

ΙΟΝΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στην Πληροφορική



- Διπλωματική Εργασία -

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ
ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH
ΚΥΜΑΤΩΝ»

Ιωάννης Χ. Βλάχος

Επιβλέπων : Αυλωνίτης Μάρκος

Επιβλέπων

Μάρκος Αυλωνίτης *Μόνιμος Επίκουρος Καθηγητής*

Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Τριμελής Επιτροπή

Μάρκος Αυλωνίτης *Μόνιμος Επίκουρος Καθηγητής*

Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Κωνσταντίνος Οικονόμου *Αναπληρωτής Καθηγητής*

Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Σπυρίδων Σιούτας *Αναπληρωτής Καθηγητής*

Ιόνιο Πανεπιστήμιο

Περίληψη

Στη διπλωματική αυτή εργασία, στόχος μας είναι η ανάπτυξη ενός καινοτόμου υλικολογισμικού συστήματος χαμηλού κόστους για τον εντοπισμό των κυμάτων Rayleigh.

Το εγχείρημα αυτό είναι ιδιαίτερος ενδιαφέρον και τα αποτελέσματά του χρήσιμα, αφού στοχεύουμε στην κατασκευή ενός χαμηλού κόστους υψηλής αξιοπιστίας και ανάλυσης υλικολογισμικού συστήματος ανοικτού κώδικα που θα επεξεργάζεται – αποθηκεύει τα δεδομένα και θα μας απεικονίζει αποτελέσματα στην οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή μας.

Πρώτο μας βήμα για να το πετύχουμε αυτό ήταν να μελετήσουμε εργασίες σχετικές με την ανάλυση , τις ιδιότητες των Rayleigh κυμάτων και τους τρόπους διάδοσής τους στην επιφάνεια και στο υπέδαφος της γης.

Επίσης αναγκαία ήταν η μελέτη (High Cost) συστημάτων ανίχνευσης Rayleigh κυμάτων τα οποία χρησιμοποιούν γεώφωνα και όχι επιταχυνσιόμετρα, για να μπορούμε να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την ακρίβεια των δεδομένων του συστήματος μας.

Αναγκαία στην συνέχεια ήταν η κατασκευή του δικού μας συστήματος χαμηλού κόστους ανοικτού κώδικα υλικολογισμικού στο οποίο ενσωματώσαμε αισθητήρες επιτάχυνσης (επιταχυνσιόμετρα χαμηλού κόστους) και αισθητήρα ταχύτητας (γεώφωνα) για απόλυτη σύγκριση των χαρακτηριστικών λειτουργίας του συστήματος μας με αυτό του εμπορίου που το συγκρίνουμε.

Τέλος αναπτύχθηκε κώδικας για την μετατροπή των δεδομένων της επιτάχυνσης σε δεδομένα ταχύτητας (Ολοκλήρωση δεδομένων) για την σύγκριση των δεδομένων από τα επιταχυνσιόμετρα με αυτά των γεωφώνων, καθώς και κώδικας ανίχνευσης των Rayleigh κυμάτων μέσα από τα δεδομένα των αισθητήρων στο πεδίο του χρόνου (Auto picking algorithm).

Λέξεις-κλειδιά: Κύματα Rayleigh , Ελεύθερος κώδικας , χαμηλού κόστους , Αισθητήρες επιτάχυνσης mem's , επιταχυνσιόμετρα, γεώφωνα.

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	3
Περιεχόμενα	3
1. Εισαγωγή	10
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία.....	10
1.2 Κίνητρο εργασίας.....	10
1.3 Δομή της εργασίας.....	11
2. Ιστορική Αναδρομή.....	13
2.1 Ιστορική αναδρομή στην σεισμολογία	13
2.1.1 Η Κλασσική περίοδος της σεισμολογίας (550 π.Χ - 1550 μ.Χ)	13
2.1.2 Η Περίοδος εμφάνισης της νέας επιστήμης (1550 μ.Χ -1900 μ.Χ).....	14
2.1.3 Νέα περίοδος της Σεισμολογίας (1900 μ.Χ - Σήμερα).....	15
2.2 Σεισμικά Κύματα.....	20
2.2.1 Τα κύματα χώρου.....	20
2.2.1.1 Τα Επιμήκη Κύματα P.....	21
2.2.1.2 Τα Επιμήκη Κύματα S.....	21
2.2.2 Τα κύματα επιφανείας.....	21
2.2.2.1 Τα κύματα Rayleigh	22
2.2.2.2 Τα κύματα Love	23
2.3 Οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων στα υλικά	24
2.4 Μέθοδοι αναγνώρισής των κυμάτων Rayleigh	25
2.4.1 Η μέθοδος First Arrivals – First Break.....	25
2.4.1 Η μέθοδος M.A.S.W – Πολυκαναλική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων	27
3. Συστήματα καταγραφής μετρήσεων.....	37
3.1 Συστήματα καταγραφής σεισμικών μετρήσεων και εδαφικών διασκοπήσεων.....	37
3.1.1 Σεισμικές πηγές	37
3.1.1.1 Κρουστικές πηγές παραγωγής δονήσεων	37
3.1.2 Γεώφωνα	38
3.1.3 Συστήματα καταγραφής	40
3.1.3.1 Το εμπορικό σύστημα καταγραφής Rosina Soil Spy	41
4. Αισθητήρες επιτάχυνσης	42
4.1 Επιταχυνσιόμετρα – Τρόπος λειτουργίας	42
4.1.1 Μηχανικά επιταχυνσιόμετρα	44
4.1.2 Επιταχυνσιόμετρα στερεάς κατάστασης	45

4.1.3 Μικροηλεκτρονικά Επιταχυνσιόμετρα “mem’s”	46
5. Τα τμήματα του συστήματος μας (System V.E.T.A)	47
5.1 Τα τμήματα του συστήματος μας	47
5.2 Η πλακέτα μικροπολογιστή ανοικτού κώδικα Raspberry Pi	49
5.2.1 Χαρακτηριστικά πλακέτας μικροπολογιστή Raspberry Pi	50
5.2.2 Ακροδέκτες GPIO μικροπολογιστή Raspberry Pi	51
5.2.3 Λειτουργικό μικροπολογιστή Raspberry Pi.....	52
5.2.4 Η Χρησιμότητα του μικροπολογιστή Raspberry Pi	53
5.3 Η γλώσσα προγραμματισμού Python	53
5.3.1 Παράδειγμα εφαρμογής (script) σε Python	54
5.4 Ο μικροπολογιστής ανοικτού κώδικα Arduino	54
5.4.1 Ο μικροπολογιστής Arduino Uno R3.....	55
5.4.2 Οι ακροδέκτες του μικροπολογιστή Arduino Uno R3	56
5.4.3 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροπολογιστή Arduino Uno R3	57
5.4.4 Η χρησιμότητα του μικροπολογιστή Arduino Uno R3	58
5.5 Η γλώσσα Προγραμματισμού Ανοικτού κώδικα Wiring.....	58
5.5.1 Η πλατφόρμα προγραμματισμού (Arduino IDE).....	58
5.6 Η επιλογή των χαμηλού κόστους αισθητήρων επιτάχυνσης	61
5.6.1 Το τριαξονικό mem’s αναλογικό επιταχυνσιόμετρο – ADXL335	62
5.6.1.1 Ο ενισχυτής σήματος για τον αισθητήρα επιτάχυνσης ADLX335.....	64
5.6.1.2 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MPC6004.....	64
5.6.1.3 Το κύκλωμα και οι βαθμίδες του ενισχυτή σήματος	65
5.6.1.4 Η διασύνδεση του επιταχυνσιόμετρου ADXL335 με το Arduino Uno ..	70
5.6.2 Το τριαξονικό mem’s ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο – MMA8452Q	71
5.6.2.1 Η διασύνδεση του MMA8452Q με το Arduino Uno	73
5.7 Αισθητήρας ταχύτητας - Γεωφώνο GS-11D (4.5Hz)	73
5.7.1 (ADS-1115) Ο Ενισχυτής – Μετατροπέας A/D του σήματος γεωφώνου	75
5.7.2 Η διασύνδεση του γεωφώνου GS-11D με το Arduino Uno	77
5.8 Το κύκλωμα ρολογιού πραγματικού χρόνου (High Real Time Clock DS3231)	77
5.9 Το κύκλωμα μεταροπής τάσεως (Down Converter)	79
5.10 Συσσωρευτής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας	80
6. Η κατασκευή και λειτουργία του συστήματος μας (System V.E.T.A).....	81
6.1 Το υλικό (Hardware) και η διασυνδεδεσή του	83
6.1.1 Ιδιοκατασκευή αισθητήρων επιτάχυνσης.....	84
6.1.2 Το σύστημα παροχής ενέργειας.....	86

6.2 Το λογισμικό (Software) και η χρησιμότητά του	86
6.2.1 Λογισμικό Arduino Uno (wiring)	86
6.2.2 Λογισμικό Raspberry Pi (Python).....	87
6.3 Χειρισμός συσκευής για την καταγραφή δεδομένων	90
7. Πειράματα.....	92
7.1 Καταγραφή δεδομένων – Πείραμα	92
7.1.1 Κανονικοποίηση δεδομένων (Πρώτη Ολοκλήρωση).....	94
7.1.2 Ανίχνευση και καταγραφή κυμάτων Rayleigh	97
7.1.2.1 Έλεγχος με την μέθοδο των πρώτων αφίξεων	97
7.1.2.2 Προσέγγιση πρώτων αφίξεων με τον αλγόριθμο που αναπτύξαμε.....	98
7.1.2.3 Συγκριτικά αποτελέσματα μετρήσεων.....	100
7.1.3.4 Έλεγχος με την χρήση της μεθόδου M.A.S.W.....	101
8. Συμπεράσματα και Μελλοντική Έρευνα - Βελτιώσεις	103
Βιβλιογραφία	105
Παράρτημα Α'	110

Πίνακας Περιεχομένων Εικόνων

Εικόνα 1 Ένα από τα πρώτα σειсмоγράμματα έτος 1989	18
Εικόνα 2 Καταγραφή σεισμού από οριζόντιο σειсмоγράφο έτος 1901	18
Εικόνα 3 Ο πρώτος σειсмоγράφος 132 μ.Χ	19
Εικόνα 4 Σύγχρονος σειсмоγράφος – Καταγραφή σειсмоγράμματος	19
Εικόνα 5 Αποτύπωση των κυμάτων χώρου τα οποία εκπέμπονται από την σεισμική πηγή.....	20
Εικόνα 6 Επιμήκες Κύμα P.....	21
Εικόνα 7 Επιμήκες Κύμα S.....	21
Εικόνα 8 Κύμα Rayleigh.....	22
Εικόνα 9 Κύμα Love.....	23
Εικόνα 10 Τυπικό Σειсмоγράφημα	23
Εικόνα 11 α)Πρώτη άφιξη κύματος P β)Μεγέθυνση του σημείου της πρώτης αφίξεως	26
Εικόνα 12 α)Στατιστική ανάλυση πρώτης άφιξης κύματος P β)Μεγέθυνση του σημείου.....	26
Εικόνα 13 Τα βήματα της μεθόδου M.A.S.W.....	31
Εικόνα 14 Παράδειγμα μετρήσεων με την μέθοδο M.A.S.W.....	32
Εικόνα 15 Μεθοδολογία σάρωσης συχνότητας (Swept frequency approach)	33
Εικόνα 16 Σάρωση συχνότητας με 10 γεώφωνα.....	34
Εικόνα 17 Αποτελέσματα για σάρωση συχνότητας με 10 γεώφωνα	35
Εικόνα 18 Προσδιορισμός της κλίσης για σάρωση συχνότητας με 10 γεώφωνα.....	36
Εικόνα 19 Αρχή Λειτουργίας Γεωφώνου.....	39
Εικόνα 20 Γεώφωνο 4.5Hz.....	39
Εικόνα 21 Διάφοροι τύποι γεωφώνων.....	40
Εικόνα 22 Εμπορικό σύστημα καταγραφής.....	40
Εικόνα 23 Λογισμικό Rosina Soil Spy σε συνεχόμενη καταγραφή.....	41
Εικόνα 24 Ισοδύναμο Επιταχυνσιόμετρο.....	43
Εικόνα 25 Ισοδύναμο Μηχανικού Επιταχυνσιόμετρο.....	44
Εικόνα 26 Πιεζοηλεκτρικό Επιταχυνσιόμετρο.....	45
Εικόνα 27 Εσωτερικό επιταχυνσιόμετρο Mem's.....	46
Εικόνα 28 Μπλόκ Διάγραμμα Συστήματος Καταγραφής κυμάτων Rayleigh (System V.E.T.A).....	48
Εικόνα 29 Η πλακέτα Raspberry Pi 3 Model B.....	49
Εικόνα 30 Η πλακέτα Raspberry Pi 3 Model B – Λειτουργίες GPIO Pins.....	51
Εικόνα 31 Λειτουργικό Raspbian Jessie για το Raspberry Pi	52
Εικόνα 32 Πρόγραμμα (script) σε γλώσσα προγραμματισμού Python	54
Εικόνα 33 Η πλακέτα μικροϋπολογιστή Arduino Uno R3	55
Εικόνα 34 Αναλυτικά οι ακροδέκτες της πλακέτας Arduino Uno R3	56
Εικόνα 35 Επιλογή κατεβάσματος του Arduino IDE από το επίσημο site του (arduino.cc)	59
Εικόνα 36 Περιβάλλον Προγραμματισμού Arduino IDE	60
Εικόνα 37 Αναλογικό τριαξονικό επιταχυνσιόμετρο mem's ADXL335.....	63
Εικόνα 38 Μπλοκ Διάγραμμα ADXL335.....	63
Εικόνα 39 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP6004.....	64
Εικόνα 40 Οι βαθμίδες του ενισχυτή σήματος βασισμένου στο MCP6004.....	65
Εικόνα 41 Καμπύλη απόκρισης φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων	66
Εικόνα 42 Καμπύλη απόκρισης φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων.....	67
Εικόνα 43 Βαθμίδα ενίσχυσης σήματος A=100.....	68
Εικόνα 44 Σήμα εισόδου ενισχυτή MCP6004 +/- 2mV.....	68

Εικόνα 45	Σήμα εξόδου ενισχυτή MCP6004 +/- 200mV	69
Εικόνα 46	Το Ηλεκτρονικό διάγραμμα του ενισχυτή σήματος	70
Εικόνα 47	Μπλοκ διάγραμμα διασύνδεσης ADXL335- ενισχυτή σήματος - Arduino Uno.....	71
Εικόνα 48	Ψηφιακό mem's επιταχυνσιόμετρον MMA8452Q.....	71
Εικόνα 49	Μπλοκ Διάγραμμα MMA8452Q.....	72
Εικόνα 50	Διασύνδεση MMA8452Q – Arduino Uno	73
Εικόνα 51	Γεώφωνο GS-11D 4.5Hz.....	74
Εικόνα 52	Breakout board A/D 16Bit converter ads1115.....	76
Εικόνα 53	Μπλοκ διάγραμμα βαθμίδων A/D 16Bit converter ads1115.....	76
Εικόνα 54	Μπλοκ διάγραμμα διασύνδεσης γεωφώνου gs-11d - ads1115 – Arduino Uno	77
Εικόνα 55	Module Real Time Clock DS3231	77
Εικόνα 56	Σχηματικό διάγραμμα Real Time Clock DS3231	78
Εικόνα 57	Σύνδεση RTC DS3231 στο Raspberry Pi	78
Εικόνα 58	DC to DC Step down Converter LM2596.....	79
Εικόνα 59	Ηλεκτρονικό σχηματικό διάγραμμα step – down μετατροπέα LM2596.....	80
Εικόνα 60	Συσσωρευτής Ηλεκτρικής ενέργειας – Μπαταρία 12Volt / 17Ah.....	80
Εικόνα 61	Σήματα και από τους 3 αισθητήρες του συστήματος που κατασκευάσαμε	82
Εικόνα 62	Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος που κατασκευάσαμε.....	83
Εικόνα 63	Κατασκευή Διπλωματικής Εργασίας (System V.E.T.A).....	83
Εικόνα 64	Ιδιοκατασκευή Στήριξης Αναλογικού Επιταχυνσιόμετρον ADXL335	84
Εικόνα 65	Ιδιοκατασκευή Στήριξης Ψηφιακού Επιταχυνσιόμετρον MMA8452Q	84
Εικόνα 66	Καλώδιο σύνδεσης επιταχυνσιόμετρον με το Arduino Uno.....	85
Εικόνα 67	Ο κώδικας (sketch) για το Arduino Uno.....	87
Εικόνα 68	Καταγραφή δεδομένων από Arduino uno προς Raspberry Pi.....	88
Εικόνα 69	Python Script logger.py	88
Εικόνα 70	Αποθηκευμένο Αρχείο καταγραφής σε μορφή (.csv) στο Raspberry Pi.....	90
Εικόνα 71	Σύγκριση των επιταχύνσεων - ταχυτήτων των αισθητήρων ξεχωριστά.....	93
Εικόνα 72	Σύγκριση των επιταχύνσεων - ταχυτήτων των αισθητήρων μαζί.....	93
Εικόνα 73	Η αριθμητική ολοκλήρωση συνάρτησης	94
Εικόνα 74	Η τραπεζοειδής προσέγγιση	94
Εικόνα 75	Μετατροπή επιτάχυνσης σε ταχύτητα (Κώδικας σε OCTAVE)	95
Εικόνα 76	Σύγκριση των ταχυτήτων ξεχωριστά (επιταχυνσιόμετρα –γεώφωνο).....	96
Εικόνα 77	Σύγκριση όλων των ταχυτήτων μαζί (επιταχυνσιόμετρα –γεώφωνο)	96
Εικόνα 78	Σήματα ταχύτητας – επιτάχυνσης πριν και μετά την ολοκλήρωση	97
Εικόνα 79	Σήματα ταχύτητας – επιτάχυνσης πριν και μετά την ολοκλήρωση	100
Εικόνα 80	Καταγραφή σημάτων με την μέθοδο M.A.S.W – σημάτων του συστήματος μας ...	102

Κατάλογος Πινάκων

<i>Πίνακας 1 Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων στα υλικά</i>	<i>24</i>
<i>Πίνακας 2 Φυσικά Χαρακτηριστικά γεωφώνου GD-11S.....</i>	<i>74</i>
<i>Πίνακας 3 Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά γεωφώνου GD-11S.....</i>	<i>75</i>
<i>Πίνακας 4 Αρχείο καταγραφής με time stamp από το Raspberry Pi.....</i>	<i>89</i>
<i>Πίνακας 5 Συγκριτικός πίνακας τιμών χρόνων first break.....</i>	<i>100</i>

1. Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Τα κύματα Rayleigh είναι τα πιο αργά κύματα όλων των τύπων των σεισμικών κυμάτων και με κάποιους τρόπους τα πιο περίπλοκα. Τα κύματα Rayleigh μετακινούν το έδαφος με τον ίδιο τρόπο όπως ένα θαλάσσιο κύμα μετακινεί τα επιφανειακά νερά. Το Rayleigh κύμα επειδή κυλά, κινεί το έδαφος πάνω-κάτω, δεξιά και αριστερά στην κατεύθυνση που κινείται. Το μεγαλύτερο μέρος του τινάγματος που γίνεται αισθητό από έναν σεισμό οφείλεται στα κύματα Rayleigh, τα οποία μπορούν να είναι πολύ μεγαλύτερα από τους άλλους τύπους σεισμικών κυμάτων.

Τα κύματα Rayleigh σε συνδυασμό με τα κύματα Love παράγουν τα διαυλικά κύματα. Τα στάσιμα κύματα που παράγονται από τη συμβολή τους (Rayleigh & Love) προκαλούν την ελεύθερη ταλάντωση της Γης.

1.2 Κίνητρο εργασίας

Στη διπλωματική αυτή εργασία, στόχος μας είναι η ανάπτυξη ενός καινοτόμου υλικολογισμικού συστήματος χαμηλού κόστους για τον εντοπισμό των κυμάτων Rayleigh στο πεδίο της διερευνήσεως ενός τεχνικού φαινομένου (Εδαφική Διασκόπηση) αλλά και φυσικών φαινομένων όπως (Κατολίσθηση, Σεισμός).

Το εγχείρημα αυτό είναι ιδιαιτέρως ενδιαφέρον και τα αποτελέσματά του χρήσιμα, αφού στοχεύουμε στην κατασκευή ενός χαμηλού κόστους υψηλής αξιοπιστίας και ανάλυσης υλικολογισμικού συστήματος ανοικτού κώδικα που θα επεξεργάζεται τα δεδομένα και θα μας απεικονίζει αποτελέσματα στην οθόνη ηλεκτρονικού υπολογιστή μας ενώ παράλληλα θα τα αποθηκεύει σε στατική μνήμη για την περεταίρω μετέπειτα επεξεργασία τους.

Πρώτο μας βήμα για να το πετύχουμε αυτό ήταν να μελετήσουμε εργασίες σχετικές με την ανάλυση, τις ιδιότητες των Rayleigh κυμάτων και τους τρόπους διάδοσής τους στην επιφάνεια και στο υπέδαφος της γης.

Επίσης αναγκαία ήταν η μελέτη (High Cost) συστημάτων ανίχνευσης Rayleigh κυμάτων τα οποία χρησιμοποιούν γεώφωνα και όχι επιταχυνσιόμετρα, για να μπορούμε να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε την ακρίβεια των δεδομένων του συστήματος μας.

Αναγκαία στην συνέχεια ήταν η κατασκευή του δικού μας συστήματος χαμηλού κόστους ανοικτού κώδικα υλικολογισμικού (System V.E.T.A - Vibration Exchanged To Acceleration System) στο οποίο ενσωματώσαμε αισθητήρες επιτάχυνσης (mem's επιταχυνσιόμετρα χαμηλού κόστους) και αισθητήρα ταχύτητας (γεώφωνο) για απόλυση σύγκριση των

χαρακτηριστικών λειτουργίας του συστήματος μας με αυτό του εμπορίου που το συγκρίνουμε.

Τέλος αναπτύχθηκε κώδικας για την μετατροπή των δεδομένων της επιτάχυνσης σε δεδομένα ταχύτητας (Ολοκλήρωση δεδομένων) για την σύγκριση των δεδομένων από τα επιταχυνσιόμετρα με αυτά των γεωφώνων, καθώς και κώδικας ανίχνευσης των Rayleigh κυμάτων μέσα από τα δεδομένα των αισθητήρων στο πεδίο του χρόνου (Auto picking algorithm).

1.3 Δομή της εργασίας

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας μας και αναλύονται οι λόγοι για τους οποίους μας οδήγησαν να ασχοληθούμε με το συγκεκριμένο θέμα.

Στο δεύτερο γίνεται Ιστορική Αναδρομή στην σεισμολογία, αναφέρονται οι τύποι και τα χαρακτηριστικά των σεισμικών κυμάτων καθώς οι τρόποι και οι ταχύτητες διάδοσης τους μέσα στα υλικά. Επίσης γίνεται λεπτομερής αναφορά στις μεθόδους αναγνώρισης των κυμάτων Rayleigh.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα συστήματα σεισμικών μετρήσεων και εδαφικών διασκοπήσεων και πιο συγκεκριμένα αναλύουμε ένα προς ένα τα τμήματα που τα αποτελούν διότι η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως τελικό σκοπό της την κατασκευή ενός παρόμοιου συστήματος με την διαφορά ότι εδώ πρόκειται για την κατασκευή ενός συστήματος χαμηλού κόστους ανοικτού υλικολογισμικού κώδικα και όχι ενός συστήματος αρκετών δεκάδων χιλιάδων ευρώ.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στην αρχή λειτουργίας των αισθητήρων επιτάχυνσης καθώς και στους τύπους τους. Γίνεται επιλογή των αισθητήρων επιτάχυνσης που θα χρησιμοποιηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία και αναλύονται οι λόγοι επιλογής τους. Επίσης γίνεται σύγκριση και αναφέρονται οι διαφορές μεταξύ των αισθητήρων επιτάχυνσης και ταχύτητας.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στα ηλεκτρονικά κυκλώματα που θα χρησιμοποιήσουμε για να κατασκευάσουμε το σύστημα χαμηλού κόστους ανοικτού υλικολογισμικού κώδικα (System V.E.T.A - Vibration Exchanged To Acceleration) της

διπλωματικής εργασίας μας. Γίνετε αναφορά και ανάλυση στα μικρουπολογιστικά συστήματα που χρησιμοποιούμε για την υλοποίηση του συστήματος καθώς και όλων των περιφερειακών συστημάτων και αισθητήρων που το απαρτίζουν.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνετε αναφορά στην αναλυτική κατασκευή και λειτουργία του συστήματος χαμηλού κόστους ανοικτού υλικολογισμικού κώδικα (System V.E.T.A - Vibration Exchanged To Acceleration) της διπλωματικής εργασίας μας. Αναλύονται τα επιμέρους κυκλώματα και η λειτουργία τους σε συνθήκες πραγματικού χρόνου καθώς και το λογισμικό (κώδικας) που δημιουργήθηκε για την λειτουργία του συστήματος.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνετε αναφορά στα αποτελέσματα πειραμάτων που διεξαγάγαμε και στα αποτελέσματα που καταγράψαμε και αποθηκεύσαμε μέσω του συστήματος χαμηλού κόστους ανοικτού υλικολογισμικού κώδικα (System V.E.T.A - Vibration Exchanged To Acceleration) της διπλωματικής εργασίας μας.

Παραθέτουμε τα επεξεργασμένα δεδομένα (κατόπιν μαθηματικής ολοκλήρωσης) με κώδικα που αναπτύχθηκε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας μας καθώς και τα αποτελέσματα των τιμών των μετρήσεων των επιταχυνσιομέτρων του συστήματος συγκρινόμενα με τα ίδια χρονικά δεδομένα των γεωφώνων του συστήματος.

Κατόπιν εφαρμόζετε ο αλγόριθμος που μας εμφανίζει στις κυματομορφές των δεδομένων των αισθητήρων μας το σημείο στο οποίο έχουμε μεταβολή τιμής και εμφάνισης κυμάτων Rayleigh.

Τέλος στο όγδοο και τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα συμπεράσματα και τις μελλοντικές βελτιώσεις τις οποίες προτείνουμε για την καλύτερη λειτουργία του συστήματος μας.

Κεφάλαιο 2

2.1 Ιστορική Αναδρομή στην σεισμολογία

Η Σεισμολογία έχει μακρά ιστορία, όσο και η φιλοσοφία, αφού οι μακροσεισμικές παρατηρήσεις και οι πρώτες ιδέες για τα αίτια γένεσης των σεισμών άρχισαν τον 6ο π.Χ. αιώνα από τους έλληνες φυσιοκράτες φιλοσόφους, οι οποίοι διατύπωσαν και τις πρώτες φιλοσοφικές ιδέες.

Η Σεισμολογία ως σύγχρονη φυσική επιστήμη έχει ηλικία μόλις 100 ετών, αφού η βασική θεωρία των ελαστικών (σεισμικών) κυμάτων αναπτύχθηκε κατά τον 19ο αιώνα και η εφεύρεση των σειсмоγράφων, με τους οποίους πραγματοποιούνται ακριβείς μετρήσεις που επιδέχονται μαθηματική (θεωρητική) ανάλυση, έγινε στο τέλος του 19ου αιώνα.

2.1.1 Η Κλασσική περίοδος της σεισμολογίας (550 π.Χ - 1550 μ.Χ)

Η Σεισμολογία γεννήθηκε στις ελληνικές πόλεις της αρχαίας Ιωνίας (Μικρά Ασία) και Κάτω Ιταλίας μαζί με τη Φιλοσοφία και τη Δημοκρατία από τους φυσιοκράτες φιλόσοφους.

Θαλής ο Μιλήσιος (624-546 π.Χ.): Το νερό είναι υπεύθυνο για τους σεισμούς.

Πυθαγόρας (585-500 π.Χ.): Η ροή θερμότητας από το εσωτερικό της Γης δημιουργεί τα γεωλογικά φαινόμενα και τους σεισμούς.

Αρχέλαος (480-410 π.Χ.): Ο αέρας εισέρχεται μέσα στη Γη σε κοιλότητες και συμπιέζεται από νέον αέρα μέχρις ότου αναγκαστεί να κινηθεί προς τα επάνω σπάζοντας τα πετρώματα και προκαλώντας σεισμούς.

Αριστοτέλης (384-323 π.Χ.): Στα «Μετεωρολογικά» διατύπωσε μια γενικευμένη επιστημονική υπόθεση για τα αίτια γένεσης των σεισμών, βασιζόμενος σε προηγούμενες σχετικές αντιλήψεις (άποψη Αρχέλαου, κλπ.), στη δική του υπόθεση περί «αναθυμιάσεων» και «ανέμου» και σε μακροσεισμικές παρατηρήσεις που έγιναν απ' αυτόν ή από προηγούμενους.

Οι απόψεις μεταγενεστέρων Ελλήνων, Λατίνων και Βυζαντινών συγγραφέων ήταν παρόμοιες με αυτές του Αριστοτέλη και ο Σενέκας (4π.Χ - 65 μ.Χ) συνόψισε σε βιβλίο του τις προηγούμενες αντιλήψεις για τα αίτια γένεσης των σεισμών.

Η θεωρία του Αριστοτέλη δέσποσε στη Δύση και κατά τη διάρκεια όλου του Μεσαίωνα. Παράλληλα με τη διατύπωση ιδεών για τα αίτια γένεσης των σεισμών πραγματοποιήθηκαν και αξιόλογες μακροσεισμικές παρατηρήσεις για τους μεγάλους καταστρεπτικούς σεισμούς που έγιναν κατά την περίοδο αυτή.

Ως παραδείγματα αναφέρουμε το σεισμό της Ελίκης το 373 π.Χ., που υπήρξε ένα σπουδαίο γεγονός για την εξέλιξη της ελληνικής επιστημονικής σκέψης, γιατί ο Αριστοτέλης έκανε επιστημονική ανάλυση του σεισμού αυτού.

Άλλο ενδιαφέρον παράδειγμα αποτελεί ο πολύ μεγάλος σεισμός που έγινε το 365 π.Χ νοτιοδυτικά της Κρήτης, του οποίου το τεράστιο θαλάσσιο κύμα προκάλεσε μεγάλες καταστροφές σε όλη την ανατολική Μεσόγειο. Κατά την περίοδο αυτή επινοήθηκε και κατασκευάστηκε το πρώτο σεισμοσκόπιο το 132 μ.Χ από τον Κινέζο φιλόσοφο Zhang Heng.

2.1.2 Η Περίοδος εμφάνισης της νέας επιστήμης (1550-1900)

Κατά την περίοδο αυτή επικρατεί γενικά νέο πνεύμα για την επιστημονική έρευνα και οι επιστήμονες ενδιαφέρονται τώρα ιδιαίτερα για την πειραματική (παρατηρητική) έρευνα. Έγιναν, κατά το διάστημα αυτό, αξιόλογες μακροσεισμικές παρατηρήσεις για καταστρεπτικούς σεισμούς οι οποίες αποτέλεσαν τη βάση για τη ραγδαία ανάπτυξη της θεωρίας της ελαστικότητας κατά το δέκατο ένατο αιώνα.

Ο σεισμός της Λισσαβώνας της 1ης Νοεμβρίου 1755 προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές και μεγάλο θαλάσσιο κύμα και οδήγησε το 1760 τον J. Mitchell για πρώτη φορά στην ιστορία της Σεισμολογίας να θεωρήσει τη σεισμική κίνηση ως αποτέλεσμα της διάδοσης ελαστικών κυμάτων στο εσωτερικό της Γης.

Η ιδέα αυτή αναπτύχθηκε παραπέρα από τους T. Young, R. Mallet και J. Milne.

Ο Mallet κατέληξε στο σημαντικό συμπέρασμα ότι κάθε σεισμός γεννιέται σε ορισμένη σεισμική εστία, που σήμερα ονομάζουμε υπόκεντρο, και στη συνέχεια διαδίδεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις έπειτα από τον σεισμό της Νάπολης το 1857.

Γαλιλαίος (1638), Hook (1660): Πειραματικά προβλήματα ελαστικότητας.

Navier (1821), Cauchy (1822): Εξισώσεις της θεωρίας της ελαστικότητας.

Poisson (1830), Stokes (1849): Χρησιμοποίησαν τις εξισώσεις της κίνησης και τους καταστατικούς νόμους της ελαστικότητας για να δείξουν ότι υπάρχουν δύο και μόνο δύο θεμελιώδεις τύποι ελαστικών κυμάτων που διαδίδονται στο εσωτερικό ομογενούς στερεού.

- τα επιμήκη κύματα (P κύματα)
- και τα εγκάρσια κύματα (S κύματα).

Λόρδος Rayleigh (1887): Έδειξε θεωρητικά την ύπαρξη των ομώνυμων επιφανειακών κυμάτων.

Love (1911): Έδειξε, επίσης θεωρητικά, την ύπαρξη του δεύτερου θεμελιώδους είδους επιφανειακών κυμάτων που φέρουν το όνομά του.

Η ανάπτυξη της θεωρίας της ελαστικότητας κατά το 19ο αιώνα αποτέλεσε τη μια από τις δύο θεμελιώδεις βάσεις για τη δημιουργία της σύγχρονης επιστήμης της σεισμολογίας, ενώ την άλλη αποτέλεσε η εφεύρεση του σειсмоγράφου.

Οι πρώτοι σειсмоγράφοι κατασκευάστηκαν στην Ιαπωνία από τους Άγγλους Cray, Milne και Ewing περί το 1880 (μηχανικοί σειсмоγράφοι και κατέγραφαν πάνω σε αιθαλωμένο γυαλί).

Η πρώτη αναγραφή μακρινού σεισμού έγινε τυχαία το 1889 στο Potsdam από οριζόντιο αυτογραφικό εκκρεμές τύπου Rebeur-Paschwitz.

Αυτή οφειλόταν σε σεισμό της Ιαπωνίας, που έγινε σε απόσταση 9000 Km περίπου από το σημείο αναγραφής.

Τα κύματα Rayleigh αναγνωρίστηκαν για πρώτη φορά στα σειсмоγράμματα το 1890 από τον Oldham στην Αγγλία και τον Wiechert στη Γερμανία.

Το 1898 ο E. Wiechert εισήγαγε τον πρώτο σειсмоγράφο με ιζώδη απόσβεση, ο οποίος έχει τη δυνατότητα αναγραφής του συνόλου της εδαφικής κίνησης που οφείλεται σε ορισμένο σεισμό.

2.1.3 Νέα περίοδος της Σεισμολογίας (1900-σήμερα)

Στις αρχές του 20ου αιώνα κατασκευάστηκαν πολλοί σεισμολογικοί σταθμοί των οποίων οι αναγραφές χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των επικέντρων των ισχυρών σεισμών.

Ο πρώτος ηλεκτρομαγνητικός σειсмоγράφος, που κατασκευάστηκε το 1906 από τον B. Galitzin χρησιμοποιήθηκε σε σεισμολογικό δίκτυο στη Ρωσία.

Το 1925 κατασκευάστηκε ο οπτικής αναγραφής σειсмоγράφος Wood-Anderson, που χρησιμοποιήθηκε αργότερα (1935) για τον υπολογισμό του τοπικού μεγέθους από τον Ch. Richter.

Το 1935 κατασκευάστηκε ηλεκτρομαγνητικός σειсмоγράφος από τον Benioff ο οποίος πήρε το όνομά του και έχει τη δυνατότητα καταγραφής βραχείας ή μακράς περιόδου (ανάλογα με την περίοδο του γαλβανόμετρου με το οποίο συνδέεται). Ο συγκεκριμένος σειсмоγράφος μπορούσε να ανιχνεύει τα σήματα ακόμη και ασθενών εδαφικών δονήσεων που οφείλονται σε σεισμούς ή πυρηνικές εκρήξεις.

Η λεπτομερής σεισμική αναγραφή της πυρηνικής έκρηξης στο νησί Bikini το 1946 και η πραγματοποίησή της το 1949 πυρηνικής έκρηξης από τη Σοβιετική Ένωση αποτέλεσαν την αιτία ανάπτυξης από τις ΗΠΑ ενός μεγάλου προγράμματος για την ανίχνευση των πυρηνικών εκρήξεων.

Το πρόγραμμα αυτό είχε σημαντικές συνέπειες για τη Σεισμολογία, μεταξύ των οποίων ήταν :

- Η εγκατάσταση, στις αρχές της δεκαετίας του 1960, του Διεθνούς Τυποποιημένου Δικτύου Σειсмоγράφων WWSSN (Worldwide Standardized Seismograph Network).

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

- Η δημιουργία ενός Παγκόσμιου Ψηφιακού Σεισμικού Δικτύου (Global Digital Seismic Network), του οποίου η εγκατάσταση άρχισε το 1980 από το IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) και την Γεωλογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών (USGS).
- R. Oldham (1900, 1906): Αναγνώρισε στα σειсмоγράμματα τα επιμήκη, P, και τα εγκάρσια, S, κύματα και διαπίστωσε την ύπαρξη του πυρήνα της Γης από την απουσία απ' ευθείας P και S κυμάτων σε αποστάσεις πηγής-δέκτη μεγαλύτερες των 1000.
- Gutenberg (1914): Χρησιμοποίησε τους χρόνους διαδρομής των σεισμικών κυμάτων που διεισδύουν καθώς και αυτών που ανακλώνται στον πυρήνα της Γης και υπολόγισε σε 2900 km το βάθος του υγρού πυρήνα (δηλαδή πολύ κοντά στην τιμή των 2889 km που γνωρίζουμε σήμερα).
- Mohorovicic (1909): Εντόπισε την ασυνέχεια ταχύτητας μεταξύ του φλοιού και του μανδύα, η οποία φέρει το όνομά του.
- Inge Lehman (1939): Ανακάλυψε τον εσωτερικό πυρήνα της Γης.
- Zöppritz (1907): Κατασκεύασε τους πρώτους πίνακες χρόνων διαδρομής.
- H. Jeffreys (1939): Προσδιόρισε την πρώτη κατακόρυφη τομή δομής ταχύτητας της Γης (από την επιφάνεια μέχρι το κέντρο της) και πρότεινε τους χρησιμοποιούμενους μέχρι σήμερα γνωστούς πίνακες J-B (Jeffreys-Bullen) οι οποίοι προβλέπουν τους χρόνους άφιξης των P κυμάτων σ' οποιοδήποτε σημείο της επιφάνειας της Γης με την αξιοσημείωτη ακρίβεια του 0.2%.
- K. Wadati (1928): Επιβεβαιώθηκε η γένεση των σεισμών βάθους και διαπιστώθηκε ότι οι εστίες βρίσκονται πάνω σε κεκλιμένες ζώνες γνωστές ως ζώνες Wadati-Benioff. Η πρώτη ελεύθερη ταλάντωση της Γης παρατηρήθηκε από τον Benioff και ήταν αυτή που προκλήθηκε από το μεγάλο σεισμό της Χιλής το 1960. Αυτή αποτέλεσε την αρχή για τη μελέτη της δομής της Γης και με τη θεωρία των κανονικών αρμονικών (normal modes).
- H. Reid (1910): Το μεγαλύτερο, ίσως, επιστημονικό βήμα για τον τρόπο γένεσης των σεισμών είναι η διαπίστωση του H. Reid το 1910, που βασίστηκε σε γεωδαιτικές μετρήσεις οι οποίες έγιναν πριν και μετά το μεγάλο σεισμό του Αγίου Φραγκίσκου το 1906, ότι κάθε σεισμός οφείλεται σε απελευθέρωση ενέργειας κατά τη διάρρηξη σεισμικού ρήγματος ενέργεια αυτή δημιουργείται κατά τη βραδεία και επί σημαντικό χρονικό διάστημα παραμόρφωση των πετρωμάτων του εστιακού χώρου πριν τη γένεση του σεισμού. Αυτή είναι γνωστή ως θεωρία της ελαστικής ανάπλασης και αποτελεί μέχρι σήμερα τη βασική θεωρία για τον τρόπο γένεσης των σεισμών.
- Shida (1917): Διαπίστωσε ότι οι πρώτες αποκλίσεις των P κυμάτων είναι συμπίεσεις στις δύο κατακόρυφη στερεές γωνίες και αραιώσεις στις δύο άλλες κατακόρυφη γωνίες που σχηματίζει το επίπεδο του ρήγματος και το κάθετο στη διεύθυνση της κίνησης επίπεδο (βοηθητικό επίπεδο).

