



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Διδακτορική Διατριβή

**Μελέτη, σχεδιασμός, κατασκευή και πειραματική
διερεύνηση Σεισμογραφικού Συστήματος Έγκαιρης
Προειδοποίησης**

ΒΟΥΤΣΙΝΑΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

Μηχανικός Η/Υ Συστημάτων, MSc

ΑΘΗΝΑ

2020

**«Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής δεν υποδηλώνει την αποδοχή
των γνώμων του συγγραφέα»**

Άρθρο 202, παρ. 2, Ν. 5343/1932



HELLENIC REPUBLIC
**National and Kapodistrian
University of Athens**
— EST. 1837 —

NATIONAL AND KAPODISTRIAN UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF SCIENCES

Faculty of Geology and Geoenvironment

Doctoral Dissertation

**Study, design, implementation and experimental
investigation of an Earthquake Early Warning System**

Voutsinas Stylianos

Computer Systems Engineer, MSc

ATHENS

2020

"The approval of the doctoral dissertation does not imply acceptance of the author's opinions"

Article 202, paragraph 2, Law 5343/1932

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βούλγαρης Νικόλαος, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Δρ. Βούλγαρης Νικόλαος, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Δρ. Παπαδημητρίου Παναγιώτης, Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Δρ. Κασσάρας Ιωάννης, Επίκουρος Καθηγητής, ΕΚΠΑ

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

**Δρ. Βούλγαρης Νικόλαος,
Καθηγητής, ΕΚΠΑ**

**Δρ. Παπαδημητρίου Παναγιώτης,
Καθηγητής, ΕΚΠΑ**

**Δρ. Κασσάρας Ιωάννης, Επίκουρος
Καθηγητής, ΕΚΠΑ**

**Δρ. Τσελέντης Γεράσιμος,
Καθηγητής, ΕΚΠΑ**

**Δρ. Καβύρης Γεώργιος, Επίκουρος
Καθηγητής, ΕΚΠΑ**

**Δρ. Βογιατζής Ιωάννης, Καθηγητής,
ΠΑΔΑ**

**Δρ. Ζάχαρης Νικόλαος,
Καθηγητής, ΠΑΔΑ**

Ιανουάριος 2020

PhD THESIS

Supervisor: Voulgaris Nikolaos, Professor UoA

Three-Member Advisory Committee:

Dr. Voulgaris Nikolaos, Professor UoA

Dr. Papadimitriou Panagiotis, Professor UoA

Dr. Kassaras Ioannis, Assistant Professor UoA

SEVEN-MEMBER EXAMINATION COMMITTEE

**Dr. Voulgaris Nikolaos,
Professor UoA**

**Dr. Papadimitriou Panayiotis,
Professor UoA**

**Dr. Kassaras Ioannis,
Assistant Professor UoA**

**Dr. Tselentis Gerasimos,
Professor UoA**

**Dr. Kaviris Georgios,
Assistant Professor UoA**

**Dr. Voyiatzis Ioannis,
Professor UniWA**

**Dr. Zacharis Nikolaos,
Professor UniWA**

January 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι σεισμοί ήταν πάντα ένα φαινόμενο που απασχολούσε την ανθρωπότητα ανά τους αιώνες λόγω της καταστροφικής τους δύναμης, πράγμα που επηρέαζε τις ίδιες τις κοινωνίες. Σήμερα η ραγδαία ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων, έχει δώσει την δυνατότητα στους επιστήμονες για ταχύτερη και αποδοτικότερη επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων έτσι ώστε να μειώνονται οι επιπτώσεις ενός καταστρεπτικού σεισμού. Σε αυτή τη διατριβή παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός σειсмоγραφικού συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης. Το παραπάνω σύστημα βασίζεται σε σταθμούς, κάθε ένας από τους οποίους είναι ένα φορητό ενσωματωμένο σύστημα χαμηλής κατανάλωσης, εξοπλισμένο με τους αισθητήρες χαμηλού κόστους, και με πολυπύρηνο επεξεργαστή, ώστε να εκτελεί υπολογισμούς τοπικά και σε πραγματικό χρόνο. Με αυτόν τον τρόπο, και λόγω της ασύρματης επικοινωνίας των σταθμών, μια περιοχή μπορεί να παρακολουθείται εύκολα και γρήγορα, αφού η παρουσία του εξυπηρετητή αλλάζει ρόλο, και πλέον δεν χρησιμοποιείται για την έκδοση των προειδοποιήσεων, αλλά για τον υπολογισμό του επικέντρου και του μεγέθους του σεισμού.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Έγκαιρη Σεισμική προειδοποίηση

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Σεισμική προειδοποίηση, Αλγόριθμοι επεξεργασίας σεισμικών δεδομένων, Ενσωματωμένα συστήματα, Αισθητήρια, Δίκτυα IEEE 802.15.4, IoT

ABSTRACT

Earthquakes have always been a phenomenon that was observed by mankind throughout the centuries because of their destructive power, as they directly affect societies. Today, with the rapid development of computer systems, scientists have the opportunity for faster and more efficient processing of seismic data, so that the effects of a devastating earthquake can be mitigated. In this thesis the design and construction of a seismic early warning system is presented. This system is based on nodes, wherein each node is a portable low-power embedded system, equipped with low cost sensors, and processing power capable to perform calculations locally and in real time. In this way, and due to the fact that the nodes are being wirelessly communicating, a region can be monitored easily. The main application server now serves a different role, not for issuing the earthquake warning, but for calculating the location and the magnitude of the earthquake.

SUBJECT AREA: Seismic early warning systems

KEYWORDS: Earthquake early warning, seismic data processing algorithms, Embedded systems, Sensors, IEEE 802.15.4 Networks, IoT

Αφιερωμένο στην γυναίκα και την κόρη μου, στους γονείς μου, και τους φίλους για την κατανόηση και την συμπαράσταση τους, καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της διατριβής.

ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ

2013 - Proceedings of International Scientific Conference eRA – 8 (ISSNB: 1791-1133)

- Necessity of supervision circuits on embedded systems
- Design of a low cost – easy to deploy system for data logging of seismic signals

2014 - International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering – IJERSTE (ISSN: 2319-7463), IF 1.252

- Design and analysis of a low cost seismic data recorder

2019 - CRL School 2019

- Introduction to Earthquake Early Warning Systems

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΕΡΓΟ

2019 - ΕΚΠΑ

- Συμμετοχή στο έργο: Ολοκληρωμένο Σύστημα Έγκαιρης Προειδοποίησης & Διαχείρισης Σεισμικού Κινδύνου με εφαρμογή σε Βιομηχανικές Υποδομές. (Κωδικός έρευνας: 15335)

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	9
ABSTRACT.....	11
ΛΙΣΤΑ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΩΝ.....	15
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	17
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ.....	21
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	27
ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	31
1. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο – ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	33
1.1 ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ.....	33
1.2 ΣΚΟΠΟΣ.....	34
1.3 ΔΙΑΡΘΡΩΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΤΡΙΒΗΣ.....	35
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο – ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ.....	37
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	37
2.2 ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΚΥΜΑΤΩΝ.....	38
2.2.1 <i>Ελαστικά κύματα χώρου</i>	38
2.2.1.1 Κύματα P.....	38
2.2.1.2 Κύματα S.....	39
2.2.2 <i>Ελαστικά Επιφανειακά κύματα</i>	40
2.2.2.1 Κύματα Love (L_Q).....	40
2.2.2.2 Κύματα Rayleigh (L_R).....	41
2.3 Η ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΓΗΣ.....	42
2.3.1 <i>Διάδοση σεισμικών φάσεων</i>	43
2.4 ΜΕΓΕΘΗ ΣΕΙΣΜΙΚΩΝ ΓΕΓΟΝΟΤΩΝ.....	44
2.4.1 <i>Τοπικό Μέγεθος M_L</i>	45
2.4.2 <i>Επιφανειακό Μέγεθος M_S</i>	45
2.4.3 <i>Μέγεθος διάρκειας σήματος M_d</i>	45
2.4.4 <i>Χωρικό Μέγεθος m_B</i>	46

2.4.5	<i>Μέγεθος Σεισμικής Ροπής M_w</i>	46
2.4.5.1	Συσχέτιση μετατόπισης P_d – Μεγέθους Σεισμικής Ροπής.....	47
2.4.5.2	Συσχέτιση μέσης σεισμικής περιόδου τ_c – Μεγέθους Σεισμικής Ροπής.....	47
2.4.5.3	Συσχέτιση μέσης σεισμικής περιόδου τ_c – μετατόπισης P_d και υποκεντρικής απόστασης	48
2.5	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΣΕΙΣΜΙΚΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ (Σ.Ε.Σ.Π)	48
2.5.1	<i>Ιστορικά δεδομένα – Αναγκαιότητα</i>	49
2.5.2	<i>Αρχή λειτουργίας</i>	51
2.5.2.1	Θετικά και Αρνητικά Στοιχεία - Κίνδυνοι της χρήσης των Σ.Ε.Σ.Π.	55
2.5.3	<i>Εφαρμογές Σ.Ε.Σ.Π.</i>	56
2.5.3.1	Εφαρμογές Σ.Ε.Σ.Π. σε ευρωπαϊκό επίπεδο	57
2.5.3.2	Εφαρμογές Σ.Ε.Σ.Π σε παγκόσμιο επίπεδο.....	59
2.6	ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΔΙΕΓΕΡΣΗΣ – ΕΠΙΛΟΓΕΙΣ ΦΑΣΗΣ	63
2.6.1	<i>Ενεργειακές μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου</i>	64
2.6.2	<i>Ενεργειακές μέθοδοι στο πεδίο της συχνότητας</i>	68
2.6.3	<i>Ανιχνευτές σωματιδιακής κίνησης και πόλωσης σεισμικών κυμάτων</i>	70
2.6.4	<i>Μέθοδοι αυτοπαλινδρόμησης</i>	72
2.6.5	<i>Συμπεράσματα - Σχολιασμός μεθόδων</i>	75
3.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο – ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ	77
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	77
3.2	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ.....	78
3.2.1	<i>Ανάλυση απαιτήσεων</i>	79
3.2.2	<i>Σχεδίαση του συστήματος</i>	80
3.3	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ.....	83
3.3.1	<i>Αισθητήρες</i>	83
3.3.1.1	Γεώφωνο.....	84
3.3.1.2	Επιταχυνσιόμετρο.....	87
3.3.2	<i>Μονάδα ψηφιοποίησης</i>	91
3.3.2.1	Προετοιμασία Αναλογικών Σημάτων – Analog Signal Preparation (A.S.P.)	92
3.3.2.2	Μετατροπéας από αναλογικό σε ψηφιακό	95
3.3.2.3	Προεπεξεργασία σήματος.....	98
3.3.3	<i>Τμήμα επεξεργασίας σήματος</i>	103
3.3.3.1	Ανάλυση εφαρμογής	104

3.3.3.2	Χρονισμός - GPS.....	122
3.3.3.3	Seedlink Service.....	123
3.3.3.4	Πρόληψη σφαλμάτων – Αποφυγή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου	123
3.3.4	Τελικές Συσκευές	126
3.3.4.1	Πρωτόκολλα επικοινωνίας.....	126
3.3.4.1.1	IEEE 802.15.4 – Xbee module.....	126
3.3.4.1.2	IEEE 802.3 - IoT service	128
3.3.4.2	Ανάλυση τελικών συσκευών	129
4.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο – ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ – ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ	
	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	131
4.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	131
4.2	ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ.....	131
4.3	ΧΡΟΝΟΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗΣ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....	133
4.4	ΈΤΟΙΜΕΣ ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΣ	134
4.4.1	Αποτελέσματα επιτυχίας διεγέρσεων	137
4.4.2	Αποτελέσματα μεγέθους Σεισμικής Ροπής	137
2.4.5.4	Δεύτερη ομάδα μετρήσεων.....	137
4.4.3	Αποτελέσματα υπολογισμού Αζιμούθιου.....	144
4.5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΣΤΑΘΜΟΥ.....	145
4.5.1	Σεισμική πηγή	150
4.5.2	Καταγραφή σε σταθμό.....	150
4.5.3	Πιστοποίηση μετρήσεων.....	159
5.	ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	163
5.1	ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	163
5.1.1	Εκτίμηση χρόνων εκτέλεσης – Σενάριο λειτουργίας	163
5.1.2	Εκτίμηση αντίληψης σεισμικών γεγονότων	170
5.1.3	Εκτίμηση υπολογισμού αζιμούθιου.....	172
5.1.4	Εκτίμηση συμπεριφοράς πρωτότυπου σταθμού	172
5.1.5	Εκτίμηση συμπεριφοράς τελικών συσκευών.....	178
5.2	ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΕΚΤΙΜΗΣΗ - ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΠΡΟΕΚΤΑΣΕΙΣ.....	180
	ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ	187
	ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ.....	189

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - ΥΛΙΚΟ	191
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ	201
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ – ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΧΡΟΝΟΥ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗΣ – ΕΣΤΙΑΚΟΥ ΒΑΘΟΥΣ	211
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	215

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Σχήμα 1: Αλληλεπίδραση των γειτονικών μικρό-πλακών με την Ευρασιατική πλάκα Interaction of adjacent micro-plates with the Eurasian plate	33
Σχήμα 2: Κατανομή σεισμικών γεγονότων κατά την περίοδο 1900-2009 (Makropoulos et al., 2012) Distribution of seismic events for the period 1900-2009.....	37
Σχήμα 3: Τρόπος διάδοσης του κύματος P (Structuremag, 2015) P-Wave propagation.....	38
Σχήμα 4: Τρόπος διάδοσης του κύματος S (Structuremag, 2015) S-Wave propagation.....	39
Σχήμα 5: Τρόπος διάδοσης κύματος Love (Structuremag, 2015) Love-Wave propagation.....	41
Σχήμα 6: Τρόπος διάδοσης κύματος Rayleigh (Structuremag, 2015) Rayleigh-Wave propagation.....	41
Σχήμα 7: Δομή της γης με βάση τη χημική σύσταση (Αριστερά) και τις φυσικές ιδιότητες (Δεξιά). Earth layered model according to chemical composition (left) and physical characteristics (right).....	43
Σχήμα 8: Οι δυο υλοποιήσεις έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης. (Satriano et al., 2011) Two main implementations for early earthquake warning	53
Σχήμα 9: Χρονικές αποκρίσεις των δύο διαφορετικών υλοποιήσεων Σ.Ε.Σ.Π. (Satriano et al., 2011) Comparison of time responses for the two EEW implementations.....	54
Σχήμα 10: Σύγκριση οριζόντιας και κάθετης κλιμάκωσης. Scale up vs Scale out	77
Σχήμα 11: Μοντέλο καταρράκτη Waterfall model	78
Σχήμα 12: Περιγραφή συστήματος Top down system analysis.....	80
Σχήμα 13: Ηλεκτρικό μοντέλο γεώφωνου. Geophone electrical model.....	85
Σχήμα 14: Συναρτήσεις μεταφοράς LGT4.5 Transfer function plots for the LGT4.5 Sensor	87

Σχήμα 15: Αρχή λειτουργίας χωρητικών επιταχυνσιόμετρων. Capacitive accelerometers operation (Andrejašic, 2008)	88
Σχήμα 16: Απόκριση συχνότητας από πειραματικά δεδομένα Frequency response plot derived from experimental data.....	90
Σχήμα 17: Απόκριση συχνότητας από προσέγγιση Frequency response plot derived by approximation.....	91
Σχήμα 18: Διάγραμμα βαθμίδων μονάδας προετοιμασίας αναλογικού σήματος ASP unit sub-modules	93
Σχήμα 19: Συνάρτηση μεταφοράς A.S.P. ASP bode plot.....	94
Σχήμα 20: Συνολική απόκριση Overall response.....	95
Σχήμα 21: Μπλοκ διάγραμμα σχηματικής απεικόνισης του μετατροπέα ADS1256 (TexasInst., 2013) ADS1256 block diagram.....	96
Σχήμα 22: Συνοπτικός πίνακας χρονισμού της SPI διεπαφής του ADS1256 ADS1256 SPI timing.....	101
Σχήμα 23: Εναλλαγή καναλιών στον μετατροπέα ADS1256 ADS1256 effective input cycling.....	101
Σχήμα 24: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας μονάδας προεπεξεργασίας Block diagram of pre-processing operation.....	103
Σχήμα 25: Διαδικτυακή διασύνδεση της εφαρμογής Connections of the application via the Internet.....	108
Σχήμα 26: Σχηματική απεικόνιση της Β.Δ. της εφαρμογής Database schema	111
Σχήμα 27: Ο κεντρικός αλγόριθμος της εφαρμογής Block diagram of the main algorithm.....	112
Σχήμα 28: Συγκριτικό γράφημα πολυπλοκότητας αλγορίθμων (Big-O complexity, 2012) Algorithm Complexity chart.....	113
Σχήμα 29: Μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης κλασικού STA/LTA αλγόριθμου Block diagram of the Classic STA/LTA algorithm that has been developed.....	114
Σχήμα 30: Μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης αναδρομικού STA/LTA αλγόριθμου Block diagram of the recursive STA/LTA algorithm that has been developed ...	115

Σχήμα 31 : Μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης αλγόριθμου Z - ανιχνευτή Block diagram of the Z-Detect algorithm that has been developed.....	116
Σχήμα 32: Παράδειγμα χρήσης αλγόριθμου classic –STA/LTA. Με κόκκινο σημειώνεται το κατώφλι διέγερσης, ενώ με μπλέ το κατώφλι από-διέγερσης Classic STA/LTA example.....	117
Σχήμα 33: Είσοδος/Έξοδος αλγόριθμου διέγερσης. Time based I/O of the triggering algorithm.....	118
Σχήμα 34: Αλγόριθμος προσδιορισμού της ενδεχόμενης σεισμικής καταστρεπτικότητας (Zollo et al., 2010) Algorithm for determining the potential destructive effects of an earthquake	119
Σχήμα 35: Μπλοκ διάγραμμα της υλοποίησης αλγόριθμου tc-Pd Block diagram of the tc-Pd algorithm that has been developed	121
Σχήμα 36: Μοντέλο πλήρους εξωτερικής θωράκισης από H/M παρεμβολές EMI shielding diagram.....	124
Σχήμα 37: Υποσύστημα ελέγχου τάσης Voltage control module	125
Σχήμα 38: Μοντέλο ενός PAN Personal Area Network model	128
Σχήμα 39: Τελική συσκευή του συστήματος End device block diagram.....	130
Σχήμα 40: Συνολική συνάρτηση μεταφοράς φίλτρου για τον tc-Pd αλγόριθμο. tc-Pd filter frequency responce	132
Σχήμα 41: Χρόνος εκτέλεσης πριν και μετά τη μεταγλώττιση JIT. Execution time before and after JIT compiler	134
Σχήμα 42: Χάρτης επικέντρων επιλεγμένων σεισμών, τη χρονική περίοδο 2010-2016. Seismic events and their locations.....	135
Σχήμα 43: Τα νέα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. Locations of the events.....	138
Σχήμα 44: Σύγκριση μέσων τιμών σεισμικής ροπής. Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή των καταγραφών, το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην ομάδα ελέγχου, το κόκκινο χρώμα στην εξίσωση 2.15. Οι αγκύλες	

αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση (standard deviation) και $*= p < 0.05$. Mw Mean values comparison	144
Σχήμα 45: Σύγκριση μέσων τιμών Αζιμούθιου. Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή των καταγραφών, το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην ομάδα ελέγχου και το κόκκινο χρώμα στην υπολογιζόμενη τιμή του Αζιμούθιου. Οι αγκύλες αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση (standard deviation) Azimuth means compared.....	145
Σχήμα 46: Δεδομένα ψηφιακού παλμογράφου (πάνω καταγραφή πλάτους, κάτω καταγραφή φασματογράφου). DSO data	146
Σχήμα 50: Δεδομένα λογικού αναλυτή. Logic analyzer data.....	147
Σχήμα 48: Πριν (πάνω) και μετά (κάτω) την αφαίρεση της αντισταθμιστικής τάσης. Before and after DC offset removal	147
Σχήμα 49: Μη γραμμικό σφάλμα ολοκλήρωσης (Staller, 2005). INL error.....	149
Σχήμα 50: Παλμοσειρά επανεκκίνησης WDT. WDT reset pulse.....	149
Σχήμα 51: Καταγραφή πρόσκρουσης αντικειμένου μάζας 1 kg από ύψος 1m. Impact of object with mass 1kg falling freely from 1m height.....	150
Σχήμα 52: Εικόνα από το ημερήσιο αρχείο καταγραφής του σταθμού. Daily drum plot.....	151
Σχήμα 53: Διαδικασία φιλτραρίσματος. Filtering process	159
Σχήμα 54: Ψηφιακό φίλτρο που υλοποιήθηκε. Digital filter.....	160
Σχήμα 55: Σύγκριση μετρούμενου και υπολογισμένου Mw. Με μπλε κύκλο εμφανίζονται τα μεγέθη Mw όπως αυτά υπολογίσθηκαν από την εξ. 2.15. με κόκκινο τρίγωνο εμφανίζονται τα μεγέθη του Mw για επικεντρικές αποστάσεις μεγαλύτερες των 150km, ενώ με μαύρο εμφανίζονται τα πραγματικά μεγέθη του Mw. Mw measurements	161
Σχήμα 56: Σενάριο εγκατάστασης και ορθής λειτουργίας. Scenario of operation	165
Σχήμα 57: Τα ενεργά ρήγματα του Ελλαδικού χώρου (Ganas et al., 2013), Greek active faults	165

Σχήμα 58: Καταγραφές για το γεγονός 2019-03-30 10:46:19 . Stations recordings for the event 2019-03-30 10:46:19.....	168
Σχήμα 59: Καταγραφές για το γεγονός 2019-03-06 01:54:45. Stations recordings for the event 2019-03-06 01:54:45.....	169
Σχήμα 60: Παράδειγμα αρχείου με ασυνέχειες. File with blocketes inconsistencies.	170
Σχήμα 61: Φασματικός θόρυβος μονάδας ASP. ASP unit noise spectrum	173
Σχήμα 62: Λόγος σήματος προς θόρυβο. SNR ratio.....	173
Σχήμα 63: Αναπαράσταση της διαθεσιμότητας του συστήματος σε σειρά. System’s availability expressed in series.....	174
Σχήμα 64: Χρονική καθυστέρηση συναρτήσει του μήκους και του αριθμού των μεταπηδήσεων (Piyare & Lee, 2013). Time delay related with packet size and number of hops.	179
Σχήμα 65: Εγκατάσταση τελικών συσκευών. End Devices installation.....	180
Σχήμα 66: Γραφική παράσταση SI - MJMA SI - MJMA correlation (Omron, 2017)	183
Σχήμα 67: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας ASP Dimensions and pinout of ASP unit.....	191
Σχήμα 68: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας τροφοδοσίας Dimensions and pinout of supplier unit.....	191
Σχήμα 69: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας ελέγχου τάσης Dimensions and pinout of voltage monitor unit.....	192
Σχήμα 70: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας προεπεξεργασίας και επεξεργασίας σήματος. Dimensions and pinout of the pre-processing and the processing unit.....	193
Σχήμα 71: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων αισθητήριου επιτάχυνσης Dimensions and pinout of accelerometer sensor	194
Σχήμα 72: Τελικές Συσκευές End Devices	194

Σχήμα 73: Διασύνδεση σειριακής πόρτας με βύσμα RJ-45 RJ-45 to RS-232 pin out	195
Σχήμα 74: Διασύνδεση μονάδας χρονισμού Timing unit pinout.....	195
Σχήμα 75: Οι ακροδέκτες του συνδέσμου για το γεώφωνο και το επιταχυνσιόμετρο σε συνδυασμό με τον χρωματικό κώδικα του καλωδίου που συνδέεται πάνω τους Connectors pinouts for the geophone and the accelerometer sensor and cable color code.....	196
Σχήμα 76: Αναπαράσταση σειράς τοποθέτησης κυκλωμάτων του συστήματος E.A.SY. Representation of the system's circuits mounting series.....	196
Σχήμα 77: Ο σταθμός συναρμολογημένος. An assembled node.....	197
Σχήμα 78: Τελικές συσκευές. Assembled end-devices	197
Σχήμα 79: Η κεντρική φόρμα της εφαρμογής Main form of the application	201
Σχήμα 80: Καταγραφή δεδομένων μετατόπισης (dummy) Displacement plot (dummy data)	202
Σχήμα 81: Απεικόνιση κάλυψης σταθμών στον χάρτη Nodes effective range displayed on map	203
Σχήμα 82: Γράφημα Διέγερσης Triggering plot	204
Σχήμα 83: Φασματογράφημα Spectrogram.....	205
Σχήμα 84: Εφαρμογή δημιουργίας αρχείου ρυθμίσεων Node configuration tool	205
Σχήμα 85: IoT Διεπαφή IoT interface (Node-red).....	206

***Σημείωση:** Τα σχήματα που δεν φέρουν πηγή, έχουν σχεδιαστεί από το συγγραφέα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών ειδών κυμάτων Characteristics of seismic waves	52
Πίνακας 2: Τεχνικές προδιαγραφές του αισθητήρα LGT 4.5. LGT4.5 Specifications.....	85
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά επιταχυνσιόμετρου LIS344ALH. LIS344ALH Specifications.....	89
Πίνακας 4: Οι προδιαγραφές του Συστήματος προετοιμασίας αναλογικού σήματος (ASP) ASP Specifications	94
Πίνακας 5: Τυποποίηση πακέτου προς αποστολή για επεξεργασία. Packet containing data from digitizing module	99
Πίνακας 6: Συνοπτικές ρυθμίσεις της μονάδας ψηφιοποίησης. Digitizer default settings	100
Πίνακας 7: Προδιαγραφές της πλακέτας Wandboard. Wandboard Specifications	104
Πίνακας 8: Παράδειγμα αρχείου ρυθμίσεων Node configuration file template.	109
Πίνακας 9: Συνοπτικές ρυθμίσεις δικτύου. PAN settings	128
Πίνακας 10: Χρόνοι εκτέλεσης. Execution times	134
Πίνακας 11: Επιλεγμένα σεισμικά γεγονότα, την περίοδο 2010-2016, στον ελλαδικό χώρο. Για κάθε γεγονός σημειώνεται το μέγεθός του, Το γεωγραφικό πλάτος/μήκος, το αζιμούθιο και η επικεντρική του απόσταση. Seismic events list	135
Πίνακας 12: Ποσοστό επιτυχών διεγέρσεων. Σε σύνολο 35 δειγμάτων υπήρξαν 35 διεγέρσεις. Percentage of successful triggering.....	137
Πίνακας 13: Αναλυτικά δεδομένα σεισμών και καταγραφών. Seismic events detailed data	138
Πίνακας 14: Μετρήσεις σταθμών ανά σεισμικό γεγονός. Με X σημειώνονται οι ανεπιτυχείς διεγέρσεις ενώ στα πεδία που είναι κενά, δεν υπήρχαν διαθέσιμες	

μετρήσεις. Measurements per event. Notice that X marks unsuccessful triggering. Null cells indicate lack of data.....	140
Πίνακας 15: Αντιστοίχιση σταθμών - αισθητήρων. List of the sensors used on the stations	142
Πίνακας 16: Ποσοστό επιτυχίας. Σε σύνολο 126 δειγμάτων υπήρξαν 115 διεγέρσεις με 60% ορθή εκτίμηση μεγέθους, Percentage of successful triggering – magnitude estimation.....	143
Πίνακας 17: Περιγραφικά χαρακτηριστικά. Descriptive statistics.....	143
Πίνακας 18: Σύγκριση περιγραφικής στατιστικής των τιμών Οπισθοαζιμούθιου που υπολογίστηκαν με τις τιμές της ομάδας ελέγχου. Υπολογίζονται οι μέσοι όροι, η τυπική απόκλιση, το τυπικό σφάλμα και οι ελάχιστες/ μέγιστες τιμές. Descriptive statistics.....	145
Πίνακας 19: Προκαθορισμένες ρυθμίσεις καταγραφικού – Τάσεις αναφοράς (στάθμες). Default digitiser settings – Voltage references (counts)	146
Πίνακας 20: Γεγονότα που καταγράφηκαν. Recorded events.....	152
Πίνακας 21: Παράμετροι φίλτρων. Filter parameters	160
Πίνακας 22: Μετρήσεις μεγέθους σεισμικής ροπής για την βαθμονόμηση του οργάνου. Moment magnitude comparison for Instrument’s experimental Calibration	161
Πίνακας 23: Χρόνοι άφιξης σεισμικών φάσεων και χρόνοι προειδοποίησης. P-S phase travel times and EEWs response time.....	164
Πίνακας 24: Καταγραφές δικτύου CL. CL network recordings.....	166
Πίνακας 25: Οι τέσσερεις δυνατές καταστάσεις που μπορεί να αντιμετωπιστούν από έναν σταθμό του συστήματος. Four possible states of EEW	171
Πίνακας 26: Καταναλώσεις στοιχείων του σταθμού. Node power consumption	175
Πίνακας 27: Σύγκριση προδιαγραφών IRIS-σταθμού. Specification comparison	176

Πίνακας 28: Υπολογιζόμενο κόστος ανά σταθμό & τελική συσκευή Calculated Cost per node & end device	198
Πίνακας 29: Τυπικά κόστη εμπορικών αισθητήρων και καταγραφικών (IRIS, 2014). Typical sensor and digitiser costs	199
Πίνακας 30: Συντομεύσεις εφαρμογής. Application's shortcuts.....	207
Πίνακας 31: Χειριστήρια εφαρμογής. Application's controls	207
Πίνακας 32: Απαιτήσεις Συστήματος. System Requirements	208
Πίνακας 33: Εντολές εφαρμογής - CLI. CLI commands	209
Πίνακας 34: Δομή καταλόγων της εφαρμογής EASY.....	209
Πίνακας 35: Node configuration tool & Ονοματοδοσία καναλιών (Halbert, 2012). Channel naming & Node Configuration tool.....	210
Πίνακας 36: Χρόνοι διαδρομής κυμάτων P- και S- συναρτήσει της επικεντρικής απόστασης για διάφορα εστιακά βάθη. (Kennett et al., 1991 (IRIS, 2018)). P-S travel times related to focal depth	211
Πίνακας 37: Γραφήματα χρόνου διαδρομής κυμάτων P- και S- συναρτήσει της επικεντρικής απόστασης για διάφορα εστιακά βάθη.. Response time – focal depth plots (Kennett et al., 1991) (IRIS, 2018).....	212

ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, στην Αθήνα και ολοκληρώθηκε το 2019. Οι πειραματικές διαδικασίες σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στο Λεκανοπέδιο Αττικής, υπό τις οδηγίες του Επιβλέποντος Καθηγητή Δρ. Βούλγαρη Νικόλαου.

Ο συγγραφέας θα ήθελε να ευχαριστήσει αρχικά τον κ. Καθηγητή Βούλγαρη Νικόλαο, για την ανάθεση του θέματος και την εμπιστοσύνη του καθ' όλη τη διάρκεια υλοποίησης της διατριβής. Θερμές ευχαριστίες εκφράζονται επίσης προς το προσωπικό του Τμήματος Μηχανικών Πληροφορικής και Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής για τις πολύτιμες συμβουλές και την κατανόηση τους πολλές φορές, ώστε να ολοκληρωθεί η διατριβή.

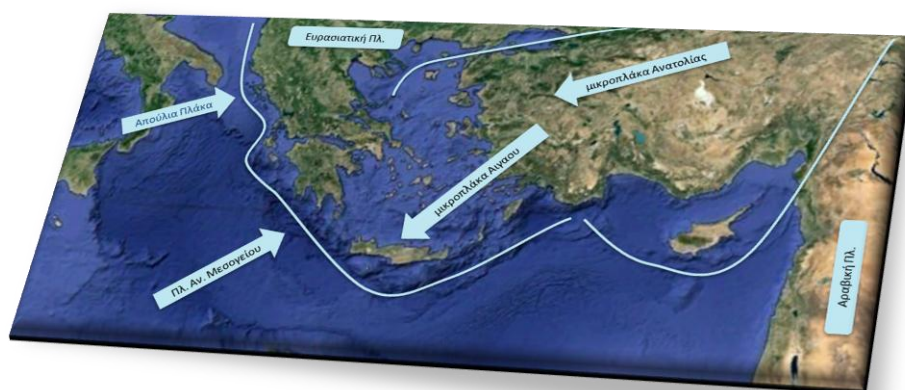
Τέλος ο συγγραφέας επιθυμεί να ευχαριστήσει το «Ίδρυμα Καλλίνικης Δενδρινού - Αντωνακάκη», με έδρα στην Κοργιαλένιο Βιβλιοθήκη του Αργοστολίου Κεφαλληνίας για την Υποτροφία που προσέφερε. Το χορηγούμενο οικονομικό ποσό δαπανήθηκε εξ' ολοκλήρου στην απόκτηση του απαιτούμενου υλικοτεχνικού εξοπλισμού και των απαραίτητων ηλεκτρονικών κυκλωμάτων, για την υλοποίηση της διατριβής, χωρίς κανένα οικονομικό όφελος του συγγραφέα.

Κεφάλαιο 1^ο – Εισαγωγή

1.1 Ορισμός του προβλήματος

Το φαινόμενο των σεισμικών δονήσεων απασχολεί για χιλιάδες χρόνια την ανθρωπότητα, σε παγκόσμια κλίμακα, κυρίως λόγω των εκτεταμένων και σημαντικών καταστροφών που μπορούν να προκαλέσουν. Οι επιπτώσεις ενός ισχυρού σεισμού μπορούν να είναι καταστροφικές τόσο σε επίπεδο υλικών και κτιριακών υποδομών όσο και μοιραίες, σε επίπεδο ανθρώπινων απωλειών. Επίσης, μπορούν να χωριστούν σε άμεσες, όπως για παράδειγμα η κατάρρευση ενός κτηρίου, και σε έμμεσες όπως για παράδειγμα η πρόκληση πυρκαγιών από διαρροές υγρών/αέριων καυσίμων. Λαμβάνοντας υπόψη τις σημαντικές ζημιές που σημειώνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη λόγω ενός σεισμού και ιδιαίτερα σε σειсмоγενείς περιοχές, κρίνεται απαραίτητη η παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας καθώς και η δυνατότητα προειδοποίησης για πιθανούς κινδύνους.

Ο ελλαδικός χώρος αποτελεί μια σημαντική περιοχή όσον αφορά την εμφάνιση σεισμικών γεγονότων, καθώς η Ελλάδα έρχεται πρώτη σε σεισμική δραστηριότητα ανάμεσα στις Ευρωπαϊκές χώρες, και έκτη σε παγκόσμια κατάταξη (Tsarapas, 2008). Αυτό οφείλεται στη γεωγραφική της θέση (Σχήμα 1), καθώς βρίσκεται στο όριο σύγκλισης της Ανατολικής Μεσογείου, που αποτελεί τμήμα της Αφρικανικής λιθοσφαιρικής πλάκας, με τη μικροπλάκα του Αιγαίου, που ανήκει στην Ευρασιατική (Παπαζάχος & Παπαζάχου, 2003).



Σχήμα 1: Αλληλεπίδραση των γειτονικών μικρό-πλακών με την Ευρασιατική πλάκα

Interaction of adjacent micro-plates with the Eurasian plate

1.2 Σκοπός

Σκοπός αυτής της εργασίας, είναι η μελέτη, ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός πρωτότυπου συστήματος έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης (Σ.Ε.Σ.Π.), με γνώμονα το χαμηλό κόστος. Το σύστημα θα είναι κατασκευασμένο εξ' ολοκλήρου από εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα (COTS - Commercial off the shelf), ενώ το λογισμικό του θα είναι ανοιχτού κώδικα. Ένα τέτοιο δίκτυο καταγραφής και προειδοποίησης θα έχει δυνατότητα εγκατάστασης σε αστικές και μη περιοχές του Ελλαδικού χώρου, περιορίζοντας σημαντικά το εύρος των ζημιών που προκαλούνται έμμεσα από τη σεισμική δραστηριότητα, όπως εκδήλωση πυρκαγιών και εκρήξεων από πιθανά βραχυκυκλώματα και διαρροή υγρών και αέριων καυσίμων. Το εν λόγω σύστημα θα πρέπει να είναι ικανό να παρέχει έγκαιρα και έγκυρα αποτελέσματα προειδοποίησης, τόσο ενσύρματα όσο και ασύρματα, για την κάλυψη όλων των εδαφών που εποπτεύει. Η δομή του θα είναι κατακερματισμένη σε σταθμούς (clustered structure), έτσι ώστε να αποφεύγεται η συγκέντρωση δεδομένων σε ένα μόνο σημείο του συστήματος. Κάτι τέτοιο θα οδηγήσει στην ελάττωση του χρόνου επεξεργασίας των δεδομένων, αφού αυτά θα επεξεργάζονται από κάθε σταθμό ξεχωριστά. Οι ειδοποιήσεις που θα παρέχονται από το σύστημα θα απευθύνονται τόσο στις αρμόδιες αρχές, όσο και σε τρίτους που θα φέρουν συσκευές που θα μπορούν να λάβουν την ειδοποίηση που εκδόθηκε, γεγονός που θα βοηθήσει σημαντικά στη μείωση των ανθρώπινων απωλειών.

Στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας διατριβής και προκειμένου να καταστεί λειτουργικό και ωφέλιμο το προαναφερθέν σύστημα προειδοποίησης, η μελέτη επιλύει κρίσιμα προβλήματα, ώστε να ολοκληρωθεί ο σχεδιασμός. Σε αυτά συγκαταλέγονται τα εξής:

- Μελέτη και επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου διέγερσης για την παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας.
- Μελέτη και επιλογή του κατάλληλου αλγόριθμου εκτίμησης της καταστρεπτικότητας του επερχόμενου σεισμού.
- Μελέτη και επιλογή των απαραίτητων αισθητήρων.
- Μελέτη και υλοποίηση του απαραίτητου κυκλώματος ψηφιοποίησης.
- Μελέτη και υλοποίηση όλων των απαραίτητων στοιχείων και κυκλωμάτων που απαρτίζουν το σύστημα.

- Ανάπτυξη και βελτιστοποίηση του απαραίτητου κώδικα τόσο για την επικοινωνία μεταξύ των υποσυστημάτων, όσο και για την επικοινωνία μηχανής – χρήστη.
- Πειραματική εξακρίβωση και βαθμονόμηση.

1.3 Διάρθρωση της διατριβής

Στο πρώτο μέρος της διατριβής αναπτύσσεται ένα εισαγωγικό κεφάλαιο (κεφάλαιο 2), στο οποίο γίνεται εκτενής αναφορά σε αλγόριθμους επιλογής φάσης και σε Σ.Ε.Σ.Π. Τα τελευταία, αναλύονται τόσο σε επίπεδο επεξεργασίας σήματος, όσο και σε επίπεδο υλικού και αισθητήρων. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση των τεσσάρων βασικών κατηγοριών αλγορίθμων επιλογής φάσης, με παρουσίαση των πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μίας μεθόδου.

Στο επόμενο κεφάλαιο της μελέτης (κεφάλαιο 3), ακολουθεί η παρουσίαση των υλικών και των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του συστήματος. Περιγράφονται τα μαθηματικά μοντέλα και οι συχνοτικές αποκρίσεις που διέπουν τους διάφορους αισθητήρες και τις υπομονάδες που απαρτίζουν το σύστημα. Επιπλέον, γίνεται αναλυτική επεξήγηση της αρχής λειτουργίας του συστήματος και παρουσιάζεται η συνεισφορά της παρούσας εργασίας στον τομέα των Σ.Ε.Σ.Π.

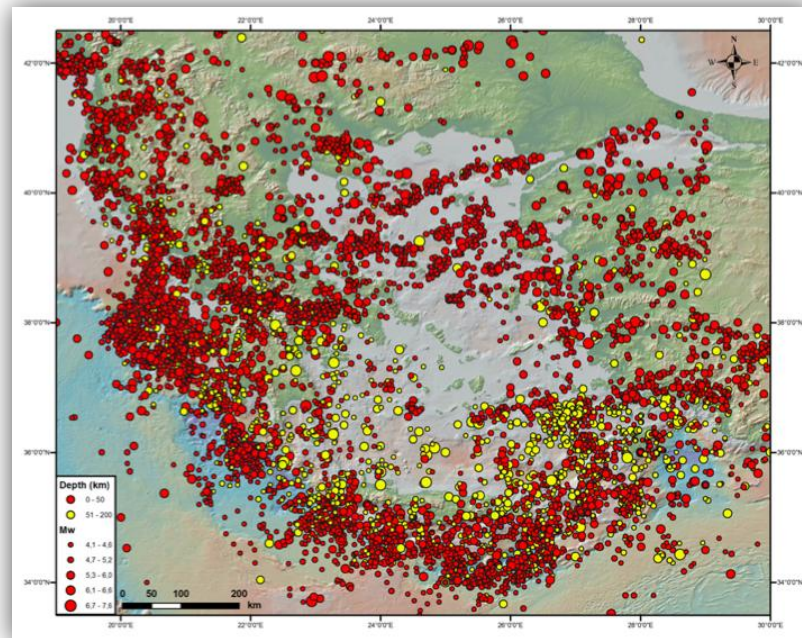
Στα τελευταία κεφάλαια της διατριβής (κεφάλαια 4 & 5), παρουσιάζονται η πειραματική διαδικασία που εκτελέστηκε για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας και απόδοσης του συστήματος, τα αποτελέσματα των μετρήσεων, καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από την παρούσα μελέτη, αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφονται τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν τόσο για τον έλεγχο της ακρίβειας του συστήματος στη λήψη μετρήσεων σεισμικών κυμάτων, σε σύγκριση με υπάρχοντα όργανα καταγραφής, όσο και για την έγκαιρη έκδοση προειδοποιήσεων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας. Ενώ στο 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο ο συγγραφέας εξάγει χρήσιμα συμπεράσματα για τον σχεδιασμό και τις μεθόδους που επιλέχθηκαν, ενώ προτείνονται και βελτιώσεις του μοντέλου για πιθανή μελλοντική χρήση.

Στο συνοδευτικό DVD περιέχεται το κείμενο της εργασίας, η παρουσίαση της, ο κώδικας και τα σχέδια για το υλικό, καθώς επίσης και οι δύο συνοδευτικοί τόμοι που περιγράφουν την τεκμηρίωση του κώδικα (Τόμος 2^{ος} και 3^{ος}).

Κεφάλαιο 2ο – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Η σεισμική δραστηριότητα σε μια περιοχή παίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του καθημερινού τρόπου ζωής στις κοινωνίες, ενώ επηρεάζει και άλλες πτυχές όπως για παράδειγμα, τον πολιτισμό, την αρχιτεκτονική, ακόμη και την οικονομία. Πλήθος σεισμών με μεγάλο αντίκτυπο στις ανθρώπινες κοινωνίες έχουν καταγραφεί ήδη από την αρχαιότητα (Kouskouna & Makropoulos, 2004), ενώ χαρακτηριστικά του αριθμού των σεισμικών γεγονότων είναι τα στατιστικά στοιχεία του σεισμολογικού εργαστηρίου του Πανεπιστημίου Αθηνών (National and Kapodistrian University of Athens, 2014). Αναφορικά, μόνο κατά τα έτη 2013-14, σημειώθηκαν 151 σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο από μέγεθος σεισμικής ροπής (M_w) 3.6. Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται μία αντιπροσωπευτική εικόνα της έντονης σεισμικής δραστηριότητας στην Ελλάδα, με την κατανομή των επικέντρων των σεισμών μικρού και ενδιάμεσου εστιακού βάθους που σημειώθηκαν την περίοδο 1900-2009 (Makropoulos et al., 2012).



Σχήμα 2: Κατανομή σεισμικών γεγονότων κατά την περίοδο 1900-2009 (Makropoulos et al., 2012) Distribution of seismic events for the period 1900-2009

Στην παρούσα διατριβή, κύριος σκοπός είναι ο σχεδιασμός ενός συστήματος έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης (Σ.Ε.Σ.Π) και η υλοποίησή του.

Προκειμένου να γίνει κατανοητός ο τρόπος λειτουργίας του, ώστε να επιτευχθεί μία αποδοτική υλοποίηση που θα παρέχει ικανοποιητικά αποτελέσματα, είναι απαραίτητη μία σύντομη βιβλιογραφική ανασκόπηση των βασικών αρχών των σεισμικών κυμάτων και των χρησιμοποιούμενων μεγεθών που τα ορίζουν. Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει ανάλυση της απαιτούμενης θεωρίας για την επεξήγηση των χαρακτηριστικών και τη λειτουργία των Σ.Ε.Σ.Π.

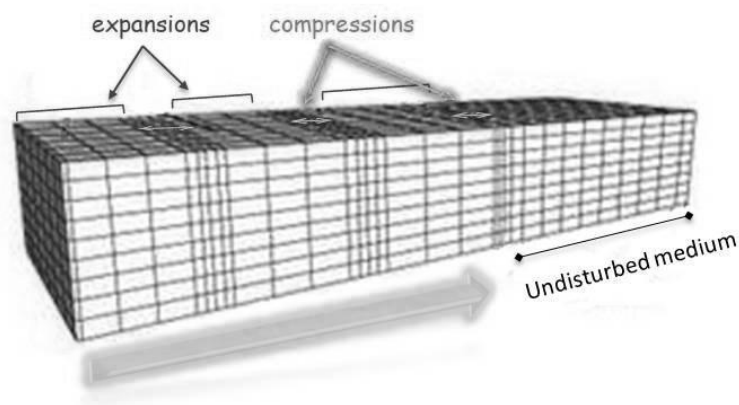
2.2 Βασικές κατηγορίες σεισμικών κυμάτων

2.2.1 Ελαστικά κύματα χώρου

Όταν σημειώνεται ένας σεισμός παράγονται δύο είδη κυμάτων χώρου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αντίδραση του μέσου διάδοσης στην αλλαγή που υφίσταται ως προς τον όγκο αλλά και το σχήμα του. Έτσι, τα ελαστικά κύματα χώρου διακρίνονται στα κύματα P και S.

2.2.1.1 Κύματα P

Τα Κύματα P (*Primus - Primary*) είναι κύματα τα οποία διαδίδονται από την εστία του σεισμού προς όλες τις διευθύνσεις. Πρόκειται για επιμήκη κύματα, τα οποία μπορούν να διαδοθούν τόσο σε στερεά όσο και ρευστά μέσα και για τον λόγο αυτόν μπορούν να διαδίδονται σε κάθε στρώμα της γης. Επιπλέον, ένα τμήμα της ενέργειας τους μπορεί να μεταφέρεται στην ατμόσφαιρα ως ηχητικό σήμα, το οποίο λόγω της χαμηλής του συχνότητας μπορεί να γίνει αντιληπτό από τα ζώα, καθώς έχουν χαμηλότερο ακουστικό φάσμα σε σχέση με το ανθρώπινο. Η πόλωση των κυμάτων P είναι διαμήκης στην κατεύθυνση διάδοσης του σήματος, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Τρόπος διάδοσης του κύματος P (Structuremag, 2015)

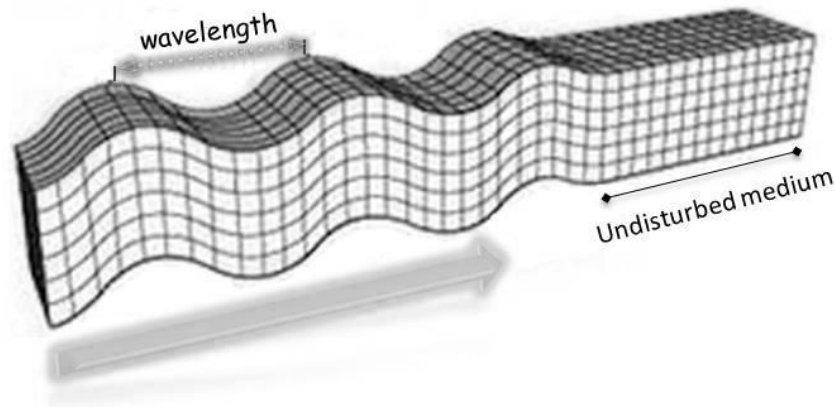
P-Wave propagation

Όσον αφορά την ταχύτητα των κυμάτων P, είναι η πιο μεγάλη συγκριτικά με τις ταχύτητες των άλλων κυμάτων χώρου αλλά και επιφανείας. Χρησιμοποιώντας τις σταθερές Lamè λ και μ και την πυκνότητα του μέσου ρ , η ταχύτητα των κυμάτων P εκφράζεται μέσω της εξίσωσης 2.1:

$$\alpha = V_p = \sqrt{\frac{(\lambda + 2\mu)}{\rho}} \quad (2.1)$$

2.2.1.2 Κύματα S

Τα κύματα S (*Secundus - Secondary*) κινούνται πιο αργά σε σύγκριση με τα P, αλλά είναι πολύ πιο ισχυρά και καταστρεπτικά κύματα. Σε αντίθεση με τα επιμήκη κύματα, τα οποία δημιουργούν πυκνώματα και αραιώματα, τα S είναι εγκάρσια, με αποτέλεσμα να τροποποιούν το σχήμα των πετρωμάτων κατακόρυφα ως προς τη διεύθυνση διάδοσης τους, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4: Τρόπος διάδοσης του κύματος S (Structuremag, 2015)

S-Wave propagation

Μία ακόμα σημαντική διαφορά με τα επιμήκη κύματα, είναι το γεγονός ότι τα εγκάρσια δεν μπορούν να διαδοθούν μέσω ρευστών σωμάτων. Έτσι προέκυψε και το συμπέρασμα πως ο εξωτερικός πυρήνας της γης είναι υγρός, καθώς δεν επιτρέπει τη διάδοση εγκάρσιων κυμάτων.

Ως προς την πόλωσή τους, τα S κύματα κατατάσσονται σε **SH** (πολωμένα οριζόντια) και **SV** (πολωμένα κατακόρυφα) κύματα. Σε αντιστοιχία με τα κύματα P, η ταχύτητά τους εκφράζεται ως προς τις σταθερές Lamé και την πυκνότητα στην εξίσωση 2.2:

$$\beta = V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.2)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 2.1 και 2.2 προκύπτει ο λόγος των δύο ταχυτήτων V_p / V_s . Λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή ότι βρισκόμαστε σε μέσο διάδοσης στο οποίο $\lambda = \mu$ και ο λόγος Poisson σ ισούται με 0.25, ο λόγος V_p / V_s ισούται με $\sqrt{3}$, τιμή που προσεγγίζει τον αντίστοιχο λόγο ταχυτήτων για τα πετρώματα του φλοιού της γης. Επιπλέον, αυτός ο λόγος αποδεικνύει μαθηματικά ότι τα κύματα P είναι πολύ πιο γρήγορα από τα κύματα S. Βιβλιογραφικά, οι τυπικές τιμές του λόγου V_p / V_s για συμπαγή βράχο κυμαίνονται από 1.5 έως 2.0 (Kayal, 2008).

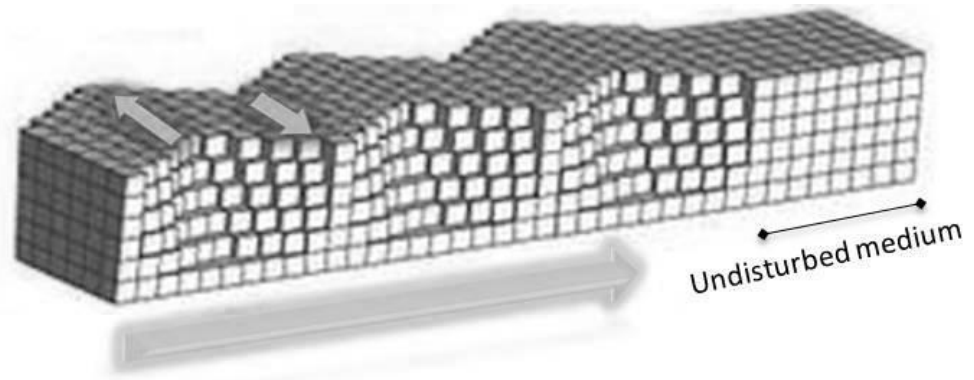
2.2.2 Ελαστικά Επιφανειακά κύματα

Τα επιφανειακά κύματα προκύπτουν από την αλληλεπίδραση των κυμάτων P και S με την επιφάνεια της γης και είναι συχνά υπεύθυνα για τις καταστροφές που προκαλεί ένας σεισμός. Η ονομασία τους οφείλεται στο γεγονός ότι διαδίδονται κοντά στην επιφάνεια της γης, ενώ όσο απομακρύνονται από αυτήν το πλάτος τους μειώνεται σταδιακά (Kulhánek, 2012). Στα κύματα επιφανείας η ταχύτητα αυξάνεται με την αύξηση της περιόδου (T) - κανονική σκέδαση.

2.2.2.1 Κύματα Love (L_Q)

Η ύπαρξη των κυμάτων Love προβλέφθηκε μαθηματικά το 1911 από τον μαθηματικό *H. Love* (Love, 1911). Τα συγκεκριμένα κύματα προκύπτουν σε ένα οριζόντιο στρώμα που λειτουργεί σαν κυματοδηγός. Το στρώμα αυτό εφάπτεται σε έναν ημιχώρο ο οποίος έχει διαφορετικές φυσικές ιδιότητες και μεγαλύτερη ταχύτητα διάδοσης εγκαρσίων κυμάτων.

Προκειμένου να δημιουργηθούν κύματα Love, θα πρέπει τα SH κύματα ανάμεσα στα δυο υλικά να ανακλώνται με γωνίες μεγαλύτερες από την ορική γωνία θ_{crit} . Επιπλέον, θα πρέπει η ταχύτητα (β_1) των SH κυμάτων στο στρώμα να είναι μικρότερη από την ταχύτητα (β_2) των κυμάτων στον ημιχώρο. Η ταχύτητα των κυμάτων V_{LQ} βρίσκεται μεταξύ των δύο ακραίων τιμών: $\beta_1 < V_{LQ} < \beta_2$.



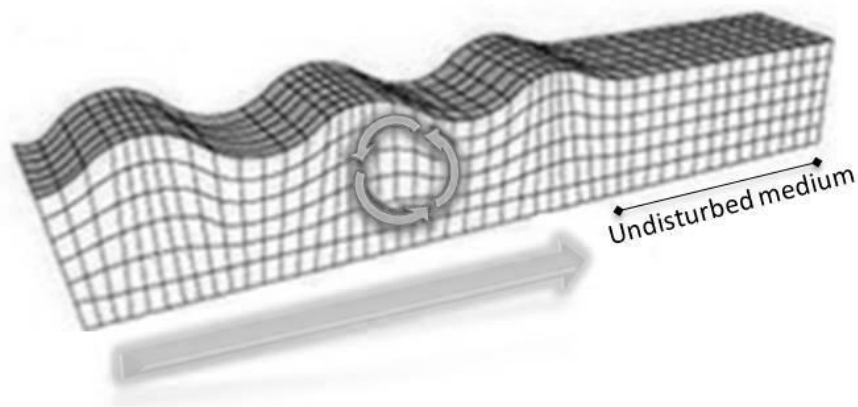
Σχήμα 5: Τρόπος διάδοσης κύματος Love (Structuremag, 2015)

Love-Wave propagation

Στην περίπτωση που ισχύουν οι παραπάνω προϋποθέσεις, τότε δημιουργούνται τα εν λόγω κύματα, τα οποία έχουν οριζόντια πόλωση κατά μήκος του άξονα διάδοσης, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Τα συγκεκριμένα κύματα είναι πιο αργά από τα κύματα χώρου αλλά πιο γρήγορα από τα Rayleigh, τα οποία αναφέρονται στη συνέχεια.

2.2.2.2 Κύματα Rayleigh (L_R)

Ο συγκεκριμένος τύπος κυμάτων φέρει την ονομασία του *Λόρδου Rayleigh*, ο οποίος προέβλεψε πρώτος την ύπαρξη τους (Rayleigh, 1885). Τα κύματα L_R είναι πολωμένα ελλειπτικά και προκύπτουν από την συμβολή των P και SV κυμάτων. Η κίνηση τους στην επιφάνεια της γης ακολουθεί μια ανάδρομη έλλειψη πάνω στο κατακόρυφο επίπεδο, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 6, παρόμοια με την κίνηση που ακολουθούν τα θαλάσσια κύματα.



Σχήμα 6: Τρόπος διάδοσης κύματος Rayleigh (Structuremag, 2015)

Rayleigh-Wave propagation

Σε ένα στερεό Poisson, η ταχύτητα του κύματος V_{LR} μπορεί να υπολογιστεί από την σχέση $V_{LR} = \sqrt{2 - \frac{2}{\sqrt{3}}} \cdot V_S$ και ισούται περίπου με $\sim 0.92V_S$ (Lowrie, 2007). Αναφορικά, σύμφωνα με μαρτυρίες, ο Λόρδος Rayleigh υπολόγιζε πως τα κύματα αυτά δεν θα υφίσταντο καμία σκέδαση. Ωστόσο, τα συγκεκριμένα κύματα σκεδάζονται κανονικά, καθώς η περιγραφή του μοντέλου της γης διαφέρει σημαντικά από τις παραδοχές του παρελθόντος, όπως για παράδειγμα στο γεγονός ότι η βαρύτητα αγνοείται και η μελέτη πραγματοποιείται σε επίπεδο χώρο απείρου μήκους (Love, 1911).

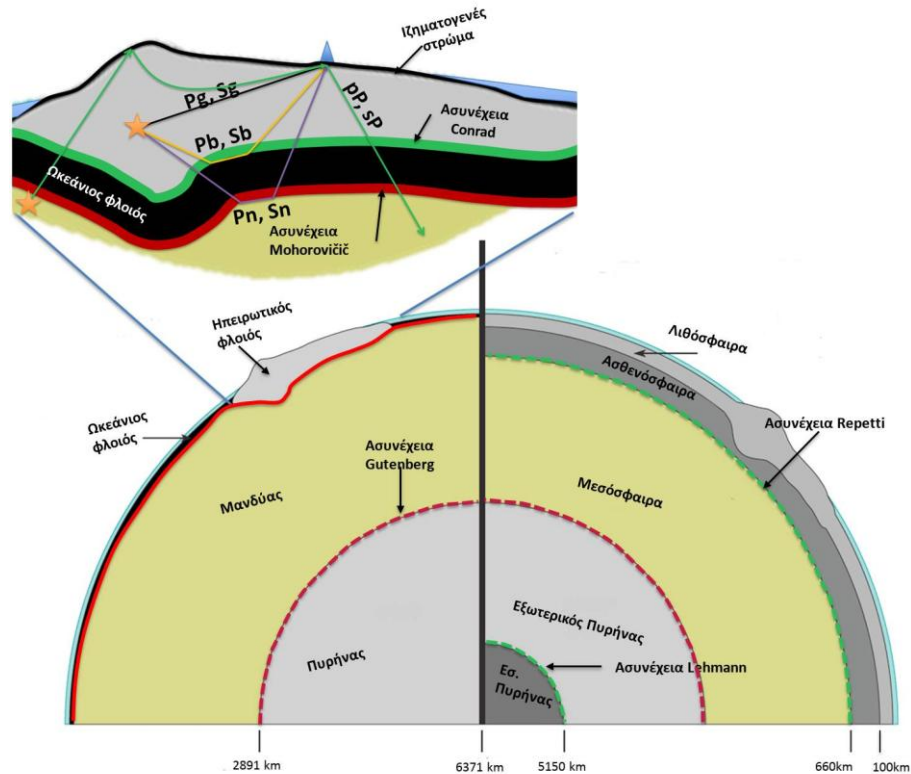
2.3 Η Δομή της Γης

Η συμβολή της επιστήμης της σεισμολογίας είναι σημαντική όχι μόνο στην κατανόηση του σεισμικού φαινομένου και την προσπάθεια έγκαιρης προειδοποίησης, αλλά και στην κατανόηση της δομής του πλανήτη μας. Ο λόγος είναι το γεγονός πως οι ανθρώπινες δραστηριότητες έχουν περιορισμένη δυνατότητα μελέτης της δομής ως προς το βάθος. Έτσι, αρκετές πληροφορίες έχουν έρθει στη δημοσιότητα μέσω της παρατήρησης του χρόνου διάδοσης των σεισμικών κυμάτων, στο εσωτερικό της Γης.

Η δομή της Γης μπορεί να αναπαρασταθεί σαν ένα μονοδιάστατο μοντέλο (1D) που εκφράζει κάποιες ιδιότητες της, όπως για παράδειγμα την ελαστικότητα του μέσου διάδοσης, την πυκνότητα, την πίεση και την βαρύτητα, ως συνάρτηση της ακτίνας του πλανήτη (η οποία εκτιμάται ότι είναι 6.371km). Το πρώτο αξιόπιστο μοντέλο αναπαράστασης της δομής του πλανήτη προτάθηκε από τον Bullen το 1940 (Bullen, 1940), έχοντας σαν βάση την μελέτη της μεταβολής της πυκνότητας της Γης. Με το πέρασμα των χρόνων παρουσιάστηκαν και άλλα μονοδιάστατα μοντέλα με τα πιο πρόσφατα να είναι τα Preliminary Reference Earth Model – PREM (Dziewonski A.M., 1981), το IASP-9 (Kennett et al., 1991), το AK135-f (Kennett et al., 1995); (Montagner & Kennett, 1996) και το STW105 (Kustowski et al., 2008).

Η ανάλυση του στρωματικού μοντέλου της Γης μπορεί να γίνει τόσο προς τη χημική της σύσταση, όσο και ως προς τις φυσικές της ιδιότητες, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 7. Ως προς την σύσταση της, η Γη αποτελείται από τον φλοιό, τον μανδύα και τον πυρήνα, ενώ ως προς τις φυσικές της ιδιότητες διακρίνονται τα εξής στρώματα: λιθόσφαιρα, ασθενόσφαιρα, μεσόσφαιρα, εξωτερικός και εσωτερικός πυρήνας. Ανάμεσα στα προαναφερθέντα στρώματα, αλλά και στα μικρότερα υποστρώματα από τα

οποία απαρτίζονται, παρατηρούνται σχεδόν σφαιρικές ζώνες, οι οποίες έχουν μία ιδιαίτερη ιδιότητα: την απότομη μεταβολή που παρατηρείται στην ταχύτητα των σεισμικών κυμάτων, όταν αυτά διέρχονται μέσα από αυτές τις ζώνες. Έτσι, λόγω αυτής της ιδιότητας οι σφαιρικές αυτές δομές ονομάζονται ασυνέχειες και ταξινομούνται ανάλογα με το αν διαχωρίζουν τα στρώματα της Γης μεταξύ τους (ασυνέχειες πρώτης τάξης) ή αν διαχωρίζουν τα υποστρώματα (ασυνέχειες δεύτερης τάξης).



Σχήμα 7: Δομή της γης με βάση τη χημική σύσταση (Αριστερά) και τις φυσικές ιδιότητες (Δεξιά).

Earth layered model according to chemical composition (left) and physical characteristics (right)

2.3.1 Διάδοση σεισμικών φάσεων

Καθώς τα σεισμικά κύματα διαδίδονται στο εσωτερικό της Γης, παρατηρείται αλλαγή στην ταχύτητα διάδοσής τους, καθώς αυτά διέρχονται από τα διάφορα στρώματα που την απαρτίζουν. Κάθε διαδρομή μέσα από ένα μέσο παράγει ένα ξεχωριστό είδος σεισμικής φάσης. Παρακάτω παραθέτονται οι πιο βασικές φάσεις φλοιού και ανώτερου μανδύα (Bormann et al., 2013).

- **Pn, Sn:** Διαμήκη ή εγκάρσια κύματα που διατρέχουν τον άνω μανδύα και προσπίπτουν πάνω στην ασυνέχεια Mohorovicic, υπό οριακή γωνία i_c και διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής με το κατακόρυφο επίπεδο.
- **Pg, Sg:** Διαμήκη ή εγκάρσια κύματα που έχουν το σημείο καμπής τους στο γρανιτικό τμήμα ή μέσα στο ιζηματογενές στρώμα του φλοιού, υπό οριακή γωνία i_c και διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής με το κατακόρυφο επίπεδο.
- **Pb, Sb:** Διαμήκη ή εγκάρσια κύματα που έχουν το σημείο καμπής τους στο βασαλτικό τμήμα του φλοιού ή κατά μήκος της ασυνέχειας Conrad υπό οριακή γωνία i_c και διαδίδονται κατά μήκος της τομής της επιφάνειας αυτής με το κατακόρυφο επίπεδο.
- **pP, sP:** Διαμήκη ή εγκάρσια κύματα που προκύπτουν ύστερα από ανάκλαση ενός ανερχόμενου P/S κύματος στην επιφάνεια.

2.4 Μεγέθη σεισμικών γεγονότων

Κατά τη σεισμική δραστηριότητα υπάρχει μετασχηματισμός της δυναμικής ενέργειας των λιθοσφαιρικών πλακών σε κυματική. Η περιοχή στην οποία συμβαίνει η διάρρηξη των πετρωμάτων ονομάζεται σεισμική εστία και θεωρείται σημειακή κατά παραδοχή. Η προβολή της στην επιφάνεια της γης ονομάζεται επίκεντρο, ενώ η απόσταση εστίας και επικέντρου ονομάζεται εστιακό βάθος. Βάσει του εστιακού βάθους (EB) οι σεισμοί διαχωρίζονται ως εξής (Kimiuyuki A., 2003):

- Μικρού εστιακού βάθους – Επιφανειακοί (EB < 70km)
- Ενδιάμεσου εστιακού βάθους (70 < EB < 300km)
- Μεγάλου εστιακού βάθους (EB > 300km)

Ωστόσο, για να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για οποιαδήποτε σεισμική δραστηριότητα, είναι απαραίτητος ο ορισμός ενός μεγέθους για τον σκοπό αυτόν. Έτσι, το μέγεθος M ενός σεισμού είναι το μέτρο της ολικής ενέργειας που εκλύεται κατά τη διάρρηξη στην εστία. Ανάλογα με τα δεδομένα εισόδου αλλά και τον τρόπο επεξεργασίας τους, έχουν προταθεί διάφορες κλίμακες μεγεθών, που αναλύονται στη συνέχεια.

2.4.1 Τοπικό Μέγεθος M_L

Το τοπικό μέγεθος M_L (κλίμακα Richter) προτάθηκε το 1935 και βασίζεται στις μετρήσεις των μέγιστων πλατών με χρήση σεισμομέτρου στρέψης με τις εξής προδιαγραφές: περίοδο οργάνου $T_o=0.8$ sec, μεγέθυνση $V_o=2800$ και δυναμική απόσβεση $\zeta=0.7$. Ο ορισμός δόθηκε για σεισμόμετρο τοποθετημένο 100 χιλιόμετρα από το επίκεντρο του εκάστοτε σεισμού. Ως πρότυπος σεισμός ορίζεται ο σεισμός με πλάτος $A'_o=1$ μm . Το μέγεθος M_L προκύπτει από την διαφορά των δεκαδικών λογαρίθμων του μέγιστου καταγεγραμμένου πλάτους και του πρότυπου σεισμού (Richter, 1935), σύμφωνα με την εξίσωση 2.3. Για τον Ελλαδικό χώρο υπάρχει η σχέση 2.3B (Kiritzi & Papazachos, 1986), όπου α το πλάτος της εδαφικής κίνησης, R η υποκεντρική απόσταση και C_s η διόρθωση του σταθμού.

$$M_L = \log A_o - \log A'_o \quad (2.3)$$

$$M_L = \log \alpha + 2.32 \log R - 1.07 + C_s \quad (2.3\beta)$$

2.4.2 Επιφανειακό Μέγεθος M_S

Το μέτρο του επιφανειακού μεγέθους χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί εύκολα το μέγεθος των σεισμών. Ωστόσο, το βασικό μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η αδυναμία υπολογισμού του μεγέθους σεισμών που με μεγάλο βάθος. Συγκεκριμένα, το μέγεθος αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εστιακά βάθη μικρότερα των 50 χιλιομέτρων (Lowrie, 2007). Ο υπολογισμός του προκύπτει από τον τύπο της Πράγας (εξίσωση.2.4) (Vanek et al., 1962), όπου α : το μέγιστο πλάτος των κυμάτων L_R σε μm , T : η περίοδος του σήματος και Δ : η επικεντρική απόσταση σε μοίρες, με την προϋπόθεση $20^\circ < \Delta < 160^\circ$. Για τον Ελλαδικό χώρο έχει προταθεί η σχέση (2.4B) (Papazachos & Vassilicou, 1966)

$$M_S = \log \frac{\alpha}{T} + 1.66 \log \Delta + 3.3 \quad (2.4)$$

$$M_S = \log \alpha + 1.42 \log \Delta + 0.2 \quad (2.4\beta)$$

2.4.3 Μέγεθος διάρκειας σήματος M_d

Ένα πρόβλημα που προκύπτει εξαιτίας του κορεσμού των οργάνων, είναι η αδυναμία υπολογισμού του μεγέθους του σεισμού. Το παραπάνω πρόβλημα επιλύεται χρησιμοποιώντας την μέθοδο υπολογισμού μεγέθους με βάση τη διάρκεια των κυμάτων και της επικεντρικής απόστασης.. (Bisztricsany, 1958). Η συγκεκριμένη μέθοδος εφαρμόζεται αρκετά συχνά σαν

πρώτη λύση για τον υπολογισμό μεγέθους. Έχει τροποποιηθεί για τα δεδομένα του Ελλαδικού χώρου σύμφωνα με την σχέση

$$M_d = -1.1 + 2.35 \log d + 0.0012 \Delta \text{ (Kaviris, 2003)}$$

2.4.4 Χωρικό Μέγεθος m_B

Προκειμένου να μπορεί να υπολογισθεί το μέγεθος οποιουδήποτε σεισμικού γεγονότος, ανεξαρτήτως εστιακού βάθους και επικεντρικής απόστασης, προτάθηκε σαν λύση η μέθοδος υπολογισμού του χωρικού μεγέθους m_B (Gutenberg, 1945). Το 1956 έγιναν βελτιώσεις του τύπου (Gutenberg & Richter, 1956) και έτσι το m_B προκύπτει από τον υπολογισμό της εξίσωσης 2.5, με χρήση έτοιμων πινάκων. Στη συγκεκριμένη εξίσωση είναι απαραίτητα τα εξής μεγέθη: το μέγιστο πλάτος u των κυμάτων P σε μm , η περίοδος του σήματος T, ο διορθωτικός παράγοντας Q λόγω της ανελαστικής εξασθένισης συναρτήσει της επικεντρικής απόστασης και του εστιακού βάθους και οι σταθερές c και d . Οι δύο τελευταίες είναι σταθερές της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένο το καταγραφικό όργανο και της περιοχής στην οποία βρίσκεται η σεισμική εστία, αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό του μεγέθους χρησιμοποιούνται δεδομένα όταν $21^\circ < \Delta < 100^\circ$ και για σήματα με περίοδο $T=1 \text{ sec}$.

$$m_B = \log \frac{u}{T} + Q(\Delta, h) + c_2 + d_2 \quad (2.5)$$

2.4.5 Μέγεθος Σεισμικής Ροπής M_w

Στο σημείο αυτό αξίζει να υπογραμμιστεί η εξής παρατήρηση: οι προαναφερθείσες κλίμακες παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς το μέτρο των μεγεθών που υπολογίζουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι επεξεργάζονται δεδομένα ενός περιορισμένου φάσματος συχνοτήτων, σε σχέση με το συνολικό φάσμα που εκπέμπεται από τη σεισμική πηγή. Το φυσικό μέγεθος που χρησιμοποιείται προκειμένου να γίνει υπολογισμός του μεγέθους ενός σεισμικού γεγονότος, σε όλο το φάσμα των σεισμικών εκπομπών, είναι η σεισμική ροπή M_0 (Aki, 1966) (εξίσωση. 2.6). Στην εξίσωση αυτή μ είναι το μέτρο δυσκαμψίας του υλικού στην εστία του σεισμού, S είναι το εμβαδόν του σεισμογόνου ρήγματος και u είναι η μέση μετάθεση στην επιφάνεια του ρήγματος κατά τη γένεση του σεισμού. Η έρευνα των Hanks και Kanamori (Hanks & Kanamori, 1979), βασίζεται στη σεισμική ροπή. Προκειμένου να υπολογιστεί το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w (εξίσωση. 2.7) είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της σεισμικής ροπής M_0 , με χρήση του εμπειρικού τύπου (Keilis-

Borok, 1959). (εξίσωση. 2.8). Στην εξίσωση αυτή: ρ : η πυκνότητα του μέσου, R : η υποκεντρική απόσταση, Ψ : το φάσμα μακρινού πεδίου των εγκάρσιων κυμάτων, β : η ταχύτητα διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων, k είναι ένας συντελεστής διόρθωσης και ο $R_{\theta\phi}$ είναι η συνάρτηση ακτινοβολίας (radiation pattern) των κυμάτων S .

$$M_O = \mu S u \quad (2.6)$$

$$M_W = \frac{\log M_O - 16.1}{1.5} \quad (2.7)$$

$$M_O = \frac{4\pi\rho R\beta^3\Psi}{kR_{\theta\phi}} \approx \frac{4\pi\rho R\beta^3\Psi}{0.85} \quad (2.8)$$

Επιπλέον, έχουν προταθεί εμπειρικές σχέσεις που συσχετίζουν τα μεγέθη M_S , m_B με το μέγεθος σεισμικής ροπής και παρουσιάζονται στις εξισώσεις 2.8-2.11 (Scordilis, 2006).

$$M_W = 0.99M_S + 0.08, 6.2 \leq M_S \leq 8.2 \quad (2.9)$$

$$M_W = 0.67M_S + 2.07, 3.0 \leq M_S \leq 6.1 \quad (2.10)$$

$$M_W = 0.85m_B + 1.03, 3.5 \leq M_B \leq 6.2 \quad (2.11)$$

2.4.5.1 Συσχέτιση μετατόπισης P_d - Μεγέθους Σεισμικής Ροπής

Οι Wu και Zhao (Wu & Zhao, 2006) απέδειξαν τη συσχέτιση του μέγιστου πλάτους μετατόπισης P_d (m - S.I.) της κατακόρυφης συνιστώσας με το μέγεθος σεισμικής ροπής χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.12, όπου A,B,C σταθερές που προκύπτουν ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης και R η υποκεντρική απόσταση. Επιπλέον, η εξίσωση 2.12 μπορεί να συσχετιστεί με τη μέγιστη εδαφική ταχύτητα (Peak ground velocity - PGV) μέσω της εξίσωσης 2.13 (Wu & Kanamori, 2005b):

$$\log P_d = A + BM_w + C \log R \quad (2.12)$$

$$\log PGV = 0.832 \log P_d + 1.481 \quad (2.13)$$

2.4.5.2 Συσχέτιση μέσης σεισμικής περιόδου τ_c - Μεγέθους Σεισμικής Ροπής

Άλλη μία χρήσιμη συσχέτιση είναι εκείνη της μέσης σεισμικής περιόδου τ_c του κύματος P με το μέγεθος σεισμικής ροπής. Το τ_c υπολογίζεται εντός των πρώτων λίγων δευτερολέπτων μετά την έλευση του κύματος P , για δεδομένα στα οποία έχουν εφαρμοστεί ανωπερατό φίλτρο Butterworth, με $F_c=0.075\text{Hz}$. Ο υπολογισμός του γίνεται με χρήση της εξίσωσης 2.14 (Wu & Kanamori,

2005a), όπου u η μετατόπιση (m - S.I.) και τ_0 ο μέγιστος χρόνος υπολογισμού της σταθεράς τ_c . Ακολουθώντας, το τ_c μπορεί να συσχετιστεί με το μέγεθος σεισμικής ροπής M_w μέσω της εμπειρικής εξίσωσης 2.15 (Wu & Kanamori, 2008):

$$\tau_c = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt}}} \quad (2.14)$$

$$\log \tau_c = 0.296 M_w - 1.462 \pm 0.122 \quad (2.15)$$

2.4.5.3 Συσχέτιση μέσης σεισμικής περιόδου τ_c - μετατόπισης P_d και υποκεντρικής απόστασης

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 2.12 και 2.15 προκύπτει ο υπολογισμός της υποκεντρικής απόστασης R , γνωρίζοντας τη μέση σεισμική περίοδο και τη μέγιστη μετατόπιση P_d . (εξίσωση 2.16):

$$\log R = \frac{\log P_d - (A + B(4.525 \log \tau_c + 5.036))}{C} \quad (2.16)$$

2.5 Συστήματα έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης (Σ.Ε.Σ.Π)

Βραχυπρόθεσμα η σεισμική δραστηριότητα μπορεί να θεωρηθεί μια ξαφνική και βίαιη εκτόνωση. Μακροπρόθεσμα μπορεί να αναλυθεί σαν μια μακροχρόνια διαδικασία συσσώρευσης της καταπόνησης μέσα σε ένα ιδιαίτερα ετερογενές μέσο. Μέσω κατανόησης της διαδικασίας συσσώρευσης ενέργειας αλλά και της παραμόρφωσης του φλοιού, είναι δυνατή η πρόληψη των έμμεσων αποτελεσμάτων της σεισμικής δραστηριότητας με την επεξεργασία σεισμικών κυμάτων με βάση την τρέχουσα τιμή τους και σε συνάρτηση με τις προηγούμενες τους τιμές. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι η σεισμική δραστηριότητα είναι εκ φύσεως μια χαοτική διαδικασία, με αποτέλεσμα να παρουσιάζει σύνθετη μηχανική συμπεριφορά και ως εκ τούτου δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί εύκολα. Έτσι, με όλα τα παραπάνω δεδομένα το πρόβλημα της βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης σεισμών δεν έχει λυθεί με την υπάρχουσα τεχνογνωσία (Kanamori et al., 1997). Ωστόσο, μπορεί να περιοριστούν οι συνέπειες από έναν επερχόμενο σεισμό, με την χρήση Σ.Ε.Σ.Π (Wu & Kanamori, 2008).

