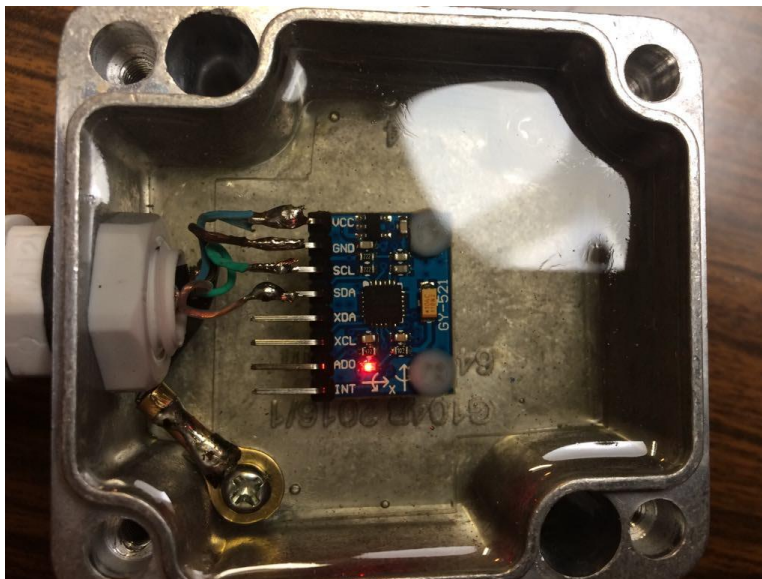


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ-ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία:

**«Σχεδιασμός και ανάπτυξη συστήματος
απομακρυσμένης παρακολούθησης και καταγραφής
μετρήσεων κλινομέτρου»**



Παγάνης Αντώνιος
Διπλ. Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

Επιβλέπουσα: Δρ. Γεωργιάννου Β. Ν., Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2019

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας είναι η υλοποίηση ενός συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης και καταγραφής των μετρήσεων ενός κλινομέτρου, η χρήση του οποίου θα συμβάλλει στην ανίχνευση των μετακινήσεων σε διάφορα τεχνικά έργα π.χ. γέφυρες, σήραγγες, επιχώματα, φράγματα, κτηριακά κ.λπ., με αποτέλεσμα τη μείωση του κινδύνου ατυχημάτων μέσω της έγκαιρης ανίχνευσης μετακινήσεων του τεχνικού έργου. Επίσης, η παρακολούθηση των μετακινήσεων/παραμορφώσεων κρίνεται απαραίτητη κατά τη διάρκεια της κατασκευής του έργου καθώς η ανάλυση των μετρήσεων μπορεί να οδηγήσει σε επαναπροσδιορισμό των φάσεων και της ταχύτητας κατασκευής π.χ. σήραγγας, στον έλεγχο των παραδοχών της αρχικής μελέτης και σε πιθανή τροποποίησή της. Η ευρεία εφαρμογή των οργανομετρήσεων τόσο στη φάση κατασκευής όσο και στη φάση λειτουργίας των τεχνικών έργων καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη νέων οργάνων μέτρησης που ακολουθούν την ανάπτυξη της τεχνολογίας.

Το σύστημα αποτελείται από ένα μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 3B+ και ένα κλινόμετρο διασυνδεδεμένων μεταξύ τους μέσω διεπαφής I²C. Η διαδικτυακή εφαρμογή του συστήματος αναπτύχθηκε στον μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 3B+ σε γλώσσα προγραμματισμού Python καθιστώντας τον να λειτουργεί ως διακομιστής (server). Ένας από τους κύριους λόγους επιλογής της γλώσσας Python για την ανάπτυξη του κώδικα, ήταν η ευκολία που παρέχει η συγκεκριμένη γλώσσα στη δημιουργία ενός API (Application Programming Interface) το οποίο αποτελεί τη διαδικτυακή πλατφόρμα μέσω της οποίας γίνεται δυνατή η διασύνδεση κάποιου εξωτερικού χρήστη για την παρακολούθηση και απεικόνιση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο, όπως και η αλληλεπίδραση του χρήστη με το καταγραφικό σύστημα. Η δυνατότητα κατασκευής και εξυπηρέτησης της πλατφόρμας και του υποβάθρου της, δόθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού ανάπτυξης εφαρμογών ιστού (web framework) Flask.

Για την κατασκευή του κλινομέτρου, χρησιμοποιήθηκε ένας ηλεκτρονικός αισθητήρας κίνησης ο οποίος συνδυάζει τη λειτουργία επιταχυνσιόμετρου και γυροσκοπίου σε ένα ολοκληρωμένο ηλεκτρονικό κύκλωμα. Έγινε εγκιβωτισμός του αισθητήρα σε μεταλλικό κουτί για την εξασφάλιση της στεγανοποίησής του και σύνδεση, μέσω καλωδίου τύπου USB του αισθητήρα με τον μικροϋπολογιστή ο οποίος δρα παράλληλα σαν μικροελεγκτής. Στη συνέχεια, μετά τη λήψη των δεδομένων του αισθητήρα, γίνεται η επεξεργασία τους μέσω ενός τροποποιημένου φίλτρου Kalman, η οποία οδηγεί στον υπολογισμό της γωνίας κλίσης του οργάνου στους δύο άξονες X και Y. Η διαδικτυακή πλατφόρμα παρέχει επίσης τη δυνατότητα εκκίνησης και διακοπής της καταγραφής καθώς και προβολής των καταγεγραμμένων γωνιών κλίσης σε γράφημα για το χρονικό διάστημα που θα επιλέξει ο χρήστης.

Η βαθμονόμηση του κλινομέτρου έδειξε μέγιστο σφάλμα της τάξης του 0,55% για κλίση 3,59° και μικρή υστέρηση της τάξης των ±0,03°.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με το πέρας της παρούσας Διπλωματικής, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς, την επιβλέπουσα Καθηγήτρια Δρ. Γεωργιάννου Βασιλική για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την παρακίνηση που μου έδωσε κατά την εκπόνηση του θέματος, όπως και για τις πολύτιμες διορθώσεις της στο κείμενο. Επίσης, τον Δρ. Λιγνό Ξενοφώντα, επιστημονικό υπεύθυνο του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, ο οποίος σε συνεργασία με την επιβλέπουσα αποτέλεσε βασικό εμπνευστή του θέματος, παραχωρώντας το χώρο εργασίας στο Εργαστήριο και παρέχοντας, μαζί με τους συνεργάτες του κ.κ. Κατσατσίδα Στέλιο και Παπαββιέρο Σπύρο, συνεχή υποστήριξη και καθοδήγηση στην πρόοδο της εργασίας αυτής. Ευχαριστίες επίσης, στους φίλους και συναδέλφους από το μεταπτυχιακό του Σ.Κ.Υ.Ε. και ιδιαίτερα στους φίλους Nsubuga Sprigo και Mustacchio Enrico για την υποστήριξή τους στην επιλογή του θέματος, όπως και στη συνάδελφο Σταυροπούλου Πετρίνα για τη συνεισφορά της στην προετοιμασία του μικροϋπολογιστή.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ιωάννη και Ευγενία για την αμέριστη στήριξη τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και να τους αφιερώσω την εργασία αυτή.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΓΑΝΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

1.1 Εισαγωγή	9
1.2 Παρακολούθηση οργάνων	9
1.3 Ιστορική αναδρομή στη χρήση λογισμικού στις γεωτεχνικές οργανομετρήσεις	11

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

2.1 Εισαγωγή.....	13
2.2 Τεχνολογία MEMS.....	13
2.3 Επιταχυνσιόμετρο MEMS	14
2.3.1 Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιομέτρου	15
2.4 Γυροσκόπιο	17
2.4.1 Αρχή λειτουργίας γυροσκοπίου	17
2.5 Κλινόμετρο	21
2.6 Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων.....	23
2.7 Τυπικές εφαρμογές στο πεδίο	24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο: ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (HARDWARE)

3.1 Μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές και μικροϋπολογιστές	27
3.2 Raspberry Pi 3B+	28
3.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας I ² C	31
3.4 Ο MPU6050	31
3.5 Κατασκευή κλινομέτρου	33
3.6 Περιγραφή σύνδεσης.....	35

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο: ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (SOFTWARE)

4.1 Λειτουργικό σύστημα Raspbian.....	37
4.2 Γλώσσα προγραμματισμού Python	38
4.2.1 Geany	39
4.3 Διαδικασία ελέγχου λειτουργίας κλινομέτρου	39
4.4 Web framework Flask	41
4.5 Λειτουργία κυρίως προγράμματος – 1ο μέρος	45
4.6 Λειτουργία κυρίως προγράμματος – 2ο μέρος	50
4.7 Εμφάνιση κύριας ιστοσελίδας.....	52

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο: ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΛΙΝΟΜΕΤΡΟΥ

5.1 Διαδικασία βαθμονόμησης 57

5.2 Επεξεργασία μετρήσεων..... 58

5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων..... 59

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ 70

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 73

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ**Σελ.**

Εικόνα 1.1	Αεροφωτογραφία του πάρκου <i>Central Park</i> στο Νέο Δελχί και χάρτης δικτύου μετρό της πόλης μεγεθυμένος στην περιοχή του πάρκου (πηγές: <i>GoogleEarth</i> , http://www.delhimetrorail.com)	9
Εικόνα 1.2	Μηκυσιόμετρο ταινίας και στιγμιότυπο από χρήση του σε πραγματικές συνθήκες (πηγή: <i>Riaz</i> , 2015)	10
Εικόνα 1.3	Σύστημα στην παρούσα εποχή με λογισμικό τρίτης γενιάς (πηγή: <i>Siebenmann et al.</i> , 2015)	12
Εικόνα 2.1	Αισθητήρας MEMS σε κλίμακα των 100 μm (πηγή: <i>Application guide – Tilt sensors</i> , <i>GEOSENSE</i>)	14
Σχήμα 2.1	Μηχανολογική δομή τυπικού αισθητήρα MEMS (πηγή: <i>Application guide – Tilt sensors</i> , <i>GEOSENSE</i>)	15
Σχήμα 2.2	Δομή επιταχυνσιομέτρου τύπου MEMS (πηγή: <i>Constantinescu et al.</i> , 2013)	16
Σχήμα 2.3	Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας MEMS γυροσκοπίου (πηγή: <i>Elliot et al.</i> , 2002)	19
Σχήμα 2.4	Δονούμενο γυροσκόπιο τύπου διαπασών (πηγή: <i>Yazdi et al.</i> , 1998)	20
Σχήμα 2.5	Σχηματική αναπαράσταση του γυροσκοπίου MEMS τύπου διαπασών, όπου Ω ο ρυθμός εισαγωγής της περιστροφής, $F1$ και $F2$ οι δυνάμεις Coriolis και V η ταχύτητα οριζόντιας κίνησης (πηγή: <i>Bernstein et al.</i> , 1993)	21
Εικόνα 2.2	Κλινόμετρο στερεωμένο σε πλάκα (πηγή: geotechpedia.com)	22
Εικόνα 2.3	Κλινόμετρα στερεωμένα σε πλάκες σε παρειά σήραγγας (πηγή: geotechpedia.com)	23
Εικόνα 2.4	Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων και εφαρμογή τους (πηγή: <i>Li and Yuan.</i> , 2016)	24
Σχήμα 2.6	Διάταξη οργάνων μέτρησης κλίσης σε τοίχο αντιστήριξης (πηγή: <i>Application guide – Tilt sensors</i> , <i>GEOSENSE</i>)	25
Σχήμα 2.7	Διάταξη οργάνων μέτρησης κλίσης σε υπόγειες και υπαίθριες κατασκευές (πηγή: <i>Application guide – Tilt sensors</i> , <i>GEOSENSE</i>)	26
Εικόνα 3.1	Ο μικροελεγκτής <i>Arduino Uno</i> .	28
Εικόνα 3.2	Ο μικροϋπολογιστής <i>Raspberry Pi 3B+</i>	29
Εικόνα 3.3	Περιγραφή υποδοχών <i>Raspberry Pi 3B+</i>	30
Εικόνα 3.4	Διάγραμμα ακροδεκτών <i>General Pins Input/Output (GPIO)</i>	30
Εικόνα 3.5	Ο μετατροπέας <i>MPU6050</i>	32
Εικόνα 3.6	Ο αισθητήρας <i>MPU6050</i> τοποθετημένος στο κουτί κατασκευής πριν από την πλήρωσή του με ρητίνη	34
Εικόνα 3.7	Ο αισθητήρας <i>MPU6050</i> συνδεδεμένος με το <i>Raspberry Pi</i> σε κατάσταση λειτουργίας μετά από την πλήρωση με ρητίνη	35
Εικόνα 3.8	Η αυτοσχέδια θύρα <i>USB-B</i> (αριστερά) και η απόληξη <i>USB-B</i> του	35

	καλωδίου που συνδέεται με τον μετατροπέα (δεξιά)	
Εικόνα 3.9	Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου διασύνδεσης του MPU6050 με τον Raspberry. (πηγή: bitify.co.uk)	36
Εικόνα 4.1	Εγγραφή εικόνας Raspbian στο λογισμικό Etcher	38
Εικόνα 4.2	Καθορισμός τύπου αρχείου σε Python στο Geany	39
Εικόνα 4.3	Μενού διαθέσιμων υπηρεσιών προς ενεργοποίηση	40
Εικόνα 4.4	Εντολή ανίχνευσης του μετατροπέα από το μικροϋπολογιστή	41
Εικόνα 4.5	Παράδειγμα σύνδεσης χρήστη στην τοποθεσία έχοντας πληκτρολογήσει ένα όνομα	45
Σχήμα 4.1	Λειτουργία της συνάρτησης atan2	46
Εικόνα 4.6	Εισαγωγή των απαραίτητων πακέτων στο αρχικό τμήμα του προγράμματος	47
Εικόνα 4.7	Ορισμός βασικών μεταβλητών στο κυρίως πρόγραμμα	47
Εικόνα 4.8	Ορισμός συναρτήσεων ανάγνωσης δεδομένων	48
Εικόνα 4.9	Ορισμός συναρτήσεων υπολογισμού κλίσης και προσδιορισμός αρχικών τιμών	49
Εικόνα 4.10	Ορισμός τοποθεσίας φόρτωσης κύριας ιστοσελίδας	50
Εικόνα 4.11	Συνάρτηση μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	51
Εικόνα 4.12	Εντολή εκτέλεσης της εφαρμογής από το κυρίως πρόγραμμα	52
Εικόνα 4.13	Στιγμιότυπο της κύριας ιστοσελίδας	53
Εικόνα 4.14	Η βάση δεδομένων στο λογισμικό SQLite Browser	54
Εικόνα 4.15	Γράφημα θερμοκρασίας και λίστα καταγεγραμμένων τιμών.	55
Εικόνα 4.16	Γράφημα της κλίσης περί τον άξονα X. Στα αριστερά απεικονίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας	56
Εικόνα 5.1	Εικόνα από τη διαδικασία βαθμονόμησης περί τον άξονα X του κλινομέτρου	57
Σχήμα 5.1	Διάγραμμα μέσω των μετρούμενων και πραγματικών τιμών από όπου προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης.	59
Σχήμα 5.2	Γράφημα πρώτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα X. Η υστέρηση ισούται με $-0,07^\circ$.	60
Σχήμα 5.3	Γράφημα δεύτερου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα X. Η υστέρηση ισούται με $-0,02^\circ$.	60
Σχήμα 5.4	Γράφημα τρίτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα X. Η υστέρηση ισούται με $0,02^\circ$.	61

Σχήμα 5.5	Συνδυαστική απεικόνιση γραφημάτων των τριών κύκλων και μέσου όρου τους περί τον άξονα X. Ο συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor) είναι 0,8552.	61
Σχήμα 5.6	Διάγραμμα μετρούμενων γωνιών περί τον X-άξονα συναρτήσει συνολικού ύψους των ελασμάτων.	62
Σχήμα 5.7	Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 1 ^{ου} κύκλου στις 0° περί τον X-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,064°. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με ±0,036° και η διακριτότητα 0.01.	63
Σχήμα 5.8	Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 2 ^{ου} κύκλου στις 0° περί τον X-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,026°. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με ±0,034° και η διακριτότητα 0.01.	63
Σχήμα 5.9	Γράφημα πρώτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα Y. Η υστέρηση ισούται με -0,02°.	64
Σχήμα 5.10	Γράφημα δεύτερου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα Y. Η υστέρηση ισούται με -0,08°.	65
Σχήμα 5.11	Γράφημα τρίτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα Y. Η υστέρηση ισούται με -0,02°.	65
Σχήμα 5.12	Συνδυαστική απεικόνιση γραφημάτων των τριών κύκλων και του μέσου όρου τους περί τον άξονα Y. Ο συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor) είναι 0,8734.	66
Σχήμα 5.13	Διάγραμμα μετρούμενων γωνιών περί τον Y-άξονα συναρτήσει συνολικού ύψους των ελασμάτων.	66
Σχήμα 5.14	Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 1 ^{ου} κύκλου στις 0° περί τον Y-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,026°. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με ±0,034° και η διακριτότητα 0.01°.	67
Σχήμα 5.15	Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 2 ^{ου} κύκλου στις 0° περί τον Y-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,062. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με ±0,038° και η διακριτότητα 0.01°.	68
Σχήμα 5.16	Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας για χρονικό διάστημα ~16 ωρών.	69
Σχήμα 5.17	Διάγραμμα μεταβολής κλίσης για χρονικό διάστημα ~16 ωρών.	69

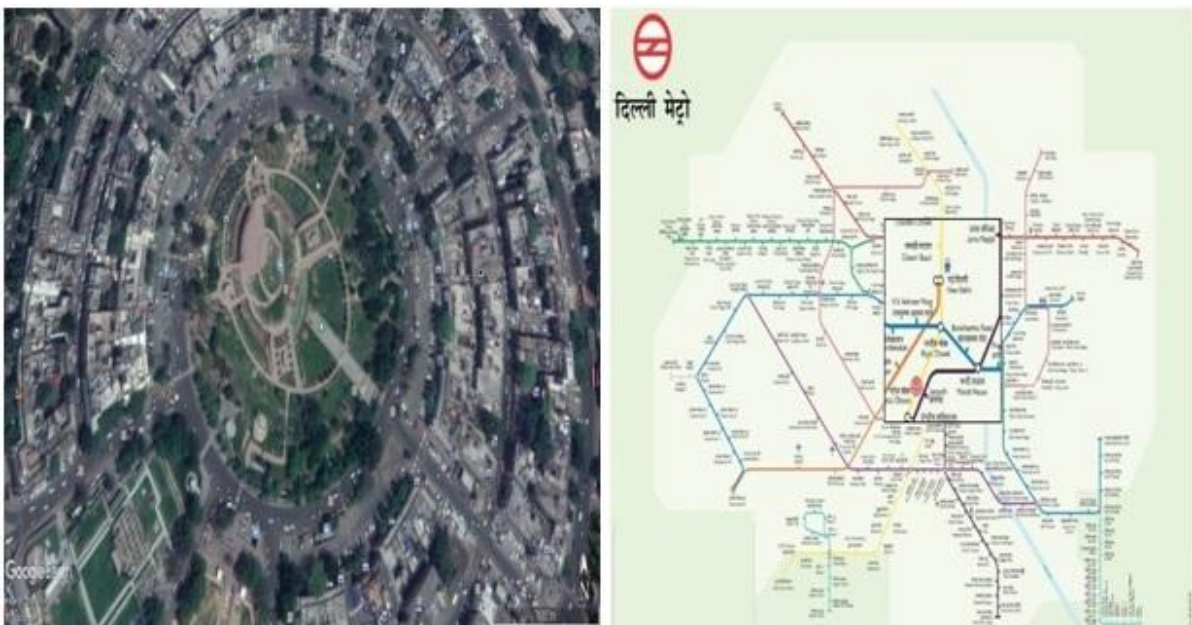
Κεφάλαιο 1^ο

ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΕΣ ΟΡΓΑΝΟΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Κατά την πάροδο των τελευταίων τεσσάρων δεκαετιών, οι σύγχρονες ανάγκες βελτίωσης των δομών συγκοινωνίας για ταχύτερες μεταφορές εντός και εκτός των αστικών και υπεραστικών δικτύων ανά την υφήλιο, οδήγησαν στην κατασκευή πολλών χιλιάδων χιλιομέτρων οδικών σηράγγων και σηράγγων μετρό, καθώς και γενικότερα υπογείων έργων.

Παρ' ότι το κόστος των έργων αυτών είναι συγκριτικά αυξημένο σε σχέση με αυτό των υπαίθριων δομών, το όφελος που αποκομίζεται από τη λειτουργία τους είναι σε πολλές περιπτώσεις σημαντικά ανώτερο. Στην Εικόνα 1.1 απεικονίζεται μια αεροφωτογραφία του πάρκου Central Park του Νέου Δελχί, μιας ανάσας πρασίνου σε μια από τις πιο πυκνοκατοικημένες πόλεις του κόσμου και του υπόγειου δικτύου μετρό που διέρχεται κάτω από την περιοχή, βοηθώντας έτσι στην αποσυμφόρηση της κυκλοφορίας και στην πιο ορθολογική αξιοποίηση του διαθέσιμου υπαίθριου χώρου. Στις εφαρμογές σε αυτοκινητοδρόμους και εθνικές οδούς, η κατασκευή οδικών σηράγγων μειώνει σημαντικά το χρόνο διαδρομής των οχημάτων, συχνά λόγω των παρακάμψεων μεγάλων ορεινών δομών.



Εικόνα 1. 1: Αεροφωτογραφία του πάρκου Central Park στο Νέο Δελχί και χάρτης δικτύου μετρό της πόλης μεγεθυμένος στην περιοχή του πάρκου (GoogleEarth, <http://www.delhimetrorail.com>).

1.2 Παρακολούθηση οργάνων

Η παρακολούθηση και καταγραφή των μετρήσεων οργάνων (monitoring) σε σήραγγες συμβατικής κατασκευής αποτελεί ένα αντικείμενο εξαιρετικής σημασίας ώστε να αξιολογηθούν οι εκτελούμενες εργασίες σε σχέση με το σχεδιασμό, όπως επίσης για να ρυθμιστεί η αλληλουχία των σταδίων εκσκαφής που λαμβάνουν χώρα όταν αυτό απαιτηθεί (Lunardi & Gatti, 2010). Έτσι, τα συστήματα 'γεωτεχνικής παρακολούθησης' είναι σχεδιασμένα ώστε να λαμβάνουν συνεχείς πληροφορίες όσον αφορά τις γεωτεχνικές συνθήκες και τη γεωμετρία της σήραγγας, όσο αυτή βρίσκεται υπό κατασκευή αλλά και σε λειτουργία. Στην Εικόνα 1.4 παρουσιάζεται ένα μηκυνσιόμετρο ταινίας, ένα όργανο το οποίο χρησιμοποιείται για τη μέτρηση μετακινήσεων σε σήραγγες.



Εικόνα 1. 1: Μηκυνσιόμετρο ταινίας και στιγμιότυπο από χρήση του σε πραγματικές συνθήκες (Riaz, 2015)

Επιπλέον, η παρακολούθηση μέσω οργάνων αποτελεί το βασικό εργαλείο που θα βοηθήσει στην επιλογή του τρόπου εκσκαφής και των μέτρων υποστήριξης μεταξύ αυτών που προβλέπονται στον αρχικό σχεδιασμό, ώστε η κατασκευή να γίνει σύμφωνα με όλες τις απαραίτητες προδιαγραφές ασφάλειας και ποιότητας, όπως ορίζονται και με το πρότυπο ISO9000, (Γεωργιάννου, 2000).

Σκοπός των οργανομετρήσεων

Ο πρωταρχικός σκοπός για τον οποίο χρησιμοποιούνται οι οργανομετρήσεις σε γεωτεχνικές εφαρμογές είναι η παρακολούθηση της δομικής ακεραιότητας του έργου, πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την κατασκευή του, παρέχοντας ένα σύστημα προειδοποίησης το οποίο θα αποτρέψει μια επερχόμενη κρίσιμη αστοχία ενός τμήματος του, ενώ παράλληλα θα παρέχει άγνωστες πληροφορίες μειώνοντας την αβεβαιότητα του έργου. Δεδομένου ότι κατασκευάζονται σήραγγες και υπόγειοι θάλαμοι κάτω από τα πιο ακριβά ακίνητα στον κόσμο, όπως και από ανεκτίμητα πολιτιστικά μνημεία, η επαρκής παρακολούθηση παίζει

σημαντικό ρόλο και από άποψη ενημέρωσης ενδιαφερομένων μελών, ικανοποίησης ρυθμιστικών αρχών, υπολογισμού φθορών, και καταγραφής επιδόσεων (Siebenmann et al., 2015).

Ο σκοπός των οργανομετρήσεων διαφέρει ανάλογα με τον τύπο σήραγγας. Στην περίπτωση των οδικών σηράγγων, η δυνατότητα παρακολούθησης των συχνά υψηλών και μεταβαλλόμενων εδαφικών πιέσεων συμβάλλει στην έγκαιρη πρόληψη και αποφυγή επικείμενης αστοχίας λόγω υψηλών τάσεων, όπως πτώση οροφής ή ανύψωση πυθμένα. Στην περίπτωση των αστικών σηράγγων μετρό όπου απαιτείται ο έλεγχος των μετακινήσεων λόγω καθίζησης στο πεδίο πάνω από τη σήραγγα, η παρακολούθηση μέσω οργάνων συμβάλλει στην εξακρίβωση ότι οι μετακινήσεις βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων, ώστε να αποφευχθούν ζημιές στον αστικό ιστό, όπως μεταβολές κλίσης κτιρίων, καθιζήσεις, ακόμα και κατάρρευση του εδάφους (Kanvadas, 2003).

Παρακολούθηση οργάνων σε πραγματικό χρόνο

Η παρακολούθηση μέσω οργάνων σε πραγματικό χρόνο περιλαμβάνει τη συνεχή λήψη πληροφοριών που αφορούν την αξιοπιστία και την απόδοση γεωτεχνικών, στατικών και τεχνικών έργων όπως υπόγειες και υπαίθριες δομές, γέφυρες, κτίρια, θεμελιώσεις, και άλλα έργα μηχανικού. Στη σημερινή εποχή η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο αποτελεί ένα κρίσιμο παράγοντα για την ορθή λειτουργία των συστημάτων αυτών και χρησιμοποιείται για την ορθή υλοποίηση και συντήρησή τους. Στο αντικείμενο της παρακολούθησης περιλαμβάνεται η γενικότερη παρατήρηση ενός συστήματος, η ανάλυση των ληφθέντων δεδομένων και η πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς τους (Dyskin, 2018)

Ο έλεγχος και η αξιολόγηση της κατάστασης των διαφόρων τεχνικών έργων πραγματοποιείται με διάφορες τεχνικές παρακολούθησης οι οποίες έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό, με κάποιες από αυτές να είναι οπτικές ενώ οι σύγχρονες τεχνικές περιλαμβάνουν τη χρήση αισθητήρων για την παρακολούθηση του έργου και την ανίχνευση πιθανών αστοχιών. Οι τελευταίες απαιτούν ένα μεγάλο αριθμό αισθητήρων για να παρέχουν μια πλήρη περιγραφή της απόκρισης του έργου, παράγοντας αντίστοιχα μεγάλο όγκο δεδομένων. Ο αριθμός των απαιτούμενων αισθητήρων εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του έργου και για αυτό στην παρούσα εποχή, υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων συστημάτων διαχείρισης δεδομένων για τα δεδομένα που λαμβάνονται από την παρακολούθηση μέσω οργάνων σε πραγματικό χρόνο.

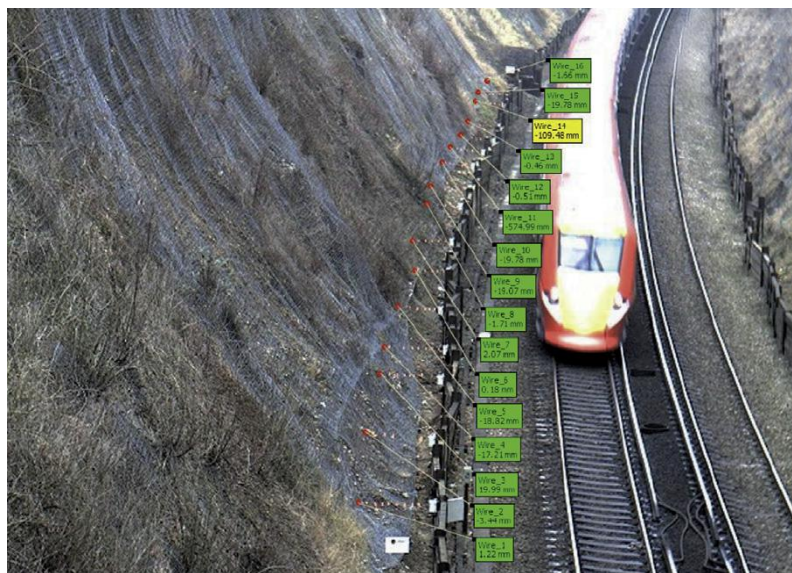
1.3 Ιστορική αναδρομή στη χρήση λογισμικού στις γεωτεχνικές οργανομετρήσεις

Η αύξηση των δυνατοτήτων και της πολυπλοκότητας των προγραμμάτων που χρησιμοποιούνται στο αντικείμενο των οργανομετρήσεων, σε γεωτεχνικές αλλά και σε στατικές εφαρμογές, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου των δεδομένων που προκύπτει σε ένα έργο. Αυτό έκανε απαραίτητη την εξέλιξη των συστημάτων διαχείρισης

δεδομένων με την πάροδο του χρόνου ώστε να ανταποκρίνονται στις νέες αυτές απαιτήσεις.

Η πρώτη γενιά λογισμικού οργανομετρήσεων παρουσιάστηκε στις αρχές του 1990, όπου στην εποχή αυτή τα περισσότερα έργα αποτελούσαν έργα μικρής κλίμακας, όπου ο αριθμός των αισθητήρων έφτανε μερικές χιλιάδες. Οι απαιτούμενες απεικονίσεις γινόντουσαν με αυτοσχέδιες γραφικές αναπαραστάσεις των δεδομένων βασισμένες σε συστήματα DOS και Microsoft Windows με το λογισμικό διαχείρισης βάσεων δεδομένων Microsoft Access. Μερικά παραδείγματα έργων όπου εφαρμόστηκαν τέτοια συστήματα είναι: ο σταθμός Waterloo του Λονδίνου, η γραμμή του μετρό του Λονδίνου Jubilee Line Extension, και η γέφυρα Tamar στη Νοτιοδυτική Αγγλία, (Γεωργιάννου, 2000).

Η δεύτερη γενιά λογισμικού χρησιμοποιήθηκε στις αρχές του 2000 κυρίως σε έργα “μεσαίου” μεγέθους με περισσότερους αισθητήρες. Η τρίτη γενιά λογισμικού είναι αυτή που χρησιμοποιείται έως και σήμερα σε γεωτεχνικά και στατικά έργα υποδομής μεγάλης κλίμακας όπου χρησιμοποιούνται έως και χιλιάδες αισθητήρες. Το λογισμικό που χρησιμοποιείται είναι βασισμένο στη χρήση του διαδικτύου και δεν απαιτεί εγκατάσταση στον υπολογιστή του χρήστη. Τα συστήματα αυτά παρέχουν τη δυνατότητα παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, αποστολής προειδοποιητικών μηνυμάτων ή συναγερμού, σύνταξης αυτόματων αναφορών σε PDF και άλλες διαδικτυακές υπηρεσίες οι οποίες παρέχονται ως πακέτο υπηρεσιών διαδικτύου παρά ως ένα αυτοτελές πρόγραμμα προς εγκατάσταση, (Siebenmann et al., 2015).



Εικόνα 1.3: Σύστημα στην παρούσα εποχή με λογισμικό τρίτης γενιάς (Siebenmann et al., 2015)

Κεφάλαιο 2^ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΑ

Σε αυτό το Κεφάλαιο γίνεται μια παρουσίαση του τρόπου λειτουργίας του μετατροπέα κίνησης MPU6050, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε κατά την εκπόνηση της Διπλωματικής Εργασίας για την κατασκευή ενός οργάνου μέτρησης γωνίας κλίσης και στρέψης, το οποίο αναπαριστά τη λειτουργία ενός κλινομέτρου. Παρουσιάζεται επίσης η λειτουργία των κλινομέτρων και οι συνηθέστερες εφαρμογές τους στο πεδίο, ενώ στο τέλος του Κεφαλαίου γίνεται αναφορά σε παρεμφερείς μεθόδους μέτρησης κλίσης και στις ομοιότητες και διαφορές που παρουσιάζουν σε σχέση με τα κλινόμετρα.

