου υπολογίζει τη νέα τιμή ελέγχου, από τη λογική πράξη bitwise XOR του byte με την προηγούμενη τιμή της. Μετέπειτα επαναλαμβάνει επτά φορές την εξέταση του τελευταίου bit. Αν το bit είναι ίσο με ένα, τότε μεταβάλλει τη τιμή ελέγχου, ολισθαίνοντας

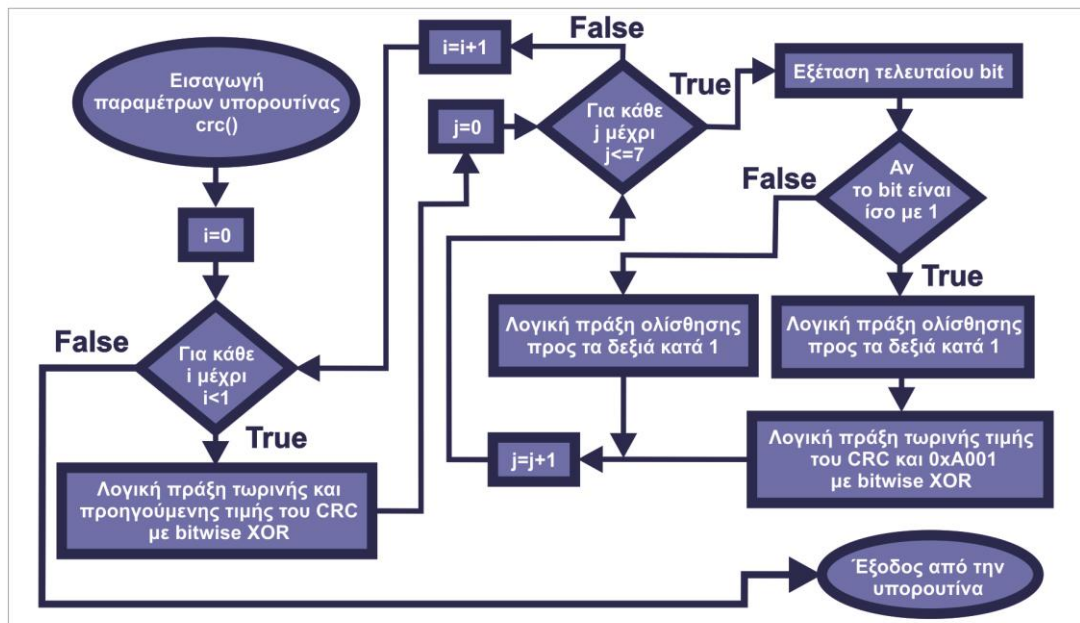


την προς τα δεξιά κατά ένα και υπολογίζεται η λογική πράξη bitwise XOR της τιμής ελέγχου με την αλφαριθμητική ποσότητα 0xA001.

Αν τώρα κατά τον έλεγχο της τιμής, το τελευταίο ψηφίο είναι ίσο με το μηδέν, πάλι μεταβάλλεται η τιμή ελέγχου, μόνο με ολίσθηση προς τα δεξιά κατά ένα. Με την ολοκλήρωση αυτής της διαδικασίας έχει επιτευχθεί ο υπολογισμός της τιμής ελέγχου CRC και η υπορουτίνα ολοκληρώνεται επιστρέφοντάς την στην κυρίως ροή του υλολογισμικού.

Υπορουτίνα crc

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας crc, για τον υπολογισμό της τιμής CRC



Εικόνα 10.10: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας crc, για την επίτευξη του πρωτόκολλου Modbus.

Όπως προαναφέρθηκε, με την ολοκλήρωση υπολογισμού της τιμής ελέγχου CRC και τη κατασκευή του πίνακα της σειράς αποστολής της εντολής, η διαδικασία αίτησης της λειτουργία που επιθυμείται να ολοκληρώσει η μονάδα του DCell, μεταβαίνει στη διεργασία αποστολής της εν λόγω σειράς. Η αποστολή επιτυγχάνεται μέσω της υπορουτίνας SMBM(), που κατασκευάστηκε, της οποίας η αρχιτεκτονική λειτουργίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής της εικόνας 10.11.

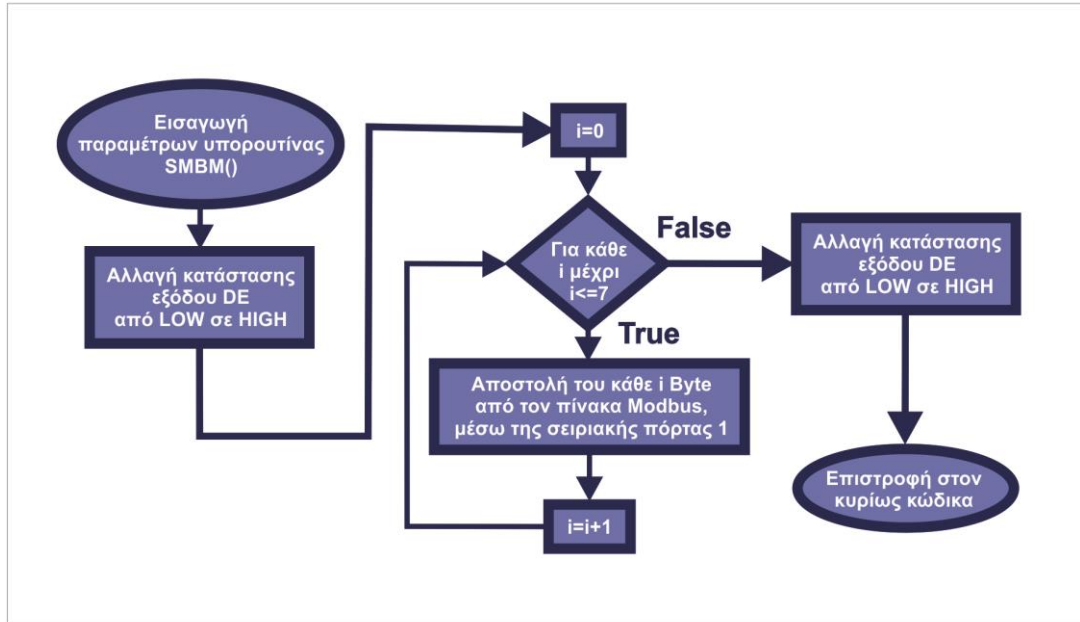
Η υπορουτίνα SMBM() δέχεται ως είσοδο στον πίνακα με τη σειρά αποστολής της εντολής από τον κυρίως κώδικα και μεταβάλλει τη κατάσταση σε HIGH στην έξοδο DE, η οποία ενεργοποιεί τη μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485 του πρωτόκολλου Modbus, σε λειτουργία αποστολής δεδομένων. Το επόμενο στάδιο επιτυγχάνεται με την αποστολή του πίνακα, όπου μια ρουτίνα αναλαμβάνει την αποστολή της εντολής, ανά ένα byte τη φορά.

Μόλις ολοκληρωθεί η αποστολή όλου του πίνακα, η υπορουτίνα SMBM(), μεταβάλλει πάλι τη κατάσταση της εξόδου DE σε LOW και η μονάδα αμφίδρομης επικοινωνίας RS485, αλλάζει κατάσταση σε λειτουργία λήψης. Με το πέρας αυτής ολοκληρώνονται οι διεργασίες της υπορουτίνας και η διαδικασία αίτησης προχωράει στην επόμενη διεργασία.



Υπορουτίνα SMBM

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SMBM, για την αποστολή της εντολής μέσω πρωτοκόλλου Modbus

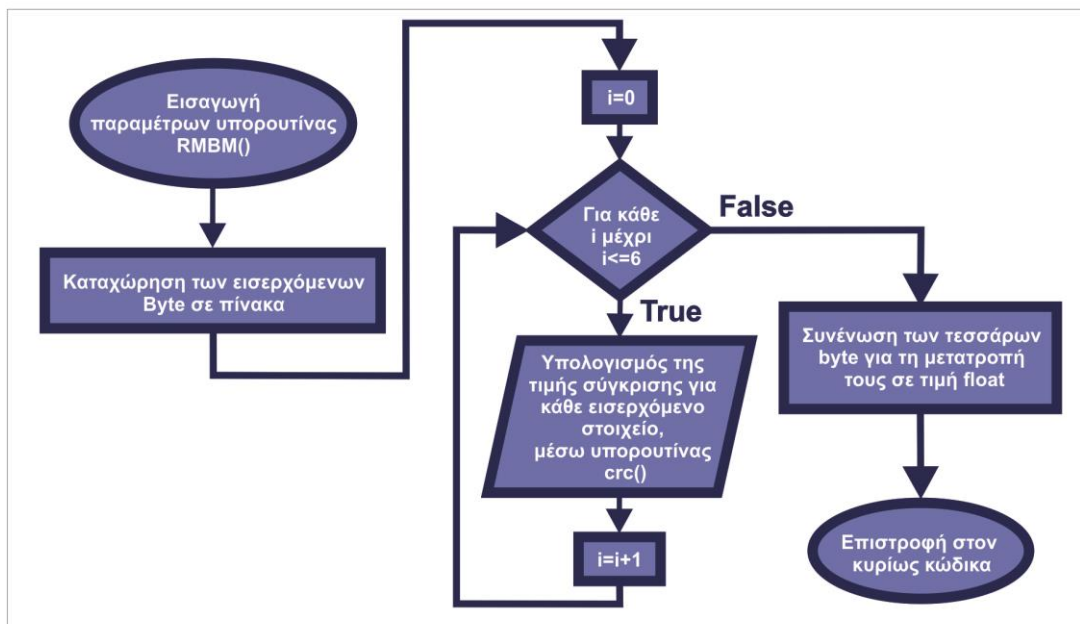


Εικόνα 10.11: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SMBM, για την επίτευξη του πρωτοκόλλου Modbus.

Η επόμενη διεργασία της διαδικασίας αίτησης είναι η διεργασία λήψης του αποτελέσματος, από τη μονάδα DCell και επιτυγχάνεται μέσω της υπορουτίνας RMBM(), της οποίας το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στη παρακάτω εικόνα.

Υπορουτίνα RMBM

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας RMBM, για τη λήψη της εισερχόμενης τιμής από το DCell



Εικόνα 10.12: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας RMBM, για την επίτευξη του πρωτοκόλλου Modbus.



Η υπορουτίνα `RMBM()` ελέγχει αν η μονάδα σειριακής επικοινωνίας 1 έχει εισερχόμενα δεδομένα στον καταχωρητή της και τα αρχειοθετεί σε ένα πίνακα, ανά byte. Μόλις ολοκληρωθεί η λήψη και τα εισερχόμενα δεδομένα βρίσκονται στο πίνακα, ξεκινάει τη διαδικασία εύρεσης σφάλματος CRC, μέσω της υπορουτίνας `crc()`, όπως πραγματοποιήθηκε και προηγουμένως. Η διαφοροποίηση είναι στο πλήθος των byte, όπου η μονάδα DCell αποστέλλει 9 byte και όχι 8 όπως στη διαδικασία αίτησης.

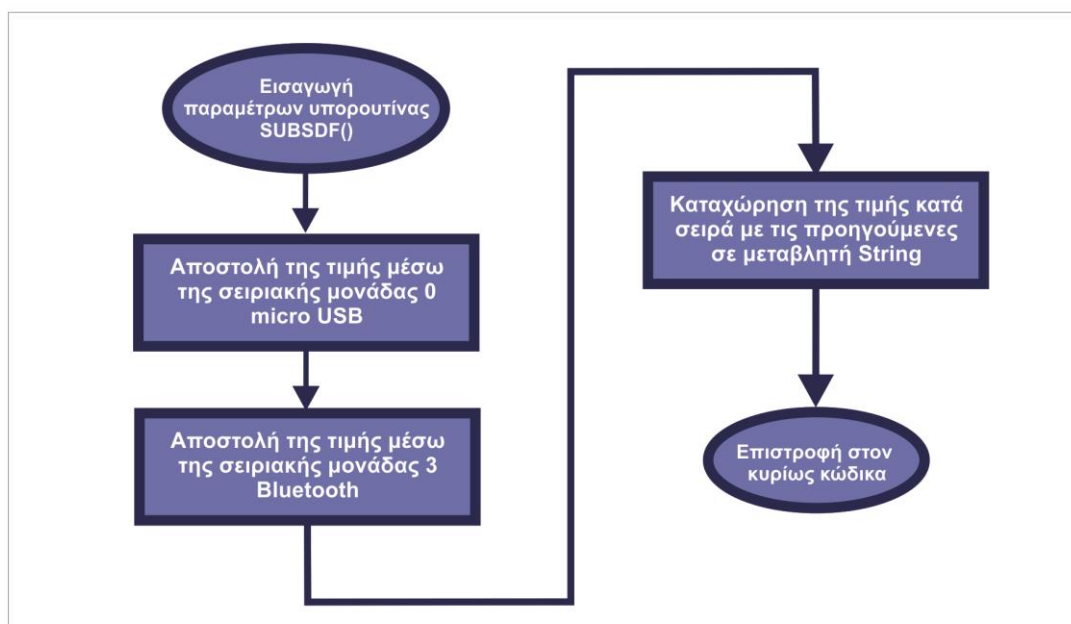
Από τα 9 byte, το πρώτο είναι η διεύθυνση της μονάδας, το δεύτερο ο τύπος λειτουργίας που πραγματοποιήσε, το τέταρτο αφορά το πλήθος των byte που καταλαμβάνει η τιμή, τα τέσσερα είναι η τιμή και τα δύο τελευταία byte είναι η τιμή ελέγχου σφάλματος. Επομένως, η υπορουτίνα `crc()` θα χρησιμοποιηθεί για επτά επαναλήψεις (έναντι των έξι επαναλήψεων που χρειάστηκε για τον υπολογισμό των δεδομένων αίτησης), ώστε να υπολογιστεί η τιμή ελέγχου. Μόλις ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της τιμής ελέγχου, συγκρίνεται με τη τιμή του πίνακα λήψης, ώστε να διαπιστωθεί αν υπήρχε κάποιο σφάλμα στα δεδομένα που έλαβε.

Στη συνέχεια η υπορουτίνα ξεκινάει τη διεργασία συνένωσης των τεσσάρων byte που αφορούν τη τιμή που έλαβε, ώστε να ολοκληρωθεί και να εξάγει τη τιμή αυτή ως αποτέλεσμα της στον κυρίως κώδικα. Με την ολοκλήρωση αυτής της διεργασίας ολοκληρώνεται η διαδικασία αίτησης για τη λειτουργία που επιθυμείται να επεξεργαστεί η μονάδα του DCell.

Επιστρέφοντας στη ροή του υλικολογισμικού, όπου βρισκόταν στο στάδιο της διαδικασίας αίτησης για τη μέτρηση και αποστολή της δύναμης από τη μονάδα DCell. Στο στάδιο αυτό το υλικολογισμικό πραγματοποιεί όλες τις προαναφερθείσες διεργασίες, αιτώντας από τη μονάδα DCell να αποστείλει τη τιμή της δύναμης που υπολόγισε από τη μέτρηση των σημάτων εξόδου της γέφυρας Wheatstone.

Υπορουτίνα SUBSDF

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SUBSDF, για την αποστολή των δεδομένων, μέσω USB και Bluetooth



Εικόνα 10.13: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SUBSDF, για την επίτευξη της αποστολής των δεδομένων.

Στην κυρίως ροή του υλικολογισμικού, σειρά έχει η αποστολή της τιμής της δύναμης που έλαβε, μέσω της υπορουτίνας `SUBSDF()`, η οποία αναλαμβάνει να την αποστείλει, μέσω της σειριακής μονάδας 1 σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (από τη διασύνδεση `micro USB`), μέσω της σειριακής μονάδας



3 σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (από την ασύρματη διασύνδεση Bluetooth) και την προετοιμασία της τιμής για την εγγραφή της στη μονάδα micro SD, εισχωρώντας την αρχικά σε μεταβλητή τύπου string.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί, ότι τα δεδομένα που αποστέλλονται δεν είναι όλα τύπου float, κάποιες είναι ακέραιες τιμές integer. Για το λόγο αυτό κατασκευάστηκε και η υπορουτίνα SUBSDI() η οποία αναλαμβάνει την αποστολή τιμών ακεραίων, ενώ η SUBSDF() αποστέλλει τιμές float. Η αρχιτεκτονική που χρησιμοποιήθηκε και στις δύο υπορουτίνες είναι ίδια και για αυτό δεν παρουσιάζεται σε ξεχωριστή εικόνα.

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SUBSDF παρουσιάζεται στην εικόνα 10.13. Η υπορουτίνα δέχεται ως είσοδο τη μεταβλητή που θα αποσταλεί και ξεκινάει τη διεργασία αποστολής της με τη σειριακή μονάδα 0. Αφού ολοκληρωθεί η αποστολή αυτή, αρχίζει η διεργασία αποστολής της τιμής με τη σειριακή μονάδα 3. Τέλος, καταχωρεί τη τιμή σε μια μεταβλητή string και την επιστρέφει στον κυρίως κώδικα με σκοπό να χρησιμοποιηθεί και για την καταχώριση των υπόλοιπων δεδομένων, κατασκευάζοντας μια σειρά από αυτές.

Αφού το υλικολογισμικό ολοκληρώσει την αποστολή της τιμής της δύναμης, περνάει στην αίτηση μέτρησης και αποστολής του διανύσματος γραμμικής επιτάχυνσης, από τη μονάδα IMU. Με τη λήψη των τριών τιμών που απαρτίζουν το διάνυσμα, περνάει στη διαδικασία αποστολής του μέσω της υπορουτίνας SUBSDF().

Σειρά έχει η διαδικασία αίτησης για τη μέτρηση και αποστολή του διανύσματος τετραδονίου που περιγράφουν το προσανατολισμό, από τη μονάδα IMU στη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας, το οποίο απαρτίζεται από τέσσερις τιμές, όπου και μέσω της υπορουτίνας SUBSDF αποστέλλεται και σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Η επόμενη διεργασία είναι η αίτηση μέτρησης και αποστολή των παραμέτρων βαθμονόμησης των αισθητήριων διατάξεων που διαθέτει η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU. Στο πλήθος τους είναι τέσσερις, η τιμή βαθμονόμησης του συνολικού συστήματος της IMU (sys, system), η τιμή βαθμονόμησης του γυροσκοπίου (gyro, gyroscope), η τιμή βαθμονόμησης του αισθητήρα επιτάχυνσης (acc, accelerometer) και η τιμή βαθμονόμησης του μαγνητόμετρου (mag, magnetometer). Οι τιμές αυτές είναι ακέραιοι αριθμοί με εύρος από 0 μέχρι 3 και δείχνουν την κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο κάθε αισθητήρας όταν παίρνει τη μέτρηση και κατά πόσο οι τιμές αυτές είναι αξιόπιστες για την περαιτέρω χρήση τους.

Στη συνέχεια η ροή του υλικολογισμικού εισέρχεται στη διεργασία αίτησης για τη μέτρηση και αποστολή της θερμοκρασίας της IMU, όπου και μετά τη λήψη της αποστέλλεται με τη υπορουτίνα SUBSDF(). Ενώ με την ολοκλήρωση αυτής της διεργασίας, ξεκινάει η διαδικασία αίτησης για τη μέτρηση και αποστολή της θερμοκρασίας του έξυπνου εργαλείου από τη μονάδα DCell, την οποία μετράει το αισθητήριο θερμοκρασία DS18S20 και στη συνέχεια συλλέγει η μονάδα DCell.

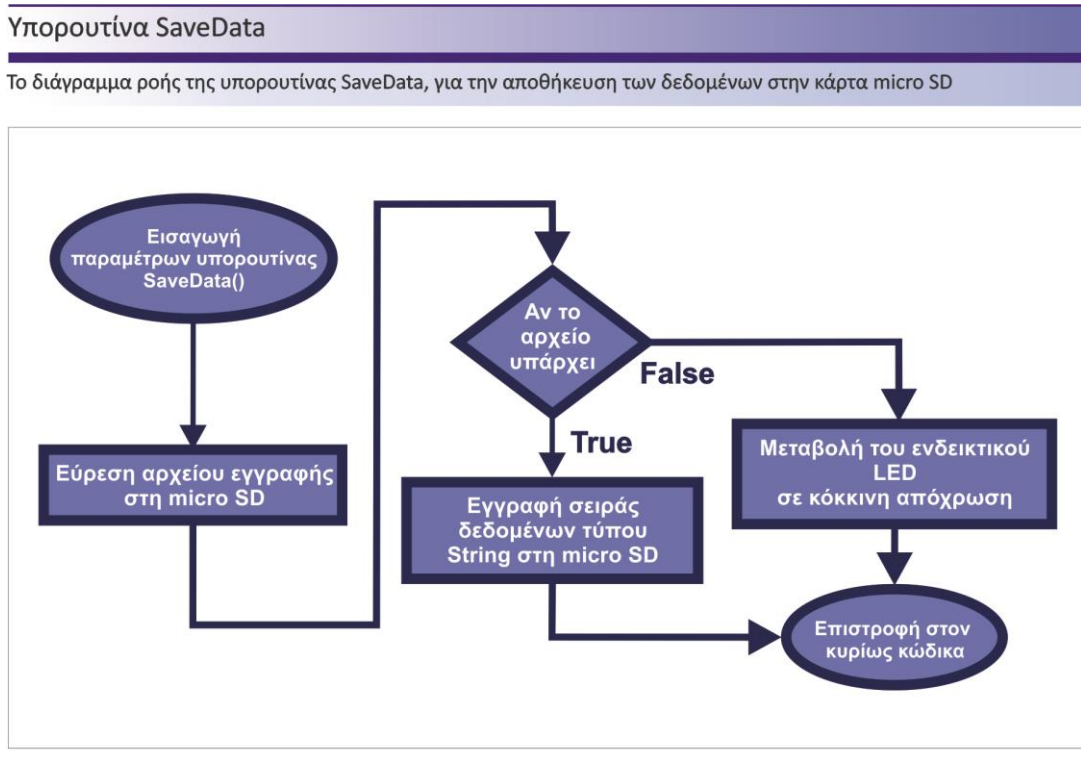
Η διαδικασία αυτή είναι ίδια με τη διαδικασία αίτησης για τη μέτρηση και αποστολή της δύναμης από τη μονάδα DCell, με τη διαφοροποίηση ότι οι καταχωρητές που ζητούνται να διαβαστούν από το DCell έχουν διεύθυνση 23 και 24 στη μνήμη και αφορούν τη θερμοκρασία. Μετά την ολοκλήρωση της διεργασίας αυτής, ακολουθεί η αποθήκευση της τιμής της θερμοκρασίας μέσω της υπορουτίνας SUBSDF.

Η τελευταία διεργασία που εκτελεί το υλικολογισμικό για ένα κύκλο προγράμματος είναι η αποθήκευση όλων των μεγεθών που παρουσιάστηκαν παραπάνω και αποστάλθηκαν σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η αποθήκευση των δεδομένων αυτών επιτυγχάνεται μέσω της υπορουτίνας



SaveData() της οποίας το διάγραμμα ροής παρουσιάζεται στην εικόνα 10.14. Η υπορουτίνα έχει ως ορίσματα το όνομα του αρχείου εγγραφής και τη μεταβλητή τύπου string που κατασκευάστηκε μέσω των υπορουτινών SUBSDF και SUBSDI, καθ' όλη τη διάρκεια της λειτουργίας. Πρόκειται για μια μεταβλητή που περιέχει όλα τα συλλεγόμενα δεδομένα, με τη σειρά αποστολής τους και διαχωρισμένα με κόμμα μεταξύ τους, σε μορφή σειράς χαρακτήρων.

Η υπορουτίνα αρχικά επιτυγχάνει την εύρεση του αρχείου στην κάρτα micro SD. Αν το αρχείο υπάρχει τότε αρχίζει τη διεργασία αποστολής της μεταβλητής με τα συλλεγόμενα δεδομένα για εγγραφή τους σε αυτό και μόλις ολοκληρωθεί η αποστολή επιστρέφει στο κυρίως κώδικα. Αν το αρχείο δε βρεθεί, τότε μεταβάλλει τη κατάσταση του LED ένδειξης λειτουργίας σε κόκκινη απόχρωση και εξέρχεται της υπορουτίνας και επιστρέφει στον κυρίως κώδικα.



Εικόνα 10.14: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας SaveData, για την επίτευξη αποθήκευσης των δεδομένων στη micro SD.



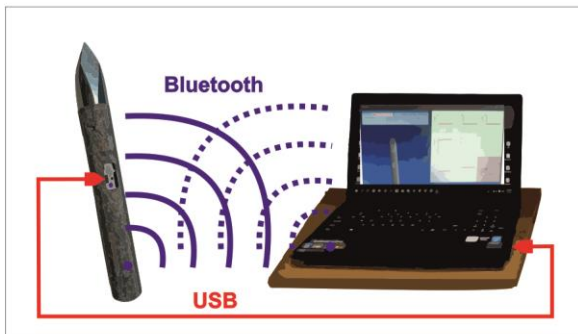
11. Ανάπτυξη πρότυπου λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού του έξυπνου εργαλείου και καταγραφής των συλλεγόμενων δεδομένων, σε πραγματικό χρόνο

Πέραν του υλικολογισμικού λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου αναπτύχθηκε και το πρότυπο λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού και καταγραφής των συλλεγόμενων μεγεθών, σε πραγματικό χρόνο. Το λογισμικό αυτό είναι ένα εργαλείο επίβλεψης και διαχείρισης του έξυπνου εργαλείου, στη διάθεση του χρήστη. Επιτρέπει την εποπτεία των μετρούμενων μεγεθών σε πραγματικό χρόνο αλλά και τη διαχείριση τους, από τον γλύπτη.

Το λογισμικό είναι κατασκευασμένο ώστε να δουλεύει σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή (εικόνα 11.1), όπου ο χρήστης μπορεί να διασυνδέσει το έξυπνο εργαλείο είτε μέσω ενσύρματης διασύνδεσης τύπου micro USB είτε να συνδεθεί ασύρματα μέσω Bluetooth. Διαθέτει ένα εύχρηστο γραφικό περιβάλλον για το χρήστη, όπου παρουσιάζει ένα εικονικό μοντέλο τριών διαστάσεων του έξυπνου εργαλείου, γραφήματα πραγματικού χρόνου των μετρούμενων μεγεθών και έναν πίνακα σύντομων ενδείξεων και λειτουργιών για τη διαχείριση του.

Διασύνδεση του έξυπνου εργαλείου

Διασύνδεση με το λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης



Εικόνα 11.1: Το σχηματικό διάγραμμα των τρόπων διασύνδεσης του έξυπνου εργαλείου, με το λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης.

Η λειτουργία του επιτυγχάνεται από τα συλλεγόμενα δεδομένα που αποστέλλει το έξυπνο εργαλείο μέσω της σειριακής επικοινωνίας τους, είτε ενσύρματα, είτε ασύρματα. Τα δεδομένα αυτά στη συνέχεια τα επεξεργάζεται με την κατάλληλη αρχιτεκτονική λειτουργίας που διαθέτει. Από την επεξεργασία αυτή προκύπτει ο προσανατολισμός του εικονικού τρισδιάστατου μοντέλου του έξυπνου εργαλείου και τα γραφήματα των μετρήσεων.

Από τα δεδομένα, επιλέχθηκαν να παρουσιάζονται σε ανεξάρτητα γραφήματα πραγματικού χρόνου, οι γραμμικές επιταχύνσεις (για τους άξονες X, Y, Z σε αντίστοιχα γραφήματα), οι γωνίες που περιγράφουν το προσανατολισμό που υπολογίζονται από το διάνυσμα του τετραδονίου (οι οποίες είναι η Roll, Pitch και Yaw, για το χώρο τριών διαστάσεων), η θερμοκρασία που αναπτύσσει και η δύναμη που μετράει το έξυπνο εργαλείο. Επιπροσθέτως, ο πίνακας ελέγχου του λειτουργικού απεικονίζει την κατάσταση βαθμονόμησης των ενσωματωμένων αισθητήριων διατάξεων της μονάδας IMU καθώς και τις τιμές για τις δύο θερμοκρασίες που συλλέγονται (από το αισθητήριο θερμοκρασίας DS18S20 και από τη μονάδα IMU).

Τα εργαλεία διαχείρισης που ενσωματώθηκαν στο λειτουργικό είναι η επιλογή της σειριακής θύρας επικοινωνίας, η επιλογή εμφάνισης της σειράς δεδομένων, η αποθήκευση των δεδομένων σε αρχείο μορφής .txt, η επιλογή διόρθωσης του προσανατολισμού του εικονικού μοντέλου του έξυπνου εργαλείου (σε περίπτωση που υπάρχει απόκλιση του προσανατολισμού μεταξύ του πραγματικού και του τρισδιάστατου μοντέλου) και επιλογή έναρξης/παύσης της λειτουργίας του κάθε γραφήματος.

Η κατασκευή του επιτεύχθηκε στο περιβάλλον προγραμματισμού processing IDE, όπου ονομάζεται PDE (Processing Development Environment), το οποίο διαθέτει τη δικιά του γλώσσα προγραμματισμού για τη σύνταξη των εντολών, ενώ ο compiler που ενσωματώνει μεταφράζει τον



κώδικα σε Java και στη συνέχεια σε γλώσσα μηχανής. Επίσης, το περιβάλλον αυτό παρέχει τη δυνατότητα εξαγωγής του προγράμματος σε εκτελέσιμο αρχείο, για τα λειτουργικά συστήματα windows, mac και linux.

11.1 Ανάλυση διαδικασίας μετατροπής διανύσματος τετραδόνιου (quaternion) σε γωνίες Euler

Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU, ενσωματώνει αλγόριθμους με τους οποίους υπολογίζει τις γωνίες Euler που περιγράφουν το προσανατολισμό που επιτυγχάνει, μέσω της επεξεργασίας των συλλεγόμενων μεγεθών από τις αισθητήριες διατάξεις της (γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο και μαγνητόμετρο). Όμως, η περιγραφή του προσανατολισμού με γωνίες Euler μπορεί να παρουσιάζει ιδιάζοντα σημεία με αποτέλεσμα να μην μπορεί να υπολογιστεί ο ακριβής προσανατολισμός.

Για την επίλυση του προβλήματος αυτού επιστρατεύθηκε μια διαφορετική μέθοδος αναπαράστασης του προσανατολισμού, όπου οι στροφές γύρω από τους άξονες αναφοράς [X,Y,Z] που επιτυγχάνει η μονάδα, περιγράφεται από ένα διάνυσμα τεσσάρων τιμών, το τετραδόνιο (quaternion). Η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU BNO055 που ενσωματώθηκε στο προ τυποποιημένο και στο βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο, διαθέτει αλγόριθμους που υπολογίζουν και εξάγουν το διάνυσμα του τετραδόνιου. Το διάνυσμα που περιγράφει το τετραδόνιο παρουσιάζεται στην εξίσωση (13), όπου απαρτίζεται από ένα πραγματικό μέρος και τρία φανταστικά [A4][A5][135].

$$q = q_w + q_i \cdot i + q_j \cdot j + q_k \cdot k \quad (13)$$

Όπου τα q_w , q_i , q_j και q_k αντιπροσωπεύουν τις τιμές w , x , y και z , αντίστοιχα, οι οποίες υπολογιστήκαν από τη μονάδα αδρανειακής μέτρησης και στη σχέση (14) παρουσιάζεται με μορφή πινάκων.

$$q = \begin{bmatrix} q_w \\ q_i \\ q_j \\ q_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (14)$$

Βέβαια το διάνυσμα του τετραδόνιου για να χρησιμοποιηθεί στο λειτουργικό τρισδιάστατης απεικόνισης, πρέπει να μετατραπεί σε γωνίες Euler ZYX, ώστε να πραγματοποιήσει τις στροφές για να επιτύχει τον προσανατολισμό. Η διαδικασία μετατροπής του τετραδόνιου σε γωνίες Euler είναι η παρακάτω, όπου προσδιορίζονται οι γωνίες που περιστρέφεται το σώμα, αρχικά με περιστροφή κατά γωνία ψ στον Z άξονα $Rot_Z(\psi)$, μετά κατά γωνία θ στον Y άξονα $Rot_Y(\theta)$ και εν τέλει κατά γωνία φ στον X άξονα $Rot_X(\varphi)$.

Στο πρώτο βήμα της μετατροπής του διανύσματος του τετραδόνιου, υπολογίζεται η τιμή κανονικοποίησής του (normalization), βάσει της σχέσης (15).

$$q_{norm} = \begin{bmatrix} w_{norm} \\ x_{norm} \\ y_{norm} \\ z_{norm} \end{bmatrix} = \left[\frac{1}{\sqrt{|w|^2 + |x|^2 + |y|^2 + |z|^2}} \right] \cdot \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (15)$$

Με την εύρεση του κανονικοποιημένου διανύσματος του τετραδόνιου μπορούν να υπολογιστούν οι γωνίες ψ , θ και φ των περιστροφών $Rot_Z(\psi) \cdot Rot_Y(\theta) \cdot Rot_X(\varphi)$ κατά τους άξονες X, Y και Z, μέσω των σχέσεων που ακολουθούν.



$$\psi = \operatorname{atan}_2\left(2 \cdot (x_{\text{norm}} \cdot y_{\text{norm}} + w_{\text{norm}} \cdot z_{\text{norm}}), (w_{\text{norm}}^2 + x_{\text{norm}}^2 - y_{\text{norm}}^2 - z_{\text{norm}}^2)\right) \quad (16)$$

$$\theta = \operatorname{asin}\left(-2 \cdot (x_{\text{norm}} \cdot z_{\text{norm}} - w_{\text{norm}} \cdot y_{\text{norm}})\right) \quad (17)$$

$$\varphi = \operatorname{atan}_2\left(2 \cdot (y_{\text{norm}} \cdot z_{\text{norm}} + w_{\text{norm}} \cdot x_{\text{norm}}), (w_{\text{norm}}^2 - x_{\text{norm}}^2 - y_{\text{norm}}^2 + z_{\text{norm}}^2)\right) \quad (18)$$

Τέλος, οι γωνίες αυτές χρησιμοποιούνται σε αλγόριθμο που πραγματοποιεί τις περιστροφές στο εικονικό μοντέλο του έξυπνου εργαλείου.