- H. Nakano (1923): Εισήγαγε τη θεωρία της ακτινοβολίας των σεισμικών κυμάτων από σεισμική πηγή που οφείλεται σε διπλό ζεύγος δυνάμεων, η οποία ερμηνεύει την κατανομή αυτή των συμπίεσεων και αραιώσεων και αποδείχθηκε ορθή μετά από σχετικές επιστημονικές συζητήσεις επί τέσσερις δεκαετίες.
- Byerly (1928): Ανέπτυξε μέθοδο καθορισμού του μηχανισμού γένεσης των σεισμών με βάση τις πρώτες αποκλίσεις των P κυμάτων.
- Langston and Helmberger (1975), Nabelek (1984): Ανέπτυξαν για τον ίδιο σκοπό μέθοδο με βάση τη μοντελοποίηση των κυματομορφών των P και S κυμάτων. Οι μέθοδοι αυτές εφαρμόστηκαν και εξακολουθούν να εφαρμόζονται αποτελεσματικά για τον καθορισμό του μηχανισμού γένεσης των ισχυρών σεισμών.
- Charles Richter (1935): Εισήγαγε την κλίμακα του τοπικού μεγέθους.
- ML. Gutenberg (1945): Εισήγαγε την κλίμακα του επιφανειακού μεγέθους.
- MS. Gutenberg και Richter (1956): Πρότειναν την τελική μορφή της κλίμακας του χωρικού μεγέθους.
- Mb. Hanks και Kanamori (1979): Πρότειναν την κλίμακα του μεγέθους ροπής.

Κατά το δεύτερο μισό της δεκαετίας του 1960 άρχισε να αναπτύσσεται η θεωρία των λιθοσφαιρικών πλακών που αποτελεί τη βάση της νέας παγκόσμιας τεκτονικής.

Τα πρώτα στοιχεία για τη θεωρία αυτή προέκυψαν από μαγνητικές μετρήσεις που δείχνουν επέκταση του θαλάσσιου πυθμένα. Η θεμελίωση της θεωρίας αυτής βασίστηκε κατά κύριο λόγο σε σεισμολογικές παρατηρήσεις, αφού τα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, καθώς και οι κατευθύνσεις και οι ταχύτητες κίνησής τους, καθορίζονται κυρίως με σεισμολογικές μεθόδους.

Έτος 1969 – 1972: Εγκαταστάθηκε σειсмоγραφικό δίκτυο στη Σελήνη με το πρόγραμμα «Απόλλων» και κατέγραψε επιφανειακούς σεισμούς με βάθη μέχρι 100 Km αλλά και σεισμούς βάθους με βάθη μεταξύ 800 και 1000 Km.

Έτος 1976: Εγκαταστάθηκε στον Άρη ο πρώτος σειсмоγράφος με το πρόγραμμα «Viking 2», αλλά αυτός κατέγραψε μόνο έναν πιθανό σεισμό, λόγω του υψηλού θορύβου που προκαλείται εκεί και από τον άνεμο.

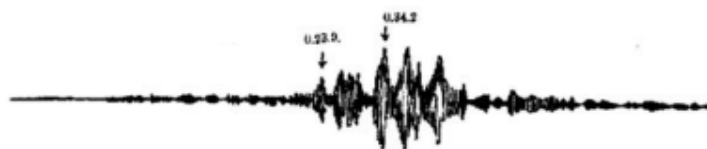
Κατά την τελευταία δεκαπενταετία η σεισμολογική έρευνα επηρεάστηκε έντονα από την αναπτυσσόμενη θεωρία του χάους. Δείχθηκε π.χ., ότι η διάρρηξη στα ρήγματα κατά τη γένεση ισχυρών σεισμών ακολουθεί τους νόμους του «αιτιοκρατικού χάους», ότι η περιοχική σεισμικότητα καθώς και επαγόμενη σεισμικότητα ερμηνεύονται με τη θεωρία της «αυτο-οργανωμένης κρισιμότητας» και ότι η γένεση των κύριων σεισμών και η προηγούμενη αυτών επιταχυνόμενη σεισμικότητα ερμηνεύεται με τη θεωρία του «κρίσιμου σημείου» (Papazachos, 2003).

Η διεθνής συνεργασία και η ανταλλαγή σεισμολογικών δεδομένων: από τις αρχές σχεδόν του 20ου αιώνα, αποτέλεσε σημαντικό παράγοντα ανάπτυξης της Σεισμολογίας.



Εικόνα 1 : Ένα από τα πρώτα σειсмоγράμματα έτος 1889

Ένα από τα πρώτα σειсмоγράμματα (**Εικόνα 1**) προέρχεται από σεισμό που έγινε στην Ιαπωνία στις 17 Απριλίου 1889 και καταγράφηκε από σειсмоγράφο τύπου Rebeur- Paschwitz εγκατεστημένο στο Potsdam της Γερμανίας (Von Rebeur-Paschwitz, E., 1889. The earthquake of Tokio, April 18, 1889, Nature, Lond. 40, 294-295).



Εικόνα 2 : Καταγραφή σεισμού από οριζόντιο σειсмоγράφο έτος 1901

Καταγραφή κοντινού σεισμού από οριζόντιο σειсмоγράφο τύπου Milne (**Εικόνα 2**) εγκατεστημένο στην Ιαπωνία. Η χρησιμότητά της καταγραφής είναι περιορισμένη λόγω έλλειψης συστήματος απόσβεσης (Milne, J. 1901. Seismological investigations. -Sixth report of the committee... Rep. Brit. Ass. Advmt. Sci. 1901, 40-54).

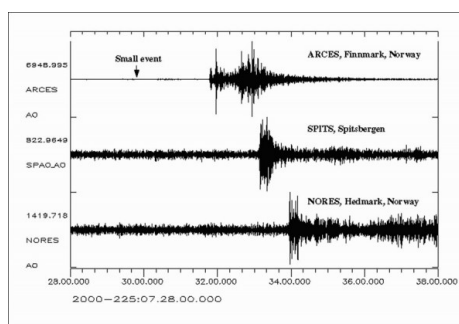


Εικόνα 3 : Ο πρώτος σειсмоγράφος 132 μ.Χ

Το πρώτο σεισμοσκόπιο (Εικόνα 3) που κατασκευάστηκε το 132 μ.Χ από τον Κινέζο φιλόσοφο Zhang Heng (78-132 μ.Χ). Το σεισμοσκόπιο περιείχε εκκρεμές (κατακόρυφος κύλινδρος) το οποίο, αποκρινόμενο στην εδαφική δόνηση, ωθούσε μέσω μοχλών σφαιρίδια να πέσουν σε υποδοχείς (ανοικτά στόματα βατράχων) που βρίσκονται στη βάση του.



(α)



(β)

Εικόνα 4 : Σύγχρονος σεισμογράφος – Καταγραφή σεισμογράμματος

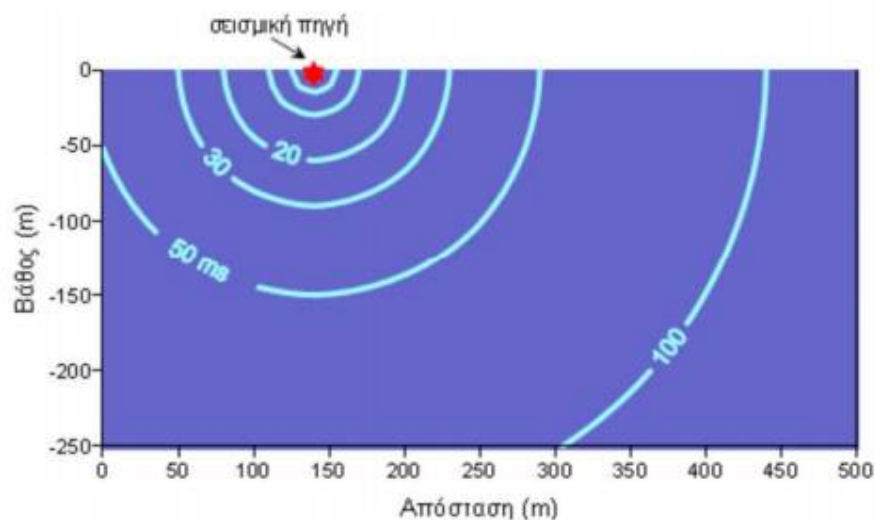
Σήμερα οι σύγχρονοι σεισμογράφοι έχουν την μορφή που βλέπουμε στην παραπάνω εικόνα (Εικόνα 4 α), ενώ καταγραφή των σεισμικών δονήσεων (σεισμογράμματα) έχουν την μορφή της εικόνας (Εικόνα 4 β) .

2.2 Σεισμικά Κύματα

Τα κύματα τα οποία διαδίδονται μέσα στη Γη σαν ελαστικά κύματα ονομάζονται σεισμικά κύματα. Υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες σεισμικών κυμάτων ανάλογα με το βάθος διείσδυσης τους μέσα στη Γη, τα κύματα χώρου (body waves) και τα κύματα επιφάνειας (surface waves).

2.2.1 Τα Κύματα χώρου

Αυτά είναι ελαστικά κύματα τα οποία διαδίδονται δια μέσου του εσωτερικού της Γης. Στις έρευνες ανάκλασης και διάθλασης, τα κύματα χώρου είναι η πηγή των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουμε το εσωτερικό της Γης. Τα κύματα διαδίδονται μακριά από την πηγή προς όλες τις διευθύνσεις. Αν η ταχύτητα με την οποία τα κύματα χώρου διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης είναι σταθερή, τότε κάθε στιγμή, τα κύματα αυτά σχηματίζουν μια σφαίρα γύρω από την πηγή, η ακτίνα της οποίας εξαρτάται από το χρόνο που πέρασε από τη στιγμή που η πηγή άρχισε να παράγει τα κύματα. Παρακάτω (**Εικόνα 5**) βλέπουμε μια τομή μέσα στη Γη, όπου τα κύματα χώρου που εκπέμπονται από την σεισμική πηγή δείχνονται σε διάφορες χρονικές στιγμές.

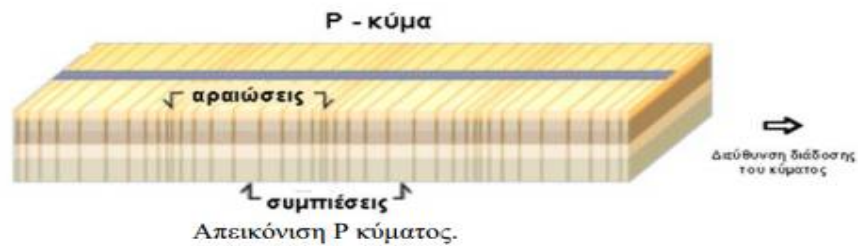


Εικόνα 5 : Αποτύπωση των κυμάτων χώρου τα οποία εκπέμπονται από την σεισμική πηγή για διαφορετικές χρονικές περιόδους

Τα κύματα χώρου υποδιαιρούνται επιπλέον σε δύο τάξεις κυμάτων ανάλογα με την μετατόπιση που προκαλούν στα μόρια της ύλης κατά την διέλευση τους μέσα από αυτήν, τα επιμήκη κύματα P & τα εγκάρσια κύματα S.

2.2.1.1 Τα Επιμήκη Κύματα P

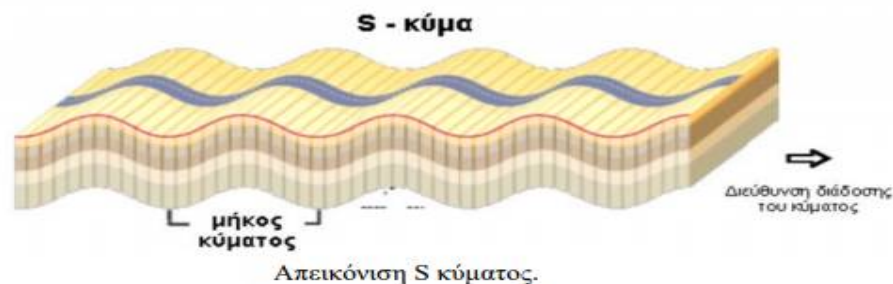
Τα επιμήκη κύματα P καλούνται επίσης και πρώτα κύματα (primary waves), επειδή διαδίδονται μέσα στο μέσο γρηγορότερα από τους άλλους τύπους κυμάτων. Στα επιμήκη κύματα P (**Εικόνα 6**), τα μόρια της ύλης μετατοπίζονται στην ίδια διεύθυνση με την οποία διαδίδεται το κύμα (στην συγκεκριμένη περίπτωση ακτινικά). Έτσι, η ύλη αραιώνεται και συμπιέζεται καθώς τα επιμήκη κύματα P διαδίδονται μέσα στο μέσο. Τα επιμήκη κύματα P είναι ανάλογα των ηχητικών κυμάτων που διαδίδονται μέσα στον αέρα.



Εικόνα 6 : Επιμήκες Κύμα P

2.2.1.2 Τα Εγκάρσια Κύματα S

Τα εγκάρσια κύματα S καλούνται και δεύτερα κύματα (secondary waves), διότι διαδίδονται μέσα στο μέσο βραδύτερα από τα επιμήκη κύματα P. Στα εγκάρσια κύματα S (**Εικόνα 7**), τα μόρια που συνιστούν το μέσο εκτοπίζονται σε διεύθυνση κάθετη στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Εικόνα 7 : Εγκάρσιο Κύμα S

2.2.2 Τα Κύματα επιφανείας

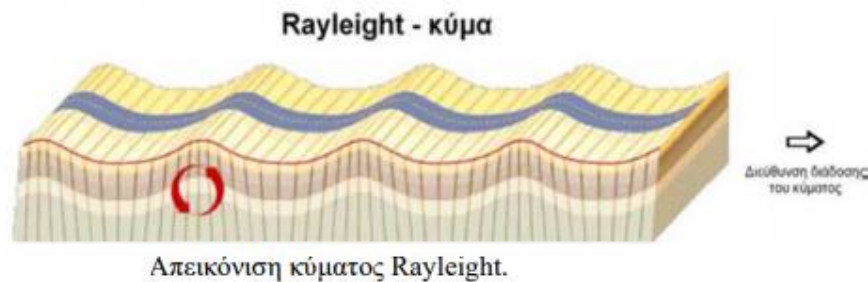
Τα κύματα επιφανείας είναι κύματα τα οποία διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια της Γης. Το πλάτος τους στην επιφάνεια της Γης μπορεί να είναι πολύ μεγάλο, αλλά μειώνεται εκθετικά με το βάθος.

Τα επιφανειακά κύματα διαδίδονται με ταχύτητες μικρότερες από αυτές των S κυμάτων, παράγονται λιγότερο αποτελεσματικά από τις θαμμένες πηγές, και έχουν πλάτη που μειώνονται με την απόσταση από την πηγή πιο αργά από ότι παρατηρείται για τα κύματα χώρου.

Υπάρχουν δύο κατηγορίες κυμάτων επιφανείας, **τα κύματα Love** και **τα κύματα Rayleigh**, τα οποία διακρίνονται από το είδος της κίνησης που προκαλούν στα σωματίδια της ύλης του μέσου.

2.2.2.1 Τα Κύματα Rayleigh

Τα κύματα Rayleigh (**Εικόνα 8**) κατά τη διάδοσή τους στα υλικά σημεία του μέσου διάδοσης διαγράφουν ελλείψεις με κατακόρυφο το μεγάλο άξονα και το μικρό άξονα παράλληλο προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.

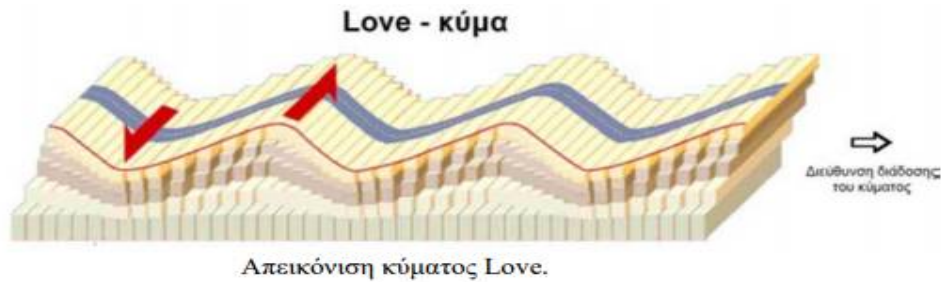


Εικόνα 8 : *Κύμα Rayleigh*

Η ταχύτητα των κυμάτων Rayleigh είναι μικρότερη από την ταχύτητα των επιμήκης κυμάτων (P- Waves) και των εγκάρσιων κυμάτων (S – Waves) και για το λόγο αυτό τα κύματα Rayleigh φθάνουν μετά τα επιμήκη και εγκάρσια κύματα.

2.2.2.2 Τα Κύματα Love

Τα κύματα Love (Εικόνα 9) κατά τη διάδοσή τους στα υλικά του μέσου διάδοσης, πραγματοποιούν οριζόντιες ταλαντώσεις κάθετες προς τη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



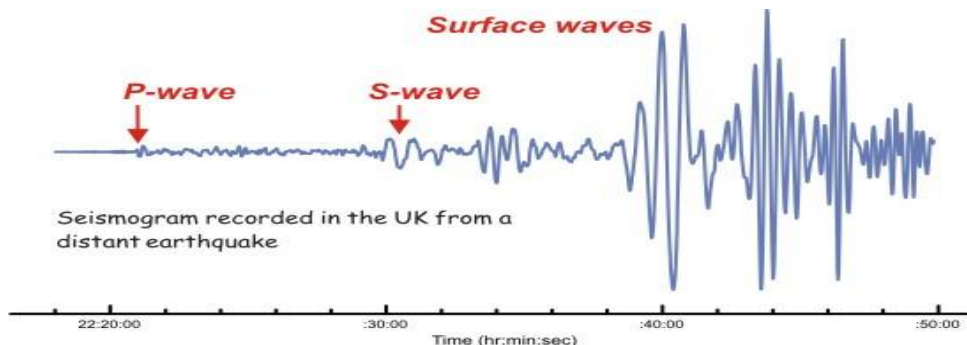
Εικόνα 9 : Κύμα Love

Τα κύματα Love είναι στην ουσία γραμμικώς πολωμένα εγκάρσια κύματα τα οποία έχουν μόνο οριζόντια συνιστώσα η οποία παριστάνεται με το σύμβολο SH. Τα κύματα Love φθάνουν μετά τα επιμήκη (P- Wave) και εγκάρσια κύματα (S-Wave).

Η ταχύτητα διάδοσης των επιφανειακών κυμάτων (Rayleigh και Love) εξαρτάται από τη περίοδο τους επειδή ο χώρος που διαδίδονται δεν είναι ομογενής. Το φαινόμενο αυτό, δηλαδή η εξάρτηση της ταχύτητας διάδοσης των κυμάτων αυτών από τη περίοδο (ή τη συχνότητα) τους λέγεται σκέδαση.

Σε όλες σχεδόν τις ερευνητικές διασκοπήσεις, τα επιφανειακά κύματα αποτελούν μια μορφή θορύβου την οποία προσπαθούμε να περιορίσουμε. Ειδικά για τις διασκοπήσεις ανάκλασης, η καταστολή της ενέργειας των επιφανειακών κυμάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι τα πλάτη τους που παράγονται από ρηγά θαμμένες πηγές συχνά παρατηρείται να είναι μεγαλύτερα από τα πλάτη των κυμάτων χώρου που προσπαθούμε να καταγράψουμε και να ερμηνεύσουμε.

Για τις διασκοπήσεις διάθλασης, τα επιφανειακά κύματα αποτελούν μικρότερο πρόβλημα διότι μας ενδιαφέρει μόνο ο χρόνος διαδρομής της πρώτης άφιξης του σεισμικού κύματος (Εικόνα 10). Τα επιφανειακά κύματα δεν είναι ποτέ η πρώτη άφιξη.



Εικόνα 10 : Τυπικό Σεισμογράφημα

2.2 Οι ταχύτητες των σεισμικών κυμάτων στα υλικά

Οι ταχύτητες των επιμήκων κυμάτων P και εγκάρσιων S, σε διάφορα υλικά που απαντούντα στο φλοιό της γης, φαίνονται στο παρακάτω πίνακα (Πίνακας 1).

Υλικό	Ταχύτητα P κυμάτων (m/s)	Ταχύτητα S κυμάτων (m/s)
Αέρας	332	
Νερό	1400-1500	
Πετρέλαιο	1300-1400	
Σίδηρο	6100	3500
Τσιμέντο	3600	2000
Γρανίτης	5500-5900	2800-3000
Βασάλτης	6400	3200
Ψαμμίτης	1400-4300	700-2800
Ασβεστόλιθος	5900-6100	2800-3000
Άμμος (ακόρεστη σε νερό)	200-1000	80-400
Άμμος (κορεσμένη σε νερό)	800-2200	320-880
Αργίλος	1000-2500	400-1000
Πλειστοκαινικές αποθέσεις (κορεσμένες)	1500-2500	600-1000

Ταχύτητες επιμήκων και εγκάρσιων κυμάτων για διάφορα υλικά.

Πίνακας 1 : Ταχύτητες σεισμικών κυμάτων στα υλικά

Αντίθετα με την πυκνότητα, στη σεισμική ταχύτητα μπορεί να υπάρχουν μεγάλες μεταβολές μεταξύ διαφορετικών τύπων πετρωμάτων και μεταξύ κορεσμένων και ακόρεστων πετρωμάτων. Ακόμα όμως και για αυτές τις μεταβολές, υπάρχει παρόλα αυτά αξιόλογη επικάλυψη στις μετρούμενες ταχύτητες. Επομένως, μόνο η γνώση της σεισμικής ταχύτητας δεν αρκεί για τον καθορισμό του τύπου του πετρώματος.

2.4 Μέθοδοι αναγνώρισης των κυμάτων Rayleigh

Για την αναγνώριση των κυμάτων επιφανείας Rayleigh χρησιμοποιούνται δύο μέθοδοι. Η μέθοδος First Arrivals – First Break και η μέθοδος M.A.S.W.

2.4.1 Η μέθοδος First Arrivals – First Break

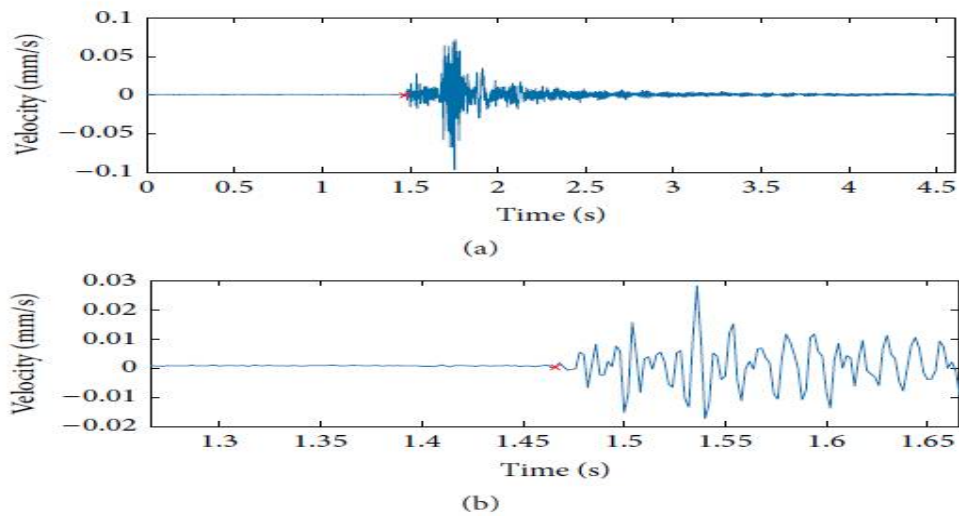
Αφού μελετήσαμε διεξοδικά τις παρακάτω δημοσιεύσεις σχετικές με το αντικείμενο του προσδιορισμού των πρώτων χρόνων αφίξεων των σεισμικών σημάτων :

1. Automatic time picking and velocity determination on full waveform sonic well logs (Lejia Han, Joe Wong, John C. Bancroft, and Robert R. Stewart), 13 March 2016.
2. An Automatic P-Phase Arrival-Time Picker by Erol Kalkan (Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 106, No. 3, pp. –, June 2016, doi: 10.1785/0120150111).
3. A Suggested Means for the Annotation of Energy Onsets in Seismograms George R. Daglish, Yurii P. Sizov (AMERICAN JOURNAL OF SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH © 2017, Science Hub, <http://www.sciencehub.org/AJSIR> ISSN: 2153 -649X, doi:10.5251/ajsir.2017.8.1.8.15).
4. An Automatic Phase Picker for Local Earthquakes with Predetermined Locations: Combining a Signal-to-Noise Ratio Detector with 1D Velocity Model Inversion by Zefeng Li and Zhigang Peng (Seismological Research Letters Volume 87, Number 6 November/December 2016).
5. Algorithm Indicating Moment of P-Wave Arrival Based on Second-Moment Characteristic Jakub Sokolowski, Jakub Obuchowski, Radoslaw Zimroz, Agnieszka Wylomanska, and Eugeniusz Koziaz (Hindawi Publishing Corporation Shock and Vibration Volume 2016, Article ID 4051701, 6 pages <http://dx.doi.org/10.1155/2016/4051701>).
6. First Break of the Seismic Signals Based on Information Theory Hong-Jiu Zhang Research institute of BPG, CNPC, Zhuozhou 072750 , (Information Engineering (IE) Volume 4, 2015).

Καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα

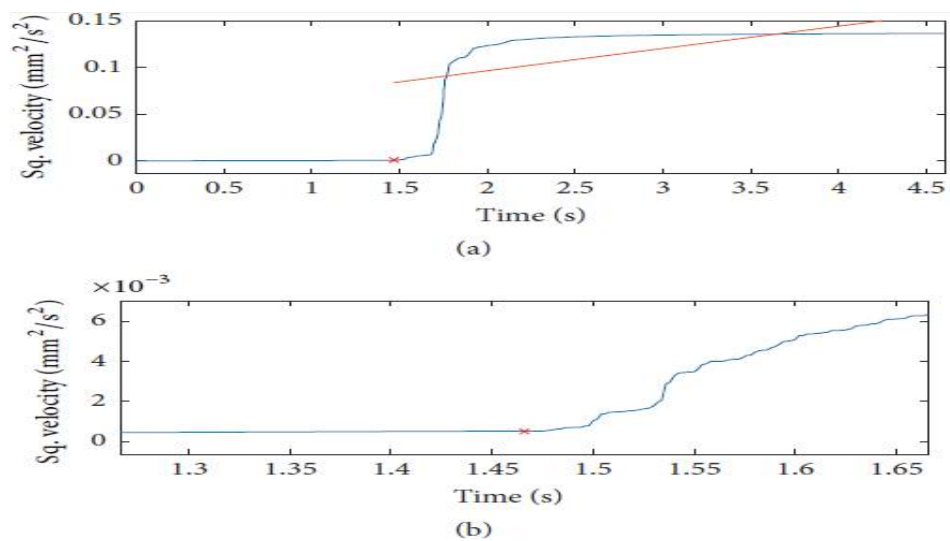
Η συλλογή πρώτης άφιξης σε δεδομένα σεισμικών ερευνών έχει μελετηθεί εκτενώς (Willis and Toksoz., 1983; Coppens, 1985; Boschetti et al., 1996).

Κατά την σεισμική εξερεύνηση ο ακριβής προσδιορισμός των πρώτων χρόνων πρώτης άφιξης των σεισμικών σημάτων μπορεί να προσδιορισθεί με μεγάλη ακρίβεια από τα ίχνη αφίξεων των ιδίων σημάτων.



Εικόνα 11 : α) Πρώτη άφιξη κύματος P , β) Μεγέθυνση του σημείου της πρώτης αφίξεως

Ο ακριβής προσδιορισμός των χρόνων πρώτων αφίξεων είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό των στατικών διορθώσεων. Οι στατικές διορθώσεις είναι ένα θεμελιώδες στάδιο στην επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων.



Εικόνα 12 : α) Στατιστική ανάλυση πρώτη άφιξη κύματος P , β) Μεγέθυνση του σημείου της πρώτης αφίξεως

Η ποιότητα των χρόνων πρώτων αφίξεων σχετίζεται με τη δομή της κοντινής επιφάνειας, τον τύπο της πηγής και τις συνθήκες S / N αναλογίας σήματος προς θόρυβο.

Κατά συνέπεια, η αυτοματοποιημένη ανάλυση των χρόνων πρώτων αφίξεων μπορεί να είναι ένα πολύ δύσκολο έργο εάν η περιοχή δεδομένων αποκτηθεί σε σύνθετα σήματα κοντά σε επιφάνειες ή αν ο S / N είναι χαμηλός.

Επιπλέον, αν το κύμα πηγής είναι μηδενικής φάσης όπως όταν χρησιμοποιούνται πηγές δονήσεων, η συσχέτιση σάρωσης παράγει συχνά πλευρικούς λοβούς που φθάνουν πριν τον χρόνο πρώτων αφίξεων, καθιστώντας έτσι ακόμα πιο δύσκολη τη διαδικασία συλλογής.

Η αναγνώριση των χρόνων πρώτων αφίξεων των σεισμικών κυμάτων, έχει πολλές μεθόδους για την αναγνώριση τους. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι αλγόριθμοι συλλογής των χρόνων πρώτων αφίξεων μπορούν να χωριστούν σε διάφορους τύπους μεθόδων, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων :

1. Της μεθόδου συσχέτισης (Correlation)
2. Της μεθόδου διασταυρούμενης συσχέτισης (Cross Correlation)
3. Της μεθόδου του νευρικού δικτύου (Neural Networks)
4. Των μεθόδων διάστασης των φράκταλ (Fractals Theory)
5. Της μεθόδου STA/LTA και πολλών άλλων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύξαμε αλγόριθμο συλλογής πρώτης άφιξης στο οποίο εφαρμόσαμε στα πειραματικά σήματα μας και τον αναλύουμε στο κεφάλαιο 7.

2.4.2 Η μέθοδος M.A.S.W (πολυκαναλική ανάλυση επιφανειακών κυμάτων)

Παρομοίως όπως και στο προηγούμενη παράγραφο ,αφού μελετήσαμε διεξοδικά τις παρακάτω δημοσιεύσεις σχετικές με το αντικείμενο της πολυκαναλικής ανάλυσης επιφανειακών κυμάτων (MASW) :

1. Multichannel Analysis of Surface Waves Methods for dispersion analysis of surface wave data ,Elín Ásta Ólafsdóttir (December 2014).
2. Estimation of near-surface shear-wave velocities and quality factors using multichannel analysis of surface-wave methods Jianghai Xia (Journal of Applied Geophysics 103 (2014) 140–151).
3. Detection of soil compaction using seismic surface waves Shane Donohue a, *, Dermot Forristal b , Louise A. Donohue (Soil & Tillage Research 128 (2013) 54–60).

4. Tool for analysis of multichannel analysis of surface waves (MASW) field data and evaluation of shear wave velocity profiles of soils Elin Asta Olafsdottir, Sigurdur Erlingsson, and Bjarni Bessason (Published at www.nrcresearchpress.com/cgj on 11 July 2017).

Και καταλήξαμε στα παρακάτω συμπεράσματα

Στις μεθόδους αναγνώρισης επιφανειακών κυμάτων τα επιφανειακά κύματα τύπου Rayleigh δημιουργούνται και χρησιμοποιούνται για να συναγάγουν το προφίλ ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων (P type waves) του τόπου δοκιμής ως συνάρτηση του βάθους. Η ταχύτητα των διατμητικών κυμάτων των μεμονωμένων στρωμάτων εδάφους είναι άμεσα ανάλογη με το μέτρο διάτμησης, που είναι η ακαμψία τους.

Σε σύγκριση με άλλα κύματα οι μέθοδοι αναγνώρισης των επιφανειακών κυμάτων είναι χαμηλού κόστους, καθώς και μη επεμβατικές και παράλληλα φιλικές προς το περιβάλλον, δεδομένου ότι ούτε απαιτούν βαριά μηχανήματα ούτε αφήνουν διαρκή χαρακτηριστικά ίχνη στην επιφάνεια του χώρου δοκιμής. Επιπλέον, έχουν δειχθεί μέθοδοι δημιουργίας επιφανειακών κυμάτων (Park, Miller & Xia, 1997, Xia et al., 2002).

Οι επιφανειακοί μέθοδοι ανάλυσης κυμάτων για την εκτίμηση της ταχύτητας - ακαμψίας των διατμητικών κυμάτων παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον.

Η φυσική διασπορά των επιφανειακών κυμάτων τύπου Rayleigh σε στρώσεις υλικών του εδάφους μας παρέχει το κλειδί που μας δίνει όλες τις πληροφορίες σχετικά με τις ιδιότητες των υλικών πλησίον της επιφάνειας.

Η βάση των περισσότερων επιφανειακών μεθόδων ανάλυσης κυμάτων είναι ο ακριβής προσδιορισμός της φάσης που εξαρτάται από τη συχνότητα - ταχύτητα του θεμελιώδους τρόπου των κυμάτων Rayleigh (Park et al., 1997). Η ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh σχετίζεται με την ταχύτητα διάτμησης των επιμέρους εδαφικών στρωμάτων.

Αναστρέφοντας την ταχύτητα διασποράς των καταγεγραμμένων κυμάτων Rayleigh, και την διάτμηση (Xia, Miller & Park, 1999) το προφίλ ταχύτητας διατμητικής κυματομορφής μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της ακαμψίας του ανώτατου εδάφους (στρωματογραφία εδάφους).

Αρκετοί τύποι μεθόδων επιφανειακών κυμάτων μπορούν να εφαρμοστούν για την εξαγωγή των κυμάτων Rayleigh , και να τα αξιοποιήσουν για να εκτιμήσουμε τα κύματα διάτμησης ταχύτητας των κορυφών των στρωμάτων εδάφους. Μεταξύ αυτών είναι η Φασματική Ανάλυση κυμάτων της Επιφάνειας (SASW) και η πολυκαναλική ανάλυση των επιφανειακών κυμάτων (MASW).

Η μέθοδος MASW έχει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι της SASW. Η απόκτηση δεδομένων στο πεδίο είναι λιγότερο χρονοβόρα καθώς η επεξεργασία δεδομένων είναι ταχύτερη και ευκολότερη για αυτοματοποίηση. Επιπλέον, οι πηγές θορύβου μπορούν να εντοπιστούν και να εξαλειφθούν ευκολότερα σε σύγκριση με την μέθοδο SASW. Η μείωση του θορύβου έχει μεγάλη σημασία, γιατί μας οδηγεί σε πιο ακριβή αποτελέσματα (Park, Miller & Xia, 1999, Xia et al., 2002).

Επίσης με την μέθοδο MASW καθίσταται δυνατή και οικονομικά εφικτή η αποτύπωση των δεδομένων σε διαγράμματα απεικόνισης δύο και τριών διαστάσεων (Park, Miller & Xia, 2001, Park, Miller, Xia & Ivanov, 2007, Xia, Miller, Park & Tian, 2003).

Η μέθοδος MASW μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά βήματα (Park et al., 1999):

1. Απόκτηση δεδομένων.
2. Ανάλυση διασποράς. (Καθορισμός καμπύλης διασποράς κυμάτων Rayleigh.)
3. Ανάλυση αναστροφής. (Καθορισμός προφίλ ταχύτητας διατμητικού κύματος.)

Η μέθοδος Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW) εισήχθη από την Park et al. (1999).

Γενικά, οι έρευνες MASW μπορούν να χωριστούν σε ενεργές και παθητικές έρευνες με βάση το πώς αποκτώνται τα επιφανειακά κύματα που απαιτούνται για την ανάλυση. Στο ενεργό MASW, τα κύματα επιφανείας παράγονται ενεργά με παρορμητικές ή δονητικές σεισμικές πηγές ενώ η παθητική μέθοδος MASW χρησιμοποιεί επιφανειακά κύματα που παράγονται από φυσικές πηγές (Park et al., 2007).

Η μέθοδος MASW αναπτύχθηκε προκειμένου να ξεπεραστούν ορισμένες από τις αδυναμίες της μεθόδου SASW τα κύρια αναφερόμενα πλεονεκτήματα της μεθόδου MASW είναι τα εξής:

- Η απόκτηση δεδομένων στο πεδίο είναι πολύ λιγότερο χρονοβόρα σε σύγκριση με την μέθοδο SASW. Η μέθοδος MASW απαιτεί μόνο μία συγκεντρωτική λήψη δεδομένων. Ωστόσο, εάν χρησιμοποιείται η μέθοδος SASW, είναι απαραίτητη η καταγραφή επαναλαμβανόμενων λήψεων ως ότου βρεθεί η επιθυμητή συχνότητα (Park et al., 1999, Xia et al., 2002).
- Η ανάλυση διασποράς που εμπλέκεται στο MASW είναι ταχύτερη και πιο εύκολη στην αυτοματοποίηση. Δεδομένα από όλους τους αισθητήρες επεξεργάζονται ταυτόχρονα, αντί για επαναλαμβανόμενους υπολογισμούς για πολλαπλά ζεύγη αισθητήρων όπως στη μέθοδο SASW (Xia et al., 2002).
- Οι πηγές θορύβου μπορούν να εντοπιστούν και να εξαλειφθούν πιο εύκολα σε σύγκριση με τη μέθοδο SASW (Park et al., 1999, Xia et al., 2002). Η μείωση του θορύβου οδηγεί σε αυξημένη ακρίβεια στην ανάλυση διασποράς και τελικά σε ακριβέστερη διάτμηση κυματομορφής.
- Η τεχνική MASW μπορεί να παρέχει μεγαλύτερο βάθος έρευνας από τη μέθοδο SASW, δεδομένου του ίδιου φορτίου πρόσκρουσης (σήμα αναφοράς). Το μέγιστο βάθος της έρευνας που μπορεί να είναι και που επιτυγχάνεται με τη χρήση της (ενεργής) μεθόδου MASW είναι γενικά περίπου 30 m, υποθέτοντας ότι τα επιφανειακά κύματα παράγονται από μια λογικά βαριά σεισμική πηγή, (Park et al., 2007).

Ωστόσο, η μέθοδος SASW μπορεί να παρέχει μια εκτίμηση της ταχύτητας διάτμησης σε βάθος περίπου 20 μέτρων στο καλύτερο περιβάλλον (Bessason & Erlingsson, 2011).

- Η μέθοδος MASW καθιστά δυνατή την παρατήρηση των πολλαπλών χαρακτηριστικών διασποράς από τα καταγεγραμμένα δεδομένα επιφανειακών κυμάτων (Park et al., 1998, Xia et al., 2003).

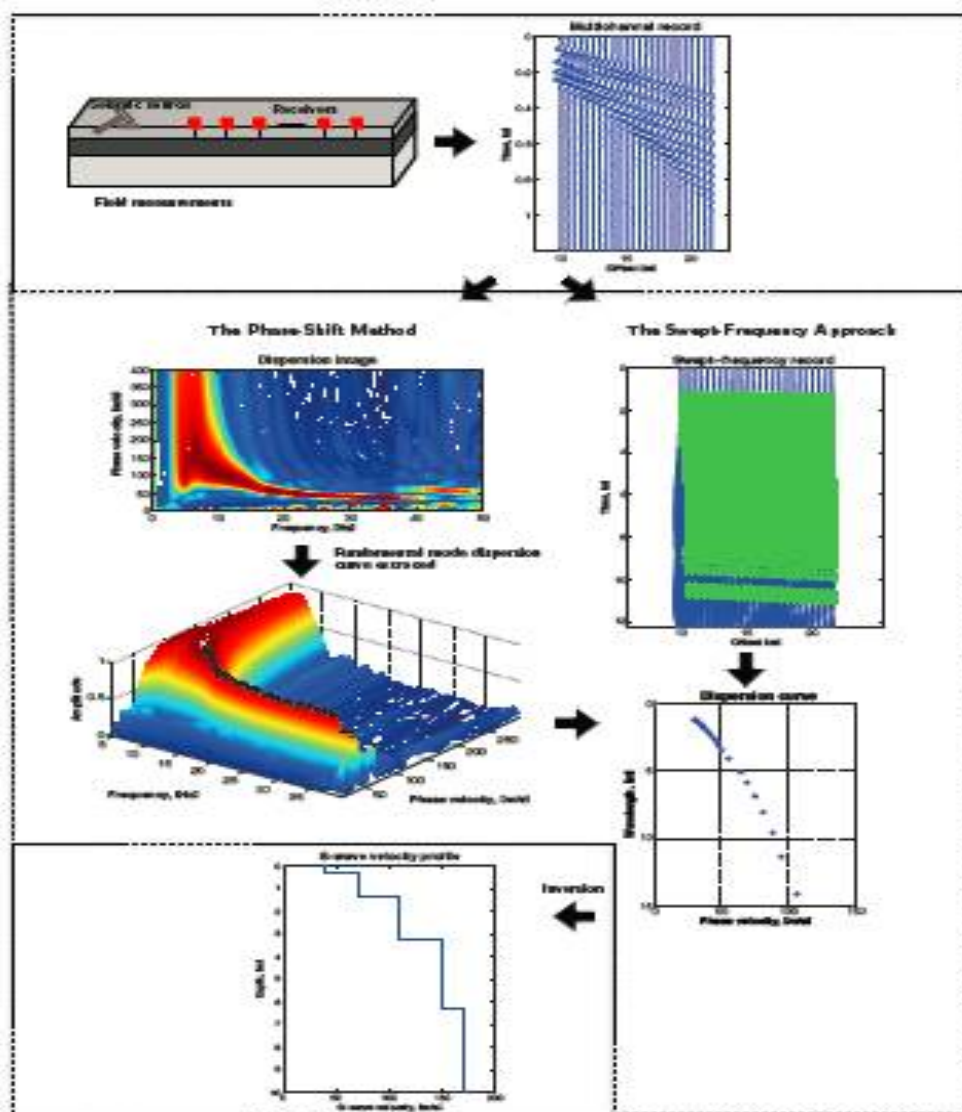
- Η μέθοδος MASW είναι πιο αποδοτική από πλευράς κόστους και χρόνου κατά την αξιολόγηση της ταχύτητας των διατμητικών κυμάτων σε δύο ή τρεις διαστάσεις (Park et al., 2007, Xia et al., 2000).