2.1 Εισαγωγή

Ο μετατροπέας κίνησης MPU-6050 ανήκει στην οικογένεια των αδρανειακών μονάδων μέτρησης (IMUs – Inertial Measurement Unit), μιας οικογένειας μετατροπέων (transducers) των οποίων οι αισθητήρες αποτελούνται από μικρών διαστάσεων ηλεκτρομηχανολογικά μέρη και που παρουσιάζουν χαμηλό κόστος. Συνδυάζοντας την παράλληλη λειτουργία αισθητήρων επιταχυνσιομέτρου και γυροσκοπίου τεχνολογίας MEMS (Micro Electro Mechanical System), η οποία περιγράφεται αναλυτικά στη συνέχεια, μπορούν να επιτύχουν ικανοποιητικές προδιαγραφές στις μετρήσεις, με χαμηλό κόστος επένδυσης, (Beravs et al., 2012).

Η τεχνολογία που ενσωματώνει ο MPU-6050 βρίσκει εφαρμογή σε πολυάριθμα εργαλεία της καθημερινότητας και αποτελεί πλέον απαραίτητη προσθήκη σε συσκευές όπως έξυπνα κινητά ή tablets, όπου επιτρέπει τη χρήση εφαρμογών αναγνώρισης κινήσεων, πλοήγησης πεζών και οχημάτων, παρακολούθησης υγείας και φυσικής κατάστασης, βελτιωμένης εμπειρίας σε βιντεοπαιχνίδια κ.λπ..

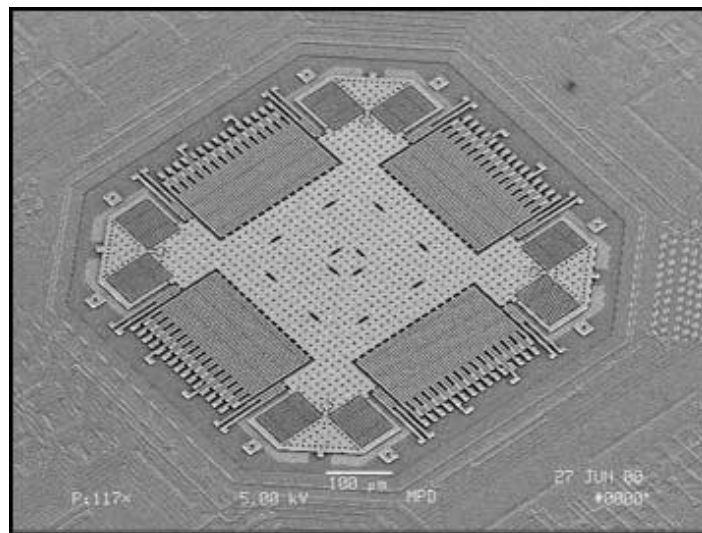
Η χρήση της τεχνολογίας αυτής σε τέτοιου είδους συσκευές προϋποθέτει μικρές διαστάσεις του αισθητήρα, χαμηλή κατανάλωση ενέργειας, υψηλή επαναληψιμότητα και ακρίβεια στις μετρήσεις σε συνδυασμό με υψηλή αντοχή σε κραδασμούς, καθώς και δυνατότητα επαναπρογραμματισμού του εύρους λειτουργίας ανάλογα με την εφαρμογή που θα χρησιμοποιηθεί.

2.2 Τεχνολογία MEMS

Το ανερχόμενο ερευνητικό πεδίο εφαρμογής των Micro Electro Mechanical Systems ή MEMS είναι αυτό στο οποίο κάποια μηχανολογικά στοιχεία όπως μεμβράνες και υποστηρίγματα κατασκευάζονται στην κλίμακα του επιπέδου των μικροηλεκτρονικών κυκλωμάτων αντί αυτού των συμβατικών στοιχείων κατασκευασμένων σε τόρνο. Χαρακτηριστικά παραδείγματα συσκευών τύπου MEMS στην καθημερινότητα είναι ένας

αναλώσιμος βιομετρικός αισθητήρας, μια κεφαλή εκτυπωτή ψεκασμού μελάνης και ένας αισθητήρας ενεργοποίησης αερόσακου.

Κοινό χαρακτηριστικό όλων των συσκευών MEMS είναι η παρουσία στοιχείων μεγέθους κάτω των $100\mu m$, μια αρχή την οποία μοιράζονται και τα μικροηλεκτρονικά συστήματα τα οποία όμως παρουσιάζουν μια σημαντική διαφορά στη δομή τους. Η διαφορά είναι ότι η δομή των μικροηλεκτρονικών είναι συμπαγής και παρουσιάζει συνοχή, ενώ στα συστήματα MEMS υπάρχουν διάκενα, οπές, μεμβράνες, υποστηρίγματα, τα οποία κατά κάποιο τρόπο προσομοιάζουν περισσότερο μια μηχανολογική κατασκευή παρά μια ηλεκτρονική.



Εικόνα 2.1: Αισθητήρας MEMS σε κλίμακα των $100\mu m$ (*Application guide – Tilt sensors, GEOSENSE*)

Η τεχνολογία MEMS έχει τη δυνατότητα να προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα και κάποιοι από τους λόγους για τους οποίους αναπτύσσεται συνεχώς, είναι η μείωση του μεγέθους των υπάρχοντων συσκευών, η δυνατότητα ανάπτυξης νέων υπηρεσιών βασιζόμενων σε παροχές οι οποίες δεν προσφέρονται στη μεγάλη κλίμακα, καθώς και η δυνατότητα αλληλεπίδρασης με τον μικρόκοσμο μέσω νέων εργαλείων. Σημαντικό ρόλο επίσης παίζει η μείωση του κόστους που επιφέρει η σμίκρυνση των συσκευών λόγω μείωσης του χρησιμοποιούμενου υλικού, ενώ οι μικρότερες διαστάσεις τους συμβάλλουν επίσης στην αποτελεσματικότερη αξιοποίηση του διαθέσιμου χώρου.

2.3 Επιταχυνσιόμετρο MEMS

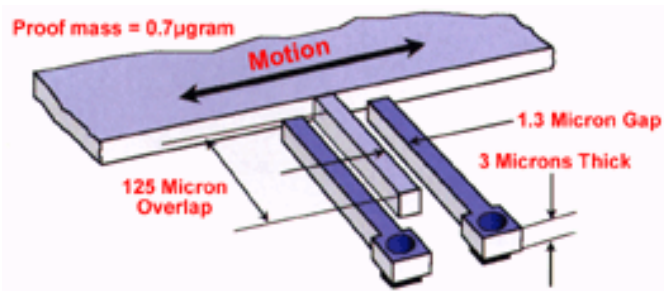
Στα συστήματα μέτρησης κλίσης απαιτείται ένας συνδυασμός εξαρτημάτων και στοιχείων, ο οποίος διαφέρει αναλόγως με το σύστημα, την εφαρμογή στην οποία χρησιμοποιείται και τα μέσα τα οποία διατίθενται για τη λήψη των δεδομένων. Τα επιταχυνσιόμετρα τεχνολογίας MEMS είναι ένας από τους δύο τύπους επιταχυνσιόμετρων που χρησιμοποιούνται στα κλινοόμετρα και αποτελούν σχετικά πρόσφατη καινοτομία. Η δεύτερη κατηγορία επιταχυνσιόμετρων είναι τα σερβο-επιταχυνσιόμετρα, τα οποία

χρησιμοποιούνται από το 1969 και παρέχουν την υψηλότερη ακρίβεια επιταχυνσιομέτρου διαθέσιμη στην αγορά, (Machan and Bennet, 2008).

Το επιταχυνσιόμετρο είναι μια ηλεκτρο-μηχανολογική συσκευή που μετρά τόσο τη στατική επιτάχυνση (λόγω βαρύτητας) όσο και τη δυναμική (λόγω κίνησης ή δονήσεων). Τα συμβατικά επιταχυνσιόμετρα βασίζονται στη χρήση πιεζοηλεκτρικών και ηλεκτροχωρητικών στοιχείων ώστε να μετατρέπουν τις μηχανικές κινήσεις σε ηλεκτρικό σήμα, (Bhattacharya et al., 2012). Η ανάπτυξη της τεχνολογίας MEMS στα επιταχυνσιόμετρα έχει επιφέρει επαναστατικές αλλαγές στις εφαρμογές όπου αυτά χρησιμοποιούνται, μειώνοντας σημαντικά το μέγεθός τους και την κατανάλωση ρεύματος και αυξάνοντας παράλληλα την ακρίβειά τους.

2.3.1 Αρχή λειτουργίας επιταχυνσιομέτρου

Κοινή βασική αρχή στη λειτουργία όλων των ηλεκτρικών επιταχυνσιομέτρων είναι ο υπολογισμός της ασκούμενης εξωτερικής δύναμης μέσω μιας αδρανούς μάζας αναρτημένης σε ένα ελατήριο. Η εφαρμογή μιας εξωτερικής επιτάχυνσης μπορεί να υπολογιστεί από τη σχετική μεταβολή της θέσης της μάζας. Για τον υπολογισμό αυτό χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνικές όπως το πιεζοηλεκτρικό φαινόμενο, όπου η ασκούμενη επιτάχυνση σε ένα σώμα προκαλεί την παραμόρφωση του ελατηρίου και την παραγωγή ηλεκτρικής τάσης από περιεχόμενες κρυσταλλικές δομές στο υλικό του. Ακόμη μία από τις κυριότερες τεχνικές είναι η μέτρηση της χωρητικότητας που επάγεται μεταξύ δύο πλακών, (Lee et al., 2012).



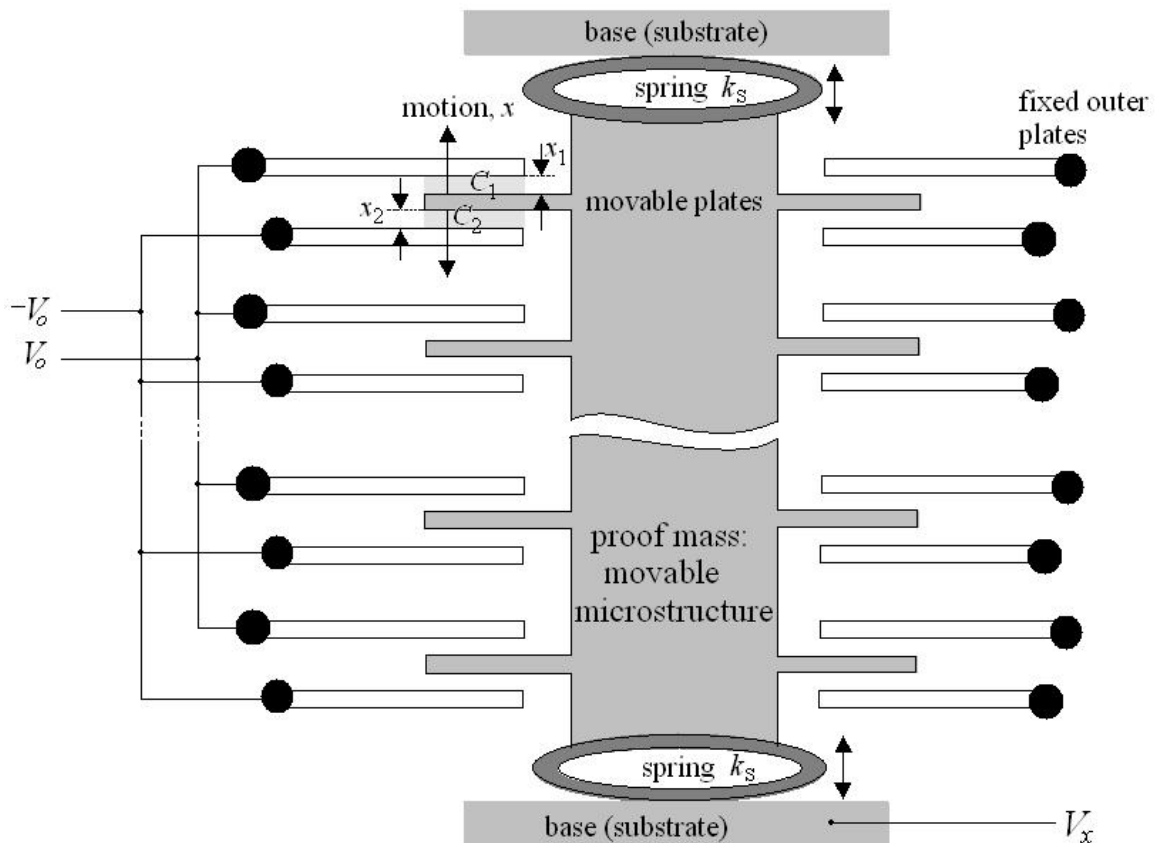
Σχήμα 2.1: Μηχανολογική δομή τυπικού αισθητήρα MEMS (Application guide – Tilt sensors, GEOSENSE)

Η τεχνική της μέτρησης χωρητικότητας μεταξύ πλακών βρίσκει εφαρμογή σε πολλές τεχνολογίες της μικρομηχανολογίας, καθώς παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία στις μετρήσεις καθώς επίσης και χαμηλή ευαισθησία στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Η μεταβολή της χωρητικότητας εξαρτάται μόνο από μεταβολές στη γεωμετρία του πυκνωτή και είναι ανεξάρτητη του υλικού της βάσης του. Η σχέση που περιγράφει τη χωρητικότητα μεταξύ παράλληλων πλακών είναι:

$$C_0 = \epsilon_0 \epsilon \frac{A}{d} = \epsilon_A \frac{1}{d},$$

όπου: ϵ_0 η ηλεκτρική διαπερατότητα του κενού, $\epsilon_A = \epsilon_0 \epsilon A$, A είναι η επιφάνεια των ηλεκτροδίων, d η απόσταση μεταξύ τους και ϵ η ηλεκτρική διαπερατότητα του μέσου που διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια. Η μεταβολή αυτών των μεταβλητών έχει ως αποτέλεσμα τη μεταβολή της χωρητικότητας και χρησιμοποιείται στα συστήματα MEMS, όπου για παράδειγμα ένας αισθητήρας υγρασίας βασίζεται στη μεταβολή του ϵ , ενώ ένα επιταχυνσιόμετρο στη μεταβολή του d ή του A .

Ένα τυπικό επιταχυνσιόμετρο τύπου MEMS αποτελείται από μία μετακινούμενη αδρανή μάζα (proof mass) με παράλληλες πλάκες η οποία είναι στερεωμένη μέσω μηχανικής ανάρτησης σε ένα επίπεδο αναφοράς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3. Το σύστημα αποτελείται από κινούμενες πλάκες και από σταθερές εξωτερικές πλάκες οι οποίες αναπαριστούν πυκνωτές. Μετρώντας τη μεταβολή της χωρητικότητας είναι δυνατός ο υπολογισμός της μετακίνησης της αδρανούς μάζας.



Σχήμα 2.2: Δομή επιταχυνσιόμετρου τύπου MEMS (Constantinescu et al., 2013)

Οι χωρητικότητες C_1 και C_2 στον κενό χώρο μεταξύ της κινούμενης και των δύο σταθερών πλακών είναι συνάρτηση των αντίστοιχων μετατοπίσεων x_1 και x_2 .

$$C_1 = \epsilon_A \frac{1}{x_1} = \epsilon_A \frac{1}{d+x} = C_0 - \Delta C, \quad C_2 = \epsilon_A \frac{1}{x_2} = \epsilon_A \frac{1}{d-x} = C_0 + \Delta C$$

Μία ασκούμενη επιτάχυνση προκαλεί μετατόπιση της αδρανούς μάζας κατά x , ενώ εάν η επιτάχυνση είναι μηδέν, οι χωρητικότητες C_1 και C_2 είναι ίσες καθώς $x_1 = x_2$. Εάν $x \neq 0$, η διαφορά χωρητικότητας προκύπτει από τις άνω σχέσεις ως:

$$C_2 - C_1 = 2\Delta C = 2\epsilon_A \frac{x}{d^2 - x^2}$$

Μπορεί συνεπώς να γίνει ο υπολογισμός της μετακίνησης x μετρώντας το ΔC και επιλύοντας την αλγεβρική εξίσωση:

$$\Delta C x^2 + \epsilon_A x - \Delta C d^2 = 0$$

Η ανωτέρω σχέση μπορεί να απλοποιηθεί απαλείφοντας τον όρο $\Delta C x^2$, ο οποίος είναι αμελητέος για πολύ μικρές μετατοπίσεις. Συνεπώς, προκύπτει:

$$x \approx \frac{d^2}{\epsilon_A} = d \frac{\Delta C}{C_0}, \quad (1)$$

από την οποία σχέση συμπεραίνεται πως η μετατόπιση είναι σχεδόν ανάλογη της διαφοράς χωρητικότητας ΔC .

Η δομή του αισθητήρα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.2 αποτελείται από πολλές ομάδες πυκνωτών. Τα άνω στελέχη των πυκνωτών χωρητικότητας C_1 είναι συνδεδεμένα παράλληλα μεταξύ τους με μία υψηλή ηλεκτρική τάση $+V$ ενώ τα κάτω στελέχη χωρητικότητας C_2 συνδέονται με χαμηλή τάση $-V$, ώστε η διαφορά μεταξύ των C_1 και C_2 να είναι επαρκώς μετρήσιμη. Επομένως, καθώς πρόκειται για πανομοιότυπες ομάδες πυκνωτών, η σχέση (1) δεν θα ισχύει μόνο για έναν πυκνωτή αλλά για το σύνολο του συστήματος.

2.4 Γυροσκόπιο

Η ανάπτυξη γυροσκοπικών αισθητήρων στη μικροσκοπική κλίμακα έχει παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη μετά την πρόσβαση στην τεχνολογία σε μικροσκοπικό επίπεδο. Η τεχνολογία αυτή έκανε δυνατή την ανάπτυξη νέων γυροσκοπικών αισθητήρων μεγαλύτερης ακρίβειας, οι οποίοι παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τους προκατόχους τους σε μακροσκοπική κλίμακα, όπως χαμηλότερο κόστος και χαμηλότερη κατανάλωση. Αποτέλεσμα αυτών των πλεονεκτημάτων είναι ένα έντονο ερευνητικό ενδιαφέρον στην περιοχή σε παγκόσμιο επίπεδο, και μια συνεχής βελτίωση των επιδόσεων των μικρο-γυροσκοπίων της τάξης του $\times 10$ κάθε 2 χρόνια από το 1991.

2.4.1 Αρχή λειτουργίας γυροσκοπίου

Η λειτουργία ενός κλασσικού γυροσκοπίου βασίζεται στους νόμους κίνησης του Νεύτωνα. Ο πρώτος νόμος δηλώνει πως για τη μεταβολή του διανύσματος της ταχύτητας ενός περιστρεφόμενου αντικειμένου, απαιτείται η επιβολή κάποιας δύναμης. Ο δεύτερος νόμος

δηλώνει πως όσο μεγαλύτερη είναι η μάζα ενός αντικειμένου τόσο περισσότερο ανθεκτικό είναι αυτό στη μεταβολή του διανύσματος της ταχύτητάς του.

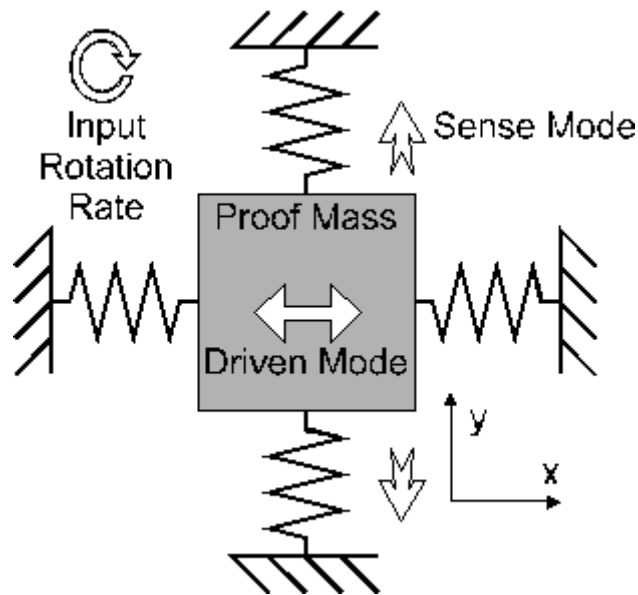
Η κατασκευή ενός γυροσκοπίου συνεπώς γίνεται με την ανάρτηση μιας κινούμενης μάζας μέσω ελατηρίων, επιτρέποντάς της έτσι την κίνηση γύρω από το κέντρο βάρους της και στους τρεις άξονες, μέσω μιας υποστήριξης χωρίς τριβή η οποία θα προσφέρει τρεις βαθμούς ελευθερίας κατά τη γωνιακή περιστροφή, σε συνδυασμό με τρεις βαθμούς περιορισμού για την περίπτωση της γραμμικής κίνησης. Μια τέτοια συσκευή μπορεί συνεπώς να παρέχει πληροφορίες για το γωνιακό προσανατολισμό της συσκευής σύμφωνα με αυτόν της κινούμενης μάζας.

Οι τρεις βασικοί τύποι γυροσκοπίου είναι:

- a) Περιστρεφόμενης μάζας
- b) Οπτικό
- c) Δονούμενης μάζας

Το γυροσκόπιο τύπου δονούμενης μάζας είναι ο τύπος που χαρακτηρίζει τα περισσότερα μικρο-γυροσκόπια τύπου MEMS (Micro Electro Mechanical System) και αποτελείται από ένα δονούμενο στοιχείο, το οποίο όταν περιστραφεί υπόκειται σε μια δευτερεύουσα κίνηση κάθετη στην κίνηση δόνησης λόγω του φαινομένου Coriolis. Το φαινόμενο Coriolis περιλαμβάνει την επαγωγή μιας δευτερεύουσας αδρανειακής επιτάχυνσης με διεύθυνση κάθετη στον άξονα κίνησης, όταν περιστραφεί ένα δονούμενο αντικείμενο. Η μέτρηση της δευτερεύουσας αυτής κίνησης είναι αυτή που επιτρέπει τον υπολογισμό του βαθμού της γωνιακής περιστροφής.

Η κατασκευή ενός μικροσκοπικού γυροσκοπίου περιλαμβάνει την ανάρτηση μιας αδρανούς μάζας από ένα σύστημα ελατηρίων, ακολουθώντας μια διαφορετική προσέγγιση από αυτή του κλασσικού μακροσκοπικού γυροσκοπίου το οποίο περιλαμβάνει ένα περιστρεφόμενο δακτύλιο, καθώς μια αντίστοιχη κατασκευή στη μικροσκοπική κλίμακα θα απαιτούσε την ύπαρξη μικροσκοπικών ρουλεμάν, πράγμα ασύμφορο και μη πρακτικό. Η μάζα αυτή υπόκειται σε μια συνεχή παλινδρομική κίνηση με τη μορφή δόνησης (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3: Σχηματική παράσταση της αρχής λειτουργίας MEMS γυροσκοπίου (Elliot et al., 2002)

Στην παραπάνω διάταξη, η αδρανής μάζα (proof mass) εισέρχεται σε καθεστώς ταλάντωσης κατά τον x-άξονα (Drive axis) παράλληλα στο υποκείμενο υπόστρωμα. Αφού ξεκινήσει η ταλάντωση, η μάζα είναι ευαίσθητη σε γωνιακή περιστροφή γύρω από τον z-άξονα ο οποίος είναι κατακόρυφος στο υπόστρωμα. Η περιστροφή αυτή σε συνδυασμό με την παλινδρομική κίνηση κατά τον x, προκαλεί μια επιτάχυνση Coriolis κατά τον y-άξονα (sense axis) η οποία μετατοπίζει τη μάζα.

Η αρχή λειτουργίας σε όλα τα γυροσκόπια τύπου δονούμενης μάζας βασίζεται στη μέτρηση της μετατόπισης που προκαλείται λόγω της επιτάχυνσης από το φαινόμενο Coriolis. Η επιτάχυνση Coriolis ασκείται σε ένα σώμα το οποίο κινείται γραμμικά σε ένα επίπεδο αναφοράς όταν το σώμα περιστρέφεται γύρω από έναν άξονα κάθετο στο επίπεδο της γραμμικής κίνησης. Η επιτάχυνση ασκείται κατά τον άξονα ο οποίος είναι κάθετος στο επίπεδο που ορίζει το διάνυσμα της γραμμικής κίνησης και αυτό του άξονα περιστροφής και το μέγεθος της είναι ανάλογο του ρυθμού περιστροφής. Έτσι προκύπτει η σχέση:

$$F_c = 2mv \cdot \Omega,$$

όπου F_c η δύναμη λόγω του φαινομένου, m η δονούμενη μάζα, v η γραμμική ταχύτητα κίνησής της και Ω η ταχύτητα περιστροφής της μάζας.

Συνεπώς, καθώς η δύναμη Coriolis δρα σε ορθογώνια διεύθυνση επί της γραμμικής κίνησης, απαιτούνται δύο βαθμοί ελευθερίας στο μικρο-γυροσκόπιο, αυτοί της γραμμικής και της δευτερεύουσας κίνησης. Για το λόγο αυτό, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.3 υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά μέρη σε ένα μικρο-γυροσκόπιο τα οποία είναι: η αδρανής μάζα (proof mass), ένα ελαστικό ελατήριο, ένας αποσβεστήρας και μια μέθοδος μέτρησης της μετατόπισης της μάζας. Η αδρανής μάζα δέχεται την αδρανειακή επιτάχυνση η οποία προκαλείται από τη γωνιακή περιστροφή του γυροσκοπίου, ενώ για τη μηχανική επαναφορά της μάζας στην αρχική της θέση μόλις σταματήσει η επιτάχυνση, είναι

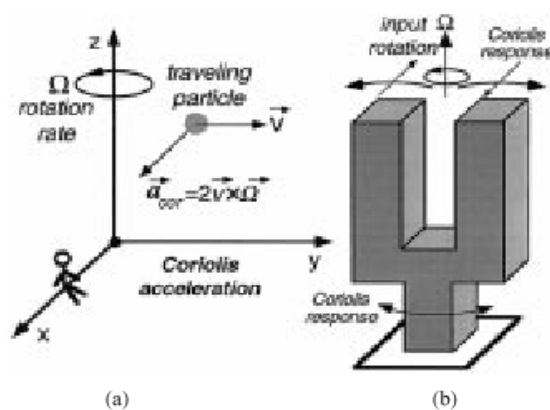
απαραίτητο το ελατήριο. Η μετατόπιση της μάζας είναι συνήθως πολύ μικρή και η μέτρησή της γίνεται μετατρέποντάς τη σε κάποια μορφή ηλεκτρικού σήματος.

Οι κυριότερες μέθοδοι για τη μετατροπή αυτή είναι η ηλεκτροχωρητική και η πιεζοηλεκτρική μέθοδος. Η ηλεκτροχωρητική μέθοδος περιλαμβάνει τη μέτρηση της μεταβολής της χωρητικότητας μεταξύ της αδρανούς μάζας και ενός σταθερού ηλεκτροδίου όταν η μάζα πλησιάζει ή απομακρύνεται από αυτό. Η πιεζοηλεκτρική μέθοδος βασίζεται στην ιδιότητα των πιεζοηλεκτρικών υλικών να μεταβάλλουν την ηλεκτρική αντίστασή τους ανάλογα με την επιμήκυνση ή συμπίεσή τους. Εμπριέχοντας τέτοια υλικά στα στοιχεία που συγκρατούν την κινούμενη μάζα όπως το ελατήριο ή οι δοκοί στήριξης είναι δυνατός ο υπολογισμός της μετατόπισης της μάζας μετρώντας τη μεταβολή στην αντίστασή τους.

Δονούμενο Γυροσκόπιο τύπου διαπασών (tuning fork) του Charles Stark Draper

Laboratory

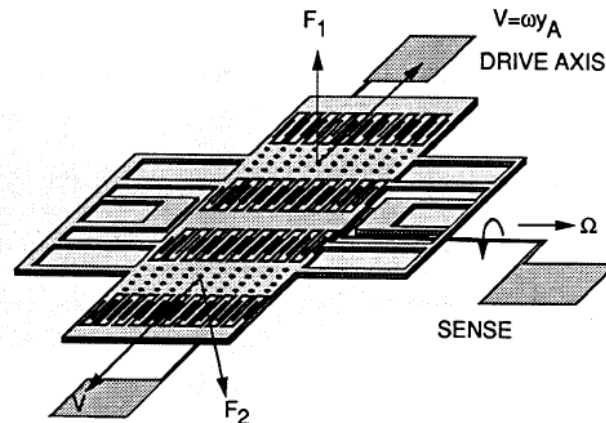
Τα γυροσκόπια τύπου διαπασών αποτελούν κλασικό παράδειγμα δονούμενου γυροσκοπίου. Το διαπασών αποτελείται από δύο στελέχη και ένα κορμό που σχηματίζουν Y όπως φαίνεται στην Σχήμα 2.4. Κατά τη λειτουργία, τα στελέχη αντηχούν διαφορετικά με σταθερό πλάτος και μόλις περιστραφούν, η δύναμη Coriolis προκαλεί την ανάπτυξη μιας διαφορετικής ημιτονοειδούς δύναμης ορθογώνιας στην διεύθυνση της δόνησης σε καθένα από τα στελέχη. Η δύναμη αυτή ανιχνεύεται είτε ως διαφορικός λυγισμός των στελεχών του διαπασών είτε ως στρεπτική δόνηση του κορμού του.



Σχήμα 2.4: Δονούμενο γυροσκόπιο τύπου διαπασών (Yazdi et al., 1998)

Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή της αντήχησης στην δομή είναι είτε ηλεκτροχωρητικοί, ηλεκτροστατικοί ή ηλεκτρομαγνητικοί, ενώ οι μηχανισμοί για την ανίχνευση της επαγόμενης δόνησης Coriolis είναι πιεζοηλεκτρικοί είτε ηλεκτροχωρητικοί. Η κατασκευή του γυροσκοπίου τύπου διαπασών πάνω σε πλακέτες πυριτίου (silicon chips) αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Charles Stark Draper Laboratory στις Η.Π.Α., ενός Αμερικάνικου οργανισμού με μεγάλη συνεισφορά στην έρευνα και ανάπτυξη αδρανειακών μονάδων για συστήματα πλοήγησης εδώ και πάνω από 60 έτη.

Μια σχηματική αναπαράσταση της λειτουργίας του γυροσκοπίου τύπου διαπασών παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5. Αποτελείται από μια δομή πυριτίου η οποία περιέχει δύο αδρανείς μάζες και αφού ο αισθητήρας τεθεί σε λειτουργία μέσω μιας εξωτερικής τάσης τότε η δομή πυριτίου εισέρχεται σε καθεστώς δόνησης με γραμμική ταχύτητα V . Στη συνέχεια, αφού εφαρμοστεί μια περιστροφική κίνηση γύρω από τον άξονα εισαγωγής της περιστροφής που είναι κάθετος στον άξονα του διανύσματος της ταχύτητας V , προκαλείται η κίνηση της μιας μάζας προς τα κάτω και της άλλης προς τα πάνω από τις δυνάμεις Coriolis. (Elliot et al., 2002)



Σχήμα 2.5: Σχηματική αναπαράσταση του γυροσκοπίου MEMS τύπου διαπασών, όπου Ω ο ρυθμός εισαγωγής της περιστροφής, F_1 και F_2 οι δυνάμεις Coriolis και V η ταχύτητα οριζόντιας κίνησης (Bernstein et al., 1993)

Η κίνηση των δύο μαζών γίνεται σε ίσες και αντίθετες κατευθύνσεις συνιστώντας μια συνολική αντιπαράλληλη κίνηση. Η παραγόμενη αυτή κίνηση μετράται μέσω πυκνωτών που βρίσκονται κάτω από τις μάζες παράγοντας ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με το ρυθμό περιστροφής.

2.5 Κλινόμετρο

Το κλινόμετρο (tilt meter) είναι όργανο μέτρησης που χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό στροφής και στρέψης μιας κατασκευής, η μέτρηση της οποίας είναι καθοριστική για τον έλεγχο και την ασφάλεια των κτισμάτων, τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

Περιέχει μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος εσώκλειστη σε μεταλλικό περίβλημα πάνω στην οποία είναι εγκατεστημένα ένα ή δύο επιταχυνσιόμετρα τύπου MEMS αν πρόκειται για μονοαξονικό ή διαξονικό κλινόμετρο αντίστοιχα. Η πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος συνήθως συνοδεύεται από ένα σύνθετο σύστημα ρύθμισης σήματος για να εξασφαλίσει τη σταθερότητα και την επαναληψιμότητα των σημάτων εξόδου. Σχεδιασμένα για να μετρούν την κλίση, η εγκατάσταση τους γίνεται σε ειδικές πλάκες, αφού αυτές στερεωθούν η προσαρτηθούν σε μια κατασκευή (Εικόνα 2.2). Η έξοδος του αισθητήρα συνδέεται μέσω καλωδίου με ένα σύστημα ανάγνωσης είτε με ένα καταγραφικό.