11.2 Περιγραφή σειράς αποστολής συλλεγόμενων μεγεθών έξυπνου εργαλείου

Προκειμένου η ορθή λειτουργία του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού και καταγραφής των συλλεγόμενων μεγεθών του έξυπνου εργαλείου, τα δεδομένα πρέπει να ακολουθούν μια συγκεκριμένη σειρά αποστολής. Η σειρά αποστολής παρουσιάζεται στον πίνακα 3,

Πίνακας σειράς αποστολής δεδομένων

Η σειρά αποστολής δεδομένων του έξυπνου εργαλείου

αρ. σειρά	Μετρούμενο μέγεθος	Τύπος μεγέθους
1.	Δύναμη	Δύναμη
2.	Επιτάχυνση άξονα Z	Διάνυσμα Γραμμικής Επιτάχυνσης
3.	Επιτάχυνση άξονα X	
4.	Επιτάχυνση άξονα Y	
5.	W	
6.	X	Διάνυσμα Τετραδόνιου
7.	Y	
8.	Z	
9.	Βαθμονόμηση συστήματος IMU	
10.	Βαθμονόμηση γυροσκοπίου	Στοιχεία Βαθμονόμησης IMU
11.	Βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου	
12.	Βαθμονόμηση μαγνητόμετρου	
13.	Θερμοκρασία IMU	
14.	Θερμοκρασία έξυπνου εργαλείου	Θερμοκρασίες

Πίνακας 4: Ο πίνακας με τη σειρά αποστολής των συλλεγόμενων δεδομένων.

όπου η πρώτη τιμή που αποστέλλει το έξυπνο εργαλείο, αφορά τη μέτρηση της δύναμης.

Οι επόμενες τρεις τιμές που αποστέλλονται είναι η μετρήσεις του διανύσματος της γραμμικής επιτάχυνσης, οι οποίες με σειρά αποστολής είναι η γραμμική επιτάχυνση στον άξονα Z, η γραμμική επιτάχυνση στον άξονα X και η γραμμική επιτάχυνση στον άξονα Y.

Σειρά έχει η αποστολή του διανύσματος του τετραδόνιου, το οποίο απαρτίζεται από τέσσερις συνιστώσες, συνεπώς αποστέλλονται τέσσερις τιμές, μια για κάθε συνιστώσα, όπου με τη σειρά αποστολής τους είναι η τιμή της συνιστώσας W, η τιμή της συνιστώσας X, η τιμή της συνιστώσας Y και η τιμή της συνιστώσας Z.

Ακολουθεί η αποστολή των τεσσάρων τιμών που αφορούν τις μεταβλητές με την ένδειξη δυναμικής βαθμονόμησης των αισθητήριων διατάξεων της μονάδας αδρανειακής μέτρησης. Έτσι με σειρά αποστολής έχουμε τη μεταβλητή του συνολικού συστήματος της μονάδας IMU, τη μεταβλητή της δυναμικής βαθμονόμησης του γυροσκοπικού αισθητήρα, τη μεταβλητή δυναμικής

βαθμονόμησης του αισθητήρα επιτάχυνσης και τη μεταβλητή δυναμικής βαθμονόμησης του μαγνητόμετρου.

Οι δύο τελευταίες τιμές που αποστέλλονται είναι οι μετρήσεις της θερμοκρασίας, όπου πρώτα αποστέλλεται η τιμή της θερμοκρασίας την οποία μετράει η μονάδα αδρανειακής μέτρησης IMU και στη συνέχεια η τιμή της θερμοκρασίας του έξυπνου εργαλείου που μετράει το αισθητήριο θερμοκρασίας που ενσωματώθηκε.



Σημαντικά στοιχεία της σειράς αποστολής των τιμών είναι οι χαρακτήρες που διαχωρίζουν τις τιμές μεταξύ τους και ο χαρακτήρας που αποστέλλεται τελευταίος και σηματοδοτεί το τέλος της σειράς δεδομένων, ώστε το λειτουργικό να τις διαχωρίζει μεταξύ τους. Ως χαρακτήρας διαχωρισμού των δεδομένων επιλέχθηκε το κόμμα και εισέρχεται μεταξύ δύο τιμών. Ως χαρακτήρας σήμανσης τέλους της σειράς δεδομένων επιλέχθηκε ο χαρακτήρας '/', όπου και κατά την καταγραφή τους σε αρχείο .txt μεταβαίνει στην επόμενη γραμμή.

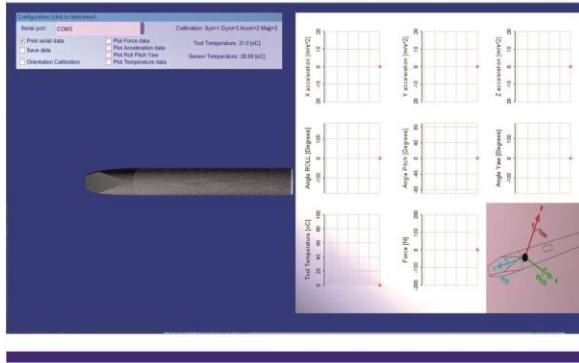
11.3 Αρχιτεκτονική λειτουργίας λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης και καταγραφής

Η αρχιτεκτονική του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού του έξυπνου εργαλείου και καταγραφής των συλλεγόμενων δεδομένων βασίστηκε στη δυνατότητα της άμεσης διαχείρισης και εποπτείας από τον χρήστη, των δεδομένων που αποστέλλει το έξυπνο εργαλείο σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Η άμεση διαχείριση και εποπτεία των συλλεγόμενων δεδομένων προσδίδει σημαντική ευκολία κατά τη χρήση του έξυπνου εργαλείου, αφού επιτρέπει την γρήγορη εκτίμηση των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη λειτουργία του, σε πραγματικό χρόνο.

Με σκοπό την επίτευξη αυτής της προϋπόθεσης, το λογισμικό που κατασκευάστηκε διαθέτει γραφικό περιβάλλον χρήστη (Graphical User Interface, GUI), το οποίο παρουσιάζεται στην εικόνα 11.2. Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού απαρτίζεται από έναν πίνακα εποπτείας και διαχείρισης, ένα

Γραφικό περιβάλλον του λογισμικού

Το περιβάλλον του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης



Εικόνα 11.2: Το γραφικό περιβάλλον του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης.

εικονικό τρισδιάστατο μοντέλο του έξυπνου εργαλείου, από οκτώ γραφήματα πραγματικού χρόνου (ένα για κάθε μετρούμενο μέγεθος) και μια εικόνα αναφοράς με το πλαίσιο συντεταγμένων του.

Ο πίνακας σύντομης εποπτείας και διαχείρισης, βρίσκεται στο πάνω αριστερό μέρος του παράθυρου του γραφικού περιβάλλοντος και διαθέτει επιλογή της σειριακής θύρας επικοινωνίας, επιλογή για την καταγραφή των δεδομένων σε αρχείο μορφής .txt, επιλογή διόρθωσης του προσανατολισμού του τρισδιάστατου μοντέλου του εργαλείου, ώστε να διορθωθεί κάποιο αρχικό σφάλμα. Επίσης, διαθέτει επιλογή ανεξάρτητης έναρξης/παύσης του κάθε γραφήματος ξεχωριστά.

Πέραν από τις παραπάνω λειτουργίες, ο πίνακας ενσωματώνει τις απεικονίσεις των δύο μετρούμενων θερμοκρασιών και των τιμών δυναμικής βαθμονόμησης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης IMU του έξυπνου εργαλείου, ώστε ο χρήστης να γνωρίζει σε πραγματικό χρόνο, κατά πόσο τα μετρούμενα μεγέθη από αυτήν είναι αξιόπιστα ή όχι, ώστε να προβεί σε ενέργειες διόρθωσης. Μια ενέργεια διόρθωσης είναι η γρήγορη βαθμονόμηση της μονάδας IMU (όπως παρουσιάζεται στο κεφάλαιο 12.2) ή η επανέναρξη της λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου.

Όπως προαναφέρθηκε το λογισμικό διαθέτει ένα εικονικό τρισδιάστατο μοντέλο του έξυπνου εργαλείου, το οποίο βρίσκεται στο κέντρο και αριστερά του παραθύρου και μπορεί να απεικονίσει οποιονδήποτε προσανατολισμό επιτυγχάνει σε πραγματικό χρόνο. Η λειτουργία αυτή επιτυγχάνεται μέσω της επεξεργασίας των τιμών του διανύσματος του τετραδόνιου.



Τα οκτώ ανεξάρτητα γραφήματα, βρίσκονται στο κέντρο και δεξιά του παραθύρου του γραφικού περιβάλλοντος, τα οποία έχουν διάταξη τριών γραμμών και τριών στηλών με το ένατο στοιχείο να είναι η φωτογραφία αναφοράς του έξυπνου εργαλείου. Η πρώτη γραμμή με τα τρία γραφήματα παρουσιάζει ανεξάρτητα τις γραμμικές επιταχύνσεις που αναπτύσσει το έξυπνο εργαλείο κατά τη λειτουργία του, για τους άξονες X, Y και Z, αντίστοιχα.

Η δεύτερη γραμμή απεικονίζει στα τρία γραφήματα τις μεταβολές των γωνιών του προσανατολισμού κατά σειρά Roll, Pitch και Yaw. Τα δύο γραφήματα της τρίτης και τελευταίας γραμμής παρουσιάζουν στο πρώτο τις μεταβολές της θερμοκρασίας που αναπτύσσει το εργαλείο, την οποία μετράει το αισθητήριο θερμοκρασία του και στο δεύτερο τη μετρούμενη δύναμη.

Για την επίτευξη όλων αυτών των λειτουργιών, κατασκευάστηκε ο κώδικας του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού, του οποίου η αρχιτεκτονική λειτουργίας παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής της εικόνας 11.3. Κατά την εκκίνηση του λογισμικού, αρχικοποιούνται οι βιβλιοθήκες καθώς οι μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν. Αφού ολοκληρωθεί ο ορισμός των μεταβλητών του προγράμματος, αρχικοποιείται το αρχείο που θα χρησιμοποιηθεί για την εγγραφή των δεδομένων, αν ενεργοποιηθεί η επιλογή εγγραφής.

Το επόμενο βήμα που ακολουθεί το πρόγραμμα είναι η αρχικοποίηση του μεγέθους του παραθύρου που έχει το γραφικό περιβάλλον, το οποίο κατά βάση ορίζει πόσα pixels της οθόνης θα καταλαμβάνει. Στη περίπτωση του λογισμικού αυτού ορίστηκε το μέγεθος του παραθύρου να έχει διαστάσεις 1300 επί 700 pixels. Ακολουθεί η αρχικοποίηση του τρισδιάστατου μοντέλου του έξυπνου εργαλείου και η αρχικοποίηση της σειριακής θύρας του ηλεκτρονικού υπολογιστή που είναι διασυνδεδεμένο.

Στη συνέχεια, αρχικοποιούνται οι παράμετροι του πίνακα σύντομης εποπτείας και διαχείρισης, όπου για κάθε στοιχείο που αναφέρθηκε ορίζονται ο τρόπος ενεργοποίησης και η θέση του στο παράθυρο του λογισμικού. Το τελευταίο βήμα που αφορά την αρχικοποίηση του λογισμικού είναι ο ορισμός των παραμέτρων για το κάθε ένα από τα οκτώ γραφήματα.

Μετά την ολοκλήρωση της αρχικοποίησης, το λογισμικό, προχωράει στην κύρια λειτουργία του, όπου εισέρχεται στο κυρίως βρόχο επανάληψης. Σε αυτόν το βρόχο, εκτελεί όλες τις διεργασίες με σταθερό κύκλο επανάληψης τα 100 mSec και παραμένει όσο η συνθήκη του είναι αληθής, δηλαδή όσο δεν πατηθεί το κουμπί παύσης. Αν πατηθεί το κουμπί παύσης το λογισμικό σταματάει όλες τις διεργασίες του ακαριαία.

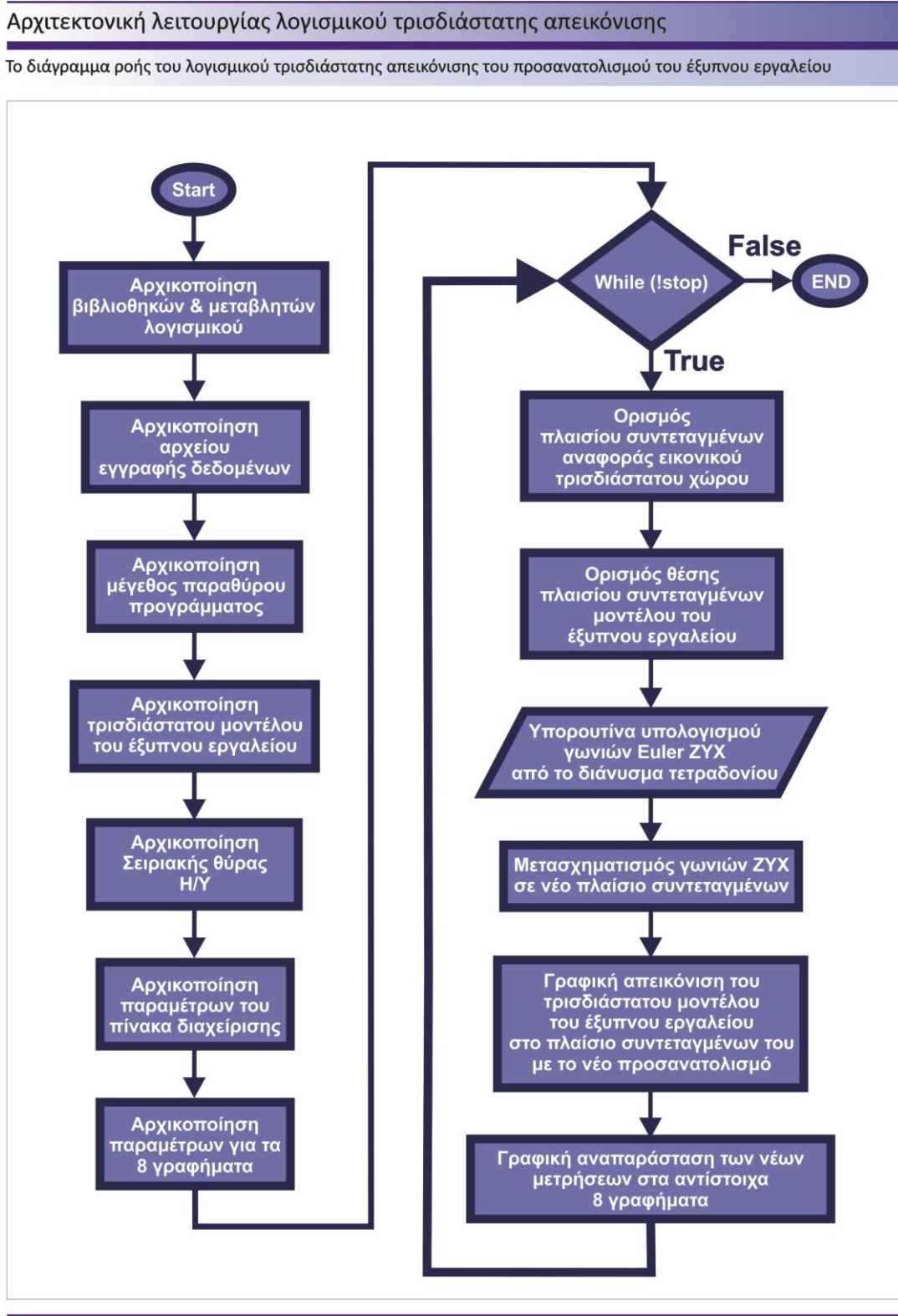
Για όσο είναι αληθής η συνθήκη του κυρίως βρόχου του λογισμικού, αρχικά ορίζεται το πλαίσιο συντεταγμένων αναφοράς της αναπαράστασης του εικονικού τρισδιάστατου χώρου και η θέση του πλαισίου συντεταγμένων που θα τοποθετηθεί το τρισδιάστατο μοντέλο του έξυπνου εργαλείου. Σειρά έχει το κάλεσμα της υπορουτίνας υπολογισμού των γωνιών Euler ZYX από το διάνυσμα του τετραδόνιου, η οποία χρησιμοποιεί την ανάλυση που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 11.1.

Αφού η υπορουτίνα υπολογίσει τις γωνίες και τις εξάγει στον κυρίως κώδικα, ακολουθεί ο μετασχηματισμός του στο νέο πλαίσιο συντεταγμένων, όπου πρέπει να αντιστοιχηθούν με βάση το πλαίσιο συντεταγμένων αναφοράς του εικονικού τρισδιάστατου χώρου. Μόλις ολοκληρωθεί αυτή η διαδικασία, το λογισμικό υπολογίζει τον πίνακα του ομογενή μετασχηματισμού που περιγράφει τον προσανατολισμό του μοντέλου και σε συνδυασμό με το πλαίσιο συντεταγμένων του, το οποίο τοποθετήθηκε παραπάνω, επιτυγχάνει τη γραφική απεικόνιση του μοντέλου στο παράθυρο του γραφικού περιβάλλοντος του λογισμικού.

Η τελευταία διεργασία που πραγματοποιεί το λογισμικό σε ένα κύκλο προγράμματος είναι η γραφική αναπαράσταση των οκτώ γραφημάτων, στα οποία ανά ένα προσθέτει τη νέα τιμή από τα εισερχόμενα



δεδομένα. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας αυτής ολοκληρώνεται ο ένας κύκλος προγράμματος και το λογισμικό επαναλαμβάνει όλες τις διεργασίες του κυρίως κύκλου από την αρχή.



Εικόνα 11.3: Το διάγραμμα ροής της λειτουργίας του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης του έξυπνου εργαλείου.

Τα εισερχόμενα δεδομένα ακολουθούν τη δομή σειράς που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 11.2. Η λειτουργία λήψης της μιας σειράς δεδομένων επιτυγχάνεται μέσω interrupt. Δηλαδή μόλις



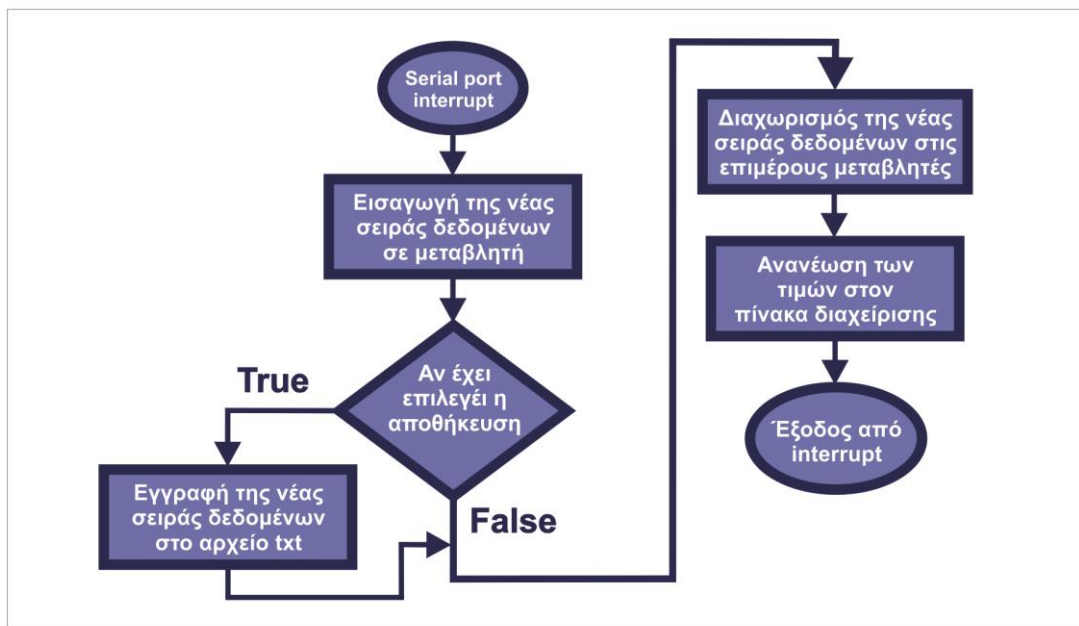
ολοκληρωθεί η παραλαβή ολόκληρης της σειράς δεδομένων στη σειριακή θύρα, ειδοποιείται το λογισμικό να σταματήσει οποιαδήποτε διεργασία εκτελεί για να λάβει τα νέα δεδομένα, μέσω της υπορουτίνας εξυπηρέτησης Serial port interrupt. Το λογισμικό ολοκληρώνει πρώτα όλες τις διεργασίες που διαθέτει η υπορουτίνα και μετά συνεχίζει τη διεργασία που σταμάτησε για να εξυπηρετήσει το interrupt.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής της λειτουργίας της υπορουτίνας εξυπηρέτησης Serial port interrupt, η οποία κατασκευάστηκε για τη λήψη των δεδομένων που αποστέλλει το έξυπνο εργαλείο. Η λειτουργία της είναι παράλληλη με αυτή του κυρίως κώδικα και επιτυγχάνεται κάθε φορά που ολοκληρώνεται η λήψη μια νέας σειράς δεδομένων, όπου τα νέα δεδομένα αρχικά εισάγονται σε μια μεταβλητή.

Στη συνέχεια, ελέγχεται αν ο χρήστης έχει επιλέξει τη λειτουργία αποθήκευσης των δεδομένων σε αρχείο. Αν έχει επιλεγεί αυτή η λειτουργία, τότε η νέα σειρά δεδομένων αποθηκεύεται στο αρχείο και συνεχίζει στις επόμενες διεργασίες. Αν δεν επιλεγεί η λειτουργία εγγραφής, τότε προχωράει στη διεργασία διαχωρισμού της σειράς δεδομένων σε επιμέρους μεταβλητές. Στο τελευταίο βήμα της, ανανεώνει τις τιμές στο πίνακα εποπτείας και διαχείρισης και εξέρχεται της υπορουτίνας, για να συνεχίσει τη διεργασία που διακόπηκε από το interrupt.

Υπορουτίνα εξυπηρέτησης Serial port interrupt

Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας εξυπηρέτησης Serial port interrupt, για τη λήψη των εισερχόμενων δεδομένων



Εικόνα 11.4: Το διάγραμμα ροής της υπορουτίνας εξυπηρέτησης της σειριακής θύρας, Serial port interrupt.



12. Διαδικασίες βαθμονόμησης αισθητήρων βελτιστοποιημένου έξυπνου εργαλείου

Το έξυπνο εργαλείο απαιτεί τη βαθμονόμηση μόνο των δύο ενσωματωμένων αισθητήριων διατάξεων, της μονάδας ενίσχυσης σημάτων DCell και της μονάδας αδρανειακής μέτρησης IMU, με τη δεύτερη να χρειάζεται επαναβαθμονόμηση κάθε φορά που ενεργοποιείται. Το αισθητήριο θερμοκρασίας είναι βαθμονομημένο από τον κατασκευαστή και δεν απαιτεί εκ' νέου βαθμονόμηση.

Στο πρώτο μέρος αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας ενίσχυσης σημάτων DCell, προκειμένου να μετατρέπεται η μετρούμενη τιμή τάσης σε τιμές δύναμης. Αυτή η διαδικασία βαθμονόμησης επιτυγχάνεται μέσω της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού και του λειτουργικού που παρέχει ο κατασκευαστής του.

Στο δεύτερο μέρος του κεφαλαίου παρουσιάζεται η διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης, ώστε όλα τα εξαγόμενα μεγέθη (διάνυσμα τετραδόνιου, διάνυσμα γραμμικής επιτάχυνσης και θερμοκρασία) να είναι αξιόπιστα και αξιοποιήσιμα.

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι η αναφορά του όρου 'έξυπνο εργαλείο', αντιπροσωπεύει τη βελτιστοποιημένη έκδοση του.

12.1 Διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας ενίσχυσης και μέτρησης (DCell)

Η μονάδα ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell διαθέτει πολλές λειτουργίες που βοηθούν στη βελτιστοποίηση της μέτρησης. Η αρχιτεκτονική λειτουργίας της μονάδας βασίζεται, αρχικά στη μέτρηση των σημάτων εξόδου από τη γέφυρα Wheatstone και στη συνέχεια ακολουθεί η επεξεργασία της σε δύο βαθμίδες μετατροπής, όπου η κάθε βαθμίδα είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή της εκάστοτε μέτρησης σε αντιπροσωπευτικές τιμές της μονάδας μέτρησης της δύναμης Newton (N) και σε κιλά (Kgr), αντίστοιχα.

Στην πρώτη βαθμίδα μετατροπής, η μονάδα DCell, υπολογίζει την εκάστοτε τιμή δύναμης σε μονάδες Newton, αντιστοιχίζοντας τη μετρούμενη ποσότητα της τάσης εξόδου από τη γέφυρα Wheatstone, βάσει της σχέσης 19, όπου το F_{Newton} είναι η εξαγόμενη τιμή της δύναμης σε $[N]$, η $V_{out,Bridge}$ η μετρούμενη ποσότητα της τάσης εξόδου από τη γέφυρα Wheatstone σε $[mV/V]$, η σταθερά GN_{Newton} είναι το κέρδος (gain) σε $[N/mV]$ και η σταθερά $F_{ofs,Newton}$ είναι το offset σε $[N]$.

$$F_{Newton} = (V_{out,Bridge} \cdot GN_{Newton}) - F_{ofs,Newton} \quad (19)$$

Η δεύτερη βαθμίδα μετατροπής υπολογίζει την εκάστοτε τιμή δύναμης σε μονάδες κιλού, αντιστοιχίζοντας τη υπολογιζόμενη τιμή δύναμης F_{Newton} , βάσει της σχέσης 20, όπου το $F_{Kilogram}$ είναι η εξαγόμενη τιμή της δύναμης σε $[Kgr]$, η F_{Newton} η υπολογισμένη ποσότητα της δύναμης σε $[N]$, η σταθερά $GN_{Kilogram}$ είναι το κέρδος (gain) σε $[Kgr/N]$ και η σταθερά $F_{ofs,Kilogram}$ είναι το offset σε $[Kgr]$.

$$F_{Kilogram} = (F_{Newton} \cdot GN_{Kilogram}) - F_{ofs,Kilogram} \quad (20)$$

Η μονάδα DCell παρέχει και περαιτέρω διεργασίες στη κάθε βαθμίδα μετατροπής, με σκοπό τη βέλτιστη δυνατή μετατροπή της μέτρησης. Έτσι, αν στη μονάδα έχει διασυνδεθεί αισθητήριο



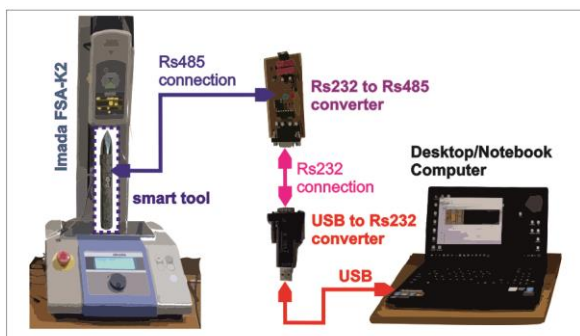
θερμοκρασίας, επιτρέπει τη διεργασία αντιστάθμισης της μετρούμενης ποσότητας $V_{out,Bridge}$ με τη θερμοκρασία (Temperature Compensation), η οποία επιτυγχάνεται στη πρώτη βαθμίδα μετατροπής της μέτρησης. Ενώ, στη δεύτερη βαθμίδα μετατροπής παρέχει τη δυνατότητα βέλτιστης γραμμικοποίησης της υπολογιζόμενης ποσότητας (Linearity Compensation).

Η βαθμονόμηση της μονάδας ενίσχυσης και μέτρησης σημάτων DCell αποσκοπεί στη συσχέτιση της μετρούμενης ποσότητας της τάσης εξόδου από τη γέφυρα Wheatstone $V_{out,Bridge}$, με την υπολογιζόμενη τιμή της δύναμης F_{Newton} , η οποία αντιπροσωπεύει την αξονική δύναμη που ασκείται στο έξυπνο εργαλείο κατά τη λειτουργία του. Βάσει αυτού, επιλέχθηκε η βαθμονόμηση μόνο της πρώτης βαθμίδας μετατροπής, ώστε η μετατροπή να έχει μονάδες Newton.

Προκειμένου να επιτευχθεί αυτή η βαθμονόμηση, πρέπει να προσδιοριστούν οι τιμές του κέρδους GN_{Newton} και της σταθεράς $F_{ofs,Newton}$ της σχέσης (19). Για τον προσδιορισμό αυτών των σταθερών, χρησιμοποιήθηκε η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού Imada FSA-K2, η οποία ασκεί θλιπτικές δυνάμεις ή δυνάμεις εφελκυσμού σε ένα δοκίμιο, με δυνατότητα μέτρησης και καταγραφής από τη μηχανή, αυτής της ασκούμενης δύναμης.

Διάταξη βαθμονόμησης DCell

Η διάταξη βαθμονόμησης της μονάδας DCell



Εικόνα 12.1: Το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης της μονάδας DCell με εξωτερικό Η/Υ.

Η εργαστηριακή διάταξη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στην εικόνα 12.1, στην οποία τοποθετήθηκε το έξυπνο εργαλείο στη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, σε κάθετη θέση, προκειμένου να ασκηθούν σε αυτό θλιπτικά φορτία από τη μηχανή.

Επιπρόσθετα παρουσιάζεται η συνολική διασύνδεση της μονάδας DCell (η οποία είναι ενσωματωμένη στο έξυπνο εργαλείο) με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, ώστε να πραγματοποιηθεί η άμεση επικοινωνία της μονάδας με το λειτουργικό διαχείρισής της που παρέχει η εταιρία.

Η διάταξη διασύνδεσης απαρτίζεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, στον οποίο διασυνδέεται ο μετατροπέας σειριακής επικοινωνίας USB σε RS232. Στο μετατροπέα USB σε RS232 διασυνδέεται η πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας RS232 σε RS485. Τέλος, η διάταξη επικοινωνίας ολοκληρώνεται με τη διασύνδεση απευθείας της ενσωματωμένης μονάδας DCell του έξυπνου εργαλείου στην πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας RS232 σε RS485.

Με σκοπό την επίτευξη της άμεσης διασύνδεσης της πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας RS232 σε RS485 με τη μονάδα DCell έχουν προδιαγραφεί και υπάρχουν πρόσθετες επαφές διασύνδεσης, όπου για την εύκολη πρόσβασή τους βρίσκονται στο εμπρόσθιο τμήμα του έξυπνου εργαλείου (βλ. κεφάλαιο 7.4.1).

Βέβαια κατά τη διάρκεια αυτής της επικοινωνίας θα πρέπει η ενσωματωμένη κεντρική μονάδα επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου να μην επικοινωνεί με τη μονάδα του DCell. Για το λόγο αυτόν θα πρέπει να έχει επιλεγθεί η διαδικασία αποστολής μηδενικών τιμών μόνο από το micro USB και Bluetooth, μέσω του push button επιλογής λειτουργίας. Στο στάδιο αυτό ο μικροελεγκτής δεν επικοινωνεί με τη μονάδα DCell (βλ. κεφάλαιο 10.2).



Εφόσον έχει ολοκληρωθεί η παραπάνω εργαστηριακή διάταξη, το έξυπνο εργαλείο υπόκειται σε σενάριο θλίψης από τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, στο οποίο το φορτίο που ασκείται σταθεροποιείται σε δύο ακραίες τιμές, αρχικά στη μικρότερη και εν συνεχεία στη μεγαλύτερη. Στην πρώτη ακραία τιμή (μικρότερη) παραμένει έως ότου σταθεροποιηθεί η μέτρηση της τάσης εξόδου της γέφυρας Wheatstone και μόλις σταθεροποιηθεί εισάγεται η τιμή που εξάγει η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, στο λογισμικό διαχείρισης της μονάδας DCell, προκειμένου να οριστεί η χαμηλότερη τιμή. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται και για τον ορισμό της υψηλότερης τιμής.

Μόλις ολοκληρωθούν και οι δύο διαδικασίες, το λογισμικό της μονάδας DCell αναλαμβάνει τον υπολογισμό των σταθερών GN_{Newton} και $F_{ofs,Newton}$, βάσει αυτών των δύο ακραίων τιμών και τις καταχωρεί στη μονάδα DCell, ολοκληρώνοντας έτσι τη διαδικασία βαθμονόμησής του.

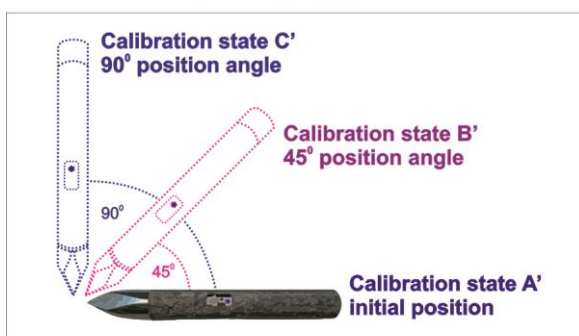
12.2 Διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης (IMU)

Η διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας αδρανειακής μέτρησης IMU που ενσωματώνει το έξυπνο εργαλείο, είναι μια πιο απλή διεργασία, η οποία δεν απαιτεί τη χρήση πρόσθετου εξοπλισμού, όπως η προηγούμενη της μονάδας DCell. Αυτό γιατί ο ενσωματωμένος μικροελεγκτής της μονάδας IMU (DMP) διαθέτει λειτουργίες αλγορίθμων δυναμικής βαθμονόμησης για την κάθε ενσωματωμένη αισθητήρια διάταξή του (γυροσκόπιο, επιταχυνσιόμετρο και μαγνητόμετρο), ξεχωριστά.

Τη κατάσταση της δυναμικής βαθμονόμησης παρουσιάζουν οι τέσσερις τιμές (βαθμονόμηση συστήματος IMU, βαθμονόμηση γυροσκοπίου, βαθμονόμηση επιταχυνσιόμετρου και βαθμονόμηση μαγνητόμετρου), που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 11.2, πίνακα 2, τιμές σειράς αποστολής δεδομένων από 9 έως 12. Οι τιμές αυτές έχουν εύρος από 0 έως 3, όπου στη τιμή 0 το αισθητήριο δεν είναι βαθμονομημένο και τα συλλεγόμενα δεδομένα του είναι εσφαλμένα, ενώ στη τιμή 3 το αισθητήριο είναι πλήρως βαθμονομημένο και τα συλλεγόμενα δεδομένα του είναι αξιόπιστα.

Βαθμονόμηση μονάδας IMU

Η διαδικασία βαθμονόμησης της μονάδας IMU



Εικόνα 12.2: Τα θήματα της διαδικασίας βαθμονόμησης της μονάδας IMU.

Η επίτευξη της βαθμονόμησης της μονάδας IMU, πραγματοποιείται με βάση τις τέσσερις αυτές τιμές και τη διαδικασία που παρουσιάζεται στην εικόνα 12.2. Αρχικά ο χρήστης κρατάει το έξυπνο εργαλείο σε οριζόντια θέση για χρόνο δύο με τριών δευτερόλεπτων, προσανατολίζοντας το LED ένδειξης λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου έτσι ώστε να το έχει μπροστά του, όπως παρουσιάζεται στη θέση βαθμονόμησης (Calibration state A', initial position) της εικόνας.