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να γίνει πλήρως ξεκάθαρη και κατανοητή η λειτουργία των Σ.Ε.Σ.Π. Δεν πρόκειται για συστήματα μείωσης του κινδύνου αλλά μείωσης της έκθεσης στον κίνδυνο και της ευπάθειας. Προκειμένου ένα

τέτοιο σύστημα να είναι αποδοτικό θα πρέπει να πληροί ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών και τεχνικών προδιαγραφών. Ένα διάστημα ειδοποίησης της τάξεως των 10sec σε περιοχές αυξημένου κινδύνου, για παράδειγμα, είναι εξαιρετικά μικρό και απαιτεί υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης, ενώ εγείρει και νομικά ζητήματα ευθύνης σε περίπτωση ψευδών ή λανθασμένων ειδοποιήσεων. Ωστόσο, η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να έχει σημαντικά οφέλη σε διάφορες πτυχές της ανθρώπινης ζωής όπως: την έγκαιρη προειδοποίηση δομών και εγκαταστάσεων που οφείλουν να παραμένουν λειτουργικές σε έναν σεισμό (π.χ. νοσοκομεία, έλεγχος εναέριας κυκλοφορίας), τη μείωση των αρνητικών συνεπειών ενός σεισμού σε κατοικημένες περιοχές (εκδήλωση πυρκαγιάς, εμφάνιση τσουνάμι), την αύξηση της ασφάλειας του πληθυσμού ειδικά σε δημόσιους χώρους (σχολεία, υπηρεσίες), την προστασία των δημόσιων μεταφορών και φυσικά την όσο το δυνατό συντομότερη επιστροφή των ανθρώπων στους καθημερινούς ρυθμούς, πριν τη γένεση του σεισμού. Δεν είναι άλλωστε λίγες οι φορές που οι περισσότερες καταστροφές δεν οφείλονται σε αυτό καθ' αυτό το σεισμικό φαινόμενο, αλλά σα συνοδά του φαινόμενα, όπως για παράδειγμα τα τσουνάμι (Sumatra, 2004), οι φωτιές (Tokyo, 1923), τα βιομηχανικά ατυχήματα (Izmit, 1999) και οι κατολισθήσεις (El Salvador, 2003); (Gasparini et al., 2011).

2.5.1 Ιστορικά δεδομένα - Αναγκαιότητα

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού που παρατηρείται τις τελευταίες δεκαετίες, μετατρέπει συχνά τις μεγαλουπόλεις σε κέντρα που υπόκεινται σε αυξημένο κίνδυνο παγκόσμιων φυσικών αλλαγών. Η αστικοποίηση ακόμη και στην Ευρώπη, μία ήπειρο με λιγότερο δραματική αύξηση πληθυσμού στις πόλεις, σε συνδυασμό με το υψηλό ποσοστό βιομηχανοποίησης και την ταχέως αναπτυσσόμενη δικτύωση των υποδομών, αυξάνει τον κίνδυνο των μεγάλων αστικών κέντρων σε οποιαδήποτε πιθανή φυσική καταστροφή (Billham, 2009). Έτσι, ένα οποιοδήποτε συμβάν που μπορεί να λάβει χώρα σε μία πυκνοκατοικημένη περιοχή συνοδεύεται από μεγάλες πιθανότητες απώλειας τόσο υλικών και οικονομικών στοιχείων, όσο κυρίως και από απώλειες σημαντικού αριθμού ανθρώπινων ζωών. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι παρά τους συγκριτικά μεγαλύτερους ανθρώπινους πληθυσμούς στην Ιαπωνία και στις Ηνωμένες Πολιτείες, ο ευρωπαϊκός πληθυσμός εμφανίζει 10 και 100 φορές μεγαλύτερη αντιστοίχως ευπάθεια σε έναν σεισμό, λόγω μικρότερων δαπανών για αντισεισμική προστασία και ασθενέστερα Σ.Ε.Σ.Π (Gasparini et

al., 2011). Συνεπώς, γίνεται εύκολα αντιληπτή η αναγκαιότητα ενός Σ.Ε.Σ.Π., η χρήση του οποίου θα στοχεύει στη μέγιστη δυνατή μείωση των επικείμενων καταστροφών.

Η αναγκαιότητα αυτή αποτελεί πλέον αντικείμενο πλήθους διεθνών οδηγιών σε κυβερνητικό επίπεδο, όπως υπαγορεύεται και από το πλαίσιο Hyogo (Hyogo, 2005), αποτέλεσμα του Παγκόσμιου Συνεδρίου Μείωσης Καταστροφών (Kobe, Hyogo, Japan; 2005). Πρόκειται για ένα παγκόσμιο μοντέλο μείωσης των επακόλουθων αποτελεσμάτων έπειτα από μία καταστροφή, προτεινόμενης διάρκειας 10 ετών με λήξη το 2015, με σκοπό τη μείωση των συνεπειών σε όλες τις πτυχές της ανθρώπινης ζωής (οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές). Επιπρόσθετα, το πρόγραμμα FP6 SAFER (Seismic Early Warning for Europe) που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Zschau et al., 2009), αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια συνάντησης όλων των ερευνητικών ομάδων με αντικείμενο τα Σ.Ε.Σ.Π. Στόχος του προγράμματος ήταν η ανταλλαγή και προώθηση γνώσεων μεταξύ των επιστημόνων από διαφορετικούς κλάδους (σεισμολόγοι, μηχανικοί ειδικευμένοι στη σεισμολογία και στην επεξεργασία σημάτων καθώς και μηχανικοί πληροφορικής), ώστε να δημιουργηθούν καινοτόμα εργαλεία στην κατασκευή των συστημάτων.

Ιστορικά, η έννοια αυτών των συστημάτων αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον J.D. Cooper το 1868, ο οποίος πρότεινε την εγκατάσταση σεισμολογικών σταθμών και τη χρήση της δικτύωσης του συστήματος τηλεγραφίας, προκειμένου να ενημερώνονται οι κάτοικοι της πόλης του San Francisco. Αυτή η ιδέα υλοποιήθηκε 100 χρόνια αργότερα περίπου, προκειμένου να προστατευτεί η σιδηροδρομική γραμμή Tohoku Shinkansen στην Ιαπωνία (Nakamura & Saita, 2007). Στην υλοποίηση αυτή, οι προειδοποιήσεις αφορούσαν τα διερχόμενα τρένα υψηλής ταχύτητας, τα οποία υποχρεώνονταν να επιβραδύνουν ή ακόμα και να σταματήσουν την πορεία τους σε περίπτωση σεισμού. Αντίστοιχο έργο παρουσιάστηκε τη δεκαετία 1960-1970 στην πολιτεία της California, με τη χρήση ενός δικτύου αποτελούμενου από 50 καταγραφικούς σταθμούς, εξοπλισμένους με κατακόρυφα σεισμόμετρα βραχείας περιόδου. Τα δεδομένα της τηλεμετρίας μεταφέρονταν στον κεντρικό διακομιστή του συστήματος στο Menlo Park, όπου και επεξεργάζονταν από αλγόριθμο ο οποίος σε 30sec από τον χρόνο γένεσης του σεισμού υπολόγιζε την άφιξη των P κυμάτων και των μέγιστων πλατών του σεισμικού γεγονότος

(Stewart et al., 1971). Με την πρόοδο της τεχνολογίας, στα τέλη της δεκαετίας του 1980, το πρόγραμμα TERRAscope στην California χρησιμοποιούσε ψηφιακούς σταθμούς εύρους 24-bit και τροποποιημένο πρωτόκολλο επικοινωνίας βασισμένο στο Gopher (Kanamori et al., 1991). Τέλος, με την περεταίρω βελτίωση του υλικοτεχνικού εξοπλισμού, το εγκατεστημένο δίκτυο σεισμικής προειδοποίησης στην Taiwan, μπορούσε να εκδώσει προειδοποίηση 22sec στις αστικές περιοχές οι οποίες βρίσκονταν 145km μακριά από το επίκεντρο του σεισμού (Wu & Teng, 2002).

Στις μέρες μας, παρά το γεγονός του αναγκαίου και σημαντικού ρόλου που μπορούν να κατέχουν τα Σ.Ε.Σ.Π. στην προστασία και τη μείωση των καταστροφών στα αστικά κέντρα, η χρήση και η εξέλιξή τους παραμένει σε εξαιρετικά χαμηλό βαθμό. Χαρακτηριστικά, λιγότερο από το 10% των αστικών κέντρων, που κινδυνεύουν από σεισμό, διαθέτει κάποιο τύπο τέτοιου συστήματος (Gasparini et al., 2011), ενώ ποικίλουν και οι δυνατότητές του. Γίνεται λοιπόν εύκολα κατανοητή η αναγκαιότητα παρουσίας και ανάπτυξης τέτοιων συστημάτων, ειδικά σε περιοχές αυξημένου σεισμικού κινδύνου. Ένα παράδειγμα του ελλαδικού χώρου αποτελεί και η περιοχή της Αττικής, πληγείσα από σημαντικά σεισμικά γεγονότα το 1981 και το 1999, η οποία περιτριγυρίζεται από ενεργές σεισμογενείς ζώνες. Το λογισμικό PRESTO λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο στο Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών για την περιοχή της Κεντρική Ελλάδας (Karetanidis et al., 2019)..

2.5.2 Αρχή λειτουργίας

Ένα σημείο το οποίο αξίζει να τονιστεί, είναι η πολύπλοκη φύση του φαινομένου ως προς τα διάφορα είδη κυμάτων που προκύπτουν κατά τη γένεση ενός σεισμού. Αναφορικά, η σεισμική δραστηριότητα προκαλείται από ποικίλες αιτίες (Betbeder, 2008), όπως:

- οι τεκτονικές δυνάμεις
- διάφορα φυσικά αίτια (ηφαιστειακή δράση και κατακρημνίσεις σπηλαίων)
- η ανθρώπινη δραστηριότητα

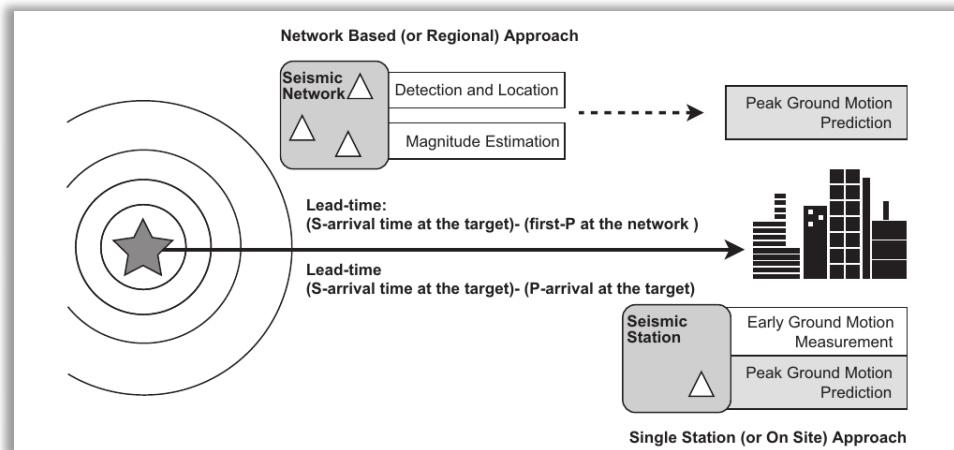
Η πιο σημαντική αιτία εξ' αυτών θεωρείται η παρουσία τεκτονικών δυνάμεων, λόγω της αλληλεπίδρασης των λιθοσφαιρικών πλακών στα σημεία εφελκυσμού, συμπίεσης και παράλληλης κίνησης. Στην περίπτωση που οι συσσωρευμένες τάσεις υπερβαίνουν ένα καθορισμένο όριο θραύσης των

πετρωμάτων, τα οδηγούν σε διάρρηξη και στην απότομη απελευθέρωση μεγάλων ποσών ελαστικής ενέργειας,

Πίνακας 1: Τα βασικά χαρακτηριστικά των διαφορετικών ειδών κυμάτων
Characteristics of seismic waves

<u>Όνομασία</u>	<u>Κατηγορία κύματος</u>	<u>Πόλωση στον άξονα διάδοσης του κύματος</u>	<u>Ταχύτητα διάδοσης κύματος</u>
Κύματα P (P-Waves)	Κύματα χώρου	Διαμήκης	$V_p / V_s = \sim \sqrt{3}$
Κύματα S (Secondary Waves)	Κύματα χώρου	Εγκάρσια	
Κύματα Love (L _Q)	Κύματα επιφανείας	Οριζόντια	$V_{s1} < V_{LQ} < V_{s2}$
Κύματα Rayleigh (L _R)	Κύματα επιφανείας	Ελλειψοειδής	$\sim 0.92V_s$

Όπως είναι γνωστό, η ταχύτητα διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα είναι περίπου $3 \times 10^8 \text{ km/s}$, ενώ η ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων P σε γρανιτικό μέσο είναι περίπου 6.2 km/s και των κυμάτων S περίπου $\sqrt{3}$ φορές μικρότερο (Bormann, 2012) (Πίνακας 1 (Kayal, 2008) (Kulhánek, 2012) (Lowrie, 2007)). Βασική αρχή λειτουργίας των Σ.Ε.Σ.Π είναι η διαφορά στους χρόνους διαδρομής των σεισμικών κυμάτων, συγκριτικά και με τον κατά πολύ μικρότερο χρόνο διάδοσης της Η/Μ ακτινοβολίας. Με αυτές τις διαφορές, ένας σταθμός τοποθετημένος σε μια περιοχή θα είναι ικανός να αντιληφθεί τη γένεση ενός σεισμικού γεγονότος και να αποστείλει προειδοποίηση προς κάποια κατοικημένη περιοχή, πριν τα σεισμικά κύματα φτάσουν σε αυτή (Satriano et al., 2011). Ο θεωρητικός χρόνος προειδοποίησης μπορεί να υπολογιστεί ως η διαφορά χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων P και S μείον το χρόνο επεξεργασίας που θα χρειαστεί για να αντιληφθεί ο σταθμός το γεγονός και να εκτιμήσει την εδαφική κίνηση. Η έγκαιρη σεισμική προειδοποίηση μπορεί να υλοποιηθεί με δυο βασικούς τρόπους, όπως αυτοί παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Οι δυο υλοποιήσεις έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης. (Satriano et al., 2011)

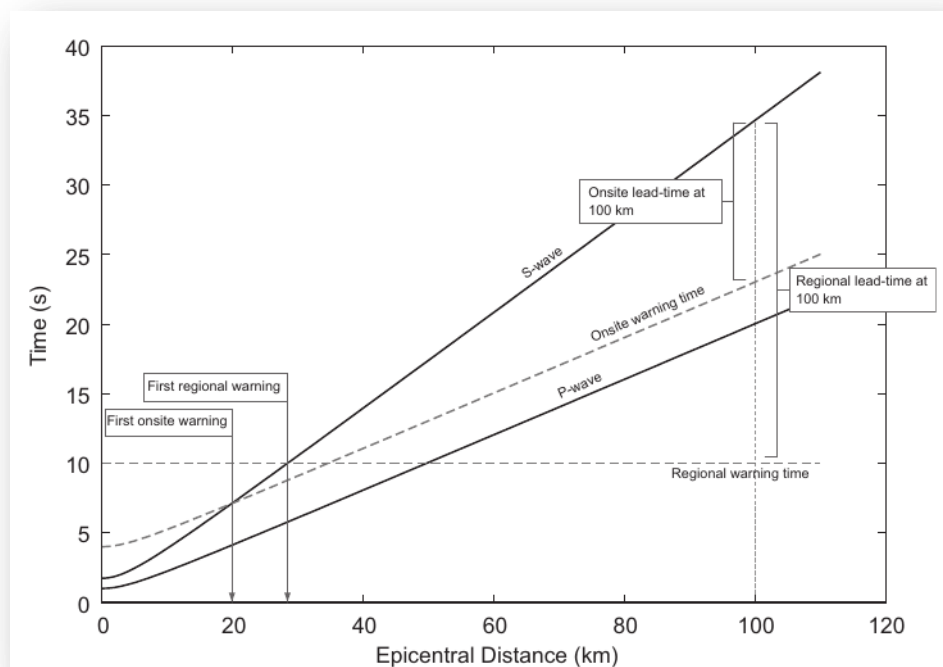
Two main implementations for early earthquake warning

Η πρώτη υλοποίηση είναι η περιφερική προειδοποίηση (Regional warning), κατά την οποία ακολουθούνται οι κλασσικές μέθοδοι της σεισμολογίας που αφορούν τον εντοπισμό του γεγονότος και τον υπολογισμό του μεγέθους και του επιπέδου του. Η συγκεκριμένη μέθοδος, αν και ακριβής, αντενδείκνυται για χρήση σε Σ.Ε.Σ.Π. τα οποία βρίσκονται κοντά στις περιοχές που εμποτεύουν, επειδή βασίζεται στις πληροφορίες που συλλέγονται από ένα ολόκληρο σεισμικό δίκτυο που έχει αναπτυχθεί γύρω από τη σεισμογενή περιοχή (Zollo et al., 2006). Έτσι, ο χρόνος επεξεργασίας για να εκτιμήσει το επίκεντρο και το μέγεθος ενός δυνητικά καταστροφικού σεισμού και να προβλέψει την κίνηση του εδάφους που θα έχει η περιοχή επόπτευσης είναι μεγάλος.

Η επιτόπια προειδοποίηση (Onsite warning), αποτελεί τον δεύτερο τρόπο υλοποίησης. Κατά την έναρξη ενός σεισμικού γεγονότος, παράγονται κύματα P και κύματα S, με τα κύματα P να έχουν σημαντικά μικρότερο πλάτος από τα S, και από τα κύματα επιφανείας. Παρόλο το μικρό τους πλάτος όμως φέρουν σημαντικές πληροφορίες σχετιζόμενες με τον σεισμό, ενώ τα κύματα S φέρουν την ενέργεια του σεισμού και είναι υπεύθυνα για τις καταστροφές που μπορεί να γίνουν (Kanamori, 2005). Η επιτόπια προειδοποίηση βασίζεται στην παρακολούθηση κυρίως των P κυμάτων και μέσω αυτών προβλέπει την επακόλουθη κίνηση του εδάφους που θα προκληθεί κυρίως από τα S και τα επιφανειακά κύματα. Μία επιπλέον διαφορά σε σχέση με τα συστήματα περιφερειακής προειδοποίησης, είναι ότι υλοποιήσεις αυτού του τύπου δεν

χρειάζονται υποχρεωτικά να εκδώσουν προσδιορισμό μεγέθους και επικέντρου του σεισμικού γεγονότος. Τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται από τη γρήγορη απόκρισή τους και την ικανότητά τους να εκδίδουν προειδοποιήσεις σε περιοχές εποπτείας, οι οποίες βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο της σεισμικής δραστηριότητας. Παρόλα αυτά, το κόστος της γρήγορης απόκρισης τους είναι οι λιγότερο ακριβείς προβλέψεις που κάνουν σε σχέση με τα συστήματα περιφερειακής προειδοποίησης (Kanamori et al., 1997).

Αναλυτικότερα και παρατηρώντας το Σχήμα 9, όπου απεικονίζεται ο χρόνος προετοιμασίας και απόκρισης και για τις δυο υλοποιήσεις Σ.Ε.Σ.Π., γίνεται αντιληπτό πως είναι της τάξης των μερικών έως μερικών δεκάδων δευτερολέπτων, ανάλογα με την απόσταση από το επίκεντρο. Υπάρχει μια αντίστροφη συσχέτιση μεταξύ του χρόνου προειδοποίησης και της αξιοπιστίας των πληροφοριών του σεισμού. Όσο περισσότερα στοιχεία συλλεχθούν μετά την εκδήλωση του σεισμού, τόσο πιο ακριβής θα είναι η προειδοποίηση, ενώ θα αυξηθεί και ο χρόνος επεξεργασίας που θα χρειαστεί ο αλγόριθμος (Allen, 2011).



Σχήμα 9: Χρονικές αποκρίσεις των δύο διαφορετικών υλοποιήσεων Σ.Ε.Σ.Π. (Satriano et al., 2011) Comparison of time responses for the two EEW implementations

2.5.2.1 Θετικά και Αρνητικά Στοιχεία - Κίνδυνοι της χρήσης των Σ.Ε.Σ.Π.

Ένα Σ.Ε.Σ.Π., προκειμένου να είναι αποτελεσματικό, απαιτεί ένα καλά ενημερωμένο και εκπαιδευμένο κοινό, ικανό να χρησιμοποιήσει σωστά την παρεχόμενη πληροφορία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί ο πληθυσμός της Ιαπωνίας, χώρα που πλήττεται κατά κόρον από σεισμικά γεγονότα, ο οποίος εκπαιδεύτηκε κατάλληλα για να εξοικειωθεί με τη χρήση των Σ.Ε.Σ.Π., λαμβάνοντας μέτρα ατομικής προστασίας σε απόκριση μιας προειδοποίησης. Επιπλέον παραδείγματα αξιοποίησης τέτοιων συστημάτων, σε συνδυασμό με την εκπαίδευση του κοινού, θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε δημόσιες υπηρεσίες (σχολεία, εργοστάσια, κοινωνικές και στρατιωτικές υπηρεσίες), με άμεση αντίδραση των ατόμων και σημαντική μείωση του πανικού, που συχνά αποτελεί επιπρόσθετο παράγοντα για πρόκληση σοβαρών βλαβών. Στο σημείο αυτό, αξίζει να επισημανθεί και μία παρερμηνεία που συχνά υιοθετείται ως προς την πιθανή πρόκληση φόβου στο κοινό λόγω των σημάτων προειδοποίησης. Πλήθος δεδομένων επιβεβαιώνουν πως δεν προκαλείται επιπλέον πανικός στο κοινό, δεν λαμβάνει χώρα οποιαδήποτε μαζική φυγή των ανθρώπων προς το εξωτερικό περιβάλλον, ενώ δεν συμβαίνουν και τροχαία ατυχήματα, πάντα βέβαια με την κατάλληλη εκπαίδευση (Allen et al., 2009).

Τα ωφέλιμα αποτελέσματα της χρήσης ενός Σ.Ε.Σ.Π. ποικίλουν και αφορούν ένα ευρύ φάσμα όλων των πτυχών της καθημερινότητας. Η διακοπή της κυκλοφορίας των σιδηροδρομικών συρμών (όπως στην Ιαπωνία το 1990), η παύση λειτουργίας των ανελκυστήρων στον κοντινότερο όροφο, το άνοιγμα των εξόδων κινδύνου σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, μέχρι και η αυτόματη αποθήκευση των δεδομένων στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και στα συστήματα, αποτελούν μερικές μόνο ενδείξεις της «ευεργετικής» χρήσης τέτοιων συστημάτων. Σε αυτές εντάσσονται επιπλέον δράσεις, όπως η διακοπή της κυκλοφορίας σε επικίνδυνα οδικά σημεία και γέφυρες, καθώς και η άκρως απαραίτητη ενημέρωση του ιατρικού προσωπικού, ώστε να διακοπεί οποιαδήποτε χειρουργική επέμβαση με την εκδήλωση του σεισμού, για προστασία του ασθενούς. Ταυτόχρονα, η έγκαιρη προειδοποίηση θα ωφελήσει το ευρύ κοινό με την αποφυγή φόβου και λανθασμένης αντίληψης ενός σεισμικού γεγονότος, αφού στην πλειοψηφία τους οι σεισμοί δεν είναι καταστροφικοί (Allen et al., 2011). Γίνεται εύκολα αντιληπτό πως με τον απαιτούμενο προγραμματισμό, οι προαναφερθείσες ενέργειες έχουν και

μηδαμινό οικονομικό κόστος, με αποτέλεσμα να καθίσταται σχετικά εύκολη η εφαρμογή τους. Ωστόσο, η χρήση των Σ.Ε.Σ.Π. μπορεί να λάβει και πιο σύνθετες διαστάσεις, με εφαρμογές όπως η εκτροπή της εναέριας κυκλοφορίας σε περίπτωση έκδοσης προειδοποιητικού σήματος, η εφαρμογή επιπλέον μέτρων προστασίας σε πυρηνικές εγκαταστάσεις, η διακοπή διαδικασιών παραγωγής που απαιτούν υψηλή ακρίβεια, μέχρι και η διασύνδεση με συστήματα δομικού ελέγχου για άμεση αλλαγή της δυναμικής απόκρισης των κτιριακών εγκαταστάσεων, όπως για παράδειγμα η ενεργοποίηση μηχανισμών απόσβεσης των σεισμικών κυμάτων (semi/active seismic dampers) (Kohiyama et al., 2019).

Παρόλα αυτά, τέτοιου είδους εφαρμογές αναδεικνύουν και ένα από τα μειονεκτήματα των Σ.Ε.Σ.Π., καθώς οποιοδήποτε λανθασμένο ή ψευδές σήμα προειδοποίησης έχει μεγάλο κόστος, θέτοντας πιο αυστηρές απαιτήσεις σχετικά με την αξιοπιστία των συστημάτων. Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε να θεωρηθεί πως υπάρχει ένας «συμβιβασμός» μεταξύ της αξιοπιστίας των προειδοποιήσεων και του διαθέσιμου χρόνου προειδοποίησης. Η χρήση των ταχύτερων σημάτων από τη συσκευή σαφώς αυξάνει τον διαθέσιμο χρόνο προειδοποίησης, ωστόσο αυξάνεται και η πιθανότητα εσφαλμένων προειδοποιήσεων. Από την άλλη πλευρά, οι καθυστερημένες ειδοποιήσεις μειώνουν τον χρόνο προειδοποίησης, αυξάνοντας ωστόσο την αξιοπιστία και ακρίβεια των παρεχόμενων σημάτων. Η αύξηση του αριθμού των σταθμών που παρατηρούν σε πραγματικό χρόνο, σε ένα δίκτυο έγκαιρης προειδοποίησης, θα μπορούσε να αυξήσει τόσο την αξιοπιστία των σημάτων όσο και τον παρεχόμενο χρόνο προειδοποίησης (Cua, 2008). Τέλος, στα μειονεκτήματα των Σ.Ε.Σ.Π. εντάσσονται το ακριβό κόστος για τον εξοπλισμό, καθώς και η έλλειψη των υποδομών για τη συλλογή των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και την επεξεργασία τους (Quansah et al., 2010).

2.5.3 Εφαρμογές Σ.Ε.Σ.Π.

Την τελευταία δεκαετία σημαντικές προσπάθειες που αναλύονται στη συνέχεια, έχουν πραγματοποιηθεί στον τομέα των Σ.Ε.Σ.Π. τόσο σε ευρωπαϊκό όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο. Οι βελτιώσεις που έχουν προταθεί συντελούν στη μείωση του χρόνου έκδοσης της προειδοποίησης, αλλά και στην ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων τέτοιων συστημάτων.

2.5.3.1 Εφαρμογές Σ.Ε.Σ.Π. σε ευρωπαϊκό επίπεδο

Στην Ευρώπη έχουν πραγματοποιηθεί δυο ερευνητικά προγράμματα με συμμετοχές αρκετών κρατών, τα FP6 SAFER (Seismic eArly warning For EuRope) και FP7 REAKT (Strategies and tools for Real Time EArthquake Risk ReducTion), στα οποία συμμετείχαν επιστήμονες και από το Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Παρόλη την προσπάθεια που καταβάλλεται, πρέπει να σημειωθεί ότι οι υλοποιήσεις Σ.Ε.Σ.Π. στον ευρωπαϊκό χώρο είναι αρκετά λιγότερες από τις πραγματικές ανάγκες που έχει μια ιδιαίτερα σεισμογενής περιοχή (Gasparini & Manfredi, 2014), όπως για παράδειγμα η λεκάνη της Μεσογείου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης η μέθοδος PreSEIS (Pre Seismic) (Böse et al., 2008), η οποία εφαρμόστηκε και δοκιμάστηκε με δεδομένα από το Σ.Ε.Σ.Π. της **Κωνσταντινούπολης** (Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System - IERREWS). Η προσέγγιση αυτή βασίζεται σε δύο νευρωνικά δίκτυα, δηλαδή ένα σύνολο απλών διασυνδεδεμένων και προσαρμοστικών μονάδων οι οποίες δημιουργούν ένα παράλληλο υπολογιστικό μοντέλο, αντίστοιχο των βιολογικών νευρωνικών δικτύων. Τα δυο αυτά δίκτυα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση του υπόκεντρου του σεισμού, το μέγεθος σεισμικής ροπής του και την εκτίμηση της εξελισσόμενης σεισμικής διάρρηξης 500 msec μετά την εκτίμηση του σεισμικού γεγονότος.

Στην **Ιβηρική χερσόνησο** το μοντέλο που προτάθηκε είναι η χρήση των παραμέτρων τ_c και P_d (Carranza et al., 2013). Ο λογάριθμος της μέσης σεισμικής περιόδου τ_c είναι γραμμικά συνδεδεμένος με το μέγεθος του σεισμού, ενώ η παράμετρος P_d αποτελεί τη μέγιστη μετατόπιση πλάτους της κατακόρυφης συνιστώσας και έχει συσχετιστεί με το μέγεθος και την υποκεντρική απόσταση του γεγονότος (Zollo et al., 2006). Η χρήση αυτής της μεθόδου είναι ιδιαίτερα ευρεία στα συστήματα Σ.Ε.Σ.Π. και έχει αποδειχθεί ικανή να εκδώσει προειδοποιήσεις ακόμα και για γεγονότα με μέγεθος $M_w = 7$ (Allen et al., 2009).

Στη Ρουμανία δημιουργήθηκε Σ.Ε.Σ.Π. το οποίο έχει σαν αρχή λειτουργίας την συσχέτιση της μέγιστης οριζόντιας εδαφικής επιτάχυνσης με το μέγιστο πλάτος της επιτάχυνσης ενός κύματος P στην κατακόρυφη συνιστώσα (Peri). Η καταγραφή του μέγιστου πλάτους της κατακόρυφης συνιστώσας γίνεται για τα πρώτα δυο δευτερόλεπτα από την άφιξη των σεισμικών κυμάτων. (Wenzel et al., 1999)

Σημαντική προσπάθεια στον τομέα της έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης καταγράφεται στην **Ιταλία**, με εποπτεία από συστήματα τοποθετημένα από τις νότιες μέχρι τις βόρειες επαρχίες της χώρας (Weber et al., 2007). Αναλυτικότερα, το σύστημα PRESTO (PRobabilistic and Evolutionary early warning SysTem) (Satriano et al., 2010) είναι μια πλατφόρμα λογισμικού ανοικτού κώδικα γραμμένο σε γλώσσα C++, το οποίο έχει εγκατασταθεί στο σεισμικό δίκτυο Irpinia. Είναι σχεδιασμένο με λογική περιφερειακής προειδοποίησης και χρησιμοποιεί μία ενεργειακή μέθοδο στο πεδίο του χρόνου για την ανίχνευση των σεισμικών δεδομένων. Τέτοιες μέθοδοι είναι εύκολες στην υλοποίησή τους, χωρίς να έχουν μεγάλες απαιτήσεις σε υπολογιστικό φόρτο. Βασίζονται στη σύγκριση της ενέργειας του σήματος, με κάποιο προκαθορισμένο κατώφλι. Η λειτουργία του συστήματος PRESTO βασίζεται στην ανάκτηση δεδομένων επιτάχυνσης στις τρεις συνιστώσες, από τους εγκατεστημένους κατά μήκος των Απεννίνων Όρεων σταθμούς. Κατά την εκδήλωση ενός σεισμικού γεγονότος ενεργοποιούνται οι δυο βασικοί αλγόριθμοι του συστήματος:

- Ο rtLoc: υπεύθυνος αλγόριθμος για τον υπολογισμό του επικέντρου του γεγονότος. Χρησιμοποιεί σε κάθε χρονική στιγμή τον χρόνο άφιξης που δηλώνεται από τους σταθμούς που καταγράφουν το γεγονός, ενώ εκμεταλλεύεται και την απουσία διέγερσης άλλων σταθμών, στους οποίους δεν έχουν φθάσει ακόμα τα P κύματα. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρέχει τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για το επίκεντρο του σεισμού, το πιο πιθανό υπόκεντρο και τον χρόνο γένεσης του γεγονότος.
- Ο rtMag: υπεύθυνος αλγόριθμος για τον υπολογισμό του μεγέθους του γεγονότος. Χρησιμοποιεί τον εμπειρικό νόμο συσχέτισης μεταξύ της μέγιστης μετατόπισης P_d , που μετριέται στα πρώτα δευτερόλεπτα μετά την άφιξη του P κύματος και του μεγέθους της σεισμικής ροπής του σεισμού (M_w). Η συσχέτιση ορίζεται από την εξίσωση 2.12, όπου R η υποκεντρική απόσταση του σταθμού (σε km), υπολογισμένη από τον αλγόριθμο rtloc. Το σύστημα αρχίζει να μετρά τη μέγιστη μετατόπιση P_d μετά την ανίχνευση ενός συμβάντος και τον ορισμό του επικέντρου του. Για κάθε μέτρηση του P_d , υπολογίζεται το αντίστοιχο μέγεθος ως μία συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Function - PDF), της οποίας ο μέσος όρος υπολογίζεται με τη χρήση της σχέσης που προαναφέρθηκε, ενώ η τυπική απόκλιση εξαρτάται από το σφάλμα των

συντελεστών A, B, και C και την αβεβαιότητα της απόστασης R. Σε κάθε χρονικό βήμα, συνδυάζεται η κατανομή του μεγέθους για κάθε σταθμό και κάθε χρονικό παράθυρο σε ένα τελικό προϊόν πιθανότητας. Χρησιμοποιώντας μια μπαγιεσιανή μέθοδο, το μέγεθος PDF που ανακτάται κατά το προηγούμενο χρονικό βήμα, λαμβάνεται υπόψη ως πληροφορία a priori.