- Η μέθοδος MASW μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση παθητικά παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων.

Τα επιφανειακά κύματα που παράγονται από παθητικές πηγές έχουν χαμηλότερες συχνότητες (μεγαλύτερα μήκη κύματος) από τα κύματα που παράγονται από φορτία πρόσκρουσης (Vibrosis Car). Η χρήση παθητικών παραγόμενων επιφανειακών κυμάτων μπορούν να αυξήσουν σημαντικά το βάθος της έρευνας που κάνουμε (Park et al., 2007).

Οι έρευνες MASW μπορούν να αναλυθούν σε τρία βήματα (εικόνα 13).

- Μετρήσεις πεδίου.
- Επεξεργασία δεδομένων.
- Ανάλυση αναστροφής (Park et al., 1999).



Εικόνα 13 : Τα βήματα την μεθόδου MASW

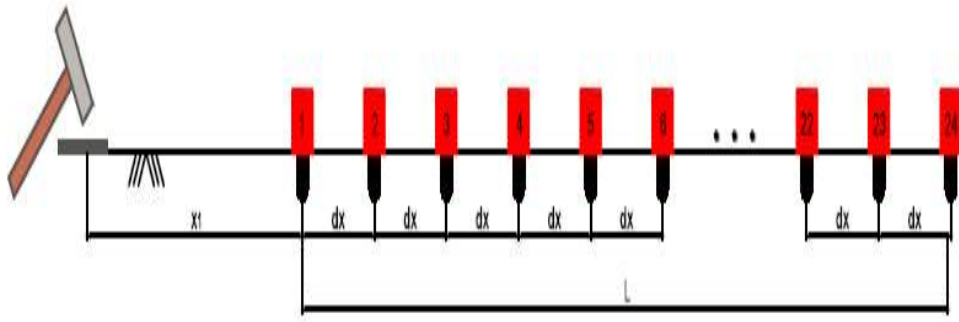
Για την απόκτηση δεδομένων, τα γεώφωνα παρατάσσονται σε ευθεία γραμμή στην επιφάνεια του πειράματος.

Καθώς τα γεώφωνα καταγράφουν μόνο κατακόρυφη κίνηση, είναι σημαντικό να τοποθετούνται κατακόρυφα και μόνο στο έδαφος.

Τα γεώφωνα είναι συνδεδεμένα με μια κάρτα απόκτησης δεδομένων και ένα υπολογιστή που διαθέτει το απαραίτητο λογισμικό. Είναι χαμηλής συχνότητας (π.χ. 4,5 Ηζ), κάτι που τα κάνει να συνιστώνται για (MASW).

Ο αριθμός των χρησιμοποιούμενων γεωφώνων είναι συνήθως δώδεκα ή περισσότερα, όπου το καθένα συνδέεται σε ξεχωριστό κανάλι (Park et al., 1997).

Αυξάνοντας τον αριθμό των χρησιμοποιούμενων γεωφώνων για καταγραφή, μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερη ανάλυση στην εικόνα διασποράς (Park et al., 2001; Ryden, Park, Ulriksen & Miller, 2004).



Εικόνα 14 : Παράδειγμα μετρήσεων με την μέθοδο MASW

Μια συχνότητα δειγματοληψίας – εγγραφής (fs) 1000 Hz είναι ικανοποιητική και χρησιμοποιείται συχνότερα στις έρευνες MASW. Αυτό αντιστοιχεί σε ένα διάστημα δειγματοληψίας (dt) 1 ms.

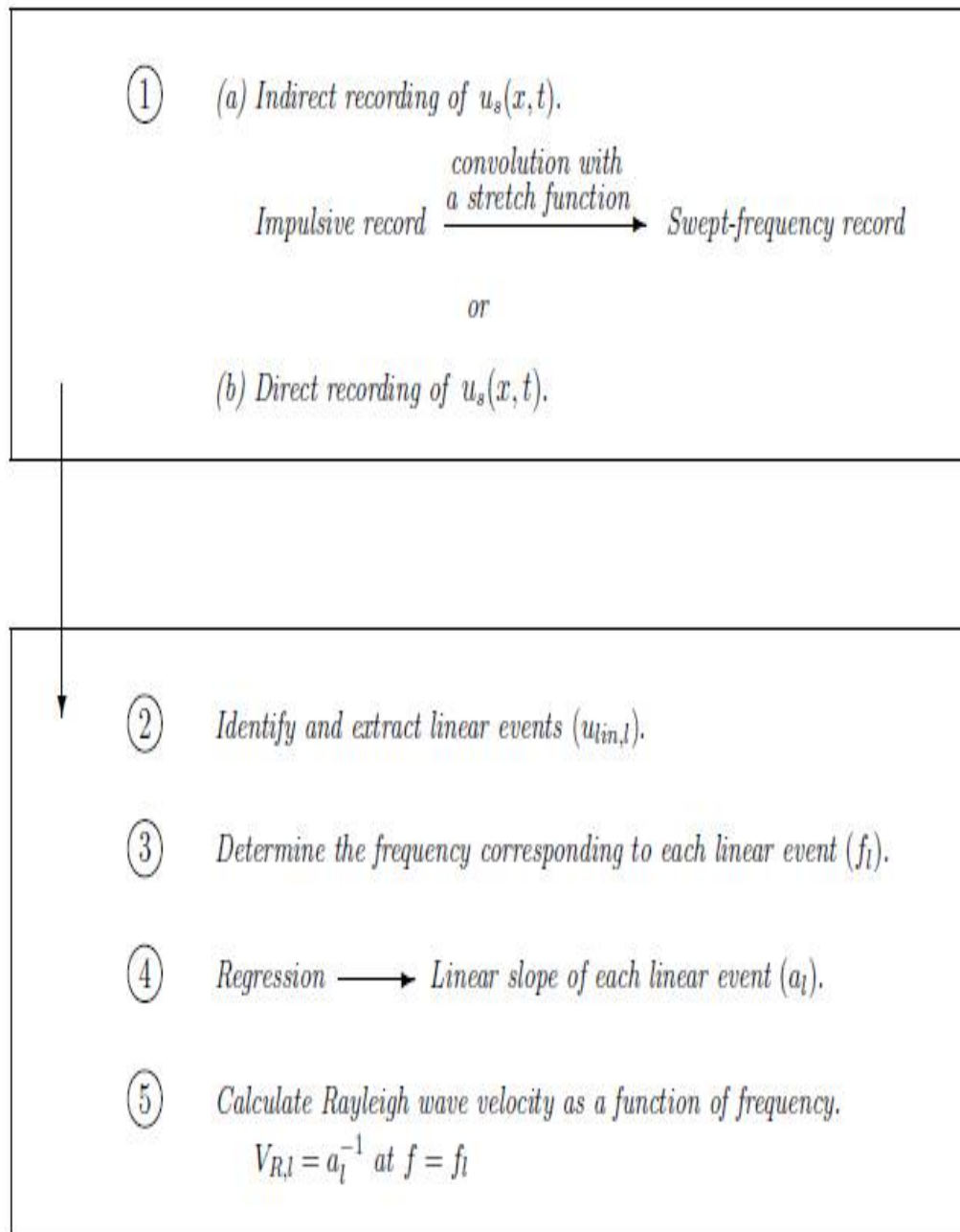
Για τις έρευνες MASW που χρησιμοποιούν σεισμική πηγή σαν σήμα αναφοράς, ο συνολικός χρόνος εγγραφής (T) είναι συνήθως περίπου 1 δευτερόλεπτο (συχνότητα 1Hz).

Η ταυτόχρονη εγγραφή πολλαπλών καναλιών (γεωφώνων) μας δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού των κυμάτων Rayleigh για διαφορετικές συχνότητες, από την ταχύτητα φάσης των κυμάτων Rayleigh.

Οι ταχύτητες φάσης των κυμάτων Rayleigh λαμβάνονται με τον υπολογισμό της γραμμικής κλίσης κάθε συνιστώσας συχνότητας (Park et al., 1999).

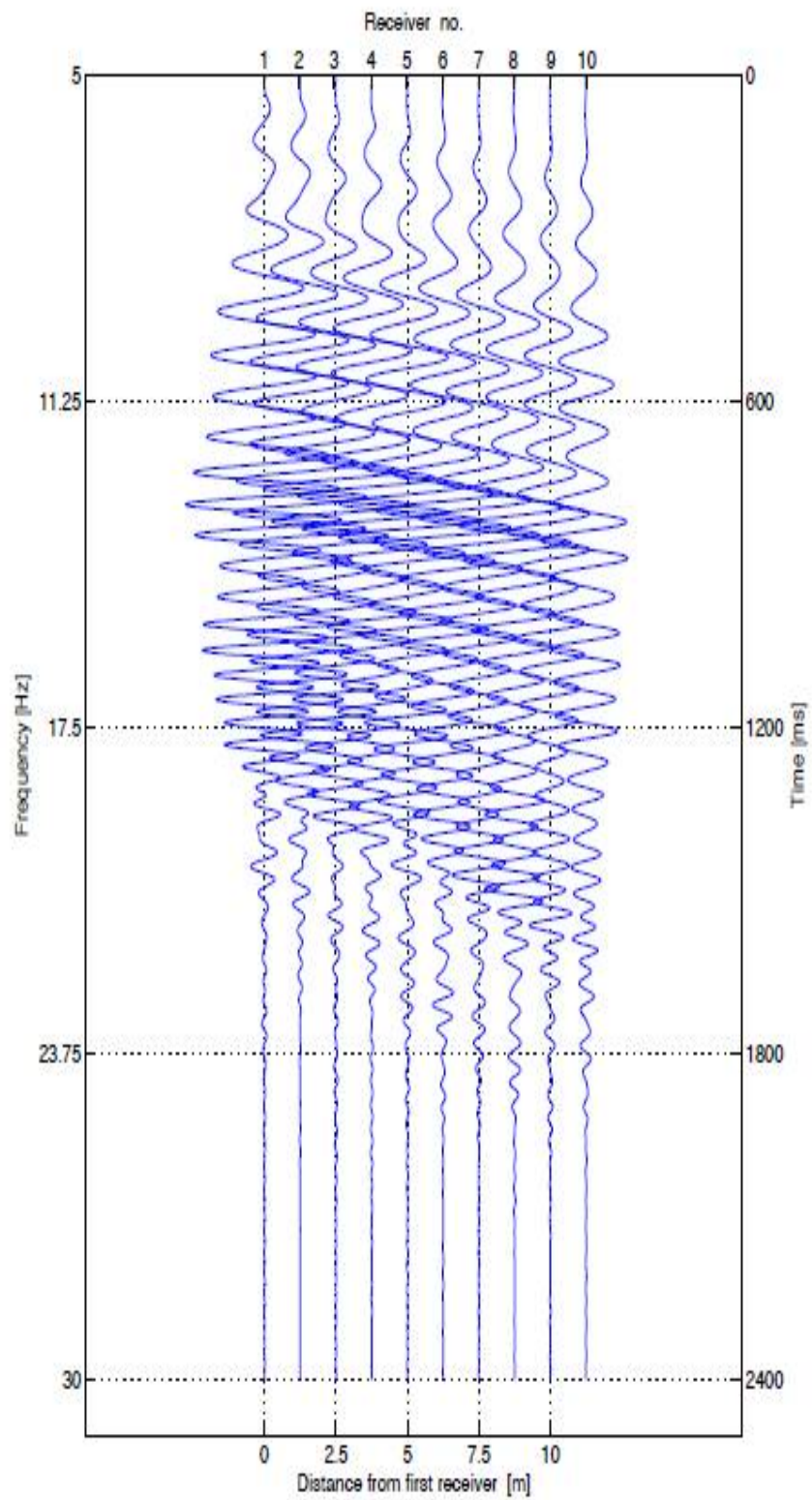
Η μέθοδος σάρωσης συχνότητας μπορεί να χωριστεί σε δύο στάδια:

1. Απόκτηση εγγραφής συχνότητας σάρωσης.
2. Υπολογισμός της ταχύτητας φάσης κύματος Rayleigh ως συνάρτηση της συχνότητας από την ταχύτητα από τις γραμμικές κλίσεις κάθε στοιχείου βάση των εγγραφών της συχνότητας σάρωσης.



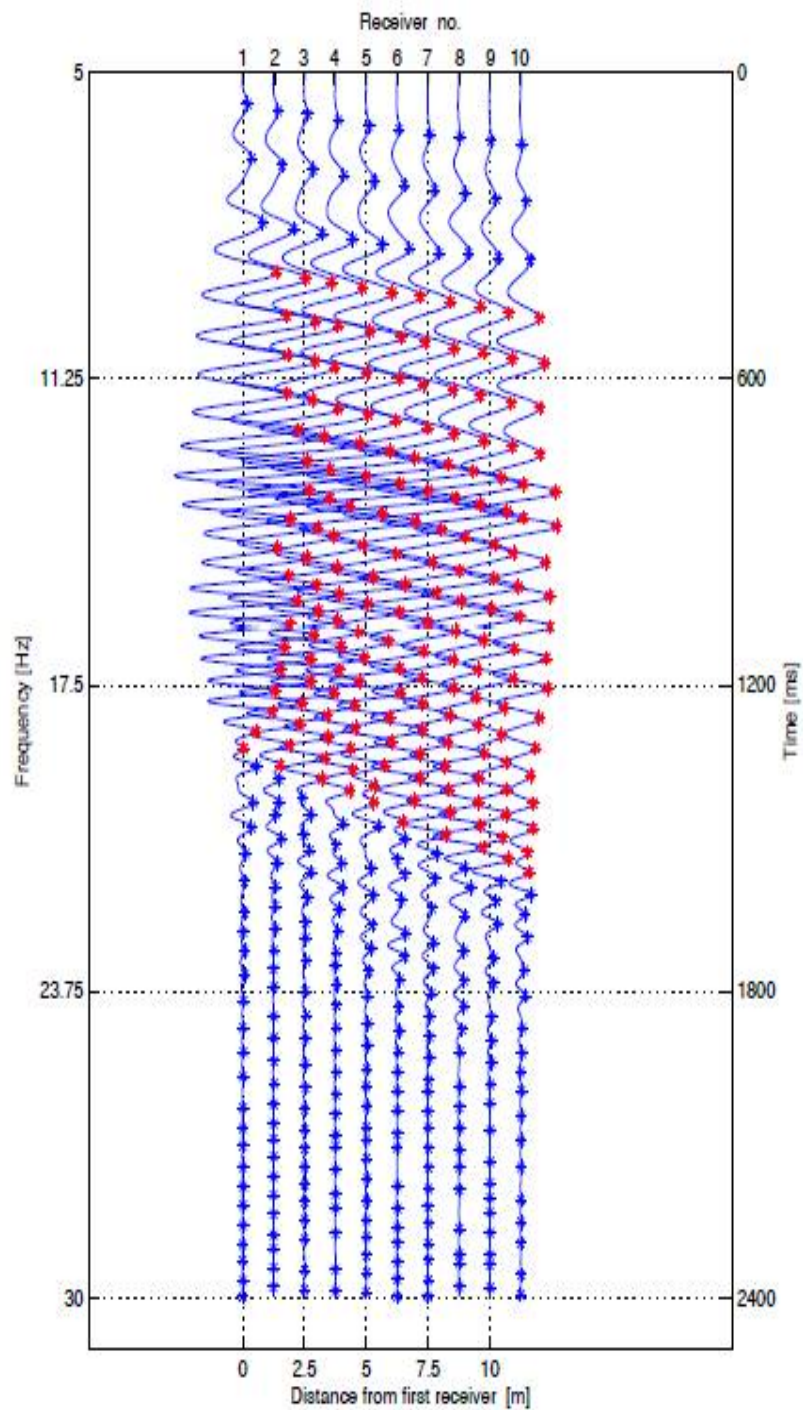
Εικόνα 15 : Μεθοδολογία σάρωσης συχνότητας (Swept frequency approach)

Ακολουθώντας πιστά τα βήματα της παραπάνω διαδικασίας (**Εικόνα 15**) σε σήματα από 10 διαφορετικά γεώφωνα βλέπουμε τα αποτελέσματα στις επόμενες σελίδες (**Εικόνα 16** , **Εικόνα 17**).



Εικόνα 16 : Σάρωση συχνότητας με 10 γεώφωνα

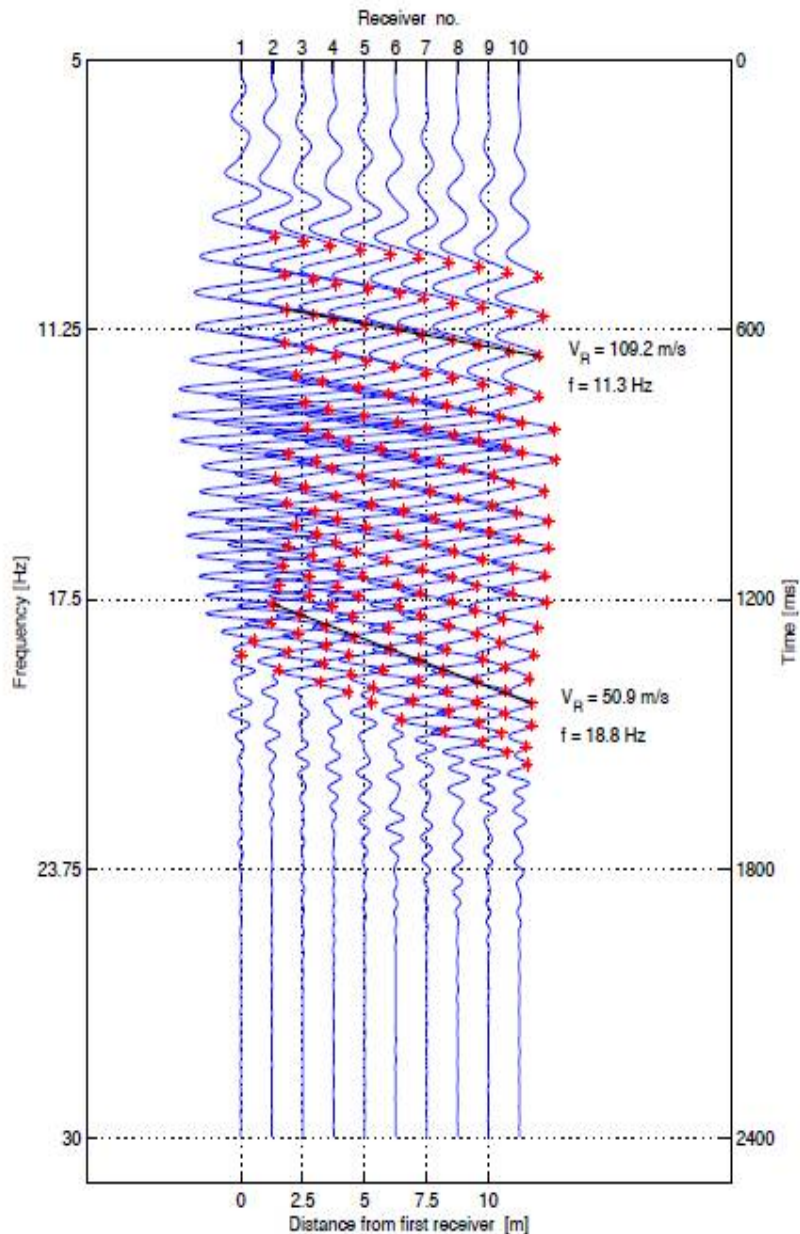
παίρνουμε τα εξής αποτελέσματα :



Εικόνα 17 : Αποτελέσματα (μέγιστε τιμές κορυφών κυματομορφών – κόκκινα σημεία) για σάρωση συχνότητας με 10 γεώφωνα

Στη συνέχεια των υπολογισμών χρησιμοποιείται η γραμμική παλινδρόμηση (προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων) για τον προσδιορισμό της κλίσης για την καλύτερη γραμμική προσαρμογής μέσω του κάθε γραμμικού συμβάντος (Bradie, 2006).

Η κλίση του γραμμικού συμβάντος καθορίζεται χρησιμοποιώντας τις τιμές χρόνου που αντιστοιχούν στα τοπικά μέγιστα του συμβάντος και την επιφανειακή θέση των γεωφώνων που χρησιμοποιούνται για την εγγραφή των δεδομένων (**Εικόνα 18**).



Εικόνα 18 : Προσδιορισμός της κλίσης στις μέγιστε τιμές κορυφών κυματομορφών – κόκκινα σημεία ,για σάρωση συχνότητας με 10 γεώφωνα

Κεφάλαιο 3

3.1 Συστήματα σεισμικών μετρήσεων και εδαφικών διασκοπήσεων

Ένα τυπικό σύστημα απόκτησης σεισμικών δεδομένων – μετρήσεων και εδαφικών διασκοπήσεων αποτελείται από τα παρακάτω τμήματα :

3.1.1 Σεισμικές πηγές

Οι πηγές σεισμικής ενέργειας εμφανίζονται σε ποικιλία μεγεθών και σχημάτων. Πρακτικά, οτιδήποτε προσκρούει ή προκαλεί κίνηση στην επιφάνεια της Γης είναι πηγή σεισμικής ενέργειας. Δυστυχώς όμως, οι περισσότερες από αυτές είναι ανεξέλεγκτες, όπως η κυκλοφορία στους δρόμους, ο αέρας (προκαλεί θόρυβο με την κίνηση των θάμνων και των δέντρων), τα αεροπλάνα, οι άνθρωποι που περπατούν.

Για τα πειράματά μας, θέλουμε να ελέγχουμε την πηγή της εδαφικής κίνησης. Εδώ θα περιορίσουμε τα παραδείγματα μας στις πηγές που χρησιμοποιούνται συνήθως στις έρευνες κοντά στην επιφάνεια.

3.1.1.1 Κρουστικές πηγές παραγωγής δονήσεων

Πηγές που παράγουν σεισμική ενέργεια με κρούση στην επιφάνεια της Γης είναι πιθανόν οι πιο ευρέως διαδεδομένες. Παρόλο που οι πηγές κρούσης μπορεί να είναι αρκετά εξειδικευμένες στην κατασκευή τους, ο περισσότερο χρησιμοποιούμενος τύπος είναι η σεισμική σφύρα (sledge hammer).

Η σεισμική σφύρα είναι ένα απλό σφυρί βάρους 3 ή 5 kg (βαριά) και στην περίπτωση αυτή ο χειριστής δεν κάνει τίποτα περισσότερο από το να το κραδαίνει στο έδαφος. Αντί να χτυπάει απευθείας το έδαφος, είναι πιο σύνηθες, για καλύτερη ζεύξη, να χτυπάει μια μεταλλική πλάκα που βρίσκεται ακουμπισμένη (με καλή επαφή) στο έδαφος.

Η σφύρα συνήθως συνδέεται με το σύστημα καταγραφής με καλώδιο. Τη στιγμή που η σφύρα χτυπάει την πλάκα το σύστημα καταγραφής αρχίζει να καταγράφει την εδαφική κίνηση στη θέση των γεωφώνων.

Μία ισχυρότερη σε απόδοση πηγή κρούσης είναι το πέπτον βάρος (dropping weight) το οποίο αποτελείται από ένα μεταλλικό δίσκο διαμέτρου 60 εκ. περίπου και βάρους 120 έως 150 kg ο οποίος πέπτει ελεύθερα από ύψος 2μ. περίπου και κρούει το έδαφος.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των σεισμικών πηγών κρούσης είναι κυρίως:

- Το χαμηλό κόστος.
- Η απλότητα στη χρήση και τη συντήρηση.

Τα βασικά τους μειονεκτήματα είναι:

- Δυσκολία στο να εξασφαλισθεί ότι η πηγή θα λειτουργεί με επαναληπτικό τρόπο.
- Κουραστικός χειρισμός.
- Απόδοση μικρών ποσών σεισμικής ενέργειας με συνέπεια την δυσκολία στην καταγραφή αξιόπιστων παρατηρήσεων σε μεγάλες αποστάσεις κρουστικής πηγής - γεωφώνου.
- Απόδοση ενέργειας χαμηλής συχνότητας στη φύση (δηλαδή η πηγή δημιουργεί πολλά επιφανειακά κύματα).

3.1.2 Γεώφωνα

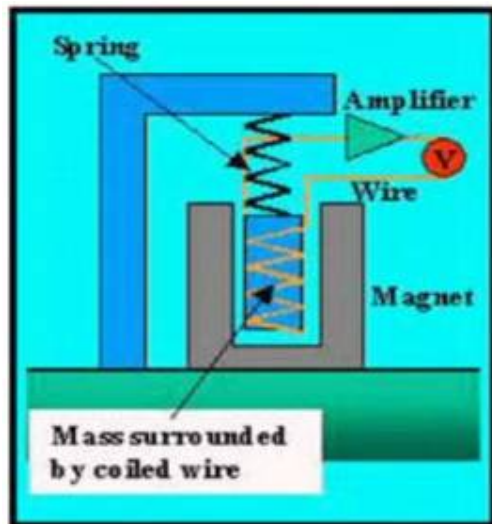
Τα γεώφωνα που χρησιμοποιούνται αποκλειστικά σχεδόν σήμερα βασίζονται στην ίδια αρχή με τα ηλεκτρομαγνητικά σεισμόμετρα κινούμενου πεδίου.

Ένα γεώφωνο (**Εικόνα 19**) αποτελείται από ένα μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος συνδέεται στερεά με το υπόβαθρο και από πηνίο, ο οπλισμός του οποίου συνδέεται με το υπόβαθρο με ελατήριο για να μπορεί να ταλαντώνεται ελεύθερα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Όταν τα ελαστικά κύματα φθάνουν στη θέση του γεωφώνου, το έδαφος ταλαντώνεται κατακόρυφα με συνέπεια ο μαγνήτης να πραγματοποιεί την ίδια ακριβώς ταλάντωση, λόγω της στερεάς σύνδεσής του με αυτό, ενώ η ταλάντωση του πηνίου είναι διαφορετική επειδή παρεμβάλλονται τα ελατήρια.

Αποτέλεσμα αυτού είναι η σχετική κίνηση μεταξύ πηνίου και μαγνήτη, η μεταβολή της μαγνητικής ροής που περνάει από το πηνίο και η δημιουργία τάσης στα άκρα του κατά την κατακόρυφη ταλάντωση του εδάφους (τάση εξόδου του γεωφώνου) [Βασίλης Κ. Παπαζάχος, 1996].

Η τάση εξόδου του γεωφώνου εξαρτάται όχι μόνο από ορισμένα χαρακτηριστικά μεγέθη του γεωφώνου (ένταση του μαγνητικού πεδίου που δημιουργεί ο μαγνήτης, αριθμός σπειρών και διάμετρος του πηνίου) αλλά και από την ταχύτητα του μαγνήτη (δηλαδή του εδάφους) σχετικά με το πηνίο.

Η τάση αυτή για τα σύγχρονα ευαίσθητα γεώφωνα είναι της τάξης των 0,5-0,7 Volt για ταχύτητα του εδάφους ίση με 1 cm/sec.



Εικόνα 19 : Αρχή Λειτουργίας Γεωφώνου

Στην εικόνα που ακολουθεί (**Εικόνα 20**) μπορούμε να δούμε ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα γεωφώνου από αυτά που συνήθως χρησιμοποιούνται στις εργασίες σεισμικής διάθλασης και ανάκλασης.

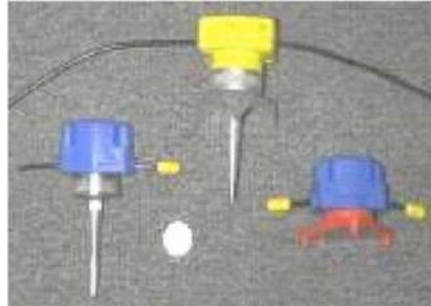


Εικόνα 20 : Γεώφωνο 4.5Hz

Το μαύρο καλώδιο που βγαίνει από την δεξιά πλευρά της κόκκινης θήκης (**Εικόνα 20**) μεταδίδει της μεταβολές της τάσης στο σύστημα καταγραφής. Το μακρύ μεταλλικό καρφί κάτω από τη κόκκινη θήκη χρησιμοποιείται για να στερεώσουμε σταθερά το γεώφωνο στο έδαφος.

Το καρφί αυτό πιέζεται στο έδαφος πατώντας το από πάνω μέχρι που το γεώφωνο να θαφτεί τελείως. Διαφορετικοί τύποι θηκών γεωφώνων διατίθενται για χρήση ανάλογα με το περιβάλλον. Ορισμένα δείγματα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα(**Εικόνα 21**).

Το γεώφωνο στο δεξί άκρο της εικόνας έχει σχεδιαστεί για χρήση σε σκληρές επιφάνειες στις οποίες δεν μπορεί να βυθιστεί το καρφί του γεωφώνου.



Εικόνα 21 : Διάφοροι τύποι γεωφώνων

3.1.3 Συστήματα καταγραφής

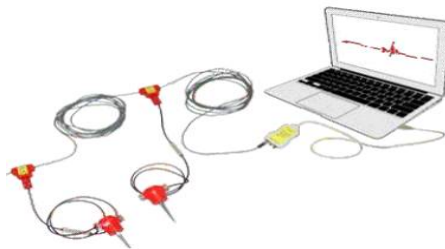
Συστήματα καταγραφής διατίθενται ευρέως από διάφορους κατασκευαστές. Τα γεώφωνα συνδέονται με το σύστημα καταγραφής με ειδικό πολύκλωνο καλώδιο (σεισμικό καλώδιο).

Κάθε σεισμικό καλώδιο μπορεί να μεταφέρει τα σήματα που παράγονται από αρκετά (10άδες έως 100άδες) γεώφωνα ταυτόχρονα.

Η εδαφική κίνηση αποθηκεύεται σε ψηφιακή μορφή είτε απευθείας στο σκληρό δίσκο του υπολογιστή που συνδέεται στο σύστημα καταγραφής ή στην στατική μνήμη (συνήθως κάρτα sd-ram) που υπάρχει μέσα στο ίδιο το σύστημα καταγραφής.

Τα περισσότερα συστήματα καταγραφής μπορούν να παρουσιάσουν την καταγραφή της εδαφικής κίνησης σχεδόν αμέσως μετά από τη λήψη των δεδομένων στην οθόνη του ηλεκτρονικού υπολογιστή.

Τα συστήματα καταγραφής (**Εικόνα 22**) που κατά κανόνα χρησιμοποιούνται στις έρευνες μικρού βάθους είναι ικανά να καταγράψουν την εδαφική κίνηση από 24 έως 142 γεώφωνα.



Εικόνα 22 : Εμπορικό σύστημα καταγραφής

3.1.3.1 Το εμπορικό σύστημα καταγραφής Rosina Soil Spy

Το Rosina soil spy είναι ένα πολυκαναλικό ψηφιακό καταγραφικό σύστημα επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων και δεδομένων εδαφικής διασκόπησης.

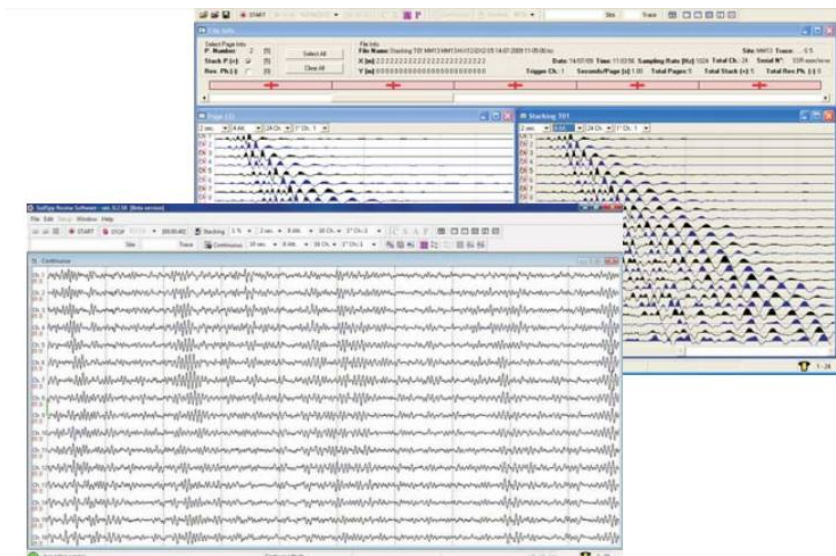
- Ελαφρύ σε βάρος – εύκολο κατά την μεταφορά στο πεδίο των μετρήσεων.
- Ευαίσθητο σε ασθενή σήματα.
- Εύκολο στην χρήση.

Το Rosina Soil Spy αποτελεί μια ολοκληρωμένη λύση υλικολογισμικού για την ενεργητική και παθητική σεισμική διασκόπηση του εδάφους.

Είναι σχεδιασμένο ώστε να μπορεί να διασυνδεθεί με οποιονδήποτε Ηλεκτρονικό υπολογιστή τσέπης η λάπτοπ στο πεδίο των μετρήσεων. Το σύστημα λειτουργεί σε περιβάλλον Microsoft Windows.

Τα δεδομένα του συστήματος Rosina Soil Spy λαμβάνονται μέσω καλωδίου από τα γεώφωνα. Τα σήματα των γεωφώνων εν συνεχεία ενισχύονται και μετατρέπονται σε ψηφιακά. Από εκεί τα ψηφιακά πλέον σήματα διοχετεύονται για επεξεργασία στον Ηλεκτρονικό υπολογιστή (τσέπης η φορητό στο πεδίο των μετρήσεων) και αναλύονται με την χρήση του λογισμικού Grilla (**Εικόνα 23**) το οποίο είναι αναπόσπαστο κομμάτι του συστήματος Rosina Soil Spy.

Η μετατροπή των δεδομένων από αναλογικά σε ψηφιακά έχει σαν αποτέλεσμα την καταστολή του θορύβου (υψηλός λόγος σήματος προς θόρυβο S/N), την αποφυγή του φαινομένου της συνακρόασης μεταξύ των καναλιών των διαφορετικών γεωφώνων, και την παροχή υψηλής ακρίβειας συγχρονισμού μεταξύ τους. Οι παραπάνω δυνατότητες αυξάνουν την αξιοπιστία των μετρήσεων του συστήματος.



Εικόνα 23 : Λογισμικό Rosina Soil Spy σε συνεχόμενη καταγραφή

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

Κεφάλαιο 4

4.1 Επιταχυνσιόμετρα – Τρόπος λειτουργίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μας ο βασικός παράγοντας που διαφοροποιεί το σύστημα μας σε σχέση με εκείνα του εμπορίου είναι οι αισθητήρες επιτάχυνσης (επιταχυνσιόμετρα) που χρησιμοποιεί έναντι των αισθητήρων ταχύτητας (γεώφωνα). Κρίνεται λοιπόν αναγκαία η επεξήγηση των αισθητήρων επιτάχυνσης σε αυτό το κεφάλαιο για την καλύτερη κατανόηση της όλης εργασίας μας.

Οι αισθητήρες επιτάχυνσης χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της επιτάχυνσης ενός σώματος. Σε πολλές εφαρμογές, η μετρούμενη επιτάχυνση χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ταχύτητας και της θέσης ενός σώματος με αντίστοιχη ολοκλήρωση και διπλή ολοκλήρωση, για τη μελέτη δονήσεων (vibrations) μηχανών και για την ανίχνευση κρούσης (shock) και κίνησης, καθώς και για τη μέτρηση της κλίσης ενός σώματος ως προς το οριζόντιο επίπεδο, φυσικά με τη βοήθεια ενός επιταχυνσιόμετρου τριών αξόνων για να ανιχνεύουμε τις αλλαγές στο χώρο. Η λειτουργία των αισθητήρων αυτών βασίζεται στο δεύτερο νόμο του Νεύτωνα:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = F$$

όπου F είναι η συνολική δύναμη που επενεργεί στη μάζα m και x είναι η μετατόπιση ως προς κάποιο σημείο αναφοράς.

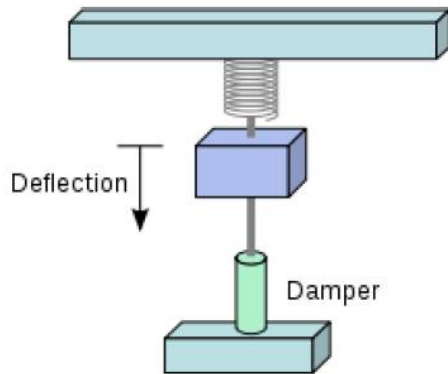
Η βασική μορφή ενός επιταχυνσιόμετρου παρατίθεται στην (Εικόνα 24). Το περίβλημα στηρίζεται πάνω στο αντικείμενο προς μέτρηση. Όταν αυτό το αντικείμενο κινείται οι δυνάμεις που επενεργούν στη μάζα m είναι η αντίδραση του ελατηρίου :

$$F_s = k \cdot x_{mi}$$

και η αντίδραση του αποσβεστήρα :

$$F_d = a \cdot \frac{dx}{dt}$$

όπου x είναι η μετατόπιση του περιβλήματος ως προς το εξωτερικό σύστημα αναφοράς X_{mi} , είναι η μετατόπιση της μάζας m ως προς το περίβλημα, k είναι η σταθερά του ελατηρίου και a είναι η σταθερά απόσβεσης του αποσβεστήρα (damper).



Εικόνα 24 : Ισοδύναμο Επιταχυνσιόμετρου

Το άθροισμα των δυνάμεων προκαλεί επιτάχυνση $\gamma_m = \frac{d^2x}{dt^2}$

της μάζας m , όπου x_{mo} είναι η μετατόπιση της μάζας m ως προς το εξωτερικό σύστημα αναφοράς και ισχύει ότι $x_{mo} = X - x_{mi}$.

Από τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει η διαφορική εξίσωση του συστήματος:

$$a \cdot \frac{dx_{mi}}{dt} + kx_{mi} = m \cdot \frac{d^2x_{mo}}{dt^2} \Rightarrow$$

$$m \cdot \frac{d^2x_{mi}}{dt^2} + a \cdot \frac{dx_{mi}}{dt} + k \cdot x_{mi} = m \cdot \frac{d^2x}{dt^2}$$

Ανάλογα με τον αριθμό των αξόνων ευαισθησίας τους, τα επιταχυνσιόμετρα ταξινομούνται ως ενός, δύο ή τριών αξόνων αντίστοιχα και τα σήματα εξόδου σε κάθε περίπτωση αντιστοιχούν στις συνιστώσες της μετρούμενης επιτάχυνσης στους άξονες ευαισθησίας του επιταχυνσιόμετρου.

Από εκεί και πέρα, τα επιταχυνσιόμετρα χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

1. Επιταχυνσιόμετρου ανοιχτού βρόχου :

Στα επιταχυνσιόμετρα αυτά γίνεται συνδυασμός ενός μηχανικού συστήματος σε συνδυασμό με ένα αισθητήρα μέτρησης μετατόπισης, για τη παραγωγή ηλεκτρικού σήματος εξόδου. Οι κυριότεροι τύποι επιταχυνσιομέτρων ανοιχτού βρόχου, ανάλογα με το τύπο του μετατροπέα θέσης που περιλαμβάνουν, είναι αναφορικά:

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

- Επιταχυνσιόμετρα με ποτενσιόμετρο.
- Επιταχυνσιόμετρα με πιεζοαντιστάσεις.
- Επιταχυνσιόμετρα με αισθητήρα μεταβλητής αντίστασης.
- Χωρητικά επιταχυνσιόμετρα.
- Πιεζοηλεκτρικά επιταχυνσιόμετρα.