Στη συνέχεια, ο χρήστης μετακινεί το έξυπνο εργαλείο για 45° (κατ' εκτίμηση) από την αρχική θέση, χωρίς να αλλάξει τον προσανατολισμό του LED ένδειξης λειτουργίας, όπως παρουσιάζεται στη θέση της βαθμονόμησης (Calibration state B', 45° position angle) και παραμένει στη θέση

αυτή για άλλα δύο με τρία δευτερόλεπτα.

Τέλος, ο χρήστης μετακινεί το έξυπνο εργαλείο για ακόμα 45° γωνία (κατ' εκτίμηση), έτσι ώστε να επιτύχει γωνία 90° από την αρχική θέση, όπως παρουσιάζεται στη τελευταία θέση βαθμονόμησης C' (Calibration state C', 90° position angle) της εικόνας 12.2. Στο σημείο αυτό όλες οι τιμές δυναμικής βαθμονόμησης θα πρέπει να είναι ίσες με 3, που σημαίνει ότι όλα τα ενσωματωμένα αισθητήρια έχουν βαθμονομηθεί. Αν σε περίπτωση κάποια από αυτές είναι μικρότερη του 3 τότε ο χρήστης



πρέπει να επαναλάβει όλη τη διαδικασία από την αρχή, έως ότου βαθμονομηθούν όλοι οι ενσωματωμένοι αισθητήρες της μονάδας IMU.

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι κατά τη διαδικασία αυτή δεν απαιτείται η ακριβής τοποθέτηση της μονάδας IMU και κατ' επέκταση του έξυπνου εργαλείου στις εν λόγω γωνίες βαθμονόμησης, αφού όπως προαναφέρθηκε παραπάνω, ο μικροελεγκτής DPM της μονάδας χρησιμοποιεί αλγορίθμους δυναμικής βαθμονόμησης (Dynamic Calibration Algorithms), οι οποίοι συνεχώς βαθμονομούν όλες τις ενσωματωμένες αισθητήριες διατάξεις της, διορθώνοντας έτσι τυχόν αποκλίσεις. Επομένως, επιτρέπεται η κατ' εκτίμηση τοποθέτηση του έξυπνου εργαλείου στις θέσεις βαθμονόμησης Α', Β' και C'.

Λόγω του ότι η μονάδα IMU υλοποιεί δυναμική βαθμονόμηση η διαδικασία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή της λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου κριθεί ότι χρειάζεται. Σίγουρα όμως επιβάλλεται η βαθμονόμηση αυτή έστω μια φορά κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του.

Σε περίπτωση που η μονάδα IMU δεν βαθμονομείται ικανοποιητικά από την εν λόγω διαδικασία, υπάρχει και η επιλογή της εκτεταμένης διαδικασίας βαθμονόμησης, κατά την οποία ο χρήστης πρέπει να ακολουθήσει τα παρακάτω τρία βήματα, με τη σειρά που αναφέρονται.

- Βήμα 1^ο: Η βαθμονόμηση του γυροσκοπικού αισθητήρα επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση του έξυπνου εργαλείου πάνω σε ένα επίπεδο, παραμένοντας ακίνητο για μερικά δευτερόλεπτα, έως ότου η τιμή βαθμονόμησης που τον αφορά γίνει ίση με τρία.
- Βήμα 2^ο: Η βαθμονόμηση του αισθητήρα επιτάχυνσης επιτυγχάνεται με την περιστροφή του έξυπνου εργαλείου γύρω από τον ένα άξονα του ανά 45°, με μια χρονικά μικρή διάρκεια παύσης στην εκάστοτε γωνία, έως ότου η συνολική περιστροφή από την αρχική θέση του να είναι ίση με 180°.
- Βήμα 3^ο: Η βαθμονόμηση του μαγνητόμετρου επιτυγχάνεται από τη συνεχή μετακίνηση του έξυπνου εργαλείου στο χώρο, έτσι ώστε η ακμή του να διαγράφει μια τροχιά όπως το σχήμα που συμβολίζει το άπειρο '∞' στα μαθηματικά.



13. Έλεγχος και βελτιστοποίηση

Στο στάδιο αυτό μελετήθηκε αν όλες οι επιμέρους διατάξεις του έξυπνου εργαλείου είναι πλήρως λειτουργικές στο επίπεδο των επιθυμητών προδιαγραφών και αν η λειτουργία πληροί τα επιθυμητά επίπεδα χρηστικότητας. Αρχικά, πραγματοποιήθηκαν διεργασίες ελέγχου λειτουργίας των ηλεκτρονικών διατάξεων, οι οποίες αναφέρονται παρακάτω.

Με σκοπό την επιβεβαίωση της ενσύρματης διασύνδεσης USB του έξυπνου εργαλείου με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό RealTerm, το οποίο παρουσίαζε και κατέγραφε τα εισερχόμενα δεδομένα σε αρχείο. Στη συνέχεια το αρχείο επεξεργάστηκε στο λογισμικό Excel και διαπιστώθηκε ότι πραγματοποιήθηκε η λήψη όλων των δεδομένων από το έξυπνο εργαλείο.

Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε σε δεύτερη φάση και για την επιβεβαίωση της ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth του έξυπνου εργαλείου με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή. Τα εισερχόμενα δεδομένα καταγράφηκαν από το ίδιο λογισμικό σε αρχείο, όπου στη συνέχεια επεξεργάστηκαν στο Excel.

Για τη διαπίστωση της λειτουργίας της micro SD, τοποθετήθηκε η κάρτα στη μονάδα εισαγωγής του έξυπνου εργαλείου και πραγματοποιήθηκε ένα σενάριο λειτουργίας, όπου τα συλλεγόμενα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε αρχείο. Με την ολοκλήρωση του σεναρίου, η λειτουργία του έξυπνου εργαλείου τερματίστηκε και αφαιρέθηκε η κάρτα, όπου και ακολούθησε η περεταίρω επεξεργασία των καταγεγραμμένων δεδομένων του αρχείου στο Excel.

Στο τέταρτο στάδιο επιτεύχθηκε ένα σενάριο θλίψης του έξυπνου εργαλείου στη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, στο οποίο αυξανόταν η ασκούμενη δύναμη ανά 50 N με παύση 20 δευτερόλεπτων, ξεκινώντας από τα 0 N και με τελευταία μέτρηση στα 600N, ώστε να επιβεβαιωθεί η διαδικασία μέτρησης και μετατροπής της δύναμης από τη μονάδα DCell. Η διαπίστωση της καλής λειτουργία στη φάση αυτή πραγματοποιήθηκε αντιστοιχίζοντας οπτικά την ένδειξη της μηχανής με τη μετρούμενη τιμή από το έξυπνο εργαλείο. Επιπρόσθετα, πραγματοποιήθηκαν πειραματικές διαδικασίες για τη διαπίστωση της ορθής λειτουργίας της μέτρησης της δύναμης, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 15.

Η διαπίστωση του χρόνου λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου, ως αυτόνομη συσκευή, πραγματοποιήθηκε υποβάλλοντάς το σε ένα σενάριο συνεχόμενης λειτουργίας με μόνη πηγή τροφοδοσίας την ενσωματωμένη μπαταρία του, όπου τα δεδομένα αποστέλλονταν και καταγράφονταν σε εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω της ασύρματης επικοινωνίας Bluetooth. Στη συνέχεια, το αρχείο επεξεργάστηκε στο Excel, όπου η συνολική διάρκεια λειτουργίας που επιτυγχάνθηκε από το έξυπνο εργαλείο, ήταν τρεις συνεχόμενες ώρες

Στην τελευταία φάση πραγματοποιήθηκε η διαπίστωση της ορθής επικοινωνίας του έξυπνου εργαλείου, ασύρματης και ενσύρματης, με το λογισμικό τρισδιάστατης απεικόνισης του προσανατολισμού και καταγραφής των συλλεγόμενων δεδομένων. Κατά την οποία επιβεβαιώθηκε οπτικά η ορθή λειτουργία των επιμέρους λειτουργιών του λογισμικού, όπως ο προσανατολισμός και τα γραφήματα.

Με την ολοκλήρωση των διεργασιών ελέγχου της λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου και του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης παρατηρήθηκε ότι η χρηστικότητα του κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα.



14. Κοστολόγηση ηλεκτρονικών διατάξεων έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Το κεφάλαιο αυτό πραγματεύεται το κόστος αγοράς των ηλεκτρονικών διατάξεων που ενσωματώθηκαν στη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου. Η κοστολόγηση αυτή χωρίζεται σε δύο μέρη, από τα οποία το πρώτο αφορά τις έτοιμες ηλεκτρονικές διατάξεις που αγοράστηκαν, ενώ το δεύτερο μέρος αφορά τις ηλεκτρονικές διατάξεις που αναπτύχθηκαν κατά τη διάρκεια περάτωσης της εργασίας.

Η κοστολόγηση των ηλεκτρονικών διατάξεων που αγοράστηκαν παρουσιάζονται στο πίνακα 4. Το συνολικό κόστος αγοράς τους ανέρχεται στα 344,82 €, στο οποίο δεν συμπεριλαμβάνονται τα έξοδα αποστολής τους και το κόστος της ειδικής κόλλας (30,00 €) που χρησιμοποιήθηκε για την τοποθέτηση των Strain gauges στο έξυπνο εργαλείο. Πληροφοριακά αναφέρεται ότι οι εν λόγω διατάξεις αγοράστηκαν εις διπλούν αφού είχαν ενσωματωθεί και στη προ τυποποιημένη έκδοση του.

Κοστολόγηση ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου

Κοστολόγηση όλων των ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου που αγοράστηκαν

A/A	Ονομασία προϊόντος	Μονάδες	Τιμή μονάδας [€]	Τιμή [€]
1.	Teensy 3.2, Microcontroller module	1	26,00	26,00
2.	SGD-3/350-XY11, Strain gauges half bridge	2	27,90	55,80
3.	Dcell, Strain gauges digitiser module	1	175,93	175,93
4.	BlueSMiRF, Bluetooth module	1	34,95	34,95
5.	PowerBoost500C, LiPo charger	1	14,95	14,95
6.	BNO055, IMU	1	34,95	34,95
7.	Tiger 1S, LiPo battery	1	2,24	2,24
Σύνολο				344.82

Πίνακας 5: Ο πίνακας με τη κοστολόγηση των ηλεκτρονικών διατάξεων που αγοράστηκαν για τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης.

Στο πίνακα 5 παρουσιάζονται αναλυτικά τα ηλεκτρονικά στοιχεία που αγοράστηκαν προκειμένου να κατασκευαστούν οι ηλεκτρονικές διατάξεις της πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας RS485, της πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας RS232 σε RS485, της πλακέτας εισαγωγής κάρτας micro SD και της πλακέτας διασύνδεσης και φόρτισης micro USB. Το συνολικό κόστος κατασκευής τους ανέρχεται στα 17,68 € και δεν συμπεριλαμβάνονται τα έξοδα αποστολής καθώς και τα υλικά που υπήρχαν ήδη στο εργαστήριο.

**Κοστολόγηση ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου**

Κοστολόγηση υλικών κατασκευής των ηλεκτρονικών διατάξεων του έξυπνου εργαλείου

A/A	Ηλεκτρονική διάταξη	Ονομασία προϊόντος	Μονάδες	Τιμή μονάδας [€]	Τιμή [€]
1.		ADM232LARZ	1	3,94	3,94
2.		ADM485A	1	5,80	5,80
3.		L7805ACV	1	0,03	0,03
4.		Bc307 PNP Transistor	1	0,08	0,08
5.		1N4002 Diode	1	0,03	0,03
6.		LED Through hole	2	0,10	0,20
7.		D-SUB DHP8-09	1	0,36	0,36
8.	Rs232 to Rs485	Pin headers (10 pins)	1	0,06	0,06
9.	Converter	Capacitor electrolytic 1μF	4	0,02	0,08
10.		Capacitor electrolytic 10μF	2	0,15	0,30
11.		Capacitor polyester 100nF	2	0,68	1,36
12.		Resistor 47Ω (through hole)	2	0,01	0,02
13.		Resistor 120Ω (through hole)	1	0,01	0,01
14.		Resistor 560Ω (through hole)	2	0,01	0,02
15.		Resistor 1KΩ (through hole)	2	0,01	0,02
16.		Resistor 2.2KΩ (through hole)	4	0,01	0,04
17.		MAX485CSA+	1	2,65	2,65
18.		Capacitor 100nF (SMD)	1	0,01	0,01
19.	Rs485	Resistor 47Ω (SMD)	2	0,01	0,02
20.		Resistor 120Ω (SMD)	1	0,01	0,01
21.		Resistor 560Ω (SMD)	2	0,01	0,02
22.		Resistor 10KΩ (SMD)	1	0,01	0,01
23.		microSD push pull connector (SMD)	1	1,18	1,18
24.	microSD	Capacitor 100nF (SMD)	1	0,01	0,01
25.		Capacitor 10μF (SMD)	1	0,03	0,03
26.		Resistor 10KΩ (SMD)	3	0,01	0,03
27.	micro USB	micro USB socket (SMD)	1	1,54	1,54
Σύνολο					17,86

Πίνακας 6: Ο πίνακας με τη κοστολόγηση όλων των επιμέρους ηλεκτρονικών στοιχείων, που χρησιμοποιήθηκαν στις ηλεκτρονικές διατάξεις, οι οποίες κατασκευάστηκαν για τη βελτιστοποιημένη έκδοση του έξυπνου εργαλείου.

Επίσης, αγοράστηκε μια πλακέτα μονής όψης και μία διπλής όψης, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των τεσσάρων ηλεκτρονικών διατάξεων, όπως και για τις πλακέτες κόμβων τάσης και γείωσης. Το κόστος αγοράς της φωτοευαίσθητης πλακέτας μονής όψης ανέρχεται στα 10,59 €, ενώ της διπλής όψης στα 13,07 €.

Βέβαια, οι εργατοώρες για την σχεδίαση, ανάπτυξη και κατασκευή αυτών των ηλεκτρονικών διατάξεων καθώς και οι εργατοώρες ανάπτυξης του υλικολογισμικού λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου και του λογισμικού τρισδιάστατης απεικόνισης, ήταν πάρα πολλές. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η ανάπτυξη τους είχε διάρκεια πάνω από έξι μήνες εργασίας.



Μέρος Γ'

Πειραματικές διαδικασίες, αξιοποίηση αποτελεσμάτων και
προτάσεις μελλοντικής εξέλιξης, για το έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης

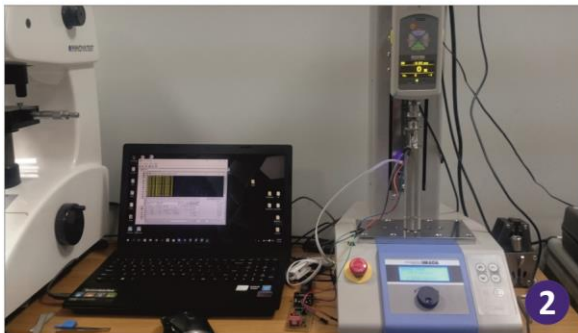
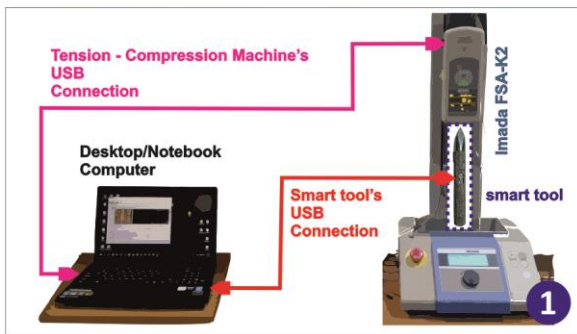


15. Σχεδιασμός και περάτωση πειραματικών διαδικασιών με σκοπό την επιβεβαίωση ορθής λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Η πρώτη σειρά πειραματικών διαδικασιών, που πραγματοποιήθηκε, αναλύεται σε αυτό το κεφάλαιο και αφορά τις πειραματικές διαδικασίες με σκοπό την επιβεβαίωση και την τεκμηρίωση της ορθής λειτουργίας του έξυπνου εργαλείου. Ο σχεδιασμός αυτής της σειράς πειραμάτων επικεντρώθηκε στη

Διάταξη πειραμάτων ορθής λειτουργίας

Η σχηματική και η πραγματική διάταξη



Εικόνα 15.1: Το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης για την πειραματική διάταξη (1) και η πραγματική πειραματική διάταξη (2).

της μηχανής (IMADA Incorporated) παρέχει ένα λογισμικό, μέσω του οποίου μπορούν να εξαχθούν σε αρχείο, για περαιτέρω επεξεργασία.

Στο σχήμα 1 της εικόνας 15.1 παρουσιάζεται η σχηματική διάταξη των πειραμάτων αυτών, με τη διασύνδεση που χρησιμοποιήθηκε, η οποία απαρτίζεται από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή, τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού και το έξυπνο εργαλείο. Το έξυπνο εργαλείο και η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού διασυνδέθηκαν στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, μέσω των θυρών τύπου USB και με τα ανάλογα λογισμικά πραγματοποιήθηκε η καταγραφή των δεδομένων σε δύο διαφορετικά αρχεία, τα οποία εν συνεχεία επεξεργάστηκαν περαιτέρω, για την εξαγωγή των γραφημάτων που παρουσιάζονται στα παρακάτω κεφάλαια.

Επιπροσθέτως, το σχήμα 2 της εικόνας 15.2 παρουσιάζει την πραγματική εργαστηριακή πειραματική διάταξη με το έξυπνο εργαλείο σε λειτουργία και τοποθετημένο στη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού. Στα κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται συνοπτικά τα αντιπροσωπευτικότερα αποτελέσματα από τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, εφόσον αποτελούν μέρος από ένα μεγάλο εύρος πειραμάτων με διάφορα σενάρια θλίψης που διεξήχθησαν.



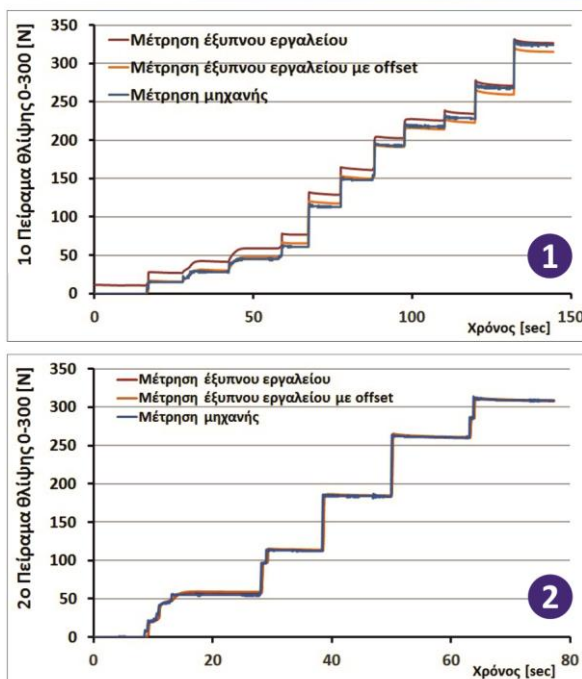
15.1 Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-300 Newton

Το πρώτο σενάριο μηχανικής θλίψης που παρουσιάζεται, σχεδιάστηκε έτσι ώστε στο έξυπνο εργαλείο να ασκηθεί θλιπτική δύναμη από 0 Newton μέχρι το μέγιστο όριο των 300 Newton. Η σχεδίαση αυτή βασίζεται στη μεταβαλλόμενη φόρτιση του έξυπνου εργαλείου, έχοντας ως αρχική κατάσταση το φορτίο των 0 Newton, όπου στη συνέχεια το φορτίο μεταβάλλεται βαθμιδωτά σε προκαθορισμένα βήματα αύξησης φορτίου, για συγκεκριμένη χρονική διάρκεια στο κάθε βήμα, έως ότου το φορτίο ανέρθει στα 300 Newton.

Το μέγιστο φορτίο θλίψης των 300 Newton πραγματοποιείται για την ίδια χρονική διάρκεια με αυτή των αυξανόμενων βημάτων, όπως και για το αρχικό βήμα των 0 Newton. Επίσης, η αύξηση του φορτίου στη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού επιτυγχάνθηκε με χειροκίνητη λειτουργία και επομένως στο κάθε βήμα μεταβολής μπορεί να υπάρχει μια μεταβολή από την προκαθορισμένη τιμή βήματος αύξησης, η οποία κυμαίνεται από την τάξη των ± 1 Newton μέχρι την τάξη των ± 50 Newton. Αυτό γιατί η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, δεν μπορεί να επιτύχει σταθερό βήμα μεταβολής της ασκούμενης δύναμης, ιδικά στα πολύ μεγάλα φορτία καθώς επίσης προσθέτετε σε αυτό και το σφάλμα χειρισμού, από τη χειροκίνητη λειτουργία.

Πειράματα θλίψης από 0 έως 300 Newton

Τα δύο πειράματα σεναρίου θλίψης από 0 έως 300 N



Εικόνα 15.2: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δευτέρου (2) πειράματος θλίψης 0-300 N.

έξυπνου εργαλείου. Η επεξεργασία αυτή αφορά την αφαίρεση της αρχικής ποσότητας από όλα τα υπόλοιπα δεδομένα, δηλαδή το κατά πόσο απέχει η μέτρηση από το μηδέν στον άξονα της δύναμης (offset).

Στο σχήμα 2 της εικόνας 15.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε γράφημα του δεύτερου πειράματος για το ίδιο σενάριο θλίψης 0 έως 300 Newton αλλά με νέα βαθμονόμηση της διάταξης μέτρησης της δύναμης του έξυπνου εργαλείου (δηλαδή του συστήματος των Strain gauges – γέφυρας Wheatstone – μονάδα DCell) η οποία ήταν για αρχικό φορτίο τα 0 Newton και για μέγιστο τα 100

Στα σχήματα της εικόνας 15.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για δύο από αυτά τα σεναρία πειραμάτων των 0 – 300 Newton, τα οποία πραγματοποιήθηκαν με διαφορετική χρονική διάρκεια βήματος, με διαφορετικό βήμα μεταβολής του φορτίου και με διαφορετική αρχική βαθμονόμηση του έξυπνου εργαλείου.

Έτσι, το πρώτο πείραμα θλίψης του οποίου το γράφημα παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 15.2, πραγματοποιήθηκε για βαθμονόμηση της μονάδας μέτρησης της δύναμης του έξυπνου εργαλείου από 0 έως 300 Newton. Το βήμα αύξησης φορτίου της τάξης των 25 Newton με σφάλμα μεταβολής να κυμαίνεται περίπου από ± 1 έως ± 50 Newton και για χρονική διάρκεια βήματος περίπου 10 sec. Η συνολική διάρκεια του πειράματος ανέρχεται στα περίπου 150 sec.

Στο γράφημα αυτό απεικονίζονται με μπλε απόχρωση το δεδομένα από τη μέτρηση της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού. Με κόκκινη απόχρωση παρουσιάζονται τα δεδομένα από τη μέτρηση του έξυπνου εργαλείου. Ενώ με πορτοκαλί απόχρωση διακρίνονται τα επεξεργασμένα δεδομένα της μέτρησης του



Newton. Το δεύτερο πείραμα πραγματοποιήθηκε για βήμα αύξησης του φορτίου ίσο με 50 Newton, με το σφάλμα του να μεταξύ του ± 5 και του ± 30 Newton. Στο πείραμα αυτό η αυξητική μεταβολή του φορτίου πραγματοποιούνταν ανά περίπου 10 sec. Η συνολική χρονική διάρκεια του περάματος προσδιορίζεται στα περίπου 80 sec.

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, με μπλε απόχρωση απεικονίζονται τα δεδομένα που συλλέχτηκαν από τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, με κόκκινη απόχρωση παρουσιάζονται τα δεδομένα που καταγράφηκαν από το έξυπνο εργαλείο και με πορτοκαλί τα επεξεργασμένα δεδομένα του έξυπνου εργαλείου με την αφαίρεση του αρχικού offset (σχήμα 2, εικόνα 15.2).

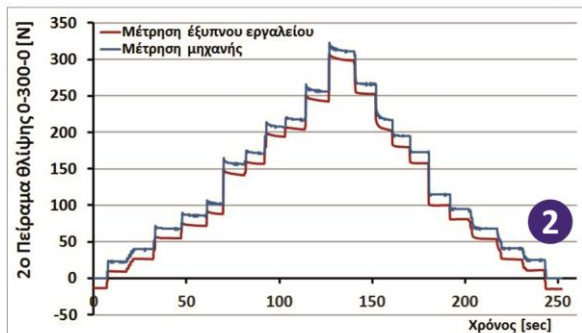
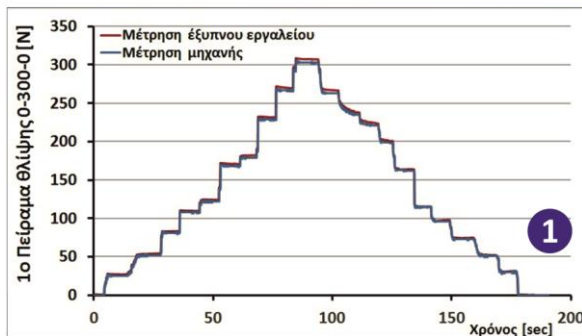
Από αυτά τα γραφήματα της εικόνας 15.2 μπορεί να παρατηρηθεί μια μη γραμμικότητα στη συμπεριφορά της μονάδας μέτρησης της δύναμης του έξυπνου εργαλείου, της οποίας η μεταβολή επηρεάζεται από τη βαθμονόμησή της. Επίσης, μπορεί να παρατηρηθεί ότι τα συλλεγόμενα δεδομένα της μέτρησης δεν παρουσιάζουν θόρυβο.

15.2 Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-300-0 Newton

Στο επόμενο σενάριο μηχανικής θλίψης, η σχεδίαση του διαφοροποιήθηκε από την προηγούμενη ως προς το σενάριο θλιπτικής δύναμης. Έτσι και σε αυτό τα όρια του φορτίου κυμαίνονται από 0 Newton μέχρι τα 300 Newton, αλλά η μεταβολή του φορτίου πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο το μεταβαλλόμενο φορτίο που ασκείται στο έξυπνο εργαλείο, έχει αυξητική πορεία, ξεκινώντας από τα 0 Newton μέχρι να φτάσει τα 300 N και στη συνέχεια στο δεύτερο στάδιο ακολουθεί φθίνουσα πορεία από τα 300 Newton μέχρι να ξαναφτάσει το μηδενικό φορτίο.

Πειράματα θλίψης από 0-300-0 Newton

Τα δύο πειράματα σεναρίου θλίψης από 0-300-0 N



Εικόνα 15.3: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δευτέρου (2) πειράματος θλίψης 0-300-0 N.

προσδιορισμό του φορτίου, που επιτυγχάνει το έξυπνο εργαλείο, όταν έχει πραγματοποιηθεί

Στο πρώτο πείραμα θλίψης για σενάριο 0 – 300 – 0 Newton, του οποίου τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 1 της εικόνας 15.3, το βήμα αύξησης φορτίου είναι της τάξης των 25 Newton και για χρονική διάρκεια βήματος περίπου 15 sec. Το πείραμα αυτό διήρκησε περίπου 250 sec και είχε προηγηθεί νέα βαθμονόμηση στα 0 μέχρι 100 Newton. Στο γράφημα αυτό απεικονίζονται με μπλε απόχρωση το δεδομένα από τη μέτρηση της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού, ενώ με κόκκινη απόχρωση παρουσιάζονται τα δεδομένα από τη μέτρηση του έξυπνου εργαλείου.

Στο σχήμα 2 της εικόνας 15.3 παρουσιάζεται το γράφημα του δεύτερου πειράματος για το ίδιο σενάριο θλίψης 0 – 300 – 0 Newton. Για το δεύτερο πείραμα δεν πραγματοποιήθηκε εκ νέου βαθμονόμηση της διάταξης μέτρησης της δύναμης του έξυπνου εργαλείου και το πείραμα διεξήχθη λίγες ώρες μετά (περίπου τρεις ώρες) τη πραγματοποίηση του πρώτου πειράματος που αναφέρθηκε παραπάνω.

Από τη μία στο πρώτο γράφημα μπορεί να παρατηρηθεί η ικανοποιητική ακρίβεια στο



βαθμονόμησή του πριν τη διεξαγωγή του πειράματος. Από την άλλη στο δεύτερο γράφημα διακρίνεται μια απόκλιση (offset) στις μετρήσεις και η αρχική τιμή κατά την έναρξη δεν είναι η μηδενική, αλλά έχει μετατοπιστεί στα αρνητικά περίπου στο -10 Newton.

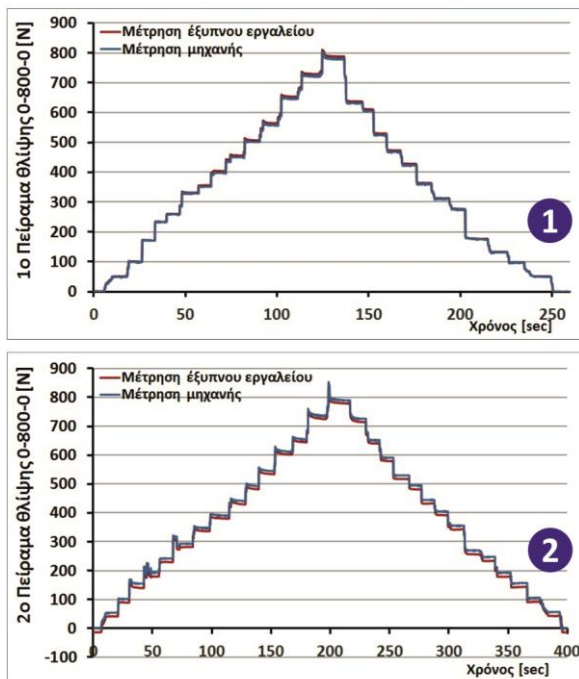
Η εν λόγω απόκλιση συνεχίζει να μεγαλώνει με την πάροδο του χρόνου, αφού η αρχική τιμή της δύναμης που μετράει το έξυπνο εργαλείο κάθε φορά που ενεργοποιείται, μικραίνει, αν δεν έχει πραγματοποιηθεί νέα βαθμονόμηση. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι την επόμενη μέρα από τη διεξαγωγή των πειραμάτων αυτών η αρχική μέτρηση του εργαλείου ήταν περίπου -60 Newton. Επίσης, δοκιμαστικά το εργαλείο αφέθηκε σε αδράνεια για μια βδομάδα και η μέτρηση στη κατάσταση ισορροπίας του ανερχόταν στα -270 Newton. Βέβαια πρέπει να σημειωθεί ότι κατά τη μεσολάβηση των δύο παραπάνω σεναρίων θλίψης η λειτουργία του έξυπνου εργαλείου απενεργοποιήθηκε.

Στο φαινόμενο αυτό που παρουσίασε το σύστημα strain gauge – γέφυρα Wheatstone -DCell του έξυπνου εργαλείου δεν έχει προσδιοριστεί ακόμα και σήμερα η αιτία που το προκαλεί, αλλά χρησιμοποιήθηκε μία στρατηγική επίλυσής του, μηδενίζοντας την αρχική μέτρηση, ως γρήγορη βαθμονόμηση, κατά την εκκίνηση της λειτουργίας του. Η μονάδα DCell διαθέτει έναν καταχωρητή, ο οποίος είναι για τον ορισμό της τιμής απόκλισης (offset). Η τιμή του offset ορίζεται από τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου, η οποία αρχικά λαμβάνει την αρχική μέτρηση και στη συνέχεια την αποστέλλει στον εν λόγω καταχωρητή της μονάδας DCell. Η λειτουργία αυτή πραγματοποιείται μόνο για μία φορά κατά τη διάρκεια της έναρξης της λειτουργίας του.

15.3 Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-800-0 Newton

Πειράματα θλίψης από 0-800-0 Newton

Τα δύο πειράματα σεναρίου θλίψης από 0-800-0 N



Εικόνα 15.4: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δεύτερου (2) πειράματος θλίψης 0-800-0 N.

χρώμα παρουσιάζεται η μέτρηση από τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού και με κόκκινη απόχρωση τα δεδομένα της μέτρησης από το έξυπνο εργαλείο.

Η επόμενη μέτρηση θλίψης αυτής της σειρά πειραμάτων πραγματοποιήθηκε για σενάριο φόρτισης του έξυπνου εργαλείου, παρόμοιο με το προηγούμενο, αλλά με διαφοροποίηση στο όριο της μέγιστης τιμής του φορτίου, το οποίο ήταν στα 800 Newton. Αυτή η μέγιστη τιμή φορτίου θεωρήθηκε ικανοποιητική, εφόσον ο γλύπτης κατά τις διαδικασίες κατεργασίας του λίθου δεν ασκεί δύναμη πολύ μεγαλύτερης τάξης και τα φορτία είναι συγκρίσιμα με αυτά του πειράματος.

Έτσι, στο σενάριο αυτό το φορτίο αυξανόταν με αρχική τιμή τα 0 N, μέχρι τα 800 Newton και στη συνέχεια ακολουθούσε φθίνουσα πορεία μέχρι να μηδενιστεί. Το βήμα μεταβολής του φορτίου ορίστηκε περίπου στα 25 N και η χρονική διάρκεια στο κάθε βήμα περίπου στα 15 sec, όπου ήταν κοινά και για τα δύο πειράματα αυτού του σεναρίου θλίψης.

Στην εικόνα 15.4 και σχήμα 1 παρουσιάζεται το πρώτο πείραμα, το οποίο πραγματοποιήθηκε αμέσως μετά τη διαδικασία νέας βαθμονόμησης της αισθητήριας διάταξης του έξυπνου εργαλείου, για εύρος τιμών από 0 N μέχρι 100 N. Με μπλε



Από το γράφημα αυτό παρατηρείται η εξαιρετική παρακολούθηση της μεταβολής του φορτίου, για όλο το εύρος τιμών του, μετά τη νέα βαθμονόμηση του έξυπνου εργαλείου.

Στο σχήμα 2, παρουσιάζεται το δεύτερο πείραμα, το οποίο διεξήχθη τρεις ώρες μετά το πρώτο πείραμα και με το έξυπνο εργαλείο σε κατάσταση αδράνειας για το διάστημα αυτό. Με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται τα δεδομένα από το έξυπνο εργαλείο και με μπλε τα δεδομένα από τη μηχανή εφελκυσμού. Στο διάγραμμα αυτό είναι εμφανές το πρόβλημα με την αρχική απόκλιση της τιμής στην κατάσταση ισορροπίας του έξυπνου εργαλείου, το οποίο αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 15.2.