Με βάση τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο σύστημα PRESTO, φάνηκε να έχει ικανότητα εντοπισμού σεισμικού γεγονότος μέσα σε 5-6 δευτερόλεπτα. Στο χρονικό διάστημα που δοκιμάστηκε το σύστημα στο δίκτυο Irpinia δεν παρουσιάστηκε κάποιο σημαντικό γεγονός ($M > 4$) και για αυτό τον λόγο έγινε προσομοίωση του δικτύου με προϋπάρχουσες καταγραφές. Αυτό που έδειξε η πειραματική διαδικασία ήταν ότι η χρήση ενός πυκνού δικτύου καταγραφής μείωσε τον χρόνο υπολογισμού στα 1-2 δευτερόλεπτα. Τέλος, σημειώνεται ότι έχει προταθεί η χρήση του σε σχολεία για την προστασία των μαθητών (Emolo et al., 2014), καθώς και στο Εθνικό δίκτυο επιταχυνσιογράφων (Rete Accelerometrica Nazionale - RAN), για την προστασία του γενικού πληθυσμού της χώρας (Picozzi et al., 2015). Το λογισμικό PRESTO λειτουργεί σε πραγματικό χρόνο στο Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών για την περιοχή της Κεντρικής Ελλάδας (Karetanidis et al., 2019).

2.5.3.2 Εφαρμογές Σ.Ε.Σ.Π σε παγκόσμιο επίπεδο

Στην παρούσα ενότητα γίνεται αναφορά στα διάφορα Σ.Ε.Σ.Π. που έχουν τεθεί σε λειτουργία παγκοσμίως. Στην **Ιαπωνία**, για παράδειγμα, λειτουργεί Σ.Ε.Σ.Π. σε εθνικό επίπεδο από το 2007 (Hoshiha et al., 2008), στο οποίο χρησιμοποιούνται πάνω από 1000 σταθμοί καταγραφής, με αποτέλεσμα η μέση απόσταση που χωρίζει δύο σταθμούς να μην είναι μεγαλύτερη από 20 χιλιόμετρα. Το γεγονός αυτό οδηγεί στον ταχύτερο υπολογισμό των σεισμικών παραμέτρων σε κάθε σταθμό. Η παράμετρος που υπολογίζεται είναι η *ένταση*, που προκύπτει από την εμπειρική της συσχέτιση με το μέγιστο πλάτος της εδαφικής ταχύτητας του σήματος. Σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμικού γεγονότος το δίκτυο χωρίζει τους χρήστες σε δύο κατηγορίες:

- Χρήστες σε απευθείας σύνδεση: είναι υπηρεσίες και αυτοματισμοί που ελέγχουν διάφορες υπηρεσίες και βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Λαμβάνουν την προειδοποίηση, η οποία δεν απευθύνεται στον γενικό πληθυσμό.

- Γενικοί χρήστες: χρήστες που λαμβάνουν έμμεσα την προειδοποίηση. Αυτό μπορεί να συμβεί μέσω των Μέσων Μαζικής Ενημέρωσης και του Διαδικτύου.

Ένα άλλο παράδειγμα είναι αυτό της **Ταϊβάν**, όπου υπάρχει Σ.Ε.Σ.Π. και λειτουργεί ήδη από το 2002 (Hsiao et al., 2009). Στη συγκεκριμένη υλοποίηση γίνεται χρήση του εικονικού υποδικτύου (Virtual Sub-Network – VSN), το οποίο όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να εκδώσει προειδοποιήσεις με χρονικό παράθυρο 22sec σε αποστάσεις 145 χιλιομέτρων από το επίκεντρο (Wu & Teng, 2002). Πέραν αυτής της μεθόδου χρησιμοποιείται επίσης και η μέθοδος παρατήρησης των παραμέτρων τ_c και P_d . Η χρήση της κρίθηκε αναγκαία, καθώς η μέθοδος VSN δεν μπορούσε να υπολογίσει με ακρίβεια σεισμικά γεγονότα με υποθαλάσσια εστία.

Μία ακόμα υλοποίηση Σ.Ε.Σ.Π. που υπάρχει στην Ταϊβάν βασίζεται σε ένα πυκνό δίκτυο καταγραφικών τα οποία είναι εξοπλισμένα με αισθητήρες χαμηλού κόστους (Wu et al., 2013). Το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από 400 σταθμούς εγκατεστημένους κυρίως σε σχολικές εγκαταστάσεις, όπου εκμεταλλεύονται τους πόρους στέγασης, χωρίς την απαίτηση για εξειδικευμένες συσκευασίες συμβατές με το πρωτόκολλο IP67 (International Protection 67 - ανθεκτικότητα στη σκόνη, ανθεκτικότητα βύθισης σε νερό βάθους ενός μέτρου, έως και μισή ώρα), ηλεκτροδότησης και δικτυακού εξοπλισμού των σχολείων. Επιπλέον, με τον τρόπο αυτόν, μειώθηκε το κόστος κατασκευής των συγκεκριμένων σταθμών στο 1/10 της τιμής των αντίστοιχων εμπορικών. Η αποστολή των δεδομένων από τους σταθμούς γίνεται σε δύο εξυπηρετητές, οι οποίοι χρησιμοποιούν τη μέθοδο παρατήρησης $\tau_c - P_d$ για την εκτίμηση της ενδεχόμενης καταστρεπτικότητας του γεγονότος, ενώ το συγκεκριμένο Σ.Ε.Σ.Π. μπορεί να παρέχει προειδοποιήσεις σε ένα χρονικό παράθυρο της τάξεως των ~20sec.

Σε αντιστοιχία με τις προσπάθειες που αναφέρθηκαν, ξεκίνησε το 2010 στην Κίνα ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός Σ.Ε.Σ.Π. που θα επόπτευε την περιφέρεια του **Πεκίνου** (Peng et al., 2012). Το σύστημα απαρτίζεται από 162 σταθμούς εξοπλισμένους με μονάδες ψηφιοποίησης με ανάλυση 24-bit και γεώφωνα τριών συνιστωσών για καταγραφή της εδαφικής ταχύτητας, ενώ η μέση απόσταση μεταξύ των σταθμών είναι περίπου 50Km. Τα δεδομένα από τους σταθμούς αποστέλλονται σε έναν κεντρικό εξυπηρετητή, στον οποίο γίνεται εκτίμηση της ενδεχόμενης καταστρεπτικότητας του γεγονότος βάσει

των παραμέτρων τ_c και P_d . Ο αλγόριθμος στον κεντρικό εξυπηρετητή ενεργοποιείται αυτόματα με τη διέγερση περισσότερων από τρεις σταθμούς, λαμβάνοντας υπόψη τη διαφορά στους χρόνους διέγερσης τους, αλλά και την απόσταση που τους χωρίζει. Κατά τη διάρκεια των πειραματικών δοκιμών, το συγκεκριμένο σύστημα κατάφερε να αποστείλει στο Πεκίνο προειδοποίηση με περιθώριο 24sec για ένα γεγονός το οποίο απείχε από την πόλη απόσταση $\sim 150\text{Km}$. Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα το μειονέκτημα της συγκεκριμένης υλοποίησης Σ.Ε.Σ.Π., καθώς θεωρείται ιδιαίτερα επιρρεπής στην έκδοση εσφαλμένων προειδοποιήσεων. Αναλυτικότερα, σε διάρκεια ενός εξαμήνου, το ποσοστό εσφαλμένων προειδοποιήσεων για γεγονότα με $M > 2.0$ ανήλθε στο 27%, ενώ το αντίστοιχο ποσοστό για γεγονότα με $M > 3$ έφτασε στο 14%.

Όσον αφορά τις προσπάθειες υλοποίησης ενός Σ.Ε.Σ.Π στην κινεζική περιοχή **Zhaotong**, χρησιμοποιήθηκαν μονάδες ψηφιοποίησης με ανάλυση 16-bit και κοινοί εμπορικά διαθέσιμοι επιταχυνσιογράφοι τύπου MEMS (Peng et al., 2013). Η μέθοδος εκτίμησης της ενδεχόμενης καταστρεπτικότητας του γεγονότος σε αυτή την υλοποίηση είναι παρόμοια με αυτήν που ακολουθήθηκε στην υλοποίηση Σ.Ε.Σ.Π. της περιοχής του Πεκίνου, ωστόσο διαφέρει στο ποσοστό των εσφαλμένων προειδοποιήσεων, το οποίο εκτινάσσεται στο 39%.

Στην πόλη του Μεξικό είναι εγκατεστημένο το σύστημα SAS. Ενώ στην πόλη της Οαχάκα είναι εγκατεστημένο το σύστημα SASO. Και τα 2 συστήματα ανήκουν πλέον στο Μεξικανικό Σεισμικό Σύστημα Ειδοποίησης (SASMEX), το οποίο ξεκίνησε την παρακολούθηση και καταγραφή των σεισμών από το 1993. Οι σταθμοί που το απαρτίζουν συνδέονται με τα κέντρα ελέγχου και διανομής τα οποία λαμβάνουν, αποκωδικοποιούν και μεταδίδουν τις ειδοποιήσεις μέσω ενός τηλεπικοινωνιακού δικτύου. Η μετάδοση των ειδοποιήσεων έγκαιρης προειδοποίησης πραγματοποιείται μέσω πομποδεκτών ραδιοφωνικών σταθμών και, μεγαφωνικών εγκαταστάσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο σύστημα εκδίδει προειδοποιήσεις για καταστρεπτικά γεγονότα σε απόσταση μεγαλύτερη των 300 χιλιομέτρων, αυτό δίνει αρκετό χρόνο απόκρισης στις αρχές (60+ δευτερόλεπτα) (Espinosa-Aranda et al., 2009)

Ένα επιπλέον Σ.Ε.Σ.Π. είναι το CISN (California Integrated Seismic Network) ShakeAlert με εφαρμογή στην **Καλιφόρνια** των Η.Π.Α. (Böse et al., 2014). Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύστημα περιλαμβάνει μία μονάδα

απόφασης που συνδυάζει τις εκτιμήσεις και αβεβαιότητες που παράγονται από τρεις μεθόδους εκτελούμενες παράλληλα:

- Η μέθοδος $\tau_c - P_d$: όπως έχει αναλυθεί παραπάνω.
- Η υπηρεσία *Virtual Seismologist (VS)*: μια μπαγιεσιανή προσέγγιση για έγκαιρη σεισμική προειδοποίηση. Συγκεκριμένα υπολογίζει το μέγεθος και το επίκεντρο του σεισμού, την κατανομή της μέγιστης εδαφικής κίνησης, χρησιμοποιώντας το πλάτος της εδαφικής κίνησης που παρατηρείται, πληροφορίες προκαθορισμένες εκ των προτέρων, καθώς και τις σχέσεις εξασθένησης της περιβάλλουσας συνάρτησης. Εκτός από το δίκτυο CISN την συγκεκριμένη μέθοδο την χρησιμοποιούν και σε άλλα δίκτυα της Ευρώπης (Ελβετία, νότια Ιταλία, Δυτική Ελλάδα, Κωνσταντινούπολη, Ρουμανία, Ισλανδία) με βάση το έργο EU FP7 REAKT (Caltech, n.d.)
- Η μέθοδος *ElarmS*: Η ανίχνευση του κύματος P και κατ' επέκταση ο υπολογισμός των παραμέτρων της συχνότητας και του πλάτους πραγματοποιείται συνδυάζοντας δεδομένα από τους γειτονικούς σταθμούς. Ο αλγόριθμος ElarmS συσχετίζει τις διεγέρσεις, χρησιμοποιώντας ένα παράθυρο χώρου και χρόνου βασισμένο στους αναμενόμενους χρόνους διαδρομής των κυμάτων. Έτσι, στην περίπτωση που ανιχνευτούν κύματα P και οι διεγέρσεις τους συμβαίνουν κοντά τόσο σε επίπεδο περιοχής όσο και στον χρόνο του συμβάντος, ο αλγόριθμος θα συνδέσει αυτές τις διεγέρσεις σε ένα ενιαίο γεγονός. Επόμενες διεγέρσεις μπορούν να προστεθούν στο γεγονός, βασιζόμενες και αυτές στο παράθυρο του χώρου και του χρόνου, αλλά και στην εκτίμηση του επικέντρου. Εκτός από το δίκτυο CISN την συγκεκριμένη μέθοδο την χρησιμοποιούν και σε άλλα δίκτυα, όπως για παράδειγμα στην Κωνσταντινούπολη ή στο Ισραήλ

Συνδυάζοντας τα παράγωγα των τριών παραπάνω αλγορίθμων μπορεί να εξαχθεί μια συνολική εικόνα για τον σεισμό που βρίσκεται σε εξέλιξη. Αναλόγως λοιπόν μπορεί να εκδοθεί η αντίστοιχη προειδοποίηση που θα απευθύνεται είτε προς αυτοματισμούς και ηλεκτρονικές υπηρεσίες (services), είτε προς τον γενικό πληθυσμό.

Κλείνοντας αυτή την ενότητα παρουσιάζεται το Σ.Ε.Σ.Π. MyShake (Kong et al., 2016) το οποίο διαφοροποιείται αρκετά στον σχεδιασμό και την υλοποίηση

του σε σχέση με τα προαναφερθέντα συστήματα. Η διαφοροποίηση έγκειται στον τρόπο καταγραφής, καθώς αντί να χρησιμοποιεί τα κλασικά σεισμολογικά δίκτυα καταγραφής βασίζει τις μετρήσεις του στους αισθητήρες που φέρουν ενσωματωμένα τα κινητά τηλέφωνα. Πιο συγκεκριμένα, αποδείχτηκε ότι ένα κινητό που φέρει επιταχυνσιόμετρο μπόρεσε να εντοπίσει σεισμό μεγέθους $M=5$ σε απόσταση 10 χιλιομέτρων, ενώ μπορεί να διακρίνει εάν η κίνηση της συσκευής οφείλεται σε ανθρώπινη ή σε σεισμική δραστηριότητα. Η σεισμική δραστηριότητα γίνεται αντιληπτή από ένα μόνο κινητό μέσω της εφαρμογής MyShake και στη συνέχεια γίνεται η επικοινωνία του κινητού με το κέντρο επεξεργασίας σημάτων. Εκεί ένας αλγόριθμος ανίχνευσης επιβεβαιώνει ότι ένας σεισμός είναι πράγματι σε εξέλιξη. Στη συνέχεια προσδιορίζονται το επίκεντρο, ο χρόνος γένεσης και το μέγεθος του σεισμού με βάση τις πολλαπλές διεγέρσεις που στέλνονται από το δίκτυο των κινητών τηλεφώνων. Αυτή η πληροφορία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί η σεισμική ένταση και ο χρόνος που απομένει μέχρι τα σεισμικά κύματα που θα προκαλέσουν καταστροφές να φτάσουν σε μια θέση ενδιαφέροντος.

2.6 Αλγόριθμοι Διέγερσης - Επιλογείς φάσης

Η έγκαιρη ανίχνευση του γεγονότος κατέχει πολύ σημαντικό ρόλο στα Σ.Ε.Σ.Π. Μία ομάδα αλγορίθμων, που αναπτύχθηκε ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, ικανών να αντιλαμβάνονται την ύπαρξη σεισμικής δραστηριότητας παρουσιάζεται στην παρούσα ενότητα. Με το πέρασμα των ετών έχουν αναπτυχθεί διάφοροι αλγόριθμοι για ανίχνευση σεισμικών γεγονότων που προέρχονται από σεισμούς και εκρήξεις. Παλαιότερα, οι αλγόριθμοι αυτοί απαιτούσαν, εξειδικευμένο και υλικό, πάνω στο οποίο μπορούσαν να λειτουργήσουν. Ωστόσο, με την πρόοδο των επιστημών, η υλοποίηση τέτοιων μεθόδων έπαψε να είναι υλικοκεντρική και έτσι τέτοιου είδους αλγόριθμοι εφαρμόστηκαν σε διάφορα σεισμολογικά όργανα. Αυτή η αλλαγή οδήγησε στην περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας, αφού οι αλγόριθμοι μπορούσαν να εγκατασταθούν σε διάφορες φορητές συσκευές (Sharma et al., 2010).

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας οδήγησε στη δημιουργία διαφόρων αλγορίθμων διέγερσης, με κάποιες υλοποιήσεις να χαρακτηρίζονται από απλότητα στην υλοποίηση και τον σχεδιασμό, ενώ κάποιες άλλες βασίζονται σε ιδιαίτερα εξελιγμένες μεθόδους, χρησιμοποιώντας αλγορίθμους για την αυτοματοποιημένη ταξινόμηση δεδομένων σε κατηγορίες, με βάση

αναγνώρισης προτύπων (pattern recognition) (Joswig, 1990) και νευρωνικά δίκτυα (Wang & Teng, 1995). Παρόλη την ακρίβεια τους, η πολυσύνθετη παραμετροποίηση τέτοιων μεθόδων τις καθιστά δύσχρηστες και επιρρεπείς σε σφάλματα (Havskov & Alguacil, 2016). Ως εκ τούτου, για πρακτικούς λόγους, χρησιμοποιούνται ευρέως αλγόριθμοι με απλούστερες υπολογιστικές μεθόδους. Οι αλγόριθμοι διέγερσης μπορούν να διακριθούν ανάλογα με το είδος τους σε:

- Ενεργειακές μεθόδους στο πεδίο του χρόνου
- Ενεργειακές μεθόδους στο πεδίο της συχνότητας
- Ανιχνευτές σωματιδιακής κίνησης και πόλωσης των σεισμικών κυμάτων
- Μέθόδους αυτοπαλινδρόμησης

2.6.1 Ενεργειακές μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου

Οι ενεργειακές μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου συναντώνται στην βιβλιογραφία και ως αλγόριθμοι STA/LTA και στην κατηγορία αυτή εντάσσονται και οι περισσότερες υλοποιήσεις ανίχνευσης σεισμικών φάσεων. Πρέπει να σημειωθεί ότι σε Σ.Ε.Σ.Π. χρησιμοποιούνται κατά κόρον ενεργειακές μέθοδοι στο πεδίο του χρόνου, καθώς οι STA/LTA μέθοδοι παρέχουν την καλύτερη ταχύτητα και υπολογιστική αποδοτικότητα των Σ.Ε.Σ.Π. σε πραγματικό χρόνο (Lomax et al., 2012).

Η πιο απλή μέθοδος διέγερσης είναι ο αλγόριθμος διέγερσης πλάτους (Amplitude threshold trigger) (Terra Technology, 1980), βάσει του οποίου το σύστημα διεγείρεται όταν το πλάτος του σήματος υπερβαίνει ένα κατώφλιο διέγερσης. Τότε, έχουμε δήλωση του σεισμικού γεγονότος, με τη λήξη του να δηλώνεται όταν το πλάτος είναι μικρότερο του κατωφλίου αποδιέγερσης. Αυτός ο αλγόριθμος χρησιμοποιείται για καταγραφή σεισμικής κίνησης σε δεδομένα στα οποία ο περιβάλλον θόρυβος θεωρείται αμελητέος. Η συγκεκριμένη μέθοδος τείνει να αντικατασταθεί πλήρως από τους αλγόριθμους STA/LTA, οι οποίοι έχουν σαν χαρακτηριστικό τους γνώρισμα την καλύτερη απόκριση σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες σήματος-θορύβου. Παρακάτω αναφέρονται ορισμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται συχνά για ανίχνευση σεισμικής δραστηριότητας.

Ο κλασικός αλγόριθμος STA/LTA αξιολογεί τον λόγο του στιγμιαίου πλάτους του σήματος (Short Term Average - STA) – όπως αυτός παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.17 - και του μέσου σεισμικού θορύβου (Long Term Average) – όπως

αυτός παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.18. Με i συμβολίζεται ο δείκτης του χρόνου, με N ο αριθμός των δειγμάτων και με x συμβολίζεται η ψηφιοποιημένη τιμή του σήματος. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος δέχεται δεδομένα από ένα κανάλι καταγραφής, στα οποία μπορεί να έχει εφαρμοστεί προαιρετικά κάποια τεχνική φιλτραρίσματος, ενώ είναι ικανός να αντιμετωπίσει τις αργές διακυμάνσεις που προκαλούνται στο σήμα από πηγές φυσικού σεισμικού θορύβου. Ωστόσο, είναι λιγότερο αποτελεσματικός τόσο σε περιβάλλοντα με έντονες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, όσο και σε περιπτώσεις στις οποίες οι διακυμάνσεις λόγω μετεωρολογικών αιτίων (π.χ. ριπές ανέμου). Για τον λόγο αυτόν παρατηρούνται πολλές ψευδείς διεγέρσεις σε τέτοιες περιπτώσεις.

$$STA_i = \frac{|x_i| - STA_{i-1}}{Nsta} + STA_{i-1} \quad (2.17)$$

$$LTA_i = \frac{|x_i| - LTA_{i-1}}{Nlta} + LTA_{i-1} \quad (2.18)$$

Μία βελτίωση του γενικού αλγόριθμου STA/LTA (Withers et al., 1998) αξιολογεί τον λόγο των τετραγώνων του STA (εξίσωση 2.19) και του LTA (εξίσωση 2.20). Δεν υπάρχει καμία επικάλυψη, καθώς το LTA παράθυρο αρχίζει να χρησιμοποιεί δεδομένα μετά από το STA παράθυρο και ο δείκτης του χρόνου (i) βρίσκεται τοποθετημένος στο πιο πρόσφατο σημείο του STA παράθυρου, προκειμένου να διατηρηθεί η αιτιότητα δηλαδή αν η έξοδος του αλγορίθμου εξαρτάται μόνο από τις τρέχουσες και τις προηγούμενες τιμές ή εξαρτάται και από τις μελλοντικές. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος εξασφαλίζει καλύτερη στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ στιγμιαίου πλάτους του σήματος και του μέσου σεισμικού θορύβου, σε σχέση με οποιαδήποτε υλοποίηση που χρησιμοποιεί επικαλυπτόμενα παράθυρα.

$$STA_i = \frac{x_i^2 - x_{i-Nsta}^2}{Nsta} + STA_{i-1} \quad (2.19)$$

$$LTA_i = \frac{x_{i-Nsta}^2 - x_{i-Nsta-Nlta-1}^2}{Nlta} + LTA_{i-1} \quad (2.20)$$

Προσθέτοντας στον κλασικό αλγόριθμο STA/LTA μία χρονική καθυστέρηση μεταξύ των δύο παραθύρων επιτεύχθηκε ακόμα μεγαλύτερη στατιστική ανεξαρτησία μεταξύ των δύο όρων (Ruud & Husebye, 1992). Η χρήση αυτής της μεθόδου (delayed STA/LTA) επιτρέπει μικρότερα μήκη παραθύρων και κατά συνέπεια, παράγει ταχύτερη ανάκαμψη από μεταβατικά φαινόμενα. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος προκαλεί πιο εύκολα μεταβολές στον λόγο STA/LTA.

Μία επιπρόσθετη υλοποίηση είναι ο αναδρομικός STA/LTA (recursive STA / LTA), ο οποίος χρησιμοποιείται έναντι των άλλων υλοποιήσεων επειδή δεν απαιτεί τη διατήρηση μεγάλων διανυσματικών δεδομένων στη μνήμη. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παράγει μια κρίσιμη απόσβεση και λόγω αυτής ανακάμπτει πιο γρήγορα σε μεγάλες ενεργειακές μεταβάσεις. Η απόκριση του αλγορίθμου εξασφαλίζει ότι θα δίνει περιορισμένη σε πλάτος έξοδο, όταν η είσοδος είναι επίσης περιορισμένη. Η περιγραφή του παρουσιάζεται στις εξισώσεις 2.21-22.

$$STA_i = Cx_i + (1 - C)STA_{i-1} \quad (2.21)$$

$$C = 1 - e^{-S/T} \approx \frac{1}{Nsta} \quad (2.22)$$

Η χαρακτηριστική τιμή του χρόνου αποσύνθεσης T είναι ο χρόνος που απαιτείται ώστε η κρουστική απόκριση να αποσυντεθεί κατά $1/e$ της αρχικής της τιμής (Evans & Allen, 1983). Η τιμή T είναι ενσωματωμένη στη σταθερά αποσύνθεσης C (εξίσωση 2.22), όπου S είναι ο χρόνος ανά δείγμα σε δευτερόλεπτα.

Τέλος, μια διαφορετική υλοποίηση είναι ο αλγόριθμος Z - ανιχνευτής (Z - Detect) (Swindell & Snell, 1997), όπως αυτός παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.23, όπου η χαρακτηριστική συνάρτηση εκφράζεται μέσω της τυποποιημένης μεταβλητής Z . Σε αυτήν το x_i είναι το παράθυρο του στιγμιαίου πλάτους του σήματος - STA, μ ο μέσος όρος των παραθύρων STA και σ η τυπική απόκλιση αυτών.

$$Z(x|i) = \frac{x_i - \mu}{\sigma} \quad (2.23)$$

Ο Z -ανιχνευτής υπολογίζει την απόσταση των δεδομένων από τον μέσο όρο της ενέργειας σε μονάδες τυπικής απόκλισης, με ιδιαίτερο πλεονέκτημά του την αυτόματη προσαρμογή ανάλογα με τον περιβάλλοντα θόρυβο του σήματος. Έτσι, στην περίπτωση που ο περιβάλλον θόρυβος είναι μικρός, μία μικρή αλλαγή στην είσοδο συνεπάγεται μία μεγάλη αλλαγή στην έξοδο. Αντίστοιχα, εάν η διακύμανση του περιβάλλοντος θορύβου είναι μεγάλη, απαιτείται μεγάλη αλλαγή στο σήμα εισόδου για να επιτευχθεί σημαντική αλλαγή στο σήμα εξόδου.

Μία ακόμη διαδεδομένη υλοποίηση είναι ο αλγόριθμος που ανέπτυξε ο Allen (Allen, 1978), σύμφωνα με τον οποίο η χαρακτηριστική συνάρτηση

υπολογίζεται με βάση την περιβάλλουσα του σήματος, όπως παρουσιάζεται στην εξίσωση 2.24.

$$E(t) = f(t)^2 + C_2 \dot{f}(t)^2 \quad (2.24)$$

Η χαρακτηριστική συνάρτηση του συγκεκριμένου αλγορίθμου είναι ίση με το άθροισμα του τετραγώνου των δεδομένων συν το σταθμισμένο τετράγωνο της πρώτης τους παραγώγου, ενώ η σταθερά c είναι η συνάρτηση του ρυθμού δειγματοληψίας και του περιβάλλοντος θορύβου. Η συγκεκριμένη χαρακτηριστική συνάρτηση δημιουργεί μία χρονοσειρά και είναι ευμετάβλητη ως προς το πλάτος και τη συχνότητα. Η συγκεκριμένη υλοποίηση είναι ικανοποιητική για καταγραφές με συχνότητες $< 1\text{Hz}$, ενώ δεν μπορεί να αντληφθεί τηλεσεισμικά γεγονότα ή γεγονότα προερχόμενα από ηφαιστειακή δραστηριότητα (Sharma et al., 2010). Στα μειονεκτήματα της συγκαταλέγονται επίσης η χρήση εμπειρικών παραμέτρων και η αδυναμία εντοπισμού γεγονότων κατά τα οποία ο λόγος σήματος/θορύβου (Signal to Noise Ratio – SNR) είναι μικρός.

Στην πορεία, οι Baer και Kradofer (Baer & Kradofer, 1987) βελτίωσαν τον παραπάνω αλγόριθμο, ώστε να χρησιμοποιεί σε μια συναθροιστική συνάρτηση έναν συνδυασμό από το ψηφιοποιημένο σήμα και την παράγωγο του σήματος για διαδοχικά δείγματα. Είναι πιο ευαίσθητος σε μεταβολές πλάτους συχνότητας και φάσης του σήματος εισόδου. Επιπλέον η τυπική απόκλιση και η μέση τιμή χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των κατωφλίων διέγερσης. Όπως φαίνεται στις εξισώσεις 2.25 και 2.26 η χαρακτηριστική συνάρτηση του συγκεκριμένου αλγόριθμου παρουσιάζει συνάφεια με την εξίσωση 2.23 του αλγόριθμου z-Detect. Με i, j συμβολίζονται τα δείγματα ενώ με E συμβολίζεται η περιβάλλουσα του σήματος. Η διαφορά των δύο έγκειται στη χρήση της διασποράς αντί της τυπικής απόκλισης που χρησιμοποιεί η 2.19, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος να οδηγείται σε καλύτερη εκτίμηση του περιβάλλοντος θορύβου σε σχέση με τον z-Detect.

$$CF_i = \frac{E_i^4 - \dot{E}_i^4}{\sigma^2(E_i^4)} \quad (2.25)$$

$$E_i^2(t) = x_i^2(t) + \left(\frac{dx_i(t)}{dt} \right)^2 \frac{\sum_{j=1}^i x_j^2}{\sum_{j=1}^i \left(\frac{dx_j(t)}{dt} \right)^2} \quad (2.26)$$

Μία πρόσφατη υλοποίηση που χρησιμοποιήθηκε και στο Σ.Ε.Σ.Π PRESTO της Ιταλίας είναι ο αλγόριθμος FilterPicker (FP) (Lomax et al., 2012); (Emolo et al., 2011). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος βασίζεται στην μέθοδο Baer και Kradofer και έχει σχεδιαστεί ώστε να λειτουργεί με ευστάθεια σε πραγματικό χρόνο, για σήματα ευρέος φάσματος. Δέχεται σαν είσοδο δεδομένα πάνω στα οποία δεν είναι απαραίτητο να έχει εφαρμοστεί κάποιο φίλτρο, όπως αυτά εξέρχονται από τη μονάδα καταγραφής. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η απουσία χρήσης οποιουδήποτε μετασχηματισμού, καθώς ο αλγόριθμος βασίζεται μόνο σε λογικές και αριθμητικές πράξεις – γεγονός που τον καθιστά ιδιαίτερα αποδοτικό ως προς τον υπολογιστικό φόρτο. Σαν εξαγόμενα δεδομένα αυτού του αλγορίθμου, θεωρούνται ο χρόνος άφιξης και η πολικότητα των σεισμικών κυμάτων, καθώς και μία εκτίμηση σφάλματος (uncertainty) στον χρόνο.

2.6.2 Ενεργειακές μέθοδοι στο πεδίο της συχνότητας

Η αδυναμία γρήγορου υπολογισμού φάσματος σε πραγματικό χρόνο είναι ένα σημαντικό μειονέκτημα, πολύ πιο έντονο σε παλαιότερες δεκαετίες εξαιτίας της μικρής υπολογιστικής διαθέσιμης ισχύος εκείνη την εποχή. Για τον λόγο αυτόν αντενδείκνυται η χρήση των ενεργειακών μεθόδων στο πεδίο της συχνότητας σε συστήματα πραγματικού χρόνου.

Η χρήση του γρήγορου μετασχηματισμού Fourier (Fast Fourier Transform - FFT) και της φασματικής πυκνότητας ισχύος (Power Spectral Density - PSD) αποτέλεσε τη βάση ανάπτυξης τριών ανιχνευτών (Shensa, 1977) για σεισμικά δεδομένα μικρής περιόδου:

- Τον μέσο ανιχνευτή ισχύος: ο οποίος αποδίδει τα βέλτιστα για αδύναμα σήματα που υπερβαίνουν ομοιόμορφα το θόρυβο, σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα συχνοτήτων, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τόσο το σήμα όσο και ο θόρυβος είναι σταθερά.
- Τον ανιχνευτή μέγιστης παραμόρφωσης: ο οποίος αποδίδει τα βέλτιστα για αδύναμα σήματα που υπερβαίνουν το θόρυβο μίας τουλάχιστον στενής ζώνης συχνοτήτων.
- Τον ανιχνευτή μέσης παραμόρφωσης, ο οποίος αποδίδει τα βέλτιστα για ασθενή σήματα που υπερβαίνουν ομοιόμορφα τον θόρυβο σε ένα σχετικά ευρύ φάσμα, λαμβάνοντας υπόψιν ότι τόσο το σήμα όσο και ο θόρυβος είναι ασταθή.

Μία άλλη προσπάθεια για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων χωρίς τη χρήση του μετασχηματισμού FFT, βασίστηκε στον μετασχηματισμό Walsh (Fletcher, 1983). Ωστόσο η προσέγγιση αυτή απαιτούσε πολύπλοκους υπολογισμούς, καθιστώντας την ακατάλληλη για σεισμικές εφαρμογές πραγματικού χρόνου.

Μία σημαντική συνεισφορά στους ανιχνευτές στο πεδίο της συχνότητας παρουσιάστηκε το 1985 (Glendhill, 1985) και εφαρμόστηκε στο σύστημα EARSS, ένα σύστημα για τον αυτόματο εντοπισμό και καταγραφή σεισμικών γεγονότων στις αρχές της δεκαετίας του '90 (Glendhill et al., 1991). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ανίχνευση γεγονότων σε πραγματικό χρόνο και βασίζεται στον Διακριτό μετασχηματισμό Fourier (Discrete Fourier Transform - DFT). Είναι ιδιαίτερα αποδοτικός, με ποσοστό επιτυχίας > 95%, ενώ είναι ικανός για εντοπισμό σεισμικών γεγονότων σε απομακρυσμένες τοποθεσίες, ακόμα και αν το SNR των δεδομένων είναι χαμηλό.

Αναγνωρίζοντας την υπολογιστική απλότητα και την ευρεία διάδοση του αλγόριθμου STA/LTA, προτάθηκε μία τροποποιημένη έκδοση του STA/LTA για δεδομένα συχνότητας (Hafez et al., 2009). Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος χωρίζει τη ζώνη συχνοτήτων σε υποζώνες συναρτήσεως του χρόνου, χρησιμοποιώντας ένα φασματογράφημα υπολογισμένο με την τεχνική μετασχηματισμού Fourier μικρής διάρκειας (Short Time Fourier Transform - STFT). Ωστόσο, μόνο μία από αυτές τις υποζώνες χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της άφιξης των κυμάτων P. Σε αυτόν τον έλεγχο, εισάγονται δύο διαδοχικά στάδια: στο πρώτο, υπολογίζονται τα προσαρμοζόμενα κατώφλια από την επιλεγμένη υποζώνη, από την οποία έχει δηλωθεί η υποψήφια διέγερση, ενώ στο δεύτερο στάδιο γίνεται χρήση του φασματικού λόγου (Spectral Ratio) για να εξασφαλισθεί ότι η διέγερση που δηλώθηκε στο πρώτο βήμα είναι αληθής.

Καταλήγοντας, παρουσιάζεται μία μέθοδος, για δήλωση απομακρυσμένης σεισμικής διέγερσης, χρησιμοποιώντας δεδομένα από το EarthScope. Ο αλγόριθμος ανίχνευσης ταυτοποιεί μοτίβα σήματος μέσω συστοιχίας οπτικοποίησης (Linville et al., 2014). Παρόλα τα σημαντικά πλεονεκτήματα αυτής της μεθόδου ανίχνευσης, υπάρχουν επίσης σημαντικοί περιορισμοί. Η ανάλυση του χρονισμού φθίνει σύμφωνα με τις παραμέτρους του μετασχηματισμού STFT που χρησιμοποιείται για να αναδιατάξει την είσοδο σαν ένα τρισδιάστατο σήμα με παραμέτρους τον χρόνο, τη συχνότητα, το πλάτος και τη φάση. Ως εκ τούτου, η επιλογή φάσης δεν καθορίζεται και δεν

υπάρχει ακριβής υπολογισμός του επικέντρου των σεισμών. Αντί αυτού, σύμφωνα με τις πρώτες αφίξεις του σεισμού, ο πλησιέστερος στο επίκεντρο του σεισμού σταθμός χρησιμοποιείται ως υποκατάστατο (proxy) για το επίκεντρο.

2.6.3 Ανιχνευτές σωματιδιακής κίνησης και πόλωσης σεισμικών κυμάτων

Όπως είναι ευρέως γνωστό, τα σεισμικά κύματα πολώνονται με διαφορετικό τρόπο το καθένα (Πίνακας 1). Συνεπώς, ανάλογα με το ποιο κύμα διατρέχει το ελαστικό μέσο διάδοσης, τα σωματίδια που απαρτίζουν το μέσο διάδοσης κινούνται με βάση την πόλωση του κύματος και κατά μήκος του άξονα διάδοσης. Με βάση αυτό αναπτύχθηκαν διάφορες μέθοδοι, έτσι ώστε η μέτρηση της πόλωσης να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανιχνευτής άφιξης των σεισμικών φάσεων.