Εικόνα 2.2: Κλινόμετρο στερεωμένο σε πλάκα (πηγή: geotechpedia.com)

Ένα κλινόμετρο τελευταίας γενιάς έχει τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

- Μετρά την κλίση σε ένα σημείο ανιχνεύοντας την περιστροφή.
- Με τη χρήση πολλών συσκευών μπορεί να υπολογιστεί η διαφορική μετακίνηση αλλά όχι η απόλυτη.
- Μπορεί να τοποθετηθεί σε οριζόντιες, κάθετες ή κεκλιμένες επιφάνειες (πλάκες).
- Οι πλάκες μπορούν να στερεωθούν σε διαφόρων τύπων επιφάνειες (μέταλλο, τσιμέντο).
- Η στερέωση των πλακών μπορεί να γίνει είτε με κοχλίωση είτε με συγκόλληση.
- Μπορεί να συνδεθεί με αυτόματο σύστημα καταγραφής των μετρήσεων είτε να διαβαστεί επί τόπου με σύστημα ανάγνωσης

Τα κλινόμετρα ως όργανα παρακολούθησης παρουσιάζουν πλεονεκτήματα αλλά και δυσκολίες κατά τη χρήση τους. Τα κύρια μειονεκτήματα των κλινομέτρων είναι η αδυναμία υπολογισμού της απόλυτης μετατόπισης με την τοποθέτηση ενός μόνο οργάνου καθώς επίσης και ότι ο αυτοματισμός των μετρήσεων ο οποίος είναι απαραίτητος ώστε να είναι δυνατή η διαρκής παρακολούθηση μέσω κλινομέτρων, είναι μια δύσκολη και χρονοβόρα διαδικασία (Εικόνα 2.3).

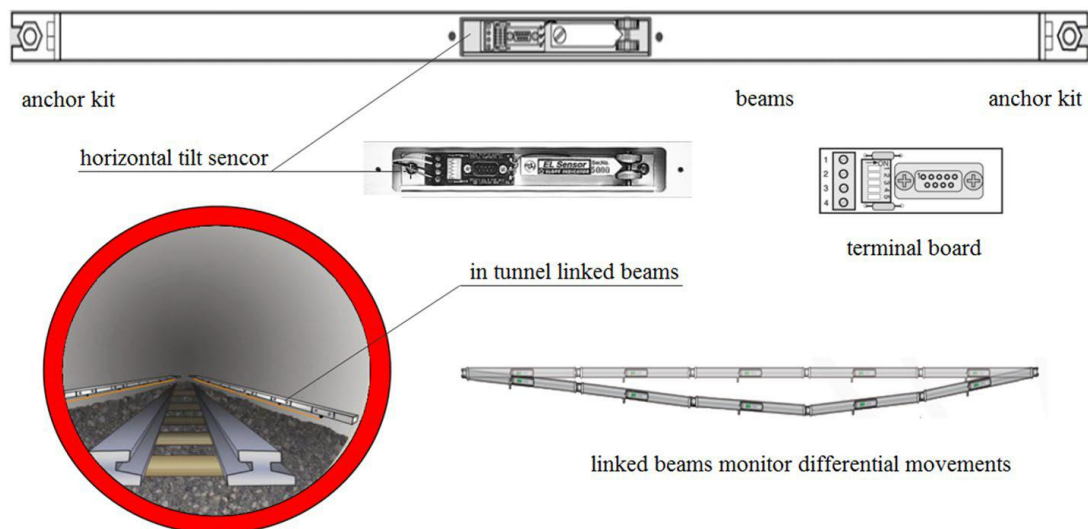


Εικόνα 2.3: Κλινόμετρα στερεωμένα σε πλάκες σε παρειά σήραγγας (πηγή: geotechpedia.com)

2.6 Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων

Ένα ακόμη όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση κλίσης σε γεωτεχνικά έργα είναι οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων. Χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο καθιζήσεων και μεταβολών στη συμπεριφορά του εδάφους οι οποίες προκαλούνται από γειτονικές εργασίες όπως εκσκαφές, αποστραγγίσεις του υδροφόρου ορίζοντα και κατασκευές υπογείων έργων (Γεωργιάννου, 2000). Η χρήση τους είναι αρκετά διαδεδομένη στο πεδίο και σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με τα κλινόμετρα. Οι βασικές διαφορές τους με τα κλινόμετρα είναι οι εξής:

- Καθώς το μήκος των ράβδων είναι προκαθορισμένο μεταξύ 1 και 3 μέτρων, οι μεταβολές στην κλίση (π.χ. λόγω καθίζησης, ανύψωσης ή σύγκλισης σε μια σήραγγα) μετατρέπονται εύκολα και γρήγορα σε μετακίνηση (Εικόνα 2.4).
- Είναι δυνατή η σύνδεση ράβδων στη σειρά οπότε μετρούνται σχετικές μετατοπίσεις και διαφορικές καθιζήσεις.



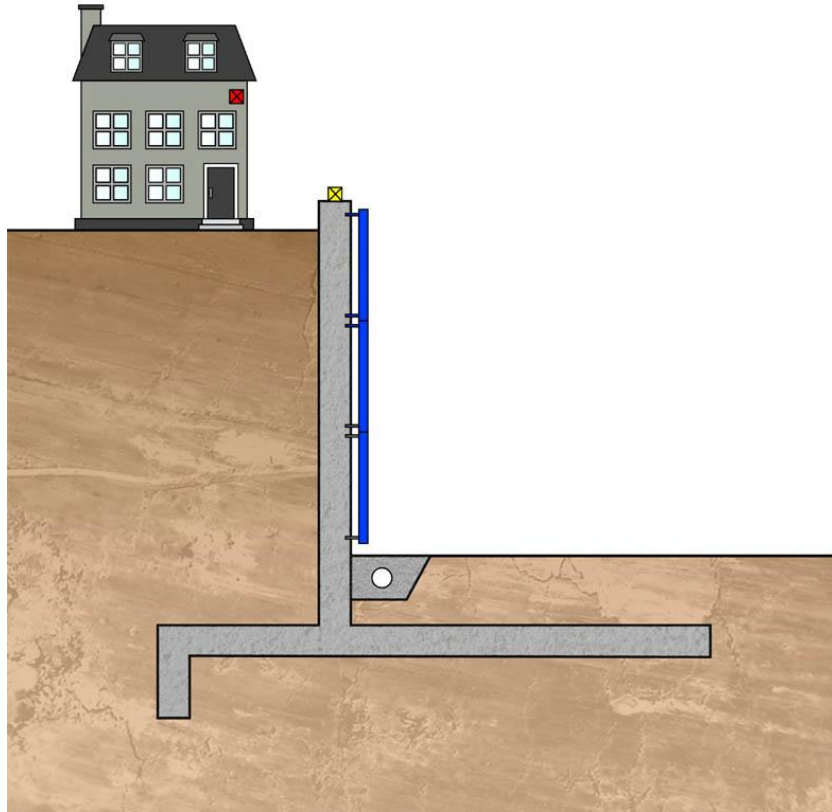
Εικόνα 2.4: Ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων και εφαρμογή τους (Li and Yuan., 2016)

2.7 Τυπικές εφαρμογές στο πεδίο

Τα κλινομέτρα και οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση μεταβολών της κλίσης κατασκευών και τεχνικών. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να οφείλονται σε κατασκευαστικές δραστηριότητες όπως σφραγγοποιία, εκσκαφή, υποβιβασμός του υδροφόρου ορίζοντα και φόρτιση του εδάφους. Επιπλέον, αλλαγές στην κλίση μπορεί να προκαλέσουν και φυσικά φαινόμενα όπως κατολισθήσεις, ριπές ανέμου και πλημμύρες. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις συνηθέστερες εφαρμογές τους στο πεδίο:

Τοίχοι αντιστήριξης

Μια τυπική εφαρμογή των κλινομέτρων και των ράβδων ηλεκτρολυτικών αισθητήρων αποτελεί η χρήση τους σε τοίχους αντιστήριξης. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μετρήσουν μετακινήσεις πριν, κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της κατασκευής του τοίχου, καθώς και να μετρήσουν μετακινήσεις και μεταβολές στην κλίση σε γειτονικά κτίρια (Σχήμα 2.6).

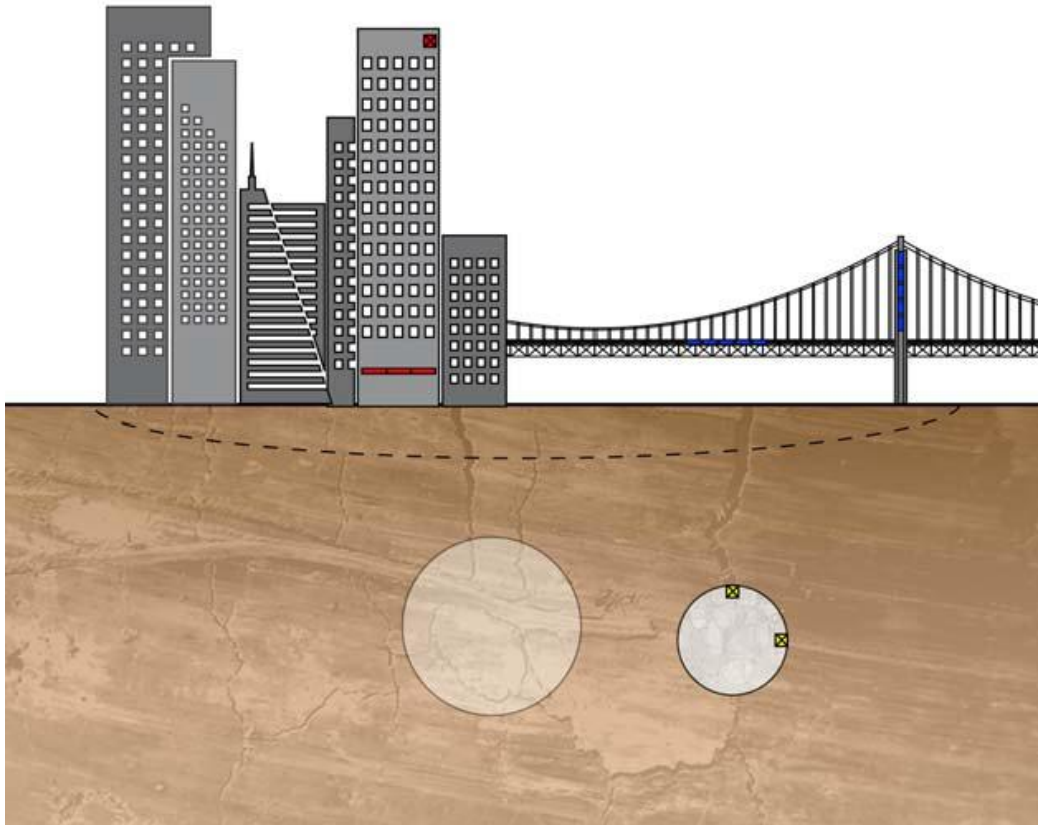


Σχήμα 2.6: Διάταξη οργάνων μέτρησης κλίσης σε τοίχο αντιστήριξης (Application guide – Tilt sensors, GEOSENSE)

Στο παραπάνω Σχήμα, το κλινόμετρο στην κορυφή του τοίχου (κίτρινο χρώμα) χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση περιστροφικών κινήσεων του τοίχου λόγω καμπτικών ροπών, ενώ το κλινόμετρο στην πρόσοψη του κτιρίου (κόκκινο χρώμα) χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση μεταβολών στην κλίση του κτιρίου λόγω καθιζήσεων ή ανύψωσης. Οι ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων (μπλε χρώμα) χρησιμοποιούνται με σκοπό την παρακολούθηση του τοίχου για πιθανές μετακινήσεις λόγω λυγισμού.

Σηραγγοποιία

Η κατασκευή νέων σηράγγων ειδικά σε αστικές περιοχές μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές καθιζήσεις στην επιφάνεια του εδάφους, επηρεάζοντας έτσι σημαντικά την ασφάλεια και την αξιοπιστία των γειτονικών επιφανειακών κτισμάτων. Για την αποφυγή προκαλούμενων καθιζήσεων χρησιμοποιείται η τεχνική της ενίσχυσης του εδάφους με ενεμάτωση (compensation grouting). Τα κλινόμετρα χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση καθιζήσεων ή/και ανύψωσης κατά την κατασκευή σηράγγων και κατά την ενεμάτωση, όπως επίσης και για την παρακολούθηση μεταβολών της κλίσης κτιρίων. Επίσης, για την παρακολούθηση των καθιζήσεων και της περιστροφής κτιριακών δομών, χρησιμοποιούνται ράβδοι ηλεκτρολυτικών αισθητήρων.



Σχήμα 2.7: Διάταξη οργάνων μέτρησης κλίσης σε υπόγειες και υπαίθριες κατασκευές
(Application guide – Tilt sensors, GEONSENSE)

Στο Σχήμα 2.7 παρατηρείται η χρήση κλινομέτρου και ράβδων ηλεκτρολυτικών αισθητήρων σε κτίριο για παρακολούθηση των μεταβολών της κλίσης λόγω καθιζήσεων (κόκκινο χρώμα) από την επικείμενη κατασκευή της σήραγγας. Επίσης, χρησιμοποιούνται κλινομέτρα στη στέψη και στην παρειά αγωγού που διέρχεται πλησίον και παράλληλα στην υπό κατασκευή σήραγγα με σκοπό την παρακολούθηση πιθανών μετακινήσεων που μπορεί να προκληθούν από τη διάνοιξη της σήραγγας. Η χρήση ράβδων μπορεί να γίνει και σε υπάρχουσες δομές συγκοινωνίας όπως γέφυρες και σιδηροδρομικές γραμμές, όπου βοηθούν ομοίως στην παρακολούθηση καθιζήσεων και μετακινήσεων των έργων.

Κεφάλαιο 3^ο

ΥΛΙΚΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ (HARDWARE)

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται τα υλικά μέρη του συστήματος απομακρυσμένης παρακολούθησης που αναπτύχθηκε. Γίνεται αρχικά μια βασική περιγραφή των εννοιών του μικροεπεξεργαστή, μικροελεγκτή και μικροϋπολογιστή και τονίζονται οι μεταξύ τους διαφορές. Στη συνέχεια, γίνεται παρουσίαση του transducer MPU6050 ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή του κλινομέτρου της παρούσας Διπλωματικής εργασίας καθώς και του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi 3B+, οι οποίοι αποτελούν τα δύο κύρια μέρη του συστήματος.

Παρουσιάζεται επίσης ο τρόπος διασύνδεσης του κλινομέτρου με τον Raspberry μέσω των ακροδεκτών εισόδου-εξόδου, όπως επίσης και ο τρόπος κατασκευής του κλινομέτρου, βασική προδιαγραφή της οποίας αποτέλεσε η πλήρης στερέωση και ακινητοποίηση του αισθητήρα εντός του μεταλλικού κουτιού κατασκευής για ελαχιστοποίηση του θορύβου. Η κατασκευή του οργάνου έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

3.1 Μικροεπεξεργαστές, μικροελεγκτές και μικροϋπολογιστές

Οι όροι μικροεπεξεργαστής, μικροελεγκτής και μικροϋπολογιστής έχουν διακριτές διαφορές μεταξύ τους και συχνά προκαλούν σύγχυση στο ευρύ κοινό κατά τη χρήση τους. Σημαντική για την ορθή χρήση τους είναι η κατανόηση των μεταξύ τους διαφορών όσον αφορά τις τεχνικές λεπτομέρειες.

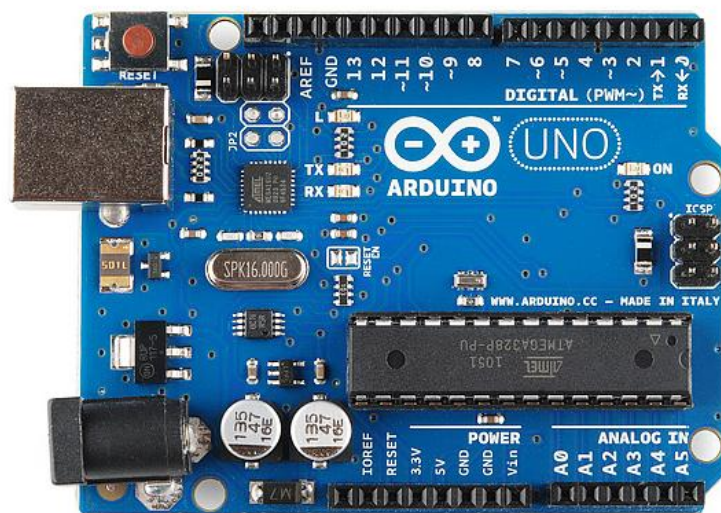
Ο μικροεπεξεργαστής αποτελεί ουσιαστικά μια κεντρική μονάδα επεξεργασίας (Central Processing Unit ή CPU) σχεδιασμένη με την κατάλληλη επεξεργαστική ισχύ για την εκτέλεση των απαραίτητων διαδικασιών στο υπολογιστικό σύστημα. Βρίσκεται υλοποιημένη μέσα σε ένα μοναδικό ολοκληρωμένο κύκλωμα, κάτι που έχει επιτευχθεί στα νεότερα συστήματα, καθώς παλαιότερα μια τέτοια μονάδα επεξεργασίας σχεδιαζόταν χρησιμοποιώντας πολλά διακριτά ολοκληρωμένα κυκλώματα, μεσαίου και μεγάλου βαθμού ολοκλήρωσης.

Με την τοποθέτηση ενός μικροεπεξεργαστή μαζί με τα απαραίτητα κυκλώματα υποστήριξης στο ίδιο υλικό ώστε να σχηματιστεί ένας στοιχειώδης υπολογιστής, προκύπτει η διάταξη που καλείται μικροϋπολογιστής. Εάν για παράδειγμα γύρω από έναν μικροεπεξεργαστή συνδεθούν μνήμη EPROM για την αποθήκευση του λογισμικού, μνήμη RAM για την αποθήκευση των μεταβλητών και των αποτελεσμάτων πράξεων και υπολογισμών, όπως επίσης και μονάδες εισόδου-εξόδου με τη μορφή ακροδεκτών, τότε το αποτέλεσμα θα είναι να σχηματιστεί ένας μικροϋπολογιστής. Συνήθως είναι απαραίτητη η εξωτερική σύνδεση περιφερειακών σε έναν μικροϋπολογιστή, όπως η οθόνη, το ποντίκι και το πληκτρολόγιο, ενώ υπάρχουν περιπτώσεις όπου αυτά είναι μέρος του αυτοτελούς συστήματος.

Ο μικροϋπολογιστής, εκτός από την CPU, είναι εξοπλισμένος με τουλάχιστον μια μνήμη RAM, ενώ συνήθως απαιτείται και η προσθήκη μιας ακόμα μνήμης για τη δυνατότητα εκτέλεσης εργασιών. Λοιπά υποσυστήματα που περιέχονται στον μικροϋπολογιστή είναι το τροφοδοτικό και οι ακροδέκτες εισόδου-εξόδου.

Βασιζόμενοι στη λογική του μικροϋπολογιστή, τοποθετώντας τις παραπάνω διακριτές μονάδες του μικροϋπολογιστή (RAM, CPU, κ.ά.) μέσα στο σώμα του ίδιου ολοκληρωμένου κυκλώματος, προκύπτει η διάταξη που καλείται μικροελεγκτής. Οι μικροελεγκτές εμφανίζονται πλέον σε πολλές διαφορετικές οικογένειες, με την κάθε οικογένεια να περιλαμβάνει τον ίδιο κεντρικό πυρήνα αλλά διαφορετικό περίβλημα, περιφερειακές μονάδες κ.ά..

Μεταξύ άλλων, μερικά κύρια πλεονεκτήματα των μικροελεγκτών είναι το χαμηλό κόστος, η αυτονομία μέσω της ενσωμάτωσης σύνθετων περιφερειακών υποσυστημάτων (όπως μνήμες και θύρες επικοινωνίας), περισσότεροι διαθέσιμοι ακροδέκτες για ψηφιακές εισόδους-εξόδους λόγω της μη δέσμευσής τους για σύνδεση περιφερειακών και το μικρό συνολικά μέγεθος του υπολογιστικού συστήματος. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα μικροελεγκτή είναι ο Arduino, μιας πλατφόρμας που χρησιμοποιείται από ένα ευρύ κοινό για την κατασκευή αυτοσχέδιων ηλεκτρονικών συσκευών και για την υλοποίηση projects αυτοματισμού (Εικόνα 3.1).

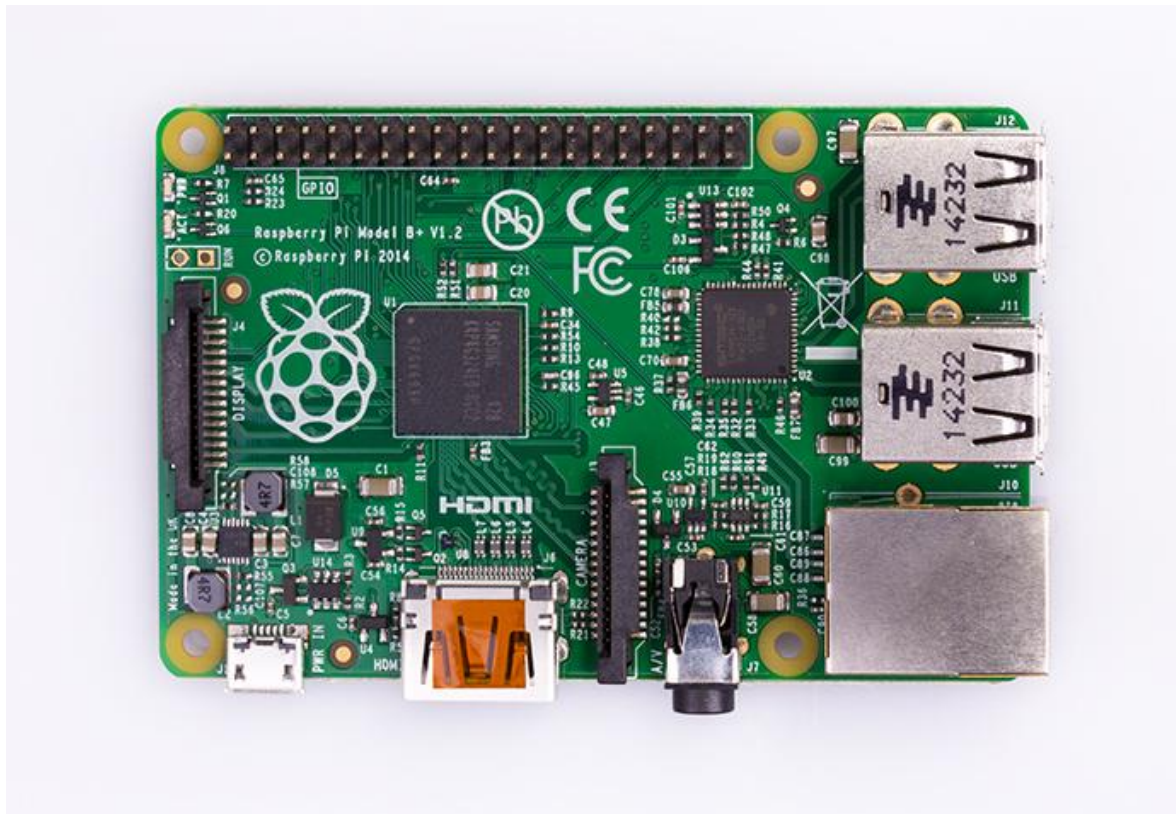


Εικόνα 3.1: Ο μικροελεγκτής Arduino Uno.

3.2 Raspberry Pi 3B+

Ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi 3B+ αποτελεί ένα υπολογιστικό σύστημα σε μια μοναδική πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος μεγέθους πιστωτικής κάρτας. Πρόκειται για ένα πλήρως λειτουργικό υπολογιστικό σύστημα το οποίο παρέχει όλες τις βασικές λειτουργίες ενός προσωπικού υπολογιστή ή laptop όπως για παράδειγμα πλοήγηση στο internet, αναπαραγωγή εικόνας και ήχου υψηλής ευκρίνειας και προγραμματισμό κώδικα. Το

μοντέλο 3B+ το οποίο κυκλοφόρησε το Φεβρουάριο του 2016, αποτελεί την τρίτη γενιά μικροϋπολογιστών Raspberry, έχει διαστάσεις 85x56x17 mm και κόστος 35\$.



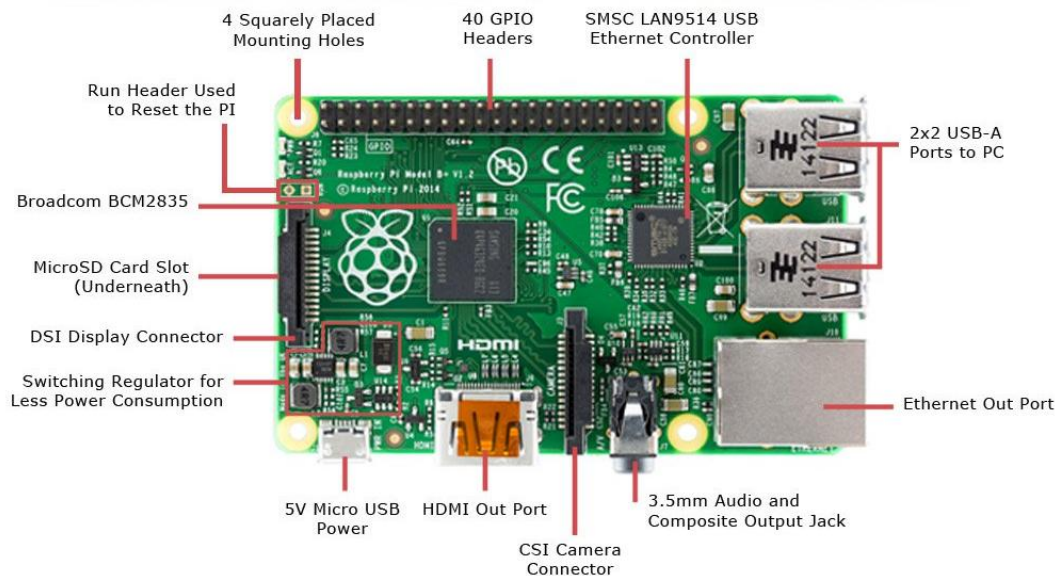
Εικόνα 3.2: Ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi 3B+

Η συσκευή διαθέτει επεξεργαστή Broadcom BCM2837 (Quad Core ARM Cortex-A53, 64bit, 1.2 GHz), 1GB RAM και ενσωματωμένο το chip BCM43438 της Broadcom για σύνδεση σε ασύρματα δίκτυα. Διαθέτει επίσης τις εξής θύρες επέκτασης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2:

- 40 GPIO pins
- 4 USB-A ports to PC
- Ethernet port
- Full HDMI port
- Micro SD card slot
- 5V micro-USB power port
- 3.5mm audio and Composite Output Jack
- DSI Display Connector
- CSI Camera Connector

Η ύπαρξη μιας ευρείας κοινότητας χρηστών ανά τον κόσμο που αναπτύσσει εφαρμογές με τη συγκεκριμένη πλατφόρμα αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα επιλογής της για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας. Το ενσωματωμένο κύκλωμα Wi-Fi, αποτέλεσε επίσης πλεονέκτημα έναντι ανταγωνιστικών συσκευών, που απαιτούν τη

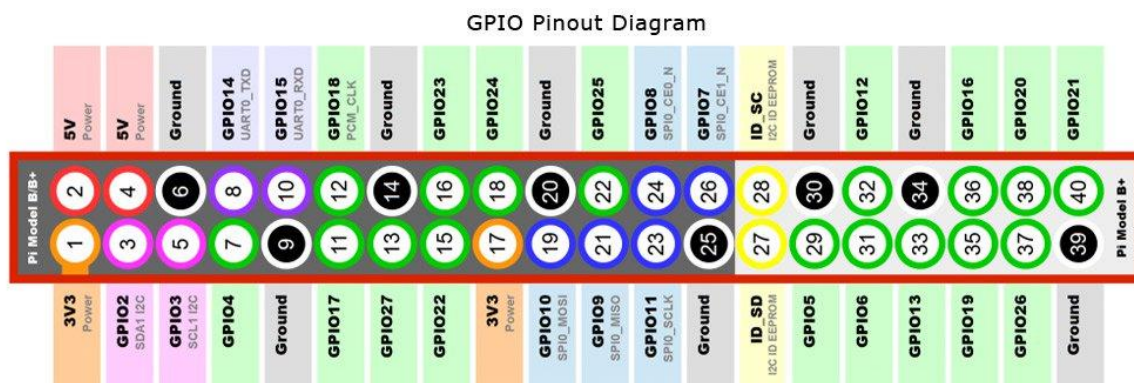
σύνδεση επιπλέον εξοπλισμού για να παρέχουν τη δυνατότητα σύνδεσης σε ασύρματο δίκτυο.



Εικόνα 3.3: Περιγραφή υποδοχών Raspberry Pi 3B+

Η συσκευή διαθέτει 40 συνολικά ακροδέκτες (pins) μέσω των οποίων επιτυγχάνεται η αναλογική και ψηφιακή σύνδεση περιφερειακών συσκευών, ενώ υποστηρίζει τη σύνδεση περιφερειακών μέσω πρωτοκόλλων επικοινωνίας I²C και SPI. Συγκεκριμένα, τα 40 συνολικά pins χωρίζονται σε: 26 digital GPIO pins, 4 pins τροφοδοσίας, 8 pins γείωσης και 2 pins ID EEPROM. Στην Εικόνα 3.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα των ακροδεκτών της συσκευής. Η αρίθμηση των pins γίνεται με 2 τρόπους:

- GPIO numbering: η αρίθμηση που δίνει ο υπολογιστής στα GPIO pins
- Physical numbering: η αρίθμηση των pins ξεκινώντας από το πιο κοντινό στην SD card.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα ακροδεκτών General Pins Input/Output (GPIO)

Για τη σύνδεση του κλινομέτρου είναι απαραίτητη η σύνδεση μέσω διεπαφής I²C η οποία περιγράφεται παρακάτω.

3.3 Πρωτόκολλο επικοινωνίας I²C

Για να μπορέσει να επικοινωνήσει ένας μικροελεγκτής ή μικροεπεξεργαστής με κάποιο περιφερειακό ολοκληρωμένο κύκλωμα, όπως για παράδειγμα έναν Αναλογικό – Ψηφιακό Μετατροπέα, είναι απαραίτητη η διασύνδεση των δύο μέσω ενός πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Τα δύο κυριότερα πρωτόκολλα επικοινωνίας που χρησιμοποιούνται είναι η Μονάδα Σειριακής Περιφερειακής Επικοινωνίας (Serial Peripheral Interface – SPI) και ο Δίαυλος Διασύνδεσης Ολοκληρωμένων Κυκλωμάτων (Inter-Integrated Circuit – I²C).

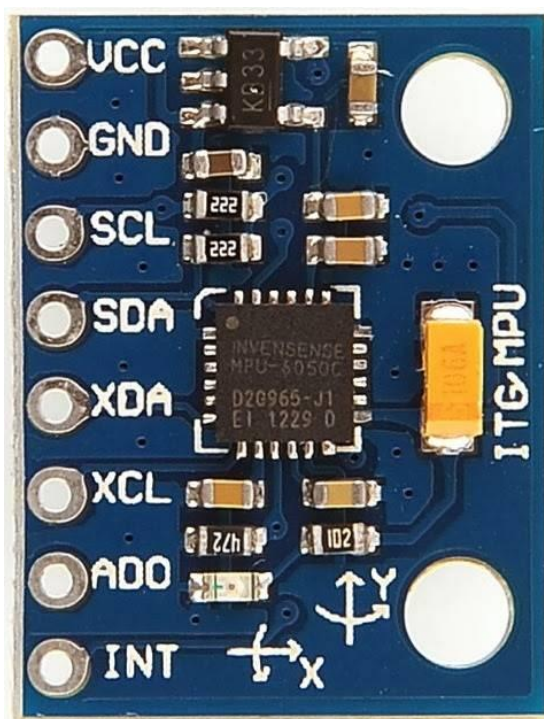
Η διεπαφή μέσω πρωτοκόλλου επικοινωνίας I²C περιλαμβάνει τη σύνδεση τεσσάρων διαφορετικών ακροδεκτών του μικροϋπολογιστή με την περιφερειακή συσκευή μέσω καλωδίων. Συγκεκριμένα, ένα καλώδιο συνδέεται με την τάση τροφοδοσίας (3.3V ή 5V), ένα με τη γείωση (GND), ενώ τα δύο εναπομείναντα SCL και SDA, τα οποία είναι χαρακτηριστικά του πρωτοκόλλου I²C, συνδέονται στις αντίστοιχες θέσεις SCL και SDA της συσκευής. Η γραμμή SCL είναι υπεύθυνη για το χρονισμό της μεταφοράς δεδομένων, ενώ η γραμμή SDA αποτελεί τη γραμμή μεταφοράς δεδομένων.