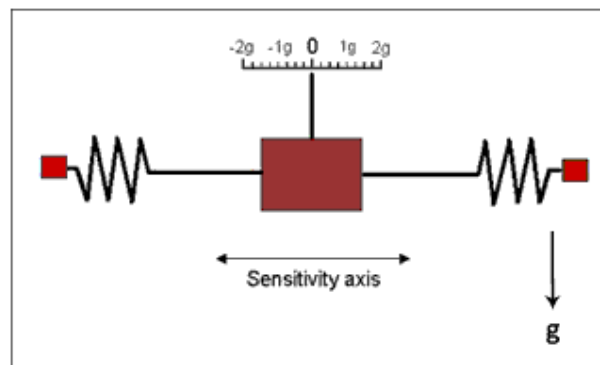
2. Επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου:

Τα επιταχυνσιόμετρα κλειστού βρόχου ή ηλεκτρομηχανικά σερβοεπιταχυνσιόμετρα, έχουν μεγαλύτερη ακρίβεια από τα επιταχυνσιόμετρα ανοικτού βρόχου, αλλά έχουν υψηλό κόστος. Τα συγκεκριμένα επιταχυνσιόμετρα δε διαθέτουν ελατήριο ή άλλο ελαστικό μέσο, αλλά μόνο μία μάζα πάνω στην οποία όταν εμφανιστεί επιτάχυνση γ , ασκείται μια αδρανειακή δύναμη, η οποία τείνει να κινήσει τη μάζα. Η μετακίνηση αυτή μετριέται με έναν μετατροπέα θέσης και μετατρέπεται σε ηλεκτρικό σήμα ανάλογου μεγέθους, το οποίο μετά ενισχύεται και τροφοδοτεί ένα ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου. Η δύναμη που προκύπτει εφαρμόζεται στη μάζα και εξισορροπεί την αδρανειακή δύναμη. Επίσης, το ρεύμα που τροφοδοτεί τον ηλεκτρομηχανικό μετατροπέα εξόδου έχει ένταση ανάλογη της επιτάχυνσης. Το αποτέλεσμα της απουσίας του ελατηρίου είναι η καλύτερη γραμμικότητα του συστήματος.

4.1.1 Μηχανικά Επιταχυνσιόμετρα

Ένα μηχανικό επιταχυνσιόμετρο εντάσσεται στην κατηγορία των επιταχυνσιομέτρων ανοικτού βρόχου και αποτελείται από μία μάζα που συγκρατείται με ελατήρια όπως φαίνεται στην (Εικόνα 25). Η μετατόπιση της μάζας μετράται με έναν αισθητήρα, που δίνει σήμα ανάλογο προς την δύναμη F που ασκείται στην μάζα κατά την διεύθυνση του κατακόρυφου άξονα.

Στη συνέχεια, ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα $F = m \cdot a$ χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της επιτάχυνσης που επενεργεί στην συσκευή.



Εικόνα 25 : Ισοδύναμο Μηχανικού Επιταχυνσιόμετρου

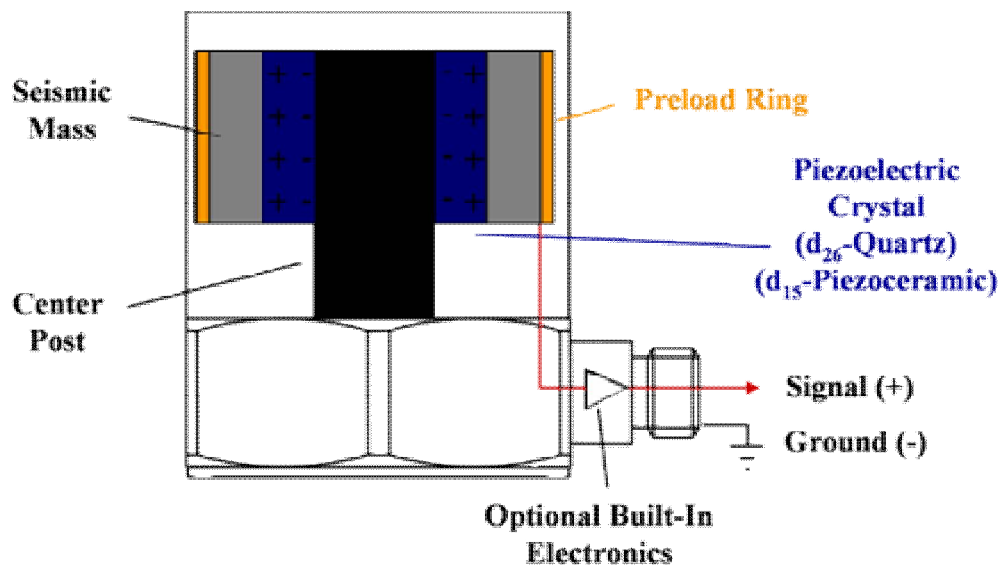
4.1.2 Επιταχυνσιόμετρα στερεάς κατάστασης

Τα επιταχυνσιόμετρα στερεάς κατάστασης εντάσσονται στην κατηγορία επιταχυνσιομέτρων κλειστού βρόγχου και μπορούν να χωριστούν σε πολλές υποκατηγορίες, όπως επιφανειακών κυμάτων, ακουστικών κυμάτων, κραδασμών, πυριτίου και χαλαζία.

Τα επιταχυνσιόμετρα στερεάς κατάστασης είναι μικρά, αξιόπιστα και στερεάς δομής. Ένα παράδειγμα επιταχυνσιόμετρου στερεάς κατάστασης (**Εικόνα 26**) είναι αυτό των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW).

Όταν εφαρμόζεται κάποια επιτάχυνση κατά τον κατακόρυφο άξονα, η πρόβολος λυγίζει. Αυτό προκαλεί την συχνότητα του επιφανειακού ακουστικού κύματος να αλλάζει αναλόγως προς την εφαρμοζόμενη τάση.

Μετρώντας την αλλαγή της συχνότητας είναι δυνατόν να υπολογιστεί η επιτάχυνση που εφαρμόζεται στην συσκευή.



Εικόνα 26 : *Πιεζοηλεκτρικό επιταχυνσιόμετρο*

4.1.3 Μικροηλεκτρονικά Επιταχυνσιόμετρα

Τα μικροηλεκτρονικά επιταχυνσιόμετρα MEM'S , κάνουν χρήση των ίδιων αρχών που ισχύουν και στους μηχανικούς και τους στερεάς κατάστασης αισθητήρες.

Πιο Συγκεκριμένα τα μικροηλεκτρονικά επιταχυνσιόμετρα MEM'S (**Εικόνα 27**), ανήκουν στην κατηγορία των Μικρο-ηλεκτρομηχανικών συστημάτων, ή διεθνώς MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems).

Πρόκειται για μια τεχνολογία που σε πιο γενική μορφή μπορεί να οριστεί ως μικρογραφία μηχανικών και ηλεκτρικών στοιχείων.

Τα MEMS αποτελούνται από συστατικά στη τάξη μεγέθους του μικρομέτρου (μm), καθώς οι συσκευές MEMS γενικά κυμαίνονται σε μέγεθος από 20 μm – 1mm περίπου.

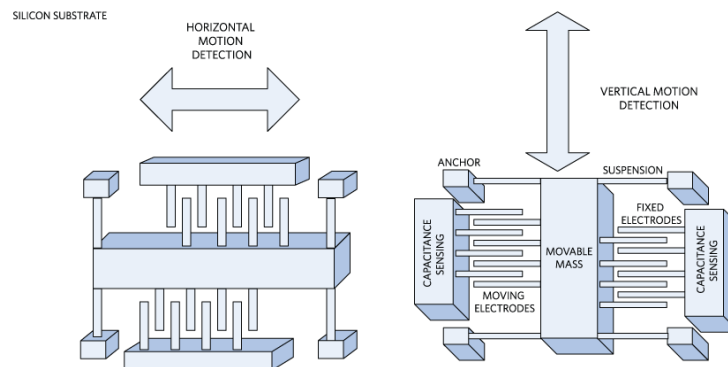
Τα συστήματα MEMS μπορούν να εκτελούν διάφορες λειτουργίες οι οποίες πολλές φορές αποτελούν σμίκρυνση αντίστοιχων κατασκευών με μακροσκοπικές διαστάσεις.

Οι τύποι των MEMS μπορούν να ποικίλουν από σχετικά απλές δομές σε εξαιρετικά πολύπλοκα ηλεκτρομηχανολογικά συστήματα με πολλαπλά στοιχεία που βρίσκονται στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης τεχνολογίας της Μικροηλεκτρονικής.

Το κριτήριο των MEMS είναι ότι χρησιμοποιεί τουλάχιστον ένα η περισσότερα στοιχεία που έχουν κάποια μηχανική ιδιότητα. Συνήθως (όχι πάντα) αποτελούνται από μια κεντρική μονάδα που επεξεργάζεται τα δεδομένα (ο μικροεπεξεργαστής) και διάφορες συνδεσμολογίες που αλληλεπιδρούν με το εξωτερικό περιβάλλον.

Οι πραγματικές δυνατότητες των MEMS γίνονται αισθητές όταν οι δομές αυτές συγχωνεύονται σε ένα κοινό υπόστρωμα πυριτίου, μαζί με άλλα ολοκληρωμένα κυκλώματα (Integrated Circuits) με τεχνολογίες CMOS ή BiCMOS.

Η πρώτη εμφάνιση των MEMS εμφανίστηκαν ως τμήματα ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, αλλά πλέον έχουν διάφορες χρήσεις σε πολλούς τομείς όπως στους αισθητήρες, στους μηχανισμούς μεταφοράς (micro-actuators), στους μηχανισμούς μεταφοράς, στη μεταφορά σημάτων, στις μικρομηχανές κ.ά.



Εικόνα 27 : Εσωτερικό επιταχυνσιόμετρου Mem's

Κεφάλαιο 5 - System V.E.T.A

5.1 Τα τμήματα του συστήματός μας

Η Παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην κατασκευή ενός συστήματος χαμηλού κόστους το οποίο θα είναι σε θέση να αναγνωρίζει τα κύματα Rayleigh με την ακρίβεια που παρέχουν σε αυτόν τον τομέα άλλα εμπορικά συστήματα σεισμικής και εδαφικής διασκόπησης όπως για παράδειγμα το *Soil spy Rossina* στο οποίο έχουμε αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο.

Η χρήση χαμηλού κόστους τριαξονικών αισθητήρων επιτάχυνσης και όχι μόνο-αξονικών γεωφώνων σε συνδυασμό με την χρήση χαμηλού κόστους υλικολογισμικού Ανοικτού κώδικα (open Software – open Hardware) προσδίδουν στην Διπλωματική Εργασία μας Καινοτομία και δυνατότητα παραγωγής σε χαμηλό κόστος αλλά και ευελιξία περαιτέρω μελλοντικής ανάπτυξης του συστήματος.

Το όλο σύστημα (**System V.E.T.A**) είναι φορητό , ελαφρύ και ενεργειακά αυτόνομο.

Παρέχει ευκολία στην μεταφορά - τοποθέτηση και λειτουργία του στο πεδίο των μετρήσεων δίχως να χρειάζονται ειδικές γνώσεις. Επίσης παρέχει στον χρήστη ασύρματο απομακρυσμένο έλεγχο του συστήματος αλλά και μέσω wi-fi αλλά και μέσω καλωδίου Ethernet.

Τέλος παρέχει συγχρονισμό δεδομένων με High Precision Real Time Clock και συχνότητα δειγματοληψίας δεδομένων $\geq 800\text{Hz}$.

Το σύστημα καταγραφής είναι φιλικό προς τον χρήστη και λειτουργεί σε windows based environment (Linux Jessie) το οποίο λειτουργεί και ως απομακρυσμένο τερματικό με χρήση του προγράμματος (Open Vnc).

Το σύστημα μας (**Εικόνα 28**) αποτελείται από τα παρακάτω υποσυστήματα :

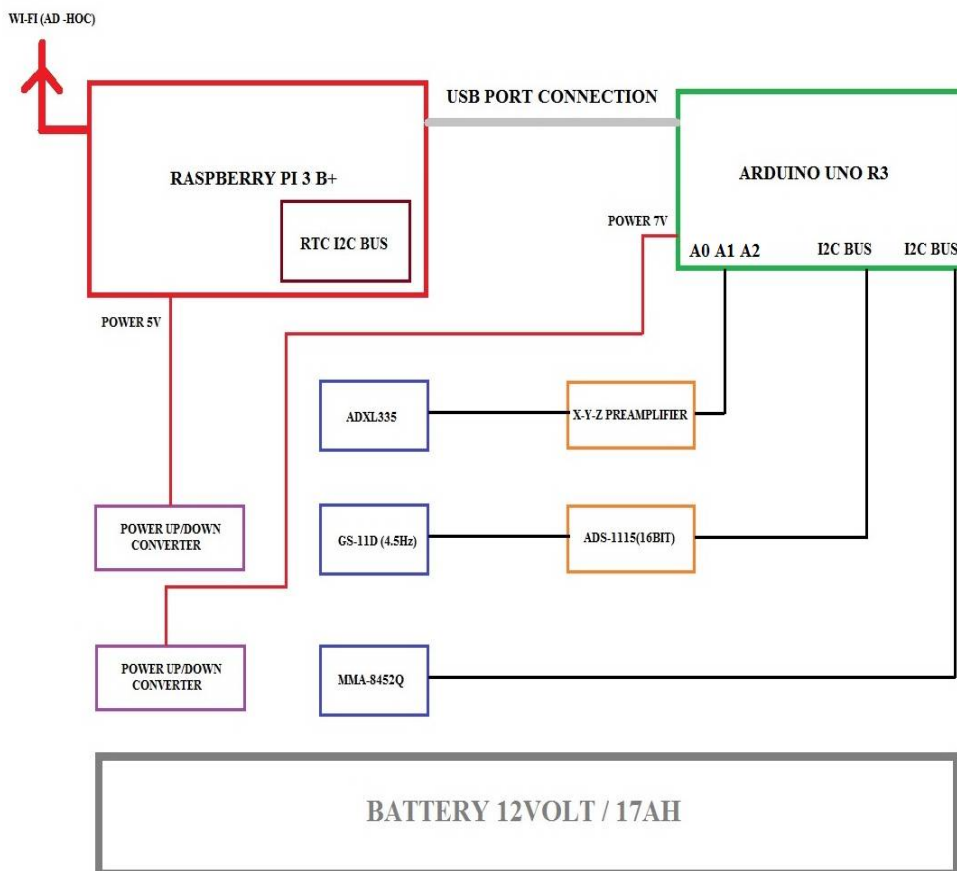
- **Πλακέτα μικροϋπολογιστή Ανοικτού κώδικα Raspberry Pi**
- **Πλακέτα μικροϋπολογιστή Ανοικτού κώδικα Arduino Uno**
- **Αναλογικό Τριαξονικό Επιταχυνσιόμετρο χαμηλού κόστους ADXL335**
- **Ενισχυτή σήματος βασισμένος σε τελεστικούς ενισχυτές τεχνολογίας Rail2Rail με την χρήση του ολοκληρωμένου κυκλώματος MCP6004**
- **Μόνο-αξονικό γεώφωνο GS-11D (4,5Hz)**
- **Πλακέτα ενισχυτή – Μετατροπέα Αναλογικού/Ψηφιακού σήματος 16 Bit ADS1115**

- Ψηφιακό Τριαξονικό Επιταχυνσιόμετρο χαμηλού κόστους MMA8452Q
- Πλακέτα ρολογιού πραγματικού χρόνου (High Precision Real Time Clock) DS3234
- Πλακέτες μετατροπής τάσεως από 12V σε 5V , καθώς και σε 7V
- Μπαταρία μολύβδου 12V/17Ah

Όλα τα παραπάνω πλην της μπαταρίας , του αισθητήρα γεωφώνου και των αισθητήρων επιτάχυνσης τοποθετούνται σε κουτί προδιαγραφών IP66 για την στεγανότητα και προστασία των κυκλωμάτων του συστήματος μας από υγρασία.

Οι αισθητήρες επιτάχυνσης τοποθετούνται σε ξεχωριστά στεγανά κουτιά όπως θα περιγράψουμε στην συνέχεια.

Επίσης η μπαταρία που τροφοδοτεί με ενέργεια το όλο σύστημα μας τοποθετείται και αυτή σε ξεχωριστό κουτί προδιαγραφών IP66.



Εικόνα 28 : Μπλοκ Διάγραμμα Συστήματος Καταγραφής κυμάτων Rayleigh

5.2 Η Πλακέτα μικροϋπολογιστή Ανοικτού κώδικα Raspberry Pi

Το σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των δεδομένων αποτελείται από έναν υπολογιστή πλακέτας *Raspberry Pi* (Εικόνα 29). Ουσιαστικά είναι ένας ολοκληρωμένος υπολογιστής με χαμηλές απαιτήσεις ρεύματος, ενώ το λειτουργικό του σύστημα είναι αποθηκευμένο σε μία κάρτα μνήμης τύπου SD.

Είναι χαμηλού κόστους, με μέτρια (για την εποχή μας) υπολογιστική ισχύ, ενώ παράλληλα προσφέρει την δυνατότητα διαχείρισης των ακροδεκτών γενικού σκοπού εισόδου-εξόδου (General Purpose Input Output, GPIO) που διαθέτει.

Βασικά χαρακτηριστικά αποτελούν ο επεξεργαστής τύπου ARM και η μνήμη RAM που διαθέτει, ενώ προσφέρει πλήθος διεπαφών εισόδου-εξόδου.

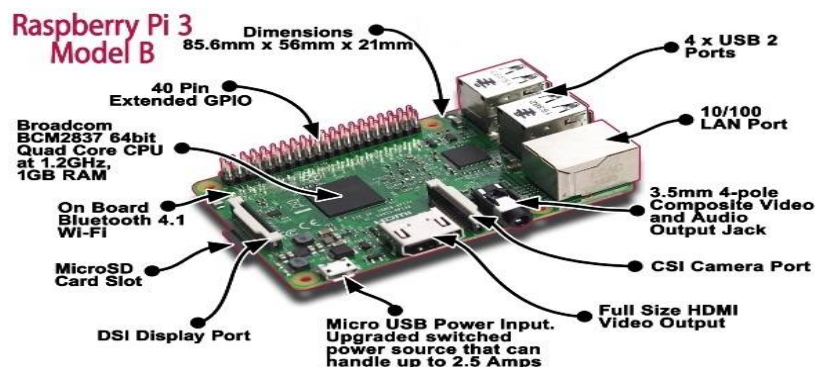
Επιπλέον όλα τα μοντέλα διαθέτουν μια επιπλέον θύρα micro USB που είναι υπεύθυνη για τη τροφοδοσία της πλακέτας.

Στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής χρησιμοποιήθηκε το Raspberry Pi 3 Model B με λειτουργικό σύστημα Raspbian Jessie Lite.

Το Raspbian είναι το επίσημο λειτουργικό σύστημα που υποστηρίζεται από την εταιρία Raspberry Pi για της πλακέτες της και είναι βασισμένο στην Debian διανομή λειτουργικού Linux.

Παρόλο που η υλοποίηση έγινε σε Raspberry Pi 3 Model B το όλο σύστημα δοκιμάστηκε και είναι πλήρως λειτουργικό και στην πλακέτα Raspberry Pi Model B που έχει αρκετά μικρότερη επεξεργαστική ισχύ, χρησιμοποιώντας το ίδιο λειτουργικό σύστημα.

Τέλος προτιμήθηκε η συγκεκριμένη πλακέτα από κάποια άλλη, όπως η BeagleBone, λόγω της πολύ καλής υποστήριξης της πρώτης σε σύγκριση με την δεύτερη. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στο Raspberry Pi είναι υλοποιημένο σε Python.



Εικόνα 29 : Η πλακέτα Raspberry Pi 3 Model B

Παρά τον ελάχιστον όγκο του, το Raspberry Pi στη μεγαλύτερή του έκδοση διαθέτει τετραπύρρηνο επεξεργαστή 1200MHz, διπύρρηνη κάρτα γραφικών, 1GB RAM, τέσσερις θύρες USB, έξοδο HDMI, τροφοδοτείται μέσω Micro USB, και 40 pins γενικής χρήσης για σύνδεση με άλλα ηλεκτρονικά και περιφερειακά κυκλώματα.

5.2.1 Χαρακτηριστικά Πλακέτας μικροϋπολογιστή Raspberry Pi

Το Raspberry Pi 3 B διαθέτει :

- 1GB μνήμη RAM (δε δέχεται επέκταση)
- Θύρα Full HDMI για εικόνα υψηλής ανάλυσης (χρησιμοποιεί ρεύμα 50mA)
- 4 θύρες USB για την επικοινωνία του RPi 3 με περιφερειακές συσκευές, όπως
 - πχ. ποντίκι, πληκτρολόγιο (καταναλώνουν ρεύμα από 100-1000mA)
- Υποδοχή micro-USB, από την οποία τροφοδοτείται με 5V
- 40 ακίδες (pins) GPIO γενικής χρήσης για σύνδεση με άλλα ηλεκτρονικά και περιφερειακά (καταναλώνουν μέχρι 50mA)
- Θύρα Ethernet για ενσύρματη τοπική δικτύωση
- Βύσμα με υποδοχή 3.5mm με υποστήριξη ήχου και βίντεο (Composite Video)
- Σύνδεση με κάμερα (Camera interface - CSI) (η κάμερα απαιτεί ρεύμα 250mA)
- Σύνδεση με οθόνη (Display interface - DSI)
- Επιπλέον, το νέο RPi περιλαμβάνει:
- Μία 64-bit τετραπύρρηνη ARMv8 CPU στα 1.2GHz
- Διπύρρηνη κάρτα γραφικών Broadcom VideoCore IV 3D στα 250MHz
- 802.11n Wireless LAN και Bluetooth 4.1 για ασύρματη σύνδεση
- Μέγιστη ταχύτητα μεταφοράς USB: 60 MB/s
- Bluetooth Low Energy (BLE) για αισθητή μείωσης κατανάλωσης ενέργειας κατά τη διάρκεια της επικοινωνίας

Η μέγιστη ένταση ρεύματος κατανάλωσης του RPi 3 είναι 1200mA (1.2A) τα οποία αρκούν για την ομαλή λειτουργία μεγάλης γκάμας εφαρμογών. Από τα παραπάνω 1200mA τα 400mA καταναλώνονται από το ίδιο το RPi για τη λειτουργία του ενώ τα υπόλοιπα 800mA

καταναλώνονται από περιφερειακά που συνδέονται πάνω σε αυτό (Αισθητήρες – Πληκτρολόγιο – Ποντίκι – usb περιφερειακά – HDMI οθόνη).

5.2.2 Ακροδέκτες GPIO μικροϋπολογιστή Raspberry Pi

Στο πάνω αριστερό μέρος του RPi 3 υπάρχει μια κεφαλή (header) όπου βρίσκονται οι ακίδες GPIO, οι οποίες είναι ψηφιακές είσοδοι και έξοδοι που (συνήθως) προγραμματίζονται για επικοινωνία με περιφερειακές συσκευές.

Raspberry Pi 3 GPIO Header					
Pin#	NAME		NAME	Pin#	
01	3.3v DC Power		DC Power 5v	02	
03	GPIO02 (SDA1 , I ² C)		DC Power 5v	04	
05	GPIO03 (SCL1 , I ² C)		Ground	06	
07	GPIO04 (GPIO_GCLK)		(TXD0) GPIO14	08	
09	Ground		(RXD0) GPIO15	10	
11	GPIO17 (GPIO_GEN0)		(GPIO_GEN1) GPIO18	12	
13	GPIO27 (GPIO_GEN2)		Ground	14	
15	GPIO22 (GPIO_GEN3)		(GPIO_GEN4) GPIO23	16	
17	3.3v DC Power		(GPIO_GEN5) GPIO24	18	
19	GPIO10 (SPI_MOSI)		Ground	20	
21	GPIO09 (SPI_MISO)		(GPIO_GEN6) GPIO25	22	
23	GPIO11 (SPI_CLK)		(SPI_CE0_N) GPIO08	24	
25	Ground		(SPI_CE1_N) GPIO07	26	
27	ID_SD (I ² C ID EEPROM)		(I ² C ID EEPROM) ID_SC	28	
29	GPIO05		Ground	30	
31	GPIO06		GPIO12	32	
33	GPIO13		Ground	34	
35	GPIO19		GPIO16	36	
37	GPIO26		GPIO20	38	
39	Ground		GPIO21	40	

Λειτουργίες των GPIO

Εικόνα 30 : Η πλακέτα Raspberry Pi 3 Model B – Λειτουργίες GPIO Pins

Το RPi 3 διαθέτει 40 τέτοια pins (**Εικόνα 30**) που κατανέμονται σε 2 σειρές των 20 και για να χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι ή έξοδοι χρειάζεται να τα ορίσουμε μέσω του κώδικα που γράφουμε (ανάλογα την κάθε εφαρμογή μας) σε γλώσσα προγραμματισμού Python.

Τα 2 pins (1 και 17) είναι για τροφοδοσία 3.3V (μέχρι 50mA).

Τα 2 pins (2 και 4) είναι για τροφοδοσία 5V (παίρνουν τροφοδοσία από το microUSB).

Τα 8 pins (6, 9, 14, 20, 25, 30, 34 και 39) είναι για γείωση.

28 pins (τα υπόλοιπα) είναι για χρήση GPIO σαν είσοδοι ή έξοδοι (Χρήση I2C ,SPI , CLK κ.α).

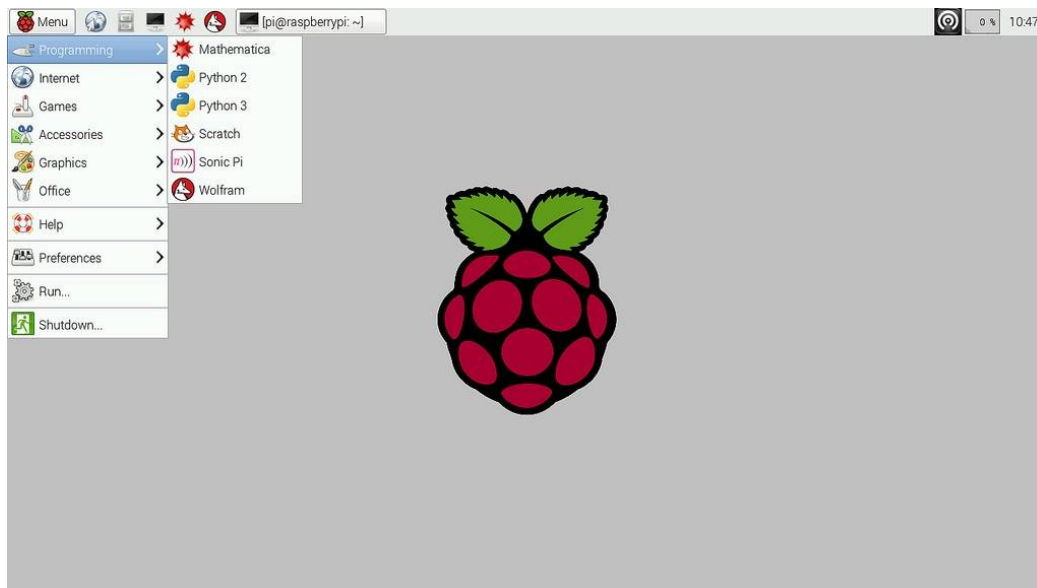
Προσοχή θα πρέπει να δοθεί κατά την σύνδεση σημάτων στους ακροδέκτες διεπαφής (GPIO) του Raspberry Pi διότι 'όλα οι ακροδέκτες (pins) δέχονται τροφοδοσία μέχρι 3.3V . Χρήση τάσης πέραν την προαναφερόμενης μπορούν να καταστρέψουν την πλακέτα.

Τέλος η τροφοδοσία παροχής ενέργειας γίνεται με εξωτερικό τροφοδοτικό 12Volt 2Amps.

Στο δικό μας σύστημα θα κάνουμε την απαραίτητες προσαρμογές για να τροφοδοτηθεί και να λειτουργεί αυτόνομα με χρήση μπαταριών.

5.2.3 Λειτουργικό μικροϋπολογιστή Ανοικτού κώδικα Raspberry Pi

Το Raspberry Pi υποστηρίζει λειτουργικό Linux (**Εικόνα 31**) και υποστηρίζει τις παρακάτω διανομές ανοικτού κώδικα.



Εικόνα 31: Λειτουργικό Raspbian Jessie για το Raspberry Pi

- Raspbian
- OpenELEC
- OSMC
- Ubuntu Mate
- Snappy Ubuntu Core
- Windows 10 IoT
- PiNet
- RISC OS
- Weather Station

Στην δική μας εφαρμογή χρησιμοποιούμε το λειτουργικό Raspbian Jessie κάνοντας χρήση της τελευταίας διανομής του (Ιούνιος 2018).

5.2.4 Η χρησιμότητα του μικροϋπολογιστή Raspberry Pi

Στην δική μας διπλωματική εργασία το Raspberry Pi χρησιμοποιείται για την καταγραφή και αποθήκευση σε πραγματικό χρόνο των δεδομένων που μεταφέρονται αυτό από το Arduino Uno R3 σε αυτό.

Η μεταφορά γίνεται με την χρήση της USB σειριακής θύρας επικοινωνιών που διαθέτουν και τα δύο (Raspberry Pi – Arduino Uno) μικροϋπολογιστικά συστήματα.

5.3 Η γλώσσα προγραμματισμού Python

Η Python είναι μια ανοικτού κώδικα υψηλού επιπέδου, γενικού σκοπού γλώσσα προγραμματισμού. Επιπλέον χαρακτηρίζεται ως αντικειμενοστραφής με δυνατότητα χρήσης διερμηνέα. Στην συγκεκριμένη υλοποίηση χρησιμοποιήθηκε η ιδιότητα αυτή, με σκοπό την εκμετάλλευση της ευελιξίας που προσφέρει. Ουσιαστικά το λογισμικό που δημιουργήθηκε με την Python χρησιμοποιεί τον διερμηνέα της συγκεκριμένης γλώσσας για να εκτελεστεί στο λειτουργικό που το φιλοξενεί. Αποτέλεσμα αυτού είναι η εύκολη προσθήκη επιπλέον λειτουργιών, η γρήγορη αποσφαλμάτωση και η άμεση διευκόλυνση στην κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος από τρίτους.



Η Python περιέχει μεγάλη ποικιλία βιβλιοθηκών και παρέχει υψηλή υποστήριξη της πλακέτας Raspberry Pi. Χρησιμοποιήθηκε η Python v3.3.3 για την υλοποίηση του λογισμικού που εκτελείται στην πλακέτα, ενώ παράλληλα συμπεριλήφθηκαν βιβλιοθήκες για την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της πλακέτας όπως η χρήση GPIO.

5.3.1 Παράδειγμα εφαρμογής (script) σε Python

Ένα πρόγραμμα (script) σε γλώσσα προγραμματισμού Python μπορεί να έχει την ακόλουθη δομή (Εικόνα 32) :

```
1  #!/usr/bin/env python
2
3  from datetime import datetime
4  import serial, io
5
6  outfile = '/home/pi/data.csv'
7
8
9  ser = serial.Serial(
10     port='/dev/ttyACM0',
11     baudrate=230400,
12
13 )
14
15
16 sio = io.TextIOWrapper(
17     io.BufferedRWPair(ser, ser, 1),
18     encoding='ascii', newline='\n'
19 )
20
21
22 with open(outfile, 'a') as f:
23     while ser.isOpen():
24         datastring = sio.readline()
25         f.write(datetime.now().isoformat() + ',' + datastring)
26         f.flush()
27
28 ser.close()
```

Εικόνα 32: Πρόγραμμα (script) σε γλώσσα προγραμματισμού Python

5.4 Ο μικροϋπολογιστής ανοικτού κώδικα Arduino

Όπως το περιγράφει ο δημιουργός του, το Arduino είναι μια «ανοικτού κώδικα» πλατφόρμα «πρωτοτυποποίησης» ηλεκτρονικών βασισμένη σε ευέλικτο και εύκολο στη χρήση hardware και software που προορίζεται για οποιονδήποτε έχει λίγη προγραμματιστική εμπειρία, στοιχειώδεις γνώσεις ηλεκτρονικών και ενδιαφέρεται να δημιουργήσει διαδραστικά αντικείμενα ή περιβάλλοντα.

Στην ουσία, πρόκειται για ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που βασίζεται στον μικροελεγκτή ATmega της Atmel και του οποίου όλα τα σχέδια, καθώς και το software που χρειάζεται για την λειτουργία του διανέμονται ελεύθερα και δωρεάν, ώστε να μπορεί να κατασκευαστεί από τον καθένα.

Αφού κατασκευαστεί μπορεί να συμπεριφερθεί σαν ένας μικροσκοπικός υπολογιστής αφού ο χρήστης μπορεί να συνδέσει επάνω του πολλαπλές μονάδες εισόδου-εξόδου και να προγραμματίσει τον μικροελεγκτή να δέχεται δεδομένα από τις μονάδες εισόδου, να τα επεξεργάζεται, και να στέλνει κατάλληλες εντολές στις μονάδες εξόδου.

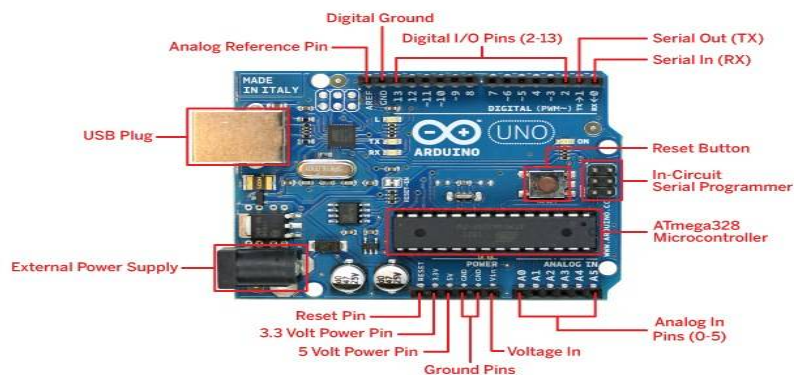
5.4.1 Ο μικροϋπολογιστής Arduino Uno R3

Το Arduino Uno R3 (**Εικόνα 33**) βασίζεται στον ATmega328, έναν 8-bit RISC μικροελεγκτή, τον οποίο χρονίζει στα 16MHz. Ο ATmega328 διαθέτει ενσωματωμένη μνήμη τριών τύπων:

- 2Kb μνήμης SRAM που είναι η ωφέλιμη μνήμη που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τα προγράμματά μας για να αποθηκεύουν μεταβλητές, πίνακες κ.λπ.
- 1Kb μνήμης EEPROM η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εγγραφή/ανάγνωση δεδομένων από τα προγράμματά μας κατά το runtime. Σε αντίθεση με την SRAM, η EEPROM δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή reset οπότε είναι το ανάλογο του σκληρού δίσκου.
- 32Kb μνήμης Flash, από τα οποία τα 2Kb χρησιμοποιούνται από το firmware του Arduino που έχει εγκαταστήσει ήδη ο κατασκευαστής του.

Το firmware αυτό που στην ορολογία του Arduino ονομάζεται bootloader είναι αναγκαίο για την εγκατάσταση των δικών μας προγραμμάτων στον μικροελεγκτή μέσω της θύρας USB, χωρίς δηλαδή να χρειάζεται εξωτερικός hardware programmer. Τα υπόλοιπα 30Kb της μνήμης Flash χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση αυτών ακριβώς των προγραμμάτων, αφού πρώτα μεταγλωττιστούν στον υπολογιστή μας.

Η μνήμη Flash, όπως και η EEPROM δεν χάνει τα περιεχόμενά της με απώλεια τροφοδοσίας ή reset.

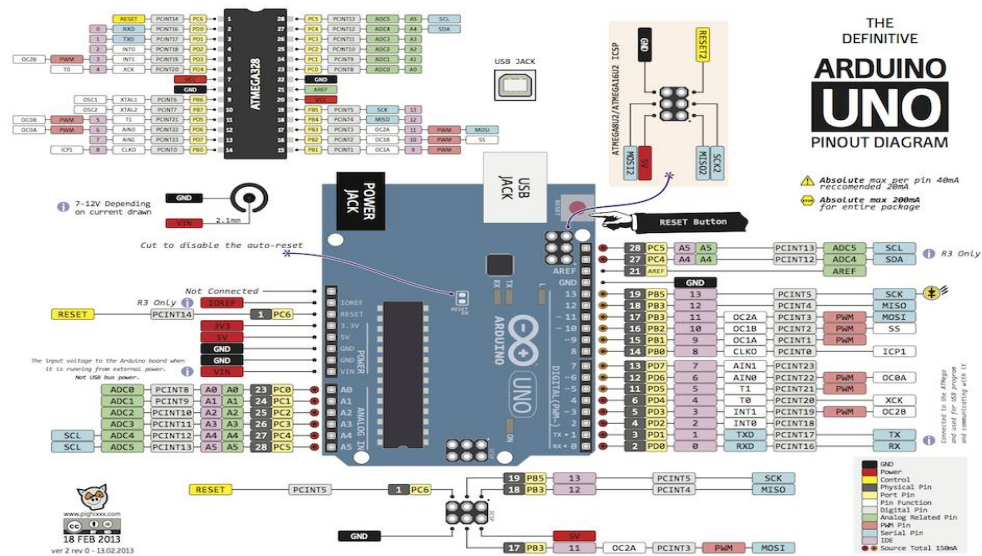


Εικόνα 33: Η πλακέτα μικροϋπολογιστή Arduino Uno R3

5.4.2 Οι ακροδέκτες του μικροϋπολογιστή Arduino Uno R3

Καταρχήν το Arduino διαθέτει σειριακό interface. Ο μικροελεγκτής ATmega υποστηρίζει σειριακή επικοινωνία, την οποία το Arduino προωθεί μέσα από έναν ελεγκτή Serial-over-USB ώστε να συνδέεται με τον υπολογιστή μέσω USB.

Η σύνδεση αυτή χρησιμοποιείται για την μεταφορά των προγραμμάτων που σχεδιάζονται από τον υπολογιστή στο Arduino αλλά και για αμφίδρομη επικοινωνία του Arduino με τον υπολογιστή μέσα από το πρόγραμμα την ώρα που εκτελείται.



Εικόνα 34: Αναλυτικά οι ακροδέκτες της πλακέτας Arduino Uno R3

Επιπλέον, στην πάνω πλευρά του Arduino βρίσκονται 14 θηλυκά pin, αριθμημένα από 0 ως 13, που μπορούν να λειτουργήσουν ως ψηφιακές είσοδοι και έξοδοι. Λειτουργούν στα 5V και καθένα μπορεί να παρέχει ή να δεχτεί το πολύ 40mA.

- Τα pin 0 και 1 λειτουργούν ως RX και TX της σειριακής
- Τα pin 2 και 3 λειτουργούν και ως εξωτερικά interrupt (interrupt 0 και αντίστοιχα)
- Τα pin 3, 5, 6, 9, 10 και 11 μπορούν να λειτουργήσουν και ως ψευδοαναλογικές έξοδοι με το σύστημα PWM (Pulse Width Modulation)

5.4.3 Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροϋπολογιστή Arduino Uno R3

- Μικροελεγκτής ATMEGA328
- Τάση λειτουργίας 5V
- Τάση εισόδου (συνίσταται) 7-12V
- Όρια τάσης εισόδου 6-20V
- Ψηφιακοί ακροδέκτες I/O 14(6 εκ των οποίων PWM έξοδο)
- Αναλογικοί ακροδέκτες εισόδου 6
- Ισχύς συνεχόμενου ρεύματος ανά ακροδέκτη 40mA
- Ισχύς συνεχόμενου ρεύματος για ακροδέκτη τάσης 3.3V 50mA
- Μνήμη flash 32KB(ATMEGA328)
- Μνήμη SRAM 2KB(ATMEGA328)
- Μνήμη EEPROM 1KB(ATMEGA328)
- Ταχύτητα ρολογιού 16MHz.

Ποίο συγκεκριμένα οι ακροδέκτες (pin) ισχύος στην πλακέτα Arduino Uno R3 είναι τα εξής:

- Vin. Είσοδος τάσης όταν η πλακέτα λειτουργεί με εξωτερική πηγή τάσης. Είναι δυνατή η τροφοδοσία της πλακέτας από αυτό το Pin, ή, αν τροφοδοτείται από το jack τροφοδοσίας, η πρόσβαση σε αυτή την τάση.
- 5V. Αυτό το pin παρέχει μια ρυθμισμένη τάση των 5V από τον ρυθμιστή τάσης της πλακέτας. Η πλακέτα μπορεί να τροφοδοτείται με τάση είτε από το DC power jack (7 - 12V), το USB connector (5V) ή το VIN pin της πλακέτας (7-12V).
- 3V3. Μία παροχή 3.3 volt που παραγόμενη από τον ρυθμιστή τάσης της πλακέτας. Μέγιστη ένταση 50 mA.
- GND. Pins γείωσης.
- IOREF. Αυτό το pin παρέχει την τάση αναφοράς με την οποία λειτουργεί ο μικροεπεξεργαστής.