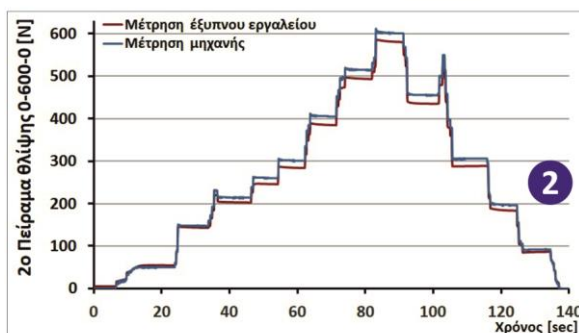
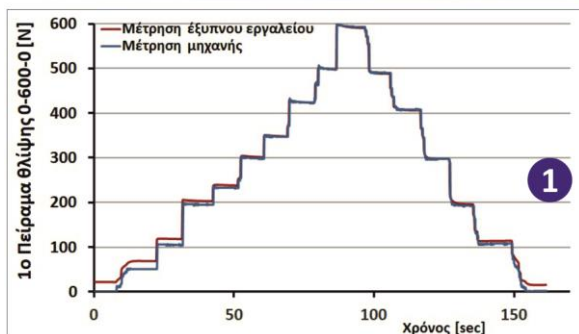
Αξίζει να σημειωθεί ότι η στρατηγική επίλυσης του προβλήματος της απόκλισης στη μέτρηση, η οποία παρουσιάστηκε και αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δεν εφαρμόστηκε για τη περάτωση αυτών των πειραματικών μετρήσεων, γι' αυτό και γίνεται εμφανές στα γραφήματα.

15.4 Πειράματα θλίψης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-600-0 Newton

Το σενάριο θλίψης του έξυπνου εργαλείου για μεταβολή φορτίου 0 – 600 – 0 Newton που παρουσιάζεται σε αυτό το επιμέρους κεφάλαιο αφορά μια σειρά πειραματικών μετρήσεων η οποία πραγματοποιήθηκε κατά τις αρχικές δοκιμές, πριν από όλες τις πειραματικές διεργασίες που

Πειράματα θλίψης από 0-600-0 Newton

Τα δύο πειράματα σεναρίου θλίψης από 0-600-0 N



Εικόνα 15.5: Τα γραφήματα του πρώτου (1) και δεύτερου (2) πειράματος θλίψης 0-600-0 N.

μελετώνται. Σε αυτό το σενάριο θλίψης η μεταβολή του φορτίου πραγματοποιείται από αρχικό φορτίο 0 Newton μέχρι τα 600 Newton μέγιστο και μειώνεται σταδιακά μέχρι τα 0 Newton.

Η διαφοροποίηση από τα υπόλοιπα είναι στη βαθμονόμηση της αισθητήριας διάταξης του έξυπνου εργαλείου, όπου το αισθητήριο βαθμονομήθηκε πριν από κάθε πείραμα.

Στο σχήμα 1 της εικόνας 15.5 παρουσιάζεται το γράφημα θλιπτικού φορτίου [N] αναφορικά με το χρόνο [sec] του πρώτου πειράματος, όπου με κόκκινη απόχρωση είναι η μέτρηση του έξυπνου εργαλείου και με μπλε η μέτρηση της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού.

Η βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε στο έξυπνο εργαλείο πριν από τη μέτρηση ήταν από φορτίο 0 Newton μέχρι το μέγιστο των 1000 Newton και από το γράφημα μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μέτρηση είναι αρκετά καλή σχεδόν σε όλο το εύρος των τιμών και κυρίως από τα 200 Newton και πάνω.

Στο δεύτερο πείραμα που πραγματοποιήθηκε (εικόνα 15.5, σχήμα 2) η βαθμονόμηση του αισθητήρα επιτεύχθηκε για φορτίο 0 Newton και μέγιστο τα 600 Newton. Από αυτό το γράφημα μπορεί να παρατηρηθεί η εξαιρετική παρακολούθηση που επιτυγχάνει το έξυπνο εργαλείο για τις μεταβολές μικρού φορτίου.



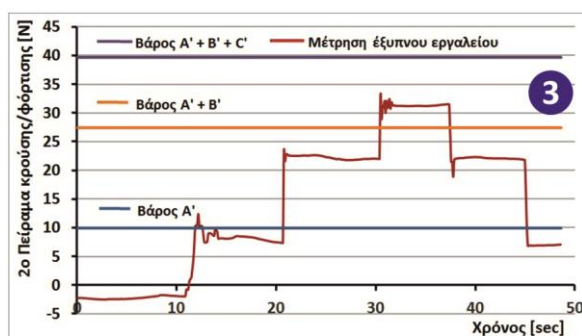
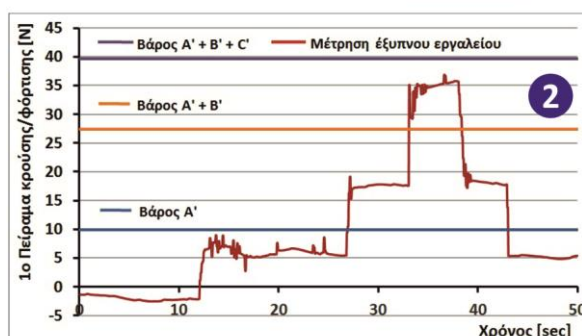
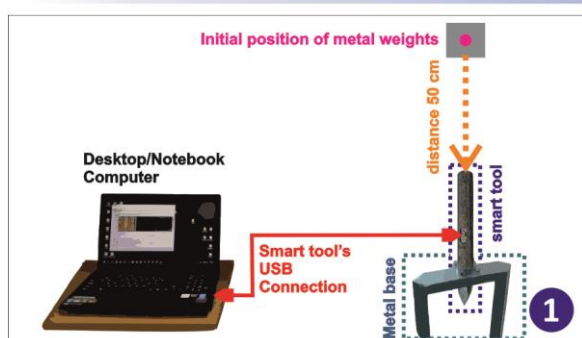
Το ενδιαφέρον σε αυτή τη σειρά μετρήσεων είναι ότι οδήγησε στη βαθμονόμηση της αισθητήριας διάταξης σε μικρό εύρος τιμών, από 0 μέχρι τα 100 Newton, η οποία χρησιμοποιήθηκε για τις επόμενες σειρές πειραμάτων και για το λόγο αυτό επιλέχθηκε να αναφερθεί.

15.5 Πειράματα κρούσης για μέτρηση μηχανικού φορτίου από 0-39,7-0 Newton

Πέραν των πειραμάτων σε σενάρια θλίψης του έξυπνου εργαλείου στη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, με μεταβολή του φορτίου, σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν σενάρια κρούσης. Για την επίτευξη αυτών των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τρία μεταλλικά βαρίδια με διαφορετικό βάρος το καθένα,

Πειράματα κρούσης /φόρτισης

Τα δύο πειράματα σεναρίου κρούσης/φόρτισης 0-39.7-0 N



Εικόνα 15.6: Το σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξη που χρησιμοποιήθηκε (1) και τα γραφήματα του πρώτου (2) και δευτέρου (3) πειράματος κρούσης – φόρτισης 0-39.7-0 N.

παρέμεινε στη πειραματική διάταξη, έως ότου ολοκληρωθεί το κάθε πείραμα.

τα οποία τοποθετήθηκαν κρουστικά στο έξυπνο εργαλείο ανά σειρά χωρίς να αφαιρεθεί κάποιο από τα προηγούμενα. Μετά την κρουστική τοποθέτηση και των τριών βαριδιών, αφαιρέθηκαν τα δύο κατά σειρά.

Με σκοπό τη περάτωση του σεναρίου κρούσης, κατασκευάστηκε μια ειδικού τύπου μεταλλική βάση, η οποία διαθέτει υποδοχή για το έξυπνο εργαλείο, ώστε να το κρατάει σε σταθερό προσανατολισμό, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 15.6. Έτσι το έξυπνο εργαλείο τοποθετήθηκε στη μεταλλική βάση κάθετο προς το δάπεδο με την ακμή του να προσανατολίζεται στο έδαφος. Με τη διάταξη αυτή, το φορτίο θα ασκείται στον άξονα του έξυπνου εργαλείου, όπως και στη διάταξη της μηχανής θλίψης εφελκυσμού.

Αρχικά το έξυπνο εργαλείο τοποθετήθηκε στη μεταλλική βάση, με προσανατολισμό κάθετο ως προς τη γη, όπου στη συνέχεια ακολούθησε η κρουστική εναπόθεση του κάθε βαριδιού κατά σειρά, για τη χρονική διάρκεια των 10, 20 και 30 mSec, αντίστοιχα. Το πρώτο βαρίδιο αφέθηκε να πραγματοποιήσει ελεύθερη πτώση τη χρονική στιγμή 10 mSec από την έναρξη του πειράματος και για απόσταση περίπου 50 cm πάνω από το οπίσθιο τμήμα του έξυπνου εργαλείου. Στη συνέχεια, για τις αντίστοιχες χρονικές στιγμές (20 και 30 mSec) ακολούθησε η κρουστική εναπόθεση των επόμενων δύο βαριδιών με τον ίδιο ακριβώς τρόπο, χωρίς να αφαιρεθεί κάποιο από προηγούμενα.

Τη χρονική στιγμή 40 mSec του πειράματος αφαιρέθηκε το τρίτο βαρίδιο από τη πειραματική διάταξη κρούσης και μετά από περίπου 5 mSec αφαιρέθηκε και το δεύτερο βαρίδιο, ενώ το πρώτο



Επίσης, τα τρία βαρίδια που χρησιμοποιήθηκαν, ζυγίστηκαν σε ζυγαριά ακριβείας, ώστε να προσδιοριστεί το ακριβές βάρος τους και κατ' επέκταση η δύναμη που θα ασκήσουν. Το βάρος του πρώτου βαριδίου ζυγίστηκε στα 1.016 kgf (9.96 N), το δεύτερο στα 1.253 kgf (12.29 N) και το τρίτο στα 1.780 kgf (17.46 N).

Στο σχήμα 2 της εικόνας 15.6 παρουσιάζεται το πρώτο πείραμα κρούσης που πραγματοποιήθηκε. Ενώ στο σχήμα 3 παρουσιάζεται το δεύτερο πείραμα κρούσης. Με κόκκινη απόχρωση είναι τα δεδομένα της μέτρησης του έξυπνου εργαλείου, με μπλε παρουσιάζεται το φορτίο που ασκεί το πρώτο βαρίδιο, με πορτοκαλί το φορτίο του πρώτου βαριδίου συν του δεύτερου και με μωβ απόχρωση το συνολικό φορτίο και των τριών μαζί. Επίσης, οι ίδιες αποχρώσεις χρησιμοποιήθηκαν και στο γράφημα του σχήματος 3, αντίστοιχα.

Από τα γραφήματα είναι ξεκάθαρο ότι οι αισθητήριες διατάξεις του έξυπνου εργαλείου είναι σε θέση να καταγράψουν τα κρουστικά φαινόμενα.

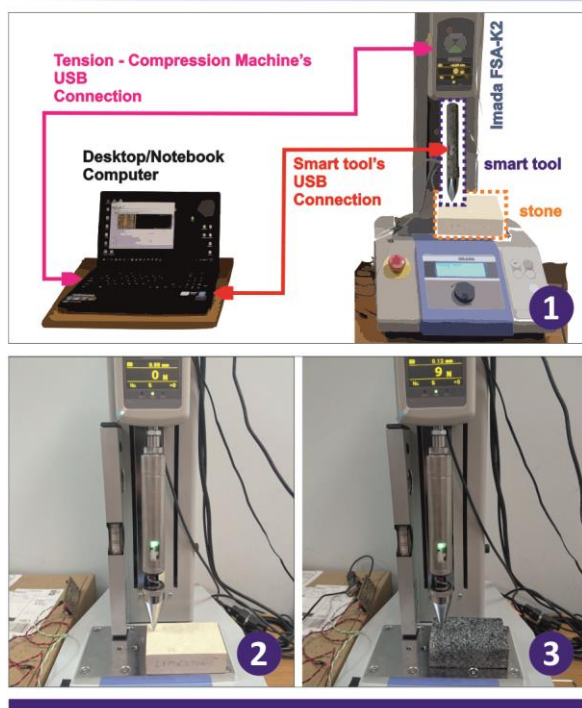


16. Σχεδιασμός και περάτωση πειραμάτων μονοαξονικής θλίψης έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης σε λίθινα δοκίμια

Το επόμενο βήμα στις πειραματικές διαδικασίες ήταν η επιβεβαίωση και η τεκμηρίωση της συμπεριφοράς του έξυπνου εργαλείου σε σενάρια θλίψης λίθινων δοκιμίων, αλλά και εύρεση του ορίου θραύσης για κάθε είδος λίθου που τέθηκε υπό δοκιμή, ξεχωριστά. Για τον σκοπό αυτό,

Διάταξη πειραμάτων σε λίθινα δοκίμια

Η σχηματική και δύο από τις πραγματικές διατάξεις



Εικόνα 16.1: Το σχηματικό διάγραμμα διασύνδεσης της πειραματικής διάταξης (1) και δύο από τις πραγματικές πειραματικές διατάξεις για δοκίμιο ασβεστόλιθου (2) και γρανίτη (3).

σχεδιάστηκε η πειραματική διάταξη που παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 16.1 και στο σχήμα 2 και 3 παρουσιάζονται η πραγματική πειραματική διάταξη για το δοκίμιο του ασβεστόλιθου και του γρανίτη, αντίστοιχα.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από το λίθινο δοκίμιο, το έξυπνο εργαλείο, τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού και έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το δοκίμιο και το έξυπνο εργαλείο τοποθετήθηκαν στη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, όπως παρουσιάζεται στα σχήματα της εικόνας 16.1, αφού αρχικά είχε προσαρμοστεί στο έξυπνο εργαλείο η εμπρόσθια εναλλάξιμη σμίλη σημείου.

Η τοποθέτηση του δοκιμίου έγινε στη βάση της μηχανής και κάθετα σε αυτό προσαρμόστηκε το έξυπνο εργαλείο, προκειμένου η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού να ασκήσει σενάρια θλιπτικού φορτίου στο δοκίμιο, μέσω του έξυπνου εργαλείου.

Το έξυπνο εργαλείο όπως και η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού διασυνδέθηκαν σε ηλεκτρονικό υπολογιστή, όπως και στις προηγούμενες σειρές πειραμάτων, ώστε να αποθηκεύονται τα συλλεγόμενα δεδομένα τους, σε αρχείο, για τη μετέπειτα επεξεργασία τους.

Το σενάριο θλίψης που χρησιμοποιήθηκε για αυτές τις πειραματικές μετρήσεις αποτελείται από τη βηματική αύξηση του φορτίου, με αρχικό μηδενικό φορτίο έως ότου φτάσει το μέγιστο φορτίο των 1000 Newton. Ο ορισμός αυτού του μέγιστου φορτίου των 1000 N, επιλέχθηκε αφού εκτιμήθηκε ότι οι περισσότεροι από αυτούς του λίθους θραύονται σε μικρότερο φορτίο. Δηλαδή, ο γλυπτής εργάζεται κυρίως με μικρότερα φορτία από το όριο θραύσης του λίθου, ώστε να μην καταστραφεί το γλυπτό και επομένως οι τιμές του φορτίου που θα λαμβάνονται από το έξυπνο εργαλείο κατά τη διαδικασία σμίλευσης θα είναι συγκρίσιμες, με αυτές του σεναρίου θλίψης. Το βήμα αύξησης ορίστηκε στα 100 N και ο χρόνος παραμονής στο κάθε βήμα ορίστηκε στα περίπου 10 sec.

Τα είδη λίθων τα οποία διερευνήθηκαν σε αυτή τη σειρά πειραματικών διαδικασιών είναι ο ασβεστόλιθος Κρήτης, το μάρμαρο Νάξου, το μάρμαρο Νέστου, το μάρμαρο Μαρμαρά και ο γρανίτης Ιταλίας. Η επιλογή των συγκεκριμένων λίθων έγινε βάση των φυσικών ιδιοτήτων τους, όπως επίσης η διαθεσιμότητα τους στην Ελληνική αγορά μαρμάρου. Για το κάθε δοκίμιο λίθου πραγματοποιήθηκαν



έξι συνολικές πειραματικές μετρήσεις, οι οποίες διεξήχθησαν από τρεις στις δύο μεγάλες επιφάνειές του.

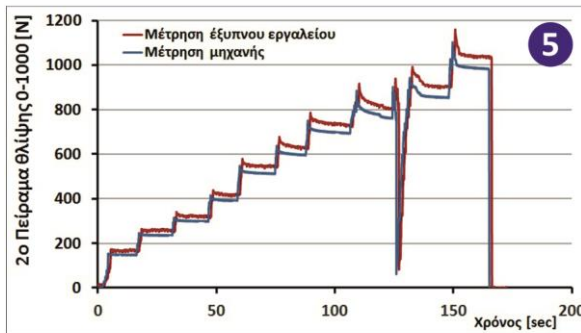
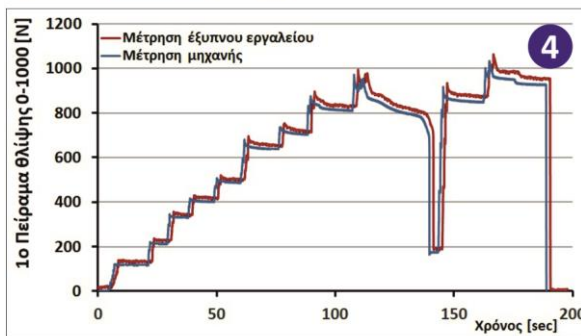
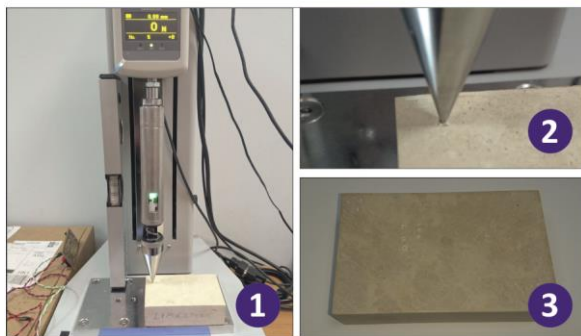
Στα επιμέρους κεφάλαια που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αντιπροσωπευτικότερα από τα αποτελέσματα αυτών πειραμάτων, ξεχωριστά για το κάθε είδος λίθου.

16.1 Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο ασβεστόλιθου

Τα πρώτα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν σε αυτή τη σειρά πειραματικών μετρήσεων με λίθινα δοκίμια αφορούσαν το φυσικό ασβεστόλιθο, ο οποίος εξορίζεται σε λατομία της Κρήτης και ανήκει

Πειράματα θλίψης σε ασβεστόλιθο

Το δοκίμιο και δύο πειράματα σε ασβεστόλιθο



Εικόνα 16.2: Η πειραματική διάταξη για ασβεστόλιθο Κρήτης (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1^ο και 2^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.

στη κατηγορία των ιζηματογενή πετρωμάτων (βλ. κεφάλαιο 5.2.2). Η πειραματική διάταξη (δοκίμιο ασβεστόλιθου – έξυπνο εργαλείο – μηχανή) η οποία χρησιμοποιήθηκε για την περάτωση του σεναρίου θλίψης παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 16.2.

Στην πειραματική διάταξη (σχήμα 1) το δοκίμιο του ασβεστόλιθου τοποθετήθηκε στη βάση της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού και σε κάθετο προσανατολισμό το έξυπνο εργαλείο με την ακμή της εναλλάξιμης σμίλης σημείου να στερεώνεται στο σημείο θλίψης του λίθου (σχήμα 2). Για την επιβεβαίωση της καθετότητας χρησιμοποιήθηκε ένα όργανο μέτρησής της (αλφάδι), το οποίο παρουσιάζεται στα αριστερά του έξυπνου εργαλείου στο σχήμα 1.

Η καθετότητα του έξυπνου εργαλείου ως προς το λίθο και κατ' επέκταση ως προς τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, επηρεάζει τη διεύθυνση μετάδοσης της ασκούμενης θλιπτικής δύναμης. Επομένως, για την επίτευξη μονοαξονικής θλίψης του συστήματος δοκίμιο λίθου – έξυπνο εργαλείο, πρέπει το έξυπνο εργαλείο να είναι ακριβώς κάθετο με το επίπεδο βάσης της μηχανής, όπου έχουν τοποθετηθεί.

Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται το δοκίμιο του ασβεστόλιθου, ενώ στο σχήμα 2 εστιάζεται το σημείο θλίψης του λίθου, από την ακμή της εναλλάξιμης σμίλη σημείου του έξυπνου εργαλείου.

Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται τα γραφήματα που κατασκευάστηκαν από τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία αναφέρονται σε δύο από τις συνολικά έξι πειραματικές μετρήσεις,



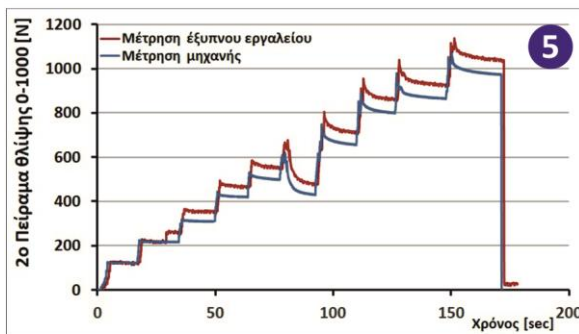
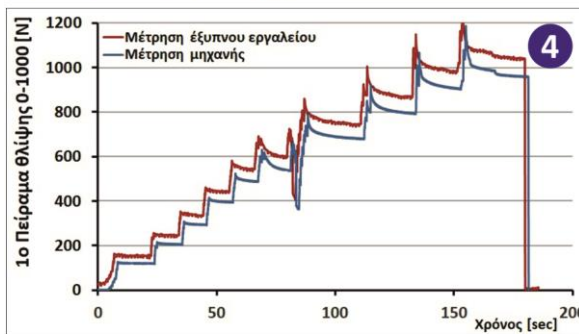
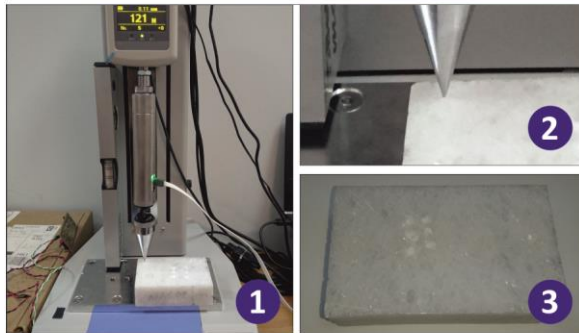
Στα γραφήματα αυτά με κόκκινη απόχρωση αναπαρίστανται τα δεδομένα που αναφέρονται στη μέτρηση που επιτυγχάνει το έξυπνο εργαλείο, ενώ με μπλε τα συλλεγόμενα δεδομένα από τη μηχανή θλίψης – εκφυλισμού. Επίσης, το σενάριο φόρτισης που ακολουθήθηκε, για τη μηχανή θλίψης – εφελκυσμού, αναφέρθηκε στο εισαγωγικό κομμάτι του κεφαλαίου.

Από τα δύο αυτά γραφήματα γίνονται αντιληπτά τα φαινόμενα θραύσης του λίθου. Στο πρώτο πείραμα (σχήμα 4) το φαινόμενο θραύσης λαμβάνει χώρα για θλιπτικό φορτίο περίπου στα 900 Newton και για χρονική στιγμή κοντά στα 140 sec και η συνολική χρονική διάρκεια του φαινομένου ήταν περίπου 8 sec. Στο δεύτερο πείραμα (σχήμα 5) η θραύση του δοκιμίου επιτεύχθηκε για θλιπτικό φορτίο περίπου στα 900 Newton, όπως και στο πρώτο πείραμα, αλλά το φαινόμενο είχε αρκετά μικρότερη χρονική διάρκεια, η οποία υπολογίζεται στα 4 sec.

16.2 Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο μαρμάρου Νάξου

Πειράματα θλίψης σε μάρμαρο Νάξου

Το δοκίμιο και δύο πειράματα σε μάρμαρο Νάξου



Εικόνα 16.3: Η πειραματική διάταξη για μάρμαρο Νάξου (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1^ο και 2^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.

Τα επόμενα πειράματα θλίψης πραγματοποιήθηκαν για το μάρμαρο Νάξου, το οποίο εξορίζεται στο νησί τη Νάξου, όπου είναι ένα είδος μαρμάρου και ανήκει στη κατηγορία των μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων (βλ. κεφάλαιο 5.3 και κεφάλαιο 5.3.1). Το δοκίμιο του μαρμάρου Νάξου που χρησιμοποιήθηκε για τη περάτωση των δοκιμών, παρουσιάζεται στο σχήμα 3 της εικόνας 16.3.

Στο σχήμα 1 της εικόνας 16.3 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη μηχανής θλίψης – εφελκυσμού με το δοκίμιο τοποθετημένο στη βάση της και το έξυπνο εργαλείο σε κάθετη τοποθέτηση, έτσι ώστε η ακμή της εναλλάξιμης σμίλης σημείου να βρίσκει το σημείο θλίψης του δοκιμίου, όπως απεικονίζεται στο σχήμα 2.

Η καθετότητα του έξυπνου εργαλείου επιβεβαιώνεται οπτικά από το αλφάδι στα αριστερά του (σχήμα 1), προκειμένου να επιτυγχάνεται η βέλτιστη μονοαξονική θλίψη και το σενάριο θλίψης που πραγματοποιήθηκε παρουσιάστηκε στο εισαγωγικό μέρος του κεφαλαίου.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν με το δοκίμιο του μαρμάρου Νάξου ήταν στο πλήθος τους έξι, από τις οποίες παρουσιάζονται οι δύο στα γραφήματα των σχημάτων 4 και 5, της εικόνας 16.3, όπου με κόκκινο χρώμα απεικονίζονται οι μετρήσεις του έξυπνου εργαλείου και με μπλε οι μετρήσεις της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού.

Στο πρώτο πείραμα του οποίου το γράφημα θλίψης – χρόνου παρουσιάζεται στο σχήμα 4, τη



χρονική στιγμή 80 sec και για φορτίο θλίψης 600 Newton, διαπιστώνεται το φαινόμενο θραύσης του δοκιμίου από τη στιγμιαία μείωση του φορτίου.

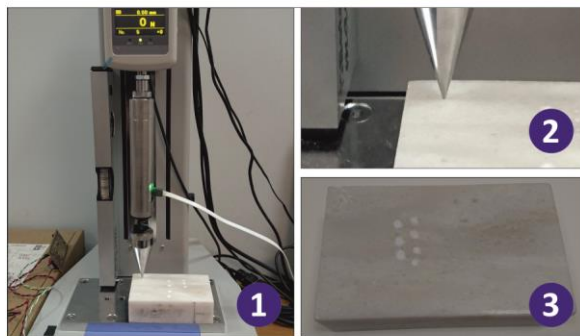
Στο δεύτερο πείραμα (εικόνα 16.3 και σχήμα 5) το φαινόμενο θραύσης παρουσιάστηκε για περίπου την ίδια χρονική στιγμή και για περίπου ίδιο φορτίο θλίψης, αλλά με μια σημαντική μεταβολή στη χρονική διάρκεια, όπου ήταν σαφώς μεγαλύτερη και όχι στιγμιαία όπως στο πρώτο πείραμα. Ο χρόνος που διήρκησε το φαινόμενο θραύσης στο δεύτερο πείραμα υπολογίστηκε στα περίπου 20 sec, από τη στιγμή θραύσης έως ότου το φορτίο επανέλθει στο αρχικό φορτίο των 600 Newton.

16.3 Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο μαρμάρου Νέστου

Ακολουθούν τα πειράματα μονοαξονικής θλίψης του έξυπνου εργαλείου σε δοκίμιο μαρμάρου Νέστου, το οποίο εξορίζεται από τη περιοχή του ποταμού Νέστου. Όπως και το προηγούμενο είναι είδος μαρμάρου και ανήκει στα μεταμορφωσιγενή πετρώματα (βλ. κεφάλαιο 5.3). Το δοκίμιο του μαρμάρου Νέστου, το οποίο χρησιμοποιήθηκε, απεικονίζεται στο σχήμα 3 της εικόνας 16.4.

Πειράματα θλίψης σε μάρμαρο Νέστου

Το δοκίμιο και δύο πειράματα σε μάρμαρο Νέστου

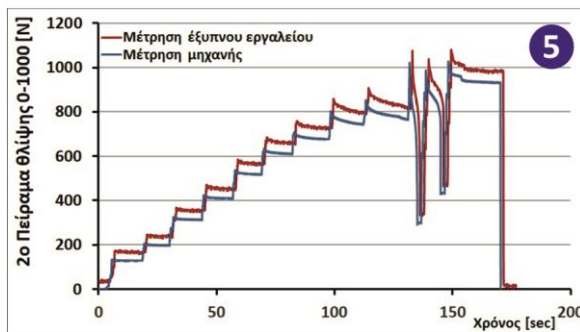
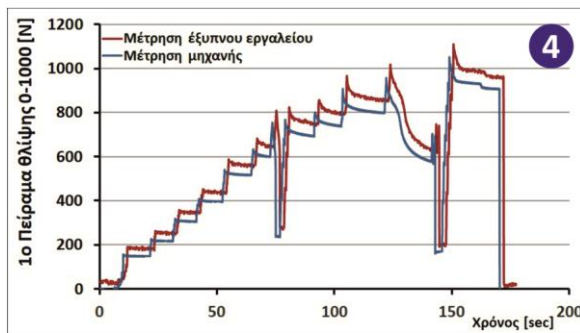


Η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού με τοποθετημένο στη βάση της, το δοκίμιο του μαρμάρου και το έξυπνο εργαλείο κάθετο στην επιφάνεια του, παρουσιάζεται στο σχήμα 1 της εικόνας 16.4. Στη διάταξη αυτή έχει τοποθετηθεί και το αλφάδι επιβεβαίωσης της καθετότητας του έξυπνου εργαλείου. Ενώ το σημείο θλίψης του δοκιμίου από τη εναλλάξιμη σμίλη σημείου του έξυπνου εργαλείου απεικονίζεται στο σχήμα 2.

Όπως και στα προηγούμενα πειράματα, το σενάριο θλίψης παραμένει το ίδιο, με έξι συνολικά πειραματικές διαδικασίες, από τις οποίες παρουσιάζονται οι δύο, στα γραφήματα των σχημάτων 4 και 5.

Η χρωματική κωδικοποίηση των δεδομένων παραμένει ίδια με αυτές των προηγούμενων, όπου με κόκκινη απόχρωση παρουσιάζονται τα δεδομένα που εξάγονται από το έξυπνο εργαλείο και με μπλε τα δεδομένα της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού.

Από το γράφημα του πρώτου πειράματος (σχήμα 4) γίνονται ευδιάκριτες δύο χρονικές στιγμές (περίπου στα 75 sec και στα 145 sec) κατά τις οποίες έλαβαν χώρα φαινόμενα θραύσης στην επιφάνεια του δοκιμίου. Η πρώτη θραύση πραγματοποιήθηκε για φορτίο θλίψης περίπου στα 700 N και το δεύτερο για φορτίο μεγαλύτερο των 900 Newton.



Εικόνα 16.4: Η πειραματική διάταξη για μάρμαρο Νέστου (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1^ο και 2^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.



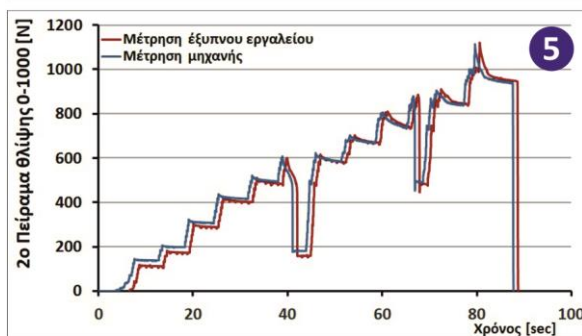
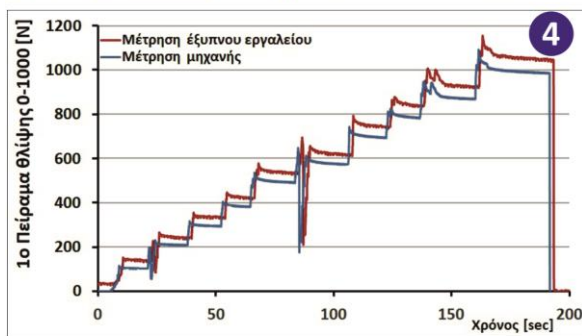
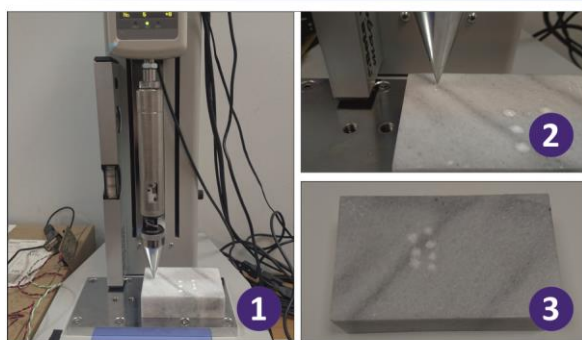
Στο δεύτερο πείραμα το φαινόμενο της θραύσης παρουσιάστηκε δύο φορές σε πολύ κοντινές χρονικές περιόδους. Όπως διακρίνεται από το γράφημα του σχήματος 5 το πρώτο φαινόμενο θραύσης παρουσιάστηκε για περίπου 135 sec και για φορτίο κοντά στα 900 Newton, όπου μετά το πέρας του παρουσιάστηκε το δεύτερο φαινόμενο θραύσης του, για το ίδιο φορτίο.

Αυτές οι απότομες ακμές κατά τη μεταβολή του φορτίου, όπου στη συνέχεια ισορροπούν σε μια λίγο μικρότερη τιμή, οφείλονται στη μηχανή θλίψης - εφελκυσμού, η οποία δεν μπορεί να σταθεροποιήσει το φορτίο στη συγκεκριμένη αρχική τιμή, ιδικά από τα 500 Newton και πάνω. Ειδικότερα σε όλα τα γραφήματα των πειραματικών διαδικασιών που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 16, μπορεί να διαπιστωθεί η συμπεριφορά, παρατηρώντας τη μέτρηση για φορτίο 1000 Newton, όπου γίνεται εντονότερο.