3.4 Ο MPU6050

Η αισθητήρια μονάδα MPU6050 (Εικόνα 3.5) είναι πλήρης συσκευή παρακολούθησης κίνησης με 6 βαθμούς ελευθερίας που περιέχει επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων καθώς και γυροσκόπιο τριών αξόνων. Πρόκειται για μια μονάδα μέτρησης αδράνειας (Inertia Measurement Unit -IMU) τοποθετημένη σε μια πλακέτα τυπωμένου κυκλώματος (breakout board) η οποία διαθέτει ως πρόσθετο χαρακτηριστικό και αισθητήρα θερμοκρασίας. Η επικοινωνία της γίνεται με δίαυλο επικοινωνίας I²C με μέγιστη ταχύτητα τα 400 kHz και διαθέτει τα εξής κύρια χαρακτηριστικά:

- Τάση λειτουργίας 2.375V – 3.46V
- Επιταχυνσιόμετρο τριών αξόνων τύπου MEMS (Micro Electro-Mechanical System) με επιλογή εύρους από: $\pm 2 / \pm 4 / \pm 8 / \pm 16$ g
- Γυροσκόπιο τριών αξόνων τύπου MEMS με επιλογή εύρους από: $\pm 250 / \pm 500 / \pm 1000 / \pm 2000$ degrees/sec
- 1 δίαυλο I²C για επικοινωνία με τους μικροελεγκτές (λειτουργία ως slave)
- 1 βοηθητικό δίαυλο I²C για επικοινωνία με άλλες συσκευές όπως μαγνητόμετρο (λειτουργία ως master)
- Ρυθμός μετάδοσης δεδομένων εξόδων έως 1kHz

Για τη μετατροπή του σήματος εξόδου του επιταχυνσιομέτρου και του γυροσκοπίου από αναλογικό σε ψηφιακό, ο MPU6050 διαθέτει έναν Αναλογικό-Ψηφιακό Μετατροπέα (ΑΨΜ) 16-bit στην έξοδο κάθε άξονα (X,Y,Z) για κάθε αισθητήρα αντίστοιχα.



Εικόνα 3.5: Ο μετατροπέας MPU6050

Γυροσκόπιο 3^{ωv}-αξόνων MEMS με 16-bit Αναλογικό Ψηφιακό Μετατροπέα

Ο MPU6050 αποτελείται από τρία ανεξάρτητα δονούμενα γυροσκόπια MEMS τα οποία ανιχνεύουν την περιστροφή γύρω από τους άξονες X-, Y- και Z-. Όταν τα γυροσκόπια περιστραφούν γύρω από τους αισθητήριους άξονες, τότε προκαλείται μια επιτάχυνση λόγω του φαινομένου Coriolis η οποία ανιχνεύεται από ένα μετρητή χωρητικότητας. Το παραγόμενο σήμα ενισχύεται και φιλτράρεται παράγοντας μία τάση η οποία είναι ανάλογη του ρυθμού περιστροφής. Στη συνέχεια η τάση αυτή ψηφιοποιείται μέσω ενός Αναλογικού Ψηφιακού Μετατροπέα των 16-bit σε κάθε άξονα. Το εύρος της ψηφιακής εξόδου των γυροσκοπίων μπορεί να προγραμματιστεί ψηφιακά σε ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ή ± 2000 μοίρες ανά δευτερόλεπτο.

Επιταχυνσιόμετρο 3^{ωv}-αξόνων MEMS με 16-bit Αναλογικό Ψηφιακό Μετατροπέα

Το επιταχυνσιόμετρο 3^{ωv}-αξόνων του MPU6050 χρησιμοποιεί ξεχωριστές αδρανείς μάζες για κάθε άξονα. Η επιτάχυνση σε ένα συγκεκριμένο άξονα προκαλεί μετατόπιση στην αντίστοιχη αδρανή μάζα, η οποία ανιχνεύεται από έναν αισθητήρα χωρητικότητας. Όταν η συσκευή τοποθετηθεί ακίνητη σε επίπεδη επιφάνεια, τότε θα μετράει 0g στους άξονες X- και Y- και 1g στον άξονα Z-. Σε κάθε άξονα υπάρχει ένας Αναλογικός Ψηφιακός Μετατροπέας για να παρέχει τις ψηφιακές εξόδους, το εύρος των οποίων μπορεί να προγραμματιστεί σε ± 2 , ± 4 , ± 8 , ή ± 16 g.

3.5 Κατασκευή κλινομέτρου

Για την κατασκευή του κλινομέτρου χρησιμοποιήθηκαν τα εξαρτήματα που αναφέρονται παρακάτω, σε συνδυασμό πάντα με όλον τον απαραίτητο εξοπλισμό για τις απαιτούμενες κατεργασίες, όπως σταθμό κόλλησης, πολύμετρο, παχύμετρο, δράπανο, κ.ά., τον οποίο παρείχε το Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ. Τη συνολική επιμέλεια κατασκευής του οργάνου και των επιμέρους μερών του καθώς και της αυτοσχέδιας θύρας USB, ανέλαβε ο Δρ. Λιγνός Ξενοφών, επιστημονικός υπεύθυνος του Εργαστηρίου Μεταλλικών Κατασκευών, με τη βοήθεια των επιστημονικών συνεργατών του κ. Κατσατσίδα Στέλιου και κ. Παπαβιέρρου Σπύρου.

1x Επιταχυνσιόμετρο και γυροσκόπιο 3 αξόνων IMU – MPU6050

1x Πλαστική επιφάνεια πάχους ~3mm

1x Κουτί κατασκευών 64x58x35mm – Μεταλλικό

1x Καλώδιο USB 2.0 A σε B μήκους 5m

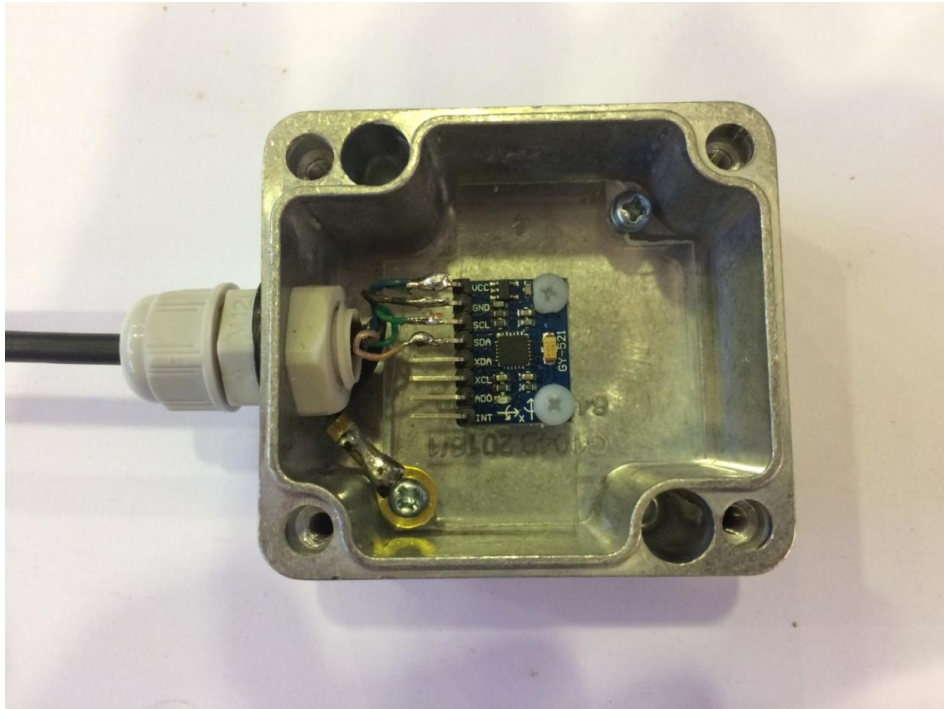
1x Στυπιοθλήπτης M16

2x Νάilon βίδα M3 – μήκους 5mm + 2x Νάilon παξιμάδι M3

Εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών

Πρώτο στάδιο της κατασκευής ήταν η διάνοιξη οπής στο μεταλλικό κουτί στο πάχος του στυπιοθλήπτη, μέσα από τον οποίο θα περνούσε και θα στερεωνόταν το κομμένο άκρο του καλωδίου USB για να φτάσει στον αισθητήρα. Στη συνέχεια έγινε στερέωση του αισθητήρα MPU6050 σε μια σκληρή πλαστική επιφάνεια πάχους περίπου 3mm, μέσω των δύο οπών διαμέτρου ~5mm τις οποίες φέρει στα άκρα του. Η πλαστική επιφάνεια διαμορφώθηκε κατάλληλα ώστε να μπορέσει με τη σειρά της να στερεωθεί εντός του μεταλλικού κουτιού κατασκευής.

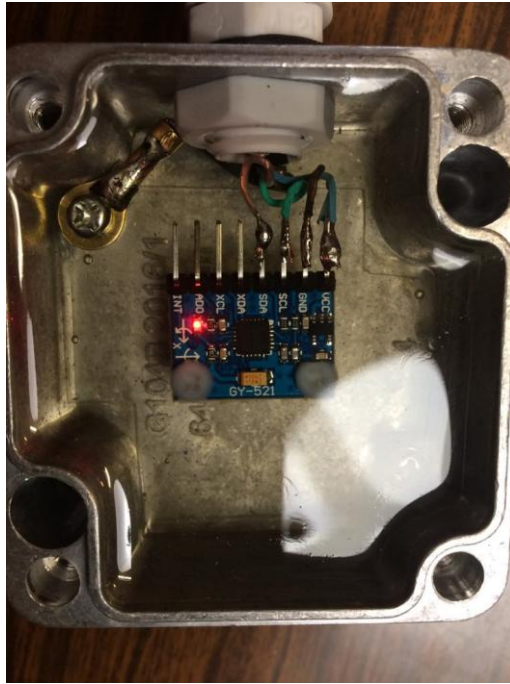
Για τη στερέωση του αισθητήρα στο πλαστικό φιλμ, μετρήθηκε η διάμετρος των οπών με παχύμετρο και επιλέχθηκε το πάχος του στελέχους για τις βίδες που θα χρησιμοποιηθούν. Αφού ανοίχθηκαν οι οπές στα αντίστοιχα σημεία του πλαστικού φιλμ με κατάλληλο εργαλείο, χρησιμοποιήθηκαν νάilon βίδες και παξιμάδια για τη στερέωση του αισθητήρα με σκοπό την αποφυγή περίπτωσης βραχυκυκλώματος. Το πλαστικό φιλμ βιδώθηκε στη συνέχεια εντός του κουτιού κατασκευής σε δύο προϋπάρχουσες αντιδιαμετρικές οπές.



Εικόνα 3.6: Ο αισθητήρας MPU6050 τοποθετημένος στο κουτί κατασκευής πριν από την πλήρωσή του με ρητίνη

Αφού ολοκληρώθηκε η παραπάνω διαδικασία, έγινε αποκοπή του καλωδίου USB στο άκρο όπου έφερε την απόληξη USB A και απογύμνωση των περιεχόμενων καλωδίων με σκοπό την κόλληση του κάθε ενός καλωδίου στον αντίστοιχο ακροδέκτη που έφερε ο αισθητήρας, συγκεκριμένα στις θέσεις VCC (τροφοδοσία), GND (γείωση), SCL (χρονισμός μεταφοράς) και SDA (μεταφορά δεδομένων). Μετά το πέρας της κόλλησης, συνδέοντας το καλώδιο στην αυτοσχέδια θύρα USB B η οποία με τη σειρά της βρισκόταν συνδεδεμένη στον Raspberry Pi, έγινε έλεγχος ότι ο αισθητήρας ήταν πλήρως λειτουργικός (Εικόνα 3.7).

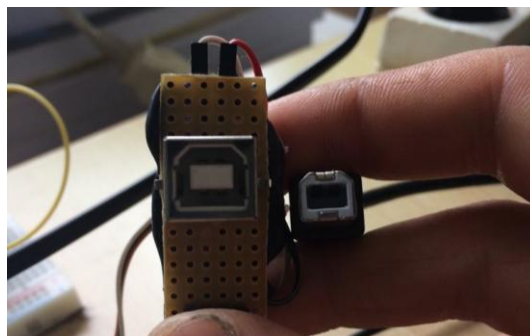
Τέλος, αφού επιβεβαιώθηκε η σωστή λειτουργία του αισθητήρα μέσα στο κουτί μετά την κόλληση, έγινε πλήρωση του κενού χώρου εντός του κουτιού με εποξειδική ρητίνη δύο συστατικών, ώστε να πακτωθεί πλήρως ο αισθητήρας μέσα στο κουτί και να εξαλειφθεί ο θόρυβος στις μετρήσεις λόγω πιθανών μετακινήσεων του αισθητήρα ή του καλωδίου. Για την πλήρη ανάπτυξη της αντοχής της ρητίνης, το όργανο έμεινε σε ακινησία 7 ημέρες τοποθετημένο σε οριζόντια τράπεζα.



Εικόνα 3.7: Ο αισθητήρας MPU6050 συνδεδεμένος με το Raspberry Pi σε κατάσταση λειτουργίας μετά από την πλήρωση με ρητίνη

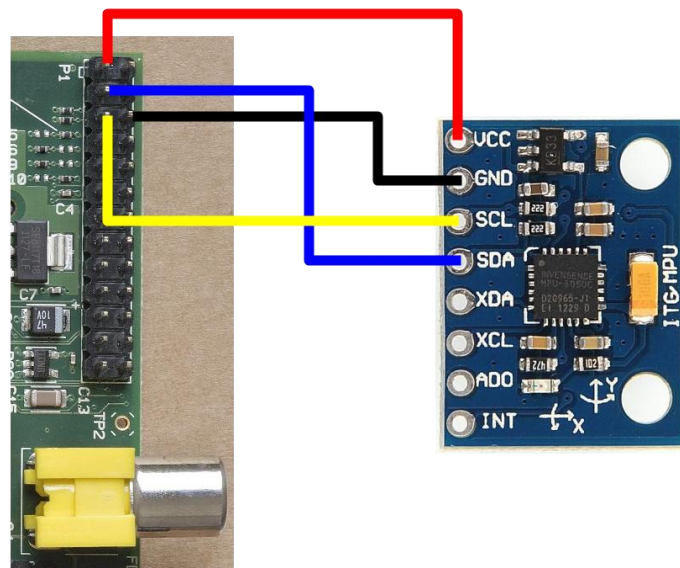
3.6 Περιγραφή σύνδεσης

Για να μπορεί να συνδεθεί ο αισθητήρας MPU6050 μέσα από το μεταλλικό κουτί με τον εξωτερικό κόσμο με σταθερό και αξιόπιστο τρόπο, ήταν απαραίτητη η προσαρμογή ενός καλωδίου είτε ενός connector στον transducer. Αφού αποφασίστηκε πως θα προσαρμοστεί καλώδιο USB – Type B στον transducer για την κατασκευή του οργάνου, ήταν απαραίτητη η κατασκευή μίας αντίστοιχης θύρας USB – Type B η οποία θα συνδεόταν στους ακροδέκτες του πρωτοκόλλου I²C του Raspberry Pi, ώστε να μπορέσει να συνδεθεί μέσω αυτής το κλινόμετρο. Η κατασκευή της αυτοσχέδιας θύρας USB έλαβε χώρα στο Εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του ΕΜΠ και περιλάμβανε την προσάρτηση μιας υποδοχής σε πλακέτα και την κόλληση καλωδίων στις τέσσερις ακίδες στο κάτω μέρος της, με σκοπό τη σύνδεση των καλωδίων αυτών στους αντίστοιχους ακροδέκτες του μικροϋπολογιστή (Εικόνα 3.8).



Εικόνα 3.8: Η αυτοσχέδια θύρα USB-B (αριστερά) και η απόληξη USB-B του καλωδίου που συνδέεται με τον μετατροπέα (δεξιά)

Η Εικόνα 3.9 αναπαριστά τον τρόπο σύνδεσης του MPU6050 με τον Raspberry μέσω των ακροδεκτών GPIO. Όπως φαίνεται και στην εικόνα, ως τροφοδοσία επιλέχθηκε ο ακροδέκτης των 3.3V (Pin No.1), ως γείωση ο ακροδέκτης No.6, ενώ για την μεταφορά και το χρονοισμό της μεταφοράς των δεδομένων επιλέχθηκαν οι ακροδέκτες No.3 και No.5 οι οποίοι εκτός από ακροδέκτες γενικής εισόδου-εξόδου (GPIO), λειτουργούν και στο πρωτόκολλο I²C ως γραμμές SDA και SCL αντίστοιχα. Μέσω της σύνδεσης των αντίστοιχων καλωδίων της αυτοσχέδιας θύρας USB B στους ακροδέκτες αυτούς, με τη σύνδεση του οργάνου στη θύρα επιτυγχάνεται το επιθυμητό αποτέλεσμα σύνδεσης του αισθητήρα με τον Raspberry μέσω I²C.



Εικόνα 3.9: Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου διασύνδεσης του MPU6050 με τον Raspberry. (πηγή: bitify.co.uk)

Κεφάλαιο 4^ο

ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ (SOFTWARE)

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια προεπισκόπηση του software του Raspberry Pi και στη συνέχεια παρουσιάζεται η δομή και η λειτουργία της διαδικτυακής εφαρμογής που αναπτύχθηκε κατά την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας. Με τον όρο software ορίζεται το σύνολο των προγραμμάτων, οι διαδικασίες και οι οδηγίες των ηλεκτρονικών υπολογιστών που εκτελούν καθορισμένες εργασίες σε ένα υπολογιστικό σύστημα.

Ο μικροϋπολογιστής Raspberry Pi παρέχει τη δυνατότητα προγραμματισμού σε διάφορες γλώσσες, τις οποίες υποστηρίζει ο ARM επεξεργαστής του. Χρησιμοποιώντας ένα προγραμματιστικό περιβάλλον (IDE - Integrated Development Environment) που βρίσκεται εγκατεστημένο στην αρχική διαμόρφωση του λειτουργικού συστήματος Raspbian, είναι δυνατή η ανάπτυξη και εκτέλεση προγραμμάτων στις γλώσσες προγραμματισμού που υποστηρίζει ο μικροϋπολογιστής.

Βασικός σκοπός ήταν η ανάπτυξη μιας εφαρμογής ιστού όπου θα λαμβάνει και θα απεικονίζει τις μετρήσεις του κλινομέτρου σε πραγματικό χρόνο. Η εφαρμογή θα περιλαμβάνει ένα σύστημα καταγραφής των μετρήσεων σε βάση δεδομένων (database) διαχειριζόμενο από τον χρήστη και θα παρέχει τη δυνατότητα απεικόνισης των μετρήσεων σε γράφημα για χρονικό διάστημα της επιλογής του, ως πρόσθετη λειτουργία. Χρησιμοποιώντας το δομικό λογισμικό ιστού (web framework) Flask μέσα από το κυρίως πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε σε γλώσσα προγραμματισμού Python, δίνεται η δυνατότητα φιλοξενίας (host) ενός API (Application Programming Interface) μέσω του μικροϋπολογιστή Raspberry ο οποίος δρα ως εξυπηρετητής (server).

4.1 Λειτουργικό σύστημα Raspbian

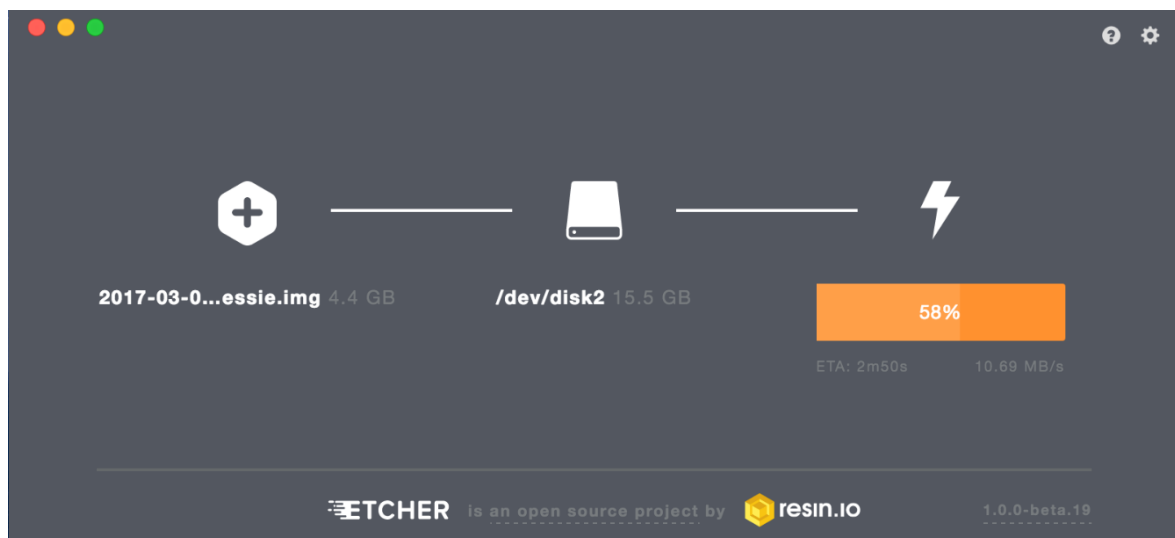
Λειτουργικό σύστημα ή Operating System (OS) καλείται η συλλογή των βασικών προγραμμάτων που είναι υπεύθυνα για το συνολικό έλεγχο της λειτουργίας ενός υπολογιστή και λειτουργεί ως υπόβαθρο για την εκτέλεση όλων των υπόλοιπων προγραμμάτων, για τη διαχείριση των περιφερειακών συσκευών και για την επικοινωνία μεταξύ του χρήστη και του υπολογιστή.

Το OS Raspbian είναι ελεύθερο λογισμικό και αποτελεί το προτεινόμενο και πιο διαδεδομένο OS για το Raspberry Pi. Δημιουργήθηκε από μια ομάδα αφοσιωμένων προγραμματιστών, θαυμαστών του Raspberry Pi και του εκπαιδευτικού του ρόλου, όπως και του project Debian, το οποίο αφορά τη διανομή του γνωστού λειτουργικού Linux πάνω στην οποία βασίζεται το Raspbian. Η κυκλοφορία του είναι σε συνεχή εξέλιξη και

ανανεώνεται συνεχώς, ενώ διατίθεται δωρεάν καθώς πρόκειται για project ανοιχτού κώδικα.

Εγκατάσταση Raspbian

Η εγκατάσταση του λειτουργικού συστήματος του Raspberry Pi γίνεται σε μια κάρτα μνήμης SD η οποία λειτουργεί ως σκληρός δίσκος. Επιλέχθηκε κάρτα μεγέθους 32GB για την εγκατάσταση του OS και απαιτήθηκε η διαμόρφωση (format) της κάρτας SD σε υπολογιστή μέσω του λογισμικού ανοιχτού κώδικα SD Card Formatter. Μετά την προετοιμασία της κάρτας SD, γίνεται λήψη της εικόνας του Raspbian μέσω της ιστοσελίδας 'raspbian.org' σε αρχείο .zip το οποίο γίνεται στη συνέχεια extract. Μέσα στα αρχεία που περιέχει το .zip file βρίσκεται και ένα αρχείο τύπου .img το οποίο στη συνέχεια θα εγγραφεί στην κάρτα SD με το open source πρόγραμμα Etcher. Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.1, αρχικά επιλέγεται το αρχείο της εικόνας (.img), στη συνέχεια το drive στο οποίο θα αποθηκευτεί και τέλος γίνεται η εγγραφή.



Εικόνα 4.1: Εγγραφή εικόνας Raspbian στο λογισμικό Etcher

4.2 Γλώσσα προγραμματισμού Python

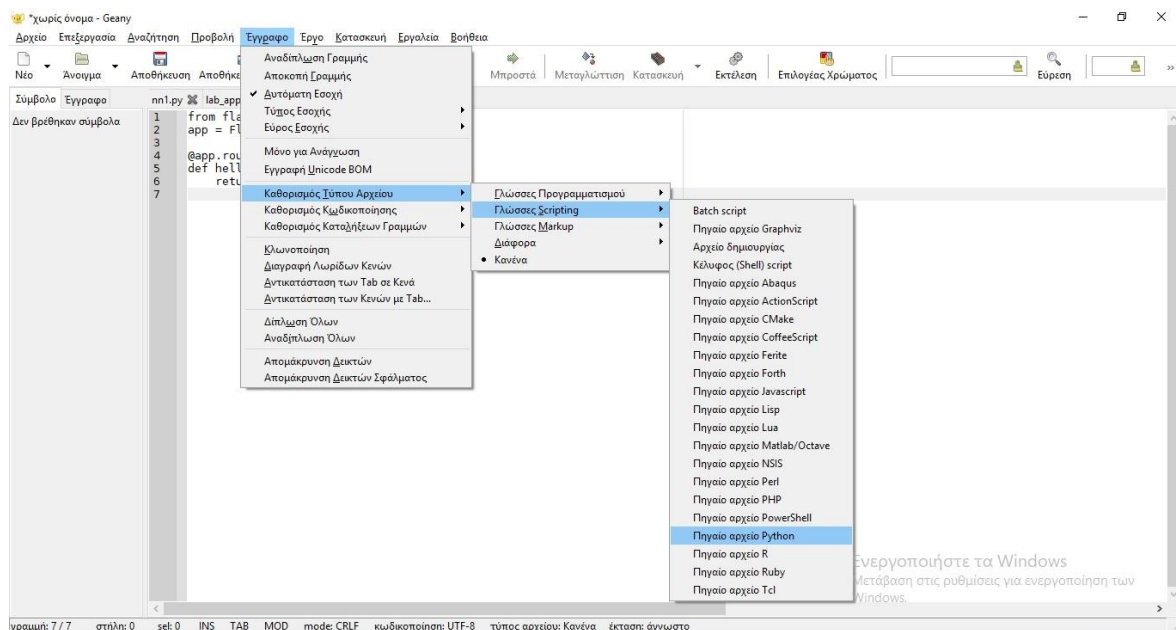
Για την υλοποίηση της διαδικτυακής εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε η γλώσσα προγραμματισμού Python και συγκεκριμένα η έκδοση 2.7 η οποία περιέχεται εγκατεστημένη στο λειτουργικό Raspbian. Η Python είναι μια γλώσσα προγραμματισμού υψηλού επιπέδου η οποία δημιουργήθηκε το 1990 από τον Ολλανδό Guido van Rossum και πρόκειται για μία ισχυρή γλώσσα με πολλές και σύνθετες δυνατότητες. Η σύνταξη του κώδικά της και η απλότητα των εντολών της την κάνουν πολύ προσιτή στο χρήστη που θα τη διαβάσει ή θα τη γράψει.

Η επιλογή της γλώσσας έγινε με γνώμονα τις δυνατότητες που παρέχει στην ανάπτυξη εφαρμογών ιστού μέσω web frameworks. Το προγραμματιστικό περιβάλλον στο οποίο

έγινε η ανάπτυξη του κώδικα είναι το λογισμικό Geany, ενώ μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου και το εγκατεστημένο πρόγραμμα Python IDLE.

4.2.1 Geany

Το Geany είναι ένα προγραμματιστικό περιβάλλον ανάπτυξης (IDE) στο οποίο είναι δυνατή η ανάπτυξη, αποθήκευση και εκτέλεση προγραμμάτων γραμμένων είτε σε Python (scripts) είτε σε C++,HTML, PHP και λοιπές γλώσσες, ενώ παρέχει διάφορες λειτουργίες για τη διευκόλυνση του χρήστη, όπως επισήμανση σφαλμάτων κατά τη μεταγλώττιση και χρήσιμες συντομεύσεις πληκτρολογίου. Στην Εικόνα 4.2 παρουσιάζεται η διαδικασία καθορισμού του τύπου ενός αρχείου ως αρχείο Python.



Εικόνα 4.2: Καθορισμός τύπου αρχείου σε Python στο Geany

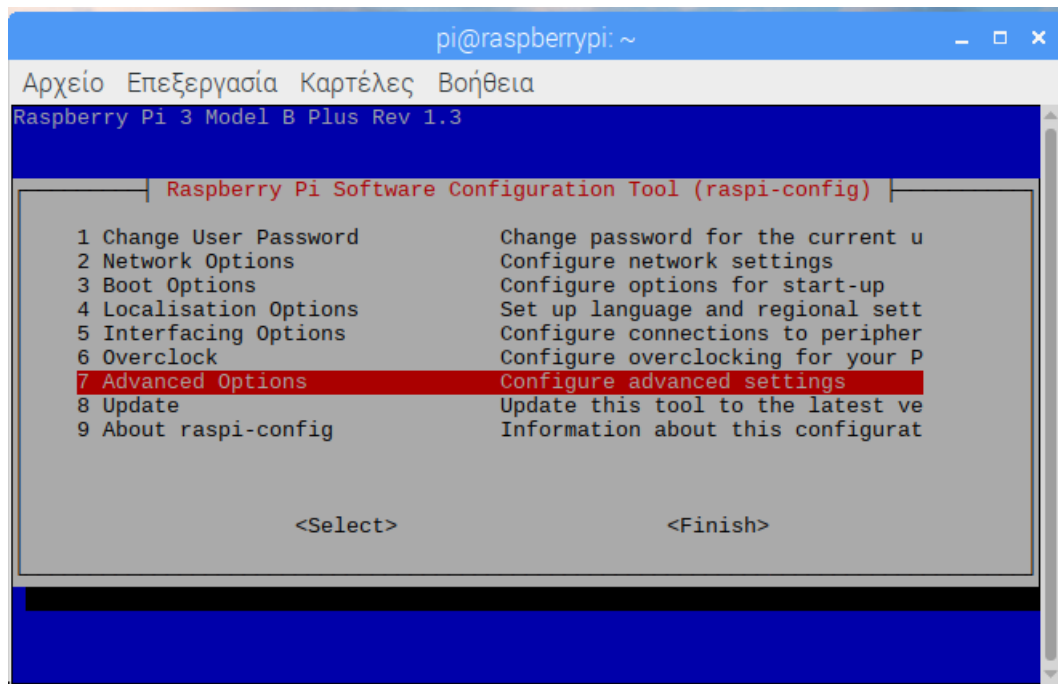
4.3 Διαδικασία ελέγχου λειτουργίας κλινομέτρου

Κατά την κατασκευή του κλινομέτρου, μετά από την κόλληση του καλωδίου με τον αισθητήρα εντός του οργάνου, έγινε ο απαραίτητος έλεγχος για να επιβεβαιωθεί η σωστή λειτουργία του οργάνου και ότι η κόλληση του καλωδίου με τον αισθητήρα ήταν κατάλληλη, ώστε να μπορέσει στη συνέχεια να γίνει η πλήρωση με ρητίνη. Αφού συνδέθηκε το καλώδιο στη θύρα USB-B του Raspberry Pi ακολούθησε ο έλεγχος της λειτουργίας του μέσω εντολών στο τερματικό του με τις παρακάτω εντολές.

Αρχικά γίνεται η ενεργοποίηση της διεπαφής I²C στον μικροϋπολογιστή, καθώς δεν αποτελεί προκαθορισμένη ρύθμιση. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω της γραμμής εντολών (LXTerminal) του Raspberry εισάγοντας την εντολή:

```
$ sudo raspi-config
```

Η εντολή αυτή εμφανίζει το μενού των διαθέσιμων υπηρεσιών προς ενεργοποίηση (Εικόνα 4.3). Πηγαίνοντας στην επιλογή 7 (Advanced Options), ενεργοποιούμε την επιλογή A7 I2C.