5.4.4 Η χρησιμότητα του μικροϋπολογιστή Arduino Uno R3 στο σύστημά μας

Στην δική μας διπλωματική εργασία το Arduino Uno R3 χρησιμοποιείται για την συλλογή των δεδομένων από τον αισθητήρα ή τους αισθητήρες που βρίσκονται συναρμολογημένοι πάνω σε αυτό.

Τα δεδομένα μεταφέρονται στο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης (Raspberry Pi) μέσω της σειριακής θύρας USB που διαθέτει η πλακέτα του Arduino Uno R3.

5.5 Η γλώσσα Προγραμματισμού Ανοικτού κώδικα Wiring

Η γλώσσα προγραμματισμού του Arduino βασίζεται στη γλώσσα Wiring, μια παραλλαγή C/C++ για μικροελεγκτές αρχιτεκτονικής AVR όπως ο ATmega, και υποστηρίζει όλες τις βασικές δομές της C καθώς και μερικά χαρακτηριστικά της C++. Για compiler χρησιμοποιείται ο AVR gcc και ως βασική βιβλιοθήκη C χρησιμοποιείται η AVR lib.

Λόγω της καταγωγής της από την C, στην γλώσσα του Arduino μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ουσιαστικά τις ίδιες βασικές εντολές και συναρτήσεις, με την ίδια σύνταξη, τους ίδιους τύπων δεδομένων και τους ίδιους τελεστές όπως και στην C.

Όμως πέρα από τις παραπάνω εντολές και συναρτήσεις υπάρχουν και κάποιες ειδικές εντολές, συναρτήσεις και σταθερές που βοηθούν για την καλύτερη διαχείριση του ειδικού hardware του Arduino και στην δική μας περίπτωση του Arduino Uno R3.

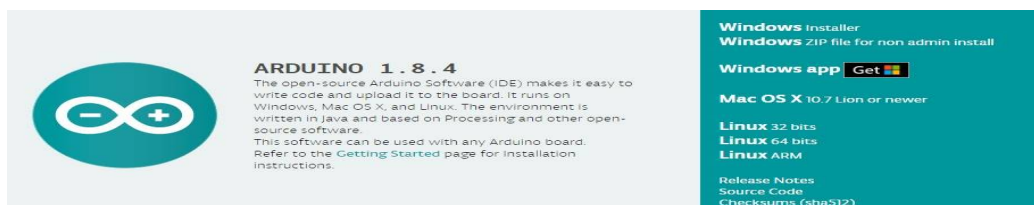
5.5.1 Η πλατφόρμα προγραμματισμού (Arduino IDE)

Την διαχείριση του Arduino από τον υπολογιστή μας μας την παρέχει το Arduino IDE. Το Arduino IDE είναι βασισμένο σε Java και συγκεκριμένα παρέχει:

- Πρακτικό περιβάλλον για την συγγραφή των προγραμμάτων (τα οποία ονομάζονται sketch στην ορολογία του Arduino) με συντακτική χρωματική σήμανση.
- Πάρα πολλά έτοιμα παραδείγματα.

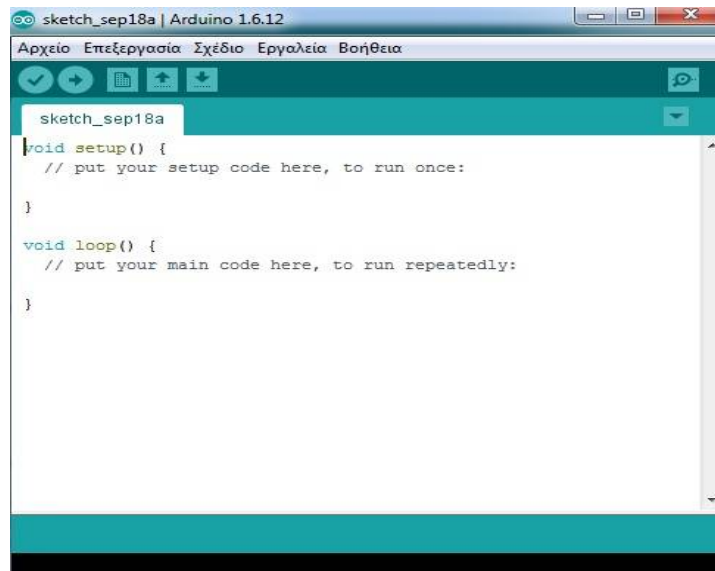
- Αρκετές έτοιμες βιβλιοθήκες για προέκταση της γλώσσας και για να χειριζόμαστε εύκολα μέσα από τον κώδικά σας τα εξαρτήματα που συνδέετε στο Arduino. Οι βιβλιοθήκες εμπλουτίζονται με νέες για κάθε νέο εξάρτημα που συνδέουμε στο Arduino μας.
- Compiler για την μεταγλώττιση των sketch – προγραμμάτων που γράφουμε.
- Serial monitor που παρακολουθεί τις επικοινωνίες της σειριακής (USB) και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για το debugging των sketch μας.
- Serial Plotter που παρακολουθεί τις επικοινωνίες της σειριακής (USB) και είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την γραφική απεικόνιση των δεδομένων μας στον άξονα των x,y της οθόνης του H/Y που προγραμματίζουμε το Arduino.
- Τέλος την επιλογή να ανεβάσουμε το μεταγλωττισμένο sketch στο Arduino.

Στην παρακάτω Εικόνα (**Εικόνα 35**) βλέπουμε το επίσημο site από το οποίο μπορούμε να κατεβάσουμε το Arduino IDE



Εικόνα 35: Επιλογή κατεβάματος του Arduino IDE από το επίσημο site του (arduino.cc).

Κι εδώ στην **(Εικόνα 36)** βλέπουμε το περιβάλλον προγραμματισμού που μας παρέχει το Arduino IDE



Εικόνα 36: Περιβάλλον Προγραμματισμού Arduino IDE

,

5.6 Η επιλογή των αισθητήρων επιτάχυνσης χαμηλού κόστους

Η παρούσα διπλωματική εργασία είναι μια χαμηλού κόστους λύση για την κατασκευή ενός αξιόπιστου συστήματος ανίχνευσης και καταγραφής κυμάτων Rayleigh.

Τα περισσότερα συστήματα αν όχι όλα σήμερα χρησιμοποιούν για την ανίχνευση και την καταγραφή κυμάτων Rayleigh αισθητήρες ταχύτητας (γεώφωνα).

Στην δική μας διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιήσουμε αισθητήρες επιτάχυνσης (επιταχυνσιόμετρα) στην θέση των γεωφώνων και θα προσπαθήσουμε να διαπιστώσουμε αν μπορούμε να αντικαταστήσουμε τα γεώφωνα με επιταχυνσιόμετρα χαμηλού κόστους.

Τα επιταχυνσιόμετρα τύπου mem's είναι τα πιο οικονομικά (τιμή <15 ευρώ) άρα και τα πλέον προτεινόμενα για την κατασκευή μας. Τα κεραμικού και πιεζοηλεκτρικού τύπου επιταχυνσιόμετρα κοστίζουν (τιμή >800 ευρώ).

Τα επιταχυνσιόμετρα mem's χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την συχνότητα λειτουργίας τους, το εύρος της μετρούμενης επιτάχυνσης που μπορούν να μετρήσουν, ο τρόπος με τον οποίο αποδίδουν το σήμα της επιτάχυνσης στην έξοδό τους (αναλογικά ή ψηφιακά).

Τα αναλογικά mem's επιταχυνσιόμετρα εμφανίζουν στην έξοδο τους τα σήματα της επιτάχυνσης σαν μεταβολές τάσεως (συνήθως μερικά millivolt / g). Το αναλογικό σήμα από τις εξόδους του αναλογικού mem's breakout board εισάγετε σε αναλογική είσοδο ή σε ψηφιακή εφόσον προηγείται μετατροπέας A/D και στην συνέχεια επεξεργάζεται από έναν μικροεπεξεργαστή π.χ (Arduino Uno).

Τα ψηφιακά mem's επιταχυνσιόμετρα ακολουθούν την λογική των αναλογικών mem's επιταχυνσιομέτρων με την προσθήκη ενός ενσωματωμένου A/D μετατροπέα στο ίδιο breakout board. Τα ψηφιακά mem's επιταχυνσιόμετρα συνδέονται με τον μικροεπεξεργαστή π.χ (Arduino Uno) με πρωτόκολλα σύνδεσης SPI, I2C και με την χρήση βιβλιοθηκών οι οποίες ενσωματώνονται στον κώδικα προγραμματισμού τους μας παρέχουν τα δεδομένα της μετρούμενης επιτάχυνσης σε απ ευθείας τιμές g, Milli-g, Micro-g.

Για την επιλογή του αισθητήρα επιτάχυνσης τεχνολογίας mem's θα πρέπει να επιλέξουμε εκείνο τον αισθητήρα του οποίου τα σήματα εξόδου θα είναι παραπλήσια σε συχνότητα, φάση, ευαισθησία και ταχύτητα απόκρισης με τα σήματα που λαμβάνουμε από ένα γεώφωνο για το ίδιο σήμα διέγερσης.

Οι ψηφιακοί mem's αισθητήρες (επιταχυνσιόμετρα) έχουν μεγαλύτερη ευαισθησία και εισαγάγουν μικρότερο θόρυβο στις μετρήσεις μας έναντι των αναλογικών. Η στάθμη των σημάτων τους δεν μπορεί να ενισχυθεί περεταίρω με εξωτερικό ενισχυτή με αποτέλεσμα να παίρνουμε μετρήσεις με χαμηλό ποσοστό θορύβου αλλά ο αισθητήρας μας να έχει αμετάβλητη ευαισθησία και να μας περιορίζει στο θέμα της ευαισθησίας.

Αντίθετα η στάθμη των αναλογικών mem's επιταχυνσιομέτρων μπορεί να ενισχυθεί με εξωτερικές ενισχυτικές – ενισχυτικές διατάξεις οι οποίες να αυξήσουν κατά πολύ την ευαισθησία του αισθητήρα κατά 10 – 100 ή ακόμη και 1000 φορές.

Η ενίσχυση του σήματος του αναλογικού mem's αισθητήρα ενισχύει ταυτόχρονα μαζί με τα ωφέλιμα σήματα και τα μη ωφέλιμα σήματα (ηλεκτρονικός θόρυβος). Το συγκεκριμένο φαινόμενο δημιουργεί προβλήματα στην ποιότητα των μετρήσεων σε χαμηλής έντασης σήματα (Πλάτος ηλεκτρονικού θορύβου >> ωφέλιμου μετρήσιμου σήματος επιτάχυνσης) με αποτέλεσμα να ελαττώνετε κατά πολύ η ευαισθησία των μετρήσεων μας. Οι λύσεις είναι α)χρήση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων φίλτρων υψηλής επιλεκτικότητας σε συνθήκες πραγματικού χρόνου β)χρήση φίλτρων software πάνω στα dataset των μετρήσεων μας σε συνθήκες μη πραγματικού χρόνου.

Η χρήση των ηλεκτρονικών φίλτρων είναι πιο δύσκολη στον υπολογισμό πιο πολύπλοκη στον σχεδιασμό και πιο κατά συνέπεια δαπανηρή καθώς όσο αυξάνουμε την επιλεκτικότητα τόσο αυξάνουμε τις παραπάνω παραμέτρους. Επιπλέον η συχνότητα λειτουργίας τους καθώς και η συμπεριφορά τους (χαμηλοπερατό , υψηλοπερατό , ζώνης διέλευσης , αποκοπής ζώνης) η οποία μπορεί να μεταβάλετε ανάλογα το πεδίο των μετρήσεων (εξωγενής θόρυβος στο πεδίο των μετρήσεων) κάνει ακόμη πιο δύσκολη την προσαρμογή τους σε χρήσεις πραγματικού χρόνου. Σε εξαιρετικές περιπτώσεις που χρειαζόμαστε επεξεργασία των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μπορούμε να κάνουμε χρήση Hardware προγραμματιζόμενων φίλτρων τα οποία μπορούν να προγραμματίζονται κάθε φορά ανάλογα με τα χαρακτηριστικά που επιθυμούμε.

Αντίθετα η χρήση φίλτρων Software λύνει με μεγάλη επιτυχία όλα τα παραπάνω προβλήματα για επεξεργασία των δεδομένων από τον αναλογικό mem's αισθητήρα σε συνθήκες μη πραγματικού χρόνου.

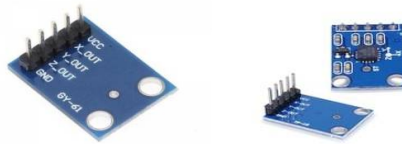
Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα χρησιμοποιήσουμε Α)το Αναλογικό mem's Triple Axis Accelerometer – ADXL335 , β) Το ψηφιακό mem's Triple Axis Accelerometer – MMA8452Q τα οποία θα συγκρίνουμε με το γεώφωνο GS-11D (4.5Hz).

5.6.1 Το τριαξονικό mem's αναλογικό επιταχυνσιόμετρο – ADXL335

Το ADXL335 (**Εικόνα 37**) είναι ένα μικρό σε διαστάσεις , χαμηλής ισχύος, χαμηλής κατανάλωσης, και φυσικά χαμηλού κόστους επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων με εξόδους σήματος κλιμακούμενης τάσης το οποίο κατασκευάζεται από την εταιρεία Analog Devices.

Μπορεί να μετρά επιτάχυνση έως $\pm 3G$. Επίσης μπορεί να μετρήσει τη στατική επιτάχυνση της βαρύτητας σε εφαρμογές ανίχνευσης κλίσης, καθώς και τη δυναμική επιτάχυνση που προκύπτει από την κίνηση, χτυπημάτων ή κραδασμών.

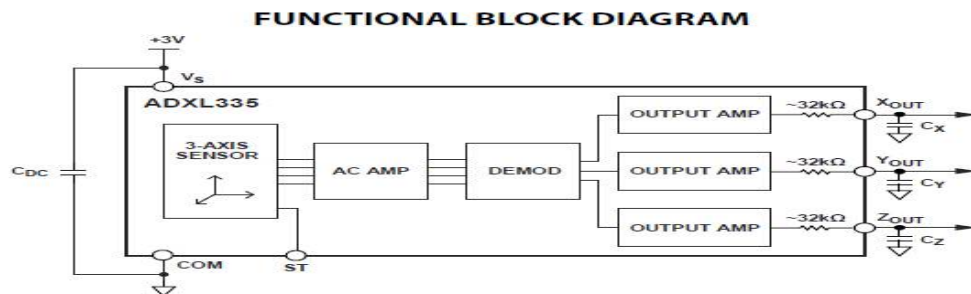
Διαθέτει τρεις αναλογικές εξόδους (μία για κάθε άξονα X , Y , Z) από τις οποίες μετράμε την υφιστάμενη επιτάχυνση ως μεταβολή της τάσης στις εξόδους του. Η τάση αυτή ορίζετε από τα χαρακτηριστικά που αναφέρονται από τον κατασκευαστή του ως $\pm 300\text{Millivolt}$ ανά $\pm 1G$. Άρα η μέγιστη μεταβολής της τάσεως στην κάθε μία από τις (X , Y , Z) εξόδους του θα είναι περίπου $\pm 900\text{Millivolt}$ για μέγιστες τιμές επιτάχυνσης $\pm 3G$.



Εικόνα 37: Αναλογικό τριαξονικό επιταχυνσόμετρο mem's (breakout board ADXL335)

Το εύρος ζώνης μπορεί να επιλεγθεί ανάλογα με την εφαρμογή, με μια σειρά από 0,5 Hz έως 1600 Hz για X και Y άξονες, και μια σειρά από 0,5 Hz έως 550 Hz για τον άξονα Z. Η επιλογή του εύρους ζώνης των εξόδων X,Y,Z του επιταχυνσιόμετρου μπορεί να ορισθεί σε διαφορετική τιμή από τις προαναφερόμενες με την χρήση εξωτερικών πυκνωτών (C_x , C_y , C_z) των οποίων η τιμή περιγράφεται σε πίνακα στο datasheet του κατασκευαστή.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 38) βλέπουμε όλες τις βαθμίδες του αναλογικού επιταχυνσιόμετρου ADXL335 που εμπεριέχονται μέσα στο ηλεκτρονικό του κύκλωμα.



Εικόνα 38: Μπλοκ Διάγραμμα ADXL335

Χαρακτηριστικά ADXL335:

- Τροφοδοσία από 3.3V έως 3.6V
- Χαμηλή ισχύς: 350μΑ στα 3.6V
- Αναλογικές Έξοδοι (x,y,z)
- Απόκριση συχνότητας εξόδων (x= 0.5 Hz to 1600 Hz , y= 0.5 Hz to 1600 Hz, z= 0.5 Hz to 500 Hz)
- Ανάλυση +/-300mv per +/-1g
- Διαστάσεις: 4 x 4 x 1.5mm

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

5.6.1.1 Ο ενισχυτής σήματος για τον αισθητήρα επιτάχυνσης ADXL335

Ο τριαξονικός αισθητήρας επιτάχυνσης ADXL335 ανήκει στην κατηγορία των strong motion accelerators (όπως όλα τα επιταχυνσιόμετρα τύπου mem's της κατηγορίας του).

Μετράει επιταχύνσεις στην περιοχή $\pm 3G$ ($G = 9.81\text{m/sec}^2$) αποδίδοντας στην έξοδο του σήμα εξόδου $\pm 300\text{mV}$ ($\pm 0.3\text{V}$) για κάθε μεταβολή επιτάχυνσης $\pm 1G$.

Γίνετε κατανοητό ότι η περιοχή στην οποία μετράει είναι πολύ μεγάλη και με μικρή ακρίβεια σε σχέση με τις τιμές μετρήσεων που εμείς περιμένουμε να πάρουμε στις καταγραφές μας σε σεισμική και εδαφική διασκόπηση.

Για τους παραπάνω πολύ σοβαρούς λόγους θα πρέπει να ενισχύσουμε τα σήματα από το επιταχυνσιόμετρο για να μπορέσουμε να πάρουμε πιο ακριβείς μετρήσεις στην περιοχή των εκατοστών και χιλιοστών του G .

Η επίτευξη του παραπάνω στόχου γίνεται με την ενίσχυση των σημάτων στην περιοχή συχνοτήτων που λειτουργεί το επιταχυνσιόμετρο.

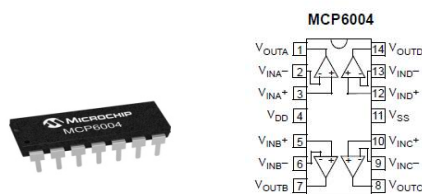
Γενικότερα η ενίσχυση των εξόδων του επιταχυνσιόμετρου γίνεται με σκοπό την αύξηση της ευαισθησίας του αισθητήρα και κατά συνέπεια του προς επεξεργασία πλάτους σήματος εξόδου του.

Ο ενισχυτής σήματος δεν θα πρέπει να αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά του σήματος αυτού ως προς (συχνότητα , εύρος ,φάση και περιοδικότητα) ενώ παράλληλα θα πρέπει να έχει υψηλή επιλεκτικότητα στα σήματα που ενισχύει δίχως να ενισχύει τον οποιοδήποτε ηλεκτρονικό θόρυβο μαζί με το ωφέλιμο σήμα.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά θα πρέπει να καλύπτονται από την ενισχυτική διάταξη που θα χρησιμοποιήσουμε προκειμένου να γίνει αποδεκτή στο σύστημα μας.

5.6.1.2 Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MPC6004

Ο ενισχυτής μας βασίζεται στον τελεστικό ενισχυτή (op-amp) MCP6004 τεχνολογίας Rail to Rail (**Εικόνα 39**) , ο οποίος μαζί με μερικά παθητικά εξαρτήματα (αναστάσεις , πυκνωτές , ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές) δημιουργούν μια ενισχυτική διάταξη η οποία ενισχύει 100 φορές τα σήματα που δέχεται στην είσοδο της.



Εικόνα 39: Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP6004

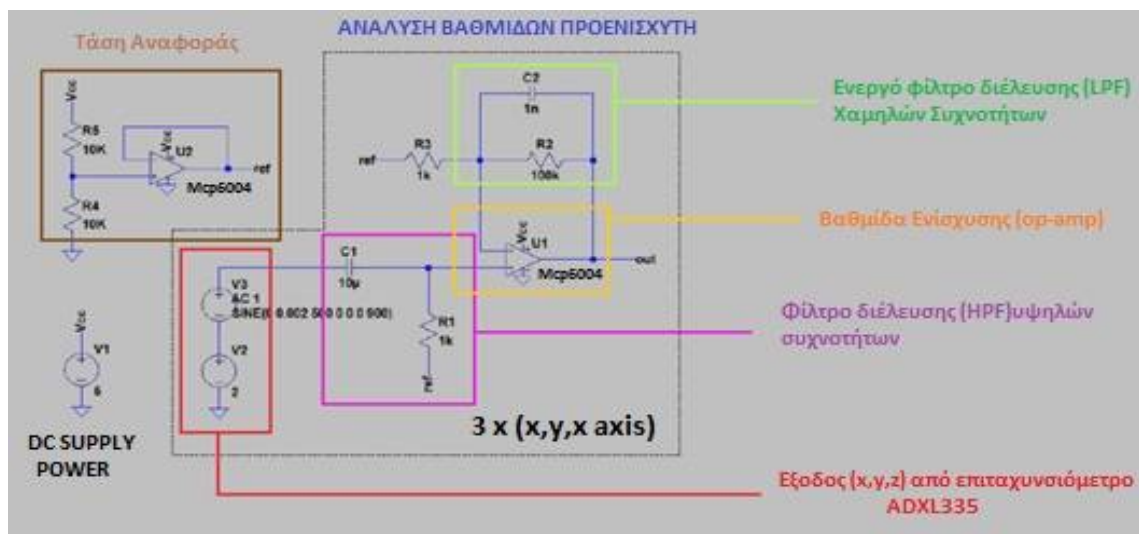
Το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP6004 αποτελείται εσωτερικά από 4 τελεστικούς ενισχυτές τους οποίους εμείς μπορούμε να συνδεσμολογήσουμε κατάλληλα για να κατασκευάσουμε την ενισχυτική διάταξη που θέλουμε.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά του ολοκληρωμένου κυκλώματος MCP6004 είναι :

- Διαθέσιμο σε περίβλημα SC-70-5 και SOT-23-5
- Τυπική Συχνότητα Λειτουργίας : 1MHZ
- Rail-to-Rail είσοδος/έξοδος
- Τάση Λειτουργίας : 1.8V έως 6.0V
- Τυπική Κατανάλωση ρεύματος : 100 μ A
- Θερμοκρασία λειτουργίας : -40 έως 125 βαθμούς Κελσίου

Περισσότερες πληροφορίες βρίσκουμε στο datasheet της κατασκευάστριας εταιρίας του στον σύνδεσμο (<https://www.microchip.com/wwwproducts/en/MCP6004>) όπου περιγράφονται αναλυτικά όλα τα χαρακτηριστικά του αλλά και αναφέρονται χρήσιμες πληροφορίες για την χρήση του σε ηλεκτρονικά κυκλώματα.

5.6.1.3 Το κύκλωμα και οι βαθμίδες του ενισχυτή σήματος



Εικόνα 40: Οι βαθμίδες του ενισχυτή σήματος βασισμένου στο MCP6004

Το κύκλωμα του ενισχυτή σήματος απαρτίζεται από τις βαθμίδες (Εικόνα 40) :

- Βαθμίδα εισόδου σημάτων από το επιταχυνσιόμετρο ADLX335
- Βαθμίδα φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων HPF
- Βαθμίδα φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων LPF
- Βαθμίδα Ενίσχυσης σήματος
- Βαθμίδα τάσεως αναφοράς Vref

Ανάλυση Βαθμίδων

Βαθμίδα εισόδου σημάτων από το επιταχυνσιόμετρο ADLX335

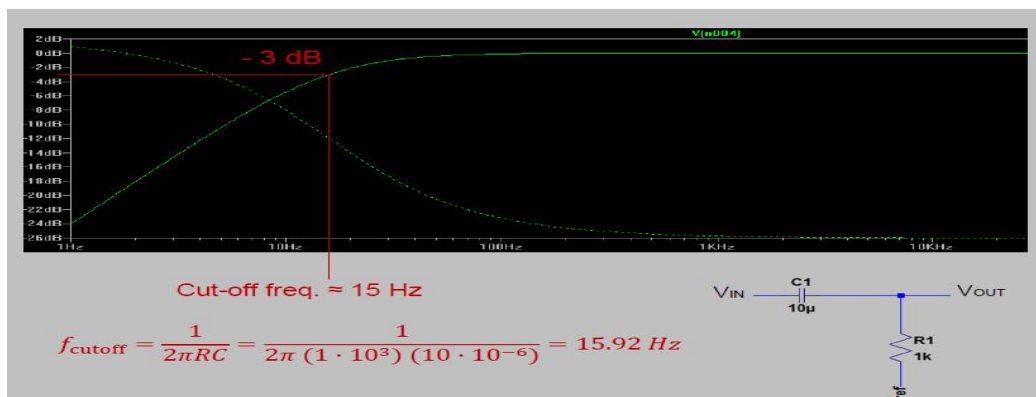
Το σήμα εξόδου από το επιταχυνσιόμετρο ADLX335 εφαρμόζεται στην είσοδο του ενισχυτή. Η συνεχή συνιστώσα (DC τάση σήματος εισόδου - σήμα από τις εξόδους x,y,z του επιταχυνσιόμετρου) αφαιρείται με την χρήση των εξαρτημάτων (C1 ,R1 – φίλτρο HPF).

Στην συνέχεια η εναλλασσόμενη συνιστώσα – ωφέλιμο προς ενίσχυση σήμα εφαρμόζεται στην μη αναστρέφουσα είσοδο (+) του τελεστικού ενισχυτή MPC6004.

Βαθμίδα φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

Η συχνότητα αποκοπής (-3db) του φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων (Εικόνα 41) είναι περίπου 16 HZ και καθορίζετε από τις τιμές των παθητικών στοιχείων του κυκλώματος R1 και C1.

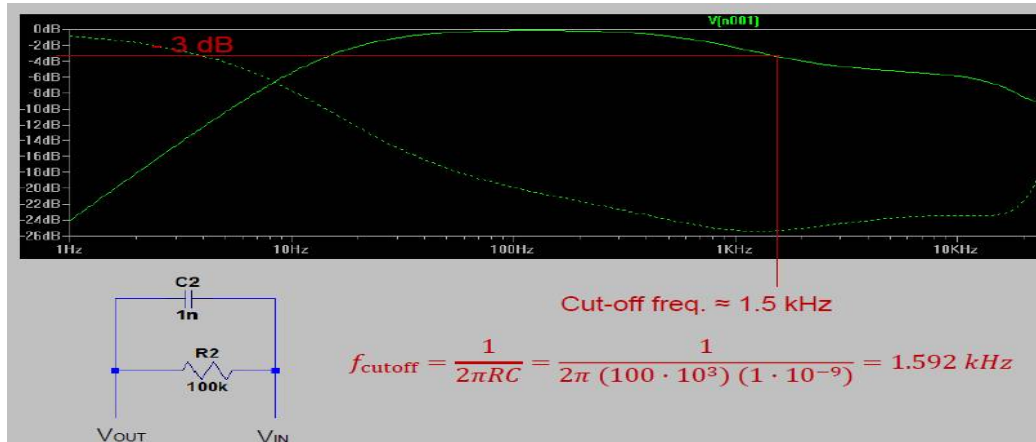
Οι τιμές των στοιχείων αυτών καθορίζουν επίσης την ταχύτητα απόκρισης της εξόδου του ενισχυτή μας στις μεταβολές των σημάτων στις εισόδου του. Στην δική μας περίπτωση έχουν επιλεγεί για γρήγορη ταχύτητα απόκρισης μεταβολών σημάτων.



Εικόνα 41: Καμπύλη απόκρισης φίλτρου διέλευσης υψηλών συχνοτήτων

Βαθμίδα φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

Το δικτύωμα των εξαρτημάτων (C2 , R2) δημιουργεί ένα φίλτρο διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων (Εικόνα 42) το οποίο έχει συχνότητα αποκοπής $F_{cutoff} = 1.6\text{KHz}$.



Εικόνα 42: Καμπύλη απόκρισης φίλτρου διέλευσης χαμηλών συχνοτήτων

Τα δύο φίλτρα υψηλής του ενισχυτή μας ένα υψηλής διέλευσης και ένα χαμηλής διέλευσης μας δημιουργούν ένα φίλτρο διέλευσης ζώνης διέλευσης συχνοτήτων με συχνότητες διέλευσης (-3db) από 16Hz έως 1.6KHz. Όπου 1.6KHz είναι και η συχνότητα που το ADLX335 σταματάει να λειτουργεί γραμμικά.

Συμπέρασμα το φίλτρο ζώνης του ενισχυτή που σχεδιάσαμε ακολουθεί πιστά την καμπύλη απόκρισης του αισθητήρα επιτάχυνσης ADXL335 και κατά συνέπεια ο ενισχυτής μας παρουσιάζει επιλεκτικότητα στην ενίσχυση σημάτων μέσα σε αυτήν και μόνο την περιοχή.

Σήματα πέραν αυτής της περιοχής συχνοτήτων (θόρυβος) δεν ενισχύονται αλλά απορρίπτονται ως μη ωφέλιμα σήματα.

Βαθμίδα Ενίσχυσης σήματος

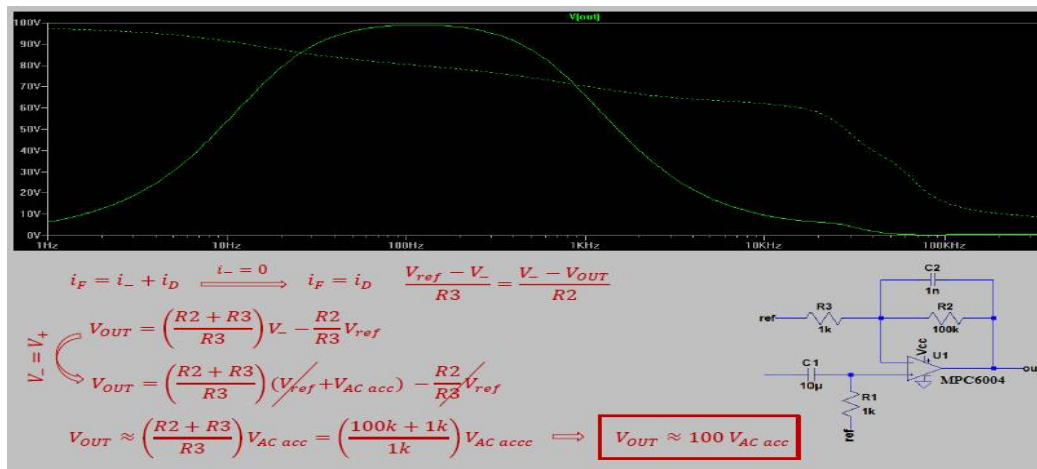
Η βαθμίδα ενίσχυσης σήματος ορίζεται από το δικτύωμα των αντιστάσεων R3 και R2 και από τον τελεστικό ενισχυτή (op-amp) MCP6004. Ποιο συγκεκριμένα ο λόγος ενίσχυσης του σήματος εισόδου δίνεται από τον τύπο $A = (R2 + R3/R3)$ και η ενίσχυση τάσεως του σήματος εισόδου από τον τύπο :

$$V_{out} = V_{in} * (R2 + R3/R3)$$

V_{in} : Η τάσης του σήματος εισόδου που εισέρχεται στον ενισχυτή μας και V_{out} : Η τάση του σήματος εξόδου που εξέρχεται από τον ενισχυτή μας.

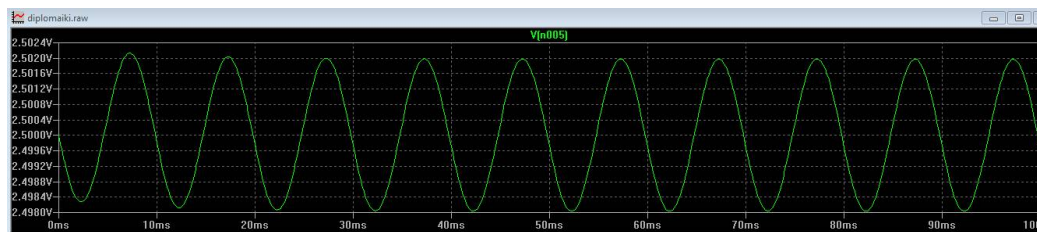
Στο (Εικόνα 43) βλέπουμε την καμπύλη απόκρισης του ενισχυτή μας (ενίσχυσης προς απόκριση συχνότητας) με αναλυτικότερη μαθηματική επεξήγηση.

Τέλος να αναφέρουμε ότι το σήμα εισόδου εφαρμόζετε στην μη αναστρέφουσα (+) είσοδο του τελεστικού ενισχυτή MCP6004 με αποτέλεσμα το σήμα εξόδου να μην παρουσιάζει διαφορά φάσης με εκείνο της εισόδου αντίθετη περίπτωση εφόσον το σήμα εισόδου εφαρμόζονταν για ενίσχυση στην αναστρέφουσα είσοδο (-) του ενισχυτή τότε το σήμα εξόδου θα παρουσίαζε διαφορά φάσης 180 μοιρών σε σχέση με το σήμα εισόδου.



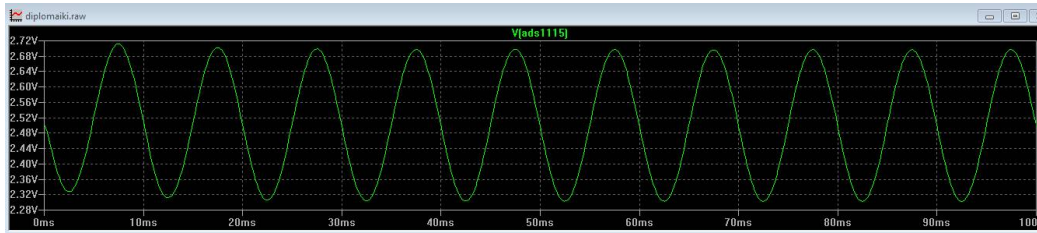
Εικόνα 43: Βαθμίδα ενίσχυσης σήματος $A=100$

Σαν παράδειγμα εισαγάγουμε στην είσοδο του ενισχυτή σήμα εισόδου (πλάτος τάσεως) $V_{in} = \pm 2mV$ με συχνότητα σήματος 100Hz (Εικόνα 44) και παρατηρούμε ότι το πλάτος της τάσεως μεταβάλετε κατά $\pm 2mV$ γύρω από την τάση αναφοράς που είναι 2.5Volt.



Εικόνα 44: Σήμα εισόδου ενισχυτή MCP6004 $\pm 2mV$

Κατόπιν ενίσχυσης με συντελεστή ενίσχυσης $A=100$ παρατηρούμε ότι το πλάτος του σήματος στην έξοδο του ενισχυτή (**Εικόνα 45**) μεταβάλλεται κατά $\pm 200\text{mV}$ γύρω από την τάση αναφοράς η οποία είναι μόνιμα 2.5V .



Εικόνα 45: Σήμα εξόδου ενισχυτή MCP6004 $\pm 200\text{mV}$

Συνοψίζοντας παρατηρούμε πως η ενίσχυση που μας παρέχει ο ενισχυτής που έχουμε κατασκευάσει παρουσιάζει στην έξοδο του τα σήματα που λαμβάνει στην είσοδο του ενισχυμένα κατά 100 φορές δίχως να υπάρχει διαφορά φάσεως μεταξύ τους.

Η Βαθμίδα τάσεως αναφοράς V_{ref}

Στην (**Εικόνα 40**) το δικτύωμα των αντιστάσεων (R_4 , R_5) δημιουργεί ένα διαιρέτη τάσεως και μας δίνει μια τάση αναφοράς $V_{ref} = \frac{1}{2}$ της τάσεως τροφοδοσίας (V_{DD}) του ενισχυτή μας. Στην περίπτωση μας η τάση τροφοδοσίας (V_{DD}) είναι 5V και κατά συνέπεια η τάση $V_{ref} = \frac{1}{2} V_{DD} = 2.5\text{V}$.

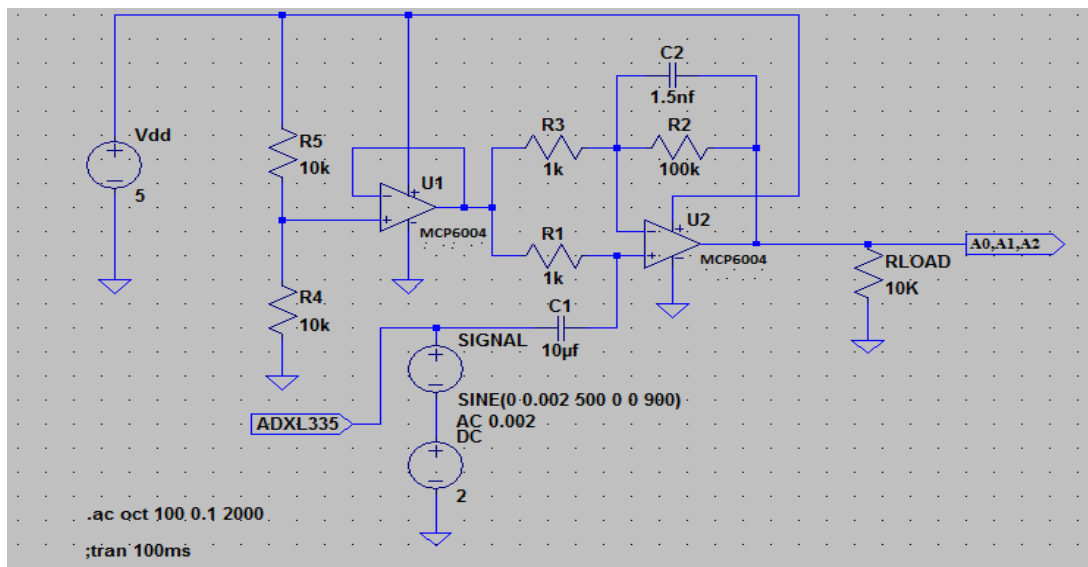
Ένας τελεστικός ενισχυτής (ο ένας από του τέσσερις που εσωκλείει το ολοκληρωμένο κύκλωμα MCP6004) χρησιμοποιείται σε συνδεσμολογία ενισχυτή μοναδιαίας ενισχυτής για να επιτύχουμε καλύτερη προσαρμογή και απομόνωση (υψηλή αντίσταση εισόδου) από επηρεασμούς της τάσεως αναφοράς V_{ref} από τα υπόλοιπα τμήματα του ενισχυτή μας.

Στην συνέχεια η τάση V_{ref} εφαρμόζεται και στις δύο εισόδους (αναστρέφουσα – και μη αναστρέφουσα +) του ενός ακόμη τελεστικού ενισχυτή που εμπεριέχετε στο ολοκληρωμένο κύκλωμα MPC6004 του ενισχυτή μας με αποτέλεσμα να ενισχύεται το σήμα που προκύπτει από την διαφορά τάσεως των σημάτων που εφαρμόζονται στις δύο εισόδους του τελεστικού ενισχυτή.

Στην πράξη ο ενισχυτής που έχουμε κατασκευάσει είναι ένας ενισχυτής διαφοράς σημάτων.

Το Ηλεκτρονικό διάγραμμα του ενισχυτή

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής μελετήσαμε σχεδιάσαμε και κατασκευάσαμε ενισχυτή σήματος (Εικόνα 46) για την καλύτερη συνεργασία του επιταχυνσιόμετρου ADXL335 με τον μικροεπεξεργαστή Arduino Uno

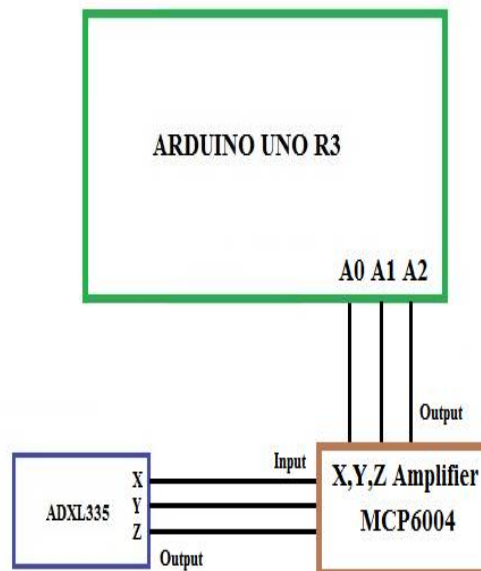


Εικόνα 46: Το Ηλεκτρονικό διάγραμμα του ενισχυτή σήματος

Για την εξομοίωση του ενισχυτή μας και για την κατασκευή των κυκλωματικών διαγραμμάτων χρησιμοποιήσαμε το πρόγραμμα εξομοίωσης ηλεκτρονικών κυκλωμάτων LTSpice το οποίο είναι ελεύθερο άδειας από την εταιρία Linear Technology.