Χρησιμοποιώντας δεδομένα από καταγραφές και στις τρεις συνιστώσες, προτάθηκε ο σχεδιασμός ενός μη γραμμικού και χρονικά μεταβαλλόμενου φίλτρου, με ικανότητα διαχωρισμού της κίνησης των σωματιδίων που είναι ευθύγραμμη προς μία συγκεκριμένη κατεύθυνση στον τρισδιάστατο χώρο. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται διαχωρισμός των κυμάτων P από τα κύματα S και τα επιφανειακά κύματα, όταν καθορίζεται το αζιμούθιο και η απόσταση της σεισμικής πηγής (Flinn, 1965) (Flinn, 1965). Στην πορεία, υπήρξε μία τροποποίηση στον παραπάνω ανιχνευτή προκειμένου να μεγαλώσει το SNR των κυμάτων χώρου σε τηλεσεισμικά δεδομένα (Montalbetti & Kanasewich, 1970).

Μία ακόμα υλοποίηση για την ανίχνευση της άφιξης των κυμάτων S από σεισμολογικά δεδομένα τριών συνιστωσών είναι η χρήση διαφορετικών χαρακτηριστικών που έχουν τα κύματα S, σε μία χαρακτηριστική συνάρτηση ορισμένη στο πεδίο του χρόνου. Η μέθοδος περιλαμβάνει τέσσερα βήματα:

α. τους πρωταρχικούς υπολογισμούς, που περιλαμβάνουν το φιλτράρισμα των δεδομένων, με ένα φίλτρο μεταβλητού παράθυρου. Το μέγεθος του είναι συνάρτηση του ρυθμού δειγματοληψίας και της συχνότητας αποκοπής του φίλτρου.

β. τη χρήση της P φάσης για τον υπολογισμό του πίνακα συνδιακύμανσης, δηλαδή ενός πίνακα οποιού το στοιχείο στη θέση i, j είναι η συνδιακύμανση

μεταξύ των i και j στοιχείων ενός διανύσματος με σκοπό να προσδιορισθεί η κατεύθυνση πόλωσης της αρχικής κίνησης των σωματιδίων,

γ. την επεξεργασία σήματος για το κύμα ουράς P (P -coda) και τον υπολογισμό τριών συντελεστών: της γωνίας εκτροπής, του βαθμού πόλωσης και της αναλογίας μεταξύ της ενέργειας των εγκάρσιων κυμάτων και της συνολικής ενέργειας, που το γινόμενο των τετραγώνων τους αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς του αλγορίθμου,

δ. τη δήλωση άφιξης της S φάσης (Cichowicz, 1993).

Οι υβριδικές μέθοδοι θεωρούνται επίσης εξίσου σημαντικές. Συγκεκριμένα, η μέθοδος που ακολουθεί βασίστηκε στον προηγούμενο ανιχνευτή σε συνδυασμό με τον λόγο της ενέργειας των κυμάτων S ως προς τη συνολική ενέργεια του γεγονότος, την γωνία πρόσπτωσης των κυμάτων S , την αλλαγή των αυτοπαλινδρομούμενων συντελεστών και τη σύγκριση του λόγου STA/LTA . Ταυτόχρονα, για την αναγνώριση και επιλογή της S φάσης χρησιμοποιήθηκε η τεχνική αναγνώρισης προτύπων (Wang & Teng, 1997).

Επιπλέον, αναπτύχθηκε μία παρόμοια προσέγγιση για την ανίχνευση και τον εντοπισμό των περιφερειακών P και S φάσεων μέσω σειсмоγράφων τριών συνιστωσών. Σύμφωνα με αυτήν, πραγματοποιείται ανάλυση πόλωσης στα φανταστικά ίχνη που προέρχονται έπειτα από μετασχηματισμό Hilbert στο πραγματικό μέρος του σήματος (Bai & Kennett, 2000).

Η τεχνική του προσαρμοζόμενου φίλτρου πόλωσης χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της ανίχνευσης της σεισμικής φάσης σε δεδομένα με γραμμικά πολωμένες φάσεις και χαμηλό SNR. Μία αυτοματοποιημένη ρουτίνα εφαρμόζεται και διαιρεί τα πολωμένα δεδομένα ανάλογα με τον χρόνο άφιξης και τα τοποθετεί σε μια εσωτερική δομή του αλγόριθμου. Η χρήση ενός συνθετικού θορύβου υποβάθρου με χαμηλό πλάτος προστέθηκε στα φιλτραρισμένα δεδομένα πόλωσης για την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας μιας εσφαλμένης επιλογής φάσης, βασισμένη σε ψευδή δεδομένα που υπάρχουν στα υπό επεξεργασία ίχνη (Reading et al., 2001).

Υβριδική μέθοδος προτάθηκε το 2009, κατά την οποία γίνεται χρήση δεδομένων από έναν αλγόριθμο STA/LTA και έναν ανιχνευτή πόλωσης, προκειμένου να εντοπιστεί η S φάση. Στην συνέχεια τα δεδομένα και των δύο αλγορίθμων χρησιμοποιούνται για να παραμετροποιηθεί ένας επιλογέας αυτοπαλινδρόμησης ($AR-AIC$). Τέλος, οι πληροφορίες από τους τρεις

αλγόριθμους συνδυάζονται για να υπολογιστεί ο χρόνος άφιξης της πρώτης φάσης S και η αντίστοιχη αβεβαιότητά της (Diehl et al., 2009).

Καταλήγοντας, παρουσιάζεται μία νέα μέθοδος για την αυτόματη ανίχνευση των φάσεων P και S σε πραγματικό χρόνο (Kurzon et al., 2014), χρησιμοποιώντας Ανάλυση ιδιαζουσών ιδιοτιμών (Singular Value Decomposition - SVD (Rosenberger, 2010)). Η μέθοδος εφαρμόζει την SVD ανάλυση σε κάθε συνιστώσα προκειμένου να επιτευχθεί ο διαχωρισμός των κυματομορφών στα επιμέρους P και S κύματα.

2.6.4 Μέθοδοι αυτοπαλινδρόμησης

Οι μέθοδοι αυτοπαλινδρόμησης (Autoregressive - AR) χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τον χρόνο άφιξης των κυριότερων σεισμικών φάσεων, αφότου έχει ήδη ανιχνευθεί μία σεισμική φάση. Η γενική αρχή λειτουργίας τέτοιων μεθόδων βασίζεται στο γεγονός ότι ένα χρονικό παράθυρο που περιέχει τα δεδομένα από ένα σεισμικό συμβάν έχει διαφορετικές στατιστικές ιδιότητες σε σχέση με ένα παράθυρο που περιέχει θόρυβο. Χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα μοντέλα για τη μορφή των δεδομένων, οι μέθοδοι αυτές αναλύουν διαφορετικά επιμέρους παράθυρα της σειράς, με σκοπό να βρουν το βέλτιστο σημείο που χωρίζει ένα παράθυρο με στατιστικές ιδιότητες του θορύβου από ένα παράθυρο που περιέχει θόρυβο μαζί με σεισμικά δεδομένα. Το βέλτιστο αυτό σημείο ορίζει και τον χρόνο άφιξης (Lomax et al., 2012).

Το 1999 προτάθηκε μία μέθοδος βασισμένη σε ένα AR μοντέλο (Leonard & Kennett, 1999). Αναλυτικότερα προτάθηκε η εφαρμογή της σε σεισμικά δεδομένα τριών συνιστωσών προκειμένου να γίνει εκτίμηση του φάσματος και του χρόνου γένεσης. Η εκτίμηση της φασματικής ενέργειας μέσω αυτής της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένας εναλλακτικός τρόπος απέναντι στη μέθοδο FFT, με το πλεονέκτημα ότι αυτή η AR μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ακόμα και σε σχετικά σύντομα χρονικά δεδομένα. Ο AR-AIC επιλογέας που προαναφέρθηκε έχει τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο επιλέγεται η βέλτιστη ζώνη συχνοτήτων του σήματος και εφαρμόζεται σε αυτή ένα ζωνοπερατό φίλτρο butterworth, με το άνω και κάτω όριο του φίλτρου να επιλέγονται στις συχνότητες που το πλάτος του σήματος ταυτίζεται με το πλάτος του θορύβου υποβάθρου. Το δεύτερο στάδιο είναι το φιλτράρισμα των δεδομένων με ένα φίλτρο AR. Στο τρίτο και τελευταίο στάδιο γίνεται ο υπολογισμός του κριτηρίου AIC κατά μήκος της χρονικής σειράς και ο

καθορισμός των ελάχιστων τιμών. Αυτές οι ελάχιστες τιμές θεωρούνται ως ο χρόνος γένεσης του γεγονότος (Leonard, 2000).

Μία τεχνική η οποία αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε σε καταγραφικά δίκτυα στην Ιαπωνία (Akazawa, 2004) παρουσιάζει υψηλή ικανότητα ανίχνευσης των P και S φάσεων σε καταγραφές ισχυρών δονήσεων. Αυτή η τεχνική επιλέγει τις φάσεις βασισμένη σε έναν αλγόριθμο STA/LTA σε συνδυασμό με έναν αλγόριθμο AR-AIC. Με τον τρόπο αυτόν, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος είναι αποδοτικός τόσο στις αλλαγές πλάτους, όσο και στις μεταβολές της συχνότητας και φάσης.

Η μέθοδος χωρίζεται σε εννέα βήματα: τα πέντε πρώτα αφορούν την επιλογή της P φάσης, ενώ τα επόμενα τέσσερα την επιλογή της S φάσης. Αναλυτικότερα:

- Δημιουργία μιας συνάρτησης συσσωρευτικής περιβάλλουσας (cumulative envelope function) για τα δεδομένα επιτάχυνσης στον κατακόρυφο άξονα
- Υπολογισμός του STA/LTA για τη περιβάλλουσα συνάρτηση
- Πρώτη εφαρμογή της μεθόδου AR-AIC
- Δεύτερη εφαρμογή της μεθόδου AR-AIC
- Εκτίμηση της άφιξης της P-φάσης
- Υπολογισμός του STA/LTA στα δεδομένα των οριζόντιων συνιστωσών της επιτάχυνσης
- Επανυπολογισμός του STA/LTA χρησιμοποιώντας το ίδιο χρονικό παράθυρο και δεδομένα με το προηγούμενο βήμα, με την μόνη διαφορά ότι τώρα τα δεδομένα τροφοδοτούνται στον αλγόριθμο με αντίστροφη χρονολογική σειρά – από την λήξη του γεγονότος προς την έναρξη του.
- Εφαρμογή της μεθόδου AR-AIC
- Εκτίμηση της άφιξης της S-φάσης

Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό αυτής της μεθόδου είναι η ικανότητά της να ορίζει διαστήματα ανίχνευσης για τις φάσεις. Συγκεκριμένα, βασίζεται μόνο σε μέγιστες ή ελάχιστες τιμές, χωρίς να καθορίσει κάποιο εξειδικευμένο κατώφλι, ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης του σταθμού που φέρει τον αλγόριθμο.

Η επόμενη μέθοδος παρέχει αυτοματοποιημένη επιλογή της άφιξης της S - φάσης σε τοπικά, περιφερειακά και τηλεσεισμικά γεγονότα (Kuperkoch et al.,

2012). Η επιλογή της φάσης γίνεται εφαρμόζοντας ένα AR μοντέλο και στις δύο οριζόντιες συνιστώσες. Οι παράμετροι για το AR μοντέλο υπολογίζονται σε ένα κινούμενο παράθυρο χρησιμοποιώντας την προσέγγιση των ελαχίστων τετραγώνων. Το μοντέλο που προκύπτει χρησιμοποιείται για να προβλέψει τις κυματομορφές των δύο συνιστωσών. Συγκρίνοντας τις δύο προβλεφθείσες κυματομορφές, με αυτές που καταγράφονται από τα όργανα, προκύπτει το σφάλμα πρόβλεψης. Το σφάλμα πρόβλεψης με τη σειρά του λειτουργεί ως η χαρακτηριστική συνάρτηση του αλγορίθμου, πάνω στην οποία εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος επιλογής, ώστε να εκτιμηθεί η άφιξη της φάσης S.

Κλείνοντας αυτή την ενότητα, παρουσιάζονται δυο μέθοδοι, οι οποίες εμφανίζονται ως εναλλακτική λύση στα προβλήματα της χρήσης του μετασχηματισμού STFT (Tary et al., 2013), δηλαδή στη σταθερή ανάλυση χρόνου και συχνότητας και στη φασματική διαρροή, στην παραμόρφωση που εισάγει ο μετασχηματισμός, λόγω των πεπερασμένων δειγμάτων, οδηγεί σε αλλοίωση του πλάτους των γειτονικών συχνοτήτων. Η πρώτη (Short-time autoregressive – ST-AR), χρησιμοποιεί συνδυασμό του μετασχηματισμού STFT μιας AR μεθόδου, ενώ η δεύτερη αποτελεί υλοποίηση ενός αναδρομικού φίλτρου Kalman (Kalman smoother – KS), μιας τεχνικής που έχει βρει εφαρμογή στον βιοϊατρικό τομέα. Τα φίλτρα Kalman είναι αλγοριθμικά και ειδικεύονται στην απομόνωση του θορύβου από το αρχικό σήμα. Αυτό καθίσταται δυνατό με την επεξεργασία χρονικών ροών από δείγματα, προκειμένου να παραχθεί μια στατιστικά βέλτιστη εκτίμηση για το σήμα. Οι δύο παραπάνω AR μέθοδοι για φασματική εκτίμηση που παρουσιάστηκαν, είναι σε θέση να αναπαραστήσουν το συχνοτικό περιεχόμενο χρονικά μεταβαλλόμενων χρονοσειρών, είτε εφαρμόζοντας την υλοποίηση ενός AR μοντέλου κατά Burg (Burg, 1972) για την εκτίμηση σε μικρά τμήματα δεδομένων, είτε υπολογίζοντας αναδρομικά τους συντελεστές για το AR μοντέλο χρησιμοποιώντας την ομαλοποίηση Kalman για κάθε νέο δείγμα δεδομένων.

Η μέθοδος KS δίνει ακριβείς εκτιμήσεις των κυριότερων φασματικών στοιχείων για χρονοσειρές μικρού και μεσαίου μεγέθους που έχουν ενδιάμεσο SNR, αλλά λόγω του μεγάλου υπολογιστικού της φόρτου δεν συνίσταται για χρήση σε χρονοσειρές μεγάλου διαστήματος. Από την άλλη πλευρά, η μέθοδος ST-AR συνδυάζει υψηλή φασματική ανάλυση, καθώς και χαμηλή ευαισθησία θορύβου.

2.6.5 Συμπεράσματα - Σχολιασμός μεθόδων

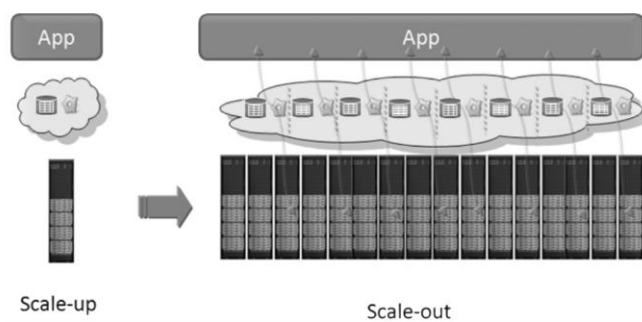
Οι βασιζόμενες στο πεδίο συχνότητας μέθοδοι αν και ακριβείς, λόγω των πολύπλοκων μαθηματικών απαιτήσεών τους, αυξάνουν σημαντικά το χρόνο έκδοσης προειδοποίησης. Ενδεικτικά, η πολυπλοκότητα του αλγόριθμου FFT εκφράζεται σαν $O(N \log_2(N))$ ενώ η πολυπλοκότητα του DFT εκφράζεται σαν $O(N^2)$ (Summerson, 2009) Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αν σε δυο υλοποιήσεις, μια FFT και μια DFT εφαρμοστεί η ίδια είσοδος (N) τότε ο αριθμός των πράξεων που θα απαιτηθεί για τον υπολογισμό του αποτελέσματος θα είναι μικρότερος για την υλοποίηση του FFT μιας και απαιτεί $N \log_2(N)$ πράξεις. Από την άλλη πλευρά, οι αυτοπαλινδρομούμενες μέθοδοι, όπως και οι μέθοδοι που βασίζονται στη σωματιδιακή κίνηση, παρόλο που είναι αποδοτικές και έχουν μεγάλο ποσοστό ακρίβειας εντοπισμού των σεισμικών γεγονότων, δεν προτείνονται για χρήση σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου. Ο λόγος είναι ότι απαιτούν ένα παράθυρο του σήματος μετά την αρχική ανίχνευση του γεγονότος, του οποίου η επεξεργασία μπορεί να υπερβαίνει τον απαιτούμενο χρόνο για να εκδοθεί η προειδοποίηση και ως εκ τούτου δεν μπορεί να παρέχει γρήγορα τις απαραίτητες πληροφορίες.

Συμπερασματικά λοιπόν, λαμβάνοντας υπόψιν τις προαναφερθείσες μεθόδους, οι αλγόριθμοι STA/LTA αποτελούν την καλύτερη επιλογή για υλοποιήσεις ανίχνευσης σεισμικών φάσεων. Ο λόγος είναι το γεγονός ότι παρέχουν τη βέλτιστη ταχύτητα και απόδοση των Σ.Ε.Σ.Π. σε πραγματικό χρόνο.

Κεφάλαιο 3ο – Υλικά και μέθοδοι

3.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα με τα Σ.Ε.Σ.Π. είναι η ανάγκη για καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Η αποστολή σεισμολογικών δεδομένων από ένα πυκνό δίκτυο προειδοποίησης σε έναν μόνο εξυπηρετητή (server) μπορεί να γίνει αιτία πολλών προβλημάτων που αφορούν κυρίως στη μείωση της απόδοσης του, λόγω της επεξεργασίας του όγκου δεδομένων. Ως αποτέλεσμα αυτού υπάρχει ο κίνδυνος της μη έγκαιρης αποστολής κάποιας προειδοποίησης έγκαιρα Ένας τρόπος για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, είναι η αύξηση των δυνατοτήτων επεξεργασίας του συστήματος των δεδομένων (μέθοδος scale up –μέθοδος κάθετης κλιμάκωσης). Ωστόσο, η συγκεκριμένη διαδικασία δεν συμφέρει, επειδή το κόστος αναβάθμισης ενός εξυπηρετητή ολοένα και αυξάνει, καθώς επίσης αγγίζονται τα όρια των διαφόρων αρχιτεκτονικών που υπάρχουν. Αυτό το πρόβλημα λύνεται εύκολα, εάν ο φόρτος επεξεργασίας των δεδομένων κατανεμηθεί στους ίδιους τους σταθμούς και μάλιστα χρησιμοποιώντας σταθμούς με περισσότερους από έναν πυρήνες (μέθοδος scale out –μέθοδος οριζόντιας κλιμάκωσης) (Michael et al., 2007), στη θέση ενός συστήματος υψηλών προδιαγραφών, γεγονός που σημαίνει ότι η επεξεργασία δεν αναλαμβάνεται από μία διεργασία αλλά διαμοιράζεται παράλληλα ανάλογα με το πλήθος των πυρήνων που έχει ο σταθμός, όπως αυτό αναπαρίσταται και στο Σχήμα 10.



Σχήμα 10: Σύγκριση οριζόντιας και κάθετης κλιμάκωσης.

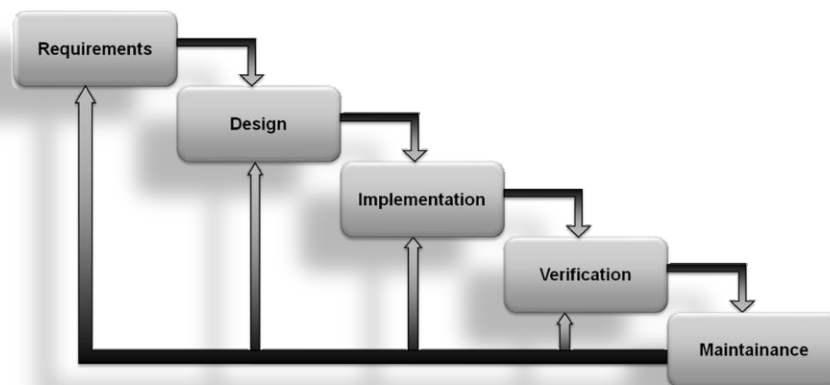
Scale up vs Scale out

Σύμφωνα με όλη τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που πραγματοποιήθηκε και προαναφέρθηκε, η παρούσα διδακτορική διατριβή θα υλοποιήσει ένα Σ.Ε.Σ.Π., βασισμένο σε ένα cluster σταθμών, στο οποίο ο κάθε σταθμός θα επικοινωνεί

με τους υπόλοιπους αλλά και με βιομηχανικούς αυτοματισμούς, μέσω των πρωτοκόλλων IEEE 802.15.4 / IEEE 802.3. Η χρήση του IEEE 802.15.4 (προσωπικά ασύρματα δίκτυα, χαμηλού εύρους) θα επιτρέπει τη δημιουργία ενός μερικώς ή και πλήρως καταναμημένου δικτύου, ενώ η χρήση του IEEE 802.3 (Ethernet) θα επιτρέπει την απευθείας ενημέρωση των βιομηχανικών αυτοματισμών μέσω κάποιας IoT (Internet of Things) υπηρεσίας, αλλά και την επικοινωνία του σταθμού με το Διαδίκτυο. Με τον τρόπο αυτόν η επεξεργασία των δεδομένων θα είναι άμεση και δεν θα απαιτείται παρουσία κεντρικού εξυπηρετητή για την επεξεργασία των δεδομένων και την έκδοση των προειδοποιήσεων. Επιπλέον, εκμεταλλευόμενοι τη δικτύωση των σταθμών και των αυτοματισμών αλλά και των κατάλληλων μηχανολογικών διατάξεων, οι έμμεσες καταστροφές της σεισμικής δραστηριότητας (εκδήλωση πυρκαγιών και εκρήξεις κατά μήκος γραμμών τροφοδοσίας αέριων και υγρών καυσίμων) θα περιοριστούν.

3.2 Σχεδιασμός

Για τον σχεδιασμό και την υλοποίηση ενός τόσο μεγάλου και σύνθετου συστήματος, μελετήθηκε το πρότυπο ANSI/AIAA G-043A-2012e (American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012), για με την παροχή τυποποιήσεων σχετικά με τον σχεδιασμό, την ανάπτυξη, την παραγωγή την αξιοποίηση και τέλος την υποστήριξη του συστήματος. Ακολουθήθηκε το μοντέλο «καταρράκτη» , όπως αυτό περιγράφεται στο Σχήμα 11. Το εν λόγω μοντέλο επιλέχθηκε κυρίως γιατί αποτελεί την παλαιότερη και πιο τεκμηριωμένη μέθοδο ανάπτυξης συστημάτων, με αποτέλεσμα να είναι γνωστές εξ αρχής οι προδιαγραφές που απαιτούνται. Επιπλέον, η τεχνολογία που θα χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη του συστήματος είναι πλήρως γνωστή και κατανοητή.

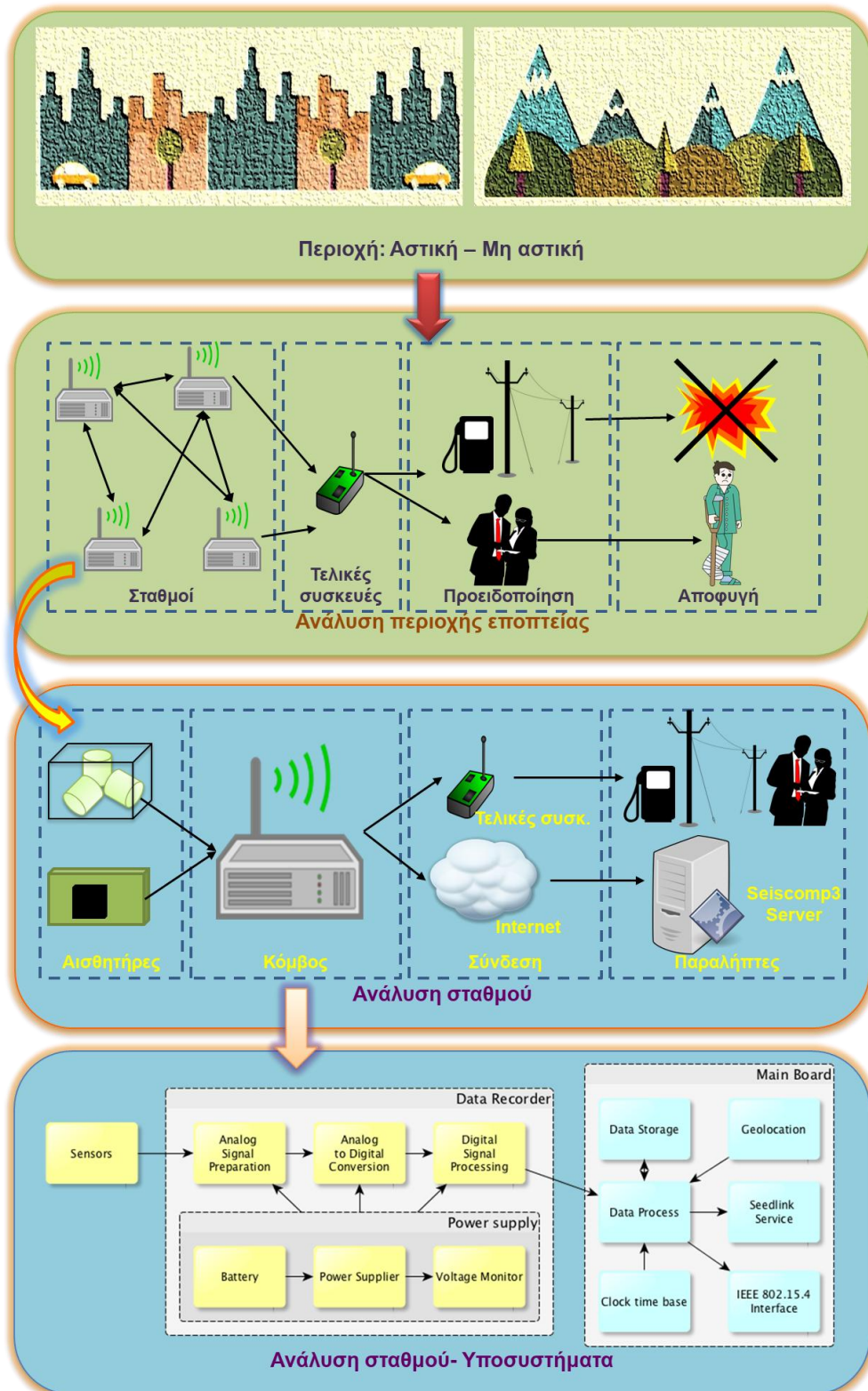


Σχήμα 11: Μοντέλο καταρράκτη
Waterfall model

3.2.1 Ανάλυση απαιτήσεων

Ο στόχος της παρούσας υλοποίησης είναι η δημιουργία ενός συστήματος, του οποίου σκοπός είναι η έγκαιρη σεισμική προειδοποίηση. Το Σ.Ε.Σ.Π. θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί αυτόνομα είτε σαν σταθμός τοποθετημένος εξωτερικά σε κάποια περιοχή, είτε τοποθετημένος σε κάποια στεγασμένη υπηρεσία όπου και θα παρέχει επιπλέον γραφικές πληροφορίες στον χειριστή του. Η βασική αρχή λειτουργίας του θα είναι η συλλογή και επεξεργασία σεισμολογικών δεδομένων μέσω αισθητήρων, με τους οποίους θα είναι εξοπλισμένο. Σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμικής δραστηριότητας θα πρέπει να είναι ικανό να εκδίδει εγκαίρως προειδοποιήσεις, τόσο στον ανθρώπινο πληθυσμό, όσο και σε μία σειρά υποσυστημάτων, τα οποία ελέγχουν τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας και των καυσίμων που υπάρχουν στην περιοχή επιτήρησης. Στη συνέχεια, θα έχει την ικανότητα να αποθηκεύει τις αρχικές μετρήσεις που έλαβε σε αποθηκευτικό μέσο, άλλα και να τις αποστέλλει σε κάποιον εξειδικευμένο εξυπηρετητή για περαιτέρω επεξεργασία. Οι αισθητήρες που θα είναι εγκατεστημένοι πάνω του θα πρέπει να είναι εμπορικά διαθέσιμοι, αλλά και ο εξοπλισμός του να είναι εξειδικευμένος για την παρακολούθηση σεισμικής δραστηριότητας. Ιδιαίτερο βάρος θα δίνεται τόσο στην ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων, όσο και στην αξιοπιστία αυτών. Συνεπώς, θα πρέπει να υπάρξει η κατάλληλη μελέτη για απομόνωση του συστήματος από τις διάφορες πηγές θορύβου, είτε αυτές είναι ηλεκτρομαγνητικής φύσης, είτε είναι αποτέλεσμα ανθρώπινης παρέμβασης. Τέλος, θα πρέπει να μελετηθεί η ικανότητα αυτονομίας και λειτουργίας του συστήματος σε οποιοδήποτε περιβάλλον εγκαθίσταται, γεγονός που σημαίνει χαμηλή ενεργειακή κατανάλωση, ικανότητα λειτουργίας σε ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες, αλλά και ευκολία συντήρησης σε περίπτωση βλάβης.

3.2.2 Σχεδίαση του συστήματος



**Σχήμα 12: Περιγραφή συστήματος
Top down system analysis**

Ένα Σ.Ε.Σ.Π., σαν το E.A.SY (Earthquake Alert System) στην πραγματικότητα αποτελεί ένα σύστημα συστημάτων (System of Systems SoS). Σε γενικές γραμμές τέτοιου είδους συστήματα είναι σχετικά δύσκολο να προτυποποιηθούν σαν χαρακτηριστικά. Μία πρώτη ολοκληρωμένη προσπάθεια έγινε από τον Maier το 1996 (Maier, 1996), ο οποίος κατέληξε σε πέντε βασικούς άξονες που πρέπει να εφαρμόζονται στον σχεδιασμό τέτοιων συστημάτων:

1. Λειτουργική ανεξαρτησία των υποσυστημάτων: Τα υποσυστήματα που απαρτίζουν το SoS, θα πρέπει να είναι λειτουργικά ακόμα και αν χρειαστεί να λειτουργήσει κάθε ένα αυτόνομα από τα υπόλοιπα.
2. Διαχειριστική ανεξαρτησία των στοιχείων: Τα υποσυστήματα λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά με τέτοιο τρόπο ώστε ο συνδυασμός των δεδομένων τους να δίνει ένα νέο τελικό και συνολικό αποτέλεσμα.
3. Εξελικτικότητα: Το SoS ποτέ δεν θεωρείται πλήρως ολοκληρωμένο, καθώς η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος είναι διαρκής και εξελικτική, με συνεχή τροποποίηση και προσθήκη/ αφαίρεση λειτουργιών.
4. Αναδυόμενη συμπεριφορά: το σύστημα εκτελεί διαδικασίες, οι οποίες δεν είναι εξαρτώμενες από κάποιο συγκεκριμένο υποσύστημα, αλλά προκύπτουν σαν σύνολα από όλα τα εξαρτήματα και τις υπηρεσίες που απαρτίζουν το SoS.
5. Γεωγραφική κατανομή: η γεωγραφική κατανομή τέτοιων συστημάτων είναι μεγάλη.

Το Σ.Ε.Σ.Π. E.A.SY, με δυνατότητα εγκατάστασης σε αστικές και μη περιοχές, αποτελείται από σταθμούς (nodes) και τελικές συσκευές (end devices). Οι σταθμοί μπορούν να επικοινωνούν είτε μεταξύ τους είτε απευθείας με τις τελικές συσκευές. Η επικοινωνία περιλαμβάνει ανταλλαγή μηνυμάτων αλλά και απευθείας έλεγχο των ακροδεκτών γενικού σκοπού Εισόδου/Εξόδου (E/E) (General Purpose Input/Output - GPIO). Σκοπός αυτού του τρόπου επικοινωνίας είναι ο έλεγχος των δυο κυριότερων αιτίων (ανθρώπινος πληθυσμός / διαχείριση ενέργειας) που προκαλούν έμμεσες καταστροφές μετά από ένα ισχυρό σεισμικό γεγονός. Έτσι, το Σ.Ε.Σ.Π. συμβάλει στην προστασία της περιοχής που εποπτεύει και στη διάσωση ανθρώπινων ζωών (Kanamori et al., 1997); (Smith, 2013). Αναλυτικότερα για τις δύο κύριες αιτίες έμμεσων καταστροφών ισχύουν τα εξής:

- **Ο ανθρώπινος πληθυσμός:** μη γνωρίζοντας για τον επερχόμενο σεισμό είναι πολύ πιθανό να βρίσκεται σε περιοχές υψηλού κινδύνου, με αποτέλεσμα να κινδυνεύουν ανθρώπινες ζωές τόσο από το ίδιο το φαινόμενο του σεισμού όσο και από φαινόμενα όχλου (π.χ. ποδοπάτημα)
- **Αγωγοί/μονάδες αποθήκευσης υγρών και αέριων καυσίμων – γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας:** σε ένα ενδεχόμενο καταστροφικό γεγονός είναι πιθανό να παρατηρηθεί ρήξη στους αγωγούς μεταφοράς υγρών ή αερίων καυσίμων, άλλα και καταστροφές στο δίκτυο μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Ο συνδυασμός αυτών των δύο καταστροφών μπορεί να οδηγήσει σε εκδήλωση πυρκαγιών, που θα προκαλέσουν επιπλέον καταστροφή της πληγείσας περιοχής. Σαν παράδειγμα, μια έκρηξη μετά από σεισμό σε έναν αποθηκευτικό χώρο καυσίμων μεγέθους 130000m³ θα ήταν καταστρεπτική για τη γύρω περιοχή, αν θεωρηθεί ότι η πυκνότητα ενέργειας στη Βενζίνη είναι της τάξης των 46MJ/L. Ανάγοντας την εκλυόμενη από την έκρηξη ενέργεια, στην αντίστοιχη έκρηξη που θα προκαλούνταν από TNT, συμπεραίνεται ότι η αντιστοιχία μεταξύ τους είναι 8.9KT TNT. Κάτι τέτοιο θα έπληττε μια περιοχή με ακτίνα 2.7km (UN, 2015)

Οι τελικές συσκευές του συστήματος λαμβάνουν τα δύο είδη μηνυμάτων που αποστέλλονται από τους σταθμούς. Με τον τρόπο αυτόν ελέγχονται και τα δύο προαναφερθέντα αίτια, με αποτέλεσμα τον περιορισμό των έμμεσων καταστροφών.

Κάθε σταθμός έχει δυνατότητα αντίληψης της σεισμικής δραστηριότητας, μέσω αισθητήρων και απαραίτητης επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να μπορεί να διακρίνει την ύπαρξη ή μη ενός σεισμικού γεγονότος. Η αποστολή των μηνυμάτων προς τις τελικές συσκευές γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου zigbee που βασίζεται στην τυποποίηση IEEE 802.15.4 και μέσω του πρωτοκόλλου Ethernet (IEEE 802.3). Η αποστολή αλφαριθμητικών μηνυμάτων προειδοποίησης απευθύνεται στον ανθρώπινο πληθυσμό, ενώ ο απευθείας έλεγχος των ακροδεκτών της τελικής συσκευής απευθύνεται σε αυτοματισμούς, οι οποίοι μέσω ηλεκτρονόμων μπορούν να ελέγξουν τις γραμμές μεταφοράς καυσίμων και ενέργειας. Εκτός από την ανταλλαγή μηνυμάτων με τις τελικές συσκευές, πραγματοποιείται ανταλλαγή μηνυμάτων με έναν εξυπηρετητή (Server) για την αποστολή των σεισμολογικών

δεδομένων που έχουν καταγραφεί με σκοπό την περαιτέρω επεξεργασία τους, μετά την έκδοση της σεισμικής προειδοποίησης. Τέλος, κάθε σταθμός στη συστοιχία συνίσταται από μία μονάδα ψηφιοποίησης και από μία μονάδα επεξεργασίας, αποτελούμενη από πολλούς πυρήνες για μείωση του χρόνου επεξεργασίας. Συνοπτικά, η αρχιτεκτονική σύμφωνα με την οποία σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ο σταθμός παρουσιάζεται στο Σχήμα 12: με κίτρινο χρώμα παρουσιάζεται το τμήμα στο οποίο γίνεται η ψηφιοποίηση του σήματος, ενώ με γαλάζιο είναι τα τμήματα που αφορούν την επεξεργασία και την αποθήκευση των σημάτων. Εκτός από τα block διαγράμματα που περιγράφουν το σύστημα, είναι διαθέσιμη στο Παράρτημα I (εικόνες Σχήμα 67-Σχήμα 78) της εργασίας η περιγραφή των κυκλωμάτων που σχεδιάστηκαν, καθώς και της καλωδίωσης του συστήματος.