Εικόνα 4.3: Μενού διαθέσιμων υπηρεσιών προς ενεργοποίηση

Στη συνέχεια επεξεργαζόμαστε το φάκελο “modules” εισάγοντας στο τερματικό την εντολή:

```
$ sudo nano /etc/modules
```

Εάν στο αρχείο που θα εμφανιστεί δεν υπάρχουν οι ακόλουθες σειρές, τότε τις προσθέτουμε και στη συνέχεια κάνουμε επανεκκίνηση του Pi (με την εντολή: \$ sudo reboot):

```
i2c-bcm2708
```

```
i2c-dev
```

Έτσι δίνεται η δυνατότητα να εγκατασταθούν στη συνέχεια τα απαραίτητα εργαλεία με την εντολή:

```
$ sudo apt-get install i2c-tools python-smbus
```

Μετά από αυτή τη διαδικασία είναι δυνατός ο έλεγχος λειτουργίας της συνδεδεμένης συσκευής. Με την παρακάτω εντολή, ελέγχεται εάν ο Pi εντοπίζει τη συσκευή μέσω I²C.

```
$ sudo i2c-detect -y 1
```

Ο αριθμός 1 υποδηλώνει τη θύρα I²C port στο οποίο πραγματοποιείται η επικοινωνία, το οποίο διαφέρει ανάλογα με το μοντέλο του Raspberry Pi που χρησιμοποιείται. Τα νεότερα μοντέλα μετά το 2013 είναι έκδοσης Rev 2 και χρησιμοποιούν το I²C port = 1 ενώ τα παλαιότερα έκδοσης Rev 1, χρησιμοποιούν το I²C port = 0, οπότε για αυτά χρησιμοποιείται ο αριθμός 0. Η διαφορά μεταξύ των δύο εκδόσεων έγκειται στο σήμα που δέχονται τα GPIO

pins 3 και 5. Το Raspberry Pi 3B+ είναι έκδοσης Rev 2 συνεπώς χρησιμοποιείται ο αριθμός 1 στην εντολή.

Εάν η σύνδεση του αισθητήρα είναι σωστή, τότε η παραπάνω εντολή θα έχει το εξής αποτέλεσμα (Εικόνα 4.4):

```
pi@raspberrypi ~ $ sudo i2cdetect -y 1
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 a b c d e f
00: ---
10: ---
20: ---
30: ---
40: ---
50: ---
60: --- 68 ---
70: ---
```

Εικόνα 4.4: Εντολή ανίχνευσης του μετατροπέα από το μικροϋπολογιστή

Ο αριθμός 68 στην Εικόνα 4.4 δηλώνει ότι η διεύθυνση (address) της συσκευής σε δεκαεξαδική μορφή στον καταχωρητή διευθύνσεων (register) του Raspberry Pi θα είναι 0x68. Η διεύθυνση αυτή θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για να επικοινωνεί το σύστημα με την εν λόγω συσκευή. Στην προκειμένη περίπτωση, με την παραπάνω εντολή γίνεται απλά ο έλεγχος ότι ο transducer μας αναγνωρίζεται από το μικροϋπολογιστή και ότι του έχει δοθεί μια διεύθυνση στον καταχωρητή.

4.4 Web framework Flask

Το Flask είναι ένα micro web framework ανάπτυξης εφαρμογών ιστού, ανεπτυγμένο σε Python. Χαρακτηρίζεται “micro framework” για το λόγο ότι δεν απαιτεί την προσθήκη συγκεκριμένων εργαλείων ή βιβλιοθηκών. Παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης διαδικτυακών εφαρμογών έχοντας τον πυρήνα της εφαρμογής σε ένα αρχείο Python από το οποίο καλούνται διαφορετικά αρχεία για την εκτέλεση ενεργειών και λειτουργιών στην εφαρμογή, χωρίς αυτό να είναι κατά κανόνα απαραίτητο. Το Flask υποστηρίζει την προσθήκη επεκτάσεων οι οποίες προσθέτουν λειτουργικότητα στην εφαρμογή, όπως δυνατότητα ανάγνωσης και εγγραφής σε database, επικύρωση φορμών, ανέβασμα αρχείων και πολλών ακόμη.

Διαμόρφωση και συμβάσεις

Η διαμόρφωση του Flask περιλαμβάνει συγκεκριμένες λειτουργίες και έννοιες για ορισμένες τιμές καθώς και κάποιες συμβάσεις για τη λειτουργία του τις οποίες αρχικά θα πρέπει να ακολουθήσει ο χρήστης και να εξοικειωθεί με αυτές. Ως σύμβαση, τα αρχεία templates και static μιας εφαρμογής θα πρέπει να βρίσκονται σε υποφάκελους με τα ονόματα templates και static αντίστοιχα, οι οποίοι θα βρίσκονται στον ίδιο φάκελο με το αρχείο Python από όπου καλείται το Flask.

Μια απλή εφαρμογή Flask

Μια απλή και υποτυπώδης εφαρμογή στο Flask παρουσιάζεται στην συνέχεια:

```
from flask import Flask

app = Flask(__name__)

@app.route('/')

def index():

    return 'Index Page'

@app.route('/hello')

def hello_world():

    return 'Hello, World!'

if __name__ == "__main__":

    app.run(host='0.0.0.0', port=4000)
```

Ο κώδικας αυτός κάνει τα εξής:

1. Αρχικά εισάγει (κάνει import) την κλάση (class) με το όνομα Flask από το αρχείο flask. Η class στην Python είναι ένας τύπος υποπρογράμματος η οποία μπορεί να περιέχει συναρτήσεις και μεθόδους στον κώδικά της. Η class Flask περιέχει όλες τις μεθόδους και λειτουργίες που χρησιμοποιεί το framework.
2. Στη συνέχεια αντιστοιχίζουμε ένα στιγμιότυπο της εφαρμογής Flask με τη μεταβλητή app περνώντας το σαν τιμή. Αυτό έχει ως συνέπεια όλες οι μέθοδοι και συναρτήσεις που περιέχονται στον κώδικα της class με το όνομα Flask να καλούνται πλέον με το πρόθεμα app (για παράδειγμα η μέθοδος run με το app.run). Ο ορισμός

`__name__` αντιστοιχίζεται από το μεταφραστή της Python στο όνομα του αρχείου μας από το οποίο τρέχουμε την εφαρμογή.

3. Στη συνέχεια χρησιμοποιώντας τη μέθοδο `route()`, μιας μεθόδου που περιέχεται στο αρχείο Flask, ορίζουμε στο `framework` την κατάληξη στη διεύθυνσή (URL) μας η οποία θα ενεργοποιήσει τη συνάρτηση που ακολουθεί. Για να ενεργοποιηθεί η εκάστοτε συνάρτηση, πρέπει ο χρήστης να συνδεθεί στην αντίστοιχη τοποθεσία (`route`) μέσω του browser του. Εδώ χρησιμοποιούνται δύο τοποθεσίες: η `'/'` και η `'/hello'`.
4. Δίνεται ένα όνομα στις συναρτήσεις και ακολουθεί ο κώδικας τους. Στην προκειμένη περίπτωση η τοποθεσία `'/'` ακολουθείται από τη συνάρτηση (function) `index()` και θα επιστρέψει το μήνυμα `'Index Page'` ενώ η τοποθεσία `'/hello'` ακολουθείται από τη συνάρτηση `hello_world()` και θα επιστρέψει το μήνυμα `'Hello, World!'` στον browser του χρήστη.
5. Η εντολή `if __name__ == "__main__":` εν συντομία εξυπηρετεί στο να εκτελείται το στιγμιότυπο του Flask μόνο μέσα από το κυρίως πρόγραμμα και ακολουθείται από την εντολή `app.run(host='0.0.0.0', port=4000)` η οποία είναι και αυτή που ξεκινάει την εφαρμογή μας. Χρησιμοποιείται στο τέλος του κώδικα ώστε η εφαρμογή να ξεκινήσει αφού πρώτα διαβαστεί όλος ο υπόλοιπος κώδικας από το μεταφραστή. Αφού επαληθεύεται η `if`, εκτελείται η εντολή `app.run(host='0.0.0.0', port=4000)`, η οποία τρέχει ένα στιγμιότυπο της εφαρμογής Flask. Η φιλοξενία της εφαρμογής γίνεται στη διεύθυνση IP από όπου εκτελείται το αρχείο στη θύρα επικοινωνίας (`port`) 4000. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως εάν για παράδειγμα η IP που έχει λάβει ο Raspberry μας για να συνδεθεί στο Internet είναι η 127.1.1.0, τότε ο χρήστης για να συνδεθεί στην εφαρμογή θα ακολουθήσει τη URL: `http://127.1.1.0:4000`.

Αποθηκεύοντας τον παραπάνω κώδικα ως ένα αρχείο Python και δίνοντας του ένα όνομα όπως για παράδειγμα `hello.py`, μπορούμε να το εκτελέσουμε είτε μέσω του Geany επιλέγοντας “Run”, είτε μέσω του τερματικού με την εντολή `python` και τη διαδρομή του αρχείου στον υπολογιστή. Εάν για παράδειγμα το αρχείο μας βρίσκεται στο φάκελο `home/pi` του Raspberry ο τρόπος για να εκτελεστεί από το τερματικό θα είναι ο εξής:

```
$ python home/pi/hello.py
* Serving Flask app "hello" (lazy loading)
* Environment: production
  WARNING: Do not use the development server in a production environment.
  Use a production WSGI server instead.
* Debug mode: off
```

```
* Running on http://0.0.0.0:4000/ (Press CTRL+C to quit)
```

Αφού δοθεί η εντολή `python home/pi/hello.py` εκτελείται ένα ξεκίνημα του Flask και εμφανίζονται τα παραπάνω μηνύματα στο τερματικό του Raspberry. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη λειτουργία ενός server ο οποίος θα λάβει τη διεύθυνση IP του μικροϋπολογιστή μας και εφόσον το τερματικό παραμένει ανοιχτό, είναι δυνατή η σύνδεση χρηστών στη διεύθυνση αυτή μέσω ενός browser, εισάγοντας τη διεύθυνση ως URL με θύρα επικοινωνίας 4000 χρησιμοποιώντας επίσης και την κατάλληλη τοποθεσία.

Φόρτωση προτύπων ιστοσελίδας (rendering templates)

Τα πρότυπα ιστοσελίδων (templates) αποτελούν αρχεία που περιέχουν κώδικα προγραμματισμένα σε γλώσσες ανάπτυξης ιστοσελίδων όπως είναι ή HTML, PHP κλπ.. Το template θα διαβαστεί από το φυλλομετρητή (browser) του χρήστη όταν αυτός συνδεθεί στην αντίστοιχη URL και θα εμφανίσει στην οθόνη του το περιεχόμενο του κώδικα.

Το Flask παρέχει αυτόματα τη δυνατότητα φόρτωσης προτύπων ιστοσελίδας υλοποιώντας τη μηχανή προτύπων Jinja2. Για να φορτωθεί ένα πρότυπο χρησιμοποιείται η μέθοδος `render_template()`. Το μόνο που χρειάζεται είναι να δοθεί το όνομα του προτύπου καθώς και τυχόν μεταβλητές που επιθυμούμε να περάσουμε στη μηχανή προτύπων ως καθορισμένες. Παρακάτω είναι ένα απλό παράδειγμα φόρτωσης ιστοσελίδας:

```
from flask import render_template

@app.route('/hello/')
@app.route('/hello/<name>')
def hello(name=None):
    return render_template('hello.html', name=name)
```

Με την εντολή `render_template('hello.html', name=name)`, το Flask θα αναζητήσει το αρχείο `'hello.html'`, στο φάκελο `templates`. Δίνεται επίσης η μεταβλητή `name` ως δεδομένο για να χρησιμοποιηθεί από το αρχείο `.html`, στο οποίο θα έχει επίσης το όνομα `name`. Εφόσον η εφαρμογή μας είναι αποθηκευμένη ως αρχείο `python` ο φάκελος `templates` πρέπει να βρίσκεται στην ίδια τοποθεσία με την εφαρμογή. Το πρότυπο θα μπορούσε να έχει για παράδειγμα αυτή τη μορφή:

```
<!doctype html>
<title>Hello from Flask</title>
{% if name %}
  <h1>Hello {{ name }}!</h1>
{% else %}
  <h1>Hello, World!</h1>
{% endif %}
```

Το πρότυπο αυτό είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού HTML όπως ορίζεται με την πρώτη εντολή `<!doctype html>`. Αρχικά δίνεται ένας τίτλος ο οποίος θα εμφανίζεται στην καρτέλα περιήγησης στο browser του χρήστη με την εντολή `<title>Hello from Flask</title>`. Έπειτα λαμβάνεται από το αρχείο της Python η μεταβλητή name και ελέγχεται εάν αυτή έχει πάρει κάποια τιμή, δηλαδή αν είναι διαφορετική του `None`. Συνεπώς, εάν υποθέσουμε πως η IP του server μας είναι η 192.168.1.6, τότε ο χρήστης ακολουθώντας την τοποθεσία (URL): `//192.168.1.6:4000/hello` θα δει το μήνυμα `Hello, World!` στην οθόνη του. Εάν ο χρήστης επιλέξει να πληκτρολογήσει ένα όνομα στο τέλος της URL που θα εισάγει, τότε θα εμφανιστεί το όνομα αυτό στην οθόνη (Εικόνα 4.5).



Εικόνα 4.5: Παράδειγμα σύνδεσης χρήστη στην τοποθεσία έχοντας πληκτρολογήσει ένα όνομα

4.5 Λειτουργία κυρίως προγράμματος – 1^ο μέρος

Στο 1^ο μέρος του κυρίως προγράμματος ορίζονται οι μεταβλητές και οι συναρτήσεις εκείνες που αρχικά περιγράφουν τα βασικά στοιχεία που αφορούν τη λειτουργία του μετατροπέα και την αλληλεπίδρασή του με τον μικροϋπολογιστή. Για παράδειγμα ορίζονται: η διεύθυνση που έχει λάβει ο μετατροπέας στο αρχείο καταχωρητών του Raspberry, οι καταχωρητές εκείνοι από τους οποίους λαμβάνει τροφοδοσία για να λειτουργήσει, όπως και οι απαραίτητες σταθερές μετατροπής των ανεπεξέργαστων (raw) μετρήσεων της τάσης εξόδου του εκάστοτε αισθητήρα στο αντίστοιχο μέγεθος το οποίο υπολογίζει (δηλ. σε deg/sec ή σε g αντίστοιχα). Ορίζονται επίσης στο αρχικό τμήμα του κώδικα οι απαραίτητες βιβλιοθήκες για εισαγωγή στο πρόγραμμα.

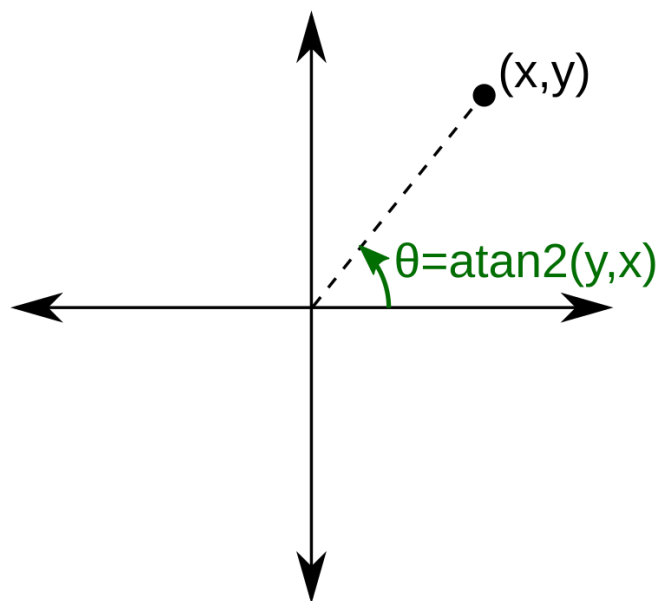
Το 1^ο μέρος του προγράμματος φέρει τον μετατροπέα σε μια κατάσταση αναμονής (standby), ούτως ώστε με τη σύνδεση κάποιου εξωτερικού χρήστη στην εφαρμογή, ο μετατροπέας να εισέλθει σε κατάσταση μέτρησης και να υπολογίζει τη γωνία κλίσης περί τους δύο άξονες X και Y. Περιέχει όλες αυτές τις μεταβλητές και διαδικασίες οι οποίες είναι υπεύθυνες για την ενεργοποίηση και σωστή προετοιμασία του μετατροπέα, εκτελείται δε κατά το τρέξιμο του προγράμματος από τον διακομιστή.

Εγκατάσταση απαραίτητων βιβλιοθηκών

Η εφαρμογή αυτή αναπτύχθηκε για να περιλαμβάνει λειτουργίες και διεργασίες οι οποίες απαιτούν τη λήψη διάφορων βιβλιοθηκών (libraries) ή αλλιώς πακέτων (modules) της

Python. Οι βιβλιοθήκες αυτές διατίθενται δωρεάν διαδικτυακά και η εγκατάστασή τους είναι δυνατή μέσω του pip, ενός διαχειριστή λήψης πακέτων (package manager), ο οποίος είναι εγκατεστημένος στην επίσημη έκδοση της Python και εκτελείται από το τερματικό του υπολογιστή. Τα πακέτα που λαμβάνονται μέσω του διαχειριστή εγκαθίστανται αυτόματα στον φάκελο της Python, κάνοντάς τα διαθέσιμα για εισαγωγή από ένα πρόγραμμα με την εντολή import και το όνομα του πακέτου. Για την εγκατάσταση ενός τυχαίου πακέτου με το όνομα "SomeProject" χρησιμοποιείται η εντολή:

Pip install "SomeProject" Αφού γίνει εισαγωγή ενός πακέτου, είναι δυνατή η εκτέλεση συναρτήσεων και μεθόδων που περιέχει στον κώδικά του, από το πρόγραμμα που κάνει την εισαγωγή. Για παράδειγμα εάν στο πρόγραμμά μας γίνει import του πακέτου math είναι δυνατή η χρήση της συνάρτησης atan2(x,y) η οποία υπολογίζει τη γωνία μεταξύ του Χ-άξονα και της ευθείας που διέρχεται από τα σημεία (0,0) και (x,y) περιορισμένη στο διάστημα (-π, π], γράφοντας math.atan2(x,y) στο κυρίως πρόγραμμα. Παρακάτω γίνεται μια περιγραφή και επεξήγηση της δομής και της λειτουργίας βασικών σημείων στον κώδικα του 1ου μέρους του κυρίως προγράμματος.



Σχήμα 4.1: Λειτουργία της συνάρτησης atan2

Εισαγωγή βιβλιοθηκών και πακέτων

Αρχικά εισάγονται τα απαραίτητα πακέτα ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια οι απαιτούμενες μέθοδοι και συναρτήσεις που περιέχονται σε αυτά.

```
ι+ Διπλωματική\Antonis\final_apps - Geany
Αναζήτηση Προβολή Έγγραφο Έργο Κατασκευή Εργαλεία Βοήθεια
Αποθήκευση Αποθήκευση Όλων Επαναφορά Κλείσιμο Πίσω Μπροστά Μεταγλώττιση Κατασκευή Εκτέλεση Επιλο
nn1.py MPU6050_app.py hello.py hello.html MPU6050_data_record.py
1 from flask import Flask, request, render_template, Response, redirect, url_for, jsonify
2 import time
3 import datetime
4 import sys
5 import sqlite3
6 import multiprocessing
7 import smbus #import SMBus module of I2C
8 import math
9 import MPU6050_data_record
```

Εικόνα 4.6: Εισαγωγή των απαραίτητων πακέτων στο αρχικό τμήμα του προγράμματος

Στη συνέχεια εισάγονται όλες οι απαραίτητες βιβλιοθήκες από το φάκελο της Python. Κάποιες από αυτές αποτελούν μέρος του κορμού των αρχείων της Python και περιέχονται εγκατεστημένες εκ των προτέρων στον φάκελό της, όπως είναι τα πακέτα time, datetime και sys. Τα πακέτα sqlite3, multiprocessing και smbus εγκαταστάθηκαν μέσω του διαχειριστή πακέτων pip. Το πακέτο MPU6050_data_record αποτελεί το δεύτερο πρόγραμμα που αναπτύχθηκε, το οποίο είναι υπεύθυνο για την διαχείριση της καταγραφής των μετρήσεων σε database και εισάγεται στο κυρίως πρόγραμμα για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί η λειτουργία του.

Ορισμός βασικών μεγεθών

Επόμενο βήμα είναι να δοθεί ένα στιγμιότυπο του Flask σαν τιμή στη μεταβλητή app, ενώ ενεργοποιείται και η λειτουργία debug του Flask η οποία αποτελεί ένα μέσο προβολής των σφαλμάτων που συμβαίνουν κατά την εκτέλεση του κώδικα στο browser του χρήστη. Ορίζονται τα registers διαχείρισης της τροφοδοσίας του αισθητήρα τα οποία είναι οι πίνακες 0x6b και 0x6c στο δεκαεξαδικό σύστημα.

```
11
12
13 app = Flask(__name__)
14 app.debug = True # Make this False if you are no longer debugging
15
16 # Power management registers
17 power_mgmt_1 = 0x6b
18 power_mgmt_2 = 0x6c
19 # Chip temperature register: TEMP_OUT_H = 0x41
20 gyro_scale = 131.0
21 accel_scale = 16384.0
22
23 address = 0x68
24 bus = smbus.SMBus(1)
```

Εικόνα 4.7: Ορισμός βασικών μεταβλητών στο κυρίως πρόγραμμα

Στη συνέχεια, δίνονται οι σταθερές μετατροπής των ψηφιακών εξόδων του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιομέτρου στα αντίστοιχα μετρούμενα μεγέθη κάθε οργάνου (degrees/sec και g αντίστοιχα). Οι τιμές αυτές βρίσκονται στο φύλλο τεχνικών προδιαγραφών (datasheet) του MPU6050 στις αντίστοιχες ενότητες, το οποίο είναι διαθέσιμο διαδικτυακά. Οι σταθερές αυτές αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των διαθέσιμων συνδυασμών ψηφίων που διαθέτει ο ΑΨΜ και διαφέρουν ανάλογα με το εύρος που θέλουμε να επιλέξουμε (π.χ. ± 1500 deg/sec ή ± 2000 deg/sec).

Στην προκειμένη περίπτωση δίνονται οι σταθερές που αντιστοιχούν στο μικρότερο εύρος συνεπώς και στη μεγαλύτερη ευαισθησία κάθε αισθητήρα (± 250 deg/sec και ± 2 g αντίστοιχα), οι οποίες είναι 131 LSB/(deg/sec) για το γυροσκόπιο και 16384 LSB/g για το επιταχυνσιόμετρο. Ο όρος LSB (Least Significant Bits) αναφέρεται στον μέγιστο αριθμό συνδυασμών ψηφίων στο δυαδικό σύστημα που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας και εξαρτάται από την ανάλυσή του (π.χ. 8bit, 16bit κλπ.). Διαιρώντας τη μετρούμενη έξοδο (raw value) του εκάστοτε αισθητήρα με την αντίστοιχη σταθερά προκύπτει η ζητούμενη μέτρηση στις αντίστοιχες μονάδες.

Δίδεται επίσης η διεύθυνση του MPU6050 στη μεταβλητή address με σκοπό να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια, καθώς και ένα στιγμιότυπο της μεθόδου smbus, μιας μεθόδου διαχείρισης των συσκευών συνδεδεμένων μέσω I²C.

Ορισμός συναρτήσεων ανάγνωσης δεδομένων

Αφού δόθηκαν τα απαραίτητα μεγέθη σχετικά με την τροφοδοσία του μετατροπέα, ορίζονται οι συναρτήσεις εκείνες με βάση τις οποίες θα γίνεται η ανάγνωση των μετρήσεων κάθε αισθητήρα και ο υπολογισμός της γωνίας κλίσης περί τους άξονες X και Y.

Η συνάρτηση read_all() αρχικά αναλαμβάνει την ανάγνωση των τάσεων εξόδου του εκάστοτε άξονα σε ανεπεξέργαστη (raw) μορφή από τον ΑΨΜ. Στις 3 πρώτες γραμμές του κώδικα της συνάρτησης, δίνονται οι εντολές οι οποίες ορίζουν τους καταχωρητές από τους οποίους θα διαβαστούν οι ανεπεξέργαστες τιμές για το γυροσκόπιο, το επιταχυνσιόμετρο και τη θερμοκρασία αντίστοιχα. Οι καταχωρητές αυτοί βρίσκονται στον αντίστοιχο κατάλογο του MPU 6050 (MPU6000 register map) ο οποίος είναι διαθέσιμος διαδικτυακά, ενώ οι μετρήσεις κάθε αισθητήρα περιέχονται σε ένα διάνυσμα 6 θέσεων, οι θέσεις του οποίου αντιστοιχούν ανά δύο σε κάθε άξονα.

```
26 def twos_compliment(val):
27     if (val >= 0x8000):
28         return -((65535 - val) + 1)
29     else:
30         return val
31
32 def read_all():
33
34     raw_gyro_data = bus.read_i2c_block_data(address, 0x43, 6)
35     raw_accel_data = bus.read_i2c_block_data(address, 0x3b, 6)
36     raw_temp_data = bus.read_i2c_block_data(address, 0x41, 6)
37
38     MPUtemp = twos_compliment((raw_temp_data[0] << 8) + raw_temp_data[1])
39
40     gyro_scaled_x = twos_compliment((raw_gyro_data[0] << 8) + raw_gyro_data[1]) / gyro_scale
41     gyro_scaled_y = twos_compliment((raw_gyro_data[2] << 8) + raw_gyro_data[3]) / gyro_scale
42     gyro_scaled_z = twos_compliment((raw_gyro_data[4] << 8) + raw_gyro_data[5]) / gyro_scale
43
44     accel_scaled_x = twos_compliment((raw_accel_data[0] << 8) + raw_accel_data[1]) / accel_scale
45     accel_scaled_y = twos_compliment((raw_accel_data[2] << 8) + raw_accel_data[3]) / accel_scale
46     accel_scaled_z = twos_compliment((raw_accel_data[4] << 8) + raw_accel_data[5]) / accel_scale
47
48     return (gyro_scaled_x, gyro_scaled_y, gyro_scaled_z, accel_scaled_x, accel_scaled_y, accel_scaled_z, MPUtemp)
```

Εικόνα 4.8: Ορισμός συναρτήσεων ανάγνωσης δεδομένων

Η συνάρτηση twos_compliment() (Εικόνα 4.8) δέχεται ως δεδομένο την ανεπεξέργαστη τιμή κάθε άξονα, ελέγχει εάν αυτή είναι θετική ή αρνητική και την επιστρέφει με το κατάλληλο πρόσημο. Ο έλεγχος γίνεται θέτοντας ως 0 τον μέσο του πλήθους συνδυασμών ψηφίων που είναι το 32768 ή 0x8000 σε 16-αδική μορφή. Τέλος, αφού διαιρεθεί το

αποτέλεσμα της συνάρτησης `twos_compliment()` με την αντίστοιχη σταθερά μετατροπής κάθε αισθητήρα σε κάθε άξονα, προκύπτουν οι τιμές στις αντίστοιχες μονάδες μέτρησης, οι οποίες επιστρέφονται στο τέλος της συνάρτησης `read_all()` στις αντίστοιχες μεταβλητές με την εντολή `return()`.

Ορισμός συναρτήσεων υπολογισμού κλίσης

Στη συνέχεια ορίζονται οι συναρτήσεις `get_y_rotation` και `get_x_rotation` (Εικόνα 4.9) οι οποίες υπολογίζουν την κλίση ως προς τους αντίστοιχους άξονες. Οι συναρτήσεις αυτές λαμβάνουν στη συνέχεια ως δεδομένα τις μετρήσεις του επιταχυνσιόμετρου στους δύο άξονες και βάσει αυτών υπολογίζουν την κλίση γύρω από τον τρίτο άξονα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `math.atan2()`. Το αποτέλεσμα είναι η κλίση που μας ενδιαφέρει να μετρήσουμε, έχει όμως το μειονέκτημα ότι περιέχει πολύ θόρυβο στις μετρήσεις και πρέπει να συνδυαστεί με τις μετρήσεις του γυροσκοπίου για να είναι πιο αξιόπιστη η μέτρηση.

```
50 def get_y_rotation(x,z):
51     radians = math.atan2(x, z)
52     return -math.degrees(radians)
53
54 def get_x_rotation(y,z):
55     radians = math.atan2(y, z)
56     return math.degrees(radians)
57
58 bus.write_byte_data(address, power_mgmt_1, 0)
59
60 (gyro_scaled_x, gyro_scaled_y, gyro_scaled_z, accel_scaled_x, accel_scaled_y, accel_scaled_z, MPUtemp) = read_all()
61
62 last_x = get_x_rotation(accel_scaled_y, accel_scaled_z)
63 last_y = get_y_rotation(accel_scaled_x, accel_scaled_z)
64
65 gyro_offset_x = gyro_scaled_x
66 gyro_offset_y = gyro_scaled_y
67 gyro_offset_z = gyro_scaled_z #try
68
69
70 Tau = 0.5 # accelerometer noise time constant (seconds)
71 Delta_t = 0.01 # sampling time (seconds)
72 Alpha = Tau/(Tau + Delta_t) # apportionment coefficient
73
74 time_diff = 0.01 # MUST BE EQUAL TO Delta_t ^above (in s)
```

Ενεργοποιήστε τα

Εικόνα 4.9: Ορισμός συναρτήσεων υπολογισμού κλίσης και προσδιορισμός αρχικών τιμών

Οι επόμενες γραμμές του κώδικα αποτελούν το τελικό τμήμα του 1^{ου} μέρους του κυρίως προγράμματος και χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των αρχικών τιμών μέτρησης του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου καθώς και των κλίσεων βάσει του επιταχυνσιόμετρου γύρω από τους X και Y (`last_x` και `last_y` αντίστοιχα). Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν στο 2^ο μέρος του προγράμματος ως αρχικές τιμές σε ένα συνεχές loop το οποίο θα αποτελεί την πηγή των δεδομένων μας. Δίνονται επίσης οι αρχικές τιμές του γυροσκοπίου ως offset το οποίο στη συνέχεια θα αφαιρεθεί από την επόμενη μέτρηση με σκοπό τον μηδενισμό των αρχικών μετρήσεων του γυροσκοπίου.

4.6 Λειτουργία κυρίως προγράμματος – 2^ο μέρος

Αφού οριστεί η διαδικασία λήψης των δεδομένων στο 1^ο μέρος του προγράμματος, στο 2^ο μέρος γίνεται η χρήση των δεδομένων αυτών για τον υπολογισμό της κλίσης που μας ενδιαφέρει. Όπως προαναφέρθηκε, παρόλο που από τις μετρήσεις του επιταχυνσιόμετρου

και μόνο μπορεί να υπολογιστεί η κλίση, τα αποτελέσματα αυτά περιέχουν πολύ θόρυβο κάνοντας τα μη αξιόπιστα. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιήθηκαν συνδυαστικά τα δεδομένα του γυροσκοπίου και του επιταχυνσιόμετρου μέσα από μια εμπειρική σχέση συμψηφισμού των δύο.

Το 2^ο μέρος του κυρίως προγράμματος περιλαμβάνει όλες τις λειτουργίες της διαδικτυακής εφαρμογής με τις οποίες μπορεί να αλληλεπιδράσει ο χρήστης, οι οποίες είναι η δυνατότητα έναρξης και λήξης της καταγραφής των δεδομένων σε βάση δεδομένων, καθώς και η προβολή των καταγεγραμμένων κλίσεων και θερμοκρασιών σε γράφημα, για το χρονικό διάστημα που θα ορίσει ο χρήστης. Περιλαμβάνει επίσης την προβολή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, μέσω ενός συνεχούς loop το οποίο τρέχει στο υπόβαθρο και δεν επηρεάζεται από την έναρξη ή τη λήξη της καταγραφής.

Οι λειτουργίες αυτές υλοποιούνται μέσω της μεθόδου `@app.route` του Flask σε συνδυασμό με την ανάπτυξη προτύπων ιστοσελίδας HTML. Συγκεκριμένα, αντιστοιχίζοντας μια τοποθεσία (route) με ένα αρχείο html με τη μέθοδο `render_template()` που έχει προαναφερθεί, είναι δυνατή η μεταφόρτωση ενός διαφορετικού προτύπου ιστοσελίδας στο browser του χρήστη ανάλογα με την τοποθεσία στην οποία θα συνδεθεί.

Φόρτωση προτύπου κύριας ιστοσελίδας

Η φόρτωση του προτύπου της κύριας ιστοσελίδας που περιέχει την απεικόνιση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο και που αποτελεί το βασικό μέρος της εφαρμογής μας γίνεται μέσω σύνδεσης στην τοποθεσία `"/lab_temp"` (Εικόνα 4.10). Το πρότυπο που φορτώνεται είναι αυτό με την ονομασία `lab_temp.html` και περιέχει τη δομή της ιστοσελίδας σε κώδικα HTML καθώς και τμήματα κώδικα Javascript τα οποία εκτελούν τις πρόσθετες λειτουργίες της εφαρμογής.

```
101 @app.route("/lab_temp")
102 def lab_temp():
103     return render_template("lab_temp.html")
104
105
106
```

Εικόνα 4.10: Ορισμός τοποθεσίας φόρτωσης κύριας ιστοσελίδας

Μέσω του Flask παρέχεται επίσης η δυνατότητα αντιστοίχισης μιας συγκεκριμένης τοποθεσίας με ένα αντικείμενο στην ιστοσελίδα με το οποίο μπορεί να αλληλεπιδράσει ο χρήστης, όπως για παράδειγμα ένα button. Εάν για παράδειγμα η ιστοσελίδα περιέχει ένα button το οποίο μπορεί να επιλέξει ο χρήστης τότε μπορεί σε αυτό να αντιστοιχηθεί μια τοποθεσία στην οποία θα κατευθύνεται ο χρήστης κάνοντας κλικ στο button. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται μέσω της προτύπου ιστοσελίδας με τη γλώσσα προγραμματισμού Javascript.