5.6.1.4 Η διασύνδεση του επιταχυνσιόμετρου ADXL335 με το Arduino Uno

Η διασύνδεση του Αναλογικού επιταχυνσιόμετρου ADXL335 με τον ενισχυτή σήματος και κατόπιν με το Arduino Uno πραγματοποιείται όπως ακριβώς βλέπουμε στην παρακάτω Εικόνα.



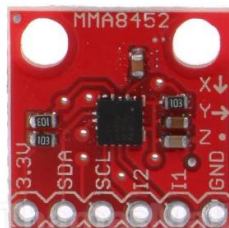
Εικόνα 47: Μπλοκ διάγραμμα διασύνδεσης ADXL335- ενισχυτή σήματος - Arduino Uno

5.6.2 Το τριαξονικό mem's ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο – MMA8452Q

Το MMA8452Q (**Εικόνα 48**) είναι ένα μικρό, χαμηλής ισχύος, χαμηλής κατανάλωσης, χαμηλού κόστους ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο 3 αξόνων με εξόδους στην κλίμακα του G.

Μπορεί να μετρά επιτάχυνση $\pm 2G$, $\pm 4G$, $\pm 8G$. Επίσης μπορεί να μετρήσει τη στατική επιτάχυνση της βαρύτητας σε εφαρμογές ανίχνευσης κλίσης, καθώς και τη δυναμική επιτάχυνση που προκύπτει από την κίνηση, χτυπημάτων ή κραδασμών.

Διαθέτει τρεις ψηφιακές εξόδους (μία για κάθε άξονα X , Y , Z) από τις οποίες μετράμε απευθείας την υφιστάμενη επιτάχυνση από τις στις εξόδους του σε τιμές του G.



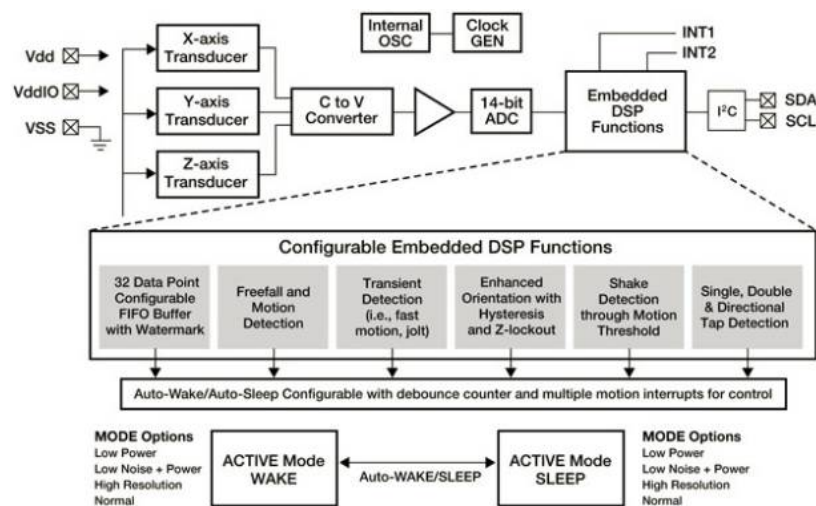
Εικόνα 48: Ψηφιακό mem's επιταχυνσιόμετρο MMA8452Q

Το εύρος ζώνης μπορεί να επιλεγεί ανάλογα με την εφαρμογή, έως 800 Hz και για τους 3 άξονες (X,Y,Z) που διαθέτει. Η επιλογή του εύρους ζώνης των εξόδων X,Y,Z του επιταχυνσιόμετρου, η περιοχή μετρούμενης επιτάχυνσης καθώς και η ταχύτητα δειγματοληψίας ελέγχονται από τον κώδικα που 'τρέχει' στο Arduino Uno και προσαρμόζονται με ευκολία στις απαιτήσεις μας.

Το Ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο MMA8452Q ενσωματώνει στο κέλυφος του έναν μικροεπεξεργαστή με A/D μετατροπέα 12bit ο οποίος είναι ανώτερος του A/D μετατροπέα που διαθέτει το Arduino Uno ο οποίος είναι μόλις 10bit. Συνδέεται απ ευθείας μέσω του διαύλου I2C στο Arduino Uno μέσω 2 και μόνο καλωδίων (SDA/SCL) και μας παρέχει αποτελέσματα στην κλίμακα των G.Επίσης παρέχει δυνατότητα Sleep για ακόμη μεγαλύτερη μείωση της κατανάλωσης.

Επεμβαίνοντας κατάλληλα στον κώδικα που 'τρέχει' για τον αισθητήρα στο Arduino Uno μπορούμε εύκολα να παίρνουμε τις τιμές της μετρούμενης επιτάχυνσης σε milli-G ώστε να προσαρμόσουμε τις τιμές εξόδου του επιταχυνσιόμετρου στην περιοχή που μας ενδιαφέρει με μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 49) βλέπουμε τις βαθμίδες του ψηφιακού επιταχυνσιόμετρου MMA8452Q που εμπεριέχονται μέσα στο ηλεκτρονικό του κύκλωμα.



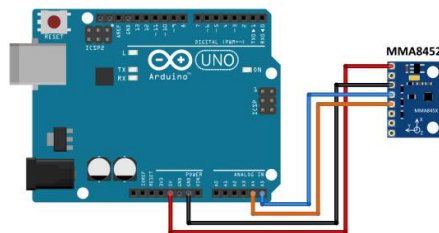
Εικόνα 49: Μπλοκ Διάγραμμα MMA8452Q

Χαρακτηριστικά MMA8452Q:

- Τάση τροφοδοσίας 1,95 έως 3,6 Volt
- Μετρούμενη επιτάχυνση με επιλογή $\pm 2g$ / $\pm 4g$ / $\pm 8g$
- Ταχύτητα δεδομένων εξόδου (ODR) από 1,56 Hz σε 800 Hz
- Επίπεδο Θορύβου $99 \mu g / \sqrt{Hz}$
- Ψηφιακή έξοδος 12-bit και 8-bit
- Διεπαφή ψηφιακής εξόδου I²C (λειτουργεί σε 2,25 MHz με pull-up 4,7 k Ω)
- Δύο προγραμματιζόμενες ακίδες διακοπής για έξι πηγές διακοπής
- Τρία ενσωματωμένα κανάλια ανίχνευσης κίνησης
- Ελεύθερη πτώση ή ανίχνευση κίνησης: ένα κανάλι
- Ανίχνευση προσανατολισμού (κατακόρυφο / οριζόντιο) με καθορισμένη υστέρηση
- Λειτουργία (sleep) χαμηλής κατανάλωσης
- Δεδομένα εξόδου σε πραγματικό χρόνο
- Λειτουργία Self Test
- Τρέχουσα κατανάλωση: 6 μA -165 Ma

5.6.2.1 Η διασύνδεση του επιταχυνσιόμετρου MMA8452Q με το Arduino Uno .

Η διασύνδεση του ψηφιακού επιταχυνσιόμετρου MMA8452Q με το Arduino Uno πραγματοποιείται όπως ακριβώς βλέπουμε στην παρακάτω Εικόνα.



Εικόνα 50: Διασύνδεση MMA8452Q – Arduino Uno

5.7 Αισθητήρας ταχύτητας - Γεώφωνο GS-11D (4.5Hz)

Για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας μας (Συγχρονισμός) επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε το γεώφωνο GS-11D 4,5Hz της εταιρίας Geospace Technologies. Το ίδιο ακριβώς γεώφωνο χρησιμοποιεί και το εμπορικό σύστημα Rosina Soil Spy με το οποίο εμείς αντιπαραθέτουμε με το σύστημα που κατασκευάζουμε.

Το GS 11D (**Εικόνα 51**) είναι ένα γεώφωνο περιστρεφόμενου πηνίου υψηλής απόδοσης σχεδιασμένο και κατασκευασμένο για να αντέχει σε υψηλές κρούσεις και καταπονήσεις.

Διαθέτει ελατήρια ακριβείας σχεδιασμένα με υπολογιστή με αποτέλεσμα η απόδοση του να είναι σταθερή ακόμα και στις πιο ακραίες συνθήκες.



Εικόνα 51: Γεώφωνο GS-11D 4.5Hz

Στον παρακάτω πίνακα (**Πίνακας 2**) παραθέτουμε τα φυσικά χαρακτηριστικά του γεωφώνου όπως αυτά αναφέρονται στα τεχνικά εγχειρίδια της κατασκευάστριας εταιρίας

PHYSICAL SPECIFICATIONS	
Orientation	Vertical and Horizontal available
Moving Mass	23.6 g (0.83 oz)
Maximum Coil Excursion p-p	> 2.5 mm (0.10 in.)
Diameter	3.18 cm (1.25 in.)
Height	3.35 cm (1.32 in.)
Weight	118 g (4.16 oz)
Operating & Storage Temperature Range	-45° to +85°C (-49 to +185°F)

Πίνακας 2 : Φυσικά Χαρακτηριστικά γεωφώνου GD-11S

Τέλος στον (Πίνακα 3) που ακολουθεί παραθέτουμε τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά του γεωφώνου όπως αυτά αναφέρονται στα τεχνικά εγχειρίδια της κατασκευάστριας εταιρίας.

ELECTRICAL SPECIFICATIONS		@25°C
Frequency		4.5 Hz *
Spurious Frequency		N.S.
Distortion at Vertical		N.S.
Coil Resistance		380 Ω *
Open-Circuit Sensitivity		32.0 V/m/s (0.81 V/i/s)
Sensitivity at 70% damping		26.18 V/m/s (0.665 V/i/s)
Open-Circuit Damping		34%
Tilt angle when coil hits end stop		Vertical geophone = 16° Horizontal geophone ±1.25°

Πίνακας 3 : Ηλεκτρικά Χαρακτηριστικά γεωφώνου GD-11S

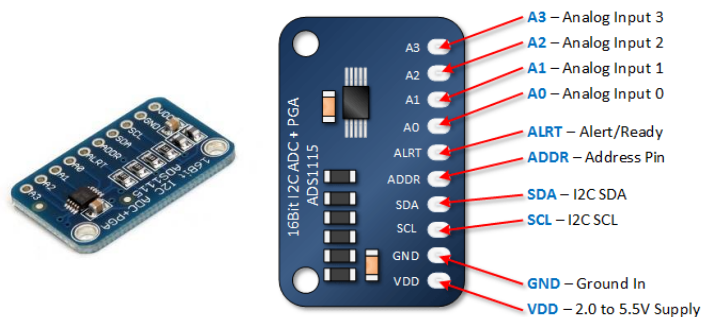
5.7.1 (ADS-1115) Ο Ενισχυτής – Μετατροπέας A/D του σήματος γεωφώνου

Τα σήματα από την έξοδο του γεωφώνου GS-11D θα πρέπει να ενισχυθούν και να μετατραπούν από αναλογικά σε ψηφιακά για να μπορούμε να τα επεξεργαστούμε με το Arduino Uno.

Το Breakout board ADS1115 (Εικόνα 52) μας προσφέρει τις παραπάνω δύο δυνατότητες με χαμηλό κόστος και με υψηλή απόδοση για την εφαρμογή μας.

Διαθέτει :

- Μετατροπέα Analog to Digital 16bit έναντι 12 που διαθέτει το Arduino Uno
- Ενσωματωμένο ενισχυτή σήματος με επιλογή ενίσχυσης x1,x2,x4,x8, x16
- Συχνότητα δειγματοληψίας έως 860 τιμές το δευτερόλεπτο
- 4 Αναλογικές εισόδους
- Άψογη συνεργασία με το Aduino Uno (I2C σύνδεση)
- Εύκολη διασύνδεση με το Arduino Uno
- Τάση τροφοδοσίας 2.5 έως 5.5 Volt
- Χαμηλή κατανάλωση

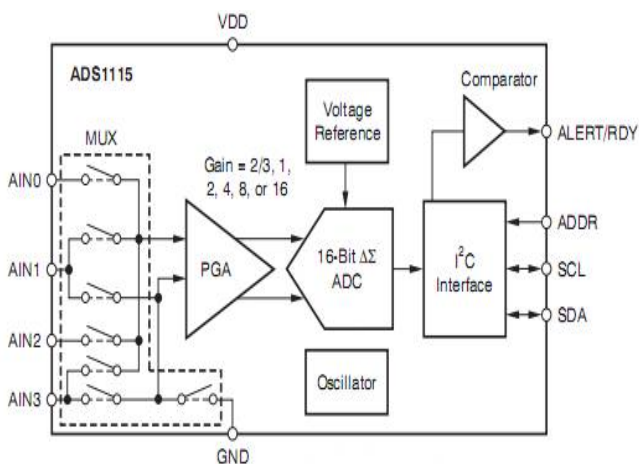


Εικόνα 52: Breakout board A/D 16Bit converter ads1115

Επίσης το Breakout board ADS1115 μπορεί να εργασθεί σαν ενισχυτής τεσσάρων ξεχωριστών σημάτων εισόδου αλλά και σαν διαφορικό ενισχυτής 2 διαφορετικών σημάτων. Στην δική μας εφαρμογή κάνουμε χρήση του ως διαφορικού ενισχυτή γιατί μας παρέχει ενίσχυση με μικρότερο θόρυβο στα σήματα μας και κατά συνέπεια καλύτερο συντελεστή SNR.

Περαιτέρω πληροφορίες μπορούμε να βρούμε στο datasheet <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf> τις κατασκευάστριας εταιρίας αλλά και στο <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-4-channel-adc-breakouts.pdf> που παρουσιάζει και επεξηγεί αναλυτικά την διασύνδεση τον τρόπο λειτουργίας του breakout board (adafruit) που χρησιμοποιεί το ADS1115.

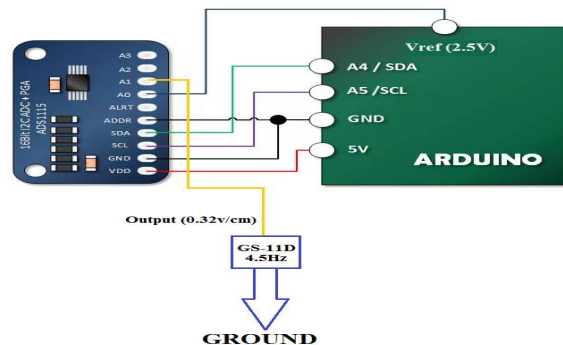
Στην (Εικόνα 53) βλέπουμε τις βαθμίδες από τις οποίες αποτελείται ο μετατροπέας αναλογικού/ψηφιακού σήματος και παράλληλα ενισχυτής σήματος ADS1115.



Εικόνα 53: Μπλοκ διάγραμμα βαθμίδων A/D 16Bit converter ads1115

5.7.2 Η διασύνδεση του γεωφώνου GS-11D με το Arduino Uno

Στο παρακάτω διάγραμμα (Εικόνα 54) βλέπουμε τον τρόπο που συνδέουμε το γεώφωνο GS-11D στον A/D μετατροπέα – ενισχυτή και από εκεί στο Arduino Uno (I2C bus σύνδεση).

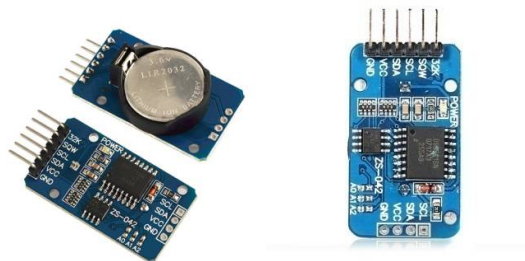


Εικόνα 54: Μπλοκ διάγραμμα διασύνδεσης γεωφώνου gs-11d - ads1115 – Arduino Uno

5.8 Το κύκλωμα ρολογιού πραγματικού χρόνου (High Real Time Clock DS3231)

Για την αποθήκευση και καταγραφή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο πρέπει να εγκαταστήσουμε στο σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης (Raspberry Pi) ένα κύκλωμα παροχής χρονισμού πραγματικού χρόνου. Το κύκλωμα αυτό ονομάζεται High precision Real Time Clock (Εικόνα 55) και εν συντομία RTC (Real Time Clock) και επιλέχθηκε το DS3231 AT24C32 IIC RTC module, ένα χαμηλού κόστους, εξαιρετικής ακρίβειας real-time ρολόι το οποίο για επιπλέον χρήση διαθέτει και αισθητήρα θερμοκρασίας.

Μετράει από χρόνια έως και δευτερόλεπτα υπολογίζοντας και τα δίσεκτα χρόνια έως το 2100. Τροφοδοτείται με 3.3 ή 5V και συνδέεται με τον μικροελεγκτή με τη χρήση του I2C πρωτοκόλλου επικοινωνίας. Το μόνο που απαιτείται είναι ο προγραμματισμός του μία μόνο φορά, καθώς μέχρι και την αφαίρεση της μπαταρίας το ρολόι μετράει κανονικά το χρόνο.

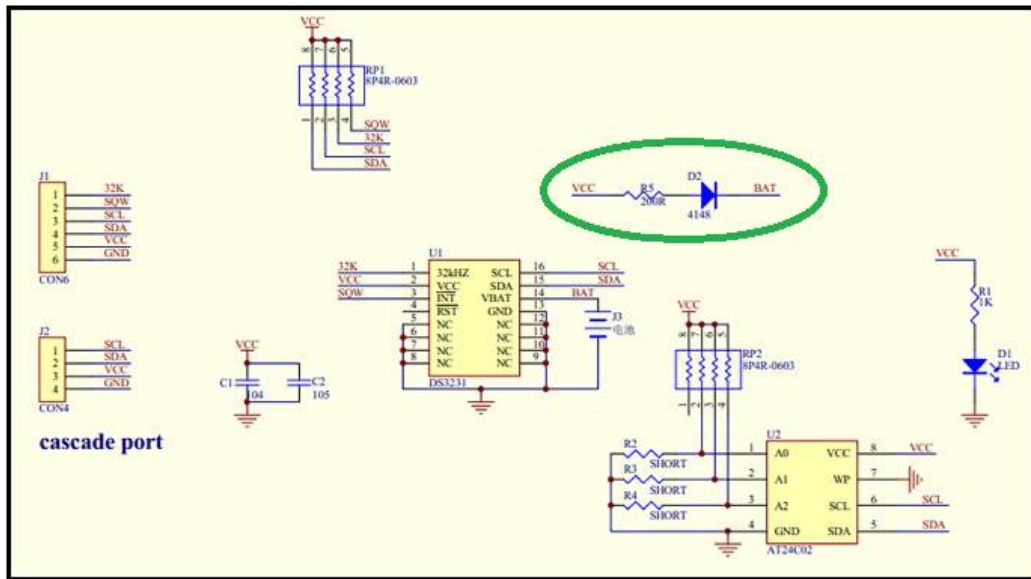


Εικόνα 55: Module Real Time Clock DS3231

Δέχεται μπαταρία τύπου LIR2032 ή CR2032 3.3V ώστε να κρατάει τον χρόνο ακόμα κι αν το module είναι εκτός λειτουργίας.

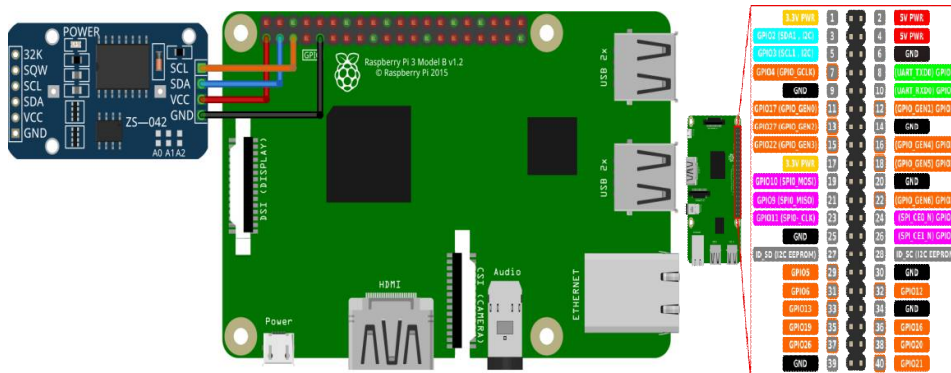
Από τις διαθέσιμες μπαταρίες, μόνο η LIR2032 είναι επαναφορτιζόμενη σε αντίθεση με την CR2032 που είναι κανονική. Η σημαντική διαφορά στην τιμή αλλά και η ευκολία εύρεσης της CR2032 έναντι LIR2032 μας κάνει να τροποποιήσουμε το κύκλωμα κι αυτό γίνεται με το να αφαιρεθεί είτε η αντίσταση ή η διόδος που φαίνονται παρακάτω στην (Εικόνα 56 Πράσινος κύκλος).

Στη συγκεκριμένη περίπτωση για τις ανάγκες της κατασκευής μας αφαιρέθηκε η αντίσταση (και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κανονική μπαταρία CR2032 χωρίς πρόβλημα).



Εικόνα 56: Σχηματικό διάγραμμα Real Time Clock DS3231

Το module DS3231 συνδέεται στο Raspberry Pi συνδέεται όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα (Εικόνα 57) και προγραμματίζεται μέσα από το ίδιο το Raspberry pi μια φορά και δεν χρειάζεται επιπλέον επιτήρηση.



Εικόνα 57: Σύνδεση RTC DS3231 στο Raspberry Pi

Ακολουθούμε με την σειρά τις οδηγίες που αναφέρονται στον παρακάτω σύνδεσμο (<https://www.raspberrypi-spy.co.uk/2015/05/adding-a-ds3231-real-time-clock-to-the-raspberry-pi/>) και αφού ελέγξουμε ότι το Module RTC DS3231 προγραμματίστηκε στην επιθυμητή ημερομηνία και ώρα έχουμε ολοκλήρωση την διασύνδεση και την εγκατάσταση του με το σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης δεδομένων μας (Raspberry Pi).

5.9 Το κύκλωμα μετατροπής τάσεως (Down Converter)

Για την παροχή ενέργειας σε ολόκληρο το σύστημα μας χρειαζόμαστε τάση τροφοδοσίας 5Volt. Στον σχεδιασμό μας είναι να τροφοδοτήσουμε το σύστημα με επαναφορτιζόμενη μπαταρία 12 Volt / 17Ah η οποία θα μπορεί μελλοντικά να φορτίζεται από ηλιακό πάνελ η από αυτόματο εξωτερικό κύκλωμα φόρτισης.



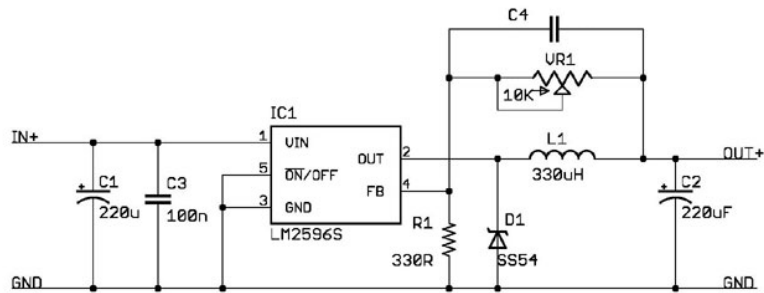
Εικόνα 58: DC to DC Step down Converter LM2596

Για τις ανάγκες του συστήματος μας χρησιμοποιούμε DC to DC Step down Converter LM2596 (**Εικόνα 58**) τεχνολογίας διακοπτόμενης λειτουργίας (Switching) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά :

- Τάση εισόδου 3.2V ~ 40V
- Τάση εξόδου 1.25V ~ 35V
- Μέγιστο ρεύμα εξόδου 3A (max)
- Συντελεστής απόδοσης 92% (maximum)
- Μέγιστη τάση κυμάτωσης εξόδου <30mV
- Συχνότητα λειτουργίας 65KHz
- Θερμοκρασία Λειτουργίας -45 °C ~ +85 °C

Στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 59**) βλέπουμε το ηλεκτρονικό σχηματικό διάγραμμα του μετατροπέα LM2589 μαζί με τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα που το απαρτίζουν.

Για την δική μας εφαρμογή όπως προαναφέραμε χρησιμοποιούμε δύο μετατροπείς ένας μας παρέχει τάση 5Volt με την οποία τροφοδοτούμε το Raspberry Pi και ο άλλος μας παρέχει τάση 7Volt με την οποία τροφοδοτούμε το Arduino Uno R3.



Εικόνα 59: Ηλεκτρονικό σχηματικό διάγραμμα step – down μετατροπέα LM2596

Οι μετατροπείς τάσεως DC το DC (step down converter) τεχνολογίας switching υπερτερούν έναντι των κλασικών (γραμμικών) μετατροπέων τάσεως κάνοντας πολύ καλύτερη διαχείριση ενέργειας και έχοντας μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης σε μεγάλες διαφορές τάσεως μεταξύ εισόδου και εξόδου τους.

5.10 Συσσωρευτής παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

Για την αδιάλειπτη λειτουργία του συστήματος μας θα χρησιμοποιήσουμε μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία (Ni-Cad) ονομαστικής τιμής τάσεως 12Volt και χωρητικότητας 17Ah.

Ο συγκεκριμένος συσσωρευτής (**Εικόνα 60**) θα μπορεί να παρέχει την απαραίτητη ενέργεια στο σύστημα μας για περίπου 70 ώρες συνεχόμενης και αδιάλειπτης καταγραφής δεδομένων.



Εικόνα 60: Συσσωρευτής Ηλεκτρικής ενέργειας – Μπαταρία 12Volt / 17Ah

Κεφάλαιο 6

Στο προηγούμενο κεφάλαιο (**κεφάλαιο 5**) κάναμε αναφορά για τα επιμέρους κυκλώματα καθώς και τους αισθητήρες που απαρτίζουν το σύστημα μας. Επεξηγήσαμε κατά το μέτρο του δυνατού την λειτουργία τους και τον τρόπο σύνδεσής τους με τις κεντρικές μονάδες επεξεργασίας στην συσκευή που κατασκευάσαμε για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας μας. Το σύστημα απαρτίζεται από δύο κεντρικές μονάδες. Την κεντρική μονάδα επεξεργασίας βασιζόμενη σε Arduino Uno και την κεντρική μονάδα επεξεργασίας βασιζόμενη σε Raspberry Pi.

Στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας βασιζόμενη σε Arduino Uno συνδέονται οι αισθητήρες επιτάχυνσης (χαμηλού κόστους επιταχυνσιόμετρα) και ο αισθητήρας ταχύτητας (γεώφωνο) ενώ στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας Raspberry Pi συνδέεται το ρολόι πραγματικού χρόνου και το ίδιο το Arduino Uno.

Το Arduino Uno κάνει την συλλογή - επεξεργασία και μεταφορά των δεδομένων από τους αισθητήρες (αναλογικούς και ψηφιακούς) ενώ το Raspberry Pi κάνει την καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων από το Arduino Uno σε πραγματικό χρόνο σε υψηλή ταχύτητα δειγματοληψίας. Το Raspberry Pi μας δίνει την δυνατότητα ενσύρματα μέσω της θύρας Ethernet ή εναλλακτικά μέσω wi-fi να συνδεθούμε πάνω στο σύστημά μας με τον φορητό υπολογιστή μας και να έχουμε τον πλήρη έλεγχο ολόκληρης της συσκευής.

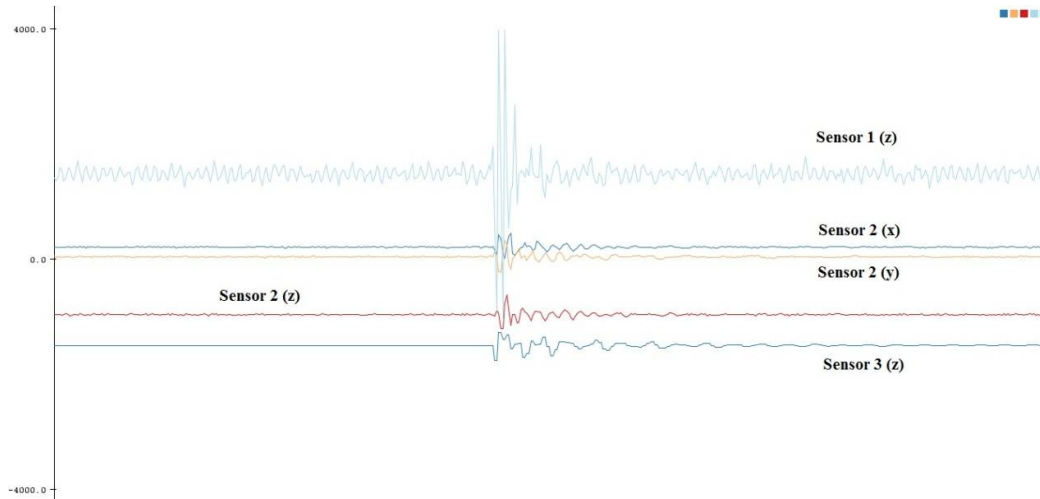
Επίσης το σύστημα μας μπορεί να συνδεθεί στο ίντερντ μέσω των παραπάνω τρόπων σύνδεσης ώστε να μπορούμε να το διαχειριζόμαστε σε πραγματικό χρόνο από όποιο σημείο εμείς βρισκόμαστε και είμαστε συνδεδεμένοι στο διαδίκτυο.

Το όλο σύστημα είναι ενεργειακά αυτόνομο και υποστηρίζεται από μια μπαταρία με τέτοια χωρητικότητα η οποία το υποστηρίζει ενεργειακά για αρκετά 24ωρα συνεχόμενης παρακολούθησης και καταγραφής δεδομένων.

Το σύστημα μας μπορεί να μας απεικονίζει σε πραγματικό χρόνο την καταγραφή των σημάτων των αισθητήρων του και να αποθηκεύει ταυτόχρονα σε πραγματικό χρόνο τα δεδομένα των αισθητήρων του.

Τα δεδομένα λαμβάνονται με την παρακάτω μορφή (**Πίνακας 4**) όπως αυτά καταγράφονται και αποθηκεύονται στην κεντρική μονάδα Raspberry Pi.

Στο παρακάτω Εικόνα (**Εικόνα 61**) βλέπουμε σε πραγματικό χρόνο τις κυματομορφές των δεδομένων που λαμβάνονται αναλύονται και εμφανίζονται στην συσκευή μας μέσω των αισθητήρων.

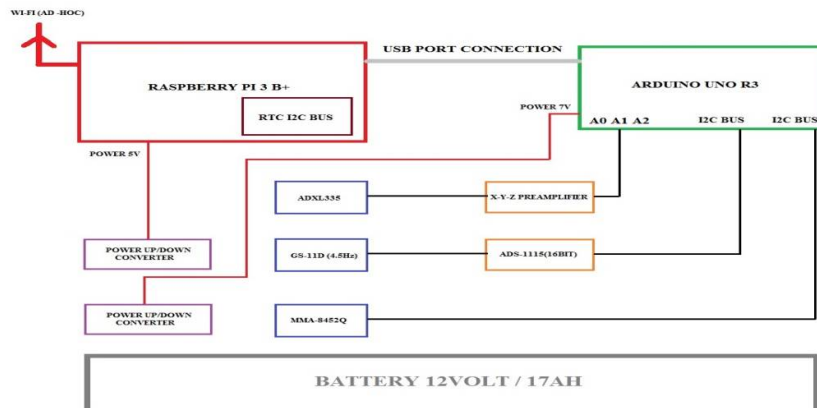


Εικόνα 61: Σήματα και από τους τρείς αισθητήρες του συστήματος που κατασκευάσαμε
(Sensor1= geophone gs11-d ,Sensor2 = digital mem's mmq8452, Sensor3= analog mem's Adxl335)

Τα δεδομένα από το σύστημα μας εξάγονται με πάρα πολύ απλό τρόπο από αυτό (μέσω ενός usb flash disk , μέσω σωτήρα) και όπου αυτό απαιτείται υπόκειται σε επεξεργασία από προγράμματα επεξεργασίας σημάτων όπως (Matlab , Octave) με σκοπό το φιλτράρισμα των δεδομένων όπου αυτό χρειάζεται (π.χ αποβολή θορύβου από τα δεδομένα των αισθητήρων από παρασιτικές συχνότητες , παρεμβολές από συχνότητες στο πεδίο των μετρήσεων κ.α) με σκοπό τον καθαρισμό των σημάτων των αισθητήρων μας.

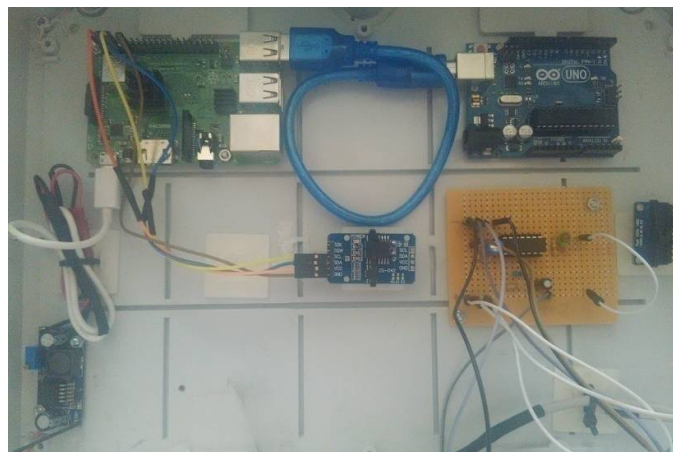
6.1 Το υλικό (Hardware) και η διασύνδεση του

Η συσκευή μας (System V.E.T.A) αποτελείται από τις παρακάτω βαθμίδες η οποίες διακρίνονται στο μπλοκ διάγραμμα (Εικόνα 62).



Εικόνα 62: Μπλοκ διάγραμμα του συστήματος που κατασκευάσαμε

Και μετά από σύνδεση των τμημάτων μεταξύ τους μέσα στο κουτί της συσκευής (Εικόνα 63).



Εικόνα 63: Κατασκευή Διπλωματικής Εργασίας (System V.E.T.A)

Στην κατασκευή της διπλωματικής μας εργασίας **Εικόνα 63** διακρίνονται οι δύο μονάδες επεξεργασίας συλλογής δεδομένων – αποθήκευσης δεδομένων (a)Arduino Uno – b)Raspberry Pi), c)το ρολόι πραγματικού χρόνου RTC (για την απόδοση ώρας πραγματικού χρόνου στα δεδομένα που αποθηκεύονται από στο Raspberry Pi , d) ο μετατροπέας τάσεως dc to dc για την παροχή ενέργειας +5Volt σε ολόκληρο το σύστημα , e) ο 16bit a/d μετατροπέας

σήματος-ενισχυτής για την διασύνδεση του γεωφώνου με το Arduino Uno , f) ο ενισχυτής αναλογικού σήματος βασιζόμενος στο MCP6004 (για την διασύνδεση του αναλογικού επιταχυνσιόμετρου ADXL335 με το Arduino Uno) και τέλος g) η γέφυρα σύνδεσης (καλώδιο usb to usb) παρέχει σειριακή επικοινωνία μεταξύ Arduino Uno με Raspberry Pi. και παράλληλα παροχή τάσεως λειτουργίας +5volt στο Arduino Uno.

6.1.1 Ιδιοκατασκευή αισθητήρων επιτάχυνσης

Για τους αισθητήρες επιτάχυνσης έγινε μια ιδιοκατασκευή προκειμένου να στηριχθούν στο έδαφος τα επιταχυνσιόμετρα μας με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που συνδέονται τα γεωφώνα. Στην παρακάτω εικόνα διακρίνουμε την ιδιοκατασκευή για το τριαξονικό αναλογικό επιταχυνσιόμετρο ADXL335 (**Εικόνα 64**).



Εικόνα 64: *Ιδιοκατασκευή Στήριξης Αναλογικού Επιταχυνσιόμετρου ADXL335*

Ο ίδιος τρόπος ιδιοκατασκευής εφαρμόστηκε και για το ψηφιακό επιταχυνσιόμετρο χαμηλού κόστους MMA8452Q (**Εικόνα 65**).



Εικόνα 65: *Ιδιοκατασκευή Στήριξης Ψηφιακού Επιταχυνσιόμετρου MMA8452Q*

Οι παραπάνω δύο ιδιοκατασκευές τοποθετούνται η κάθε μία σε ξεχωριστό πλαστικό αδιάβροχο και στεγανοποιημένο κουτί διαστάσεων λίγο μεγαλύτερες από τον αισθητήρα επιτάχυνσης όπως το έχουμε προσαρμόσει.

Ο αισθητήρας συνδέεται με το σύστημα συλλογής δεδομένων (Arduino Uno) με CCTV καλώδιο καλώδιο αυτό παρέχει στο επιταχυνσιόμετρο τάση τροφοδοσίας (V_{cc} , Gnd) και μεταφέρει τα σήματα της επιτάχυνσης δίχως να εισαγάγει θόρυβο από το επιταχυνσιόμετρο στο Arduino Uno.

Το καλώδιο μεταφοράς είναι θωρακισμένο και προστατεύει τα σήματα που συλλαμβάνουν οι αισθητήρες μας από επιπρόσθετους θορύβους που μπορούν να προκαλέσουν αλλοίωση των χαρακτηριστικών τους.

Στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 66**) παρουσιάζουμε τον τύπο του καλωδίου που χρησιμοποιούμε. Τα καλώδια κόκκινο-μαύρο χρησιμοποιούνται για την τροφοδοσία του αισθητήρα και το πλέγμα (μπλεντάζ – πλεγμένος χαλκός) μαζί με το καλώδιο σήματος μεταφέρουν το ωφέλιμο σήμα της επιτάχυνσης.



Εικόνα 66: Καλώδιο σύνδεσης επιταχυνσιόμετρου με το Arduino Uno

Στην περίπτωση του αναλογικού αισθητήρα επιτάχυνσης (όπου γίνεται ενίσχυση σήματος με χρήση ενισχυτή MCP6004) χρησιμοποιούμε θωρακισμένο καλώδιο και πριν και μετά τον ενισχυτή.

Γενικά τα αναλογικά σήματα είναι πιο ευαίσθητα σε παρεμβολές και εισαγωγή θορύβου σε αυτά από εξωγενείς παράγοντες (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία , βιομηχανικό περιβάλλον κ.α) απ ότι τα ψηφιακά σήματα τα οποία δείχνουν πολύ μεγάλη ανοχή στον θόρυβο.

Στην κατασκευή μας χρησιμοποιούμε θωρακισμένα καλώδια για την μεταφορά σημάτων επιτάχυνσης και ταχύτητας σε όλους τους αισθητήρες μας ανεξάρτητα του τρόπου μετάδοσης των δεδομένων τους.

Το μήκος των καλωδίων πρέπει να είναι υπολογισμένο αν πρόκειται για μεγάλες αποστάσεις γιατί εισάγονται παρασιτικές χωρητικότητες και αυτεπαγωγές οι οποίες αλλοιώνουν τα χαρακτηριστικά των προς συλλογή και επεξεργασίας σημάτων μας. Τέτοιες αλλοιώσεις μπορούν να εντοπίσουν σε συχνότητα και φάση αν το καλώδιο δεν είναι κατάλληλο.

6.1.2 Σύστημα παροχής ενέργειας

Για την παροχή ενέργειας στο σύστημα μας χρησιμοποιούμε συσσωρευτή ηλεκτρικής ενέργειας 12Volt /17Ah τοποθετημένο μέσα σε πλαστικό αδιάβροχο στεγανό κουτί IP66.

Η τάση τροφοδοσίας 12 Volt μεταφέρετε με καλώδιο τροφοδοσίας 2 x 1.5 mm χρώματος κόκκινου – μαύρου από τον συσσωρευτή προς την συσκευή μας με την χρήση του step down voltage converter (12volt=είσοδος , 5volt= έξοδος , και αντίστοιχα 7volt =έξοδος).

Το σύστημα παροχής ενέργειας ασφαρίζεται με ασφαλειοθήκη και ασφάλεια 1Amp και προφυλάσσει το σύστημα μας από τυχόν προβλήματα (βραχυκύκλωμα).

6.2 Λογισμικό

Το σύστημα που έχουμε κατασκευάσει για τη υποστήριξη του συστήματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από δύο μικροεπεξεργαστές (Arduino Uno , Raspberry Pi).