Οι διαφοροποιήσεις στην αρχιτεκτονική των δύο συστημάτων έγκεινται πρακτικά στο σημείο της επεξεργασίας σήματος. Στην παρούσα υλοποίηση λόγω του ότι η επεξεργασία γίνεται σε πραγματικό χρόνο, τοπικά στο μηχάνημα, κρίνεται απαραίτητη η χρήση επεξεργαστή ο οποίος αποτελείται από πολλούς πυρήνες, προκειμένου να μπορέσει να αντεπεξέλθει στο πλήθος των δεδομένων. Για τον λόγο αυτόν και η αρχιτεκτονική που ακολουθήθηκε χωρίζεται σε δυο βασικά τμήματα:

- Τη μονάδα ψηφιοποίησης των εισερχόμενων σημάτων
- Τη μονάδα επεξεργασίας των ψηφιοποιημένων σημάτων

3.3 Υλοποίηση

3.3.1 Αισθητήρες

Ένα καταγραφικό σύστημα για σεισμικά σήματα, θα πρέπει να είναι εξοπλισμένο με κατάλληλους αισθητήρες, ώστε να είναι ακριβές, αρκετά ευαίσθητο και να μπορεί να λειτουργήσει με αξιοπιστία. Τέτοιου είδους αισθητήρες θεωρούνται όργανα τα οποία μπορούν να μετρήσουν την μετατόπιση του εδάφους, όταν αυτό δονείται.

Αναλύοντας ένα τέτοιο όργανο με το μοντέλο Black-Box, θεωρούμε μια συσκευή η οποία δέχεται σαν είσοδο την εδαφική κίνηση, εκφρασμένη είτε σαν ταχύτητα είτε σαν επιτάχυνση, ενώ η έξοδός της εκφράζεται σαν μεταβολή τάσης στους νεότερους αισθητήρες. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται καθώς ο αισθητήρας κινείται μαζί με το έδαφος στο οποίο έχει εγκατασταθεί, με την

προϋπόθεση ότι δεν υπάρχει κάποιο σταθερό σημείο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως σημείο αναφοράς. Λόγω αυτής της παραδοχής, η μετατόπιση δεν μπορεί να υπολογιστεί άμεσα. Σύμφωνα όμως με την αρχή της αδράνειας, μπορούμε να παρατηρήσουμε μία κίνηση μόνο εάν πρόκειται για επιταχυνόμενη. Έτσι, τα σεισμικά κύματα προκαλούν παροδικές κινήσεις, γεγονός που συνεπάγεται την ύπαρξη επιτάχυνσης καθ' όλη τη διάρκειά τους.

Όπως ήδη αναφέρθηκε, ένας αισθητήρας οφείλει να είναι ευαίσθητο όργανο για την καταγραφή των διαφόρων σεισμικών κυμάτων. Έτσι, ο αισθητήρας θα πρέπει να καλύπτει ένα εύρος συχνοτήτων από 0.01-100Hz τουλάχιστον και να καταγράφει εδαφικές κινήσεις της τάξης των 10nm-10mm (Havskov & Alguacil, 2016).

Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται ανάλογα με το εύρος της συχνότητας και του πλάτους που μπορούν να καταγράψουν. Ορισμένες από αυτές τις κατηγορίες παραθέτονται παρακάτω:

- Αισθητήρες μικρής περιόδου (Short Period)
- Αισθητήρες μεγάλης περιόδου (Long Period)
- Αισθητήρες ευρέος φάσματος (Broad-Band)

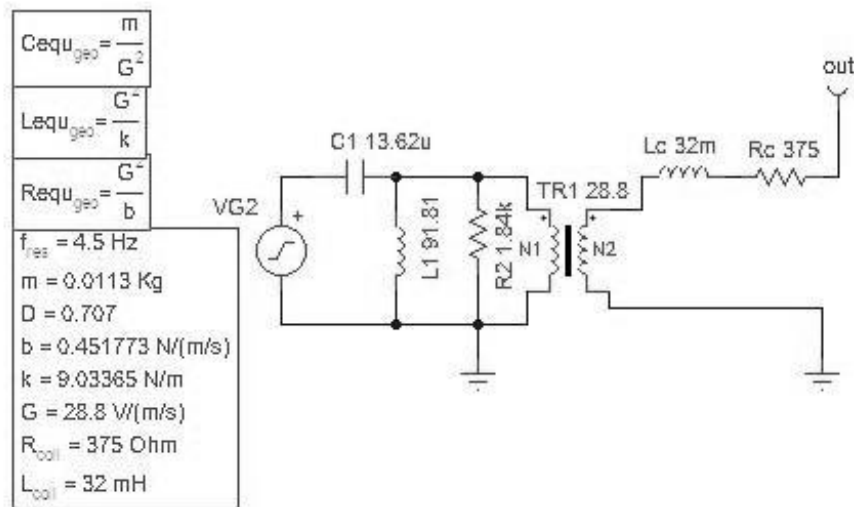
Η παρούσα υλοποίηση έχοντας σαν στόχο τη δημιουργία ενός Σ.Ε.Σ.Π. του οποίου το κόστος θα είναι χαμηλό, όντας συμβατή με εμπορικούς αισθητήρες της αγοράς, φέρει σαν προεπιλεγμένους αισθητήρες, ένα επιταχυνσιόμετρο τύπου MEMS (Micro-electro mechanical systems) και ένα γεώφωνο, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

3.3.1.1 Γεώφωνο

Σαν γεώφωνο επιλέχθηκε ο αισθητήρας LGT-4.5 της εταιρίας Longet Equipments. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας έχει ιδιοσυχνότητα ταλάντωσης τα 4.5Hz. Γνωρίζουμε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καταγραφή σημάτων μεγαλύτερων των 0.3Hz (Havskov & Alguacil, 2016). Τρεις τέτοιοι αισθητήρες, είναι τοποθετημένοι σε συσκευασία συμβατή με το πρωτόκολλο IP67.

Στον πίνακα 2 που ακολουθεί παρουσιάζονται οι τεχνικές προδιαγραφές του κατασκευαστή, χωρίς ωστόσο να παρέχονται οι σταθερές του ελατηρίου k και η σταθερά απόσβεσης b , οι οποίες υπολογίστηκαν εύκολα με τη χρήση των εξισώσεων (3.1α,β). Με βάση τα δεδομένα αυτά, κατασκευάστηκε το ηλεκτρικό ανάλογο του γεώφωνου (Σχήμα 13), το οποίο θα χρησιμοποιηθεί μελλοντικά

στον σχεδιασμό της μονάδας προετοιμασίας αναλογικών σημάτων (RSUW, 2012); (ZHAO et al., 2017).



Σχήμα 13: Ηλεκτρικό μοντέλο γεώφωνου. Geophone electrical model

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.1\alpha)$$

$$D = \frac{b}{2\sqrt{k \cdot m}} \quad (3.1\beta)$$

Πίνακας 2: Τεχνικές προδιαγραφές του αισθητήρα LGT 4.5.

LGT4.5 Specifications

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Ανοχή (%)	Μονάδα
Συχνότητα συντονισμού	f_o	4.5	±10	Hz
Μάζα σώματος	m	0.0113	-	Kg
Αντίσταση Απόσβεσης	R_D	12200	±5%	kΩ
Λόγος απόσβεσης	D	0.707	±10	-
Σταθερά απόσβεσης	b	0.451773	-	N/(m/s)
Σταθερά ελατηρίου	k	9.03365	-	N/m
Δυναμική μεγέθυνση	G	28.8	±10	V/(m/s)
Αντίσταση πηνίου	R_{coil}	375	±5	Ω

Η μελέτη του αισθητήρα απαιτεί τη χρήση της συνάρτησης μεταφοράς του. Ως συνάρτηση μεταφοράς ορίζεται ο λόγος εξόδου ως προς την είσοδο του συστήματος $H = V_o/V_i$.

Ως γεώφωνο θεωρείται το σύστημα μίας μάζας m η οποία συνδέεται με ένα σημείο της επιφάνειας της γης, μέσω μιας παράλληλης διάταξης ενός ελατηρίου και ενός αποσβεστήρα. Μόλις εντοπιστεί οποιαδήποτε κίνηση από τον αισθητήρα, η μάζα του ταλαντώνεται ελεύθερα κατά μήκος του άξονα της κίνησης. Συμβολίζοντας την επιτάχυνση του εδάφους με \ddot{X}_h και την κίνηση της μάζας σε σχέση με τη γη ως X_r , το ελατήριο θα ασκήσει μια δύναμη ανάλογη προς την επιμήκυνση του $X_r - X_o$, όπου X_o η αρχική θέση ισορροπίας της μάζας. Ο αποσβεστήρας θα ασκήσει μια δύναμη ανάλογη με την ταχύτητα \dot{X}_r μεταξύ της μάζας m και της γης. Συμβολίζοντας τις σταθερές του ελατηρίου και της απόσβεσης με k και b αντίστοιχα, τη μεταβλητή του Laplace με s , η εξίσωση κίνησης για τη μάζα m ως προς το σημείο ηρεμίας εκφράζεται σαν συνάρτηση μεταφοράς ενός μηχανικού συστήματος δεύτερης τάξης:

$$V_i = \frac{X_r}{\ddot{X}_h} = \frac{-1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{K}{m}} \quad (3.2)$$

Κατά την κίνηση της μάζας, πραγματοποιείται αλληλεπίδραση της μάζας και του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται από έναν φυσικό μαγνήτη, ο οποίος είναι προσκολλημένος στον αισθητήρα. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, όπως αυτός εκφράζεται στο πεδίο των συχνοτήτων και λόγω του γεγονότος ότι το $\partial\Phi/\partial t$ θεωρείται σταθερό για μικρές μετατοπίσεις, η τάση εξόδου (εξίσωση 3.3) είναι ανάλογη της ταχύτητας του πηνίου και της δυναμικής μεγέθυνσης G .

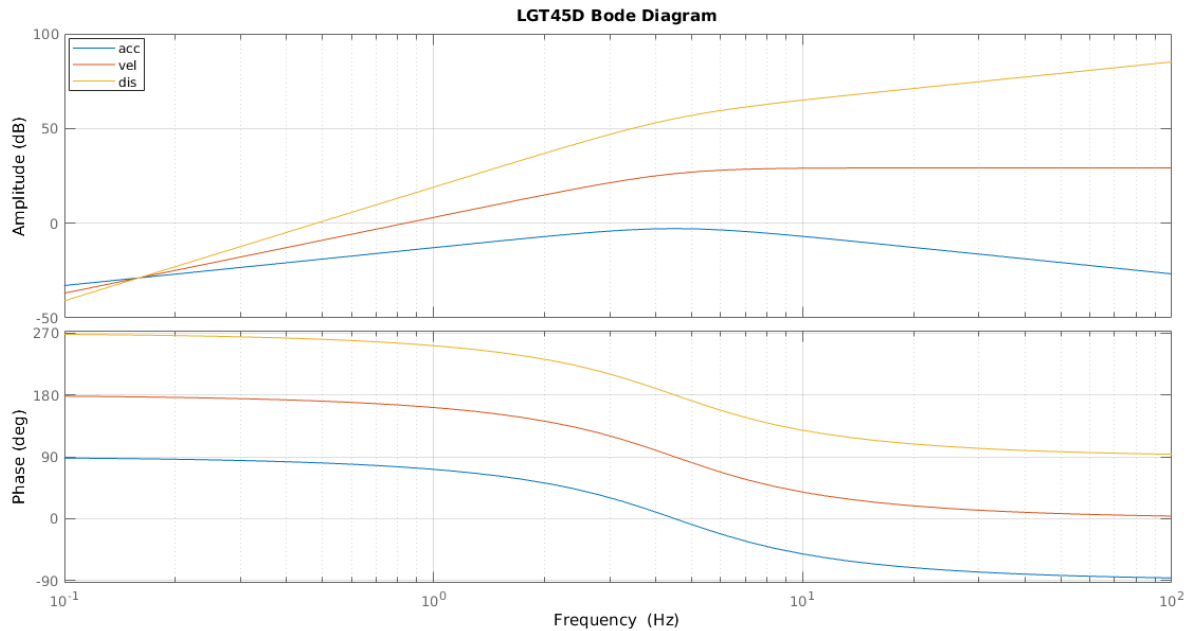
$$V_o = \frac{\partial\Phi}{\partial t} = \frac{-\partial\Phi}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = -G\dot{X}_r = -GsX_r \quad (3.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις 3.2 και 3.3, προκύπτουν οι εξισώσεις 3.4-3.6, που είναι η απόκριση συχνότητας του αισθητήρα για επιτάχυνση, ταχύτητα και μετατόπιση αντίστοιχα, όπως απεικονίζονται και στο Σχήμα 14.

$$\begin{aligned} H_{acc}(s) &= \frac{V_o}{V_i} = \frac{GsX_r}{\frac{X_r}{\ddot{X}_h}} = \frac{Gs}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{K}{m}} \\ &= \frac{28.8s}{s^2 + \frac{0.451773}{0.0113}s + \frac{9.03365}{0.0113}} \\ &= \frac{28.8s}{s^2 + 39.9799s + 799.4} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned}
H_{vel}(s) &= \frac{V_o}{V_i} = \frac{GsX_r}{\frac{X_r}{\dot{X}_h}} = \frac{Gs^2}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{K}{m}} \\
&= \frac{28.8s^2}{s^2 + \frac{0.451773}{0.0113}s + \frac{9.03365}{0.0113}} \\
&= \frac{28.8s^2}{s^2 + 39.9799s + 799.4}
\end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
H_{dis}(s) &= \frac{V_o}{V_i} = \frac{Gs^3}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{K}{m}} = \frac{28.8s^3}{s^2 + \frac{0.451773}{0.0113}s + \frac{9.03365}{0.0113}} \\
&= \frac{28.8s^3}{s^2 + 39.9799s + 799.4}
\end{aligned} \tag{3.6}$$

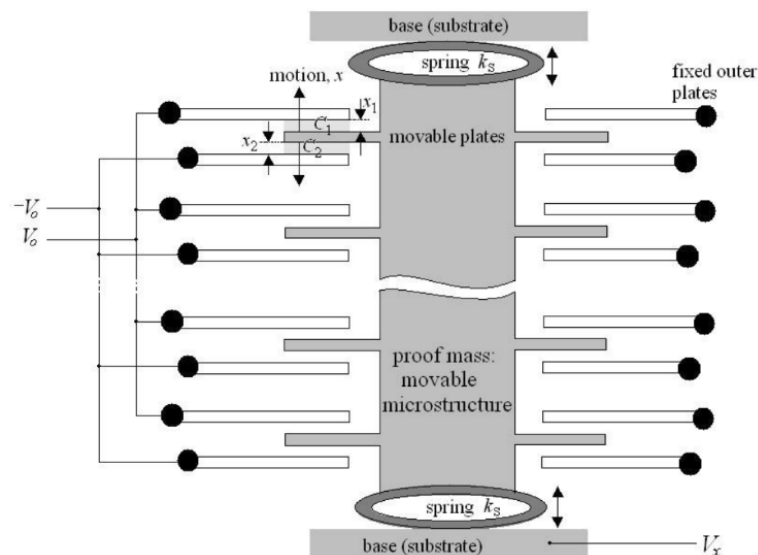


Σχήμα 14: Συναρτήσεις μεταφοράς LGT4.5
Transfer function plots for the LGT4.5 Sensor

3.3.1.2 Επιταχυνσιόμετρο

Οι αισθητήρες τύπου MEMS οι οποίοι είναι ψηφιακοί και ελέγχονται μέσω πρωτοκόλλων όπως το SPI και το I²C, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για σεισμική καταγραφή λόγω της χαμηλής ανάλυσης των ενσωματωμένων ADC που φέρουν, τα οποία δεν ξεπερνούν συνήθως τα 10 bit. Σε αντίθεση με τα παραπάνω, αναλογικοί αισθητήρες τύπου MEMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τις τεχνικές προδιαγραφές τους. Πρέπει δε να σημειωθεί ότι τέτοιοι αισθητήρες χρησιμοποιούνται ήδη σε σεισμολογικά δίκτυα, όπως για παράδειγμα το δίκτυο Quake-Catcher Network (QCN) (Cochran et al., 2009) και το δίκτυο Community Seismic Network (CSN) (Clayton et al., 2011).

Το επιταχυνσιόμετρο που εγκαταστάθηκε στον κάθε σταθμό, είναι το LIS344ALH της ST microelectronics με δυνατότητα μέτρησης επιταχύνσεων που φτάνουν τα $\pm 2g$ ή και τα $\pm 6g$ κατόπιν επιλογής. Ο συγκεκριμένος αισθητήρας είναι χωρητικός κλάσης C, το οποίο, όπως περιγράφεται και παρακάτω (Σχήμα 15) αποτελείται από μια κινητή μάζα η οποία φέρει προεξοχές. Η κινητή μάζα συνδέεται με ένα σταθερό πλαίσιο αναφοράς μέσω ενός μηχανικού συστήματος ανάρτησης. Το σταθερό πλαίσιο αναφοράς φέρει και αυτό προεξοχές. Οι προεξοχές του σταθερού και του μεταβλητού πλαισίου λειτουργούν μεταξύ τους ως οπλισμοί πυκνωτή. Κατά την εκτροπή της μάζας όταν ασκείται δύναμη στον αισθητήρα παρατηρείται διαφορά στις χωρητικότητες των πυκνωτών C_1 και C_2 η οποία είναι ανάλογη της μετατόπισης που πραγματοποιήθηκε.



Σχήμα 15: Αρχή λειτουργίας χωρητικών επιταχυνσιόμετρων. Capacitive accelerometers operation (Andrejašić, 2008)

Επιλέχτηκε έναντι άλλων επιταχυνσιόμετρων, λόγω του χαμηλού του κόστους αλλά και λόγω του ότι έχει χρησιμοποιηθεί σε εγκαταστάσεις συστημάτων σεισμικής προειδοποίησης (Peng et al., 2013). Επιπλέον, πειράματα που πραγματοποιήθηκαν με το συγκεκριμένο αισθητήρα, έφεραν ικανοποιητικά αποτελέσματα στον τομέα της μέτρησης της σεισμικής έντασης, δηλαδή στο μέτρο εκτίμησης των επιπτώσεων μιας σεισμικής δόνησης στο έδαφος και τις κτηριακές εγκαταστάσεις μιας περιοχής. (Xin et al., 2014).

Έκτος από τη δυνατότητα επιλογής κλίμακας, το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο παρέχει δυνατότητα για έλεγχο ορθής λειτουργίας. Έχει στις αναλογικές εξόδους του ένα κατωπερατό φίλτρο τύπου RC 1ης τάξης με $f_c=482.28\text{Hz}$. Το

συγκεκριμένο ολοκληρωμένο είναι ιδανικό, γιατί έχει πολύ μικρή πυκνότητα θορύβου σε σχέση με αντίστοιχους εμπορικά διαθέσιμους αισθητήρες, όπως φαίνεται και στον πίνακα 3, στον οποίο παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των τριών συνιστωσών του αισθητήρα. Για ένα εύρος συχνοτήτων 50Hz, ο RMS θόρυβος του οργάνου υπολογίζεται στα 443μg (-67db).

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά επιταχυνσιόμετρου LIS344ALH.

LIS344ALH Specifications

Παράμετρος	Σύμβολο	Άξονας X	Άξονας Y	Άξονας Z	Μονάδα
Κλίμακα	R	±2, ±6	±2, ±6	±2, ±6	<i>g</i>
Εύρος Συχνότητας	BW	2500	2500	1800	<i>Hz</i>
Πυκνότητα θορύβου	ND	26	26	50	$\mu g/\sqrt{Hz}$
Τάση τροφοδοσίας	V_{sup}	2.4-3.6			<i>V</i>
RMS θόρυβος	$N_{RMS} = ND * \sqrt{BW} * 1.57$, για φίλτρο 1ης τάξης				

Πρέπει να σημειωθεί ότι η χρήση επιταχυνσιόμετρων κλάσης C δεν ενδείκνυται για καταγραφή μικρών σεισμικών γεγονότων λόγω του μεγάλου θορύβου τους. Αντίθετα, για μεγάλα σεισμικά γεγονότα υπερτερούν σε σχέση με τα γεώφωνα, επειδή δεν είναι εύκολο να έρθουν σε κορεσμό. Για τον λόγο αυτό σε περίπτωση που ο σταθμός αντιληφθεί ότι το γεώφωνα ήρθε σε κορεσμό, χρησιμοποιεί το επιταχυνσιόμετρο για να πάρει τα δεδομένα της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης. Προκειμένου να προσαρτηθεί ο αισθητήρας, ώστε να παρέχεται πρόσβαση στις επιλογές κλίμακας και ελέγχου λειτουργίας, ήταν απαραίτητη η κατασκευή απλής πλακέτας, μέσω της οποίας θα οδηγούνται τα σήματα εξόδου και η τροφοδοσία. Το εν λόγω κύκλωμα αποτελείται από τρεις βραχυκυκλωτήρες (jumpers) οι οποίοι ρυθμίζουν τον αισθητήρα και τους απαραίτητους συνδετήρες (connectors) για τη μεταφορά των δεδομένων. Η συγκεκριμένη πλακέτα τοποθετήθηκε και αυτή σε υδατοστεγή συσκευασία, συμβατή με το πρωτόκολλο IP67, για την προστασία της από το εξωτερικό περιβάλλον. Η συγκεκριμένη συσκευασία φέρει επίσης συσκευή ευθυγράμμισης με τον ορίζοντα, για εύκολη και σωστή εγκατάσταση του αισθητήρα στον χώρο λειτουργίας του. Το όργανο είναι τοποθετημένο στον χώρο, έτσι ώστε ο X άξονας των δεδομένων του να είναι προσανατολισμένος με την ανατολή, ο Y άξονας με τον βορρά ενώ ο κατακόρυφος να δείχνει προς τα πάνω.

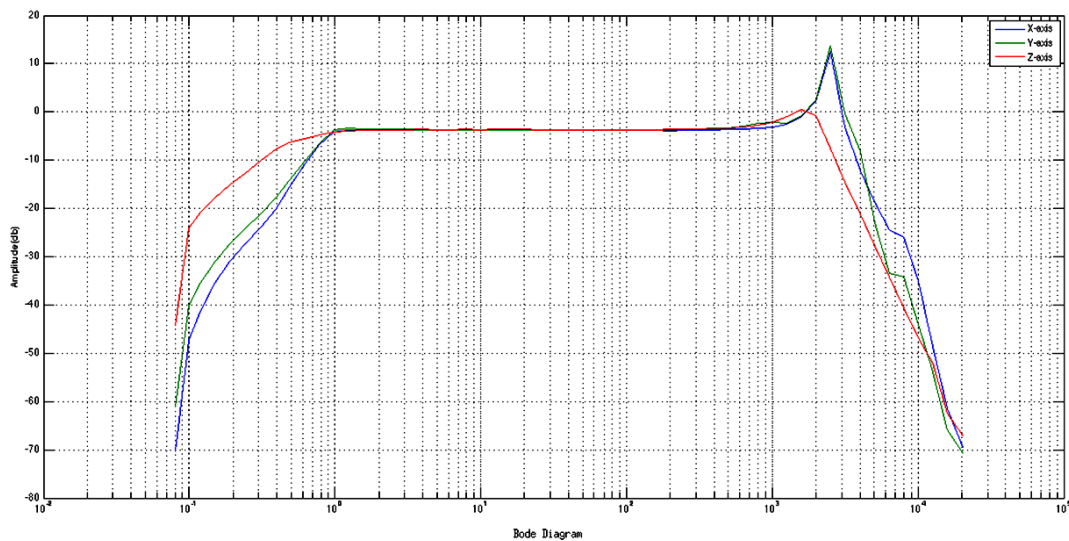
Ανεξάρτητα όμως από τα πολλά και σημαντικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου αισθητήρα, υπήρξε ένα ιδιαίτερο πρόβλημα που αφορούσε τις

παρεχόμενες πληροφορίες κατασκευής του. Αναλυτικότερα, δεν παρέχονταν στα δεδομένα του κατασκευαστή πληροφορίες σχετικά με την απόκριση συχνότητας του αισθητήρα, πέραν της πληροφορίας ότι το όριο λειτουργίας του αντιστοιχεί σε 1800Hz. Έπειτα από βιβλιογραφική έρευνα, κατέστη εφικτή η προσέγγιση των εξισώσεων της απόκρισης συχνότητας του αισθητήρα βάσει πειραματικών δεδομένων (Müller et al., 2011). Οι εξισώσεις υπολογίστηκαν με βάση τα σημεία θλάσης και τις κλίσεις του διαγράμματος απόκρισης από τα πειραματικά δεδομένα (Σχήμα 16). Στις εξισώσεις 3.7-3.9 περιγράφεται η απόκριση συχνότητας από κάθε συνιστώσα του αισθητήρα και στο Σχήμα 17 γίνεται γραφική απεικόνισή τους σε διαγράμματα πλάτους σε σύγκριση με τα πειραματικά δεδομένα.

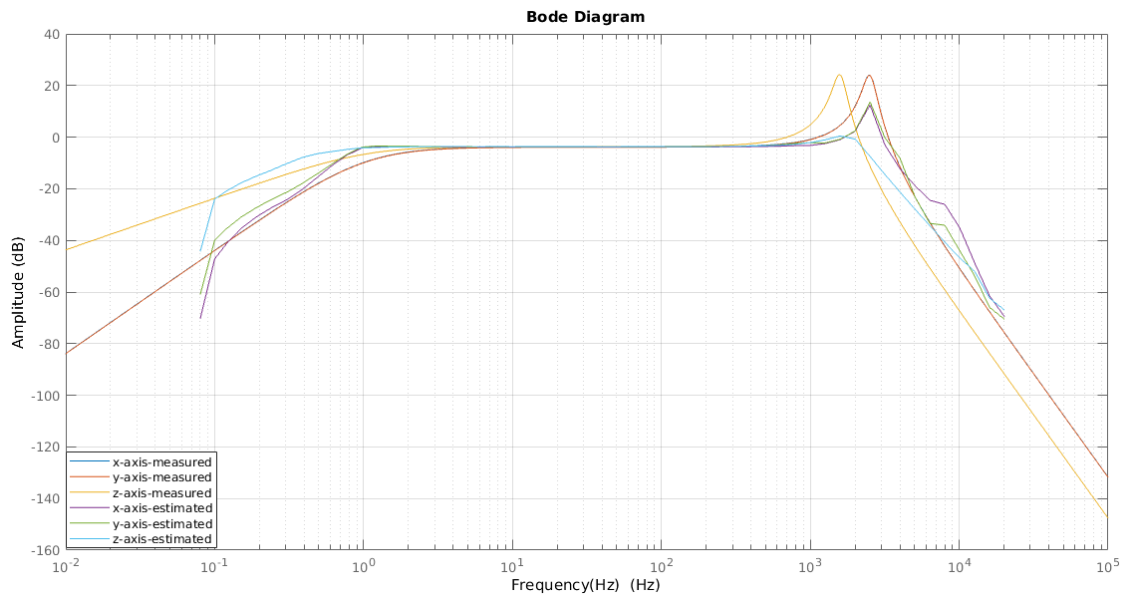
$$G_x(s) = \frac{4.048e16s^2}{s^6 + 6346s^5 + 5.114e08s^4 + 1.593e12s^3 + 6.28e16s^2 + 7.89e17s + 2.47e18} \quad (3.7)$$

$$G_y(s) = \frac{4.048e16s^2}{s^6 + 6346s^5 + 5.114e08s^4 + 1.593e12s^3 + 6.28e16s^2 + 7.89e17s + 2.47e18} \quad (3.8)$$

$$G_z(s) = \frac{6.493e15s}{s^5 + 3996s^4 + 2.03e08s^3 + 3.982e11s^2 + 9.896e15s + 6.215e16} \quad (3.9)$$



Σχήμα 16: Απόκριση συχνότητας από πειραματικά δεδομένα
Frequency response plot derived from experimental data



Σχήμα 17: Απόκριση συχνότητας από προσέγγιση
Frequency response plot derived by approximation

3.3.2 Μονάδα ψηφιοποίησης

Ο σταθμός χρησιμοποιεί αισθητήρες για να καταγράψει την εδαφική κίνηση. Οι αισθητήρες αυτοί, με την σειρά τους, διοχετεύουν τα εισερχόμενα σήματα στα επόμενα τμήματα του σταθμού, όπου και ακολουθεί η διαδικασία ψηφιοποίησης των σημάτων σε τρία βήματα:

Προετοιμασία Αναλογικού Σήματος (Analog Signal Preparation - ASP): Τα εισερχόμενα σήματα, πριν εισαχθούν στον αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα, ενισχύονται και φιλτράρονται από ένα κατωπερατό φίλτρο με χαμηλή εισαγωγή θορύβου στο σύστημα, ώστε να περιοριστεί η ποσότητα της πληροφορίας η οποία δεν μας ενδιαφέρει.

Μετατροπή από Αναλογικό σε Ψηφιακό σήμα (Analog to Digital Conversion - ADC): Στο επόμενο βήμα τα σήματα ψηφιοποιούνται με τη βοήθεια ενός 24-bit ADC.

Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος (Digital Signal Processing - DSP): Τα δεδομένα μετατρέπονται σε στάθμες και φορμάρονται σε πακέτα, τα οποία αποστέλλονται στη μονάδα επεξεργασίας για να εισαχθούν σαν δεδομένα στους αλγόριθμους διέγερσης που εκτελούνται εκεί. Στην συνέχεια, τα δεδομένα φορμάρονται σε πακέτα του πρότυπου mini-SEED και

αποστέλλονται σε κεντρικό διακομιστή, μέσω της υπηρεσίας Ringserver (Trabant, 2015), ο οποίος έχει ρόλο near real-time Seedlink Server.

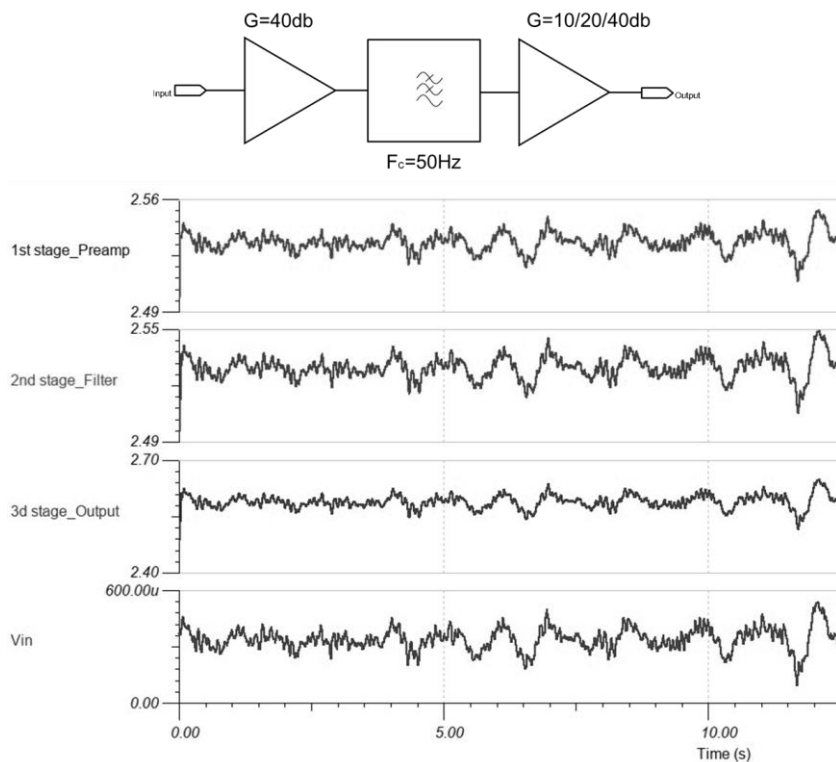
Η συγκεκριμένη συσκευή τροφοδοτείται είτε από μπαταρία +12V βαθιάς εκφόρτισης είτε μέσω μετασχηματιστή, και όχι απευθείας από το δίκτυο ηλεκτροδότησης, ενώ η δημιουργία των απαιτούμενων τάσεων (+3.3V, +5V, +12V) πραγματοποιείται μέσω ενός μικρού σε μέγεθος τροφοδοτικού υπολογιστή (ricoATX psu) με δυνατότητα παροχής ισχύος έως και 120W. Η επιλογή του συγκεκριμένου τροφοδοτικού έγινε με γνώμονα το μικρό του μέγεθος και την ικανότητα του να λειτουργεί χωρίς ψύξη. Ένα επιπλέον θετικό του συγκεκριμένου τροφοδοτικού είναι η τάση εισόδου που χρειάζεται για να λειτουργήσει, η οποία είναι +12VDC, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να τροφοδοτηθεί από μια μπαταρία βαθιάς εκφόρτισης.

Η μετάδοση των δεδομένων μεταξύ των διαφόρων υποσυστημάτων γίνεται μέσω συνδετήρων και καλωδιοταινίας, ενώ για την τροφοδοσία των κυκλωμάτων γίνεται χρήση βυσμάτων molex τεσσάρων επαφών που έχουν πλέον τυποποιηθεί στη χρήση τους σαν βύσματα τροφοδοσίας.

Όλα τα παθητικά εξαρτήματα έχουν επιλεγεί με γνώμονα το χαμηλό περιθώριο θορύβου. Για αυτό οι αντιστάσεις είναι μεταλλικού φιλμ με ακρίβεια 1%, και οι κεραμικοί πυκνωτές είναι τύπου NPO (negative-positive 0 ppm/°C). Κάθε ολοκληρωμένο φέρει ζεύγος κεραμικού πυκνωτή / πυκνωτή Τανταλίου για λόγους αποσύζευξης.

3.3.2.1 Προετοιμασία Αναλογικών Σημάτων – Analog Signal Preparation (A.S.P.)

Το αναλογικό σήμα που λαμβάνεται από τους αισθητήρες έχει αρχικά πολύ μικρό πλάτος, της τάξης των μV ή ακόμα και nV . Εκτός αυτού η πληροφορία που καταγράφεται από τους αισθητήρες περιέχει πολλές φορές και δεδομένα τα οποία δεν χρειάζεται να ψηφιοποιηθούν, καθώς δεν αντιστοιχούν σε κάποιο σημαντικό γεγονός, αλλά οφείλονται στην παρουσία ανεπιθύμητου θορύβου. Για τον λόγο αυτόν, προτού το αναλογικό σήμα περάσει από την υπομονάδα ψηφιοποίησης πρέπει πρώτα να ενισχυθεί και να απομακρυνθούν τα δεδομένα που αποτελούν προϊόντα θορύβου. Προκειμένου να επιτευχθούν τα παραπάνω χρειάστηκε να σχεδιαστεί ένα ειδικό κύκλωμα ενίσχυσης – φίλτρου, με βάση τις ανάγκες του συγκεκριμένου συστήματος. Όπως φαίνεται και στο μπλοκ - διάγραμμα (Σχήμα 18), το κύκλωμα αποτελείται από τρεις βαθμίδες (Α, Β, Γ):



**Σχήμα 18: Διάγραμμα βαθμίδων μονάδας προετοιμασίας αναλογικού σήματος
ASP unit sub-modules**

- Η βαθμίδα Α είναι σχεδιασμένη σε συνδεσμολογία προενισχυτή με χρήση ενισχυτή οργανολογίας (instrumentation amplifier). Πρόκειται για ολοκληρωμένα κυκλώματα διαφορικής εισόδου, με χαμηλό περιθώριο θορύβου στο συχνотικό εύρος που εμφανίζεται σεισμολογική πληροφορία. Έχει σταθερό κέρδος +40db.
- Η βαθμίδα Β αναλαμβάνει το φιλτράρισμα ανεπιθύμητων συχνοτήτων. Για τον λόγο αυτόν ενσωματώθηκε ένα κατωπερατό butterworth φίλτρο αντι - επικάλυψης (Anti - aliasing filter AAF) τέταρτης τάξης με $f_c=50\text{Hz}$.
- Η βαθμίδα Γ είναι ο τελικός ενισχυτής με μεταβλητό κέρδος +10, +20 ή +40db .

Ένα ακόμα σημείο που έπρεπε να μελετηθεί εκτενώς ήταν το κομμάτι της ακεραιότητας του σήματος. Το αναλογικό σήμα μπορεί να προσβληθεί από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές προερχόμενες από το εξωτερικό περιβάλλον, αλλά και από τον θόρυβο που παράγουν τα ολοκληρωμένα. Η ανάλυση και των δύο προβλημάτων ακολουθεί σε επόμενο κεφάλαιο. Όσον αναφορά τον θόρυβο που εισάγουν τα ολοκληρωμένα, τα κυκλώματα του φίλτρου και της ενίσχυσης θα πρέπει να εισάγουν στο αναλογικό σήμα τον λιγότερο δυνατό

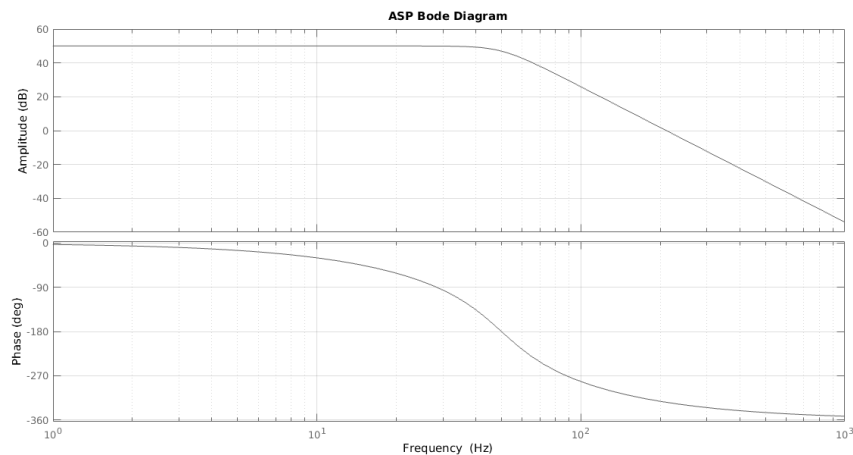
θόρυβο, προκειμένου να εξασφαλιστεί η ακεραιότητα του σήματος. Παρά το γεγονός ότι θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν τελεστικοί ενισχυτές τύπου CS3301A της Cirrus Logic, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για ενίσχυση γεωφώνων με εισαγωγή θορύβου $8.5nV/\sqrt{Hz}$, επιλέχθηκαν οι OPA27 και INA103 της Texas Instruments. Ο λόγος επιλογής τους είναι ότι πρόκειται για ολοκληρωμένα πολύ χαμηλού θορύβου, που συστήνονται για ενισχύσεις σε ευαίσθητα όργανα, μιας και εισάγουν μόνο $4.5nV/\sqrt{Hz}$ και $1.1nV/\sqrt{Hz}$, αντίστοιχα, στο σύστημα. Στον πίνακα 4 που ακολουθεί παρουσιάζονται συνοπτικά οι προδιαγραφές του ASP που σχεδιάστηκε.