Υπολογισμός κλίσης και απεικόνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Η μετάδοση των μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο γίνεται μέσω ενός loop το οποίο εκτελείται στο υπόβαθρο του browser του χρήστη. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας μια

διαδρομή μέσω της μεθόδου `@app.route` χρησιμοποιώντας το πρόθεμα `"/_"` πριν το όνομα της διαδρομής, κάτι που ορίζεται ως σύμβαση από το Flask. Απαιτείται επίσης η προσθήκη συγκεκριμένου κώδικα στο αρχείο `.html`, το οποίο φορτώνεται, που θα λειτουργεί στο background του browser και θα εκτελεί επαναλαμβανόμενα τον κώδικα της διαδρομής `/_stuff`. Καθώς επιθυμούμε το loop να εκτελείται με τη σύνδεση του χρήστη στην τοποθεσία `/lab_temp`, τοποθετούμε τη διαδρομή `/_stuff` πριν από τη διαδρομή `/lab_temp` στο κυρίως πρόγραμμα. Οι τιμές προς απεικόνιση επιστρέφονται στον browser με τη μορφή JSON, μιας μορφής δεδομένων η οποία μπορεί να αναγνωστεί από το μεταφραστή του browser.

```

76 @app.route("/_stuff", methods=['GET'])
77 def stuff():
78     global last_x, last_y
79     (gyro_scaled_x, gyro_scaled_y, gyro_scaled_z, accel_scaled_x, accel_scaled_y, accel_scaled_z, MPUtemp) = read_all()
80     gyro_scaled_x -= gyro_offset_x
81     gyro_scaled_y -= gyro_offset_y
82     gyro_scaled_z -= gyro_offset_z
83
84     gyro_x_delta = (gyro_scaled_x * time_diff)
85     gyro_y_delta = (gyro_scaled_y * time_diff)
86
87     rotation_x = get_x_rotation(accel_scaled_y, accel_scaled_z)
88     rotation_y = get_y_rotation(accel_scaled_x, accel_scaled_z)
89
90     last_x = Alpha * (last_x + gyro_x_delta) + ((1 - Alpha) * rotation_x)
91     last_y = Alpha * (last_y + gyro_y_delta) + ((1 - Alpha) * rotation_y)
92
93     celsius = (MPUtemp/340.00) + 36.53 #conversion provided in MPU6000 Register Map
94     now = datetime.datetime.now()
95     ora = now.strftime("%Y-%m-%d %H:%M:%S.%f")
96
97     return jsonify(temp="%.2f" %celsius, inclx="%.2f" %last_x, incly="%.2f" %last_y, AX="%.2f" %accel_scaled_x, AY="%.2f" %accel_scaled_y,

```

Εικόνα 4.11: Συνάρτηση μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Ο υπολογισμός της κλίσης γίνεται συνδυάζοντας τα δεδομένα του επιταχυνσιομέτρου και του γυροσκοπίου. Συγκεκριμένα, η μέτρηση που λαμβάνεται από το γυροσκόπιο είναι σε μονάδες `deg/sec`. Πολλαπλασιάζοντας συνεπώς τη μέτρηση με το χρόνο δειγματοληψίας, προκύπτει η μεταβολή της κλίσης σε μοίρες. Προσθέτοντας την μεταβολή αυτή στην προηγούμενη μέτρηση της κλίσης προκύπτει η νέα τιμή της κλίσης.

Τα αποτελέσματα από το γυροσκόπιο παρουσιάζουν κατά πολύ μεγαλύτερη αξιοπιστία από αυτά του επιταχυνσιομέτρου και για αυτό έχουν πολύ μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στον υπολογισμό της τελικής κλίσης. Ο συντελεστής αυτός εξαρτάται από το διάστημα δειγματοληψίας και από μια σταθερά εξάλειψης θορύβου που έχει να κάνει με το χρόνο απόκρισης του επιταχυνσιομέτρου μεταξύ μετρήσεων σε `sec` και δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Alpha} = T / (T + \Delta T), \quad \text{όπου:}$$

Alpha: ο συντελεστής βαρύτητας,

T: η χρονική σταθερά εξάλειψης θορύβου του επιταχυνσιομέτρου σε `sec`, που στην προκειμένη περίπτωση ισούται με `0.5 sec`,

ΔT : το διάστημα δειγματοληψίας.

Έχοντας επιλέξει διάστημα δειγματοληψίας `0.01 sec`, ο συντελεστής βαρύτητας Alpha που προκύπτει για τα δεδομένα του γυροσκοπίου είναι `0.98` ενώ για τα δεδομένα του επιταχυνσιομέτρου είναι $(1 - \text{Alpha})$ δηλαδή `0.02`.

Η κλίση προκύπτει από τη σχέση:

$$R_{X(i)} = \text{Alpha} \cdot (R_{X(i-1)} + G_{X(i)} \cdot \Delta T) + (1 - \text{Alpha}) \cdot R_{XACC(i)}, \text{ όπου:}$$

$R_{X(i)}$: η τελική κλίση σε deg

$R_{X(i-1)}$: η προηγούμενη τιμή της τελικής κλίσης σε deg

Alpha: ο συντελεστής βαρύτητας

$G_{X(i)}$: η μέτρηση του γυροσκοπίου σε deg/sec

$R_{XACC(i)}$: η υπολογισμένη τιμή της γωνίας κλίσης από τα δεδομένα του επιταχυνσιόμετρου σε deg

ΔT : το διάστημα δειγματοληψίας σε sec

Πολλαπλασιάζοντας τη μέτρηση του γυροσκοπίου με το διάστημα δειγματοληψίας προκύπτει η μεταβολή της κλίσης από τα δεδομένα του γυροσκοπίου, η οποία προστίθεται στην προηγούμενη υπολογισμένη τιμή της τελικής κλίσης για να προκύψει η τιμή της νέας κλίσης μόνο από το γυροσκόπιο, η οποία στη συνέχεια πολλαπλασιάζεται με τον συντελεστή βαρύτητας Alpha. Προστίθεται επίσης η κλίση από τα δεδομένα του επιταχυνσιόμετρου πολλαπλασιασμένη με (1-Alpha) και προκύπτει η νέα τελική κλίση.

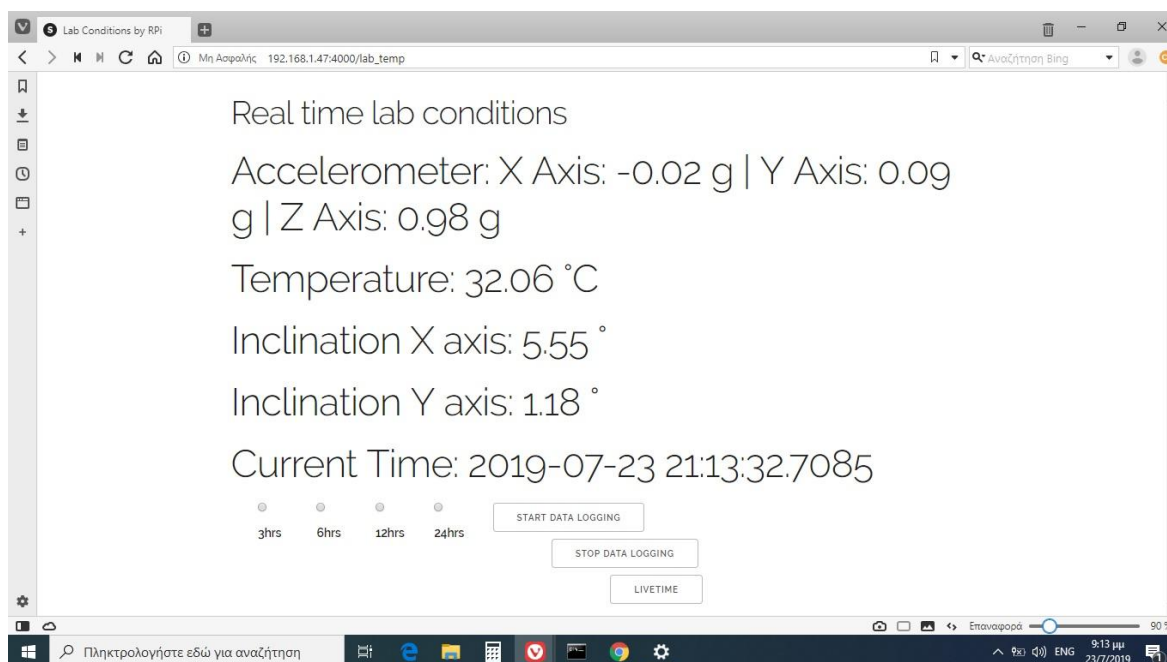
4.7 Εμφάνιση κύριας ιστοσελίδας

Η εκτέλεση του κυρίως προγράμματος από τον μικροϋπολογιστή επιτρέπει τη σύνδεση ενός εξωτερικού πελάτη (client) στην εφαρμογή, στη συγκεκριμένη IP όπου έχει λάβει ο μικροϋπολογιστής και στην κατάλληλη θύρα επικοινωνίας και τοποθεσία. Αυτό επιτυγχάνεται με την παρακάτω εντολή στο κυρίως πρόγραμμα.

```
187
188 if __name__ == "__main__":
189     app.run(host='0.0.0.0', port=4000)
190
```

Εικόνα 4.12: Εντολή εκτέλεσης της εφαρμογής από το κυρίως πρόγραμμα

Μέσω αυτής της εντολής γίνεται η εκτέλεση της εφαρμογής Flask, ενώ αυτή βρίσκεται στο τέλος του κυρίως προγράμματος ούτως ώστε να εκτελεστεί αφού διαβαστεί ο υπόλοιπος κώδικας. Ο όρος host='0.0.0.0' δηλώνει πως η φιλοξενία της εφαρμογής θα γίνει στη διεύθυνση IP του μικροϋπολογιστή και όχι σε κάποια άλλη IP. Η κύρια ιστοσελίδα η οποία εμφανίζεται στο χρήστη μετά τη σύνδεσή του παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.13: Στιγμιότυπο της κύριας ιστοσελίδας

Η παραπάνω εικόνα αποτελεί ένα στιγμιότυπο από την απεικόνιση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο στην κύρια ιστοσελίδα. Η απεικόνιση των δεδομένων είναι δυναμική και η ανανέωσή τους γίνεται ανάλογα με το διάστημα (interval) ανανέωσης της ιστοσελίδας στο υπόβαθρο το οποίο έχει οριστεί, σε συνδυασμό και με το διάστημα δειγματοληψίας. Τα δεδομένα τα οποία απεικονίζονται είναι:

οι συνιστώσες του διανύσματος της επιτάχυνσης από το επιταχυνσιόμετρο σε μονάδες g, η θερμοκρασία σε °C,

οι κλίσεις περί τους άξονες X και Y σε ° και τέλος,

η τρέχουσα ώρα και ημερομηνία.

Στο κάτω μέρος της σελίδας υπάρχουν τέσσερα διαφορετικά κουμπιά (radio buttons) προεπιλογής του χρονικού διαστήματος στο οποίο επιθυμούμε να παρουσιαστούν τα καταγεγραμμένα δεδομένα σε γράφημα. Συγκεκριμένα υπάρχουν οι προεπιλογές για τις τελευταίες 3, 6, 12 και 24 ώρες. Επιλέγοντας ένα από αυτά, ο χρήστης κατευθύνεται σε μια νέα σελίδα όπου φορτώνονται σε λίστα τα καταγεγραμμένα δεδομένα μαζί με τα γραφήματα για θερμοκρασία και κλίσεις. Στη νέα σελίδα υπάρχει επίσης πεδίο επιλογής ώρας και ημερομηνίας για παρουσίαση των δεδομένων.

Στο κάτω δεξιό μέρος της σελίδας τοποθετήθηκαν τέλος τρία διαφορετικά κουμπιά τα οποία μπορεί να επιλέξει ο χρήστης, συγκεκριμένα ένα για την έναρξη της καταγραφής των δεδομένων, ένα για τον τερματισμό της καταγραφής και ένα για την παρουσίαση των δεδομένων σε γράφημα σε πραγματικό χρόνο. Η διαχείριση της καταγραφής των δεδομένων γίνεται μέσω του δεύτερου προγράμματος το οποίο αναπτύχθηκε, το οποίο εισάγεται στην αρχή του κυρίως προγράμματος.

Καταχώρηση δεδομένων σε database

Η αποθήκευση των μετρήσεων κατά την καταγραφή γίνεται σε βάση δεδομένων (database) η οποία αναπτύχθηκε στον μικροϋπολογιστή Raspberry, μέσω του λογισμικού διαχείρισης βάσεων δεδομένων SQLite Browser (Εικόνα 4.12). Η βάση δεδομένων αποτελείται από πέντε διαφορετικούς πίνακες, συγκεκριμένα:

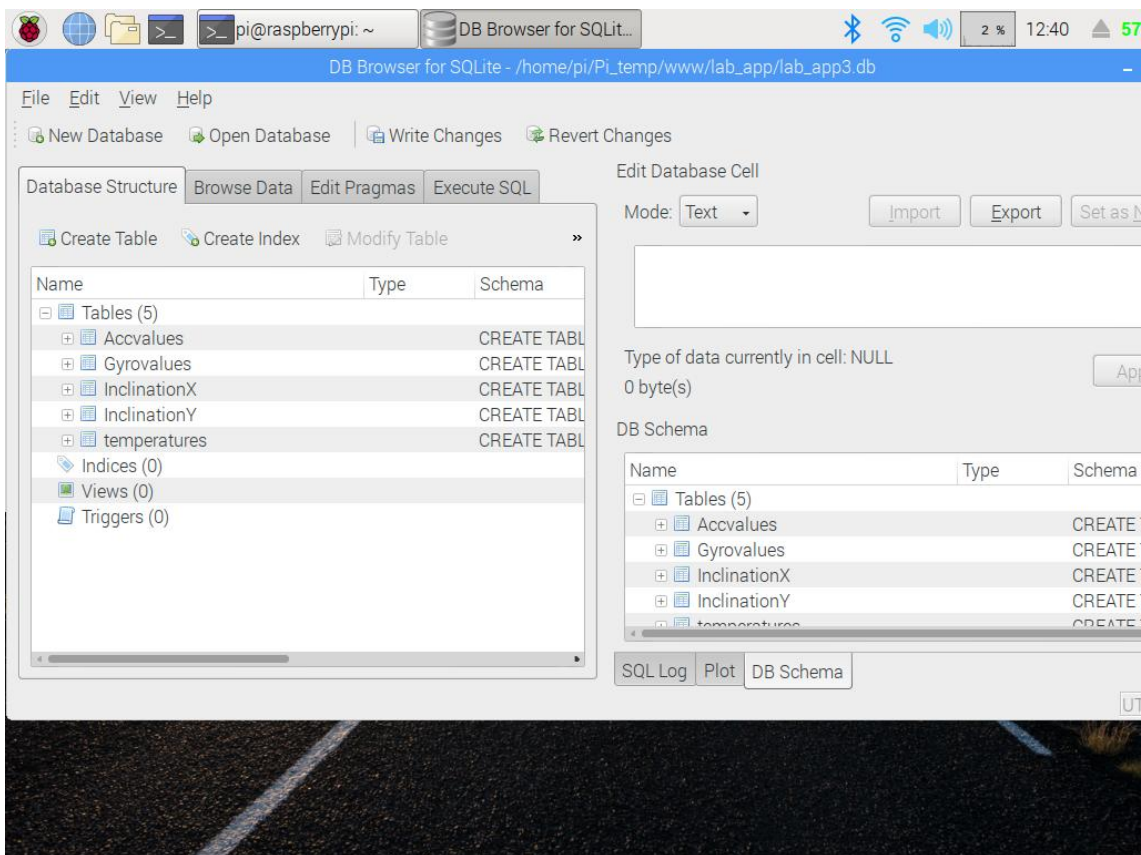
Ένα πίνακα με 2 στήλες για τα δεδομένα της θερμοκρασίας (Ημερομηνία και ώρα, θερμοκρασία)

Ένα πίνακα με 4 στήλες για τα δεδομένα του γυροσκοπίου (Ημερομηνία και ώρα, μετρήσεις X,Y,Z)

Ένα πίνακα με 4 στήλες για τα δεδομένα του επιταχυνσιομέτρου (Ημερομηνία και ώρα, μετρήσεις X,Y,Z)

Ένα πίνακα με 2 στήλες για τις τελικές κλίσεις περί τον άξονα X (Ημερομηνία και ώρα, κλίση X)

Ένα πίνακα με 2 στήλες για τις τελικές κλίσεις περί τον άξονα Y (Ημερομηνία και ώρα, κλίση Y)



Εικόνα 4.14: Η βάση δεδομένων στο λογισμικό SQLite Browser

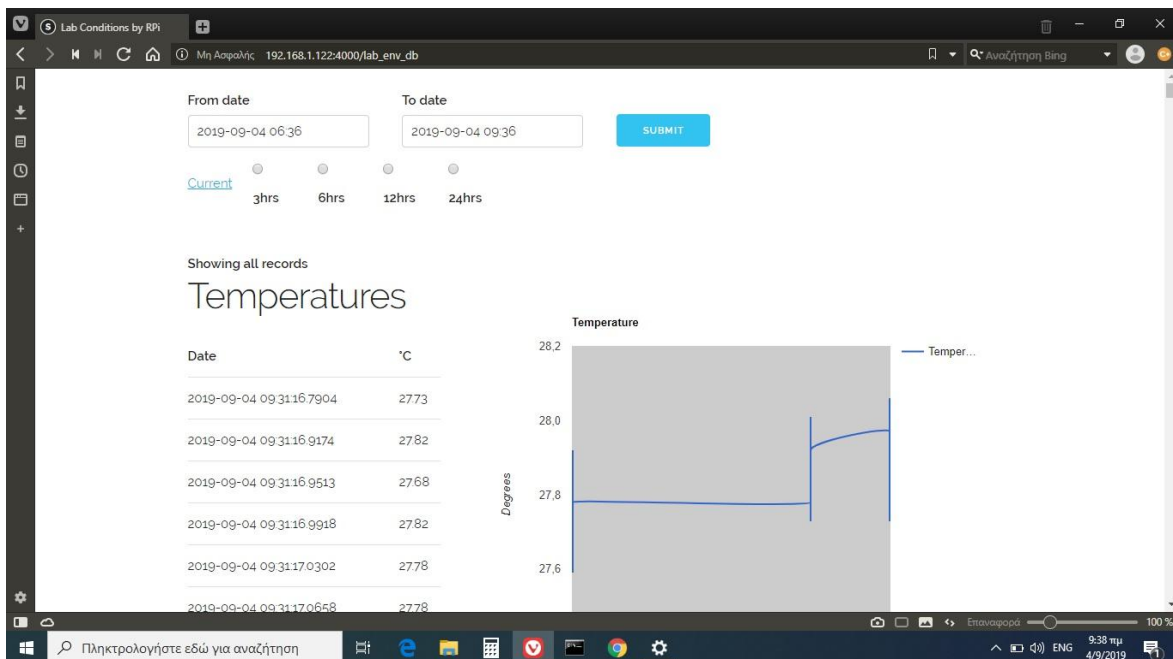
Με την έναρξη της καταγραφής, γίνεται σύνδεση στη βάση δεδομένων και τα νέα δεδομένα προστίθενται ως νέες γραμμές στους παραπάνω πίνακες, σύμφωνα με το

διάστημα δειγματοληψίας που έχει οριστεί στο πρόγραμμα που εκτελεί την καταγραφή. Η ώρα και η ημερομηνία καταχωρούνται σε μία στήλη και αποτελούν κοινή στήλη σε όλους τους πίνακες της βάσης δεδομένων.

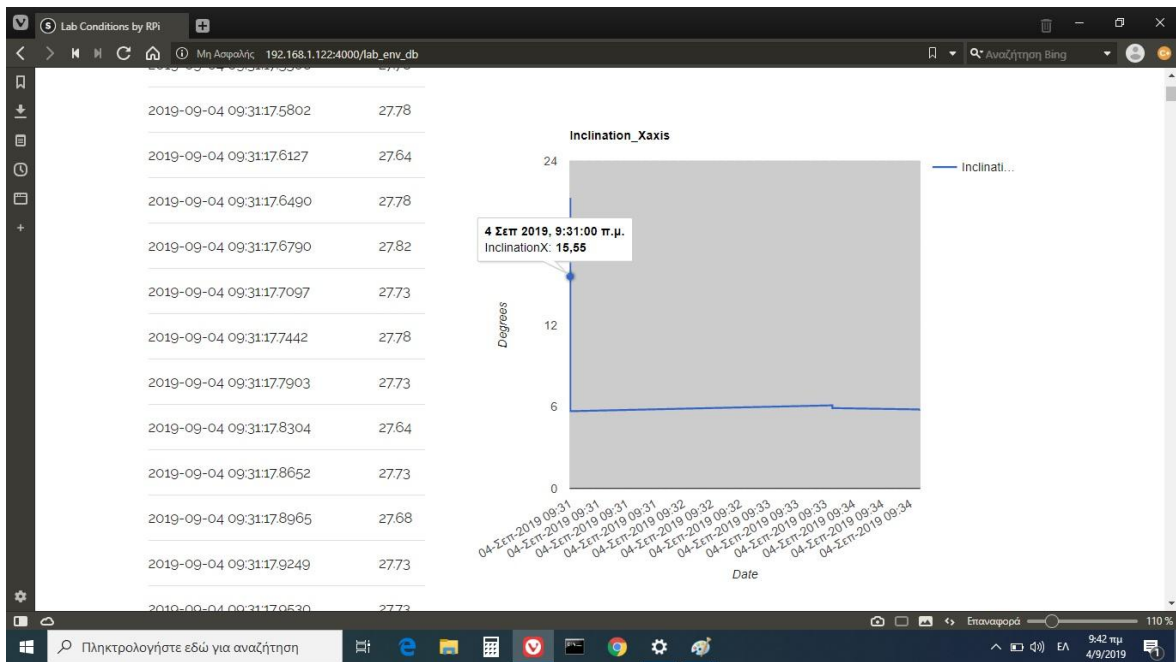
Παρουσίαση δεδομένων σε γράφημα

Η επιλογή ενός από τα τέσσερα κουμπιά προκαθορισμένου χρονικού διαστήματος n-ωρών από την κύρια σελίδα, κατευθύνει τον χρήστη σε μια νέα ιστοσελίδα, φορτώνοντας ένα νέο template από την εφαρμογή Flask, όπου παρουσιάζονται τα καταγεγραμμένα δεδομένα της θερμοκρασίας, της κλίσης και της επιτάχυνσης τις τελευταίες n-ώρες. Δίνεται επίσης η δυνατότητα επιλογής οποιουδήποτε χρονικού διαστήματος θελήσει ο χρήστης.

Αφού οριστεί το επιθυμητό χρονικό διάστημα, το πρόγραμμα ανατρέχει στη database για το διάστημα αυτό και φορτώνει τις αντίστοιχες τιμές από τον αντίστοιχο πίνακα, παρουσιάζοντάς τες σε ένα γράφημα με τη βοήθεια του εργαλείου προβολής γραφικών παραστάσεων Google Graphs. Το template που χρησιμοποιήθηκε ανήκει σε ένα αντίστοιχο project ανοιχτού κώδικα στο διαδίκτυο, το οποίο περιλάμβανε την κατασκευή ενός μετεωρολογικού σταθμού για τη μέτρηση και ζωντανή μετάδοση της θερμοκρασίας και υγρασίας με τη χρήση ενός αισθητήρα. Το template αυτό χρησιμοποιήθηκε ως βάση και πάνω σε αυτό έγιναν οι απαραίτητες προσθήκες και μετατροπές για να παραχθεί το τελικό αποτέλεσμα των γραφικών παραστάσεων των μετρήσεών μας (Εικόνες 4.13 & 4.14).



Εικόνα 4.15: Γράφημα θερμοκρασίας και λίστα καταγεγραμμένων τιμών.



Εικόνα 4.16: Γράφημα της κλίσης περί τον άξονα Χ. Στα αριστερά απεικονίζονται οι τιμές της θερμοκρασίας

Κεφάλαιο 5°

ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΚΛΙΝΟΜΕΤΡΟΥ

Στο Κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη διαδικασία της βαθμονόμησης του κλινομέτρου η οποία έγινε με σκοπό τον προσδιορισμό των συστηματικών σφαλμάτων του οργάνου, της απόκλισης των μετρούμενων κλίσεων από τις πραγματικές, της διακριτότητάς του και της ευαισθησίας του στις θερμοκρασιακές μεταβολές. Μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης έγινε εξαγωγή ενός συντελεστή εξισορρόπησης των μετρήσεων (calibration factor), ο οποίος διορθώνει τις μετρούμενες τιμές φέρνοντάς τες κοντά στις πραγματικές και προκύπτει από την κλίση του γραφήματος των πραγματικών προς των μετρούμενων τιμών.

5.1 Διαδικασία βαθμονόμησης

Η διαδικασία της βαθμονόμησης πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Μεταλλικών Κατασκευών του Ε.Μ.Π. και περιλάμβανε τη στερέωση του κλινομέτρου πάνω σε μια δοκό αλουμινίου ορθογωνικής διατομής, γνωστών διαστάσεων και με πλήρη οριζοντιότητα, κάτω από την οποία τοποθετήθηκαν σε συγκεκριμένη θέση, μεταλλικά ελάσματα γνωστού πάχους. Με την τοποθέτηση κάθε ελάσματος, έγινε καταγραφή των μετρήσεων του κλινομέτρου στη βάση δεδομένων μέσω κινητού τηλεφώνου, από όπου στη συνέχεια εξήχθησαν τα δεδομένα κάθε κύκλου μετρήσεων και μεταφέρθηκαν σε αρχείο excel για επεξεργασία.



Εικόνα 5.1: Εικόνα από τη διαδικασία βαθμονόμησης περί τον άξονα X του κλινομέτρου

Η δοκός αλουμινίου τοποθετήθηκε σε πλήρως οριζόντια επιφάνεια εντός πρότυπης μεταλλικής διατομής στο εργαστήριο. Κάθε κύκλος μετρήσεων περιλάμβανε την διαδοχική τοποθέτηση των ελασμάτων στο προκαθορισμένο σημείο κάτω από τη δοκό και την ανύψωση του ενός άκρου της έως ότου αυτό φτάσει στην υψηλότερη θέση. Μόλις τελείωνε η καταγραφή στην υψηλότερη θέση, ακολουθούσε η διαδοχική αφαίρεση των ελασμάτων μαζί με νέα καταγραφή, έως και την οριζόντια θέση.

Τεχνικά χαρακτηριστικά

Το μήκος της δοκού ήταν 3000mm, ενώ το όριο τοποθέτησης των ελασμάτων βρισκόταν σε απόσταση 2970mm από το σταθερό άκρο της δοκού. Με την τοποθέτηση κάθε ελάσματος, το άκρο της δοκού στο οποίο ήταν στερεωμένο το κλινόμετρο αποκτούσε μια κλίση από την οριζόντιο, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$\phi = \tan^{-1} \frac{h}{L},$$

όπου h το συνολικό ύψος των ελασμάτων και L η απόσταση του ορίου τοποθέτησης των ελασμάτων από το σταθερό άκρο της δοκού.

Σε κάθε ύψος, έγινε είσοδος στην εφαρμογή μέσω κινητού τηλεφώνου και έναρξη της καταγραφής των μετρήσεων για 01':30" λεπτό, με συχνότητα καταγραφής 10 μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο. Συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις κύκλοι προσθήκης και αφαίρεσης των ελασμάτων και για τους δύο άξονες X και Y αντίστοιχα, προσανατολίζοντας το κλινόμετρο κατάλληλα πάνω στη δοκό. Κάθε κύκλος περιλάμβανε τη μέτρηση σε 14 διαφορετικά ύψη και συνολικά 27 στάδια καταγραφής. Το μέγιστο ύψος που επιτεύχθηκε ήταν 186,52mm και η αντίστοιχη μέγιστη γωνία κλίσης του κλινομέτρου 3,59°.

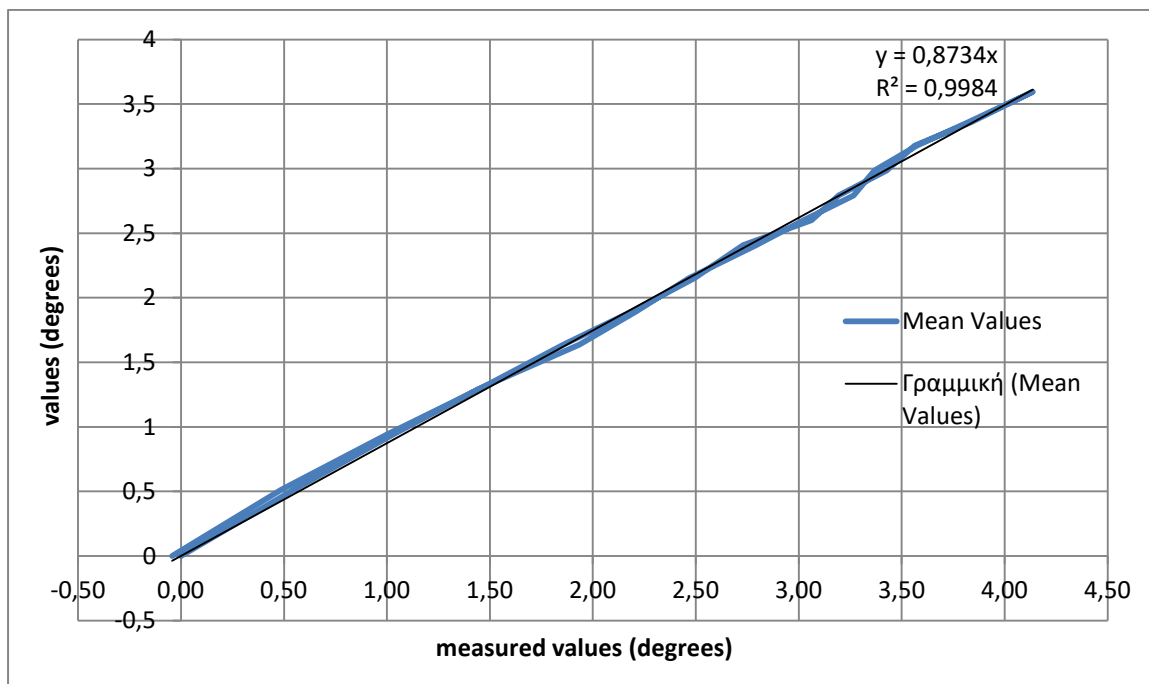
Για την εύρεση της διακριτότητας του οργάνου χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από την αρχή κάθε κύκλου βαθμονόμησης, όταν αυτό βρισκόταν σε οριζόντια θέση. Κατά την έναρξη του κάθε κύκλου η καταγραφή διαρκούσε 05':00" λεπτά αντί για 01':30" ώστε να ληφθούν περισσότερες μετρήσεις και ο μέσος όρος αυτών να είναι πιο αντιπροσωπευτικός.

5.2 Επεξεργασία μετρήσεων

Οι μετρούμενες από το όργανο γωνίες κλίσης απαιτούσαν την αφαίρεση της αρχικής απόκλισης (bias) από τις 0° την οποία παρουσίαζε το όργανο κατά τη μέτρηση σε οριζόντια θέση. Συνήθως για την λειτουργία ηλεκτρονικών κυκλωμάτων απαιτείται μία μικρή τιμή διαφοράς τάσης ή έντασης ηλεκτρικού ρεύματος που δίνει την απόκλιση από το μηδέν. Αφαιρώντας τον μέσο όρο των μετρούμενων τιμών στη θέση 0°, από το μέσο όρο των τιμών στις υπόλοιπες θέσεις, προκύπτει η διορθωμένη μετρούμενη τιμή κάθε θέσης, η οποία παρά τη διόρθωση της αρχικής απόκλισης εξακολουθεί να περιέχει το συστηματικό σφάλμα του οργάνου. Η επεξεργασία αυτή έγινε σε κάθε κύκλο μετρήσεων ξεχωριστά.