16.4 Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο μαρμαρά Μαρμαρά

Ένα ακόμα είδος μαρμαρά που διερευνήθηκε είναι το μάρμαρο Μαρμαρά, από τη περιοχή Μαρμαρά της Τουρκίας. Όπως όλα τα μάρμαρα ανήκουν στη κατηγορία των μεταμορφωσιγενών πετρωμάτων, τα οποία αναλυθήκαν στο κεφάλαιο 5.3 και 5.3.1. Το δοκίμιο του μαρμαρά Μαρμαρά που χρησιμοποιήθηκε σε αυτές τις πειραματικές διαδικασίες παρουσιάζεται στο σχήμα 3 της εικόνας 16.5.

Το δοκίμιο και δύο πειράματα σε μάρμαρο Μαρμαρά



Εικόνα 16.5: Η πειραματική διάταξη για μάρμαρο Μαρμαρά (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1^ο και 2^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.

Το σενάριο θλίψης του δοκιμίου παρέμεινε το ίδιο με των υπόλοιπων πειραματικών δοκιμών, το οποίο αναφέρθηκε στο εισαγωγικό μέρος του κεφαλαίου και απαρτίζεται από τη βαθμιδωτή θλίψη του δοκιμίου από το αρχικό φορτίο των μηδέν Newton μέχρι το μέγιστο των 1000 N.

Στο σχήμα 1 της εικόνας 16.5 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη, με το δοκίμιο μαρμαρά να έχει τοποθετηθεί στη βάση της μηχανής και το έξυπνο εργαλείο σε κάθετη διεύθυνση προς στη επιφάνεια του.

Στο σχήμα 2 απεικονίζεται το σημείο θλίψης του δοκιμίου από τη ακμή της εναλλάξιμης σμίλης σημείου του έξυπνου εργαλείου. Όπως και στις υπόλοιπες πειραματικές μετρήσεις, αυτής της σειράς πειραματικών διαδικασιών, τα σημεία θλίψης του λίθου από το έξυπνο εργαλείο ήταν στο σύνολο τους έξι διαφορετικά για κάθε μια από τις μετρήσεις.

Το σχήμα 4 της εικόνας 16.5 παρουσιάζει το γράφημα για μία από τις έξι πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν και στο οποίο διακρίνονται 2 φαινόμενα θραύσης. Το πρώτο διακρίνεται για χρόνο κοντά στα 20 sec και για



φορτίο περίπου 200 Newton, ενώ το δεύτερο παρουσιάστηκε κοντά στα 80 sec και για φορτίο περίπου 600 Newton.

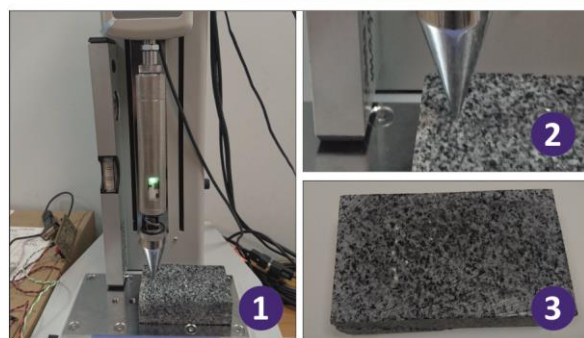
Το διάγραμμα του δεύτερου πειράματος παρουσιάζεται στο σχήμα 5, στο οποίο πάλι διακρίνονται δύο φαινόμενα θραύσης του δοκιμίου. Το πρώτο έλαβε χώρα για χρόνο 40 sec και με φορτίο 600 N. Το δεύτερο φαινόμενο θραύσης του δοκιμίου επιτεύχθηκε σε χρόνο κοντά στα 65 sec και για φορτίο μονοαξονικής θλίψης περίπου στα 900 Newton.

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι η βαθμονόμηση της μονάδας μέτρησης σημάτων DCell πραγματοποιήθηκε μόνο μία φορά, στην αρχή όλης της πειραματικής διαδικασίας θλίψης λίθινων δοκιμίων και μπορεί να παρατηρηθεί το ικανοποιητικό αποτέλεσμα των μετρήσεων του έξυπνου εργαλείου από τα γραφήματα ως τώρα.

16.5 Πείραμα θλίψης εργαλείου σε δοκίμιο γρανίτη

Πειράματα θλίψης σε γρανίτη

Το δοκίμιο και δύο πειράματα σε γρανίτη



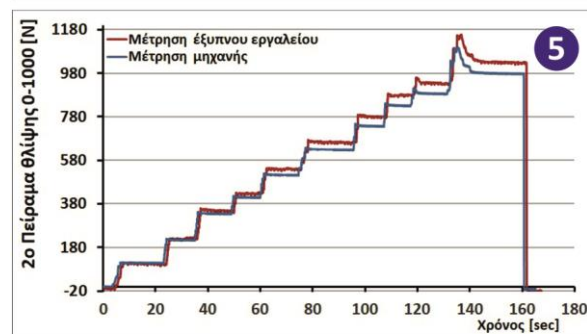
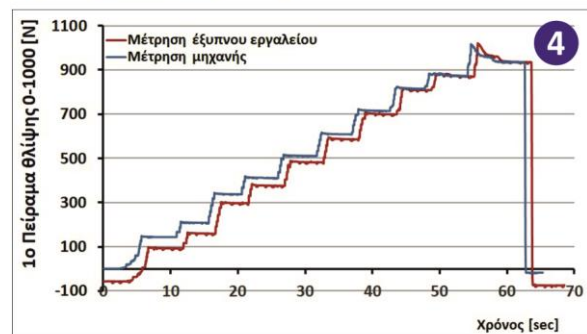
Ο τελευταίος λίθος που υποβλήθηκε σε σενάρια μονοαξονικής θλίψης είναι ο γρανίτης. Ο γρανίτης είναι ένα πυριγενές πέτρωμα (βλ. κεφάλαιο 5.1 και κεφάλαιο 5.1.1) και ο λίθος με τη μεγαλύτερη σκληρότητα, όπως και αντοχή σε θλιπτικό φορτίο, από όλους τους λίθους που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές τις πειραματικές διαδικασίες.

Το δοκίμιο του γρανίτη που χρησιμοποιήθηκε παρουσιάζεται στο σχήμα 3 της εικόνας 16.6 και η προέλευση του είναι Ιταλική. Το σενάριο θλίψης που εφαρμόστηκε σε αυτές τις πειραματικές διαδικασίες παρουσιάστηκε στο εισαγωγικό μέρος του κεφαλαίου.

Η πειραματική διάταξη του συστήματος δοκίμιο γρανίτη – έξυπνο εργαλείο – μηχανή (θλίψης – εφελκυσμού) παρουσιάζεται στο σχήμα 1, ενώ στο σχήμα 2 απεικονίζεται το σημείο θλίψης του δοκιμίου από το έξυπνο εργαλείο.

Στα σχήματα 4 και 5 της εικόνας 15.6 παρουσιάζονται τα διαγράμματα για δύο από τις συνολικά έξι πειραματικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν. Στα διαγράμματα αυτά με κόκκινη απόχρωση απεικονίζονται τα συλλεγόμενα δεδομένα του έξυπνου εργαλείου, ενώ με μπλε τα δεδομένα της μηχανής θλίψης – εφελκυσμού.

Όπως ήταν αναμενόμενο από τις φυσικές ιδιότητες του γρανίτη, σε κανένα από αυτά τα πειράματα (παρατηρώντας τα γραφήματα στα σχήματα 4 και 5) δεν παρουσιάστηκε φαινόμενο θραύσης του.



Εικόνα 16.6: Η πειραματική διάταξη για γρανίτη Ιταλίας (1), το σημείο θλίψης (2), το δοκίμιο (3) και δύο γραφήματα για το 1^ο και 2^ο πείραμα, (4) & (5), αντίστοιχα.



Ο γρανίτης εκτός από τη μεγάλη σκληρότητα και αντοχή σε θλίψεις, διαθέτει και μεγάλη επιφανειακή σκληρότητα, η οποία είναι περίπου τρεις φορές μεγαλύτερη από τους υπόλοιπους λίθους και επομένως χρειάζεται πολύ μεγαλύτερο φορτίο, από τα 1000 Newton, για να θραυτεί.



17. Αξιοποίηση αποτελεσμάτων

Από την περάτωση των πειραματικών διαδικασιών θλίψης του έξυπνου εργαλείου σε δοκίμια λίθων διαπιστώνεται η ικανοποιητική λειτουργία του, αφού είναι σε θέση να μετρήσει και να καταγράψει τα φαινόμενα θραύσης που παρουσιάστηκαν, αλλά και να παρακολουθεί τις μεταβολές του φορτίου που ασκούσε η μηχανή θλίψης – εφελκυσμού. Βέβαια η κρουστική λάξευση απαρτίζεται και από άλλα φαινόμενα, όπως τα κρουστικά, εφόσον όμως το έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης είναι σε θέση να αντιληφθεί τα φαινόμενα θραύσης στο λίθο, επομένως μπορεί να μετρήσει και να καταγράψει και τα κρουστικά φαινόμενα.

Επίσης, τα πειράματα αυτά έδειξαν και κάποιες δυσλειτουργίες του έξυπνου εργαλείου που χρήζουν βελτίωσης, όπως το πρόβλημα με τη συνεχή αύξηση της απόκλισης στη μέτρηση (offset) στην τιμή της δύναμης που μετράει η μονάδα DCell, στην οποία χρησιμοποιήθηκε μια στρατηγική γρήγορης βαθμονόμησης (βλ. κεφάλαιο 15.4).

Με την ολοκλήρωση αυτών των πειραμάτων και από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, τα όποια επιβεβαίωσαν την καλή λειτουργία του έξυπνου εργαλείου, μπορούν πλέον να σχεδιαστούν και να πραγματοποιηθούν πειράματα για τη καθ' εαυτού διαδικασία κρουστικής λάξευσης. Τα πειράματα αυτά μπορεί να είναι κατεργασίες κρούσης του έξυπνου εργαλείου σε λίθο, από τον γλύπτη, σε διάφορα στάδια της διαδικασίας κρουστικής λάξευσης, προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά, η χρηστικότητα και η εργονομία του έξυπνου εργαλείου αλλά και μέσω αυτών να προσδιοριστούν πιθανά μεγέθη που την απαρτίζουν.



18. Σχόλια, Συμπεράσματα και Προτάσεις για μελλοντική εξέλιξη

Ο σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η διασύνδεση των ηλεκτρονικών διατάξεων καθώς και η ανάπτυξη του κατάλληλου υλικολογισμικού που θα επιτυγχάνει τη βέλτιστη λειτουργία αυτών, για να ενσωματωθούν στο έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης. Βάσει των ηλεκτρονικών διατάξεων του, το έξυπνο εργαλείο επιτυγχάνει τη συλλογή και καταγραφή δεδομένων, κατά τις κατεργασίες σε λίθους που χρησιμοποιούνται στη γλυπτική τέχνη.

Από τη μία, το έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης (η βελτιστοποιημένη έκδοση, βλ. κεφάλαιο 7.4), το οποίο αναπτύχθηκε, πληροί σε ικανοποιητικό βαθμό, όλες τις προδιαγραφές σχεδίασης του (βλ. κεφάλαιο 6). Όπως τεκμηριώθηκε από τις πειραματικές διαδικασίες που πραγματοποιήθηκαν (βλ. κεφάλαιο 15 και κεφάλαιο 16), το έξυπνο εργαλείο είναι σε θέση να μετρήσει, να αποστείλει και να καταγράψει τη δύναμη σε ικανοποιητικό βαθμό παρακολούθησης, καθώς επίσης και τον προσανατολισμό, τις εσωτερικές θερμοκρασίες και το διάνυσμα των γραμμικών επιταχύνσεων, που αναπτύσσει κατά τη λειτουργία του.

Από την άλλη, οι πειραματικές δοκιμές θλίψης του έξυπνου εργαλείου σε λίθινα δοκίμια (βλ. κεφάλαιο 16) κατέδειξαν την αναμενόμενη συμπεριφορά του κάθε λίθου όταν του ασκηθούν θλιπτικά φορτία. Βέβαια, εκτός από ότι το κάθε είδος λίθου παρουσιάζει διαφορετικά όρια θραύσης, μπορεί ακόμα και λίθοι του ίδιου τύπου, αλλά από διαφορετική περιοχή εξόριξης (π.χ. τα είδη μαρμάρου που χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές αυτές, Νάξου, Νέστου και Μαρμαρά) να παρουσιάζουν διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και όρια θραύσης. Αυτό μπορεί να συμβεί ακόμα και σε δοκίμια που έχουν την ίδια περιοχή προέλευσης αλλά από διαφορετικό σημείο του συνολικού αποθέματος του λίθου ή ακόμα και σε διαφορετικό σημείο θλίψης στο ίδιο δοκίμιο (π.χ. όπως στο δοκίμιο του μαρμάρου Μαρμαρά, βλ. κεφάλαιο 16.4, στην εικόνα 16.5, 1^ο και 2^ο πείραμα, στα γραφήματα των σχημάτων 4 και 5, αντίστοιχα). Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη σύνθεση των υλικών που απαρτίζεται ο κάθε λίθος.

Πέραν του ότι η λειτουργία του έξυπνου εργαλείου επιβεβαιώθηκε να κυμαίνεται σε ικανοποιητικά επίπεδα, βάσει των προδιαγραφών σχεδίασής του, χρήζει όμως περαιτέρω εξέλιξης. Αρχικά, θα πρέπει να διερευνηθεί, με σκοπό να διορθωθεί, το πρόβλημα με τη συνεχή αύξηση της απόκλισης στη μέτρηση (offset) των strain gauges (βλ. κεφάλαιο 15.4). Η στρατηγική γρήγορης βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε να μην επιλύει το εν λόγω πρόβλημα προσωρινά, αλλά σε βάθος χρόνου μπορεί να διογκωθεί σημαντικά και να απαιτεί την τοποθέτηση νέων strain gauges.

Μια μελλοντική εξέλιξη που αφορά την επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγει το έξυπνο εργαλείο είναι ο υπολογισμός της θέσης του στο χώρο και όχι μόνο του προσανατολισμού του, ο οποίος υπολογίζεται με ικανοποιητική ακρίβεια, έως τώρα. Αυτός ο υπολογισμός της θέσης την εκάστοτε χρονική στιγμή, θα ήταν ένα εξαιρετικό μέσο για τη χαρτογράφηση της κατεργασίας κρουστικής λάξευσης, για την οποία έχει κατασκευαστεί το έξυπνο εργαλείο.

Ο υπολογισμός της θέσης βάσει των αισθητήριων διατάξεων που διαθέτει το έξυπνο εργαλείο, θεωρητικά μπορεί να πραγματοποιηθεί από τη διπλή ολοκλήρωση του διανύσματος της επιτάχυνσης. Στην πράξη όμως, ο υπολογισμός αυτός είναι ένα πάρα πολύ δύσκολο πρόβλημα, για το λόγο ότι ο θόρυβος που παρουσιάζεται στις μετρήσεις του διανύσματος της επιτάχυνσης, όταν ολοκληρώνεται δύο φορές, τείνει τις τιμές της θέσης εκθετικά προς το άπειρο, καθιστώντας την εύρεση της πραγματικής θέσης μη εφικτή. Κατά τη διάρκεια της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκαν δοκιμές υπολογισμού της θέσης, αλλά λόγω αυτού του προβλήματος δεν έγινε εφικτή η πραγματοποίησή της.



Ακόμα μια μελλοντική εξέλιξη του έξυπνου εργαλείου, αφορά τη μείωση της φυσικής του διάστασης, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της χρηστικότητας και της εργονομίας του. Αν και οι τωρινές διαστάσεις του είναι σε ικανοποιητικό επίπεδο εργονομίας, ένα έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης με κυρίως μικρότερη διατομή θα επιτύγχανε μέγιστη εργονομία. Η μείωση των διαστάσεων του έξυπνου εργαλείου, προϋποθέτει οι διαστάσεις των ηλεκτρονικών διατάξεων που ενσωματώνονται να μειωθούν, κατά την επιλογή τους όμως επιλέχθηκαν οι μικρότερες σε διάσταση που υπάρχουν στο εμπόριο. Επομένως, όλες αυτές οι ηλεκτρονικές διατάξεις θα πρέπει να ενσωματωθούν σε μία μόνο πλακέτα που συνολικά θα καταλαμβάνει μικρότερο όγκο στο εσωτερικό χώρο του έξυπνου εργαλείου, το οποίο συνεπάγεται και τη μείωση των εξωτερικών διαστάσεων του.

Η επίτευξη μικρότερου κύκλου προγράμματος είναι μια ακόμα μελλοντική εξέλιξη του έξυπνου εργαλείου, ώστε να επιτυγχάνεται ακόμα καλύτερη μέτρηση στα κρουστικά φαινόμενα. Ο τωρινός κύκλος προγράμματος του ανέρχεται στα 25 mSec και όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 16, ήταν αρκετός για να καταγράψει τα φαινόμενα θραύσης των λίθινων δοκιμίων, είτε αυτά ήταν στιγμιαία, είτε διέθεταν μια χρονική διάρκεια.

Τέλος, μια ακόμα εξέλιξη στο έξυπνο εργαλείο είναι η ανάπτυξη κώδικα ειδικής λειτουργίας στο υλικολογισμικό του, η οποία θα επιτυγχάνει τη διασύνδεση του με εργαλειομηχανή αριθμητικού ελέγχου, προκειμένου να χρησιμοποιηθεί σε αυτοματοποιημένες κατεργασίες κρουστικής λάξευσης.

Επιπροσθέτως, η συνολική ανάπτυξη ενός καινοτόμου αντικειμένου, όπως το έξυπνο εργαλείο κρουστικής λάξευσης απαιτεί να πραγματοποιηθεί με βάσει τα πρότυπα σχεδιασμού και ανάπτυξης βιομηχανικών προϊόντων, που ορίζει ο ΟΒΙ (Οργανισμός Βιομηχανικής Ιδιοκτησίας), προκειμένου να αναγνωριστεί ως εφεύρεση μέσω διπλώματος ευρεσιτεχνίας, το οποίο και επιτεύχθηκε.



Βιβλιογραφικές πηγές

Άρθρα

- [A1] Chen, Y., Han, X., Okada, M., Chen, Y. (2007). "Integrative 3D modelling of complex carving surface". *Computer-Aided Design*, vol. 40, Issue 1, pp. 123-132, 2008.
- [A2] Wootton, W., Russell, B., and Rockwell, P. (2013). "Stoneworking tools and toolmarks (version 1.0)", *The Art of making in antiquity: Stoneworking in the Roman world*. <http://www.artofmaking.ac.uk/content/essays/2-stoneworking-tools-and-toolmarks-w-wootton-b-russell-p-rockwell/>. (last accessed on November 30, 2017).
- [A3] Abd El-Tawab, N., Askalany, M. (2011). "Study of durability of alabaster used in the temples of Luxor and Karnak and laboratory evaluation of consolidation treatment". *Egyptian journal of Archaeological and restoration studies*, vol. 1, Issue 2, pp. 15-32, 2011.
- [A4] Horn, B. (1986). "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions". *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 4, No 4, pp. 629-642, 1987.
- [A5] Fresk, E., Nikolakopoulos, G. (2013). "Full quaternion based attitude control for a quadrotor". *European control conference, ECC*, Zurich, Switzerland, 2013.

Βιβλία και διδακτικά συγγράμματα

- [B1] Hölscher, T. (2002). «Κλασική αρχαιολογία: Βασικές γνώσεις» Μτφρ. Π. Παπαγεωργίου, Π. Καρανασάση (επιμ.). Θεσσαλονίκη: University studio press. 2005.
- [B2] Palagia, O. (Ed.). (2006). "Greek Sculpture: Function, materials, and techniques in the archaic and classical periods". New York, NY: Cambridge University press. 2006. p: 243 – 279.
- [B3] Κυριάκου, Ε. «Ψηφιοποίηση μηχανολογικών εξαρτημάτων με χρήση τεχνολογιών τρισδιάστατης σάρωσης». Πτυχιακή εργασία. Τμήμα Μηχανολογίας, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης.
- [B4] Δριβαλά, Μ. «Τρισδιάστατη σάρωση σε ιατρικές εφαρμογές». Πτυχιακή εργασία. Τμήμα Μηχανολογίας, Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης.
- [B5] Σαργέντης, Φ. (2005). «Η χρήση και η συμπεριφορά των υλικών στη γλυπτική». Διδακτορική διατριβή. Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα. σ. 137-141.
- [B6] Κορωνάιος, Α., Πουλάκος, Γ. (2006). «Τεχνικά υλικά τόμος 4». Σχολή Αρχιτεκτόνων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.
- [B7] Παπαθεοδώρου, Κ. (2015). «Γενική και εφαρμοσμένη γεωλογία: Κεφάλαιο 3». Τμήμα Γεωπληροφορικής και Τοπογραφίας, Τ.Ε.Ι. Κεντρικής Μακεδονίας, Σέρρες.
- [B8] Αμπελακιώτου, Θ., Νικολάρου, Π. (2006). «Πέτρινα γεφύρια στον μονό Λακωνίας». Πτυχιακή εργασία. Τμήμα Πολιτικών Δομικών Έργων, Α.Τ.Ε.Ι. Πειραιά.

Ιστοσελίδες

- [I1] "Laocoön and his sons". https://en.wikipedia.org/wiki/Laoco%C3%B6n_and_His_Sons.
- [I2] "Winged victory of Samothrace". https://en.wikipedia.org/wiki/Winged_Victory_of_Samothrace.
- [I3] Tetlow, J. (2017). "Stone Sculpture: Dales Countryside Museum Commission – Carving Progress". <http://www.jennifertetlow.co.uk/sculpture/commissions/dales-countryside-museum-sculpture-commission-aurochs/dales-countryside-museum-commission-carving-progress>.
- [I4] "Stone Sculpture". https://en.wikipedia.org/wiki/Stone_sculpture.
- [I5] Carroll, M. (2016). "The sculpture studio: Types of stone for carving". <http://www.thesculpturestudio.com/typesOfStone.html>.
- [I6] Carroll, M. (2016). "The sculpture studio: How to carve stone". <http://www.thesculpturestudio.com/howToCarveStone.html>.
- [I7] "Pointing machine". https://en.wikipedia.org/wiki/Pointing_machine.
- [I8] Van Velzen, K. "Copying points with a pointing machine". <https://beeldhouwerijblog.nl/punteren-met-een-punteerapparaat/?lang=en>.



- [I9] Coates, P. (2013). "Carving Stone: Indirect techniques". <http://sculpturewiki.com/html/indirect.html>.
- [I10] Williams, S. H. (2010). "Stone sculpture legacy program: Voltaire continued". <https://seanhwilliams.wordpress.com/tag/granite/>.
- [I11] Carroll, M. (2016). "The sculpture studio: Stone carving tools". <http://www.thesculpturestudio.com/stoneTools.html>.
- [I12] Coates, P. (2013). "Carving Stone: Manual carving tools". <http://sculpturewiki.com/html/tools1.html>.
- [I13] Coates, P. (2013). "Carving Stone: Origins". <http://sculpturewiki.com/html/origins.html>.
- [I14] Coates, P. (2013). "Carving Stone: Power tools". <http://sculpturewiki.com/html/tools2.html>.
- [I15] "Cuturi". <http://www.cuturi.com/>.
- [I16] "Trow & Holden". <https://trowandholden.com/>.
- [I17] "Calipers". <https://en.wikipedia.org/wiki/Calipers>.
- [I18] "Ruler". <https://en.wikipedia.org/wiki/Ruler>.
- [I19] Σολδάτος Τ. (επιμ.) «Ορυκτολογία: Πετρογραφικά στοιχεία». <http://www.geo.auth.gr/106/index.htm>. (τελ. ενημ. Ιανουάριο 14, 2016)
- [I20] «Igneous rock». https://en.wikipedia.org/wiki/Igneous_rock.
- [I21] Σολδάτος Τ. (επιμ.) «Ορυκτολογία: Πυριγενή πετρώματα». http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_igneous.htm. (τελ. ενημ. Ιανουάριο 14, 2016)
- [I22] "Granite". <https://en.wikipedia.org/wiki/Granite>.
- [I23] "Sedimentary rock". https://en.wikipedia.org/wiki/Sedimentary_rock.
- [I24] Σολδάτος Τ. (επιμ.) «Ορυκτολογία: Ιζηματογενή πετρώματα». http://www.geo.auth.gr/106/theory/pet_sedimentary.htm. (τελ. ενημ. Ιανουάριο 14, 2016)
- [I25] "Sandstone". <https://en.wikipedia.org/wiki/Sandstone>.
- [I26] "Limestone". <https://en.wikipedia.org/wiki/Limestone>.
- [I27] "Limestone funerary relief". <https://www.metmuseum.org/art/collection/search/252983>
- [I28] "Metamorphic rock". https://en.wikipedia.org/wiki/Metamorphic_rock.
- [I29] Σολδάτος Τ. (επιμ.) «Ορυκτολογία: Μεταμορφωμένα πετρώματα». <http://www.geo.auth.gr/106/index.htm>. (τελ. ενημ. Ιανουάριο 14, 2016)
- [I30] "Marble". <https://en.wikipedia.org/wiki/Marble>.
- [I31] "Parthenon frieze". https://en.wikipedia.org/wiki/Parthenon_Frieze.
- [I32] "Soapstone". <https://en.wikipedia.org/wiki/Soapstone>.
- [I33] "Alabaster". <https://en.wikipedia.org/wiki/Alabaster>.
- [I34] "Canopic jar". https://en.wikipedia.org/wiki/Canopic_jar.
- [I35] "Quaternion". <https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternion>.



Παράρτημα-Α: Σχηματικά διαγράμματα

Στο παράρτημα αυτό παρατίθενται τα σχηματικά διαγράμματα καθώς και τα διαγράμματα για τα PCB των πλακετών που κατασκευάστηκαν. Το πρώτο σκέλος Α.1. αφορά τις πλακέτες που σχεδιάστηκαν και κατασκευάστηκαν για την πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου. Ενώ το Α.2. αφορά τις πλακέτες για την προ τυποποιημένη και τη βελτιστοποιημένη έκδοσή του.

Η σχεδίαση όλων των πλακετών πραγματοποιήθηκε μέσω του περιβάλλοντος σχεδίασης κυκλωμάτων και PCB, που διαθέτει το λογισμικό KiCad.

Α.1. Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρονικών διατάξεων για το πρώιμο έξυπνο εργαλείο

Παρακάτω παρατίθενται τα σχηματικά διαγράμματα της συνδεσμολογίας των ηλεκτρονικών στοιχείων και τα διαγράμματα PCB, για τις επιμέρους ηλεκτρονικές διατάξεις που ενσωματώθηκαν στη πρώτη έκδοση του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης.

Αναλυτικότερα, για τη πλακέτα ενίσχυσης σημάτων, στο παράρτημα Α.1.1. παρουσιάζονται:

- Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Συγκεντρωτικό σχηματικό PCB και για τις δύο όψεις της πλακέτας.
- Σχηματικό PCB για την άνω όψη.
- Σχηματικό PCB για την κάτω όψη.
- Συγκεντρωτικό PCB για εκτύπωση πλακέτας.

Για τη πλακέτα κεντρικής τροφοδοσίας, στο παράρτημα Α.1.2. παρουσιάζονται:

- Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Συγκεντρωτικό σχηματικό PCB και για τις δύο όψεις της πλακέτας.
- Σχηματικό PCB για την άνω όψη.
- Σχηματικό PCB για την κάτω όψη.
- Συγκεντρωτικό PCB για εκτύπωση πλακέτας.

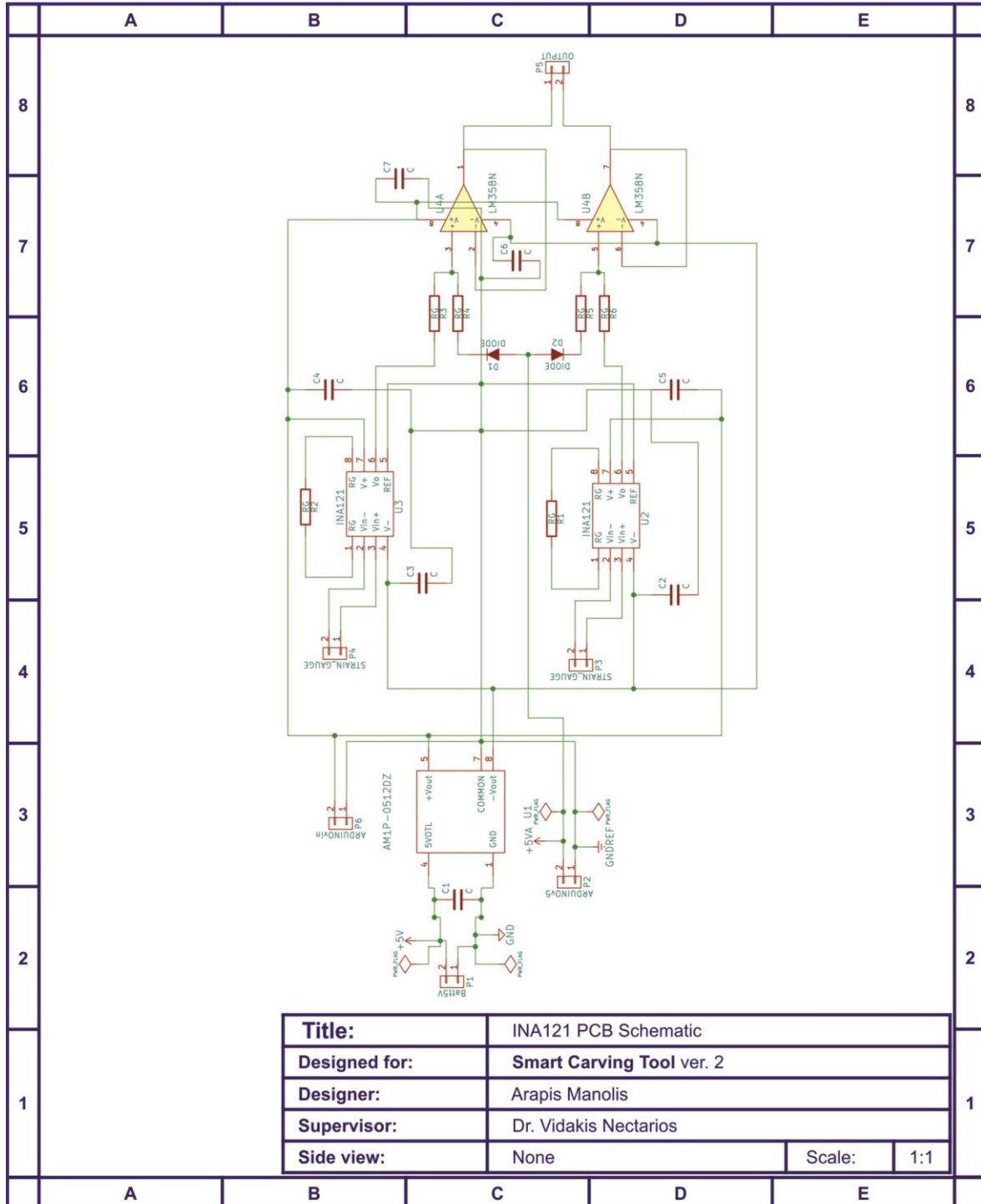
Τέλος, για τη πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB, στο παράρτημα Α.1.3. παρουσιάζονται:

- Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Σχηματικό PCB για την άνω όψη.
- Σχηματικό PCB για εκτύπωση πλακέτας.