Πίνακας 4: Οι προδιαγραφές του Συστήματος προετοιμασίας αναλογικού σήματος (ASP) ASP Specifications

Παράμετρος	Σύμβολο	Τιμή	Μονάδα
Κέρδος	G	50, 60, 80	db
Εύρος Συχνότητας φίλτρου	BW	50	Hz
Τάση τροφοδοσίας	V _{sup}	+12, +5 εξ. τροφοδοσία	V
Τάση εξόδου	V _{out}	0-5	V
Θερμοκρασία λειτουργίας	T	-40 έως +85	C°

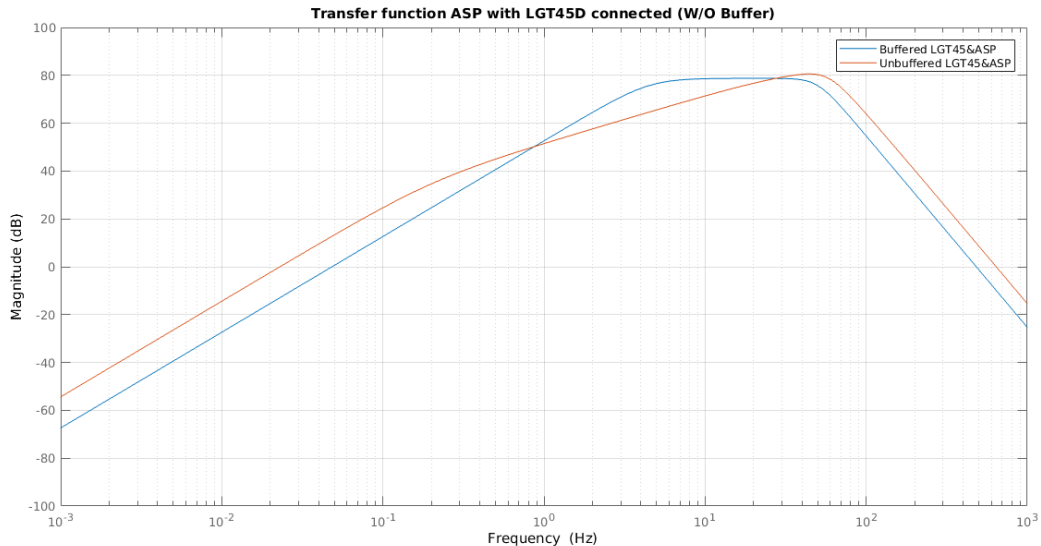
Η εξίσωση 3.10 αντιστοιχεί στη συνολική απόκριση συχνότητας του υποσυστήματος προετοιμασίας αναλογικού σήματος για δεδομένα ταχύτητας, ενώ στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται το αντίστοιχο διάγραμμα bode.

$$G(s) = \frac{2.932e12}{s^4 + 820.9s^3 + 3.37e05s^2 + 8.102e07s + 9.741e09} \quad (3.10)$$



**Σχήμα 19: Συνάρτηση μεταφοράς A.S.P.
ASP bode plot**

Συνδυάζοντας την εξίσωση 3.5 με την εξίσωση 3.10, προκύπτει η συνολική απόκριση του αισθητήρα σε συνδυασμό με το ASP, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 20. Οι 2 συναρτήσεις μεταφοράς προκύπτουν από την παρουσία ή όχι απομονωτή (buffer) σαν μονάδα εισόδου στο ASP.

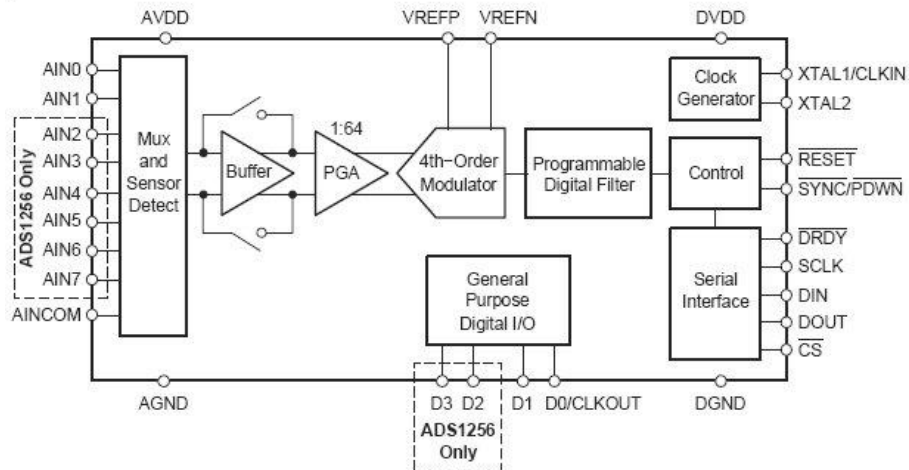


Σχήμα 20: Συνολική απόκριση
Overall response

3.3.2.2 Μετατροπές από αναλογικό σε ψηφιακό

Το επόμενο βήμα στην υλοποίηση της εργασίας είναι η ψηφιοποίηση των σημάτων σε στάθμες. Για αυτή τη λειτουργία επιλέχθηκε ένας μετατροπέας από αναλογικό σε ψηφιακό (Analog to Digital Converter – ADC) τύπου Σίγμα - Δέλτα. Η επιλογή έγινε με τη λογική ότι τα συγκεκριμένα ολοκληρωμένα αποτελούνται κυρίως από ψηφιακά ηλεκτρονικά, ενώ σαν κατηγορία κυκλωμάτων έχει αποδειχθεί ότι χαρακτηρίζονται από σταθερότητα και αξιοπιστία, τόσο στις μετρήσεις που λαμβάνουν, όσο και στην απρόσκοπτη λειτουργία τους. Ένα επιπλέον βασικό πλεονέκτημα τους είναι η απουσία προσαρμοστικών κυκλωμάτων, όπως για παράδειγμα τα κυκλώματα δειγματοληψίας και συγκράτησης (sample and hold). Εκτός αυτών, η μονάδα προετοιμασίας αναλογικού σήματος δεν χρειάζεται να έχει κάποιο ιδιαίτερα ισχυρό φίλτρο, καθώς διαθέτουν ψηφιακό φίλτρο. Συνοψίζοντας, η διαδικασία ψηφιοποίησης με χρήση μετατροπέα τύπου Σίγμα - Δέλτα συνεισφέρει ιδιαίτερα στο σύστημα, αφού δεν απαιτεί επιπλέον κυκλώματα και όγκο, ενώ διατηρεί το κόστος υλοποίησης σε χαμηλά επίπεδα.

Αναλυτικότερα, επιλέχθηκε ο μετατροπέας ADS1256EVM της εταιρίας Texas Instruments, δεδομένου ότι χρησιμοποιείται ήδη στο καταγραφικό CD24x της εταιρίας Güralp (Güralp, 2016). Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο Σχήμα 21, ο συγκεκριμένος μετατροπέας μπορεί να ψηφιοποιήσει 8 πηγές εισόδου. Ο έλεγχος της συσκευής πραγματοποιείται μέσω πρωτοκόλλων SPI και I²C, καθώς και GPIO ακίδων για τη ρύθμιση επιπλέον επιλογών.



Σχήμα 21: Μπλοκ διάγραμμα σχηματικής απεικόνισης του μετατροπέα ADS1256 (TexasInst., 2013)
ADS1256 block diagram

Τα δύο βασικά τμήματα λειτουργίας του μετατροπέα ADS1256 είναι:

- Ο Σίγμα - Δέλτα διαμορφωτής (sigma-delta modulator SDM) και
- Το Ψηφιακό φίλτρο

Ο διαμορφωτής Σίγμα - Δέλτα λειτουργεί ως μετατροπέας τάσης σε συχνότητα, επιτελώντας την κβαντοποίηση του αναλογικού σήματος. Η λειτουργία του βασίζεται στην υπερδειγματοληψία του σήματος, ώστε να αυξηθεί η διακριτική ικανότητα του μετατροπέα. Ο διαμορφωτής παρέχει στην έξοδό του μια παλμοσειρά από λογικά “1” και “0” με περίοδο $\tau = 1/f_q$, όπου f_q είναι η συχνότητα υπερδειγματοληψίας (oversampling frequency).

Το ψηφιακό φίλτρο του διαμορφωτή Σίγμα - Δέλτα επιτελεί τη μετατροπή της παλμοσειράς εξόδου του σε ψηφιακές λέξεις των n bits. Με βάση τον αριθμό των ωφέλιμων ψηφίων (effective number of bits - ENOB), ο οποίος προκύπτει από την εξίσωση 3.11, αφαιρούνται από τα n bits τα δεδομένα που δεν παρέχουν χρήσιμη πληροφορία. Επιλύοντας την εξίσωση 3.11 για εκατό δείγματα ανά δευτερόλεπτο, προκύπτουν 23.4 ωφέλιμα bits.

$$ENOB = \frac{\ln\left(\frac{Full_{scale_{range}}}{RMS_{noise}}\right)}{\ln 2} \quad (3.11)$$

Το προγραμματιζόμενο κατωπερατό ψηφιακό φίλτρο λαμβάνει την έξοδο του διαμορφωτή Σίγμα - Δέλτα και παράγει ψηφιακή έξοδο. Το φίλτρο αποτελείται από δύο τμήματα: ένα σταθερό φίλτρο που ακολουθείται από ένα προγραμματιζόμενο φίλτρο. Το σταθερό φίλτρο είναι ένα φίλτρο sinc 5^{ης} τάξης. Το προγραμματιζόμενο φίλτρο είναι ένα φίλτρο κυλιόμενου μέσου με τον αριθμό των μέσων όρων των τιμών να καθορίζονται από την τιμή του καταχωρητή DRATE. Η συνολική συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου δίνεται από την εξίσωση 3.12.

$$|H(f)| = |H_{sinc^5}(f)| \cdot |H_{averager}(f)|$$

$$= \left| \frac{\sin\left(\frac{256\pi \cdot f}{f_{clk_{in}}}\right)}{64 \cdot \sin\left(\frac{4\pi \cdot f}{f_{clk_{in}}}\right)} \right|^5 \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{256\pi \cdot Num_{Ave} \cdot f}{f_{clk_{in}}}\right)}{Num_{Ave} \cdot \sin\left(\frac{256\pi \cdot f}{f_{clk_{in}}}\right)} \right| \quad (3.12)$$

Ο μετατροπέας ADS1256EVM μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δύο τρόπους λειτουργίας: είτε με διαφορική είσοδο (differential input), όπου μετριέται και ψηφιοποιείται το σήμα εισόδου με την εξίσωση $V_{out} = AIN_p - AIN_n$, είτε με μοναδικά τερματισμένη είσοδο (single ended input), όπου εκεί μετριέται η διαφορά $AIN_p - AIN_{com}$ σε σχέση με την τάση αναφοράς. Ο σχεδιασμός του μετατροπέα που επιλέχθηκε ορίζει μοναδικά τερματισμένες εισόδους και τάση αναφοράς τα +2.5V. Συνεπώς, μπορεί να αναπαραστήσει 2²³ στάθμες σε παράσταση προσημασμένου ως προς 2, έχοντας για τάση τροφοδοσίας τα 5V, και με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.13α, όπου α, β σταθερές και OFC, FSC οι τιμές που έχουν οι αντίστοιχοι καταχωρητές, η κάθε στάθμη υπολογίζεται σε 596nV. Επιπλέον, έχοντας έναν ενισχυτή με κέρδος 50db και χρησιμοποιώντας την εξίσωση 3.14, μπορεί να βρεθεί η τάση εισόδου ενός σεισμολογικού σήματος εντός της γραμμικής περιοχής του ενισχυτή που θα αντιστοιχεί σε 1bit πληροφορίας στην έξοδο του ADC και προκύπτει 596nV. Γνωρίζοντας την ευαισθησία του γεώφωνου που είναι προσαρτημένο στο σύστημα, όπως προαναφέρθηκε (Πίνακας 2), και με τη βοήθεια της εξίσωσης 3.15, προκύπτει η ευαισθησία αντίληψης κίνησης υπολογιζόμενη σε 65.44 pm/s.

$$Code_{ADC} = \begin{cases} \frac{2 * V_{REF}}{(2^{23} - 1) * PGA} \Rightarrow Sensitivity_{ADC}(V_{REF} = 2.5V, PGA = 1) = 596nV(\alpha) \\ \left(\frac{V * PGA}{2V_{ref}} - \frac{OFC}{\alpha} \right) * FSC \cdot \beta(\beta) \end{cases} \quad (3.13)$$

$$Sensitivity_{ASP} = \frac{Sensitivity_{ADC}}{Gain_{linear}} = \frac{596nV}{10^{50/20}} = 1.885nV \quad (3.14)$$

$$Sensitivity_{Geophone} = \frac{Sensitivity_{ASP}}{GeophoneVoltageSensitivity} = \frac{1.885nV}{28.8V/m/s} \quad (3.15)$$

$$\Rightarrow Sensitivity_{Geophone} = 65.44 \mu m/s$$

Σχετικά με το επιταχυνσιόμετρο που χρησιμοποιείται, το οποίο φέρει ενσωματωμένο ενισχυτή, και με χρήση της εξίσωσης 3.16, προκύπτει η ευαισθησία του οργάνου για $\pm 2g$ ίση με $666mV/g$. Συνεπώς 1bit πληροφορίας στην έξοδο του ADC αντιστοιχεί σε $8.86\mu m/s^2$.

$$Sensitivity_{Accelerometer} = \frac{V_{cc}}{5} = 666 mV/g = 67 mV/m/s^2 \quad (3.16)$$

Τέλος, η επικοινωνία από και προς τον ADS1256 γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου SPI, μέσω του οποίου αποστέλλονται οι δεκαπέντε εντολές που παραμετροποιούν, διαβάζουν και γράφουν πάνω στους δέκα καταχωρητές της συσκευής. Όλες οι εντολές είναι 8bit, πλην των εντολών ανάγνωσης και εγγραφής καταχωρητή οι οποίες είναι 16bit, ως άθροισμα των 8bit της εντολής και των 8bit της διεύθυνσης στην οποία αυτή απευθύνεται. Προκειμένου να συνδεθεί ο ADS1256 με την μονάδα προ-επεξεργασίας, ώστε να τροφοδοτηθεί από τις απαιτούμενες τάσεις και να λάβει τα σήματα από το ASP, σχεδιάστηκε ένας απλός προσαρμογέας για επίλυση του προβλήματος.

3.3.2.3 Προεπεξεργασία σήματος

Στο τμήμα της προεπεξεργασίας γίνεται αρχικοποίηση, έλεγχος και παραμετροποίηση του αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα. Στη συνέχεια, αφού γίνουν οι επιθυμητές ρυθμίσεις, ξεκινάει η συλλογή δεδομένων από τους αισθητήρες και τυποποιούνται σε πακέτα, ώστε να αποστέλλονται μέσω πρωτοκόλλου UART στο τμήμα επεξεργασίας σήματος. Η μορφή του πακέτου που αποστέλλεται απεικονίζεται στον πίνακα 5. Τα πεδία χωρίζονται με τον χαρακτήρα του κενού (0x20). Τα έξι πρώτα πεδία του πακέτου είναι δεδομένα

προερχόμενα από τους αισθητήρες του συστήματος, ενώ τα υπόλοιπα τελευταία είναι πληροφορίες σχετικές με την τιμή που έχει η κύρια τάση τροφοδοσίας του συστήματος και με τη θερμοκρασία χώρου στη συσκευασία που περικλείει τα κυκλώματα. Παρατηρώντας τα δεδομένα που εμπεριέχονται στο πακέτο, το μεγαλύτερο μέγεθος πακέτου είναι 75 χαρακτήρες. Συνεπώς το baud rate της σειριακής ζεύξης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερο από $75 * 10 * 100 = 75000\text{bps}$. Η σειριακή επικοινωνία είναι μια επικοινωνία χωρίς ασφάλεια αποστολής. Για αυτόν τον λόγο, αν “χαθεί” κάποιος χαρακτήρας, τα δεδομένα των πακέτων θα αρχίσουν να μπλέκονται. Λάθη στην σειριακή επικοινωνία είναι συχνά. Πιο συγκεκριμένα, στον μικροελεγκτή MSP432 στα 115200Baud ο κατασκευαστής ορίζει ένα ποσοστό σφάλματος $\pm 0.3\%$. Εάν για παράδειγμα στην παρακάτω ακολουθία πακέτων χαθεί ένας χαρακτήρας του πακέτου, δύο τιμές θα συνενωθούν σε μία, με αποτέλεσμα να υπάρχουν απώλειες δεδομένων.

```
Original: -6168 -6240 -2060 -3159 16802 663 8038141 484576549 0
Encoded: -6168 -6240 -2060 -3159 16802 663 8038141 484576549 0ϕ-άBëΥ[ΌXê
Corrupted: -6168 -6240 -2060 -3159 16802 663 8038141484576549 0ϕ-άBëΥ[ΌXê
Repaired: -6168 -6240 -2060 -3159 16802 663 8038141 484576549 0
```

Για τον λόγο αυτόν, κρίθηκε αναγκαία η εγκατάσταση ενός κώδικα προστασίας και επιδιόρθωσης σφαλμάτων. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος επιδιόρθωσης Reed-Solomon. Ο αριθμός των Bytes διόρθωσης επιτρέπει τη διόρθωση των μισών σφαλμάτων που προκύπτουν. Θεωρητικά, για την επίλυση όλων των σφαλμάτων στο πακέτο (75bytes πληροφορίας), απαιτείται η χρήση 150 διορθωτικών bytes.

Πίνακας 5: Τυποποίηση πακέτου προς αποστολή για επεξεργασία.

Packet containing data from digitizing module

Δεδομένα	X _{acc}	Y _{acc}	Z _{acc}	X _{geo}	Y _{geo}	Z _{geo}	V	C °	Status	Bytes συμπλήρωσης	ECC bytes	
Length	1 - 9 (τιμή: 0- ±8388608)								1 (τιμή: -1 - 2)	Μεταβλητού μεγέθους	10	
bytes	18-75								85		57-0	10

Προκειμένου να πραγματοποιηθούν όλες οι παραπάνω διεργασίες, χρησιμοποιείται η πλακέτα Stellaris LaunchPad MSP432, εξοπλισμένη με επεξεργαστή χρονισμένο στα 48MHz, ενώ έχει βιομηχανικά πρότυπα ανοχής στη θερμοκρασία (-40 - 85 °C). Η πλακέτα διαθέτει αποθηκευτικό χώρο 256KB

τύπου flash και 64 KB RAM. Η υπεύθυνη εφαρμογή για τη ρύθμιση και την εξαγωγή των δεδομένων από τη μονάδα μετατροπής από αναλογικό σε ψηφιακό, είναι γραμμένη στο περιβάλλον ανοιχτού κώδικα EnergiaIDE, ένα περιβάλλον που παρέχει ευκολία στη συγγραφή του κώδικα. Επιπλέον, για την αφαίρεση σφαλμάτων από τον κώδικα που αφορά το πρωτόκολλο SPI, χρησιμοποιήθηκε λογικός αναλυτής προκειμένου να ελεγχθεί εάν οι παλμοσειρές του SPI αποστέλλονται σωστά. Τέλος, για την τεκμηρίωση του κώδικα χρησιμοποιήθηκε η εφαρμογή Doxygen, προκειμένου να δημιουργηθεί το ηλεκτρονικό εγχειρίδιο της εφαρμογής.

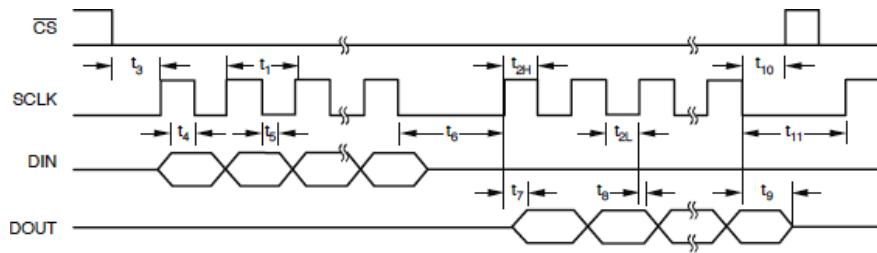
Ο κύριος κορμός του κώδικα αναφέρεται στην παραμετροποίηση της συσκευής, στον έλεγχο των bit των καταχωρητών, καθώς και στην τυποποίηση των δεδομένων εξόδου. Στον πίνακα 6 παρουσιάζονται συνοπτικά οι ρυθμίσεις της συσκευής. Κατά την εκτέλεση του κώδικα πραγματοποιούνται τα εξής:

- επιλέγεται ο ρυθμός επικοινωνίας μεταξύ μονάδας προεπεξεργασίας και του ADC,
- ενεργοποιείται η σειριακή μετάδοση δεδομένων προς το τμήμα επεξεργασίας των σημάτων,
- επιλέγεται η σειρά αποστολής των δεδομένων (endianness) και
- επιλέγεται ο συντελεστής ενίσχυσης που παρέχει ο ενσωματωμένος ενισχυτής της συσκευής.

Πίνακας 6: Συνοπτικές ρυθμίσεις της μονάδας ψηφιοποίησης. Digitizer default settings

Ταχύτητα SPI Διαύλου	1.00MHz
Ταχύτητα σειριακής επικοινωνίας	115200bps
Εσωτερικός απομονωτής	Απενεργοποιημένο
Σημαντικότερο ψηφίο (Endianness)	Πρώτα το MSB
Προγραμματιζόμενο κέρδος	X1
Ρυθμός δειγματοληψίας	1000 sps /8Channels 837Hz (104.65Hz/channel)
Τύπος εισόδου	Απλά τερματισμένα
Mux channel cycling	Ch0 -Ch7 (Απλά τερματισμένα)

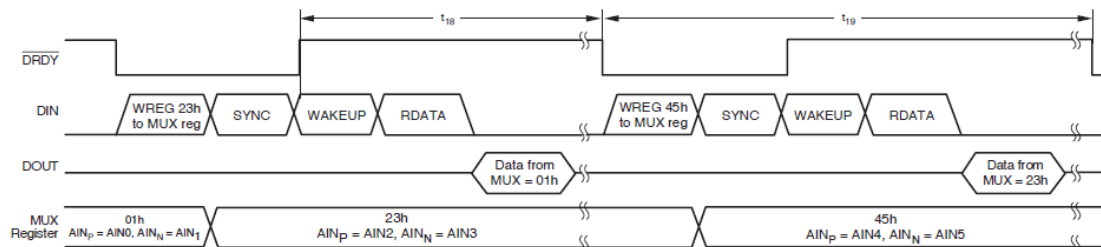
Ένα βασικό πρόβλημα που συναντήθηκε ήταν ο ιδιόρρυθμος χρονισμός καθυστερήσεων που απαιτούνταν για την αποθήκευση των ρυθμίσεων και την ανάκτηση δεδομένων. Στο Σχήμα 22 παρουσιάζεται ο συνοπτικός πίνακας χρονισμού του ADS1256. Στην επίλυση αυτού του προβλήματος βοήθησε σημαντικά η χρήση του λογικού αναλυτή.



Σχήμα 22: Συνοπτικός πίνακας χρονισμού της SPI διεπαφής του ADS1256
ADS1256 SPI timing

Εφόσον έχει γίνει σωστά η παραμετροποίηση των καταχωρητών και των επιθυμητών ρυθμίσεων για τη μετατροπή των σημάτων, ακολουθεί η λήψη των δεδομένων από τα κανάλια εισόδου. Ένα σημείο που πρέπει να αποσαφηνιστεί, είναι ότι ο μετατροπέας που χρησιμοποιήθηκε δεν φέρει 8 αναλογικούς σε ψηφιακό μετατροπείς, όπως γίνεται σε άλλα ολοκληρωμένα, αλλά φέρει έναν πολυπλέκτη 8 καναλιών, μέσω του οποίου μπορεί να γίνει η επιλογή και η ανάγνωση από οποιοδήποτε συνδυασμό καναλιών επιλέγει ο χρήστης. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής:

Όταν η ακίδα DRDY πέσει σε λογικό επίπεδο «0», υποδεικνύει ότι δεδομένα είναι έτοιμα προς ανάκτηση. Προκειμένου λοιπόν να γίνει εναλλαγή μεταξύ των καναλιών του ADS1256, χρειάζεται να ακολουθηθούν με τη σειρά οι παρακάτω εντολές, οι οποίες απεικονίζονται και στο διάγραμμα χρονισμού (Σχήμα 23).



Σχήμα 23: Εναλλαγή καναλιών στον μετατροπέα ADS1256
ADS1256 effective input cycling

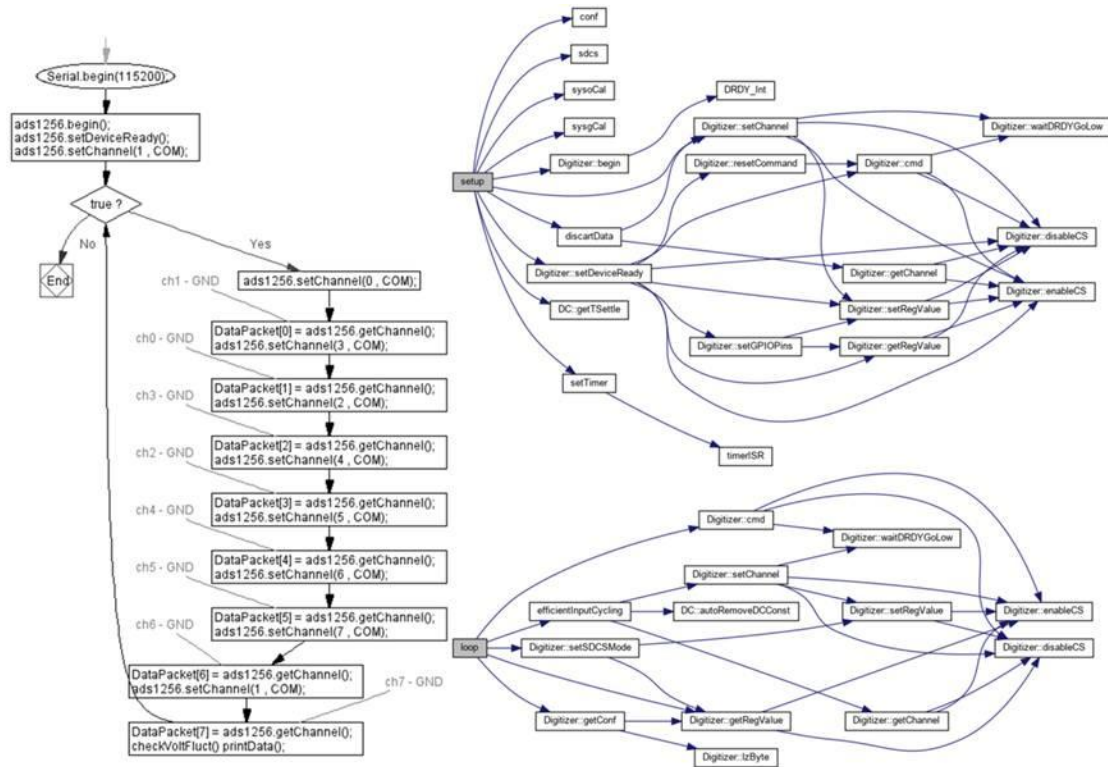
- Εγγραφή στον καταχωρητή MUX σχετικά με το ποιο κανάλι θεωρείται η θετική είσοδος AIN_P και ποιο η αρνητική AIN_N .
- Επανεκκίνηση της διαδικασίας μετατροπής, χρησιμοποιώντας τις εντολές SYNC και WAKEUP.
- Ανάκτηση των δεδομένων της προηγούμενης μετατροπής, με χρήση της εντολής RDATA.

- Μόλις τελειώσει η ανάκτηση των δεδομένων που προέρχονται από τα οκτώ κανάλια του μετατροπέα, αυτά αποστέλλονται μέσω της σειριακής θύρας στο τμήμα επεξεργασίας σήματος.

Τέλος, πρέπει να αναφερθεί μια ακόμη λειτουργία που έχει υλοποιηθεί, η οποία ελέγχει την κατάσταση του αισθητήρα, με την οποία το ADS1256 μπορεί να εντοπίσει εύκολα έναν λειτουργικό αισθητήρα σε σχέση με ένα βραχυκυκλωμένο. Η συγκεκριμένη διαδικασία γίνεται μέσω του αρθρώματος ανίχνευσης πηγών ρεύματος αισθητήρων (sensor detect current sources - SDCS). Όταν ενεργοποιηθεί, μπορεί να διοχετεύσει στον αισθητήρα, μέσω του πολυπλέκτη, ρεύμα της τάξης των 0.5μΑ, 2μΑ ή 10μΑ, ενώ ενεργοποιεί τον απομονωτή του κυκλώματος για λόγους ασφαλείας. Ένας λειτουργικό αισθητήρας θα δημιουργήσει ένα χαμηλό σήμα εξόδου σε αντίθεση με αυτό που δυσλειτουργεί. Ο έλεγχος της συγκεκριμένης λειτουργίας μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά τη λειτουργία της συσκευής με το πάτημα του πλήκτρου 2, το οποίο είναι προσαρτημένο πάνω στην πλακέτα του Launchpad. Πραγματοποιούνται οι απαραίτητες ρυθμίσεις προκειμένου να γίνει η μέτρηση των αισθητήρων. Μόλις πραγματοποιηθεί η μέτρηση, επανέρχονται οι ρυθμίσεις στην προηγούμενη επιλογή και συνεχίζεται κανονικά η λειτουργία του κώδικα.

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 24, Κατά την εκκίνηση της συσκευής εκτελείται η `setup()`, η οποία αρχικοποιεί την συσκευή και την επικοινωνία μεταξύ του launchpad με το τμήμα επεξεργασίας σήματος αλλά και με το ADS1256EVM. Αφού γίνει η αρχικοποίηση της συσκευής ο μικροελεγκτής θέτει το πρώτο κανάλι προς μετατροπή στους καταχωρητές του ADS1256. Μόλις τερματίσει η συνάρτηση `setup`, καλείται σε ατέρμονα βρόγχο η συνάρτηση `loop()`, μέσω της οποίας γίνεται η ανάγνωση και η τυποποίηση και αποστολή των δεδομένων από την μονάδα ψηφιοποίησης, προς το τμήμα επεξεργασίας δεδομένων. η μετατροπή των καναλιών γίνεται κυκλικά ως εξής: Ψηφιοποίηση καναλιού_{*n*} – Λήψη δεδομένων καναλιού_{*n-1*}. Σε περίπτωση που ο χρήστης πιέσει το πλήκτρο 1, που βρίσκεται ενσωματωμένο πάνω στο launchpad, αλλάζει λειτουργία η συνάρτηση `loop()` και επιστρέφονται οι τιμές των καταχωρητών του ADS1256, ενώ πατώντας το πλήκτρο 2, καλείται η διαδικασία SDCS για τον έλεγχο της λειτουργίας των αισθητηρίων. Παρατηρώντας το Σχήμα 70, πιέζοντας τα 2 κουμπιά του καταγραφικού το ADS1256 μπαίνει σε λειτουργία βαθμονόμησης συστήματος, που προϋποθέτει ο χρήστης να εφαρμόσει τάση

0V για την αντισταθμιστική βαθμονόμηση και +5V για την διαδικασία βαθμονόμησης κέρδους. Οι δύο τελευταίες ενέργειες δεν κρίνονται απαραίτητες αφού με την εκκίνηση του μετατροπέα γίνεται αυτόματα διαδικασία βαθμονόμησης.



Σχήμα 24: Μπλοκ διάγραμμα λειτουργίας μονάδας προεπεξεργασίας
Block diagram of pre-processing operation

3.3.3 Τμήμα επεξεργασίας σήματος

Για την επεξεργασία των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η πλακέτα Wandboard quad, μια αναπτυξιακή πλακέτα εφοδιασμένη με τον πολυπύρρηνο επεξεργαστή i.MX6 της εταιρίας NXP, ο οποίος κατά τον κατασκευαστή είναι βαθμονομημένος για βιομηχανική χρήση με κύκλο ζωής 10-15 έτη (NXP, 07/2015). Επιπλέον, η πλακέτα φέρει μεγάλη μνήμη και διάφορες μεθόδους επικοινωνίας. Τα χαρακτηριστικά της εμφανίζονται αναλυτικότερα στον πίνακα 7 που ακολουθεί:

Πίνακας 7: Προδιαγραφές της πλακέτας Wandboard.

Wandboard Specifications

Προδιαγραφές αναπτυξιακής πλακέτας WandBoard	
Επεξεργαστής	NXP i.MX6 Quad, 1.2GHz, τέσσερις πυρήνες
Μνήμη	2GB DDR3, 1600Hz
Αποθηκευτικός Χώρος	16GB SD card, Συμβατή με διεπαφή SATA
Συνδεσιμότητα	I2C, SPI, UART, GPIO pins
Δίκτυο	1Gb Ethernet + Wi-Fi 802.11 b/g/n (BCM4329) + Bluetooth
Τροφοδοσία	5V 2A

Στον αποθηκευτικό χώρο του κυκλώματος εγκαταστάθηκε το λειτουργικό σύστημα Ubuntu 16.04, προκειμένου να μπορέσει να φιλοξενήσει την εφαρμογή και τις βιβλιοθήκες οι οποίες είναι απαραίτητες για την ομαλή λειτουργία της εφαρμογής και την επικοινωνία του με τον εξυπηρετητή.

3.3.3.1 Ανάλυση εφαρμογής

Η εφαρμογή E.A.SYplot είναι γραμμένη εξολοκλήρου στην γλώσσα Processing 2.2.1. Η συγκεκριμένη γλώσσα αναπτύχθηκε από εργαστήριο του MIT και χρησιμοποιείται κατά κόρον στην ανάπτυξη εφαρμογών επικοινωνίας με ενσωματωμένες συσκευές. Στα πλεονεκτήματα της περιλαμβάνονται η δημιουργία εφαρμογών οι οποίες είναι ανεξάρτητες πλατφόρμας (cross-platform), αλλά και η συμβατότητά της σε ποσοστό 100% με κώδικα και βιβλιοθήκες της γλώσσας Java. Η ζεύξη μεταξύ μονάδας προεπεξεργασίας και Wandboard γίνεται μέσω του πρωτοκόλλου UART, ενώ για τον χειρισμό της μονάδας ελέγχου τάσης χρησιμοποιούνται οι υποδοχές GPIO (General Purpose Input / Output). Η συγκεκριμένη εφαρμογή έχει δυνατότητα:

- Σειριακής ζεύξης με δύο συσκευές, μία μονάδα προεπεξεργασίας και μία μονάδα επικοινωνίας συμβατή με το πρωτόκολλο Zigbee.
- Ενημέρωσης της λίστας των εντός εμβέλειας σταθμών και τελικών συσκευών μέσω της χρήσης της εντολής εξερεύνησης η οποία είναι διαθέσιμη από το API του XBee.
- Αποστολής αλφαριθμητικών μηνυμάτων, αλλά και απευθείας ελέγχου των GPIO ακροδεκτών στους εντός εμβέλειας σταθμούς και τελικές συσκευές μέσω του XBee.
- Λήψης αρχείου ρυθμίσεων μέσω διαδικτυακής εφαρμογής, εγκατεστημένης στον κεντρικό εξυπηρετητή.