Αφού υπολογίστηκαν οι διορθωμένες τιμές κάθε θέσης/κλίσης και για τους τρεις κύκλους, χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος των τριών αυτών τιμών για να προκύψει μια πιο αντιπροσωπευτική μέση τιμή της μετρούμενης γωνίας σε κάθε θέση. Μέσω του διαγράμματος των μέσων μετρούμενων τιμών συναρτήσει των πραγματικών τιμών της

γωνίας, προκύπτει ο συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor), ο οποίος αντιστοιχεί στην κλίση της γραμμής ελαχίστων τετραγώνων (best fit line) του διαγράμματος που διέρχεται από το σημείο (0,0). Η γραμμή αυτή αποτελεί την 'καμπύλη βαθμονόμησης'.



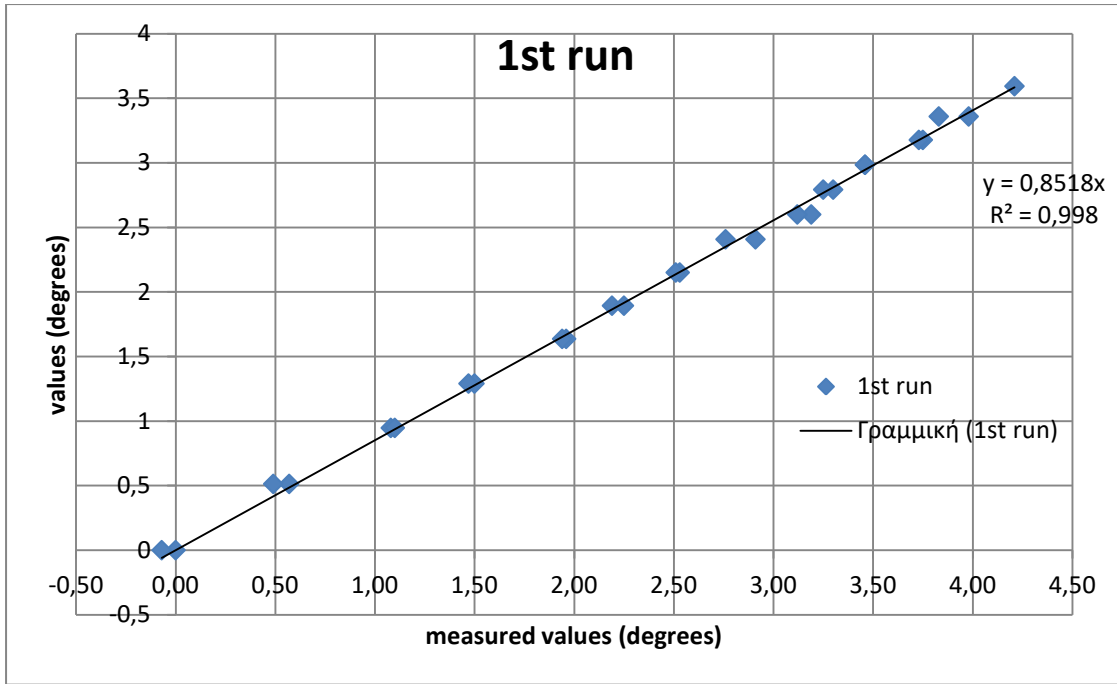
Σχήμα 5.1: Διάγραμμα μέσων μετρούμενων και πραγματικών τιμών από όπου προκύπτει η καμπύλη βαθμονόμησης.

Στο Σχήμα 5.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα των μέσων μετρούμενων προς τις πραγματικές τιμές της γωνίας. Η καμπύλη βαθμονόμησης διέρχεται από το σημείο (0,0) και έχει κλίση 0.8734. Η γραμμή προσδιορίζεται μαθηματικά με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Από την εξίσωση της ευθείας προκύπτουν οι νέες διορθωμένες τιμές, οι οποίες βρίσκονται αρκετά κοντά στις πραγματικές εφόσον ο συντελεστής συσχέτισης $R^2=0.9984$.

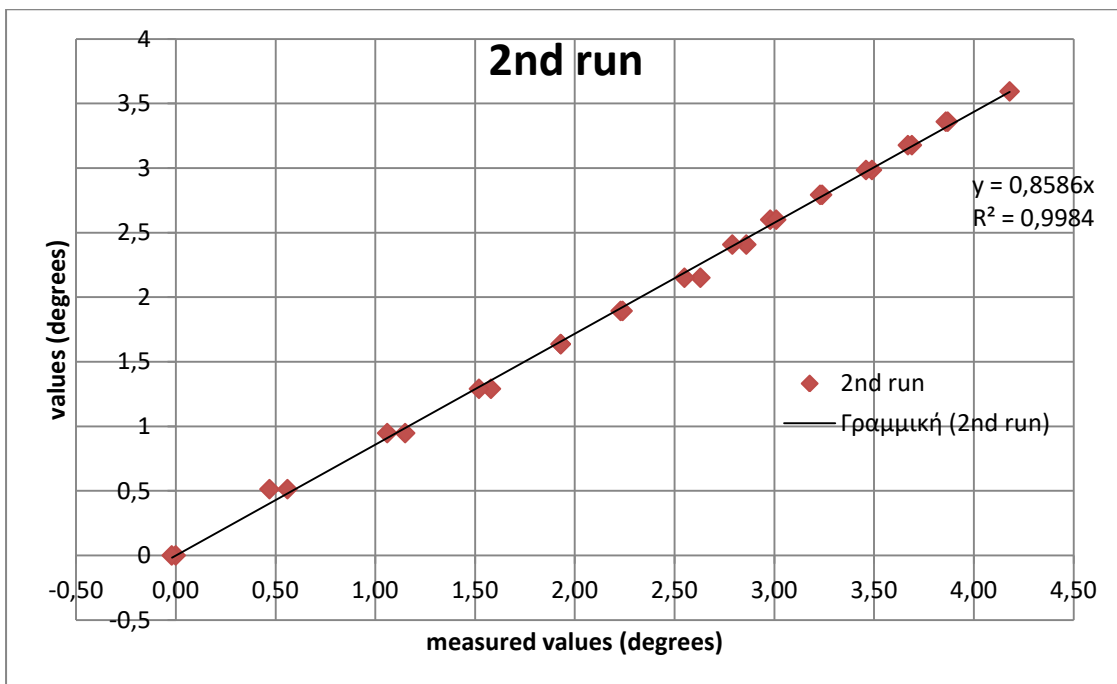
5.3 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙ ΤΟΝ Χ-ΑΞΟΝΑ

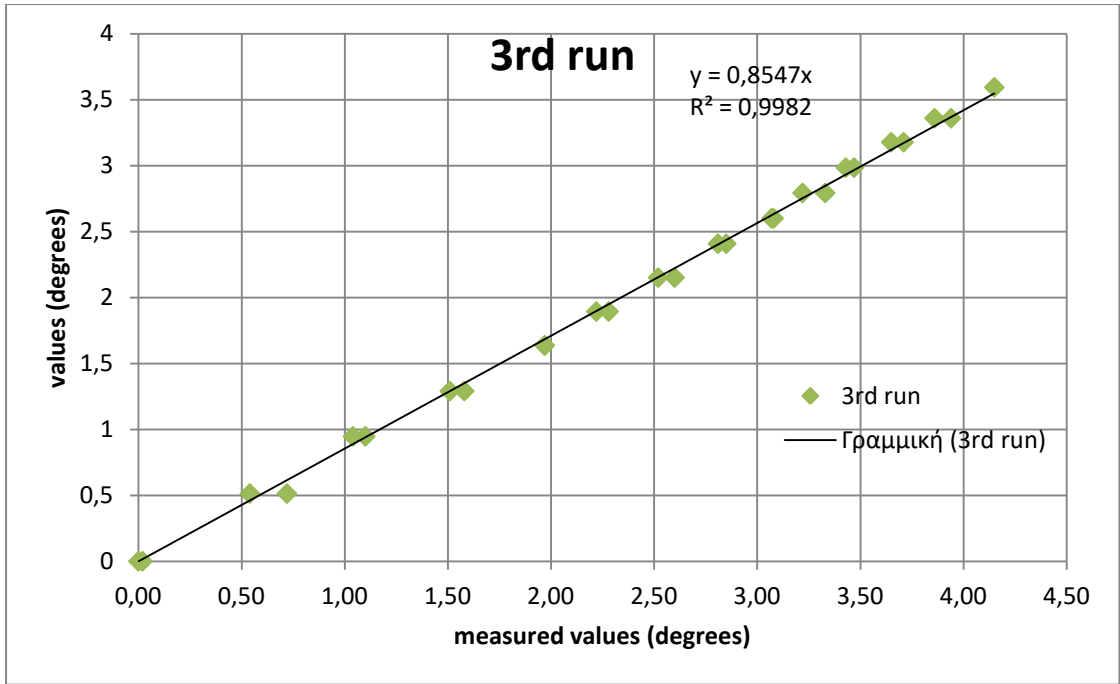
Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση που πραγματοποιήθηκε με προσανατολισμό του οργάνου περί τον Χ-άξονα. Στα Σχήματα 5.2-5.5 παρουσιάζονται τα διαγράμματα των πραγματικών προς τις μετρούμενες γωνίες για κάθε κύκλο ξεχωριστά και συνδυαστικά με το μέσο όρο τους. Από την κλίση της γραμμής τάσης των μέσων τιμών από τους τρεις κύκλους, προκύπτει ο συντελεστής βαθμονόμησης ο οποίος είναι ίσος με 0,8552. Υπολογίζεται επίσης η μέση τιμή της υστέρησης από τους τρεις κύκλους, η οποία αποτελεί την απόκλιση της μέτρησης στην τελική θέση του κύκλου βαθμονόμησης στις 0° από την αρχική τιμή στις 0° , (στην αρχή του κύκλου φόρτισης) και προέκυψε ίση με $-0,023^{\circ}$.



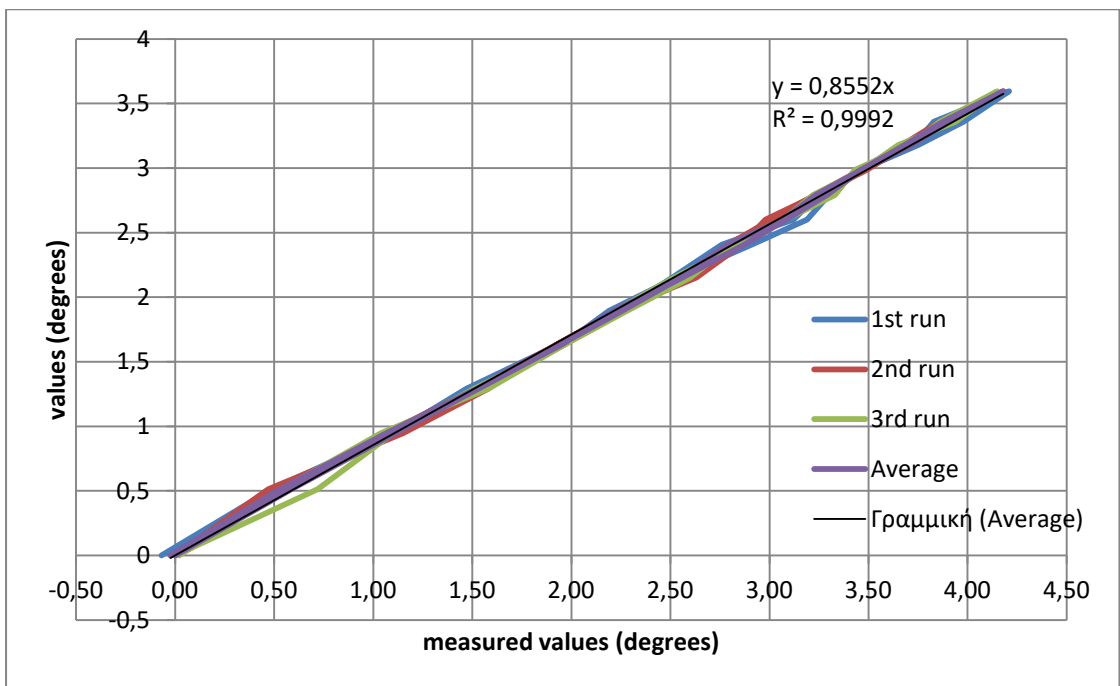
Σχήμα 5.2: Γράφημα πρώτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα X. Η υστέρηση ισούται με $-0,07^\circ$.



Σχήμα 5.3: Γράφημα δεύτερου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα X. Η υστέρηση ισούται με $-0,02^\circ$.



Σχήμα 5.4: Γράφημα τρίτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα X. Η υστέρηση ισούται με $0,02^\circ$.



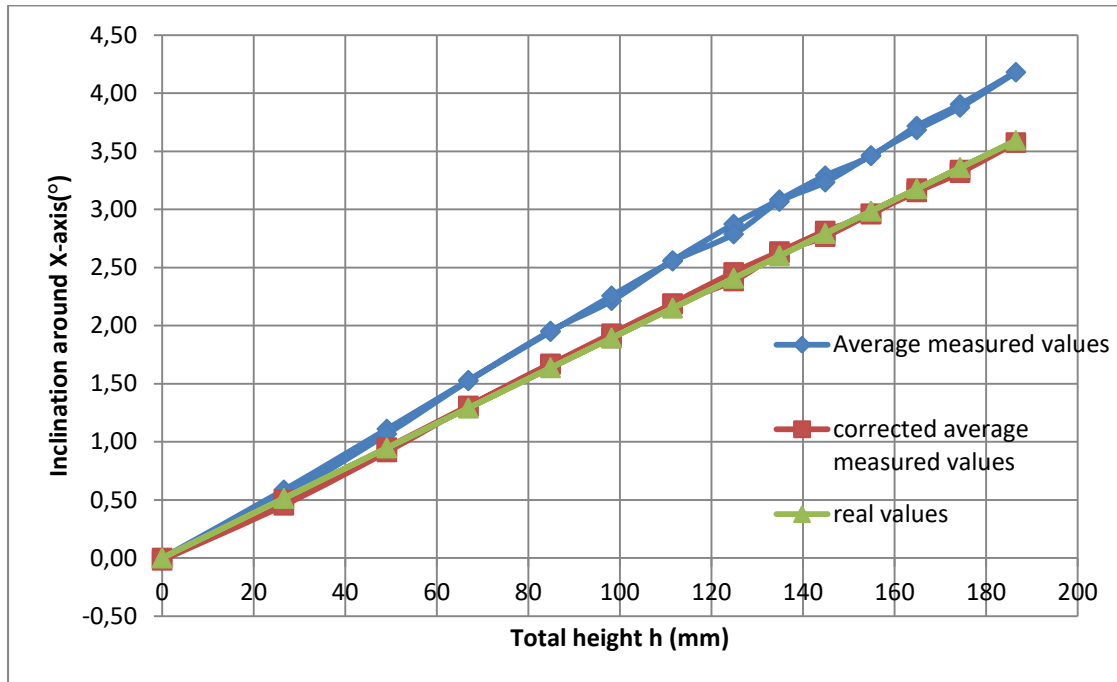
Σχήμα 5.5: Συνδυαστική απεικόνιση γραφημάτων των τριών κύκλων και μέσου όρου τους περί τον άξονα X. Ο συντελεστής βαθμονόμησης (*calibration factor*) είναι 0,8552.

Στο Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται το γράφημα της μετρούμενης γωνίας προς το συνολικό ύψος των ελασμάτων. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η κλίση, οι μετρούμενες τιμές αποκλίνουν αναλόγως από τις πραγματικές. Ο πολλαπλασιασμός των μέσων μετρούμενων τιμών με τον συντελεστή βαθμονόμησης έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση των τιμών κοντά στις πραγματικές, όπως παρατηρείται και στο γράφημα συνολικού ύψους – μετρούμενων

γωνιών. Το σχετικό σφάλμα (relative bias error) στην ανώτερη θέση μετά τη διόρθωση των μετρήσεων ισούται με -0,55% και υπολογίζεται από τη σχέση:

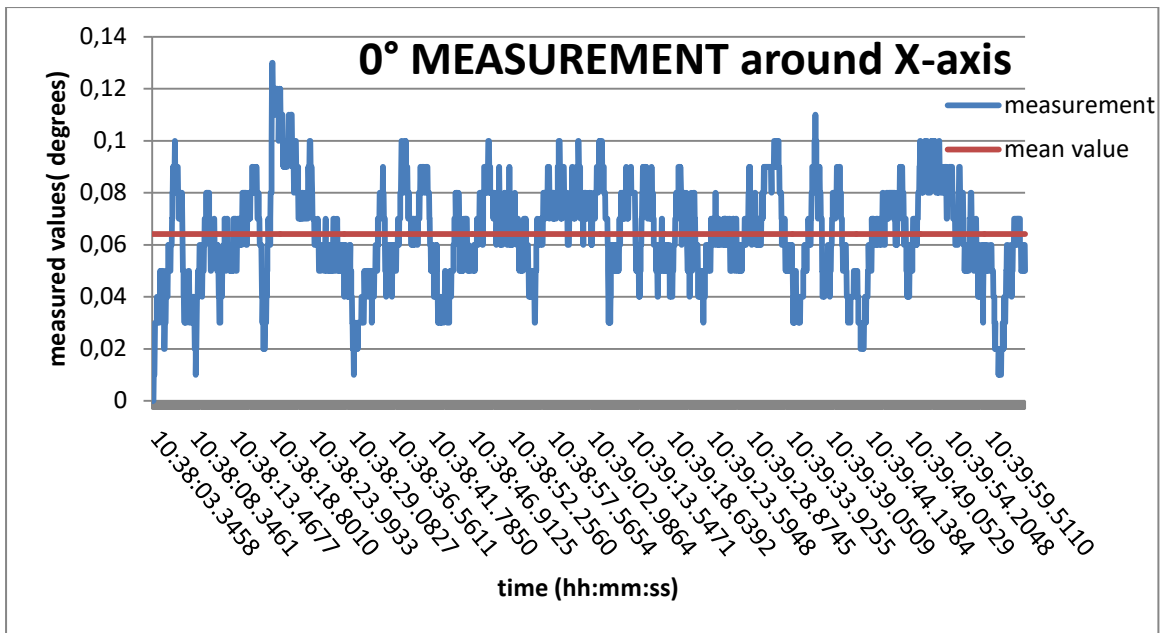
$$\text{σχετικό σφάλμα (\%)} = 100 \cdot \frac{X_{\text{διορθ}} - X_{\text{πραγ}}}{X_{\text{πραγ}}},$$

όπου $X_{\text{διορθ}}$, η διορθωμένη τιμή του μέσου όρου μετά από τον πολλαπλασιασμό της με τον συντελεστή βαθμονόμησης. Στην προκειμένη περίπτωση, η αρχική μέση τιμή στην ανώτερη θέση είναι ίση με $4,18^\circ$, η διορθωμένη τιμή είναι ίση με $3,57^\circ$ και η πραγματική τιμή είναι ίση με $3,59^\circ$.

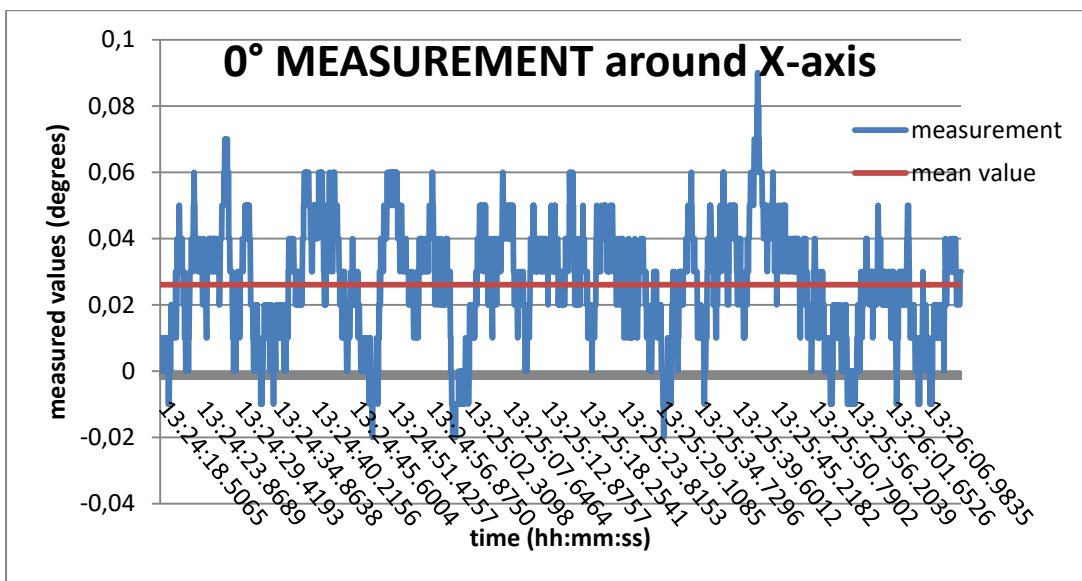


Σχήμα 5.6: Διάγραμμα μετρούμενων γωνιών περί τον X-άξονα συναρτήσει του συνολικού ύψους των ελασμάτων.

Τα διαγράμματα για τον υπολογισμό της επαναληψιμότητας των μετρήσεων που προέκυψαν από τις μετρήσεις στην οριζόντια θέση κατά την αρχή κάθε κύκλου παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τον πρώτο κύκλο, όπου η επαναληψιμότητα προέκυψε ίση με $\pm 0,036^\circ$ και υπολογίστηκε θεωρώντας ως μέσο άνω όριο των μετρήσεων τις $0,1^\circ$ και αφαιρώντας στη συνέχεια τη μέση κυμαινόμενη τιμή. Οι τιμές μεγαλύτερες του $0,1^\circ$ που παρουσιάζονται στο διάγραμμα, λόγω και της στιγμιαίας μόνο εμφάνισής τους, θεωρήθηκαν ως θόρυβος και δεν ελήφθησαν υπόψη. Η διακριτότητα των μετρήσεων είναι 0.01^0 και αποτελεί την μικρότερη τιμή μέτρησης στο διάγραμμα του Σχήματος 5.7.



Σχήμα 5.7: Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 1^{ου} κύκλου στις 0° περί τον X-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,064°. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με ±0,036° και η διακριτότητα 0.01.



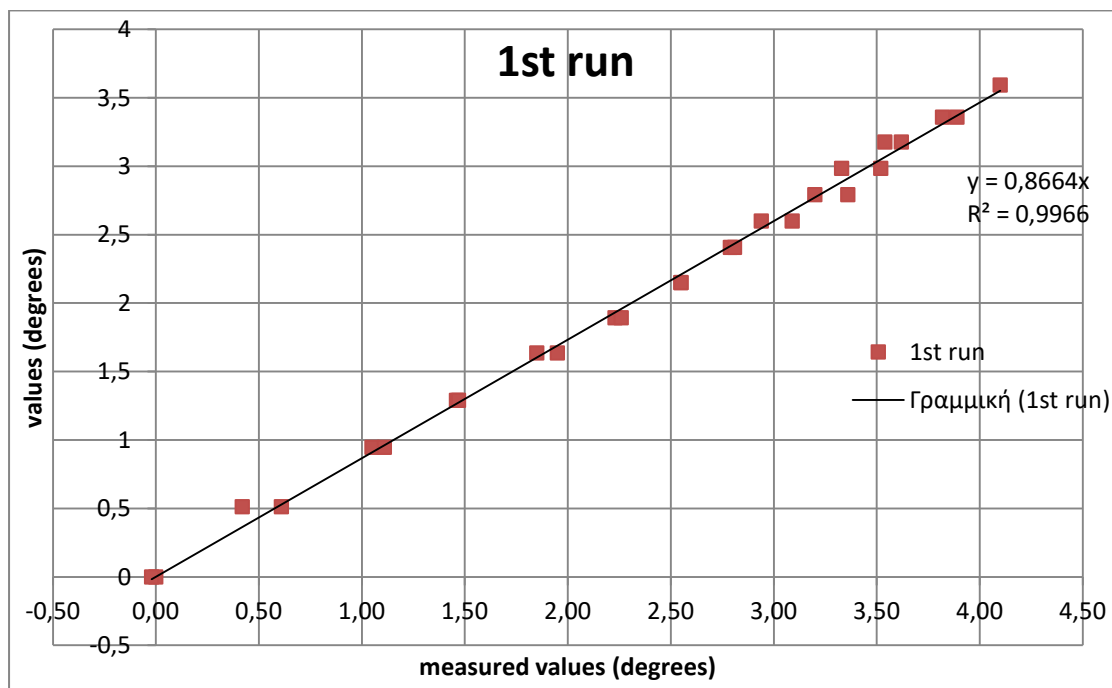
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 2^{ου} κύκλου στις 0° περί τον X-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,026°. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με ±0,034° και η διακριτότητα 0.01.

Στο Σχήμα 5.8 παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τον δεύτερο κύκλο, όπου η επαναληψιμότητα προέκυψε ίση με ±0,034° και υπολογίστηκε θεωρώντας ως μέσο άνω όριο των μετρήσεων τις 0,06° και αφαιρώντας στη συνέχεια τη μέση κυμαινόμενη τιμή. Οι τιμές μεγαλύτερες του 0,06° θεωρούνται όπως και προηγουμένως ως θόρυβος λόγω της μεμονωμένης εμφάνισής τους. Η διακριτότητα των μετρήσεων είναι 0.01°.

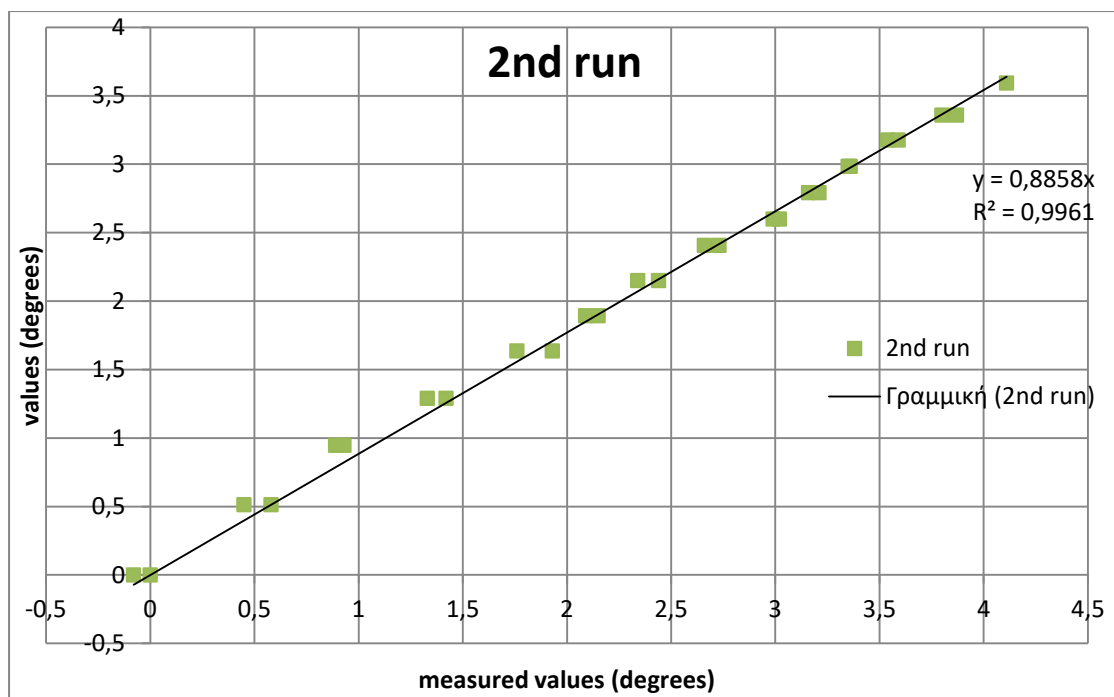
Οι μετρήσεις από τον 3^ο κύκλο περιείχαν αρκετό θόρυβο και κρίθηκαν μη αντιπροσωπευτικές, συνεπώς δεν χρησιμοποιήθηκαν. Η μέση επαναληψιμότητα που προκύπτει από τους δύο κύκλους είναι ίση με $\pm 0,035^\circ$ και η διακριτότητα που αποτελεί το ελάχιστο βήμα μεταβολής μεταξύ των μετρούμενων τιμών είναι $0,01^\circ$.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙ ΤΟΝ Υ-ΑΞΟΝΑ

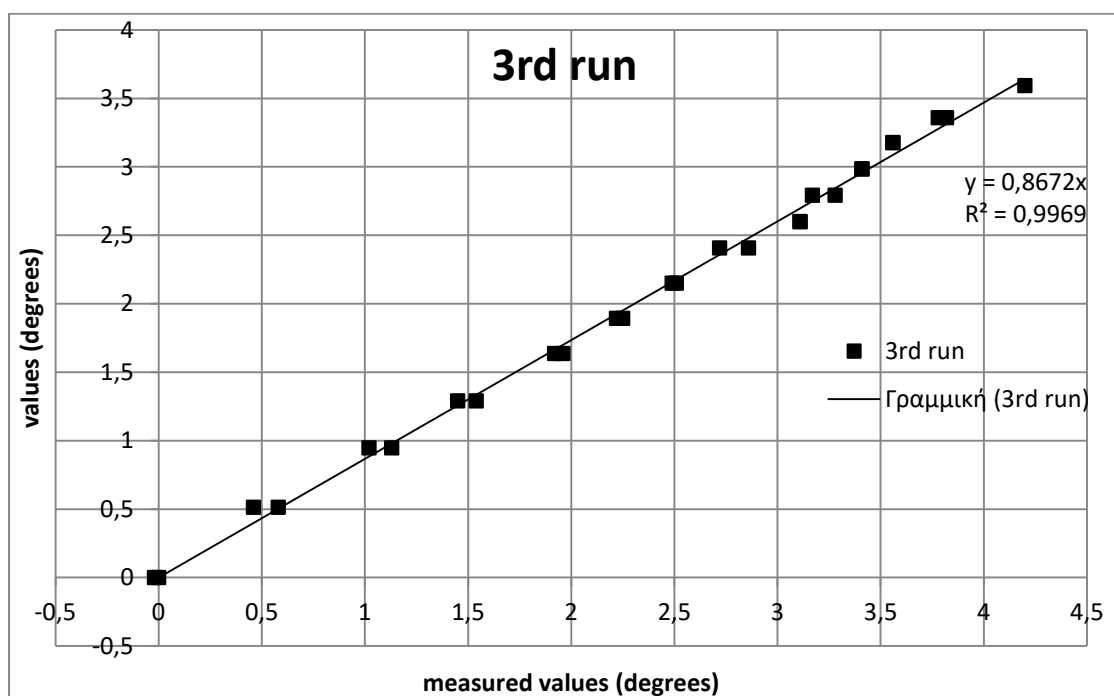
Στη συνέχεια παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.9-5.11 τα αποτελέσματα από τη βαθμονόμηση με προσανατολισμό του οργάνου περί τον Υ-άξονα. Από την κλίση της γραμμής τάσης των μέσων τιμών από τους τρεις κύκλους, προκύπτει ο συντελεστής βαθμονόμησης ο οποίος είναι ίσος με 0,8734. Η μέση τιμή της υστέρησης από τους τρεις κύκλους προέκυψε ίση με $-0,04^\circ$.



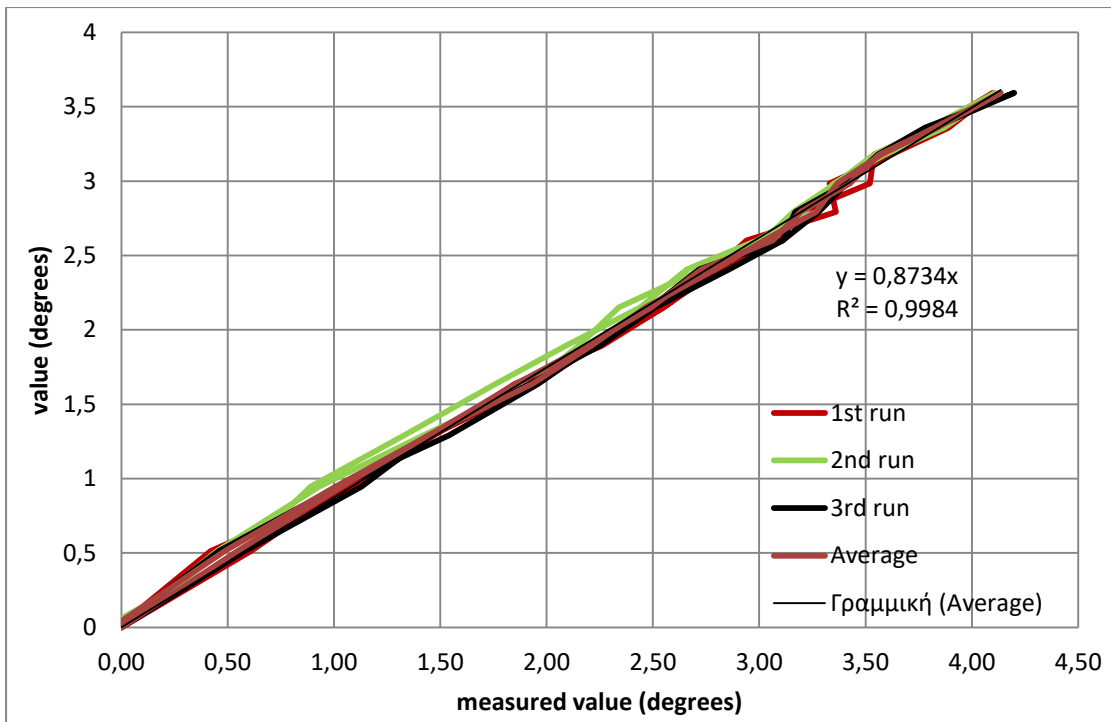
Σχήμα 5.9: Γράφημα πρώτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα Υ. Η υστέρηση ισούται με $-0,02^\circ$.