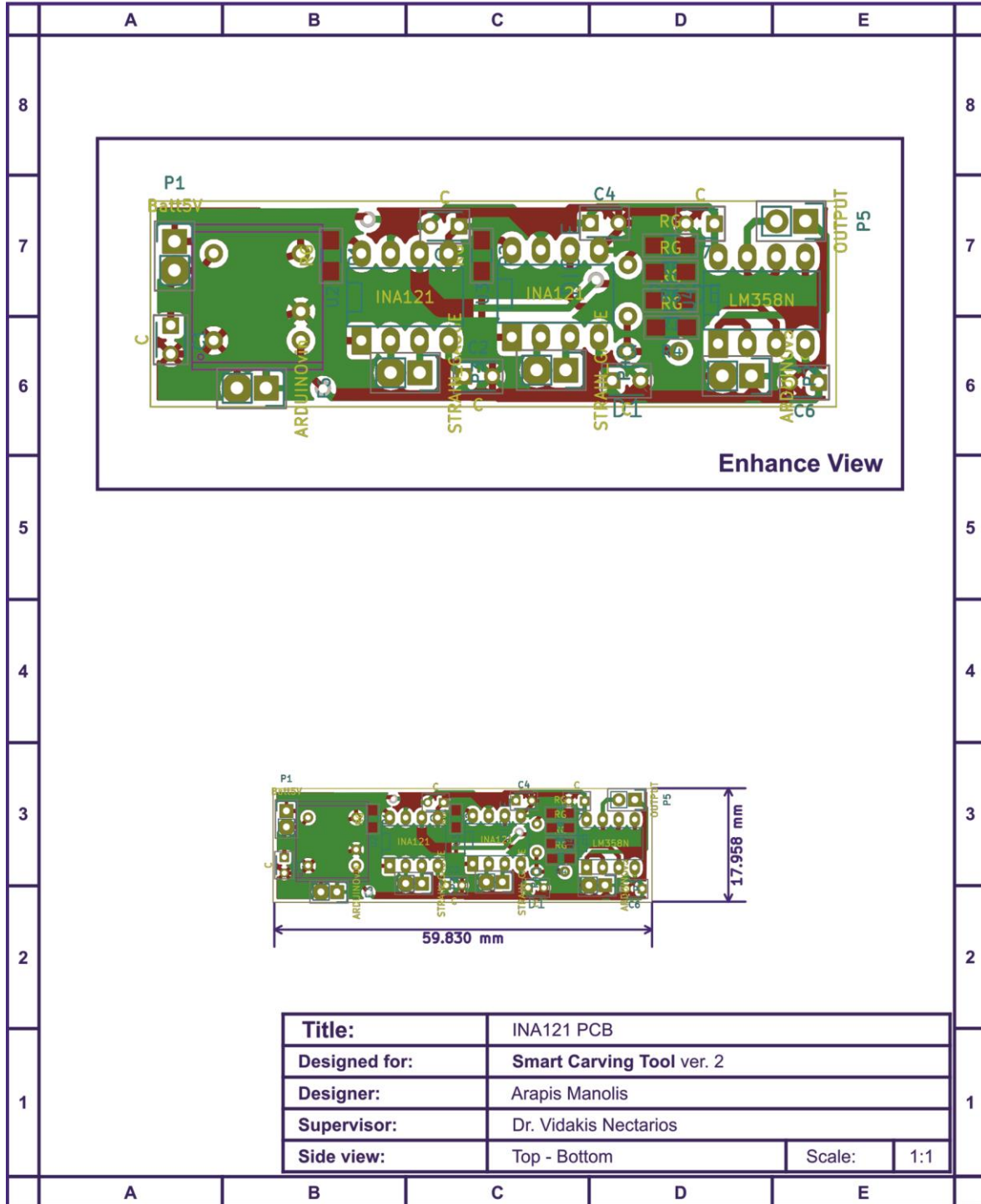
A.1.1. Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας ενίσχυσης σημάτων

Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας ενίσχυσης σημάτων INA121



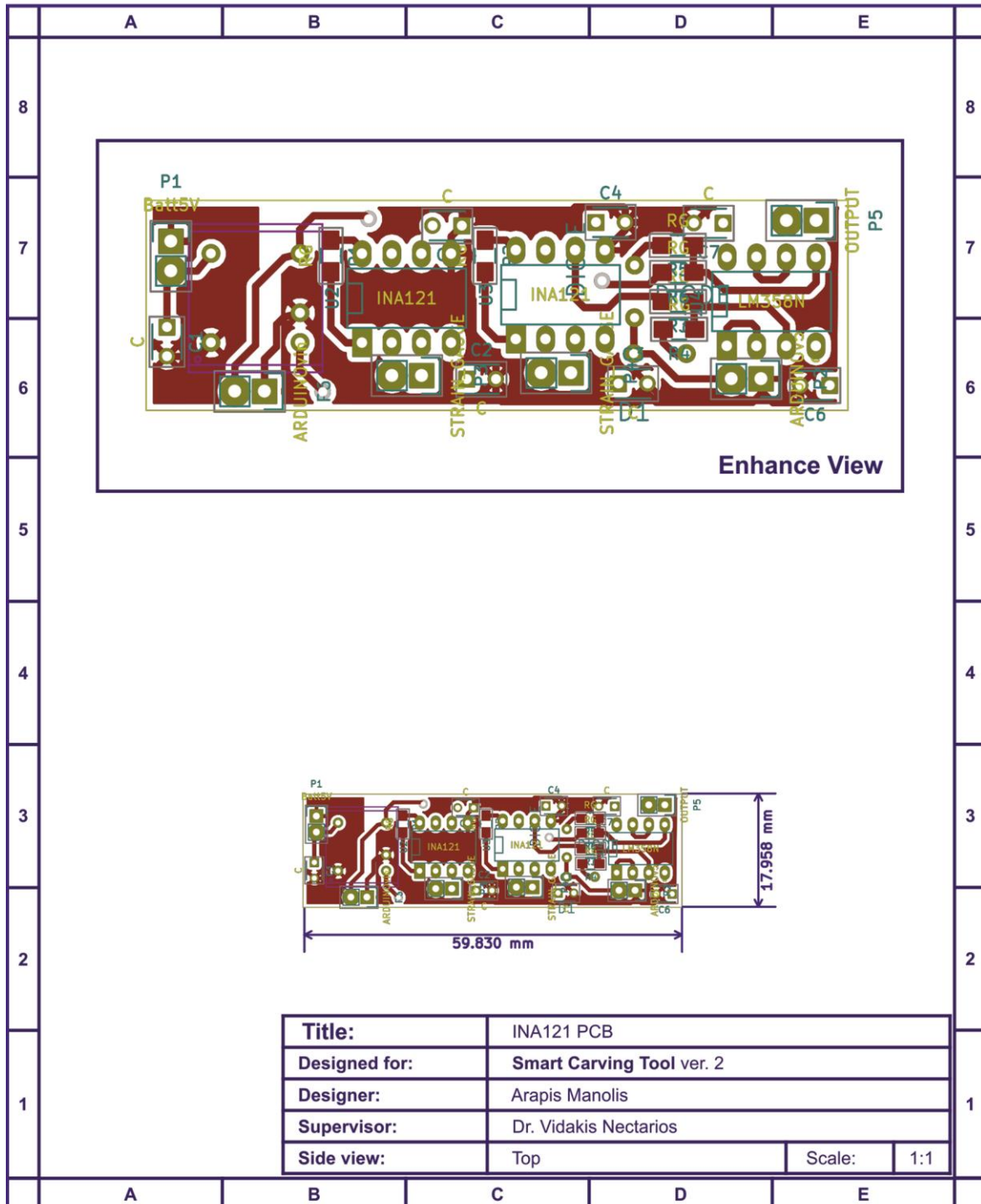


PCB TOP - BOTTOM View πλακέτας ενίσχυσης σημάτων INA121



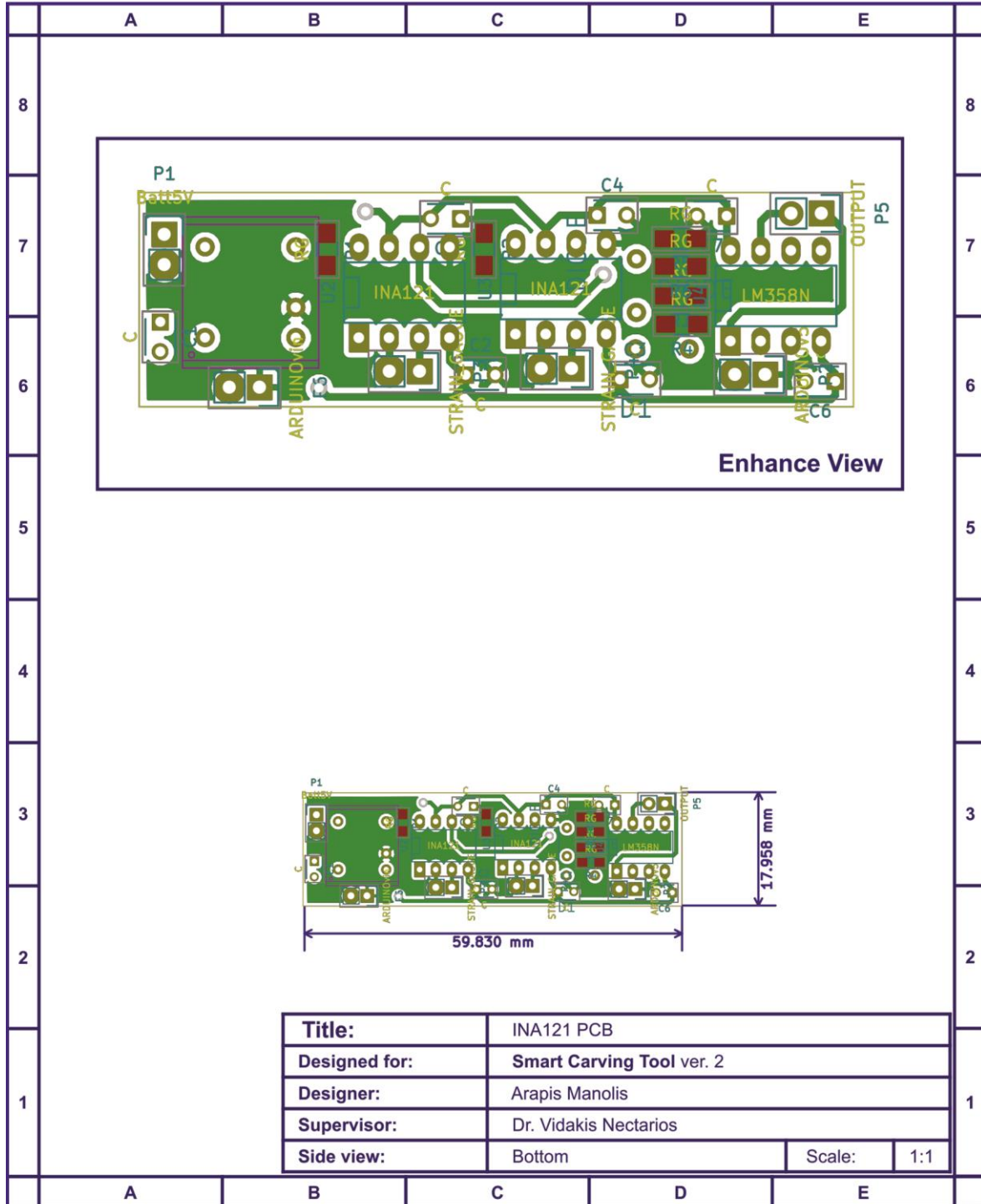


PCB TOP View πλακέτας ενίσχυσης σημάτων INA121



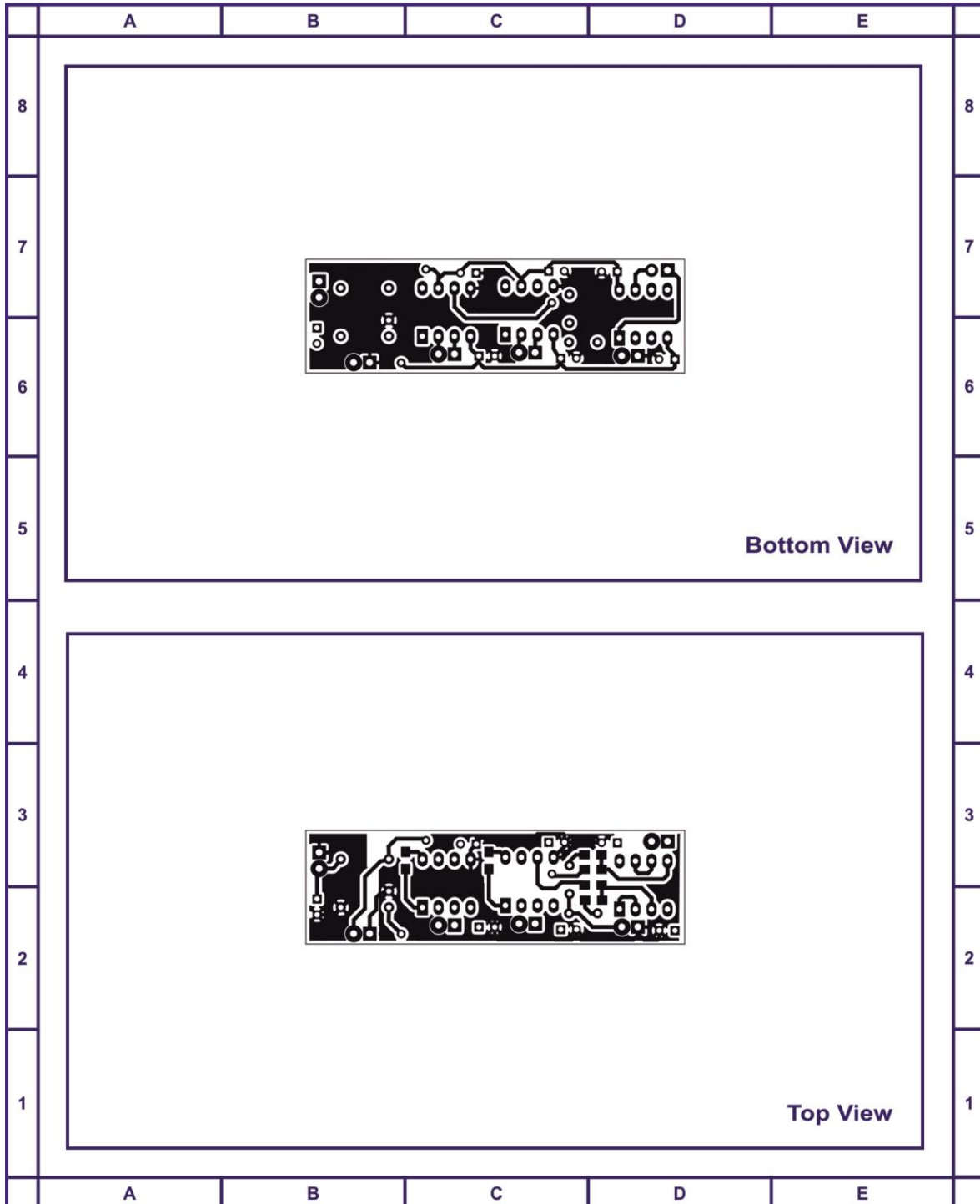


PCB BOTTOM View πλακέτας ενίσχυσης σημάτων INA121





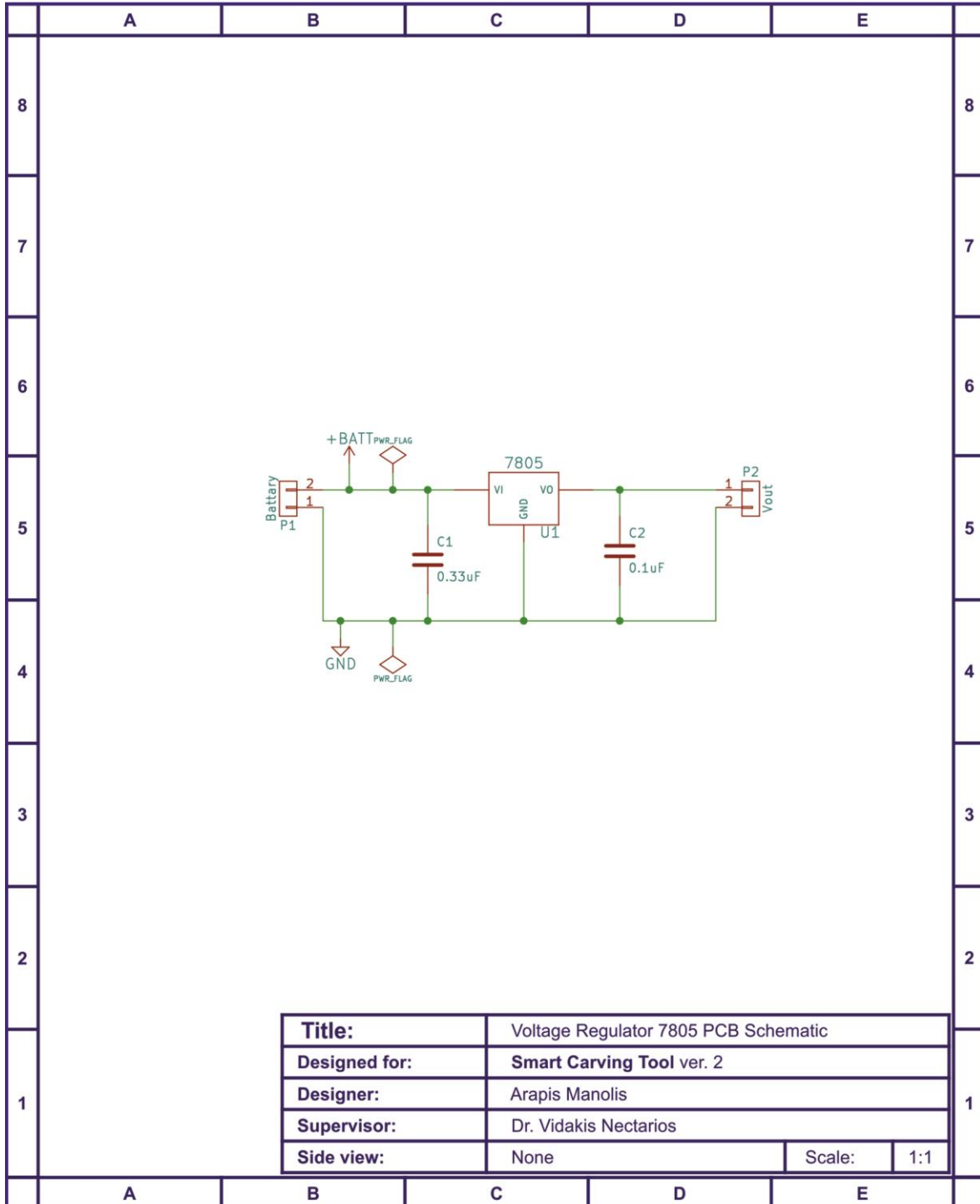
PCB print πλακέτας ενίσχυσης σημάτων INA121





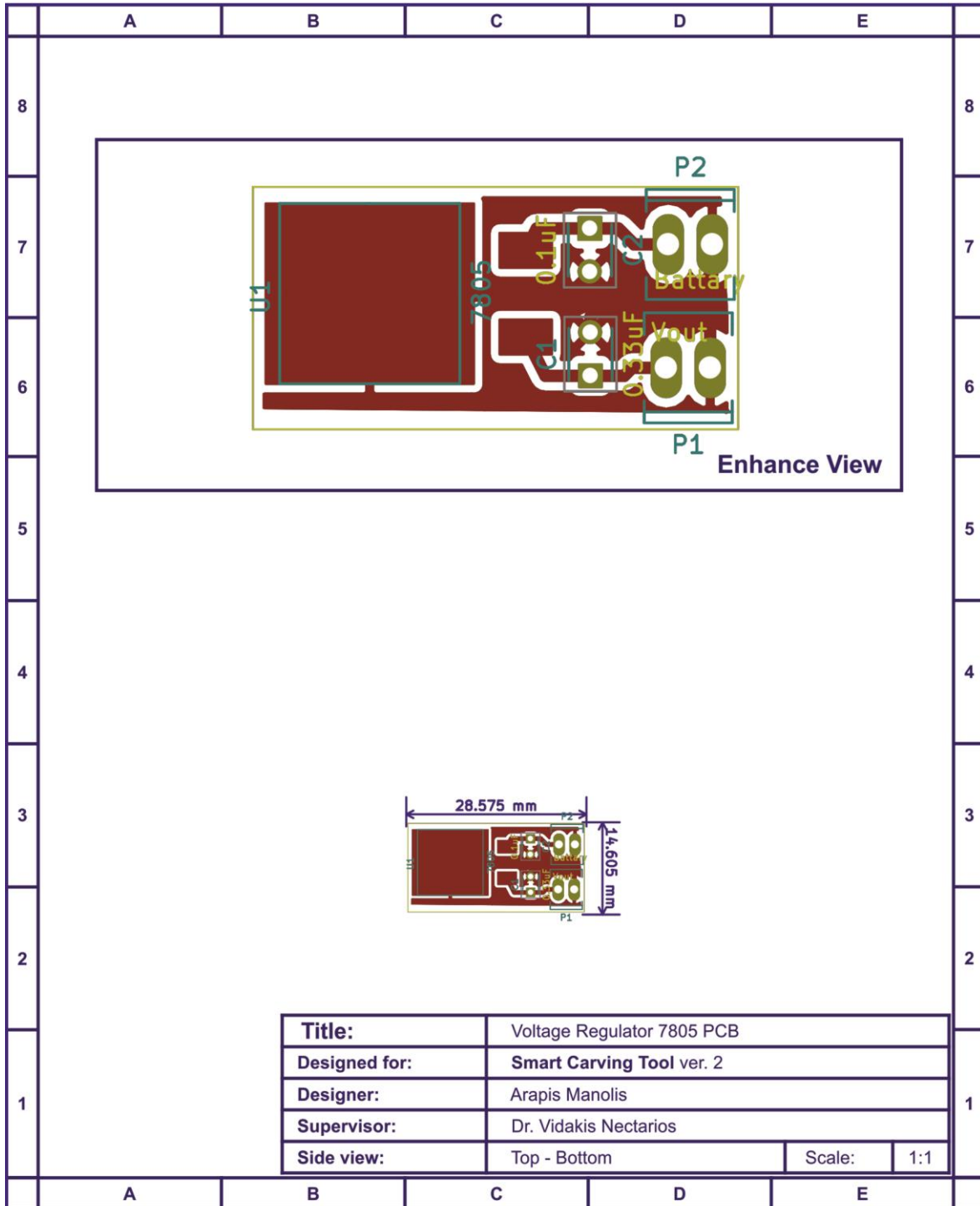
A.1.2. Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας

Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας Voltage regulator 7805



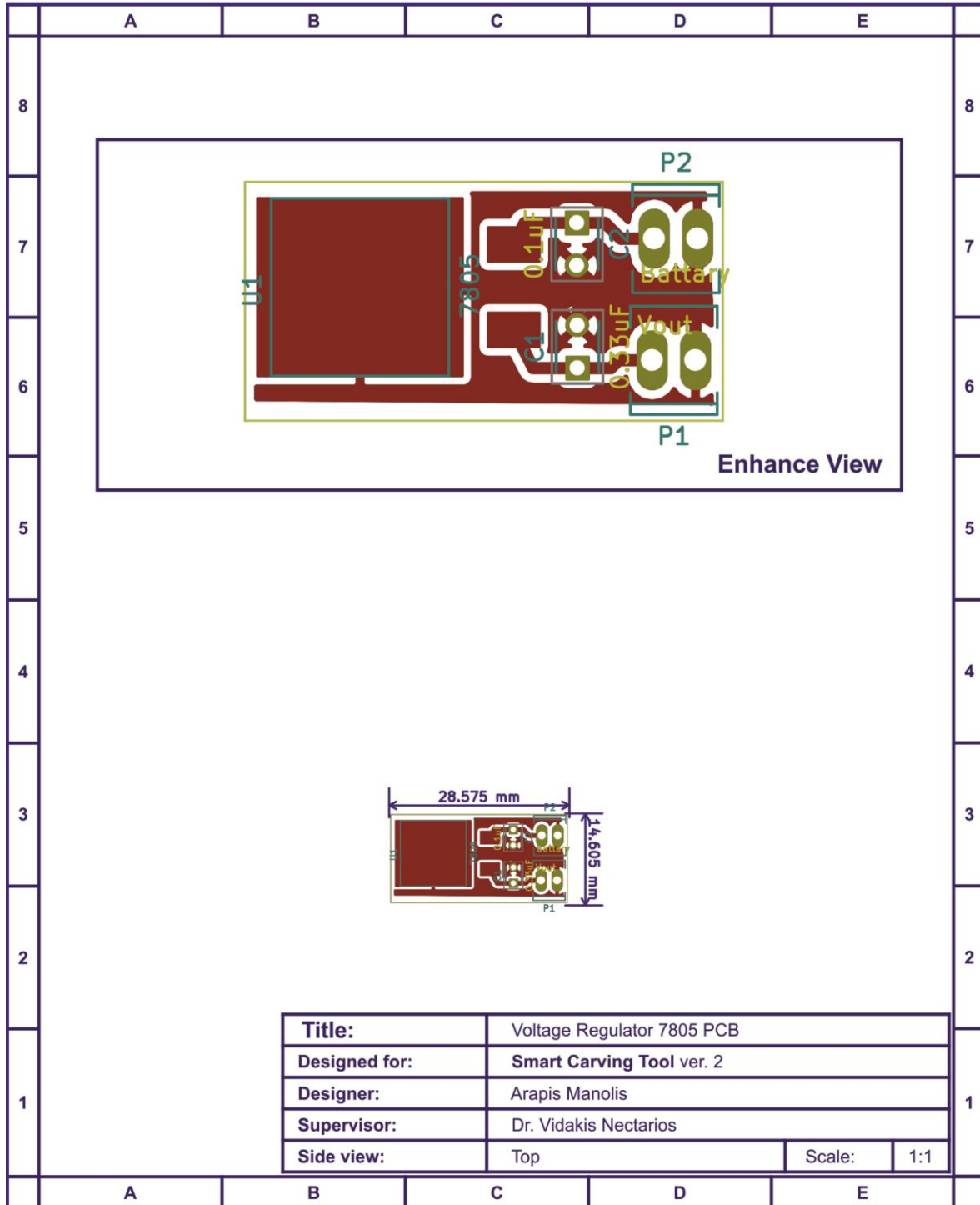


PCB TOP - BOTTOM View πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας Voltage regulator 7805



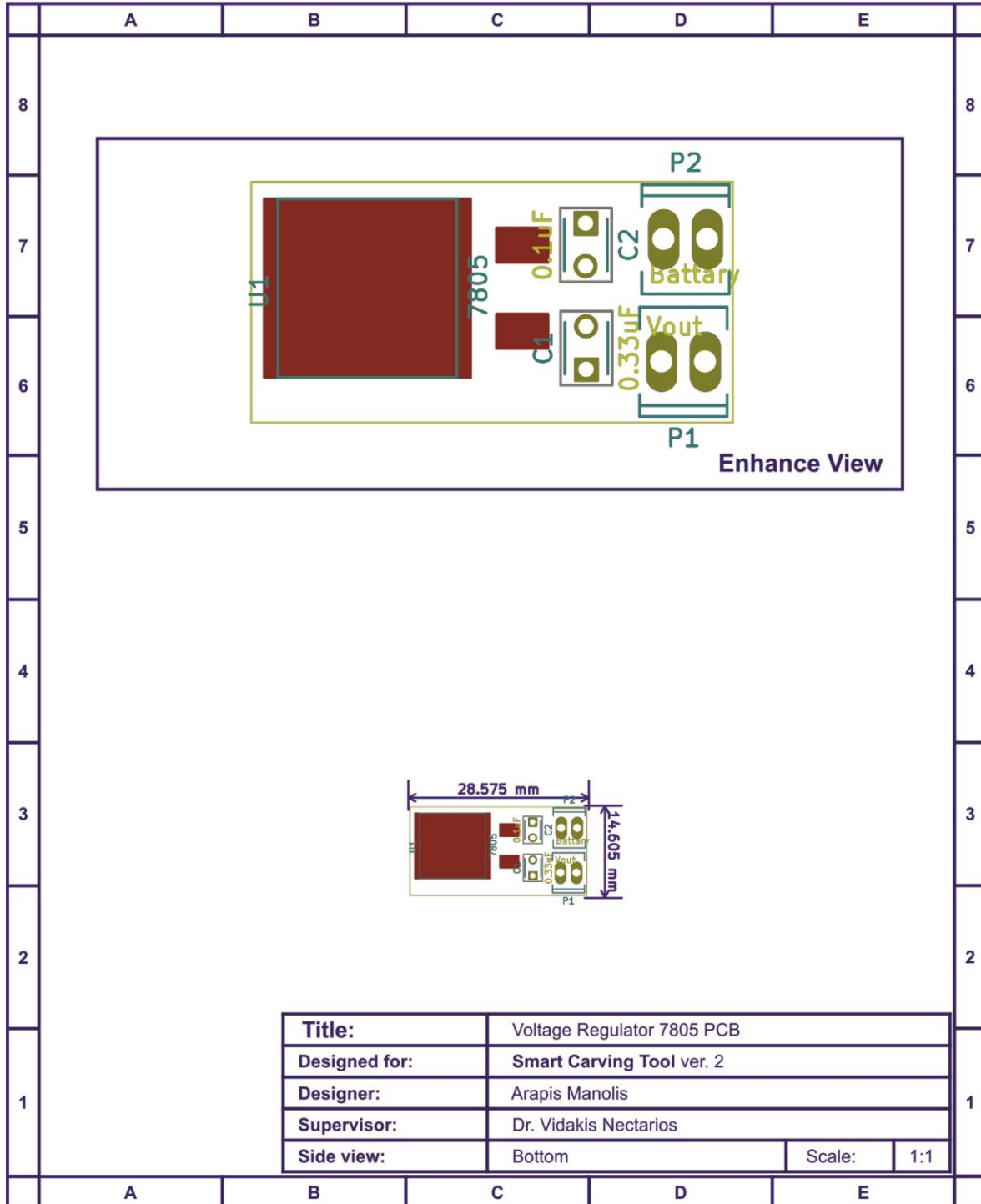


PCB TOP View πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας Voltage regulator 7805



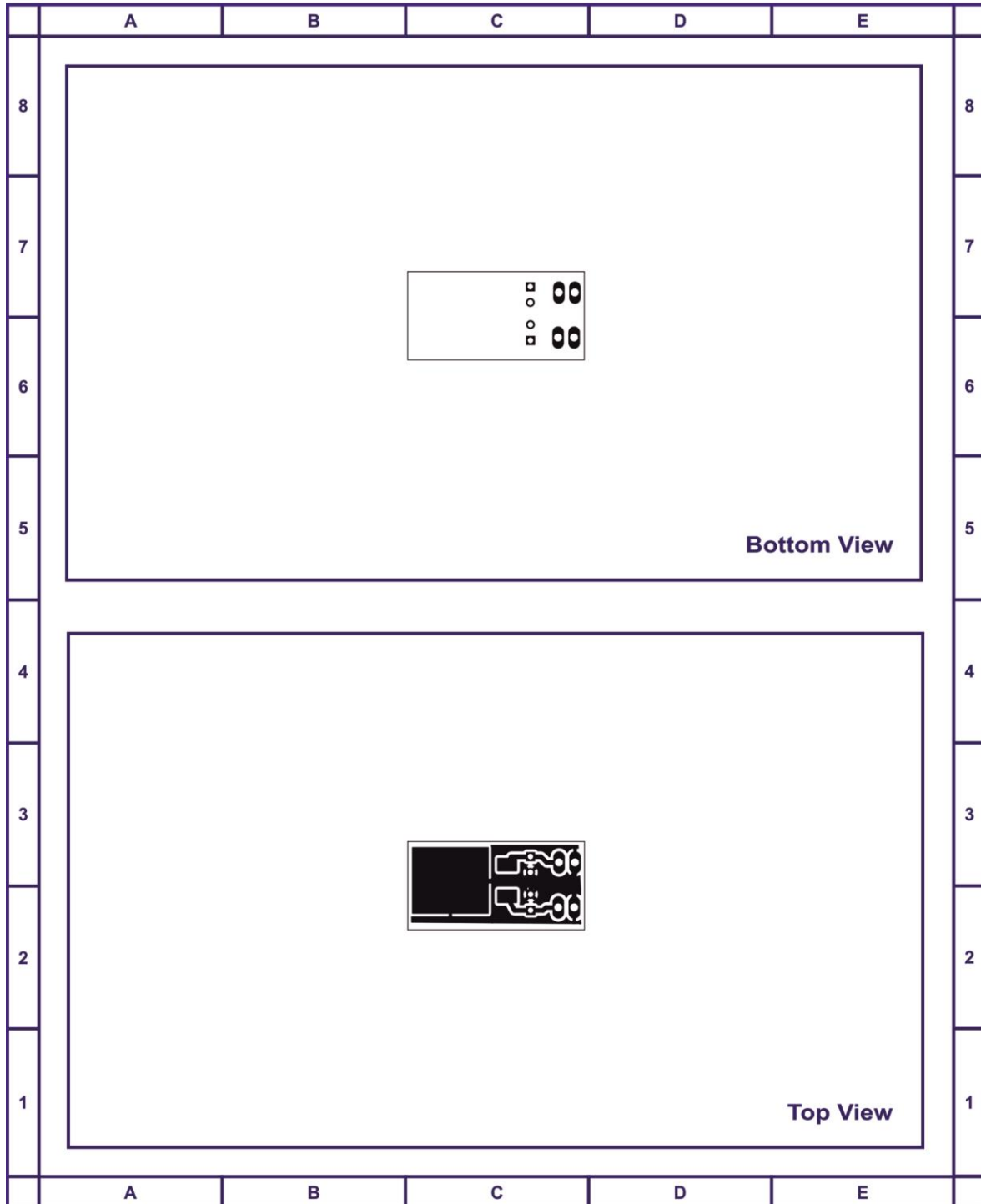


PCB BOTTOM View πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας Voltage regulator 7805





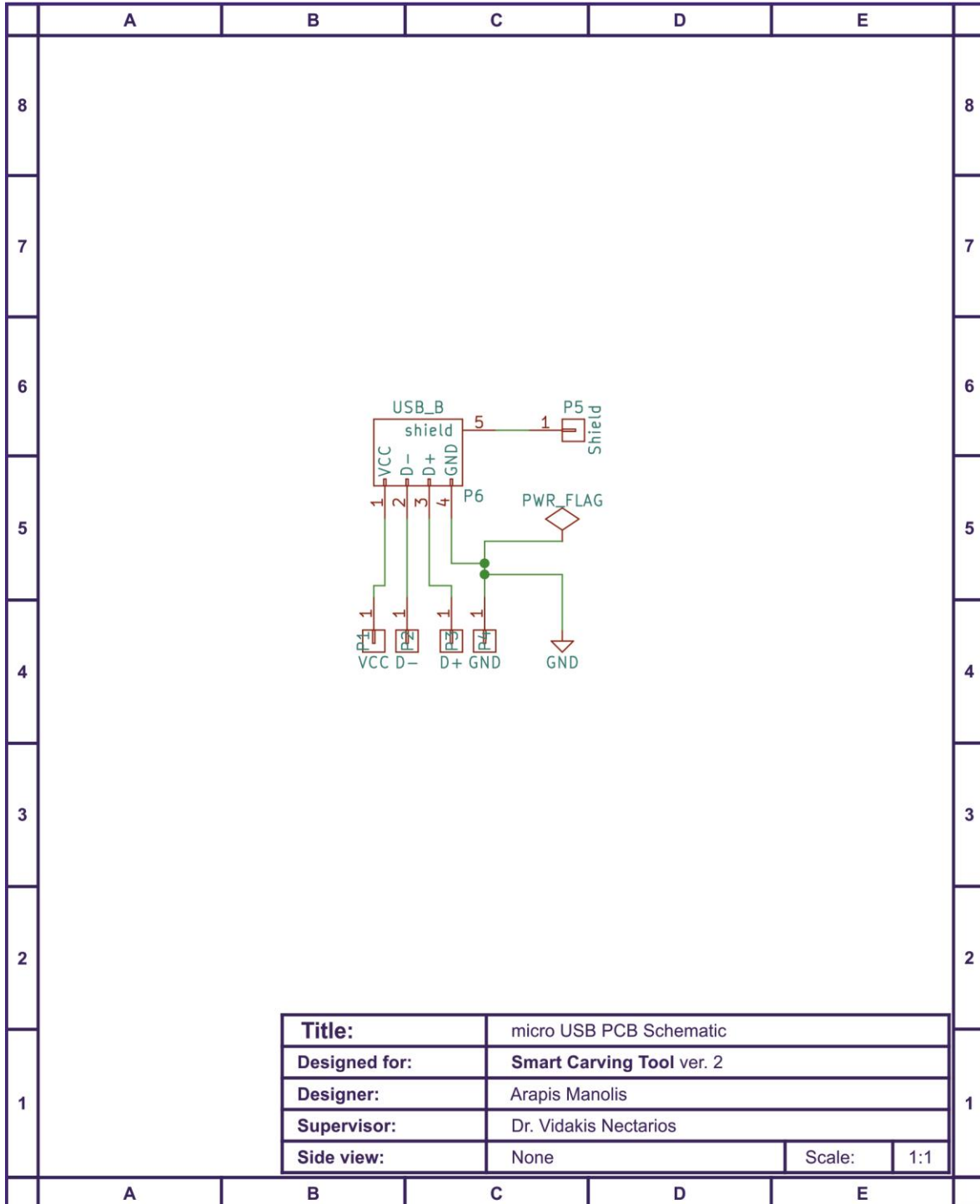
PCB print πλακέτας κεντρικής τροφοδοσίας Voltage regulator 7805