Το Arduino Uno συλλέγει επεξεργάζεται και μεταφέρει μέσω της σειριακής USB Θύρας του τα δεδομένα από τους αισθητήρες (αναλογικό επιταχυνσόμετρο , ψηφιακό επιταχυνσόμετρο, γεώφωνο), στην σειριακή USB Θύρα του Raspberry Pi στο οποίο γίνεται η αποθήκευση των δεδομένων σε συνθήκες πραγματικού χρόνου.

Οι παραπάνω διεργασίες για να γίνουν θα πρέπει να προγραμματίσουμε κατάλληλα (wiring , python) το arduino Uno και το Raspberry Pi ώστε η συσκευή μας να μπορεί να λειτουργεί σαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα . Και οι δύο πλατφόρμες υλικού που χρησιμοποιούμε είναι ανοικτού κώδικα υλικού και παρόμοιος ανοικτού κώδικα λογισμικού.

Τέλος στο Raspberry Pi ενεργοποιούμε τις υπηρεσίες ssh , sftp , spi , i2c και την υπηρεσία δυνατότητας απομακρυσμένης πρόσβασης VNC (Virtual Network Control) η οποία μας επιτρέπει τον έλεγχο του συστήματος μας από απόσταση μέσω δικτύου.

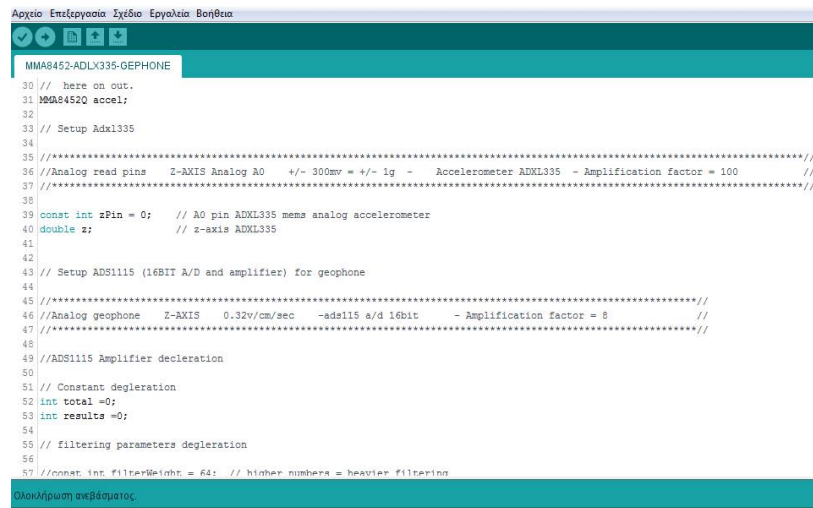
6.2.1 Λογισμικό Arduino Uno (wiring)

Το Arduino Uno συλλέγει επεξεργάζεται και μεταφέρει στο Raspberry Pi μέσω της USB σειριακής θύρας του με συχνότητα δειγματοληψίας 220 Hz τα δεδομένα από τους αισθητήρες:

- 3-Αξονικό ψηφιακό επιταχυνσόμετρο MMA8452Q

- 3-Αξονικό αναλογικό επιταχυνσόμετρο ADXL335
- 1-Αξονα γεώφωνο GD-11S

Ένα μέρος από τον κώδικα (sketch) που ‘τρέχει’ στο Arduino Uno περιγράφεται στην επόμενη εικόνα (**Εικόνα 67**), ενώ ολόκληρος ο κώδικάς βρίσκεται στο παράρτημα Α.



```

Αρχείο  Επιχειρηστικά Σχέδιο  Εργαλεία  Βοήθεια
MMA8452-ADXL335-GEOPHONE
30 // here on out.
31 MMA8452Q accel;
32
33 // Setup Adxl335
34
35 //*****
36 //Analog read pins  Z-AXIS Analog A0  +/- 300mg = +/- 1g  - Accelerometer ADXL335 - Amplification factor = 100  //
37 //*****
38
39 const int sPin = 0;  // A0 pin ADXL335 mma analog accelerometer
40 double z;  // z-axis ADXL335
41
42
43 // Setup ADS1115 (16BIT A/D and amplifier) for geophone
44
45 //*****
46 //Analog geophone  Z-AXIS  0.32v/cm/sec  -ads115 a/d 16bit  - Amplification factor = 8  //
47 //*****
48
49 //ADS1115 Amplifier decleration
50
51 // Constant decleration
52 int total =0;
53 int results =0;
54
55 // filtering parameters decleration
56
57 //const int filterWeight = 64; // higher numbers = heavier filtering
58
Ολοκλήρωση κωδικού

```

Εικόνα 67: Ο κώδικας (sketch) για το Arduino Uno

Έτοιμες Βιβλιοθήκες για το 3-Αξονικό ψηφιακό επιταχυνσίμετρο MMA8452Q καθώς και για τον μετατροπέα-ενισχυτή A/D 16bit ADS1115 ενσωματώνονται στον συνολικό κώδικα που φτιάξαμε για την εφαρμογή μας.

6.2.2 Λογισμικό Raspberry Pi (python)

Το Raspberry Pi δέχεται μέσω της USB σειριακής θύρας του τα δεδομένα από τους αισθητήρες του Arduino Uno υπό μορφή όπως φάνετε από την καταγραφή στην επόμενη σελίδα (**Εικόνα 68**).

```

-983.398,-29,0
-986.328,68,-2
-984.375,-156,-2
-983.398,-4,-1
-982.422,0,-1
-981.445,-9,-1
-982.422,-24,-1
-981.445,-83,2
-980.469,-83,2
-980.469,58,1
-977.539,48,1
-984.375,-112,3
-984.375,-29,3
-981.445,39,4
-986.328,34,4
-980.469,-43,0
-981.445,-122,0
-986.328,-19,-4
-985.352,19,-4
-980.469,43,-4
-984.375,-34,-4
-984.375,-151,-5
-983.398,0,-5
-981.445,24,-3
-987.305,-9,-3
-978.516,-112,-3

```

Εικόνα 68: Καταγραφή δεδομένων από Arduino Uno προς Raspberry Pi.

Για την καταγραφή και αποθήκευση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιούμε το παρακάτω script γραμμένο σε γλώσσα python το οποίο ‘τρέχει’ στο Raspberry Pi. Ένα μέρος από το script (*logger.py*) που ‘τρέχει’ στο Raspberry Pi περιγράφεται στην επόμενη Εικόνα (Εικόνα 69), ενώ ολόκληρος ο κώδικας βρίσκεται στο παράρτημα Α.

```

1  #!/usr/bin/env python
2
3  from datetime import datetime
4  import serial, io
5
6  outfile = '/home/pi/data.csv'
7
8
9  ser = serial.Serial(
10     port='/dev/ttyACM0',
11     baudrate=230400,
12
13 )
14
15
16  sio = io.TextIOWrapper(
17     io.BufferedRWPair(ser, ser, 1),
18     encoding='ascii', newline='\n'
19 )
20
21
22  with open(outfile, 'a') as f:
23     while ser.isOpen():
24         datastring = sio.readline()
25         f.write(datetime.now().isoformat() + ',' + datastring)
26         f.flush()
27
28  ser.close()

```

Εικόνα 69: Python Script logger.py

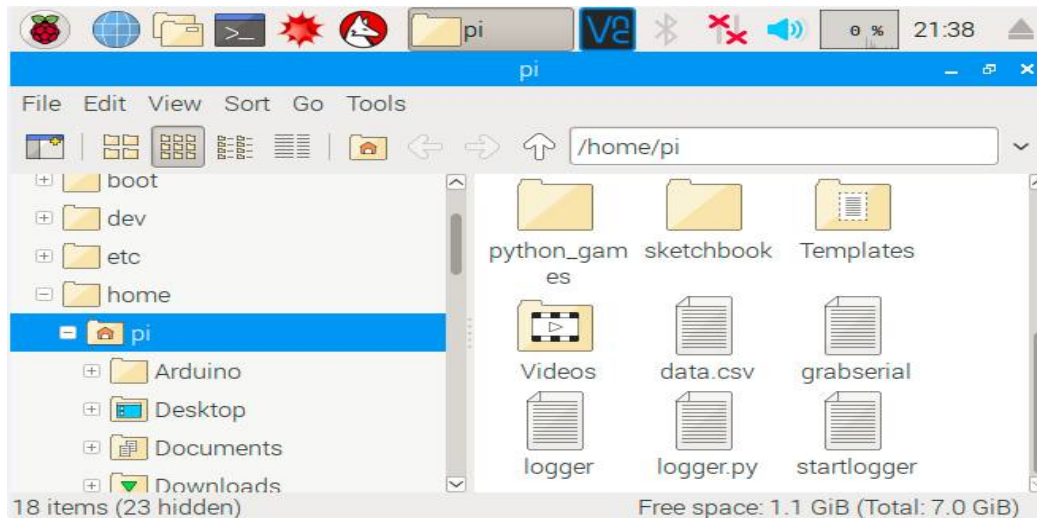
Ο παραπάνω κώδικας (script) ενσωματώνει στα δεδομένα πραγματικό χρόνο για κάθε τιμή 220 φορές το δευτερόλεπτο (timestamp) και συγχρονίζει την ταχύτητα επικοινωνίας των σειριακών θυρών του Arduino Uno με το Raspberry Pi (Στην περίπτωση μας στην ταχύτητα των 230400 baud).

Το Raspberry Pi δημιουργεί ένα αρχείο τυπου comma separated value (.csv) και αποθηκεύει σε αυτό όλες τις τιμές των δεδομένων από τους τρεις αισθητήρες μας. Παράλληλα ενσωματώνει τον πραγματικό χρόνο (timestamp) κατά τον οποίο ελήφθησαν τα δεδομένα από τον κάθε αισθητήρα. Τα δεδομένα στο αρχείο καταγραφής έχουν την μορφή που φαίνεται στο παρακάτω Εικόνα (Πίνακας 4) ενώ το αρχείο αποθηκεύεται στην κάρτα mini sd που διαθέτει το Raspberry Pi.

	A	B	C	D
1	DATE / TIME	MMA8452-ZAXIS	ADXL335-ZAXIS	GEOPHONE Z-AXIS
2	2018-06-07T21:58:37.947824	-999.023	-92	-89
3	2018-06-07T21:58:37.951971	-1002.93	34	2
4	2018-06-07T21:58:37.956879	-993.164	-14	2
5	2018-06-07T21:58:37.961174	-1000.977	-78	28
6	2018-06-07T21:58:37.965328	-996.094	-73	28
7	2018-06-07T21:58:37.969302	-1002.93	39	26
8	2018-06-07T21:58:37.973135	-999.023	14	26
9	2018-06-07T21:58:37.977946	-1000.977	-83	11
10	2018-06-07T21:58:37.981994	-1000	-97	11
11	2018-06-07T21:58:37.985948	-998.047	-48	-8
12	2018-06-07T21:58:37.991199	-997.07	-39	-8
13	2018-06-07T21:58:37.995521	-1002.93	-43	-2
14	2018-06-07T21:58:38.000159	-995.117	-87	-2
15	2018-06-07T21:58:38.004473	-1003.906	-78	14
16	2018-06-07T21:58:38.008817	-999.023	-9	14
17	2018-06-07T21:58:38.013388	-996.094	-48	26
18	2018-06-07T21:58:38.018071	-997.07	-122	26
19	2018-06-07T21:58:38.022134	-1000	-53	36
20	2018-06-07T21:58:38.025915	-997.07	9	36
21	2018-06-07T21:58:38.030225	-1000.977	-29	34
22	2018-06-07T21:58:38.035079	-1000	-9	34
23	2018-06-07T21:58:38.039192	-1004.883	-39	32
24	2018-06-07T21:58:38.044444	-995.117	-73	32
25	2018-06-07T21:58:38.048469	-1002.93	-4	10

Πίνακας 4 : Αρχείο καταγραφής με time stamp από το Raspberry Pi

Παρακάτω στην (Εικόνα 70) βλέπουμε το αρχείο καταγραφής (data.csv) αποθηκευμένο στην κάρτα mini sd σε μορφή αρχείου (.csv) στην διαδρομή (path) /home/Pi στο Raspberry Pi.



Εικόνα 70: Αποθηκευμένο Αρχείο καταγραφής σε μορφή (.csv) στο Raspberry Pi

6.3 Χειρισμός συσκευής για την καταγραφή δεδομένων

Για να ξεκινήσουμε μια καταγραφή δεδομένων από τους αισθητήρες επιτάχυνσης και ταχύτητας με το σύστημα μας προβαίνουμε στις παρακάτω διαδικασίες :

- Μεταφέρουμε τον εξοπλισμό στο πεδίο των μετρήσεων
- Τοποθετούμε τους αισθητήρες στο σημείο που επιθυμούμε
- Συνδέουμε την Μπαταρία με το σύστημά μας
- Τροφοδοτούμε το σύστημα μας με τάση θέτοντας τον διακόπτη από το κουτί της μπαταρίας στην θέση ON
- Παρατηρούμε ότι ανάβουν τα ενδεικτικά λαμπάκια (led) σε διάφορα σημεία ου συστήματος μας
- Αφήνουμε περίπου 30 δευτερόλεπτα να ανέβει το λειτουργικό του Raspberry Pi και να ανεβάσει τις υπηρεσίες του
- Συνδεόμαστε Ασύρματα (wifi) η ενσύρματα (καλώδιο Ethernet) από τον υπολογιστή μας με το σύστημα μας αφού κάνουμε τις απαραίτητες ρυθμίσεις δικτύου στον υπολογιστή μας (Οι ρυθμίσεις αναφέρονται στο Παράρτημα 1)
- Αφού συνδεθούμε ανοίγουμε το VNC στον υπολογιστή μας και συνδεόμαστε με χρήση κωδικών επιβεβαίωσης με το σύστημα μας. Συνδεθήκαμε!!!!!!

- Ανοίγουμε ένα terminal και πληκτρολογούμε στο command prompt (>> sudo python logger.py) και πατώντας enter η καταγραφή μας ξεκινάει.
- Καταγράφουμε για όσο χρόνο θέλουμε και στην συνέχεια στο terminal που έχουμε ανοίξει όταν θέλουμε να τελειώσουμε την καταγραφή πατάμε ctrl+x .Η καταγραφή έχει σταματήσει. Ένα αρχείο με όνομα data.csv βρίσκεται στην διαδρομή /home/pi και περιέχει όλες τις τιμές που κατέγραψε.
- Τραβάμε το αρχείο στον υπολογιστή μας με την χρήση sftp client software (secure ftp π.χ filezilla) και το επεξεργαζόμαστε.
- Επαναλαμβάνουμε την διαδικασία όσες φορές μας είναι απαραίτητο για τις μετρήσεις μας.
- Για να κλείσουμε την συσκευή μας πηγαίνουμε ξανά στο terminal που έχουμε ανοικτό και γράφουμε στο command prompt (>> sudo shutdown – h now) και πατάμε enter.
- Τέλος ένα λεπτό μετά το software shutdown του συστήματος κι αφού στο Raspberry Pi ανάβει σταθερά ένα κόκκινο led θέτουμε τον διακόπτη της μπαταρίας στην θέση OFF.

7. ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

Έφτασε η στιγμή να δούμε αν το σύστημα που έχουμε κατασκευάσει μπορεί να ανταπεξέλθει στα ζητούμενα της διπλωματικής μας εργασίας.

Μπορεί μια συσκευή χαμηλού κόστους με υλικολογισμικού ανοιχτού κώδικα και με επιταχυνσιόμετρα αντί γεώφωνα να μας κάνει ανίχνευση και καταγραφή κυμάτων Raleigh ?

Μπορεί η παρούσα συσκευή με χρήση γεωφώνου σαν αισθητήρα να μας παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια σε σχέση με μια παρόμοια συσκευή του εμπορίου ?

Μπορούν τα επιταχυνσιόμετρα χαμηλού κόστους να αντικαταστήσουν τα γεώφωνα ?

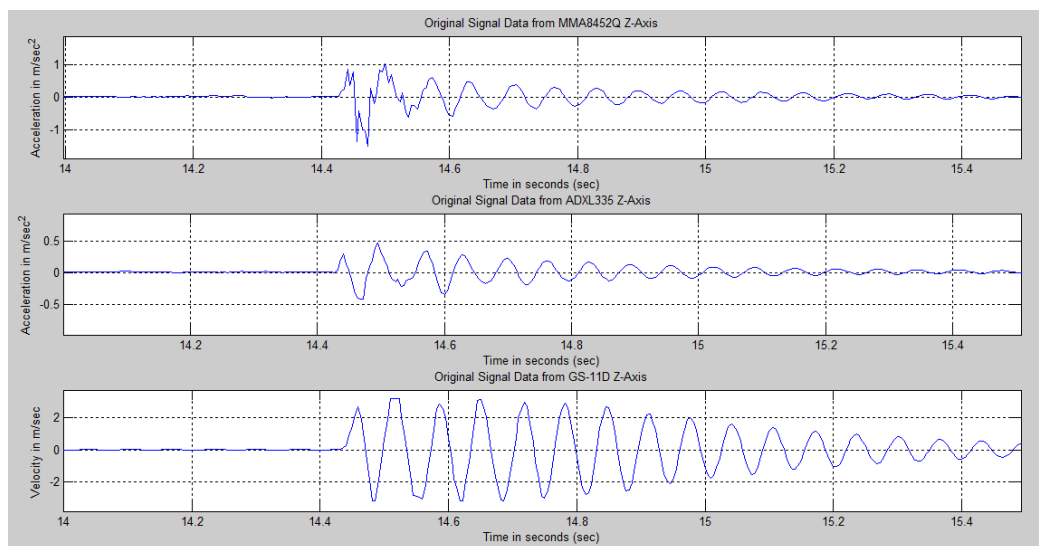
7.1 Καταγραφή δεδομένων – Πείραμα

Το πείραμα διεξήχθη στο σημείο του νομού Κερκύρας με πηγή παραγωγής σεισμικών κυμάτων το χτύπημα μιας μεταλλικής πλακάς με σφυρί (βαριοπούλα) η οποία εφάπτονταν στο έδαφος.

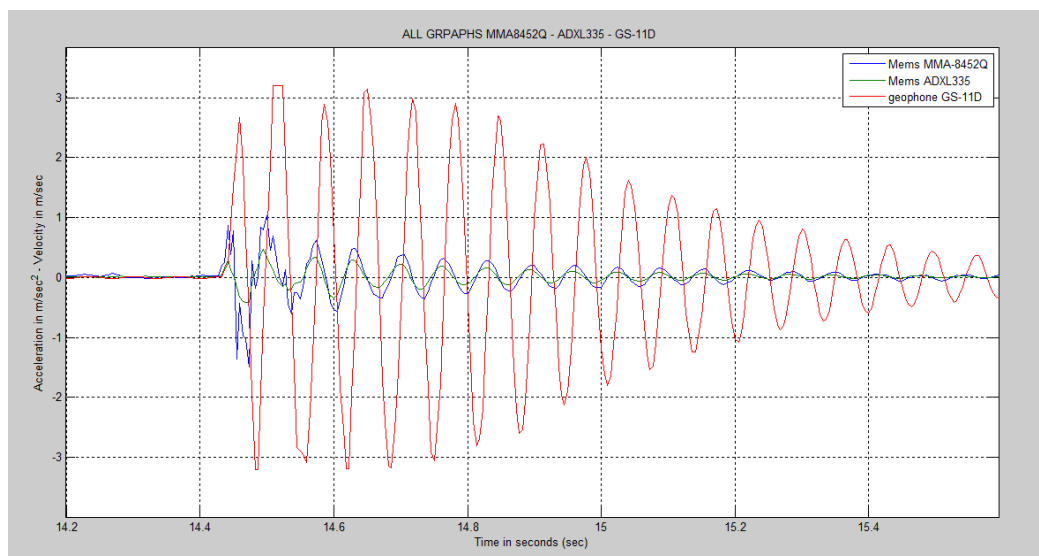
Για την καταγραφή δεδομένων με το σύστημα μας κάνουμε τις παρακάτω ενέργειες :

- Μεταφέρουμε τον εξοπλισμό στο πεδίο των μετρήσεων.
- Τοποθετούμε τους αισθητήρες του συστήματος μας στο έδαφος στο ίδιο σχεδόν σημείο.
- Ξεκινάμε και κατόπιν ολοκληρώνουμε την διαδικασία καταγραφής.
- Μεταφέρουμε τα δεδομένα των μετρήσεων του συστήματος μας στον υπολογιστή μας.
- Κλείνουμε με ασφάλεια το σύστημα μας.

Αφού επεξεργασθήκαμε τα αποτελέσματα που κατέγραψε το σύστημά μας από το πείραμα φτιάχνουμε τα διαγράμματα απόκρισης για τον κάθε ένα αισθητήρα χωριστά.



Εικόνα 71: Σύγκριση των επιταχύνσεων - ταχυτήτων των αισθητήρων ξεχωριστά

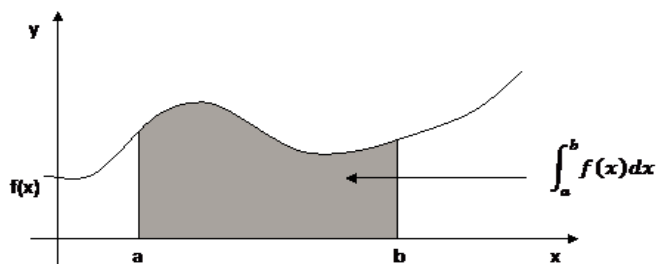


Εικόνα 72: Σύγκριση των επιταχύνσεων - ταχυτήτων των αισθητήρων μαζί

Παρατηρούμε ότι τα σήματα στην εικόνα 72 παρουσιάζουν διαφορά φάσεως με το σήμα της ταχύτητας του γεωφώνου να επιπορεύεται των σημάτων της επιτάχυνσης των mem's επιταχυνσιόμετρων ADXL335 και MMA8452Q.

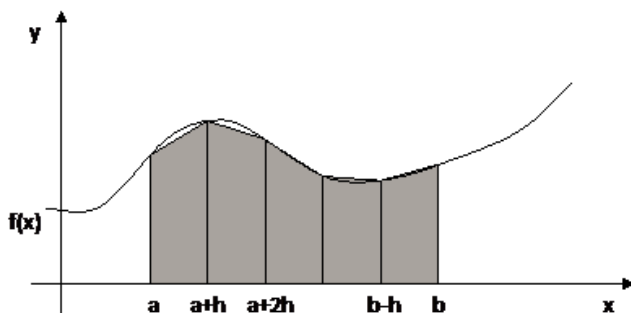
7.1.1 Κανονικοποίηση δεδομένων (Πρώτη Ολοκλήρωση)

Η αριθμητική ολοκλήρωση μιας συνάρτησης είναι ο προσεγγιστικός υπολογισμός του ολοκληρώματος της συνάρτησης $f(x)$ από ένα σημείο αρχής $x=a$ έως ένα τελικό σημείο $x=b$. Το ολοκλήρωμα είναι το εμβαδόν της επιφάνειας κάτω από την $f(x)$ στο διάστημα $a \leq x \leq b$ (Εικόνα 73).



Εικόνα 73 : Η αριθμητική ολοκλήρωση συνάρτησης

Η προσέγγιση του τέλει ολοκληρώματος με τη μέθοδο των τραπεζίων (Εικόνα 74) γίνεται τεμαχίζοντας το διάστημα $[a, b]$ σε n τμήματα πλάτους h και αθροίζοντας τα εμβαδά των τραπεζίων.



Εικόνα 74: Η τραπεζοειδής προσέγγιση

$$\begin{aligned} \text{Sum} &= \frac{1}{2} h [f(a) + f(a+h)] + \frac{1}{2} h [f(a+h) + f(a+2h)] + \dots + \frac{1}{2} h [f(b-h) + f(b)] \\ &= \frac{h}{2} [f(a) + f(b)] + h [f(a+h) + f(a+2h) + \dots + f(b-h)] \end{aligned}$$

Στο δικό μας σύστημα διαθέτουμε αισθητήρες επιτάχυνσης (accelerometers) και αισθητήρες ταχύτητας (geophones). Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τα δεδομένα μας και το αν πραγματικά η συσκευή μας μπορεί να μας καταγράψει τα δεδομένα που ζητάμε θα πρέπει να κανονικοποιήσουμε τα δεδομένα των αισθητήρων μας και να τα μετατρέψουμε όλα σε

ταχύτητα. Αρα θα πρέπει τα δεδομένα από τις τιμές της επιτάχυνσης (m/sec^2) να μετατραπούν σε τιμές ταχύτητας (m/sec).

Από την φυσική γνωρίζουμε ότι η ταχύτητα είναι το ολοκλήρωμα της επιτάχυνσης για χρονικό διάστημα από 0 έως T. Κατά συνέπεια η σχέση που μας δίνει την ταχύτητα από την επιτάχυνση είναι η παρακάτω :

$$v = \int a dt$$

Όπου V= velocity (ταχύτητα) , a= acceleration (επιτάχυνση) και dt= το χρονικό βήμα σε sec (δευτερόλεπτα).

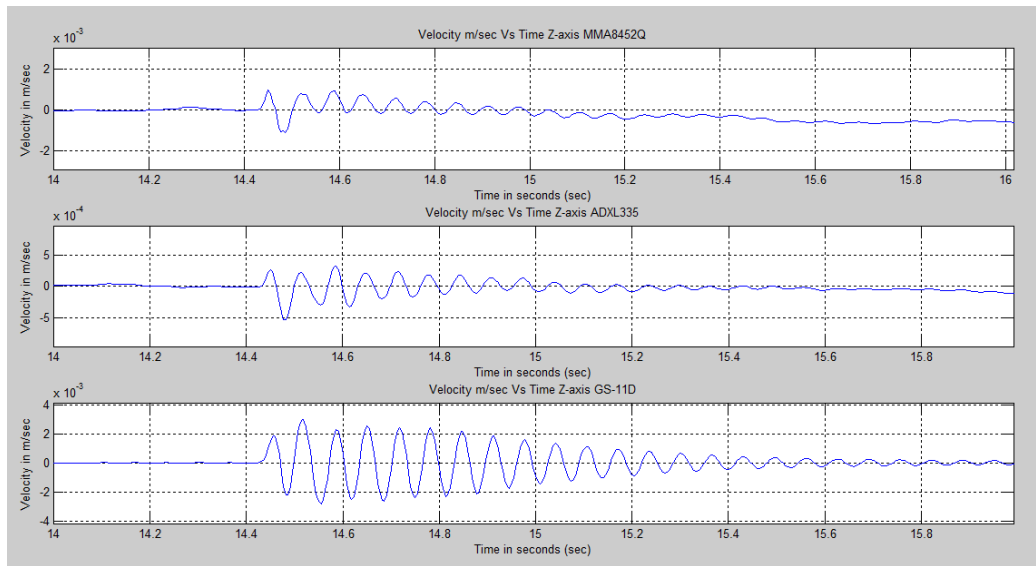
Για την ολοκλήρωση των τιμών της επιτάχυνσης των αισθητήρων μας, συνάρτηση του χρόνου (1/συχνότητα δειγματοληψίας $1/\text{fs}=220\text{Hz}$) εφαρμόζουμε την προαναφερθείσα μέθοδο της τραπεζοειδούς προσέγγισης.

Στην παρακάτω εικόνα (**Εικόνα 75**) που ακολουθεί βλέπουμε ένα από τα παραδείγματα κώδικα (Octave) που χρησιμοποιήσαμε και που μας μετατρέπει αυτόματα μια προς μία τις τιμές των αισθητήρων μας από επιτάχυνση σε ταχύτητα και κατόπιν μας προβάλλει τα αποτελέσματα σε κυματομορφή ταχύτητας. Τον συνολικό κώδικα τον παραθέτουμε και στο Παράρτημα Α.

```
1 - clear;
2 - A=csvread('integration-y.csv') %read data file
3 - x=A(:,1)
4 - y=A(:,2)
5 - for i=2:length(x) %run the length of the array
6 -     v(i-1) = trapz(x(1:i),y(1:i)); % integral at each point
7 - end
8 - subplot(211),plot(x,y)
9 - title ( 'Acceleration in m/sec^2 Vs Time Y-axis ');
10 - xlabel('Time in seconds (sec)');
11 - ylabel('Acceleration in m/sec^2');
12 - grid on;
13
14 - subplot(212),plot(x(2:end),v)
15 - title ( 'Velocity m/sec Vs Time Y-axis');
16 - xlabel('Time in seconds (sec)');
17 - ylabel('Velocity in m/sec');
18 - grid on;
```

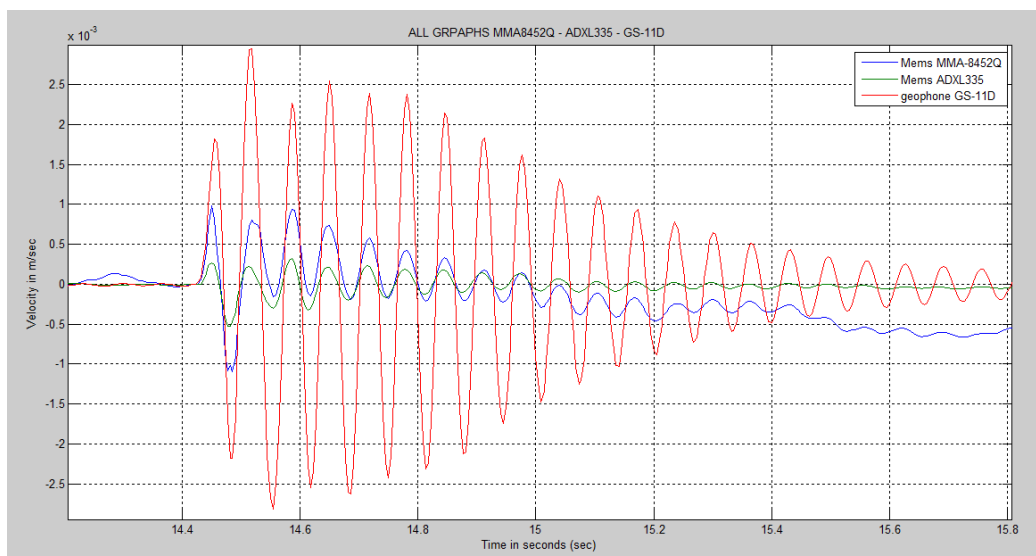
Εικόνα 75: Μετατροπή επιτάχυνσης σε ταχύτητα (Κώδικας σε OCTAVE)

Μετατρέπουμε τα δεδομένα των επιταχύνσεων των αισθητήρων σε ταχύτητα και τα προβάλλουμε ξανά στην επόμενη σελίδα με την μορφή κυματομορφών στην (**Εικόνα 76 και Εικόνα 77**) .



Εικόνα 76: Σύγκριση των ταχυτήτων ξεχωριστά (επιταχυνσιόμετρα –γεώφωνο)

Από την σύγκριση που κάνουμε στις κυματομορφές των αισθητήρων παρατηρούμε πως τα αποτελέσματα των χαμηλού κόστους αισθητήρων (επιταχυνσιόμετρα MMA8452Q και ADXL335) σε σχέση με τα δεδομένα από το γεώφωνο (GS-11D) του εμπορικού συστήματος rossina soil spy παρουσιάζουν ομοιότητες στην φάση και την συχνότητα αλλά διαφορές στο πλάτος του σήματος (μέγεθος της ταχύτητας) με το γεώφωνο GS-11D να καταγράφει μεγαλύτερες ταχύτητας σε σχέση με αυτές από τα επιταχυνσιόμετρα MMA8452Q και ADXL335.



Εικόνα 77: Σύγκριση όλων των ταχυτήτων μαζί (επιταχυνσιόμετρα–γεώφωνο)

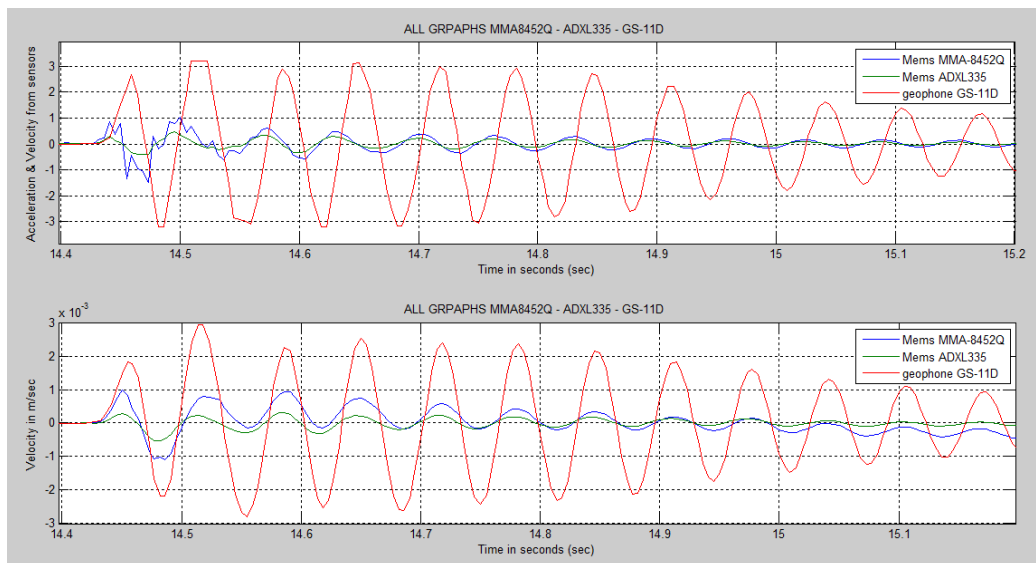
7.1.2 Ανίχνευση και Καταγραφή Κυμάτων Rayleigh

Στο κεφάλαιο 2.4 επεξηγήσαμε τους δύο τρόπους με τους οποίους μπορούμε να καταγράψουμε από τα σήματα μας κύματα Rayleigh.

- Με την μέθοδο των πρώτων αφίξεων
- Με την μέθοδο MASW

7.1.2.1 Έλεγχος με την μέθοδο των πρώτων αφίξεων

Για να ελέγξουμε ότι έχουμε δραστηριότητα πρώτων αφίξεων στα σήματα που καταγράφουν οι αισθητήρες μας, εφαρμόζουμε στα δεδομένα μας (πριν και μετά την πρώτη ολοκλήρωση τους (**Εικόνα 78**) την μεθοδολογία αλγόριθμου που αναπτύξαμε βασισμένη στην επιστημονική δημοσίευση του Μάρκου Αυλωνίτη << Avlonitis, M. (2016). *On the problem of early detection of users interaction outbreaks via stochastic differential models* >>.



Εικόνα 78: Σήματα ταχύτητας – επιτάχυνσης πριν και μετά την ολοκλήρωση

7.1.2.2 Προσέγγιση πρώτων αφίξεων με χρήση του αλγορίθμου που αναπτύξαμε

Έχουν εξεταστεί διάφορες μέθοδοι για τον εντοπισμό του χρόνου των πρώτων αφίξεων με ασφάλεια και ακρίβεια, ακόμη και σε σήματα με χαμηλό συντελεστή λόγου σήματος προς θόρυβο (SNR).

Ένας από τους πιο κλασσικούς αλγορίθμους στη βιβλιογραφία είναι ο STA / LTA. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται σε δύο παράθυρα που μετατοπίζονται στα δεδομένα και ο πρώτος χρόνος άφιξης επιλέγεται όταν ο λόγος STA / LTA είναι μεγαλύτερος από ένα συγκεκριμένο όριο (Rex, 1978).

Μια τροποποιημένη έκδοση του προαναφερθέντος αλγορίθμου προτάθηκε για να βελτιώσει την επιλογή πρώτης άφιξης όταν το SNR είναι χαμηλό (Zuolin & Stewart, 2005).

Μια άλλη ευρεία μέθοδος που χρησιμοποιείται για τα μικρό-σεισμικά σήματα είναι η AIC (Leonard & Kennett, 1999) και βασίζεται στην αυτορυθμιζόμενη μοντελοποίηση.

Επιπλέον, οι εναλλακτικές μέθοδοι κάνουν χρήση της μεθόδου κούρτωσης (2002) σε συνδυασμό με την ανισότητα Chebyshev (2004) για να αυξήσουν την εγκυρότητα της επιλογής του πρώτου χρόνου άφιξης (Saragiotis, Hadjileontiadis, & Panas, 2004) (Saragiotis C. 2002).

Οι Yue Li και οι Li (Li, Wang, Lin, & Zhong, 2018) πρότειναν τον αλγόριθμο DWSW, ο οποίος εκτελέστηκε με μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με τη μέθοδο STA / LTA, AIC και Kurtosis.

Επιπλέον, κάποιοι άλλοι ερευνητές εφάρμοσαν μεθόδους φιλτραρίσματος όπως το Kalman Filter (Baziw & Jones, 2002), (Baziw et al 2004), (Xia, Wang, & Li, 2016) και πιο πρόσφατα (Omar, 2018) Laplacian του Gaussian φίλτρου. Ο κύριος στόχος τους ήταν η εξάλειψη του θορύβου και η επίτευξη μεγαλύτερης ακρίβειας κατά την επιλογή του πρώτου χρόνου άφιξης.

Εμείς για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήσαμε έναν πρόσφατα δημοσιευμένο αλγόριθμο, ο οποίος βασίζεται σε ένα διαφορικό στοχαστικό μοντέλο και χρησιμοποιήθηκε για να προσεγγίσει την έγκαιρη ανίχνευση επιδημίας αλληλεπίδρασης χρηστών.

Πιο συγκεκριμένα, το προαναφερθέν στοχαστικό μοντέλο διαφορικού λογισμού βασίζεται στο λεγόμενο μοντέλο Verhulst με τη ντετερμινιστική φαινομενολογική εξίσωση :

$$\dot{X} = \lambda X - X^2$$

όπου X είναι το μέτρο του μεγέθους ενός βιολογικού πληθυσμού και λ η παράμετρος ανάπτυξης της Μαλθουσίας.

Υποθέτουμε ότι η παράμετρος λ μπορεί να γραφεί ως:

$$\lambda_t = \lambda + \sigma \xi_t$$

η οποία είναι η μέση τιμή της.

Η παράμετρος ξ είναι ο Gaussian λευκός θόρυβος και μας μετρά την ένταση του εξωτερικού θορύβου.

Η τελική στοχαστική εξίσωση είναι η :

$$dX_t = (\lambda X_t - X_t^2) dt + \sigma X_t dW_t$$

Προσεγγίζοντας το πρόβλημα των κρουσμάτων, σημειώνεται ότι ένα ξέσπασμα είναι στην πραγματικότητα το αρχικό στάδιο της ανάπτυξης οποιουδήποτε πληθυσμού, όπως αυτό διαμορφώνεται από το μοντέλο Verhulst.

Επιπλέον, τα αρχικά στάδια του μοντέλου Verhulst μπορούν να ερμηνευθούν ως χρονικά διαστήματα όπου η μεταβλητή X του πληθυσμού είναι πολύ χαμηλή.

Στο όριο $X_t^2 \ll X_t$

προτείνεται η ακόλουθη στοχαστική διαφορική εξίσωση προκειμένου να μοντελοποιηθεί η εξέλιξη των εστιών.

$$[DX]_t = \lambda X_t dt + \sigma X_t dW_t$$

Με αυτή τη μορφή δεν υπάρχει κανένα κριτήριο για την έγκαιρη ανίχνευση, έτσι μετατρέπουμε την εξίσωση στη μορφή

$$d \ln X_t = \lambda dt + \sigma dw_t$$

και τελικά καταλήγουμε με τη μεταβληθείσα μεταβλητή μας

$$Z_t = \ln X_t - \lambda t \quad \text{όπου} \quad dZ_t = \sigma dW_t.$$

Με βάση αυτή τη μεθοδολογία το κριτήριο για μια επιδημία τώρα, είναι το γεγονός ότι οι αυξήσεις της νέας μεταβλητής εκτελούν μια τυχαία διαδικασία.

Κατά την εμφάνιση μιας επερχόμενης έκρηξης, η αρχική μεταβλητή έχει έναν μετρήσιμο συντελεστή συσχέτισης ο οποίος υποδηλώνει ότι τα δεδομένα μας ακολουθούν ενδεχομένως μια τάση και δεν είναι εντελώς τυχαία.

Σε σύγκριση, η μετασχηματισμένη μεταβλητή έχει έναν ελάχιστο συντελεστή συσχέτισης ο οποίος είναι λογικός αν το θεωρούμε ως τυχαίο. Σύμφωνα με το προαναφερθέν μοντέλο, ο προτεινόμενος τρόπος υπολογισμού του συσχετισμού ήταν να χρησιμοποιηθεί η συνάρτηση διακύμανσης [Van marcke].