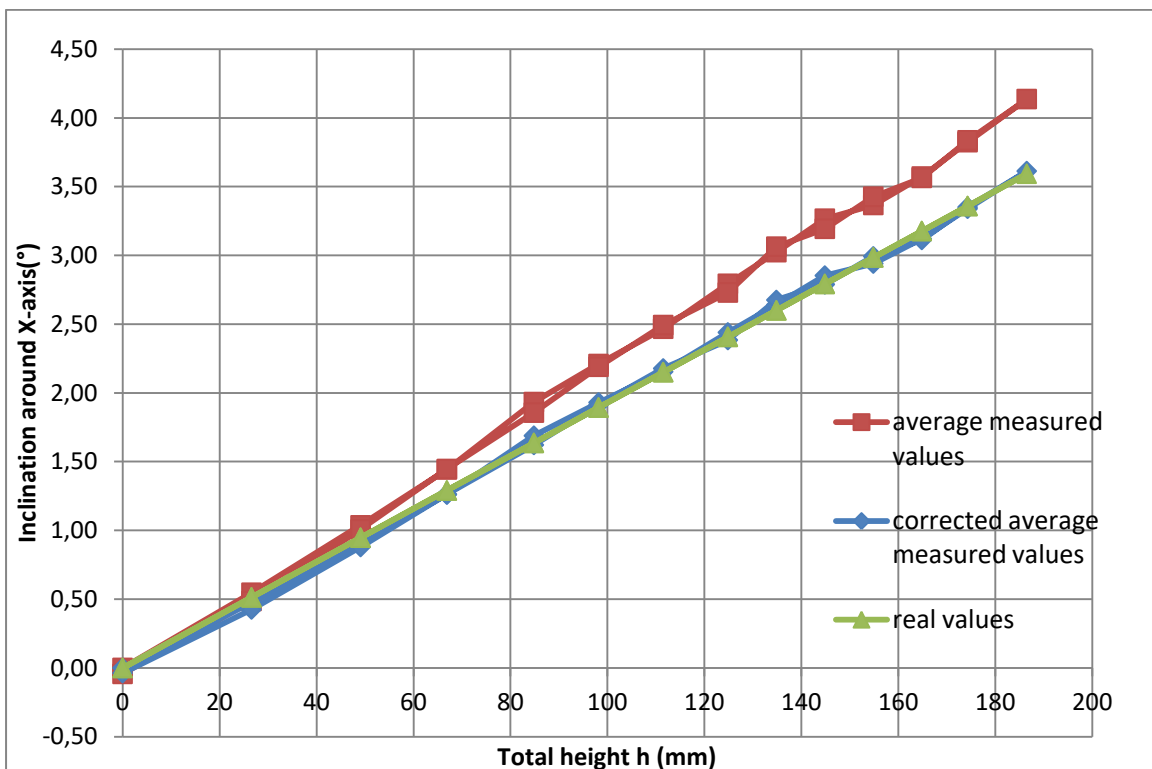
Σχήμα 5.10: Γράφημα δεύτερου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα Y. Η υστέρηση ισούται με $-0,08^\circ$.



Σχήμα 5.11: Γράφημα τρίτου κύκλου βαθμονόμησης περί τον άξονα Y. Η υστέρηση ισούται με $-0,02^\circ$.



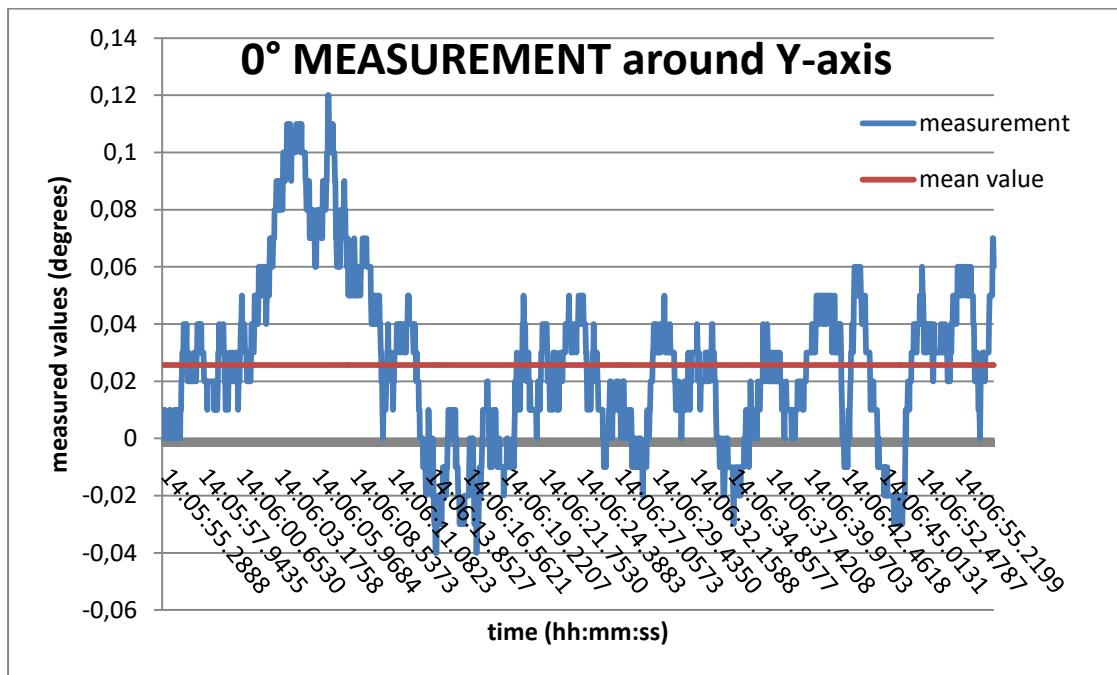
Σχήμα 5.12: Συνδυαστική απεικόνιση γραφημάτων των τριών κύκλων και του μέσου όρου τους περί τον άξονα Y. Ο συντελεστής βαθμονόμησης (calibration factor) είναι 0,8734.



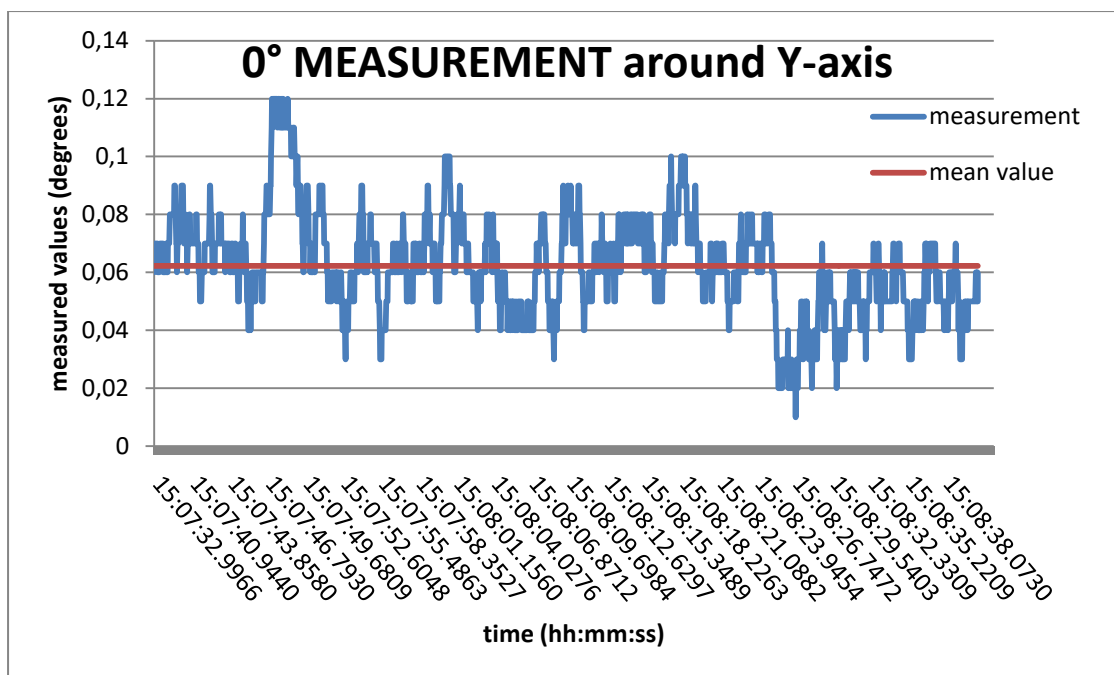
Σχήμα 5.13: Διάγραμμα μετρούμενων γωνιών περί τον Y-άξονα συναρτήσεως του συνολικού ύψους των ελασμάτων.

Στο Σχήμα 5.13 όπου οι κλίσεις σχεδιάζονται ως προς το ύψος των ελασμάτων η αρχική μέση τιμή στην ανώτερη θέση ισούται με $4,14^\circ$, η διορθωμένη τιμή με $3,61^\circ$ και η πραγματική με $3,59^\circ$, ενώ το σχετικό σφάλμα μετά τη διόρθωση ισούται με $0,55\%$.

Τα διαγράμματα για τον υπολογισμό της επαναληψιμότητας που προέκυψαν από τη μέτρηση στην οριζόντια θέση κατά την αρχή κάθε κύκλου παρουσιάζονται στη συνέχεια. Στο Σχήμα 5.14 παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τον πρώτο κύκλο, όπου η επαναληψιμότητα προέκυψε ίση με $\pm 0,034^\circ$ και υπολογίστηκε θεωρώντας ως μέσο άνω όριο των μετρήσεων τις $0,06^\circ$ και αφαιρώντας στη συνέχεια τη μέση κυμαινόμενη τιμή. Η διακριτότητα εξακολουθεί να παραμένει ίση με $0,01^\circ$.



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 1^{ου} κύκλου στις 0° περί τον Y-άξονα. Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι $0,026^\circ$. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με $\pm 0,034^\circ$ και η διακριτότητα $0,01^\circ$.

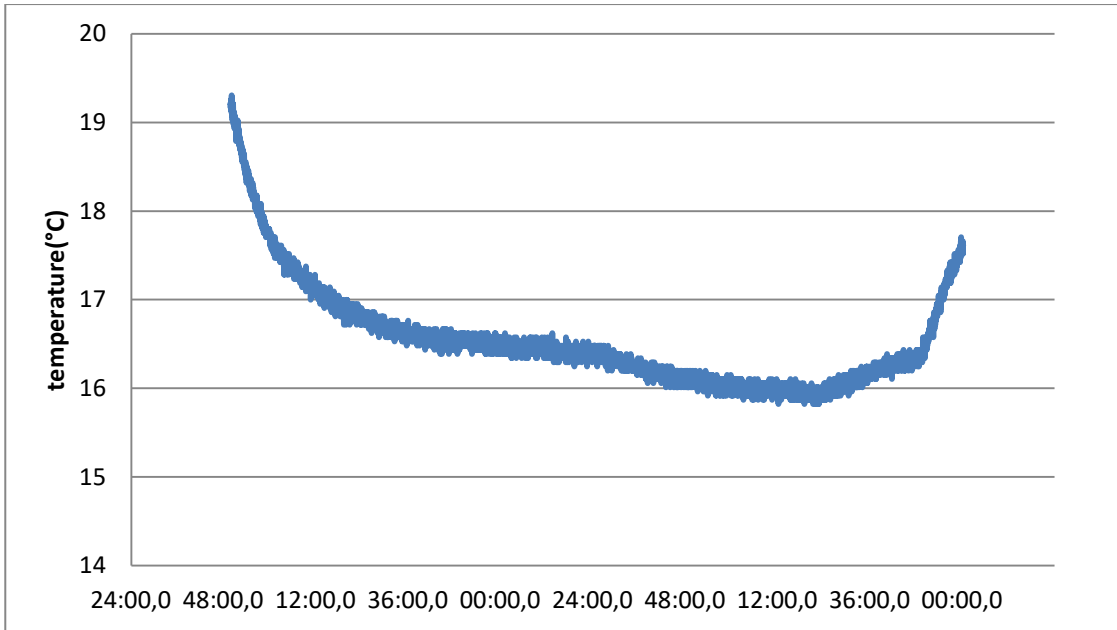


Σχήμα 5.7: Διάγραμμα μετρούμενων τιμών 2^{ου} κύκλου στις 0° περί τον Y-άξονα . Η μέση κυμαινόμενη τιμή είναι 0,062. Η επαναληψιμότητα είναι ίση με $\pm 0,038^\circ$ και η διακριτότητα 0.01° .

Στο Σχήμα 5.15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις από τον δεύτερο κύκλο της βαθμονόμησης περί τον Y-άξονα. Η επαναληψιμότητα προέκυψε αφαιρώντας τη μέση κυμαινόμενη τιμή η οποία είναι ίση με $0,062^\circ$ από το μέσο άνω όριο των μετρήσεων το οποίο θεωρήθηκε ως $0,1^\circ$. Συνεπώς η επαναληψιμότητα ισούται με $\pm 0,038^\circ$ και μέση επαναληψιμότητα που προκύπτει από τους δύο κύκλους είναι ίση με $\pm 0,036^\circ$. Όπως και προηγουμένως, η διακριτότητα του οργάνου είναι ίση με $0,01^\circ$. Παρατηρείται ομοιότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων και για τους δύο άξονες.

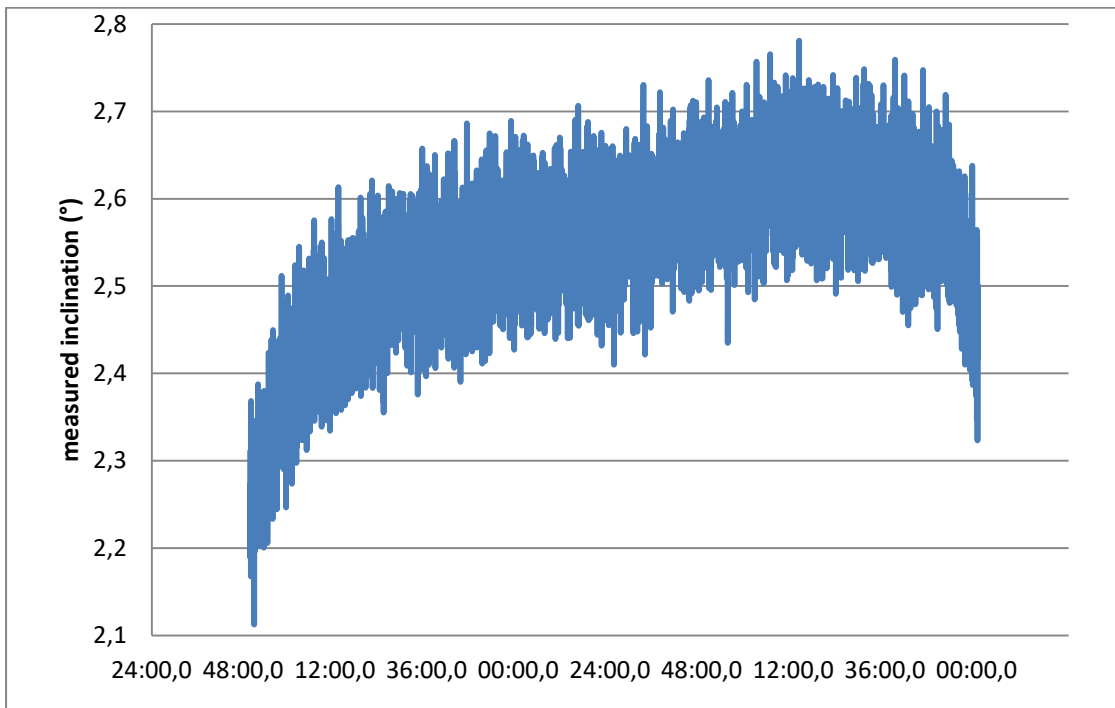
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΠΙΔΡΑΣΗΣ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΩΝ ΜΕΤΑΒΟΛΩΝ

Ο μετατροπέας MPU6050 διαθέτει αισθητήρα θερμοκρασίας ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για να αξιολογηθεί η επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών στις μετρήσεις της κλίσης. Για το σκοπό αυτό έγινε τοποθέτηση του κλινομέτρου σε κατάλληλο χώρο εντός του εργαστηρίου, όπου η θερμοκρασία παρουσίαζε αισθητές μεταβολές κατά τη διάρκεια του 24ώρου. Το όργανο τοποθετήθηκε σε οριζόντια θέση λαμβάνοντας μετρήσεις για περίπου 16 ώρες, ξεκινώντας από τις απογευματινές ώρες της 1^{ης} ημέρας έως τις πρωινές ώρες της επομένης. Το βήμα δειγματοληψίας επιλέχθηκε να είναι 10 sec. Η μεταβολή της θερμοκρασίας που καταγράφηκε κατά τις ώρες αυτές παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.16.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα μεταβολής θερμοκρασίας για χρονικό διάστημα ~16 ωρών.

Η καταγραφή ξεκίνησε απογευματινή ώρα με το κλείσιμο του εργαστηρίου, όταν η θερμοκρασία, λόγω της θέρμανσης που λειτουργούσε στο χώρο, ήταν υψηλότερη από ότι στη συνέχεια. Τις επόμενες ώρες μετά το κλείσιμο της θέρμανσης παρατηρείται πτώση της θερμοκρασίας μέχρι τις πρώτες πρωινές ώρες, όταν παρατηρείται εκ νέου άνοδος της θερμοκρασίας. Στο Σχήμα 5.17 παρουσιάζονται οι μετρήσεις της γωνίας που κατέγραψε το κλινόμετρο στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα μεταβολής κλίσης για χρονικό διάστημα ~16 ωρών.

Παρατηρώντας τα Σχήματα 5.16 & 5.17 είναι εμφανής η επιρροή της θερμοκρασίας στις μετρήσεις της κλίσης, η οποία παρουσιάζει άνοδο των μετρούμενων τιμών με την πτώση της θερμοκρασίας και μείωση των μετρούμενων τιμών με την άνοδο της θερμοκρασίας. Η αναλογία που προέκυψε μεταξύ των δύο μεγεθών βάσει των μέγιστων και ελάχιστων μετρήσεων είναι $0,1925^{\circ}/^{\circ}\text{C}$, η οποία ενδέχεται να μην είναι πλήρως αντιπροσωπευτική, δεδομένου του σχετικά μικρού εύρους μεταβολής της θερμοκρασίας που ήταν περίπου μόνο 3°C .

Κεφάλαιο 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στο παρόν Κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής. Γίνονται επίσης προτάσεις για περαιτέρω ανάπτυξη της εφαρμογής και του υλικού μέρους για σύνδεση περισσότερων κλινομέτρων και αναβάθμιση του συστήματος.

1. Από τη βαθμονόμηση προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι μετρήσεις της κλίσης παρουσιάζουν ένα συστηματικό σφάλμα, το οποίο είναι ανάλογο με την κλίση του οργάνου είτε περί τον άξονα Χ είτε περί τον άξονα Υ. Η καμπύλη βαθμονόμησης είναι ευθεία γραμμή που περνά από την αρχή των αξόνων. Μέσω της βαθμονόμησης προέκυψε ένας συντελεστής βαθμονόμησης που συνδέει τις μετρούμενες τιμές με τις πραγματικές. Το σχετικό σφάλμα στη μέγιστη τιμή μέτρησης προέκυψε ίσο με 0,55% τόσο για τις μετρήσεις περί τον άξονα Χ όσο και για τις μετρήσεις περί τον άξονα Υ.
2. Εισάγοντας τον συντελεστή βαθμονόμησης στον κώδικα τόσο του κυρίως όσο και του δευτερεύοντος προγράμματος της εφαρμογής και πολλαπλασιάζοντας με αυτόν τις μετρήσεις, επιτυγχάνεται η αξιόπιστη λειτουργία του κλινομέτρου με μειωμένο σφάλμα.
3. Η επαναληψιμότητα των μετρήσεων μελετήθηκε για μηδενική κλίση του οργάνου και είναι της τάξης του $\pm 0.03^\circ$. Η διακριτότητα των μετρήσεων του οργάνου είναι 0.01° . Οι τιμές ισχύουν και για τους δύο άξονες Χ και Υ.
4. Από τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας για την επίδραση των θερμοκρασιακών μεταβολών, παρατηρείται μια επιρροή της μεταβολής της θερμοκρασίας στις μετρήσεις. Προέκυψε η σχέση μεταξύ της μεταβολής της μετρούμενης γωνίας και της μεταβολής της θερμοκρασίας ως $0,1925^\circ / ^\circ\text{C}$. Αύξηση της θερμοκρασίας οδηγεί σε μείωση της μετρούμενης κλίσης του οργάνου. Η επίδραση της θερμοκρασίας μπορεί να συμπεριληφθεί στα προγράμματα για περαιτέρω βελτίωση της αξιοπιστίας των μετρήσεων, ενώ μπορεί να επαναπροσδιοριστεί μέσω νέας πειραματικής διαδικασίας με μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιακής μεταβολής, ώστε να είναι πιο αντιπροσωπευτική.
5. Η ακρίβεια των μετρήσεων, η επαναληψιμότητα και η διακριτότητά τους όπως μετρήθηκαν υπό εργαστηριακές συνθήκες είναι συγκρίσιμες με εκείνες των αντίστοιχων μονάδων μέτρησης στο πεδίο. Η εξαιρετικά μικρή τιμή αγοράς του

μετρητή MPU6050 τον καθιστά ιδανικό για χρήση πολλαπλών μετρήσεων στο πεδίο και υπαγορεύει την συνέχιση της έρευνας με σκοπό την πρακτική του εκμετάλλευση.

6. Η επικοινωνία του μετρητή με το λειτουργικό σύστημα *Raspberry Pi* και ο προγραμματισμός που έγινε μέσω του *Python* για την λήψη μετρήσεων, την διαχείρισή τους και τον έλεγχό τους μέσω κινητού παραπέμπει σε μίας νέας γενιάς μετρητές με δυνατότητες που στερούνται τα κλασικά όργανα μέτρησης.

Οι δυνατότητες αυτές παραπέμπουν στην ανάγκη περαιτέρω ανάπτυξης της εφαρμογής με μελλοντική τροποποίηση του κυρίως προγράμματος ώστε να περιέχει σύστημα ειδοποίησης όταν παρατηρηθεί απότομη μεταβολή στην κλίση, το οποίο μπορεί να είναι συνδεδεμένο με σύστημα συναγερμού ηχητικής ειδοποίησης στο υπό παρακολούθηση έργο, καθώς επίσης να παρέχει και τη δυνατότητα αποστολής μηνύματος ηλεκτρονικού ταχυδρομείου προς κάθε ενδιαφερόμενο φορέα επίβλεψης του έργου ενημερώνοντας τον για το συμβάν, συνοδευόμενο από φωτογραφίες από το χώρο μέσω ενσωματωμένης κάμερας στον μικροϋπολογιστή.

Επίσης, μέσω κατάλληλης συσκευής επέκτασης των ακροδεκτών του *Raspberry Pi* είναι δυνατή η σύνδεση πολλών κλινομέτρων σε ένα μικροϋπολογιστή. Κάνοντας τις απαραίτητες τροποποιήσεις στον κώδικα είναι δυνατή η διαμόρφωση της εφαρμογής έτσι ώστε να διαχειρίζεται άνω του ενός κλινομέτρου και να παρουσιάζει τις μετρήσεις του κάθε ενός, αλλά και της συνολικής μεταβολής κλίσης ενός τμήματος του έργου.

Φυσικά θα πρέπει να διερευνηθεί κατά πόσον οι ιδιότητες (ακρίβεια, επαναληψιμότητα, διακριτότητα) του μετρητή που μετρήθηκαν στο εργαστήριο ισχύουν και στο πεδίο. Η παρούσα εργασία δείχνει ότι ο MPU6050 έχει πολλές δυνατότητες που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Γεωργιάννου Β.Ν., (2000). Χρήση Γεωτεχνικών Οργάνων – Οργανομετρήσεις / Β. Ν. Γεωργιάννου. - Αθήνα : Παρισιάνου Μαρία Γρ., 2000. - 220σ. : εικ. · 25x17εκ. ISBN 960-340-170-6, ISBN-13 978-960-340-170-4

Πεκμεστζή Κ., (2009). Συστήματα μικροϋπολογιστών, Τόμος 2: Μικροελεγκτές AVR και PIC, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΣΥΜΜΕΤΡΙΑ, ISBN: 975-960-266-269-4

Ρούσσου Δ., (2007). Μεθοδολογία παρακολούθησης μικρομετακινήσεων με τη χρήση γεωτεχνικών οργάνων σε σήραγγες, Διατριβή Ειδίκευσης, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών Γεωτεχνολογία και Περιβάλλον, Πολυτεχνείο Κρήτης.

Beravs T., Podobnik J., Munih M., (2012). Three-Axial Accelerometer Calibration Using Kalman Filter Covariance Matrix for Online Estimation of Optimal Sensor Orientation, *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*. Digital Object Identifier <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2012.2187360>

BERNSTEIN, J., CHO, S., KING, A., KOUREPENIS, A., MACIEL, P. & WEINBERG, M. , (1993). A micromachined comb-drive tuning fork rate gyroscope. *IEEE*, 143-148.

Bhattacharya S., Krishna A. Murali, Lombardi D., Crewe A., Alexander N., (2011). Economic MEMS based 3-axis water proof accelerometer for dynamic geo-engineering applications, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 36 111 – 118, 0267-7261/\$ - see front matter & 2011 Elsevier Ltd. All rights reserved. doi: <http://10.1016/j.soildyn.2011.12.001>

Constantinescu F., Gheorge A.G., Nitescu M., (2013). A Capacitive Accelerometer Model, Article in *Revue Roumaine des Sciences Techniques - Serie Électrotechnique et Énergétique* , publication at: <https://www.researchgate.net/publication/280488954>

Dyskin A.V., Basarir H., Doherty J., Elchalakani M., Joldes J.R., Karrech A., Lehane B., Miller K., Pasternak E., Shufrin I., Wittek A., (2018). Computational monitoring in real time: review of methods and applications, *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 4:235–271 <https://doi.org/10.1007/s40948-018-0086-6>

Elliot K., Gupta P., Reed K., Rodriguez R., (2002)., *Micromachined Vibrating Gyroscopes: Design and Fabrication*, Northwestern University, Department of Mechanical Engineering

Fitriani Diah Ayu, Andhyka K Wahyu, Kom S., Kom M., Risqiwati Diah, S.T., M.T, (2016). Desing of Monitoring System Step Walking With MPU6050 Sensor Based Android, *Journal of Informatics, Network, and Computer Science*, Vol:1, No:1Halaman : 1 – 8 ISSN : 2541-5123 DOI Link : <https://doi.org/10.21070/joincs.v1i1.799>

Georgiannou V.N., Lefas I.D. and Boronkay K.A., (2005). Monitoring of tunnel behavior through cataclastic rocks, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering* 158, June 2005 Issue GEI, Pages 1-11, Paper 13778. at: <https://www.researchgate.net/publication/274765303>

GEOSENSE, (2018). Application guide – Tilt sensors, Geosense Ltd
Nova House . Rougham Industrial Estate . Rougham . Bury St Edmunds . Suffolk . IP30 9ND
. England .

Invensense Inc., (2013). MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4,
<http://www.invensense.com>

Invensense Inc., (2013). MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision
4.2, <http://www.invensense.com>

KARDOS S., BALOG P., SLOSARCIK S., (2017). Gait Dynamics Sensing Using
IMU Sensor Array System, BIOMEDICAL ENGINEERING VOLUME 15, NUMBER: 1.
DOI: <http://dx.doi.org/10.15598/aeec.v15i1.2019>

Kavvadas, M.J., (2003). MONITORING AND MODELLING GROUND DEFORMATIONS
DURING TUNNELLING, Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation
Measurements, Santorini, Greece.

Kavvadas, M.J., (2005). Monitoring ground deformation in tunneling: Current practice in
transportation tunnels, Engineering Geology 79, 93 – 113, doi:
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.10.011>

Lee Yeon-Gwan, Jang Hong-Kyu, Kim Dae-Hyun, Kim Chun-Gon, (2012). Development of
a mirror mounted fiber optic inclinometer, Sensors and actuators A: Physical, Sensors and
Actuators A 184 (2012) 46 – 52, 0924-4247/\$ – see front matter © 2012 Elsevier B.V. All
rights reserved.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2012.06.022>

Li Xinggao and Yuan Dajun, (2016). Development of the safety control framework for shield
tunneling in close proximity to the operational subway tunnels: case studies in mainland
China, DOI <http://dx.doi.org/10.1186/s40064-016-2168-7>

Lunardi, G., & Gatti, M. (2010). Tunnel monitoring system—a contribution for the preparation of
guidelines. In *ITA-AITES World Tunnel Congress*.

Machan George and Bennet Victoria G., (2008), Use of Inclinometers for Geotechnical
Instrumentation on Transportation Projects, *State of the Practice*, TRANSPORTATION
RESEARCH CIRCULAR E-C129, ISSN 0097-8515

Riaz Asif, (2015), Tunnel Convergence Monitoring – From Concept to Implementation,
National University of Sciences and Technology,
DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3015.8569>
at: <https://www.researchgate.net/publication/281113987>

Siebenmann R., Yu Hai-Tien, Bachus R., (2015). UCIMS: Advances in geotechnical
construction and performance monitoring, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical
Engineering 7 207-212. nstitute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of
Sciences. Production and hosting by Elsevier B.V. All rights reserved.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.03.002>

Weng Y., Wang S., Zhang H., Gu H., Wei X., (2017). A high resolution tilt measurement system based on multi-accelerometers, Measurement 109 (2017) 215-222.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.058>

Yazdi N., Ayazi F. and Najafi K., (1998). Micromachined Inertial Sensors, IEEE Invited Paper, Publisher Item Identifier S 0018-9219(98)05106-8.

ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΠΗΓΕΣ

<http://geotechpedia.com>

<https://www.python.org/>

http://blog.bitify.co.uk/2013/11/interfacing-raspberry-pi-and-mpu-6050.html?fbclid=IwAR2Xbe3XmkP4w0ojEkZJgzl3FoD99qP6-ermUIJu90GlqA_SCHEIpgZd1Mc

https://www.instructables.com/id/Accelerometer-Gyro-Tutorial/?fbclid=IwAR21Rwmev_3pS45xE-OtU47cB2bae7PBRfEjSbZ7gtAwYVnyYeumPRgmSKc

http://www.electrooobs.com/eng_robotica_tut6_1.php?fbclid=IwAR0y33ecUUWaA0Lk4l6v8ZVUnGN0j7NnL3sUhkmE4WvPVr2CYQzz0V3eRM0

<https://www.electronicwings.com/raspberry-pi>

<https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module>

<https://stackoverflow.com/questions>

https://www.w3schools.com/jquery/tryit.asp?filename=tryjquery_ajax_ajax_async&fbclid=IwAR2WUbn7dp_t5tbhRJO3-jtVE7Xnymb1ooeRu0SEj1k-kjtkJUcMc_mQnLk

https://developers.google.com/chart/interactive/docs/gallery/linechart?fbclid=IwAR0QTmE5pX3cdDMnluvicte9uSyQIQwCxMFx0w457A_F3GSUexHvCc1sJE

<https://medium.com/@jaems33/understanding-kalman-filters-with-python-2310e87b8f48>

<https://openhomeautomation.net/arduino-wifi-cc3000>

<https://flask.palletsprojects.com>

<https://tutorials-raspberrypi.com/raspberry-pi-measure-humidity-temperature-dht11-dht22/>

<http://quora.com/>

<http://github.com>