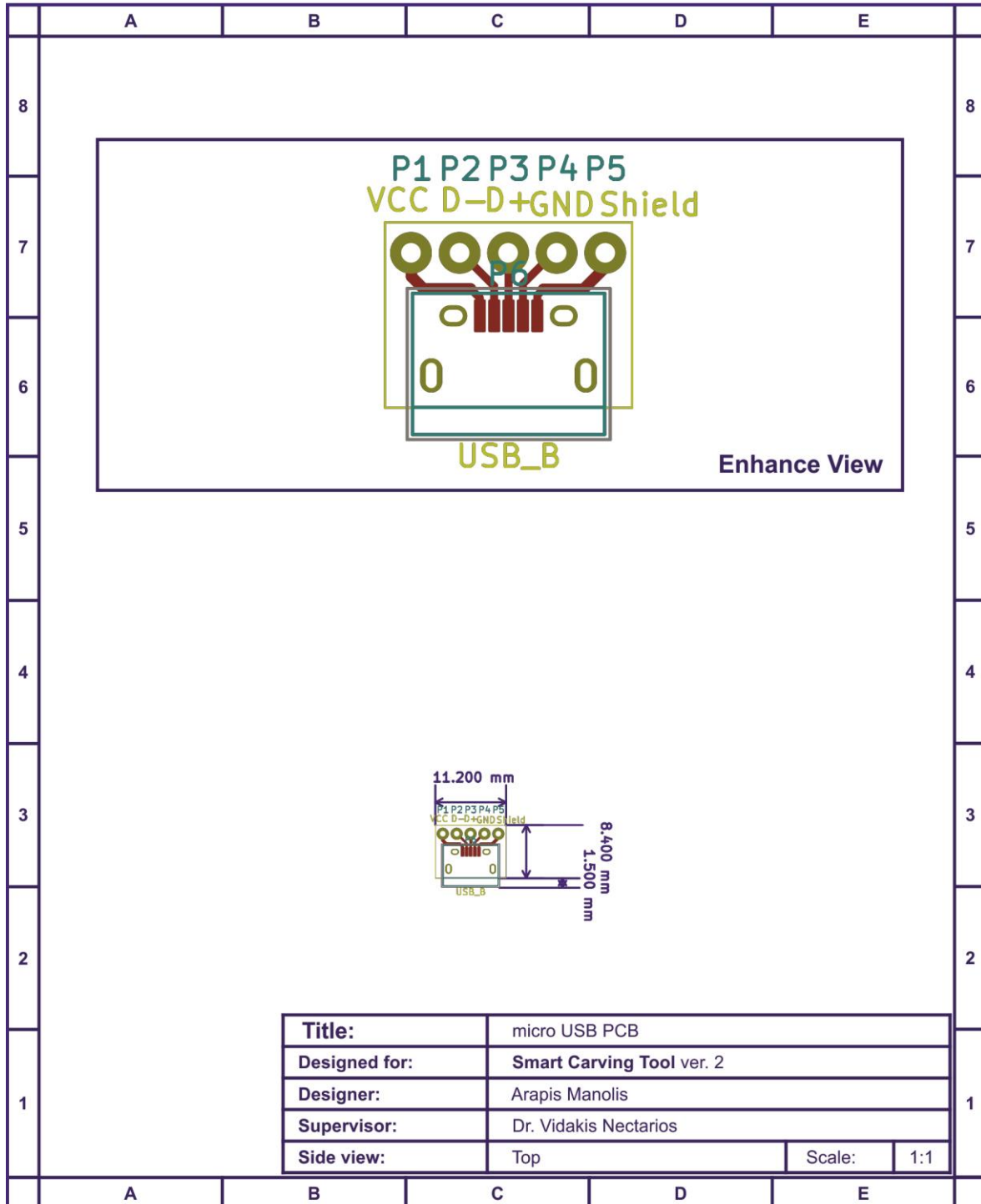
A.1.3. Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας διασύνδεσης micro USB

Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας διασύνδεσης micro USB



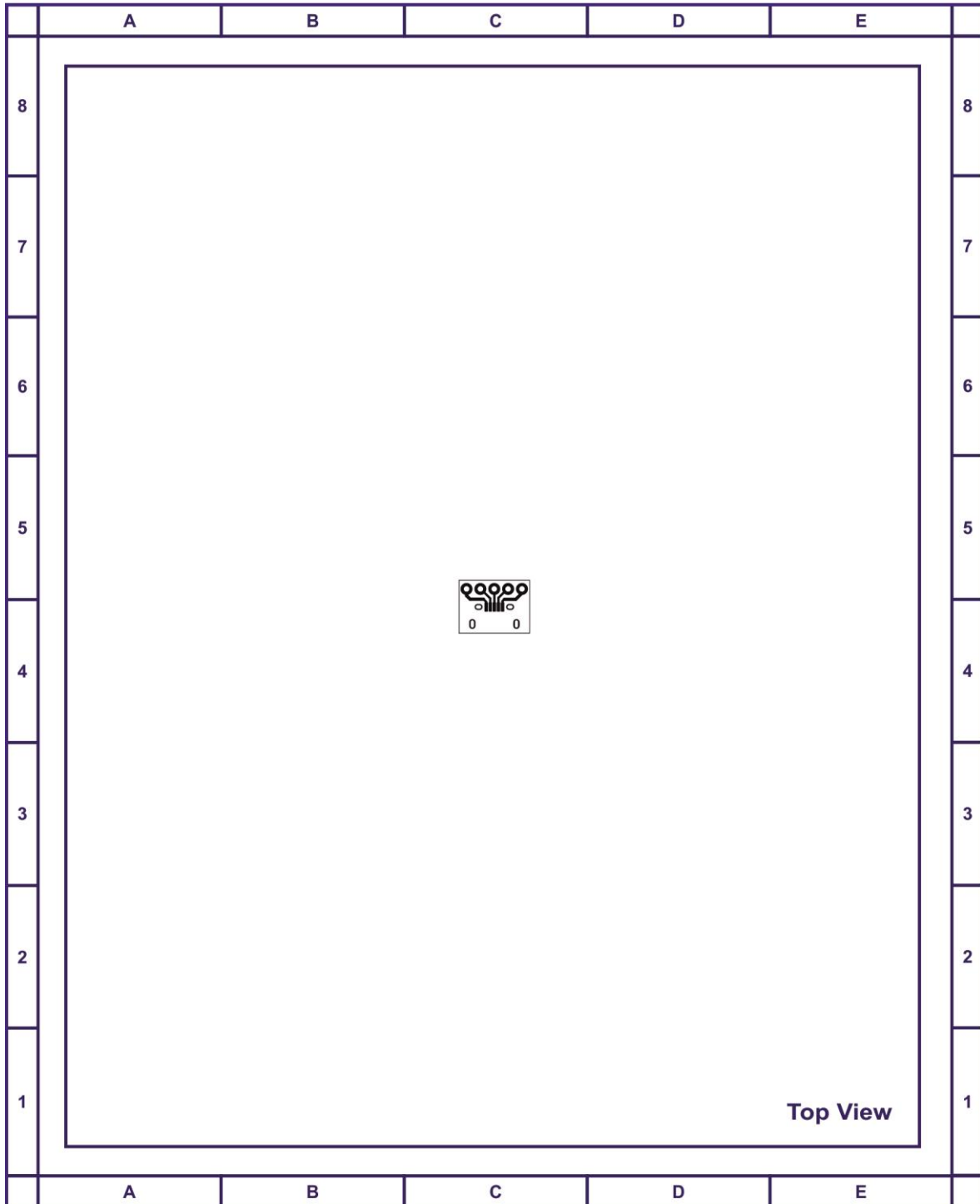


PCB TOP View πλακέτας διασύνδεσης micro USB





PCB print πλακέτας διασύνδεσης micro USB





A.2. Σχηματικά διαγράμματα ηλεκτρονικών διατάξεων για το προ τυποποιημένο και βελτιστοποιημένο έξυπνο εργαλείο

Στο παράρτημα Α.2. παρατίθενται τα σχηματικά διαγράμματα της συνδεσμολογίας των ηλεκτρονικών στοιχείων και τα διαγράμματα PCB, για τις επιμέρους ηλεκτρονικές διατάξεις της προ τυποποιημένης και της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου. Επίσης, η πλακέτα διασύνδεσης τύπου micro USB, της οποίας η σχεδίαση παρουσιάστηκε στο παράρτημα Α.1.3. κατασκευάστηκε σε περισσότερα αντίτυπα, που χρησιμοποιήθηκαν και σε αυτές τις νεότερες εκδόσεις του έξυπνου εργαλείου.

Έτσι, για την πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με τη μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου, στο παράρτημα Α.2.1. παρουσιάζονται:

- Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Συγκεντρωτικό σχηματικό PCB και για τις δύο όψεις της πλακέτας.
- Σχηματικό PCB για την άνω όψη.
- Σχηματικό PCB για την κάτω όψη.
- Συγκεντρωτικό PCB για εκτύπωση πλακέτας.

Για την πλακέτα αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή, στο παράρτημα Α.2.2. παρουσιάζονται:

- Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Σχηματικό PCB για την κάτω όψη.
- Σχηματικό PCB για εκτύπωση πλακέτας.

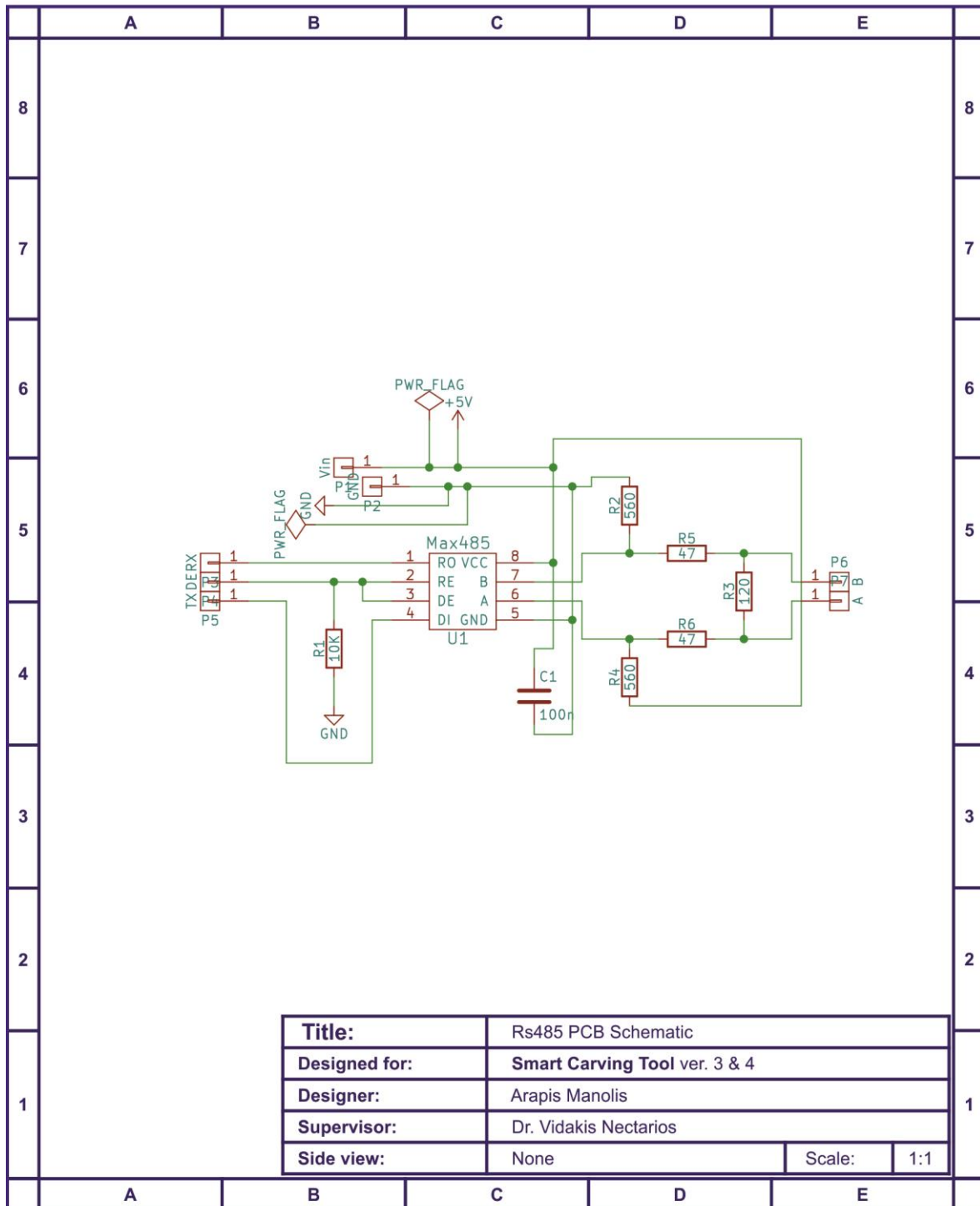
Τέλος, για την πλακέτα εισαγωγής πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης τύπου micro SD, στο παράρτημα Α.2.3. παρουσιάζονται:

- Σχηματικό διάγραμμα συνδεσμολογίας ηλεκτρονικών στοιχείων.
- Συγκεντρωτικό σχηματικό PCB και για τις δύο όψεις της πλακέτας.
- Σχηματικό PCB για την άνω όψη.
- Σχηματικό PCB για την κάτω όψη.
- Συγκεντρωτικό PCB για εκτύπωση πλακέτας.



A.2.1. Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με την μονάδα κεντρικής επεξεργασίας του έξυπνου εργαλείου

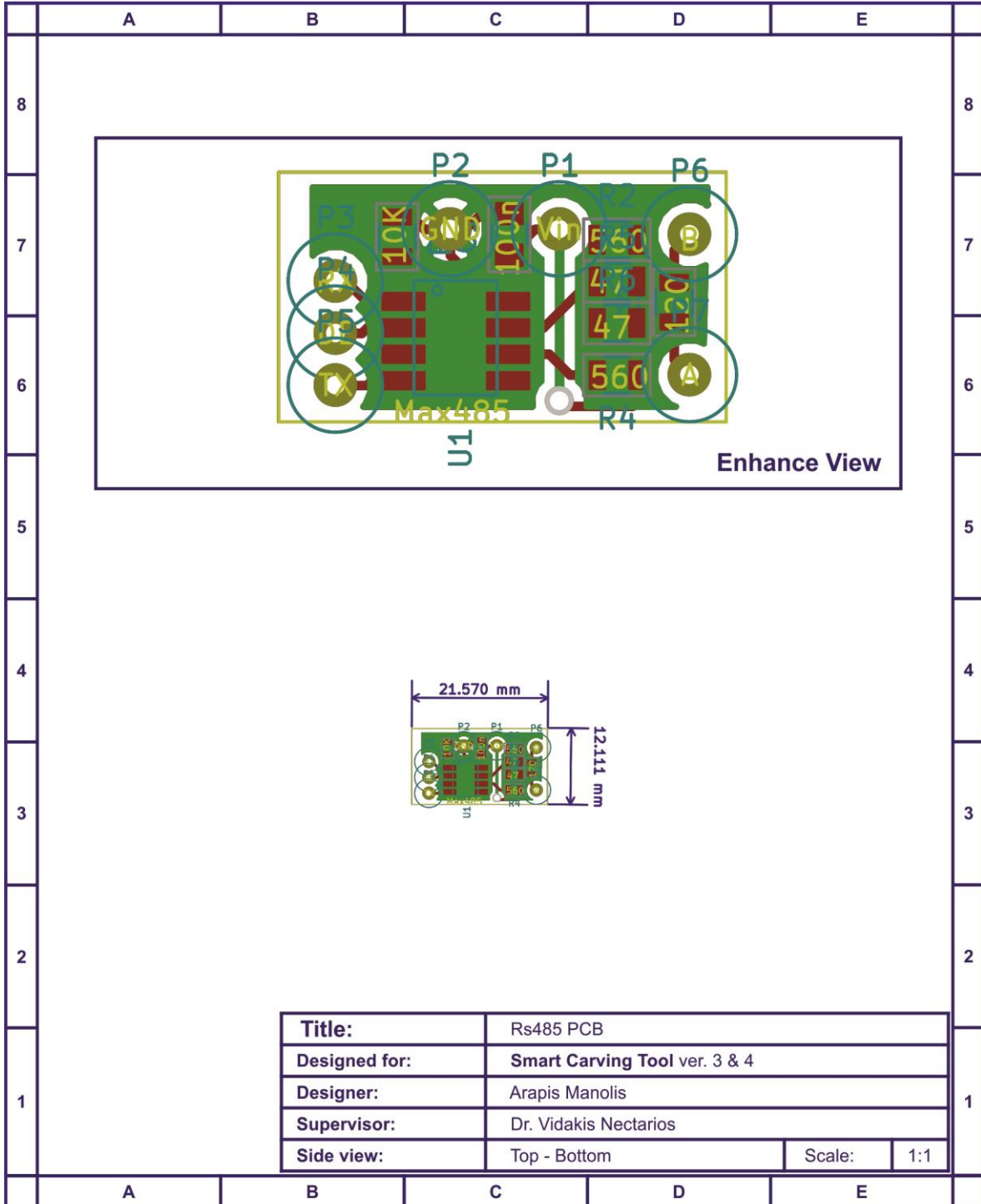
Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs485



Title:	Rs485 PCB Schematic		
Designed for:	Smart Carving Tool ver. 3 & 4		
Designer:	Arapis Manolis		
Supervisor:	Dr. Vidakis Nectarios		
Side view:	None	Scale:	1:1

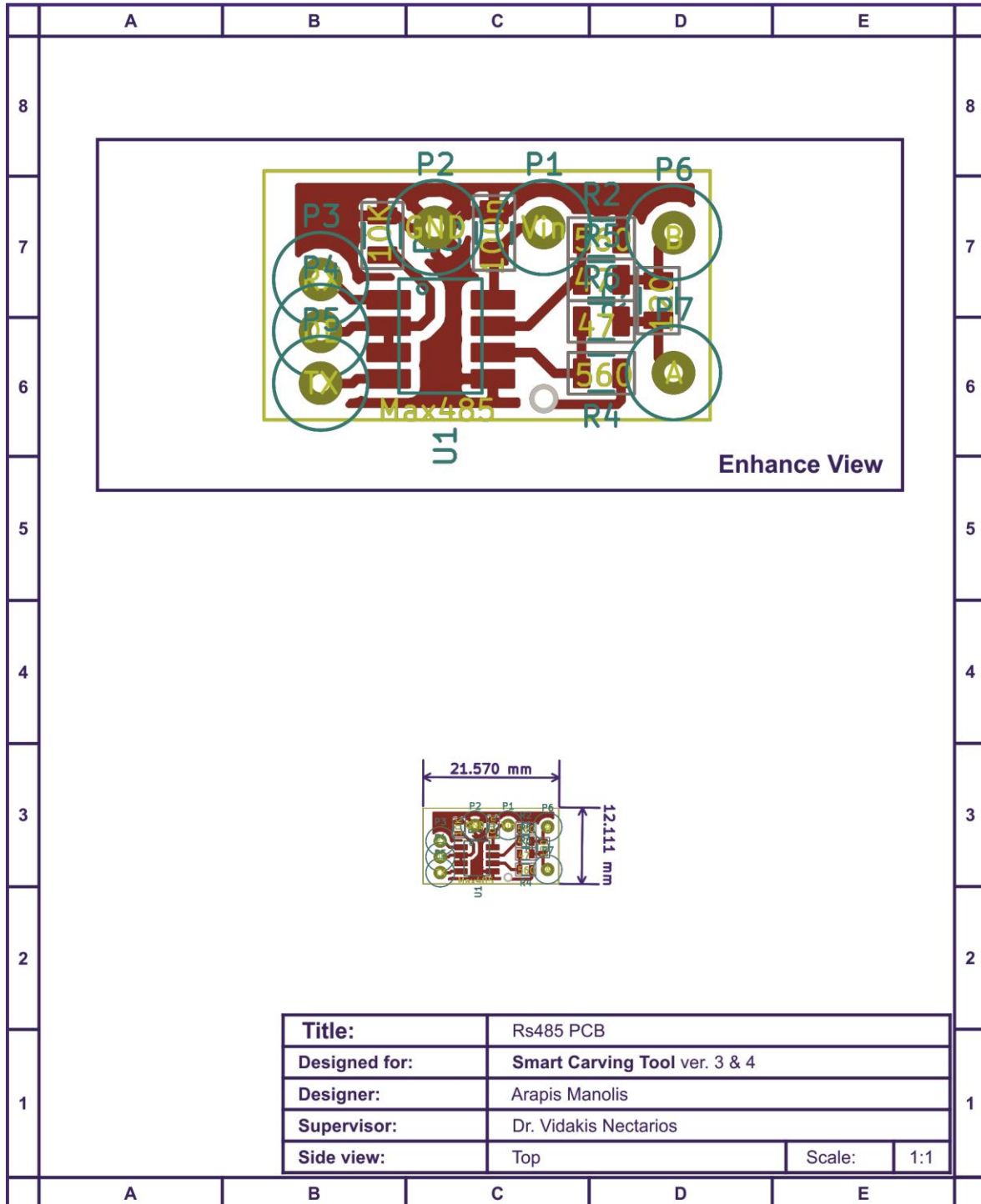


PCB TOP - BOTTOM View πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs485



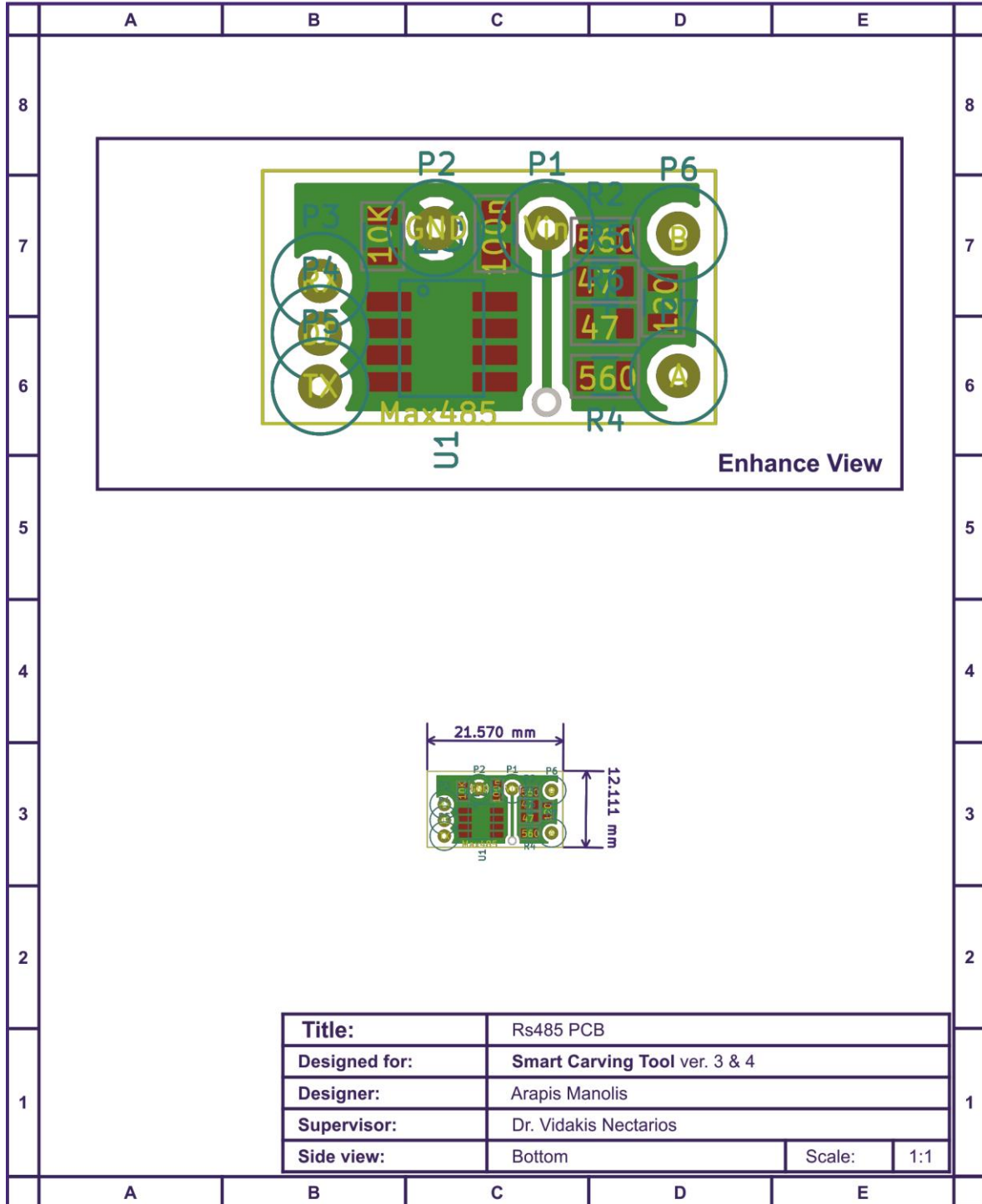


PCB TOP View πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs485



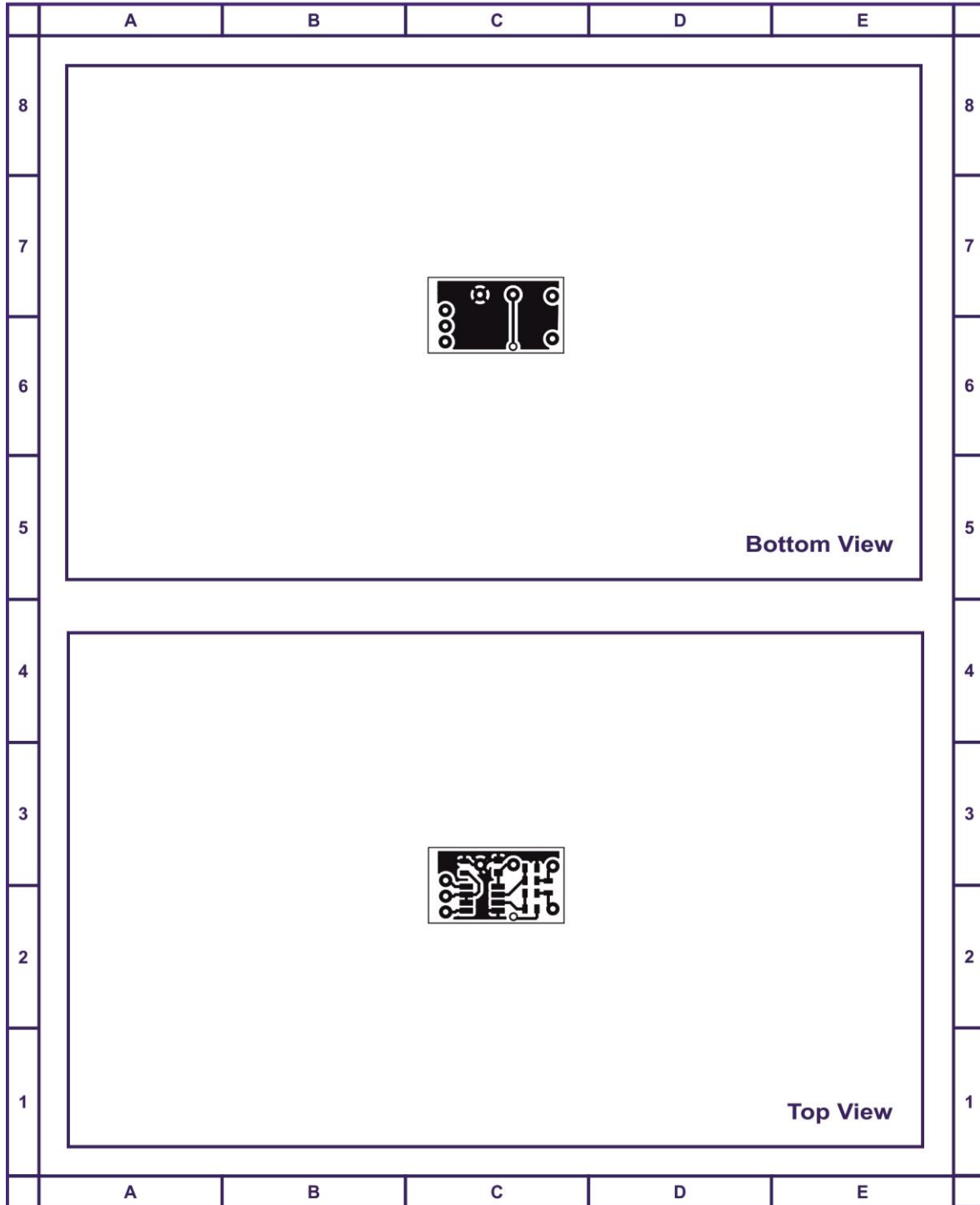


PCB BOTTOM View πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs485





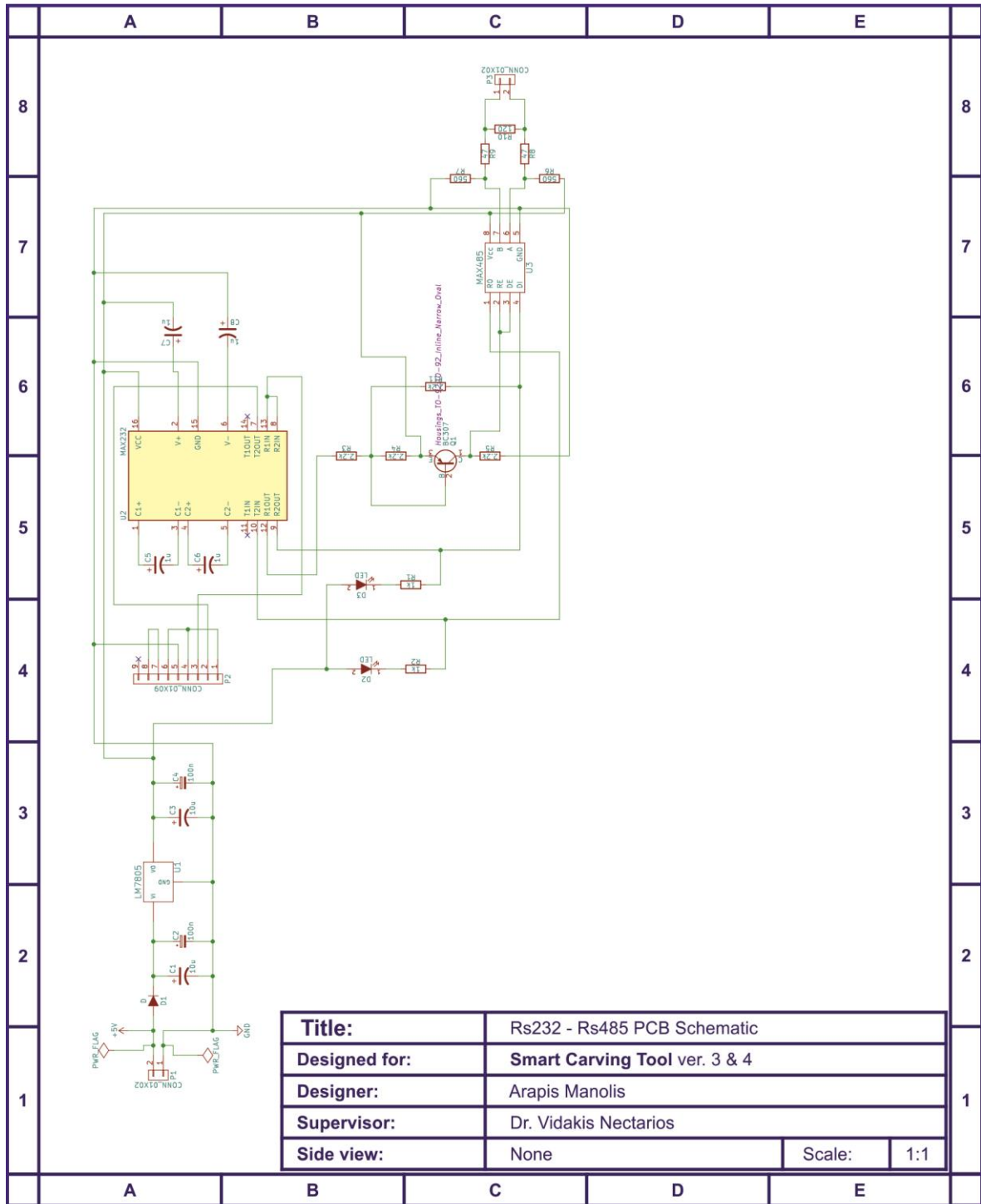
PCB print πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs485





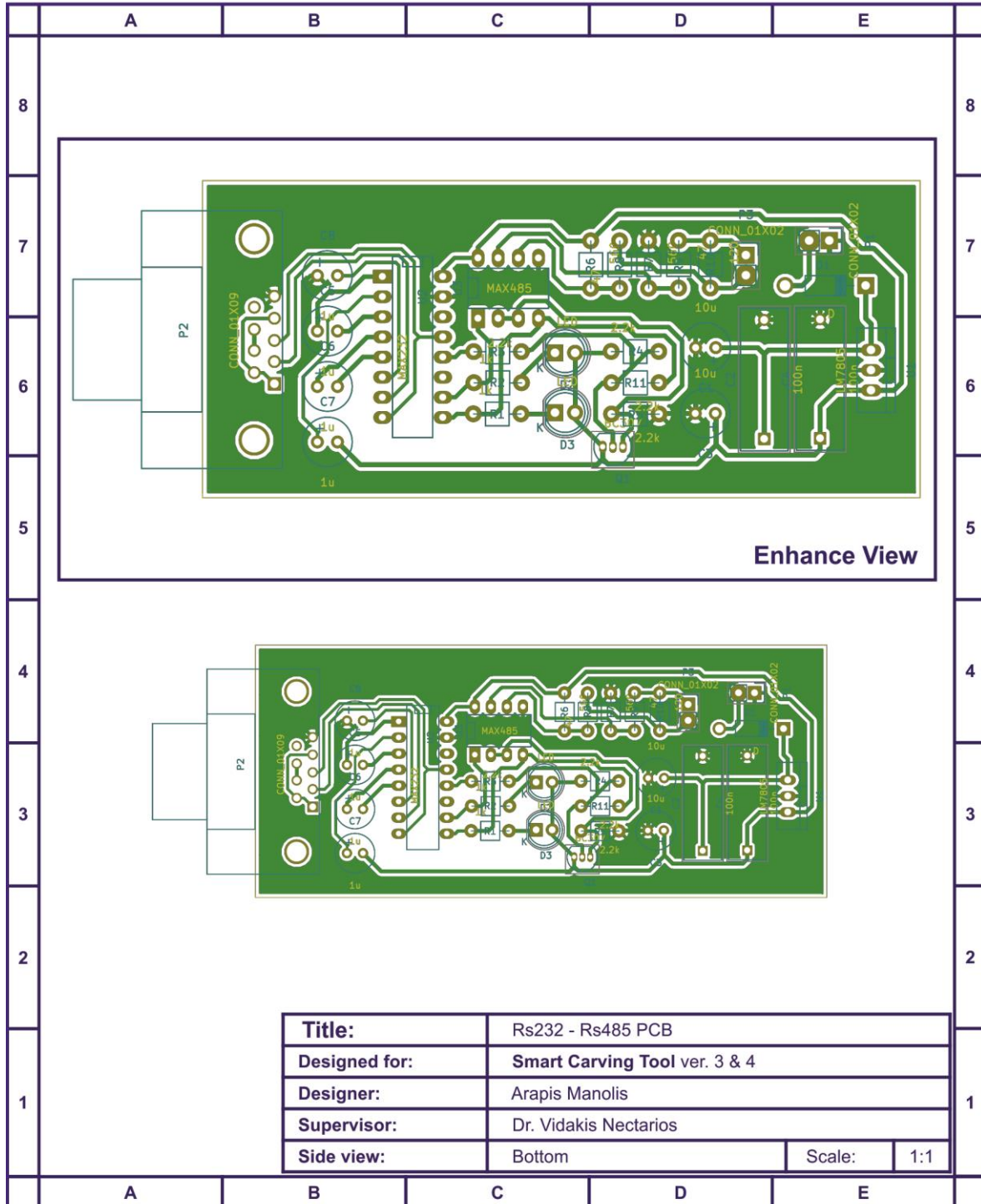
A.2.2. Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας της μονάδας ενίσχυσης DCell με εξωτερικό ηλεκτρονικό υπολογιστή

Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs232 - Rs485



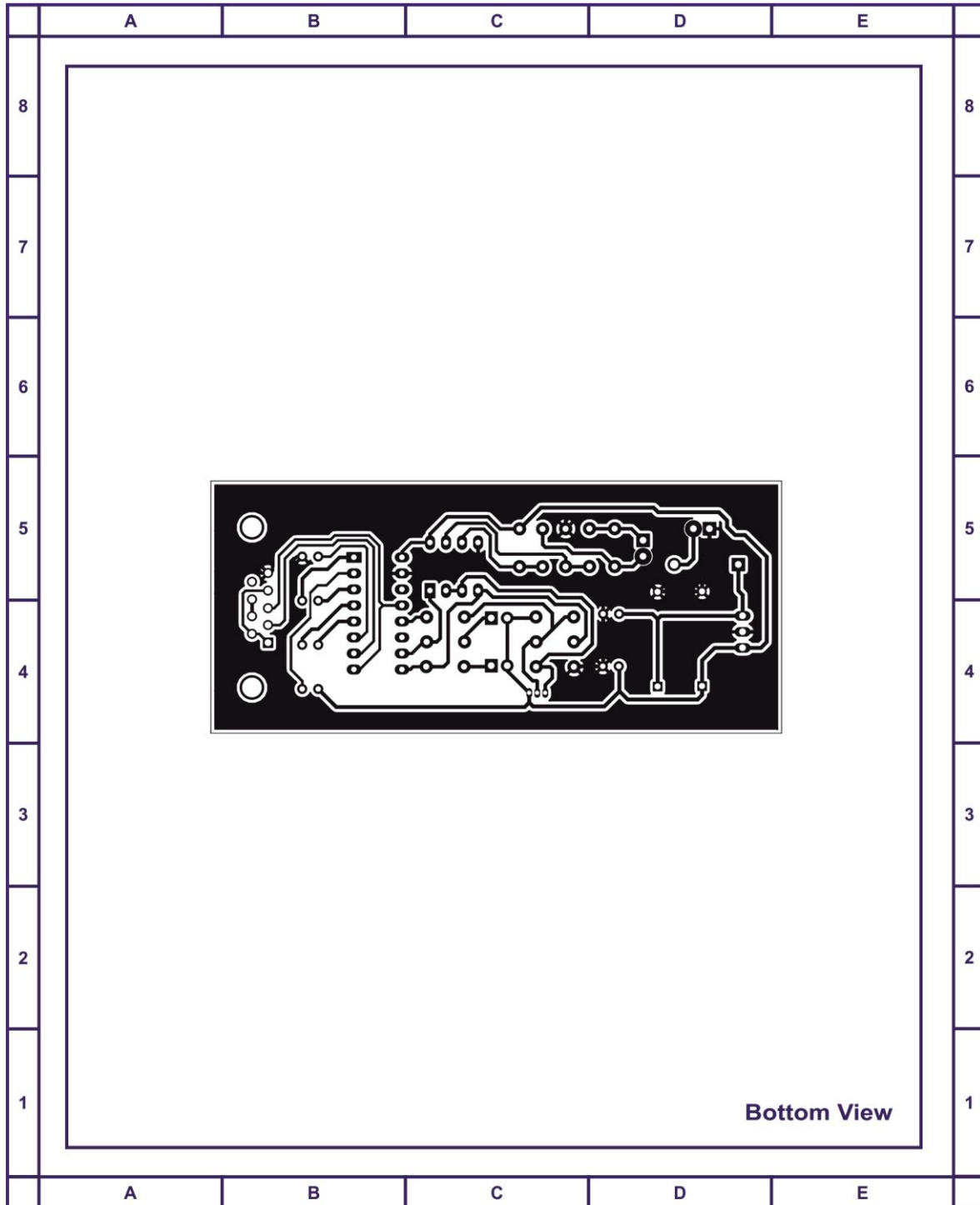


PCB BOTTOM View πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs232 - Rs485





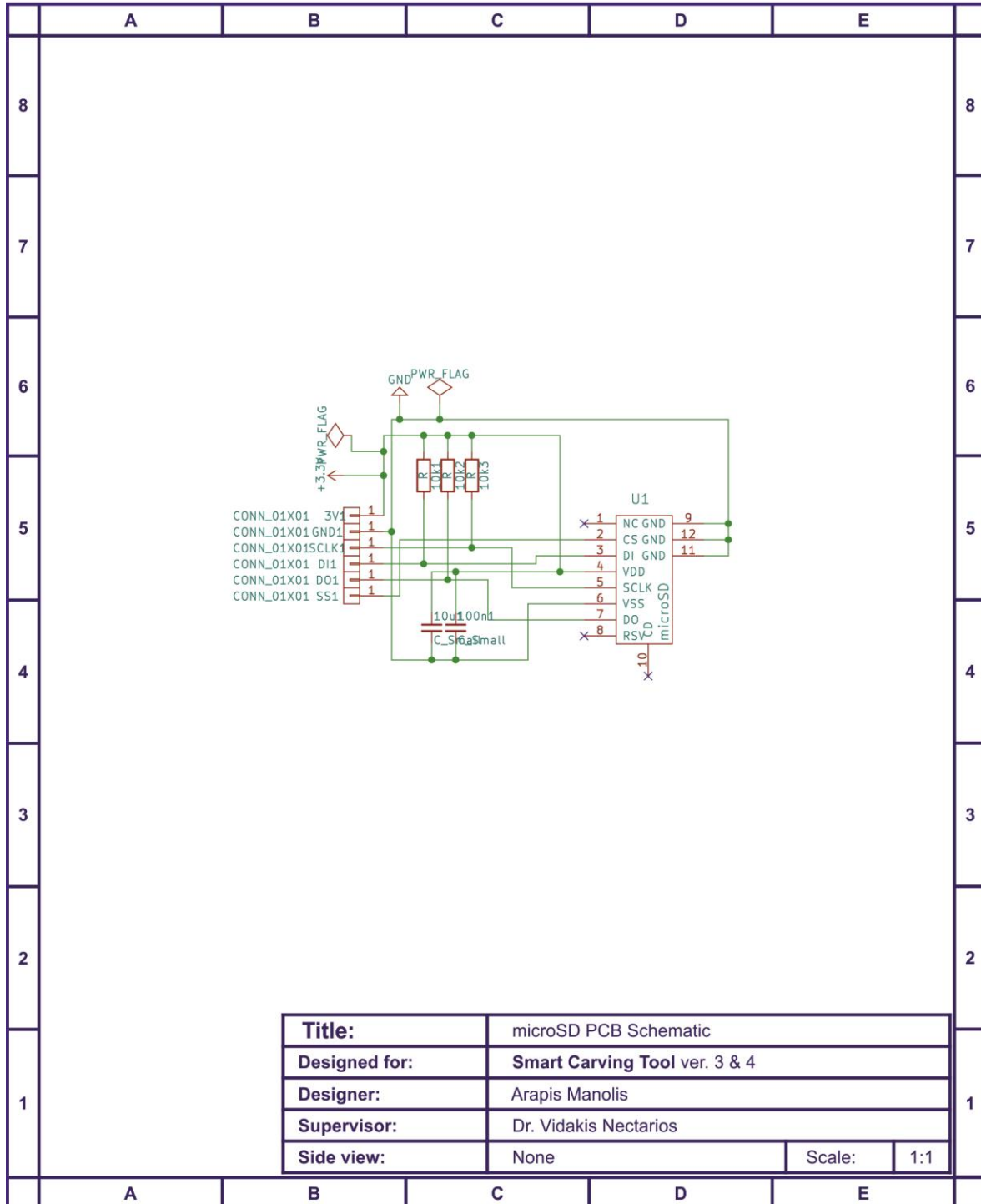
PCB print πλακέτας αμφίδρομης επικοινωνίας Rs232 - Rs485





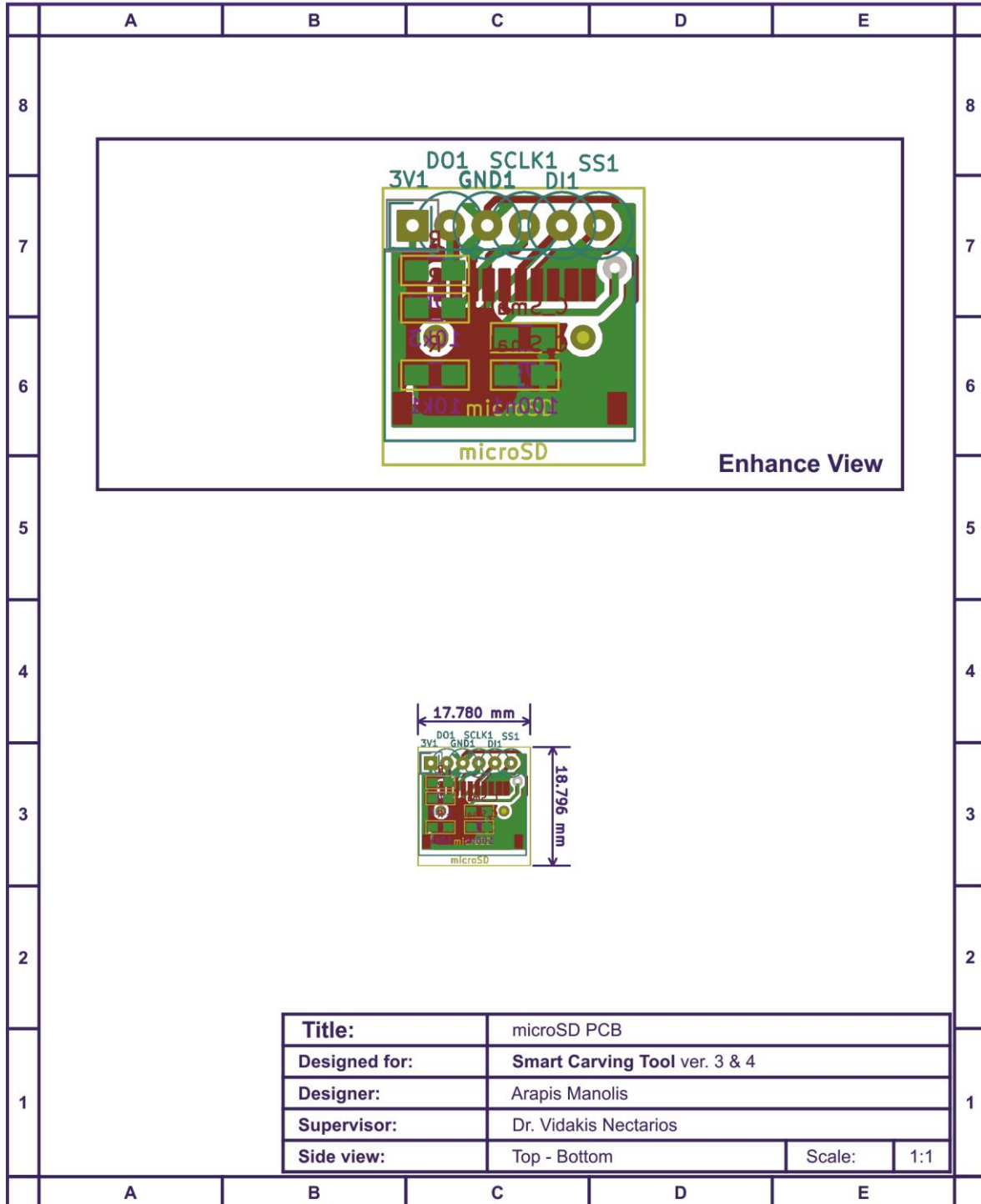
A.2.3. Σχηματικό διάγραμμα ηλεκτρονικής πλακέτας για εισαγωγή πρόσθετης μνήμης αποθήκευσης τύπου micro SD

Σχηματικό διάγραμμα πλακέτας εισαγωγής κάρτας micro SD



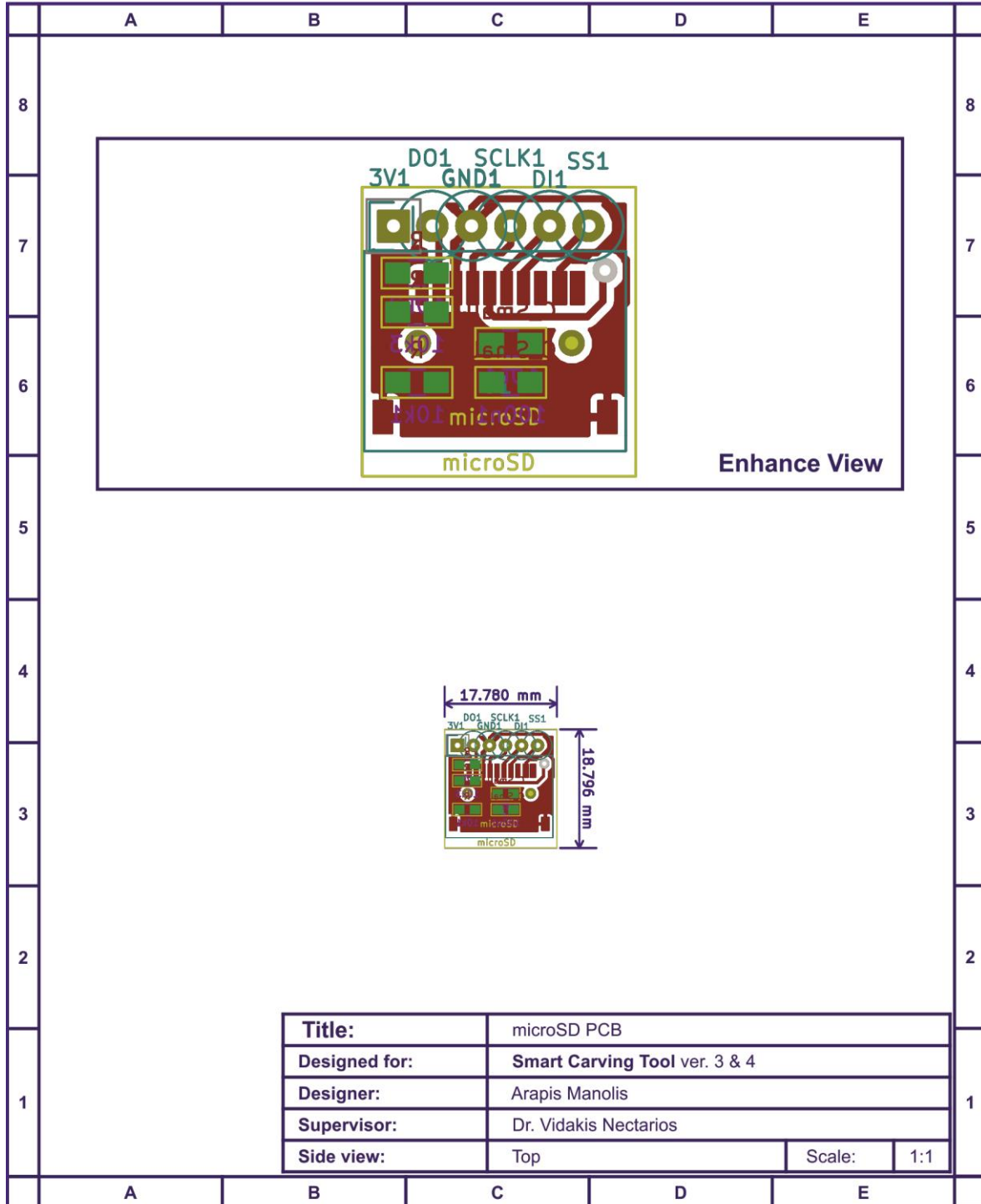


PCB TOP - BOTTOM View πλακέτας εισαγωγής κάρτας micro SD



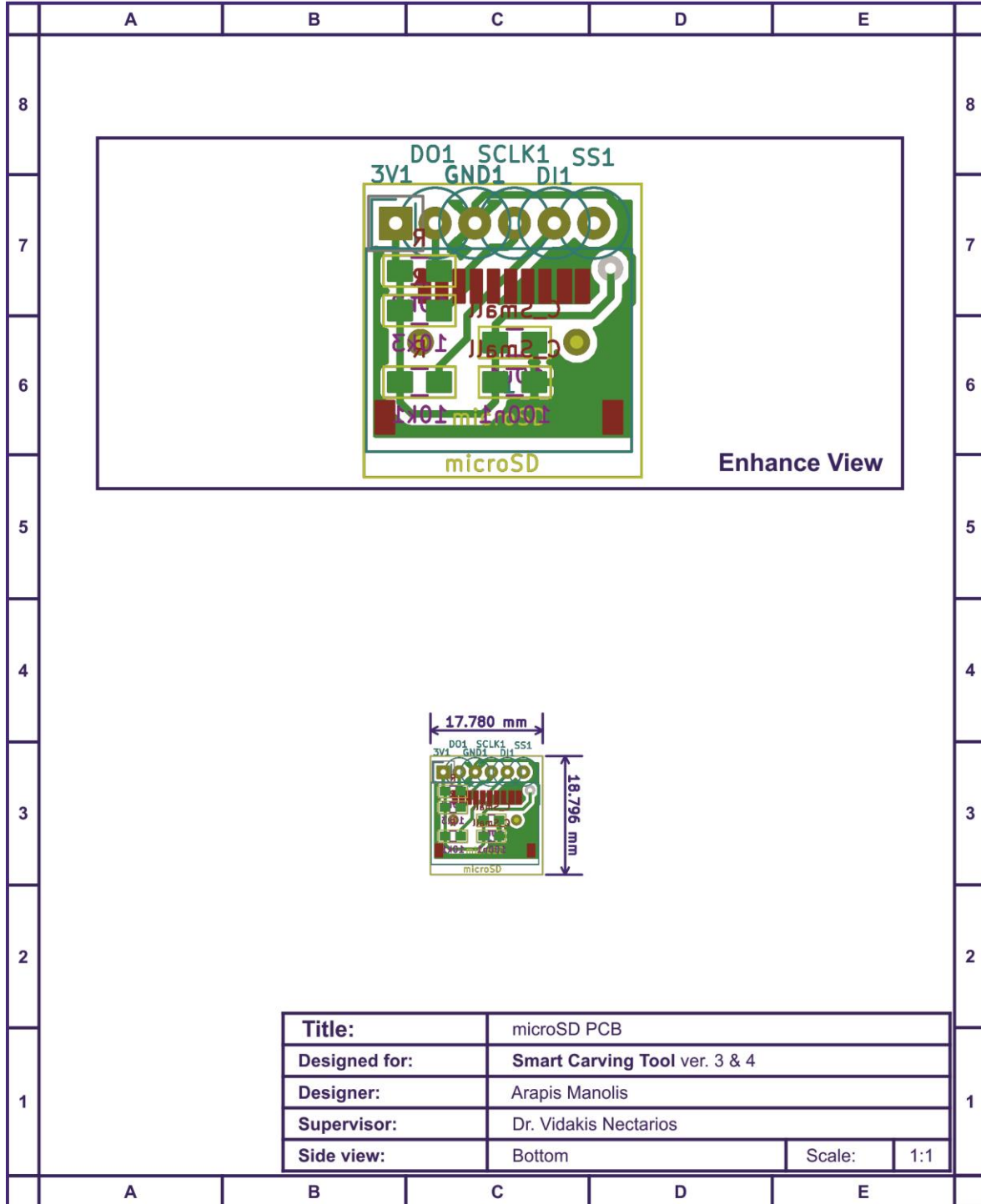


PCB TOP View πλακέτας εισαγωγής κάρτας micro SD



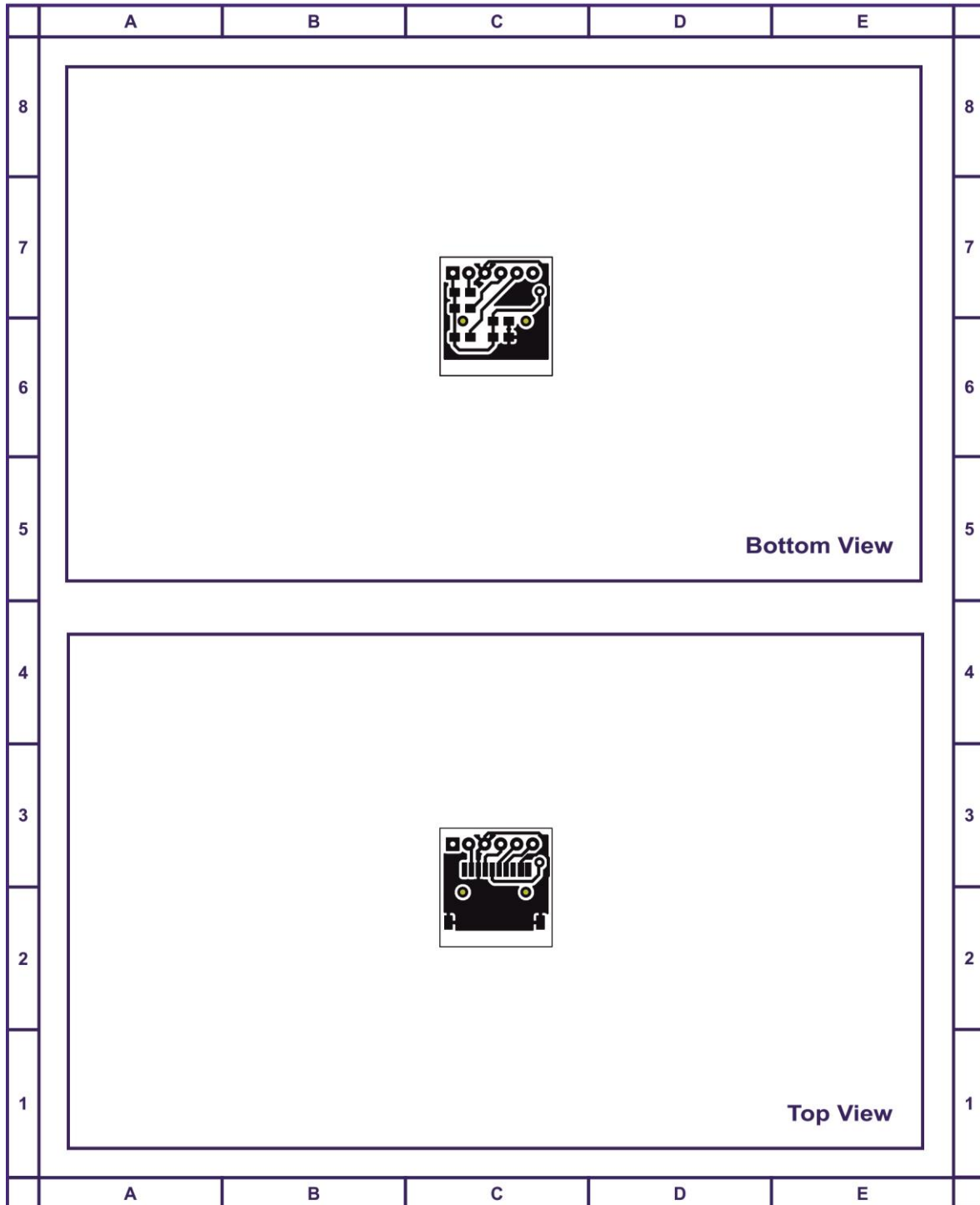


PCB BOTTOM View πλακέτας εισαγωγής κάρτας micro SD





PCB print πλακέτας εισαγωγής κάρτας micro SD





Παράρτημα-Β: Στιγμιότυπα της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου

Στο παράρτημα - Β παρατίθενται εικόνες με στιγμιότυπα από το πρωτότυπο της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου κρουστικής λάξευσης. Οι εικόνες αυτές το παρουσιάζουν μέσα από τα στάδια συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης των επιμέρους τμημάτων που το απαρτίζουν, από την πλήρως συναρμολογημένη μορφή του έως την πλήρως ανεπτυγμένη.

Αναλυτικότερα, τα στάδια συναρμολόγησης/αποσυναρμολόγησης, είναι:

- Στάδιο πλήρους συναρμολογημένης μορφής.
- Στάδιο μερικούς ανεπτυγμένης μορφής.
- Στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης μορφής, άνω όψης.
- Στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης μορφής, κάτω όψης.
- Στάδιο πλήρους ανεπτυγμένης μορφής, κάτω όψης με το στοιχείο της μπαταρίας απομακρυσμένο από τη θέση του.

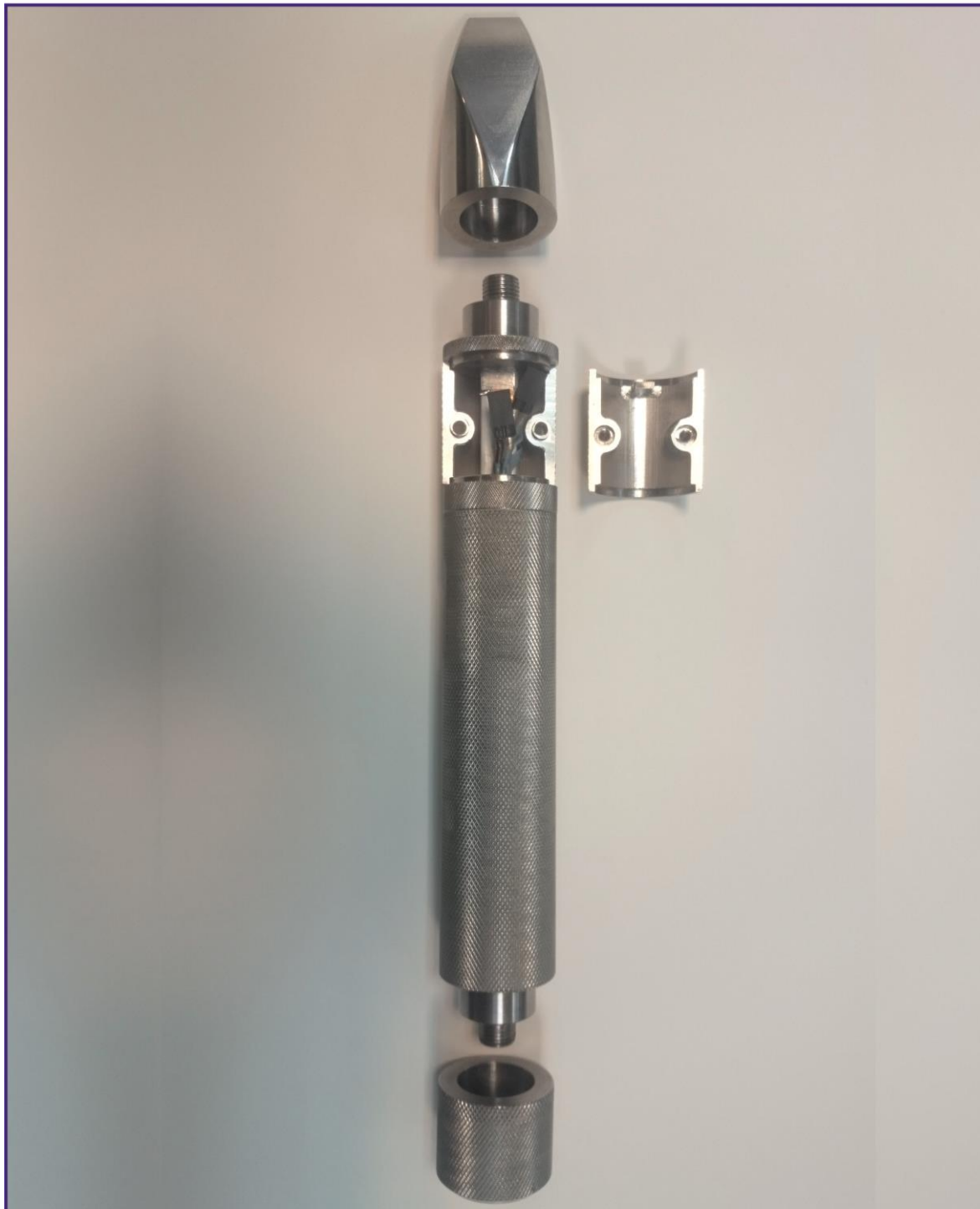


Το πρωτότυπο της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου στην πλήρως συναρμολογημένη μορφή του





Το πρωτότυπο της βελτιστοποιημένης έκδοσης του έξυπνου εργαλείου στη μερικώς ανεπτυγμένη μορφή του





Το πρωτότυπο της βελτιστοποιημένης έκδοσης στην πλήρως ανεπτυγμένη μορφή του, άνω όψη



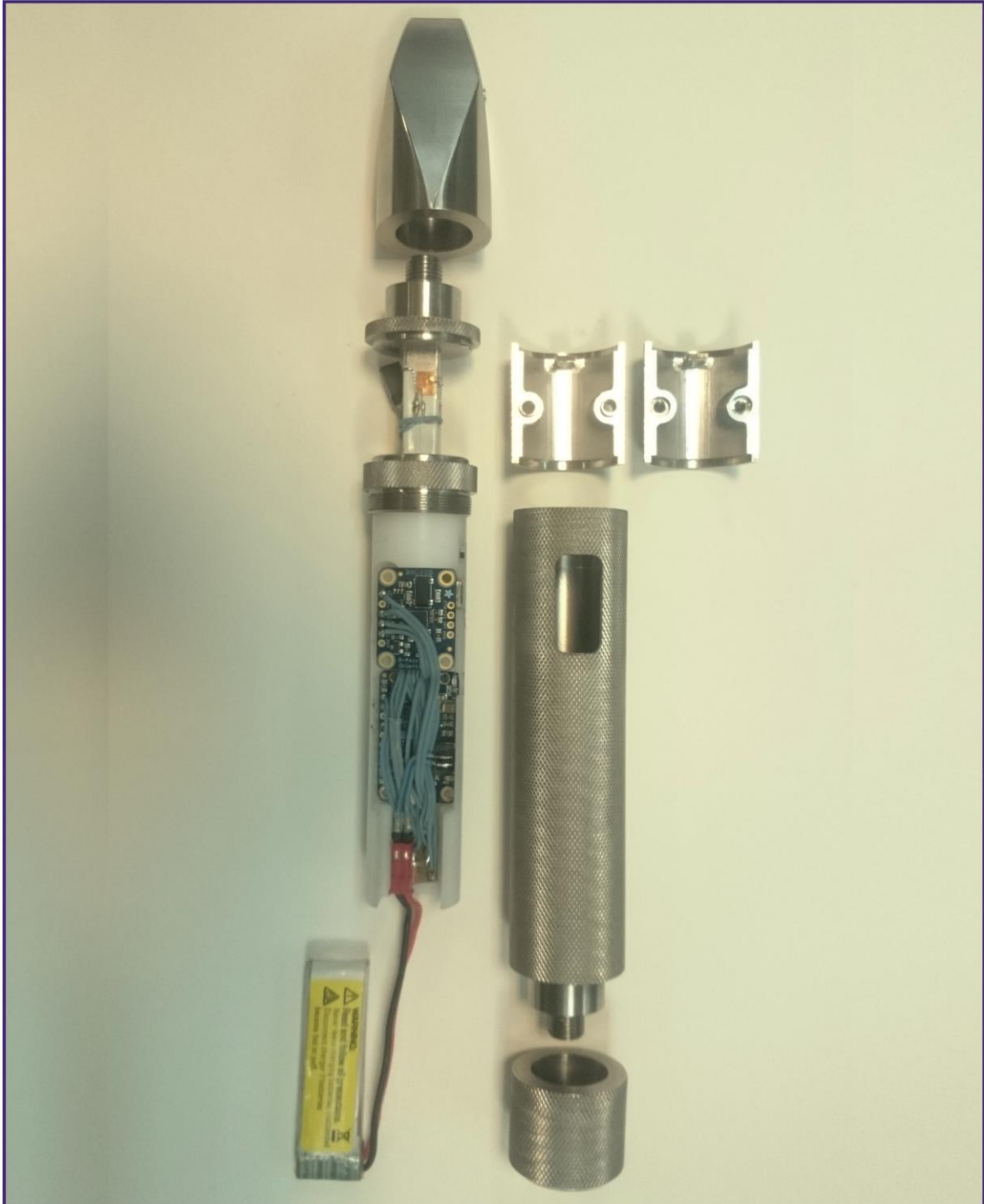


Το πρωτότυπο της βελτιστοποιημένης έκδοσης στην πλήρως ανεπτυγμένη μορφή του, κάτω όψη





Το πρωτότυπο στην πλήρως ανεπτυγμένη μορφή του και με τη μπαταρία απομακρυσμένη από τη θέση της, κάτω όψη





ΤΕΙ Κρήτης

Πληροφορίες εγγράφου

Αυτό το κείμενο αποτελείται από **205** σελίδες και περιέχει **54763** λέξεις.



Α.Τ.Ε.Ι. Κρήτης

Ηράκλειο 2018

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα

Προηγμένα Συστήματα Παραγωγής, Αυτοματισμού και Ρομποτικής

Μεταπτυχιακή εργασία

Σχεδιασμός, διασύνδεση και λειτουργία
ηλεκτρονικών διατάξεων έξυπνου
εργαλείου κρουστικής λάξευσης

Μεταπτυχιακός φοιτητής: Αράπης Εμμανουήλ - Τσαμπίκος
Επιβλέπων Καθηγητής: Καθ., Δρ. Νεκτάριος Βιδάκης

Copyright © Αράπης Εμμανουήλ - Τσαμπίκος, 2018
Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.