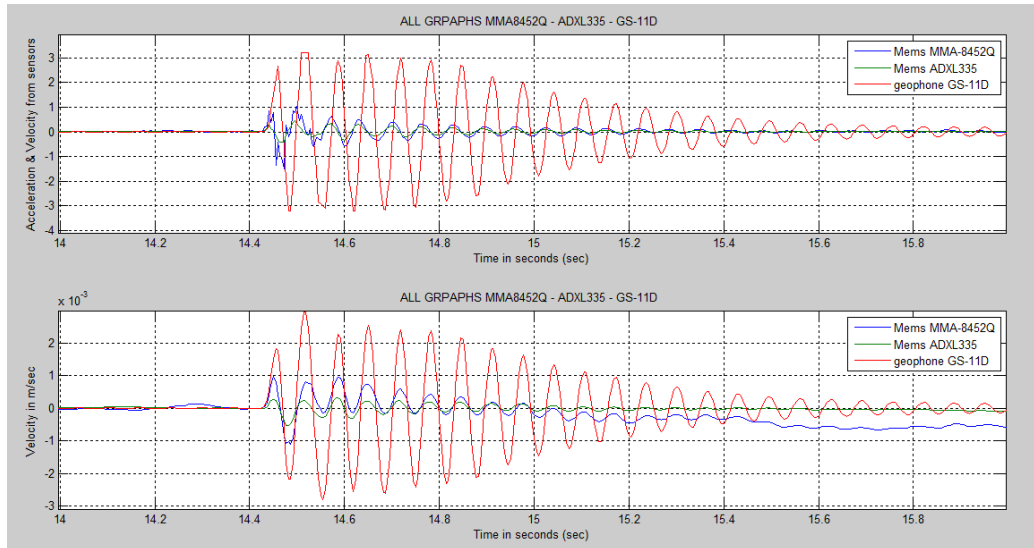
$$\gamma(T) = s_T^2 / s^2$$

όπου T είναι το παράθυρο κινούμενου μέσου όρου και s^2 η διακύμανση.

Έτσι, εμφανίζεται ένα ξέσπασμα όταν η συνάρτηση διακύμανσης της πρώτης μεταβλητής δεν ακολουθεί μια κατανομή νόμου ισχύος και η μετασχηματισμένη έχει σχεδόν τέλει σχήμα νόμου ισχύος.

7.1.2.3 Συγκριτικά Αποτελέσματα Μετρήσεων

Κατόπιν εφαρμογής του αλγόριθμου που μας αναγνωρίζει τις πρώτες αφίξεις σεισμικών κυμάτων Rayleigh στα σήματα των αισθητήρων μας (πριν και μετά από την εφαρμογή της πρώτης ολοκλήρωσης σε αυτά εικόνα 79) παίρνουμε τις παρακάτω τιμές πρώτων χρόνων άφιξης (Πίνακας 5).



Εικόνα 79: Σήματα ταχύτητας – επιτάχυνσης πριν και μετά την ολοκλήρωση

Στον Παρακάτω πίνακα (πίνακας 5) φαίνονται οι χρόνοι άφιξης σημάτων (first arrival times) από την εφαρμογή του αλγόριθμου που χρησιμοποιήσαμε.

A/A	First Arrival time Before Integration	First Arrival time After Integration
Ψηφιακό Επιταχυνσιόμετρο (Mem's) MMA8452Q	14.436, 0.24525 (3 rd)	14.445, 0.0007004 (3 rd)
Αναλογικό Επιταχυνσιόμετρο (Mem's) ADXL335	14.432, 0.047546 (1 st)	14.441, 0.00013721 (2 nd)
Γεώφωνο GS-11D (4.5Hz)	14.436, 0.12844 (2 nd)	14.436, 0.12844 (1 st)

Πίνακας 5 : Συγκριτικός πίνακας τιμών χρόνων first break

Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5 (εφαρμογή αλγόριθμου αναγνώρισης σημάτων first arrivals) εξάγουμε το συμπέρασμα ότι πριν και μετά την ολοκλήρωση των τιμών των σημάτων των αισθητήρων μας δεν έχουμε κοινό σημείο χρόνου άφιξης σημάτων (first arrivals) σε καμιά από τις δυο περιπτώσεις και για τους τρεις αισθητήρες μας ταυτόχρονα.

Πιο συγκεκριμένα στα σήματα από τους αισθητήρες πριν την εφαρμογής της ολοκλήρωσης των σημάτων έχουμε κοινό χρόνο άφιξης των σημάτων για τους αισθητήρες (ψηφιακό επιταχυνσόμετρο χαμηλού κόστους MMA8452Q και γεωφώνου GS-11D 4.5Hz) ενώ το σήμα άφιξης στο αναλογικό επιταχυνσόμετρο χαμηλού κόστους ADXL335 προπορεύεται των παραπάνω δύο σημάτων.

Μετά την ολοκλήρωση των τιμών των σημάτων των αισθητήρων δεν έχουν και πάλι κοινό σημείο άφιξης σημάτων first arrivals ενώ παράλληλα παρατηρούμε πως τα σήματα προπορεύονται με την ακόλουθη σειρά (Γεωφώνο GS-11D 4.5Hz – Αναλογικό επιταχυνσόμετρο χαμηλού κόστους ADXL335 - Ψηφιακό επιταχυνσόμετρο χαμηλού κόστους MMA8452Q).

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι οι αισθητήρες επιτάχυνσης χαμηλού κόστους που χρησιμοποιήσαμε δεν μπορούν να αναπαραστήσουν πιστά τις τιμές της ταχύτητας του γεωφώνου και αυτό μπορεί να δικαιολογηθεί διότι κατά την πρώτη ολοκλήρωση των σημάτων των επιταχύνσεων από τους αισθητήρες εισαγάγετε μια διαφορά φάσης (χρονική καθυστέρηση λόγω επεξεργασίας σημάτων) η οποία ευθύνεται για τις χρονικές διαφορές του πίνακα 5.

Συμπέρασμα η μεθοδολογία των first arrivals μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια από το σύστημά μας εφόσον γίνουν οι απαραίτητες ενέργειες (Αρχειοποίηση παραμέτρων – Calibration) ώστε να αφαιρεθεί ο χρόνος που εισαγάγετε ως καθυστέρηση στα σήματα που μετατρέπουμε από επιτάχυνση σε ταχύτητα. Με την τέλεση πολλών πειραμάτων μπορούμε να βρούμε την χρονική σταθερά καθυστέρησης για κάθε αισθητήρα. Αφαιρώντας την χρονική καθυστέρηση οι τιμές των επιταχυνσιόμετρων (πρώτη ολοκλήρωση) θα τείνουν να είναι ίδιες με τις τιμές του αισθητήρα αναφοράς – του αισθητήρα ταχύτητας – γεωφώνου.

7.1.2.4 Έλεγχος με την χρήση της μεθόδου MASW

Αυτό που προέκυψε από το χαμηλού κόστους σύστημα που κατασκευάσαμε πειραματιστήκαμε και εξαγάγαμε συμπεράσματα είναι ότι τα σήματα μας μετά την πρώτη ολοκλήρωση (επιτάχυνση σε ταχύτητα) είναι συμφασικά και με μικρές αποκλίσεις στο πλάτους τους.

Αυτό κάνει το σύστημα μας πολύ ενδιαφέρον για την έρευνα σεισμικής δραστηριότητας, εδαφικής διασκόπησης κ.α με την μέθοδο (multichannel analysis of surface waves M.A.S.W) την οποία και αναλύσαμε επεξηγηματικά στο κεφάλαιο 2.4 της διπλωματικής εργασίας μας.

Αντίθετα με την προηγούμενη μέθοδο (First Arrivals) τα αποτελέσματα με την χρήση της μεθόδου M.A.S.W κρίνονται ως άκρως ελπιδοφόρα για το σύστημά μας και αυτό διότι τα

δεδομένα και των τριών αισθητήρων που χρησιμοποιούμε (μετά την πρώτη ολοκλήρωση- επιταχυνσίόμετρα mem's) εμφανίζονται ως :

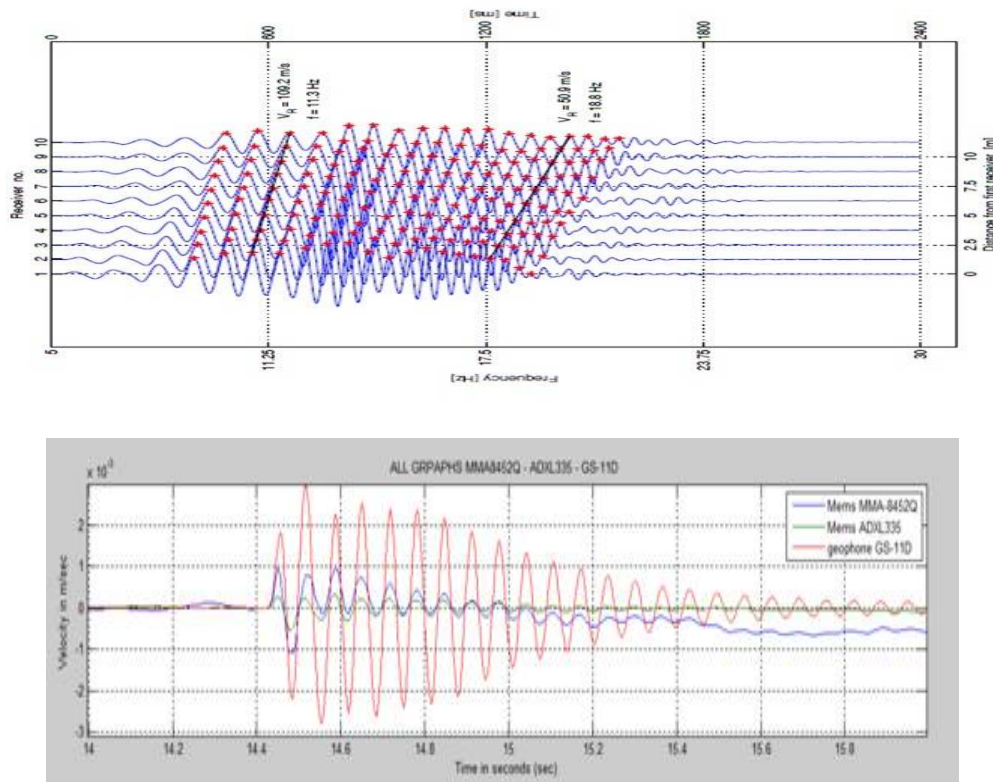
Α) Συμφασικά

Β) Ιδίας συχνότητας

Γ) Με κοινές μέγιστες κορυφές

Σας αποτέλεσμα παρατηρούμε ότι οι αισθητήρες επιτάχυνσης mem's χαμηλού κόστους μπορούν να ακολουθήσουν με ακρίβεια την συμπεριφορά του αισθητήρα αναφοράς (γεώφωνα) και να τον αντικαταστήσουν με την μέθοδο M.A.S.W.

Στην παρακάτω εικόνα παραθέτουμε τις ομοιότητες που παρουσιάζει στην καταγραφή των σημάτων το σύστημα μας με την καταγραφή από ένα σύστημα με την μέθοδο M.A.S.W το οποίο χρησιμοποιεί δέκα (10) γεώφωνα.



Εικόνα 80 : Καταγραφή σημάτων με την μέθοδο M.A.S.W (Πάνω) και σημάτων του συστήματος μας (Κάτω)

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κατασκευάσαμε ένα καταγραφικό σύστημα που ενσωματώνει 3 αισθητήρες (2 επιτάχυνσης και έναν ταχύτητας) και μπορεί με πολύ μικρές προσθήκες να ενσωματώσει πολύ περισσότερους δίσκους να αλλοιώσει τα χαρακτηριστικά της καθώς και τα χαρακτηριστικά των μετρούμενων μεγεθών.

Σχετικά με τα πειράματα που διεξαγάγαμε τα συμπεράσματα μας είναι πως το γεωφώνο παρουσιάζει την μεγαλύτερη ευαισθησία και ακρίβεια με επόμενο το ψηφιακό mem's επιταχυνσιόμετρο MMA-8452Q και τελευταίο το αναλογικό mem's επιταχυνσιόμετρο ADXL335.

Συνυπολογίζοντας το κόστος του γεωφώνου(150ευρώ) ως προς τους αισθητήρες επιτάχυνσης (MMA-8452Q 10E) και (ADXL-335 5E) μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα πως ένας χαμηλού κόστους αισθητήρας επιτάχυνσης μπορεί να αναγνωρίσει κύματα Rayleigh με αξιοπιστία αλλά όχι με μεγάλη ευαισθησία. Κάτι τέτοιο σημαίνει πως οι αισθητήρες επιτάχυνσης μπορούν να αντληθούν συμβάντα μικρών δονήσεων και κυμάτων Raleigh από κοντινές περιοχές ενώ συμβάντα από μακρινές περιοχές θα πρέπει να είναι αρκετά δυνατά για να γίνουν αντιληπτά. Τα συμπεράσματα μας εξάγονται από τις συγκριτικές κυματομορφές των αισθητήρων επιτάχυνσης σε σχέση με αυτόν του γεωφώνου.

Παρ όλα αυτά η περεταίρω μελέτη είναι αναγκαία για το πόσο είναι δυνατόν οι αισθητήρες επιτάχυνσης τεχνολογίας mem's να αντικαταστήσουν επάξια τα γεωφώνα που χρησιμοποιούνται σήμερα ευρέως.

Με την πρόοδο της τεχνολογίας την μαζική παραγωγή και την μείωση του κόστους κατασκευής η χρήση επιταχυνσιόμετρων mem's για την αντικατάσταση των γεωφώνων θα είναι μια μεγάλη πρόκληση για τους ερευνητές και τις κατασκευάστριες εταιρίες.

Με ένα σύστημα σαν το δικό μας εφοδιασμένο με αισθητήρες επιτάχυνσης χαμηλού κόστους πετυχαίνουμε ακρίβεια μετρήσεων που φτάνει και ξεπερνά το 80% από εμπορικά συστήματα που κοστίζουν 15.000 ευρώ όταν το δικό μας σύστημα δεν ξεπερνά σε κόστος τα 200 ευρώ.

Κρίνεται επιτακτική κατά την κρίση μας η έρευνα με το παρόν σύστημα με την προσαρμογή αισθητήρων mem's μεγαλύτερης ευαισθησίας και ακρίβειας (και κατά συνέπεια μεγαλύτερου κόστους) κάνοντας το εφάμιλλο με τα εμπορικά συστήματα άλλα με κάστας 1/10 και ίσως μικρότερου από τα συστήματα της αγοράς.

Τέλος η αρχιτεκτονική του συστήματος είναι τέτοια που μπορεί να προσαρμοσθεί για διάφορες λειτουργίες όπως καταγραφή σεισμικών φαινομένων , διασκόπησης εδάφους , καταγραφή δονήσεων σε κτίρια , γέφυρες , δρόμους κτλ καθώς και για την καταγραφή δονήσεων σε περιοχές με εδαφική καταπόνηση όπου δημιουργούνται φαινόμενα κατολισθήσεων.

Γενικά η παρούσα διπλωματική εργασία μας απέδωσε :

- Ένα σύστημα χαμηλού κόστους για την ανίχνευση και καταγραφή Rayleigh κυμάτων (Μέθοδος MASW)
- Καινοτόμο με την χρήση χαμηλού κόστους mem's αισθητήρων επιτάχυνσης έναντι την αισθητήρων ταχύτητας
- Καθολικά ανοικτού υλικολογισμικού
- Εύκολα επεκτάσιμο
- Φορητό (εύκολα μεταφερόμενο στο πεδίο των μετρήσεων)
- Ενεργειακά αυτόνομο για μελέτη φαινομένων αργής εξέλιξης
- Εύκολο στην χρήση
- Με την δυνατότητα να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα σε μέθοδο MASW διαφορετικούς mem's αισθητήρες επιτάχυνσης χαμηλού κόστους καθώς και γεώφωνα. (Ταυτόχρονη χρήση πολλαπλών τύπων αισθητήρων)

Έρευνα - Μελλοντικές Βελτιώσεις

- Σύνδεση με 12 , 24 , 48 mem's επιταχυνσιόμετρα και πειράματα σε μετρήσεις MASW.
- Ανάπτυξη φιλικής προς τον χρήστη πλατφόρμας για τον έλεγχο της συσκευής.
- Χρήση πιο ακριβών και μεγαλύτερης ακρίβειας mem's επιταχυνσιόμετρων και επανέλεγχος χρόνων πρώτων αφίξεων – εύρεση των χρονοκαθυστερήσεων που εισαγάγουν διαφορά φάσης στις μετρήσεις μας λόγω της ταχύτητας απόκρισης του αισθητήρα , χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων από τον αισθητήρα.
- Εμφύτευση του κώδικα πρώτης ολοκλήρωσης (επιτάχυνση σε ταχύτητα) αλλά και δεύτερης ολοκλήρωσης (ταχύτητα σε μετατόπιση) στον κεντρική πλακέτα καταγραφής και επεξεργασίας (Raspberry Pi 3 model b+).
- Χρήση ταχύτερου (ταχύτητα δειγματοληψίας >1Khz)και μεγαλύτερης ακρίβειας μετατροπέα σημάτων (A/D Converter) 24bit τουλάχιστον

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure. Seth Stein Department of Geological Sciences, Northwestern University, Evanston, Illinois Michael Wyession Department of Earth and Planetary Sciences, Washington University, St Louis, Missouri.
2. Kearey, P., Brooks, M. Introduction to Geophysical Exploration, Oxford-London Boston, Blackwell Scientific Publication, 1984.
3. Εισαγωγή στην Σεισμολογία Παναγιώτης Χατζηδημητρίου και Γιώργος Καρακαίσης <<http://www.geo.auth.gr/211/pdf/Mathima_1_Eisagogi.pdf>>.
4. Διάδοση Κυμάτων στα Υλικά. Δ. Ευταξίου <<<https://docplayer.gr/30148-Diadosi-kymaton-sta-ylika-d-eytaxiopoulos.html>>>.
5. <<RayleighWaves>> <http://geo.cv.nctu.edu.tw/EngGeo/download/RayleighWave.pdf>
6. Park, C. B., Miller, R. D. & Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. Geophysics, 64 (3), 800-808.
7. Solnes, J., Sigmundsson, F. & Bessason, B. (Editors). (2013). Natturuva a Islandi– Eldgosog Jarpskjalfar. Reykjavik: Virlagatrygging Islands & Haskolautgafan.
8. Kaldal, L. S. (2007). Yfirborðsmælingarogysjunarhætta. (Master's thesis). University of Iceland, Reykjavík.
9. Donohue, S., Dermot, F. & Donohue, L. A. (2013). Detection of soil compaction using seismic surface waves. Soil and Tillage Research, 128, 54-60.
10. Lin, C.-P., Chang, C.-C. & Chang, T.-S. (2004), The Use of MASW Method in the Assessment of Soil Liquefaction Potential. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24, 689-698.
11. Park, C. B. and Carnevale, M. (2010). Optimum MASW Survey - Revisit after a Decade of Use. In Fratta, D. O., Puppala, A. J. & Muhunthan, B (editors), GeoFlorida 2010: Advances in Analysis, Modeling and Design (pp. 1303-1312). doi: 10.1061/41095(365)130
12. Schilling, R. J. & Harris, S. L. (2012). Introduction to Digital Signal Processing using MATLAB. (International Edition. 2nd edition). Cengage Learning.
13. Multichannel Analysis of Surface Waves Methods for dispersion analysis of surface wave data, Elín Ásta Ólafsdóttir December 2014.

14. Seismic Wave Method for Ground Investigation Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong.
<<http://web.hku.hk/~chanls/Research/refraction_survey2.pdf>>
15. <<Mems seismology>> <https://www.slideshare.net/ajsatienza/mems-seismolog>
16. Γεώργιος Φ.Αλεξίου, Νικόλαος Χ.Πετρέλλης, Μικροεπεξεργαστές και σχεδιασμός μικροϋπολογιστικών συστημάτων, Εκδόσεις Γκιούρδας, 9.
17. Ηλεκτρικές μετρήσεις και αισθητήρες, Κώστας Καλαϊτζάκης, Ευτύχης Κουτρούλης, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
18. Luke Huang & Dr. Joseph C.Chen, “A Multiple Regression Model to Predict In-process Surface Roughness in Turning Operation Via Accelerometer”, Journal of Industrial Technology, Vol. 17, No 2, 2001
19. «Introduction to Arduino» <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
20. «Introduction to Raspberry Pi»
https://web.sonoma.edu/users/f/farahman/sonoma/courses/es465/lab/basiclab/RPi_Released/Sonoma_Lab_RaspberryPi3_Lab1_v2.pdf
21. «WHAT IS A RASPBERRY PI?»<https://www.raspberrypi.org/help/what-%20is-a-raspberry-pi/>
22. «Python,» <https://el.wikipedia.org/wiki/Python>
23. «python - Linux man page,» <https://linux.die.net/man/1/python>
24. Μούζης Νικόλαος, Μετάδοση Δεδομένων Μέσω του Πρωτοκόλλου I2C, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 5.
25. «RPi_Low-level_peripherals,» http://elinux.org/RPi_Low-level_peripherals
26. <https://www.raspberrypi.org/>
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Raspberry_Pi
28. <https://www.raspberrypi.org/downloads/raspbian/>
29. <https://www.arduino.cc/>
30. <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
31. <https://el.wikipedia.org/wiki/Arduino>
32. <https://www.pcesteps.gr/52828-τι-είναι-το-raspberry-pi/>
33. <https://www.cl.cam.ac.uk/projects/raspberrypi/>
34. <https://www.raspberrypi.org/help/faqs/#generalDifference>
35. <https://el.wikipedia.org/wiki/USB>

36. <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
37. «Arduino analog read» <https://www.arduino.cc/en/Tutorial/AnalogInput>
38. «Atmega168Datasheet»
www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2545.pdf
39. «Γλώσσα Προγραμματισμού Processing» <http://processing.org/>
40. Arduino, <http://el.wikipedia.org/wiki/Arduino>
41. Arduino Uno, <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
42. SPI library, <http://arduino.cc/en/Reference/SPI>
43. SoftwareSerial library, <http://arduino.cc/en/Reference/SoftwareSerial>
44. «Επιταχυνσιόμετρο MMA8452Q » <https://www.sparkfun.com/products/12756>
45. «Επιταχυνσιόμετρο ADXL335 » <https://www.adafruit.com/product/163>
46. «Geophone GS11-D 4.5HZ»
https://www.geospace.com/wpcontent/uploads/2018/04/592-14510-01_A_Brochure-GS-11D-Geophone-.pdf
47. «MCP6004 » <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21733j.pdf>
48. «ADS1115 » <https://www.adafruit.com/product/1085>
49. «DS3231 » <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS3231.pdf>
50. «LM2596,»<http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/nationalsemiconductor/DS012583.PDF>
51. «SystemROSSINA»http://www.tromino.it/Italiano/Download/ROSINA_ENG_2.01_C10.pdf
52. «ΤελεστικοίΕνισχυτές»http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/downloads/theory/11_tel_amp.pdf
53. « LTSPICE SIMULATION SOFTWARE» <https://en.wikipedia.org/wiki/LTspice>
54. « OCTAVE» https://en.wikipedia.org/wiki/GNU_Octave
55. Αριθμητική Ολοκλήρωση με τις μεθόδους Τραπεζίου/Simpson - Φίλιππος Δογάνης
<<http://users.ntua.gr/nmand/downloads/Numerical_Integration.pdf>>
56. Adamczyk, A., Malinowski, M., & Malehmir, A. (2013). Application of first-arrival tomography to characterize a quick clay landslide site in Southwest Sweden. Acta Geophysica, 1057-1073.
57. Avlonitis, M. (2016). On the problem of early detection of users interaction outbreaks via stochastic differential models.

58. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 92-96. Baziw, E., & Jones, I. (2002).
59. Application of Kalman filtering techniques for microseismic event detection. Pure Applied Geophysics, 449-471. Baziw, E., Nedilko, B., & Weir-Jones, I. (2004). Microseismic event detection Kalman filter: derivation of the noise covariance matrix and automated first break determination for accurate source location estimation.
60. Pure Applied Geophysics, 303-329. Chae, G. B., Park, J. H., Catani, F., Simoni, A., & Berti, M. (2017). Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. Geosciences Journal, 1033-1070.
61. Cummings, D., & Clark, R. (1988). Use of seismic refraction and electrical resistivity surveys in landslide investigations. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 459-464.
62. Hunter, A. A., Benjumea, B., Harris, J. B., Miller, R. D., Pullan, S. E., Burns, R. A., & Good, R. L. (2002). Surface and downhole shear wave seismic methods. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 22, 931-941. Leonard, M., & Kennett, B. L. (1999).
63. Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 247-263. Li, Y., Wang, Y., Lin, H., & Zhong, T. (2018).
64. First arrival time picking for microseismic data based on DSW algorithm. Journal of Seismology, 1-8. MacAulay, H. A., & Pullan, S. E. (1987).
65. An in-hole shotgun source for engineering seismic surveys. Geophysics, vol. 52, n7, 985-996. Omar, S. (2018).
66. Automatic arrival time detection for earthquakes based on Modified Laplacian of Gaussian filter. Computer and Geosciences, 43-53. Rex, A. V. (1978).
67. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bulletin of the Seismological Society of America, 1521-1532. Saad, O. M., Shalaby, A., Samy, L., & Sayed, M. S. (2018).
68. Automatic arrival time detection for earthquakes based on Modified Laplacian of Gaussian filter. Computers & Geosciences, 43-53. Saragiotis, C. (2002).
69. A robust automatic seismic P phase arrival identification scheme. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 1395-1404. Saragiotis, Hadjileontiadis, L., & Panas, S. (2004).
70. Automatic P phase picking using maximum kurtosis and kappa-statistics criteria. IEEE Geosci Remote Sens Lett, 147-151. Shang, X., Li, X., Esteban, M. A., & Dong, L. (2018).
71. Enhancing micro-seismic P-phase arrival picking: EMD-cosine function-based denoising with an application to the AIC picker. Journal of Applied Geophysics, 325-337.

72. Sumanovac, F., & Weisser, M. (2001). Evaluation of resistivity and seismic methods for hydrogeological. *Journal of Applied Geophysics* 47, 13-28.
73. Suriñach, E., Vilajosana, I., Khazaradze, G., Biescas, B., Furdada, G., & Vilaplana, M. J. (2005). Seismic detection and characterization of landslides and. *Natural Hazards and Earth System Science*, 791-798.
74. Xia, S., Wang, W., & Li, S. (2016). Application of Kalman filter in microseismic data denoising based on identified signal model.
75. The 28th Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan, China. Zhao, Y., Liu, Y., Li, X., & Jiang, N. (2014).
76. Time–frequency domain SNR estimation and its application in seismic data processing. *Journal of Applied Geophysics*, 25-35. Zuolin, C., & Stewart, R. (2005). Multi-window algorithm for detecting seismic first arrivals. Abstracts, CSEG National Convention

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 1

Arduino sketch (code)

```
// SOFTWARE STARTS HERE //
```

```
// Setup MMQ8452Q
```

```
//**************************************************************************//
```

```
//Digital read pins  X,Y,Z-AXIS +/- 2g - Digital Accelerometer MMA8452Q //
```

```
//**************************************************************************//
```

```
/*
```

Hardware hookup for MMA8452Q breakout board

Arduino ----- MMA8452Q Breakout

3.3V ----- 3.3V

GND ----- GND

SDA (A4) --\330 Ohm\-- SDA

SCL (A5) --\330 Ohm\-- SCL

The MMA8452Q is a 3.3V max sensor, so you'll need to do some

level-shifting between the Arduino and the breakout. Series

resistors on the SDA and SCL lines should do the trick.

```
*****/
```

```
#include <Wire.h> // Must include Wire library for I2C
```

```
#include <SFE_MMA8452Q.h> // Includes the SFE_MMA8452Q library
```

```
#include <Adafruit_ADS1015.h> // include for the ads115 a/d & amplifier
```

```
// Begin using the library by creating an instance of the MMA8452Q
```

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

```

// class. We'll call it "accel". That's what we'll reference from

// here on out.

MMA8452Q accel;

// Setup Adxl335

//*****
//*****//

//Analog read pins   Z-AXIS Analog A0   +/- 300mv = +/- 1g   -   Accelerometer ADXL335   - Amplification factor = 100
//

//*****
//*****//

const int zPin = 0;   // A0 pin ADXL335 mem's analog accelerometer

double z;           // z-axis ADXL335

// Setup ADS1115 (16BIT A/D and amplifier) for geophone

//*****
//*****//

//Analog geophone   Z-AXIS   0.32v/cm/sec   -ads115 a/d 16bit   - Amplification factor = 8           //

//*****
//*****//

//ADS1115 Amplifier decleration

// Constant degleration

int total =0;

int results =0;

// filtering parameters degleration

//const int filterWeight = 64; // higher numbers = heavier filtering

//const int numReadings = 10;

//int average = 0;           // the average

Adafruit_ADS1115 ads; /* Use this for the 16-bit version */

//Adafruit_ADS1015 ads; /* Use thi for the 12-bit version */

// The setup function simply starts serial and initializes the

// accelerometer.

void setup()

{

  Serial.begin (230400);

  Serial.println("MMA8452Q Test Code!");

```

«ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ
ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

```

// Choose your adventure! There are a few options when it comes

// to initializing the MMA8452Q:

// 1. Default init. This will set the accelerometer up

// with a full-scale range of +/-2g, and an output data rate

// of 800 Hz (fastest).

//accel.init();

// 2. Initialize with FULL-SCALE setting. You can set the scale

// using either SCALE_2G, SCALE_4G, or SCALE_8G as the value.

// That'll set the scale to +/-2g, 4g, or 8g respectively.

//accel.init(SCALE_2G,50); // Uncomment this out if you'd like

// 3. Initialize with FULL-SCALE and DATA RATE setting. If you

// want control over how fast your accelerometer produces

// data use one of the following options in the second param:

// ODR_800, ODR_400, ODR_200, ODR_100, ODR_50, ODR_12,

// ODR_6, or ODR_1.

// Sets to 800, 400, 200, 100, 50, 12.5, 6.25, or 1.56 Hz.

accel.init(SCALE_2G, ODR_800);

// Choose the amplification factor for the ads115 a/d & amplifier //

//
// ADS1015 ADS1115
//
// -----

//ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); // 2/3x gain +/- 6.144V 1 bit = 3mV 0.1875mV (default)

//ads.setGain(GAIN_ONE); // 1x gain +/- 4.096V 1 bit = 2mV 0.125mV

ads.setGain(GAIN_TWO); // 2x gain +/- 2.048V 1 bit = 1mV 0.0625mV

//ads.setGain(GAIN_FOUR); // 4x gain +/- 1.024V 1 bit = 0.5mV 0.03125mV

//ads.setGain(GAIN_EIGHT); // 8x gain +/- 0.512V 1 bit = 0.25mV 0.015625mV

//ads.setGain(GAIN_SIXTEEN); // 16x gain +/- 0.256V 1 bit = 0.125mV 0.0078125mV

ads.begin();

}

// The loop function will simply check for new data from the

// accelerometers and geophone and print them on serial or plot them out if needed

void loop()

{

```



```

// Use the accel.available() function to wait for new data

// from the accelerometer.

if (accel.available())
{
    // First, use accel.read() to read the new variables:

    accel.read();

    // accel.read() will update two sets of variables.

    // * int's x, y, and z will store the signed 12-bit values

    // read out of the accelerometer.

    // * floats cx, cy, and cz will store the calculated

    // acceleration from those 12-bit values. These variables

    // are in units of g's.

    // Check the two function declarations below for an example

    // of how to use these variables.

    printCalculatedAccels();

    //printAccels(); // Uncomment to print digital readings

    // The library also supports the portrait/landscape detection

    // of the MMA8452Q. Check out this function declaration for

    // an example of how to use that.

    //printOrientation();

    int z = (506 - analogRead(zPin));

    z = (z * 4.8875); // voltage step = 5000mv / 1023 steps --- z output is +/- 300 mv per +/-1 g

    // But because we amplify the input signal by a factor of 100 after the procedure

    // we take the output file and we divide the values /100 to take the pure signal and also /300 to take the

    acceleration in G

    // By Multiply the G we found with 9.81 m/sec^2 we have the real acceleration

    // All the above we do it in matlab to avoid delay at our sampling rate

    // declaration for the ads115 and the geophone

    int16_t results;

    // Choose the right value from the table above to the multiplier

    /* Be sure to update this value based on the IC and the gain settings! */

    //float multiplier = 0.1875F; //ADS1115 @ +/- 6.144V gain (12-bit results)

    float multiplier = 0.0625F; /* ADS1115 @ +/- 0.256V gain (16-bit results) */

    results = ads.readADC_Differential_0_1(); // results from the amplifier in Millivolts

    «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ
    ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»

```

```

total = (results * multiplier);

Serial.print(z);

Serial.print(",");

// Serial.println(); // Print new line every time.

Serial.print(total);

// Serial.print(",");

Serial.println(); // Print new line every time

}

}

void printAccels()

{

Serial.print(accel.x, 3);

Serial.print("\t");

Serial.print(accel.y, 3);

Serial.print("\t");

Serial.print(accel.z, 3);

Serial.print("\t");

}

// This function demonstrates how to use the accel.cx, accel.cy,

// and accel.cz variables.

// Before using these variables you must call the accel.read()

// function!

void printCalculatedAccels()

{

Serial.print((accel.cx *1000), 3); // x 1000 gia times se millig

Serial.print(",");

Serial.print((accel.cy *1000), 3); // x 1000 gia times se millig

Serial.print(",");

Serial.print((accel.cz *1000), 3); // x 1000 gia times se millig

Serial.print(",");

}

```

Raspberry pi – python code(logger.py)

```
#!/usr/bin/env python

from datetime import datetime

import serial, io

outfile = '/home/pi/data.csv'

ser = serial.Serial(

    port='/dev/ttyACM0',

    baudrate=230400,

)

sio = io.TextIOWrapper(

    io.BufferedRWPair(ser, ser, 1),

    encoding='ascii', newline='\n'

)

with open(outfile,'a') as f:

    while ser.isOpen():

        datastring = sio.readline()

        f.write(datetime.now().isoformat() + ',' + datastring)

        f.flush()

ser.close()
```

1st Integration Matlab – Octave (Code)

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%                               %
%   Using the trapezoidal approach to integrate the data of ours   %
%   accelerometers to transform them from acceleration to velocity %
%                               %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Start Program
close all
clear all
clc

% sensor MMA8452Q 1/3

A=csvread('xdigidata.csv') %read data file
size(A) % show that the file is not empty

x=A(:,1) % all values from A at the first row (time)
y=A(:,2) % all values from A at the second row (acceleration)

v = cumtrapz(x,y);

%velocity = cumtrapz(time,acceleration);

for i=2:length(x) %run the length of the array
    v(i-1) = trapz(x(1:i),y(1:i)); % make the integral at each point
end

% filtering data to avoid integration drift with hpf

b=butter(3,[0.09 0.11],'stop');
%an nth-order lowpass, bandpass, or multiband FIR filter with linear phase.
%The filter type depends on the number of elements of Wn
% https://www.mathworks.com/help/signal/ref/fir1.html#bullet96
v = filter(b,1,v);

%save the integration data into file

fileID = fopen('xdigi-int-data.txt','w');
fprintf(fileID,'%0.8f\r\n',v);
fclose(fileID);

subplot(411),plot(x,v)
    «ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΚΑΙΝΟΤΟΜΟΥ ΥΛΙΚΟΥ ΧΑΜΗΛΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΟΥ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΑΙ ΤΗΝ
    ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ RAYLEIGH ΚΥΜΑΤΩΝ»
```

```

title ( 'Velocity m/sec Vs Time X-axis MMA8452Q');
xlabel('Time in seconds (sec)');
ylabel('Velocity in m/sec');
grid on;

% sensor MMA8452Q 2/3

A=csvread('ydididata.csv') %read data file
size(A) % show that the file is not empty

x=A(:,1) % all values from A at the first row (time)
y=A(:,2) % all values from A at the second row (acceleration)

v = cumtrapz(x,y);

%velocity = cumtrapz(time,acceleration);

for i=2:length(x) %run the length of the array
    v(i-1) = trapz(x(1:i),y(1:i)); % make the integral at each point
end

% filtering data to avoid integration drift with hpf

b=butter(3,[0.09 0.11],'stop');
%an nth-order lowpass, bandpass, or multiband FIR filter with linear phase.
%The filter type depends on the number of elements of Wn
% https://www.mathworks.com/help/signal/ref/fir1.html#bullet96
v = filter(b,1,v);

%save the integration data into file

fileID = fopen('ydidgi-int-data.txt','w');
fprintf(fileID,'%0.8f\r\n',v);
fclose(fileID);

subplot(412),plot(x,v)
title ( 'Velocity m/sec Vs Time Y-axis MMA8452Q');
xlabel('Time in seconds (sec)');
ylabel('Velocity in m/sec');
grid on;

% sensor MMA8452Q 3/3

A=csvread('z-digi.csv') %read data file
size(A) % show that the file is not empty

x=A(:,1) % all values from A at the first row (time)
y=A(:,2) % all values from A at the second row (acceleration)

```

```

v = cumtrapz(x,y);

%velocity = cumtrapz(time,acceleration);

for i=2:length(x) %run the length of the array
    v(i-1) = trapz(x(1:i),y(1:i)); % make the integral at each point
end

% filtering data to avoid integration drift with hpf

b=butter(3,[0.09 0.11],'stop');
%an nth-order lowpass, bandpass, or multiband FIR filter with linear phase.
%The filter type depends on the number of elements of Wn
% https://www.mathworks.com/help/signal/ref/fir1.html#bullet96
v = filter(b,1,v);

%save the integration data into file
fileID = fopen('zdigi-int-data.txt','w');
fprintf(fileID,'%0.8f\r\n',v);
fclose(fileID);

subplot(311),plot(x,v)
title ( 'Velocity m/sec Vs Time Z-axis MMA8452Q');
xlabel('Time in seconds (sec)');
ylabel('Velocity in m/sec');
grid on;

% sensor ADXL335 1/3 Z-AXIS

A=csvread('z-adxl.csv') %read data file
size(A) % show that the file is not empty

x1=A(:,1) % all values from A at the first row (time)
y1=A(:,2) % all values from A at the second row (acceleration)

v1 = cumtrapz(x1,y1);

%velocity = cumtrapz(time,acceleration);

for i=2:length(x1) %run the length of the array
    v1(i-1) = trapz(x1(1:i),y1(1:i)); % make the integral at each point
end

% filtering data to avoid integration drift with hpf

b=butter(3,[0.09 0.11],'stop');
%an nth-order lowpass, bandpass, or multiband FIR filter with linear phase.
%The filter type depends on the number of elements of Wn
% https://www.mathworks.com/help/signal/ref/fir1.html#bullet96
v1 = filter(b,1,v1);

```

```

%save the integration data into file
fileID = fopen('zadxl-int-data.txt','w');
fprintf(fileID,'%0.8f\r\n',v1);
fclose(fileID);
subplot(312),plot(x1,v1)
title('Velocity m/sec Vs Time Z-axis ADXL335');
xlabel('Time in seconds (sec)');
ylabel('Velocity in m/sec');
grid on;

%ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΙΣΘΗΤΗΡΑ No3
%
%Eisagogi arxeiou dedomenon (file has to be in "+val -- 0 -- -val"
data = load('geophone.csv'); % Take data from that file
size(data) % show that the file is not empty and how many records has
Fs = 220; % sampling freequency
L = 5987 ; % Total lenght of the dataset
t = (0 : L - 1)/Fs; % Create time vector
value = 0 % value = calibration value

data = data + value;
data = data/2; % 2 is the signal amplification factor
data = data/320; % 320mv/cm/sec metatropi simatos se cm/sec
data = data/100 % convert cm/sec into m/sec
data=-data; % invert values 180 degrees - due to amp missed inverter

data = smooth(data);

%save the integration data into file
fileID = fopen('geophone-int-data.txt','w');
fprintf(fileID,'%0.8f\r\n',data);
fclose(fileID);

subplot(313)
plot(t,data,'LineWidth',1);
title('Original Signal Data from GS-11D Z-Axis');
xlabel('Time in seconds (sec)');
ylabel('Velocity in m/sec');
grid on;

%subplot(414)

%plot(t,data,x,v,x1,v1,'LineWidth',1);
%title('ALL GRPAPHS MMA8452Q - ADXL335 - GS-11D ');
%xlabel('Time in seconds (sec)');
%ylabel('Velocity in m/sec');
%legend('geophone GS-11D','Mems MMA-8452Q','Mems ADXL335')
%grid on;
% save all integrated data in a file to go for autopicking algorithim

outvar = [t(:) v(:) v1(:) data(:)];
dlmwrite('all-velocities.csv',outvar);

```