- Ρύθμισης λογαριασμού σε εξυπηρετητή smtp για την αποστολή e-mail προειδοποίησης.
- Προβολής γραφημάτων πραγματικού χρόνου για δεδομένα επιτάχυνσης, ταχύτητας, μετατόπισης και του επιλεγμένου αλγόριθμου διέγερσης στις τρεις συνιστώσες (NS,EW,Z). Τα συγκεκριμένα διαγράμματα έχουν δυνατότητα δυναμικής αναπροσαρμογής του πλάτους του διαγράμματος, ενώ χρονικά μπορούν να αναπαραστήσουν δεδομένα 15 λεπτών. Τα αναπαριστώμενα δεδομένα ολισθαίνουν προς τα αριστερά, μετατοπίζοντας τις προηγούμενες χρονικές στιγμές. Παράλληλα στις καρτέλες της επιτάχυνσης της ταχύτητας και της μετατόπισης, σημειώνονται οι μέγιστες τιμές από τα αντίστοιχα μεγέθη. Σε περίπτωση που εκδηλώνεται σεισμικό γεγονός, ο χρωματισμός αυτών των τιμών αλλάζει για να είναι ευκολότερα αντιληπτό από τον χειριστή.
- Προβολής γραφημάτων FFT πραγματικού χρόνου για τα δεδομένα επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης. Η συγκεκριμένη υπηρεσία χρησιμοποιεί τη βιβλιοθήκη ήχου Minim. Η συγκεκριμένη βιβλιοθήκη βασίζεται στο API JavaSound. Για τον λόγο αυτόν τα δεδομένα έπρεπε να τυποποιηθούν με τρόπο κατάλληλο, ώστε να μπορούν να θεωρηθούν δεδομένα ήχου, ώστε να επεξεργαστούν από τη βιβλιοθήκη. Το φασματογράφημα βασίζεται σε μια υλοποίηση ανοιχτού κώδικα που παρέχει το πανεπιστήμιο Columbia για την επεξεργασία ήχου (Ellis, 2010).
- Παρακολούθησης κατωφλίων θερμοκρασίας και τάσης (σε όσα λειτουργικά συστήματα υποστηρίζουν I/O επικοινωνία με GPIO). Επιπλέον, κάνοντας χρήση των GPIO ακίδων του Wandboard, γίνεται ενημέρωση του σταθμού για προστασία από βυθίσεις και υπερτάσεις. Τέλος, ανά τακτά χρονικά διαστήματα, η εφαρμογή μέσω των GPIO ακροδεκτών, στέλνει προς το κύκλωμα του WDT (Watch Dog Timer) έναν παλμό προκειμένου να τον ενημερώσει για την ορθή λειτουργία του λογισμικού. Στην περίπτωση που ο WDT δεν λάβει σήμα αναβολής, θεωρεί ότι κάποιο σφάλμα έχει επέλθει στο λογισμικό και επανεκκινεί το σύστημα.
- Μεταβολής των τιμών των κατωφλίων από/διέγερσης και των παραθύρων STA και LTA στους αλγόριθμους διέγερσης.
- Εμφάνισης χάρτη στον οποίο είναι εγκατεστημένοι όλοι οι σταθμοί του συστήματος, με τη χρήση της βιβλιοθήκης UnfoldingMaps που

υποστηρίζει πληθώρα υπηρεσιών χαρτογράφησης, όπως για παράδειγμα Google Maps, Open Street Maps, Microsoft Maps και ESRI. Τα δεδομένα των σταθμών λαμβάνονται ύστερα από σχετικό αίτημα της εφαρμογής στη βάση δεδομένων (B.Δ.) που βρίσκεται εγκατεστημένη στον κεντρικό εξυπηρετητή του συστήματος. Γύρω τους είναι σχεδιασμένη η θεωρητική μέγιστη εμβέλεια κάλυψης αυτών, ενώ ανάλογα με την περιοχή εγκατάστασης φέρουν διαφορετικό χρώμα για εύκολο διαχωρισμό. Σε περίπτωση που ο σταθμός καταγράψει σεισμικό γεγονός, γίνεται ενημέρωση της B.Δ. και όσοι σταθμοί κατέγραψαν το γεγονός φέρουν διαφορετικό χρωματισμό στον χάρτη από το φυσιολογικό τους, προκειμένου να είναι εύκολος ο εντοπισμός των διεγερμένων σταθμών. Με τη λήξη του σεισμικού γεγονότος, οι χρωματισμοί των σταθμών επανέρχονται στο φυσιολογικό τους.

- Διασύνδεσης της εφαρμογής με διαδικτυακή εφαρμογή στον εξυπηρετητή, η οποία εισάγει τα στοιχεία του νέου σταθμού στη B.Δ. και δημιουργεί τα αρχεία ρυθμίσεων για κάθε σταθμό.
- Δημιουργίας και αποθήκευσης αρχικών και μη επεξεργασμένων δεδομένων στο δίσκο.
- Δημιουργίας και αποθήκευσης αρχείων κωδικοποίησης .mseed για κάθε κανάλι που φέρει σεισμικό αισθητήρα.
- Διασύνδεσης της εφαρμογής με την υπηρεσία IRIS Ringserver, η οποία εκτελεί χρέη near real time Seedlink server.
- Εμφάνισης διαγνωστικών μηνυμάτων και βοήθειας σε ενσωματωμένη κονσόλα, αλλά και δυνατότητα επιμέρους διαγνωστικού ελέγχου κάθε υπό-τμήματος της εφαρμογής.
- Για το φιλτράρισμα των δεδομένων χρησιμοποιήθηκαν δυναμικά παραμετροποιημένα Φίλτρα IIR (Infinite Impulse Response), λόγω του ότι είναι πιο οικονομικά στην κατανάλωση πόρων σε σχέση με τα FIR (Finite Impulse Response) φίλτρα.
- Η δομή των καταλόγων της εφαρμογής περιγράφεται στο Παράρτημα-II (Πίνακας 34).
- Το γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής περιγράφεται στα σχήματα 79-85 και στους πίνακες 30 - 31 του Παράρτηματος-II. Οι απαιτήσεις της εφαρμογής περιγράφονται στον πίνακα 32.

- Λειτουργία διεπαφής κονσόλας (command-line interface - CLI), κατά την οποία η εφαρμογή εκκινεί, αφού πρώτα δεχθεί ορισμένα ορίσματα από τον χρήστη. Η CLI εφαρμογή έχει τις ίδιες λειτουργίες που παραθέτονται και στην εφαρμογή που φέρει γραφικό περιβάλλον. Η συγκεκριμένη λειτουργία κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμη, αφού υπάρχει πλήρης λειτουργικότητα της εφαρμογής απουσία γραφικού περιβάλλοντος και περιφερικών (οθόνη). Η αποστολή εντολών προς την εφαρμογή μπορεί να γίνει απευθείας από τη γραμμή εντολών αν εκτελείται σαν απλή εφαρμογή, είτε μέσω ενός TCP socket στην πόρτα 22212 αν εκτελείται ως υπηρεσία του συστήματος. Το σύνολο των εντολών της εφαρμογής είναι διαθέσιμο στο Παράρτημα-II (Πίνακας 33).
- Εκκαθάρισης παλαιών αρχείων καταγραφής με χρόνο δημιουργίας παλαιότερο των 30 ημερών, για τον περιορισμό του όγκου δεδομένων.
- Επικοινωνίας με IoT (Internet of Things) υπηρεσίες (Dweet.io, Nodered). Η δικτυακή εφαρμογή (Σχήμα 85 – Παράρτημα 2^ο) έχει δυνατότητα απεικόνισης 2 κατηγοριών δεδομένων, με διαφορετικά σύμβολα ανάλογα το μέγεθος και τον τύπο τους: Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται τα επίκεντρα των σεισμών που έχουν εκδηλωθεί στον Ελλαδικό χώρο τις τελευταίες μέρες και στη δεύτερη τα γεγονότα που καταγράφονται από το σύστημα easy. Οι πληροφορίες που αφορούν τους σεισμούς στην Ελλάδα παρατίθενται κάτω από το χάρτη, σε μορφή λίστας, ταξινομημένοι με βάση τον χρόνο γένεσης του κάθε γεγονότος. Οι πληροφορίες από το σύστημα easy εμφανίζονται και αυτές σε μορφή λίστας και γραφικής αναπαράστασης. Με την επιλογή ενός σεισμού στον χάρτη, εμφανίζονται σε μορφή φυσαλίδας οι πληροφορίες για αυτό το γεγονός. Για κάθε νέο γεγονός που καταγράφεται από το σύστημα easy, όλες οι πληροφορίες αποστέλλονται στο twitter στον λογαριασμό της υπηρεσίας @easyalertsysteem. Επιπρόσθετα, στην εφαρμογή έχει ρυθμιστεί ένα επιπλέον heatmap layer στον χάρτη, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μελλοντικά για έγκαιρη εκτίμηση καταστροφών ανά περιοχή. Αυτό μπορεί να γίνει εφικτό αφού η εφαρμογή καταγράφει τη μέγιστη τιμή της επιτάχυνσης του σεισμού, άρα μπορεί να υπάρχει μια αντιστοίχιση με την τροποποιημένη κλίμακα Mercalli (ITΣAK, ND). Η πρόσβαση στην δικτυακή εφαρμογή γίνεται μέσω του συνδέσμου:

<https://easy.servequake.com/ui/>

Πίνακας 8: Παράδειγμα αρχείου ρυθμίσεων

Node configuration file template

```
Channel_0=HNE
Channel_1=HNN
Channel_2=HNZ
Channel_3=HHE
Channel_4=HHN
Channel_5=HHZ
Channel_6=volt
Channel_7=temp
Samplerate=94
Location=R
NetworkCode=HA
StationID=TES5
LocationID=00
Latitude=37.9665
Longitude=23.7845
LpfOrd=4
HpfOrd=4
DFOrdH=8
DFOrdL=8
DFFcL=10
DFFcH=0.075
LpfFc=10
TLpfFc=10
THpfFc=4.5
Seed=all
GPIO=ON
RS=ON
DIGILOG=OFF
ACCFC=1
XBEEID=1
KF=ON
ME=2
EE=2
PN=0.001
```

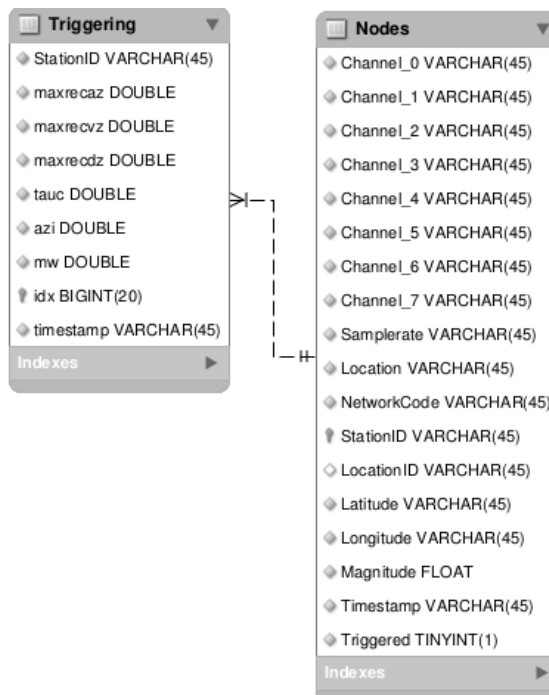
Εκτός από την αποθήκευση του αρχείου ρυθμίσεων, η εφαρμογή στέλνει ένα ερώτημα στη Βάση Δεδομένων, όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 26, η οποία είναι εγκατεστημένη στον εξυπηρετητή προκειμένου να λάβει τις συντεταγμένες και το είδος της περιοχής που είναι εγκατεστημένος ο κάθε σταθμός (αστική / μη αστική). Μέσω αυτού του ερωτήματος μπορεί να αναπαραστήσει όλους τους σταθμούς του συστήματος με βάση το γεωγραφικό πλάτος και μήκος του κάθε ενός. Εκτός από τη δυνατότητα απεικόνισης τους στον χάρτη, γύρω τους εμφανίζεται και η μέγιστη εμβέλεια κάλυψης του

αρθρώματος zigbee του κάθε σταθμού με βάση την περιοχή εγκατάστασης του, καθώς επίσης και η κατάσταση του κάθε σταθμού.

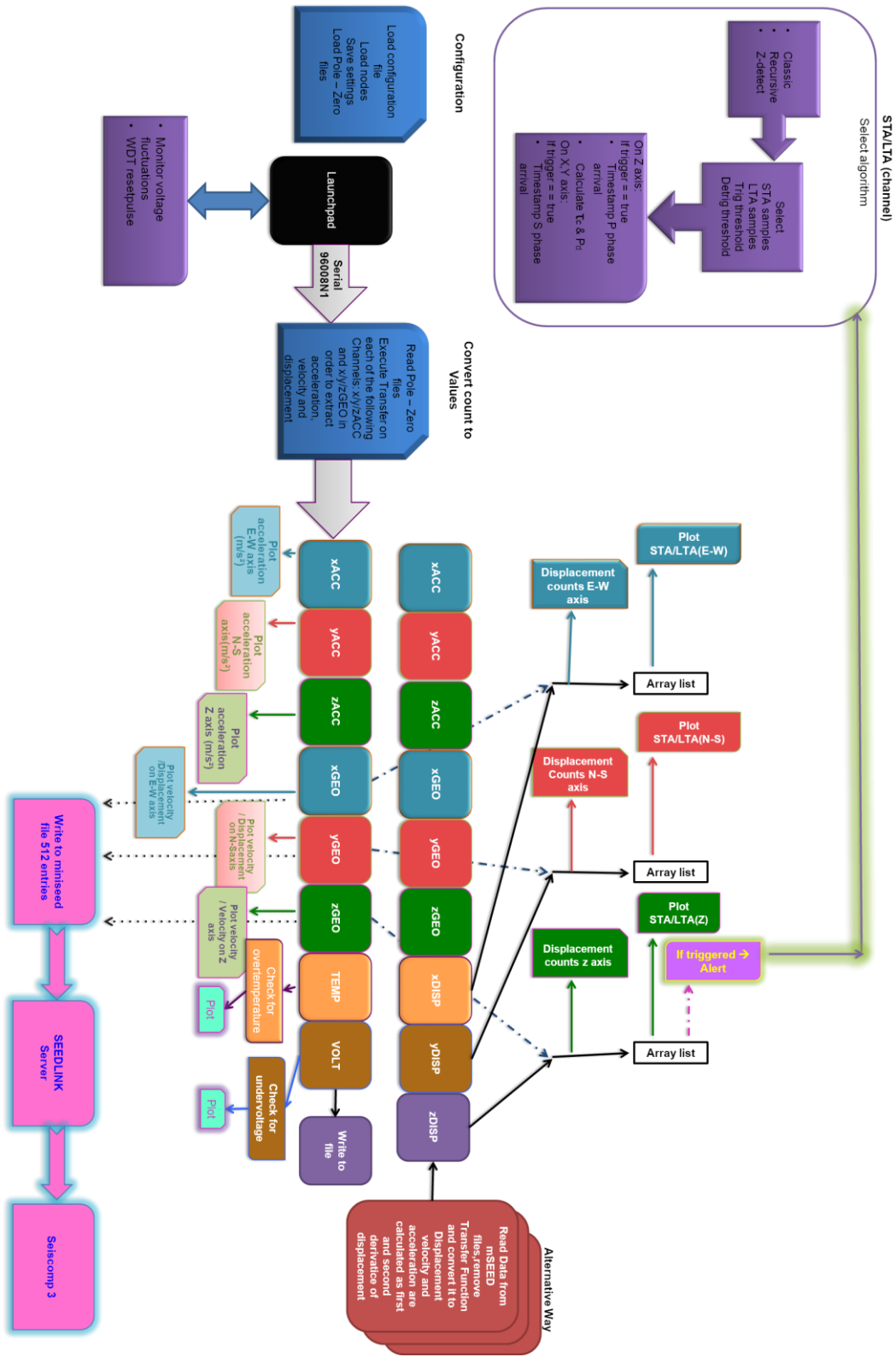
Στη συνέχεια, η εφαρμογή διαβάζει αρχεία τύπου .sacpz (Pole Zero Constant) τα οποία φέρουν πληροφορίες σχετικά με τις συναρτήσεις μεταφοράς των αισθητήρων. Πιο συγκεκριμένα, φέρουν όλους τους πόλους, τα μηδενικά και τη σταθερά του συστήματος, καθώς επίσης και σχόλια σχετιζόμενα με το όργανο που περιγράφουν. Επειδή η εφαρμογή δέχεται μια συγκεκριμένη τυποποίηση όσο αφορά τις αριθμητικές τιμές, αλλά και απαιτεί την απουσία σχολίων στο αρχείο, ο χρήστης προτού χρησιμοποιήσει κάποιο αρχείο .sacpz πρέπει να εκτελέσει αρχικά τη βοηθητική εφαρμογή sacpzformatter, προκειμένου να μορφοποιήσει κατάλληλα το αρχείο. Έπειτα, ο χειριστής αποθηκεύει τις ρυθμίσεις για την αποστολή των email σε κάποιο λογαριασμό για την ενημέρωση των αρμόδιων αρχών, ενώ τέλος μπορεί να αφήσει τις προεπιλεγμένες τιμές ή να θέσει νέες δικές του, για τα κατώφλια τάσης, θερμοκρασίας και για τον αλγόριθμο διέγερσης. Μόλις ξεκινήσει η σειριακή ζεύξη, η μονάδα επεξεργασίας λαμβάνει δεδομένα της μορφής του πίνακα 5.

Σε κάθε λήψη ενός τέτοιου πακέτου καλείται η μέθοδος `serialevent()`, οπότε και εκτελείται ο αλγόριθμος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 27. Τα δεδομένα χωρίζονται μεταξύ τους και αποθηκεύονται κατά είδος σε ξεχωριστές προγραμματιστικές δομές, κάποιες από τις οποίες αποθηκεύονται στον δίσκο ή χρησιμοποιούνται για απεικόνιση μέσω της βιβλιοθήκης `GWoptics`. Τα παραγόμενα γραφήματα φέρουν πλέγμα για εύκολη ανάγνωση αποτελεσμάτων. Με τη χρήση των κατάλληλων συντομεύσεων μπορούν να αυξομειωθούν τα άνω και κάτω όρια του γραφήματος. Τα δεδομένα της επιτάχυνσης και της ταχύτητας τυποποιούνται σε αρχεία σύμφωνα με το πρότυπο `miniSEED` μέσω της βιβλιοθήκης `seisFile` (Crotwell, 2015) και αποστέλλονται στην εφαρμογή `Seiscomp3` μέσω του εξυπηρετητή `ringserver`. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από το καταγραφικό μετατρέπονται από στάθμες τάσης σε μονάδες επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης, αφού πρώτα αποσυνελιχθεί η συνάρτηση μεταφοράς του αντίστοιχου οργάνου από αυτά. Αυτή η διαδικασία πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την βιβλιοθήκη `fissuresUtil`, που φέρει τη μέθοδο `Transfer` (Crotwell, 2011), η οποία χρειάστηκε να τροποποιηθεί προκειμένου να δέχεται δεδομένα πραγματικού χρόνου, απευθείας από το καταγραφικό. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι υλοποίηση του εκτελέσιμου `transfer`, το οποίο παρέχεται από τον οργανισμό

IRIS. Εκτός από την εμφάνιση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από το καταγραφικό, η εφαρμογή υποστηρίζει το διάβασμα και την εμφάνιση δεδομένων από έτοιμα αρχεία καταγραφής τυποποιημένα σε αρχεία miniSEED. Τα δεδομένα αυτά εμφανίζονται με βάση τον ρυθμό δειγματοληψίας που υπάρχει αποθηκευμένος στην κεφαλίδα του αρχείου καταγραφής, ενώ το διάβασμα και η ενημέρωση των προγραμματιστικών δομών που φέρουν μέσα τους τα δεδομένα καταγραφής γίνεται μέσω events και eventListeners. Τέλος, είτε η εφαρμογή λειτουργεί αντλώντας δεδομένα από κάποιο αρχείο καταγραφής είτε μέσω του ψηφιοποιητή τα δεδομένα της μετατόπισης οδηγούνται ως είσοδος προς τον εκάστοτε επιλεγμένο αλγόριθμο διέγερσης, ο οποίος παράγει σαν έξοδο μία χαρακτηριστική συνάρτηση, που οδηγείται σαν είσοδος στη συνάρτηση διέγερσης.



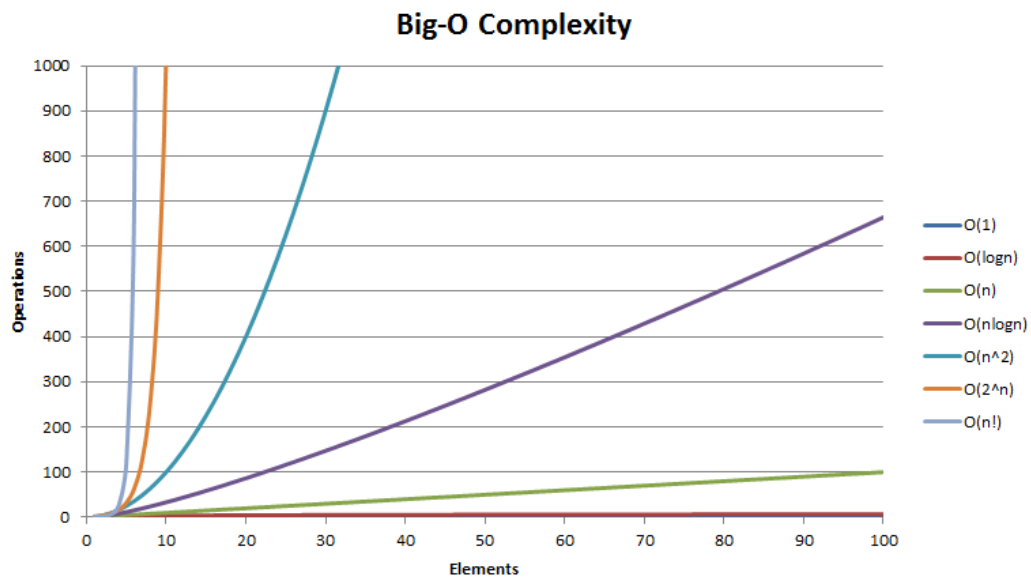
Σχήμα 26: Σχηματική απεικόνιση της Β.Δ. της εφαρμογής
Database schema



Σχήμα 27: Ο κεντρικός αλγόριθμος της εφαρμογής *Block diagram of the main algorithm*

Σημαντικό κριτήριο στην ανάπτυξη των αλγορίθμων αποτέλεσε η πολυπλοκότητα της κάθε υλοποίησης, δηλαδή η συσχέτιση κλιμάκωσης των πράξεων που απαιτούνται για να επιλυθεί το πρόβλημα, όσο αυξάνονται τα δεδομένα εισόδου. Παρατηρώντας το Σχήμα 28, προκύπτει το συμπέρασμα ότι για να διατηρηθεί ο χαρακτήρας του πραγματικού χρόνου στο σύστημα πρέπει να επιλεγούν υλοποιήσεις με πολυπλοκότητα $O(n \log n)$ ή $O(n)$, καθώς ο αριθμός των πράξεων στις υπόλοιπες πολυπλοκότητες, π.χ. $O(2^n)$, τις καθιστά μη αποδοτικές για το συγκεκριμένο σύστημα.

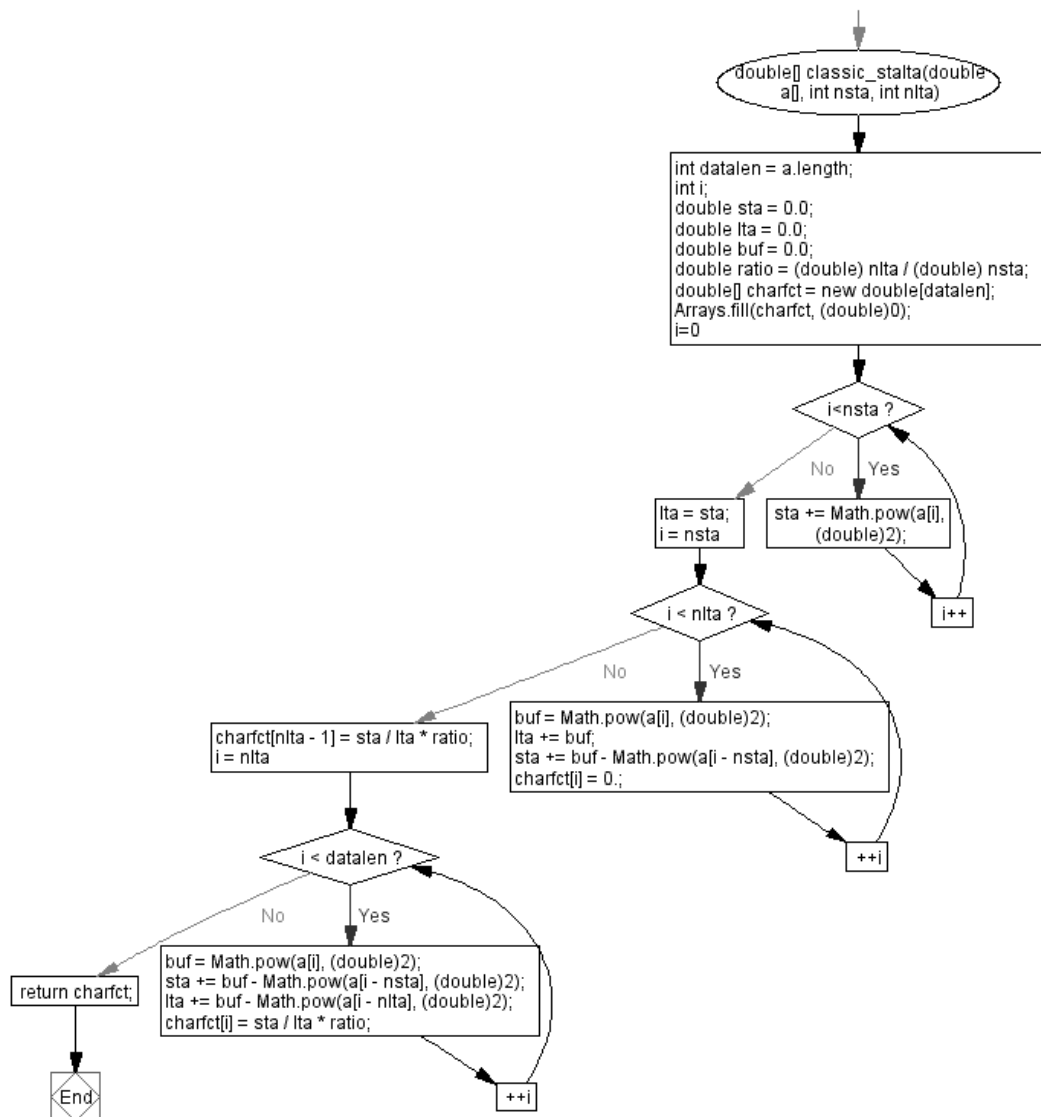
Σαν αρχή λειτουργίας οι αλγόριθμοι που έχουν υλοποιηθεί, συγκρίνουν την ενέργεια του σεισμικού σήματος, ή αλλιώς τη χαρακτηριστική του συνάρτηση με κάποιο κατώφλι, που τίθεται από τον χειριστή του συστήματος. Αυτό υλοποιείται με τη χρήση δύο συνεχόμενων κυλιόμενων παραθύρων πάνω στο καταγεγραμμένο σεισμικό σήμα. Ο λόγος STA/LTA, καθώς τα παράθυρα ολισθαίνουν πάνω στο σήμα, συγκρίνεται συνεχώς με το κατώφλι και σε περίπτωση που αυτό ξεπεραστεί, υπάρχει εκδήλωση σεισμικού γεγονότος.



Σχήμα 28: Συγκριτικό γράφημα πολυπλοκότητας αλγορίθμων (Big-O complexity, 2012) Algorithm Complexity chart

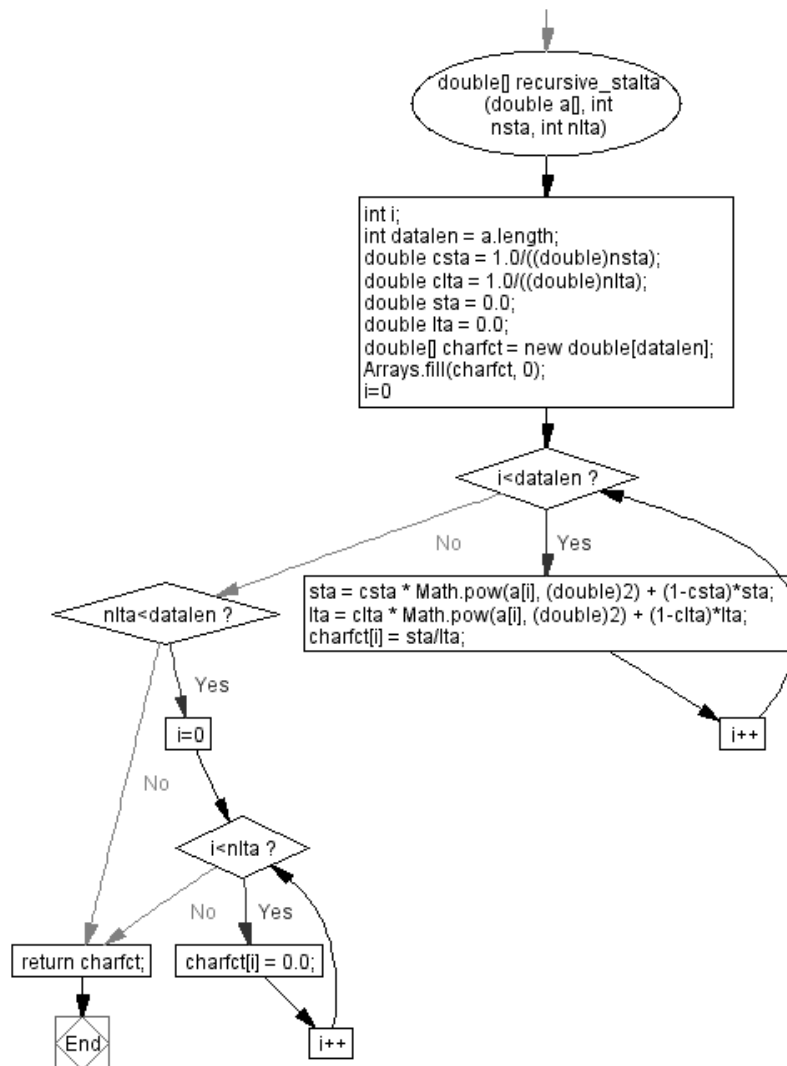
Αναπτύχθηκαν τρεις αλγόριθμοι, όλοι πολυπλοκότητας $O(n)$, οι οποίοι αναλύθηκαν διεξοδικά στο κεφάλαιο 2.5.1 της εργασίας:

- Ο STA/LTA (classic STA/LTA), ο οποίος περιγράφεται στο Σχήμα 29.



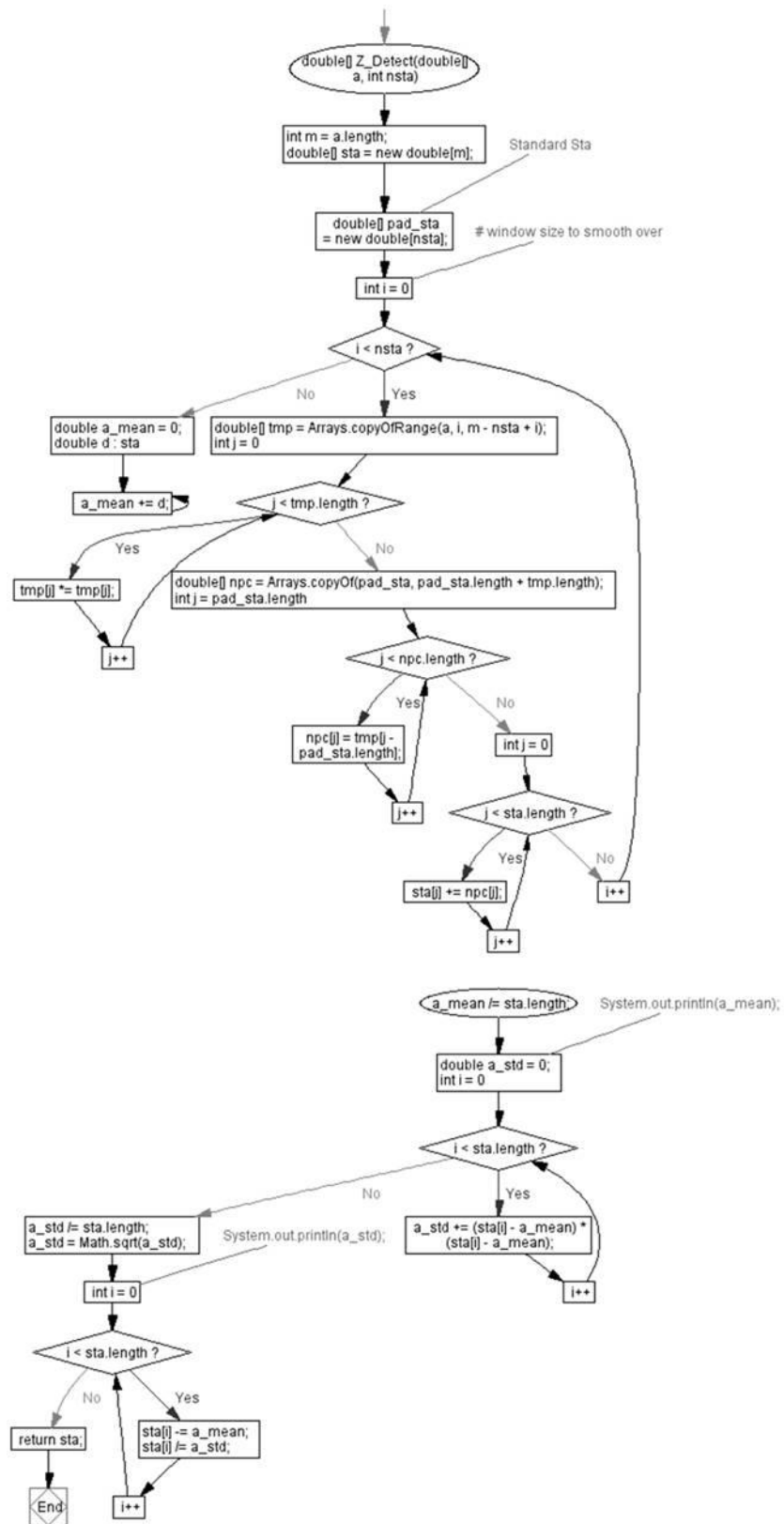
Σχήμα 29: Μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης κλασικού STA/LTA αλγόριθμου
Block diagram of the Classic STA/LTA algorithm that has been developed

- Ο αναδρομικός STA/LTA (recursive STA/LTA), ο οποίος περιγράφεται στο Σχήμα 30.



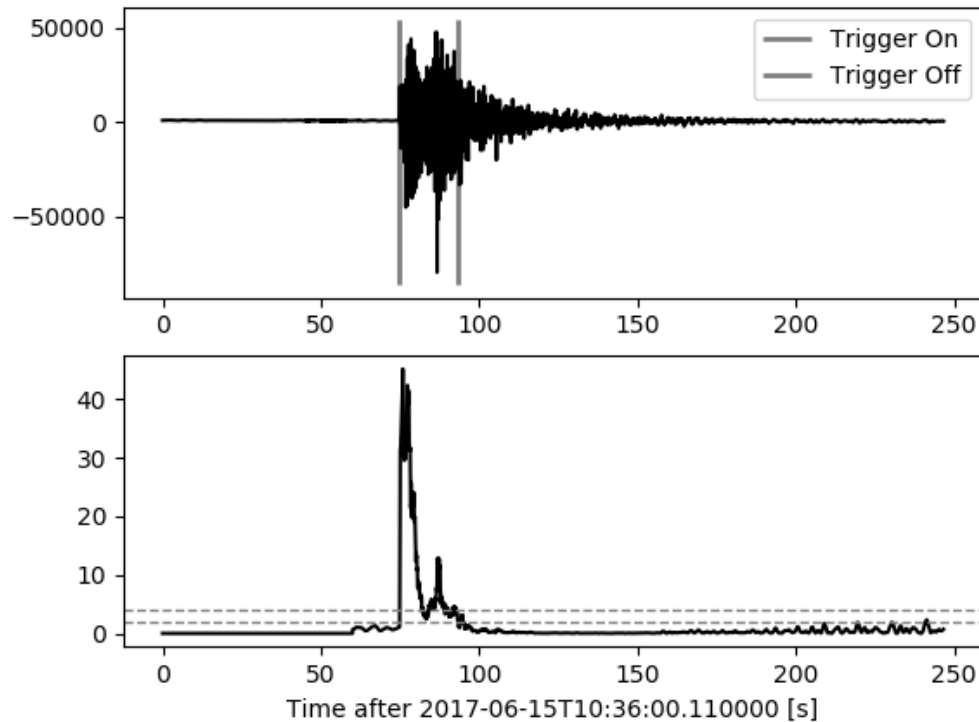
Σχήμα 30: Μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης αναδρομικού STA/LTA αλγόριθμου
Block diagram of the recursive STA/LTA algorithm that has been developed

- Ο Z-ανιχνευτής (Z-detect), ο οποίος περιγράφεται στο Σχήμα 31



Σχήμα 31 : Μπλοκ διάγραμμα υλοποίησης αλγόριθμου Z - ανιχνευτή
Block diagram of the Z-Detect algorithm that has been developed

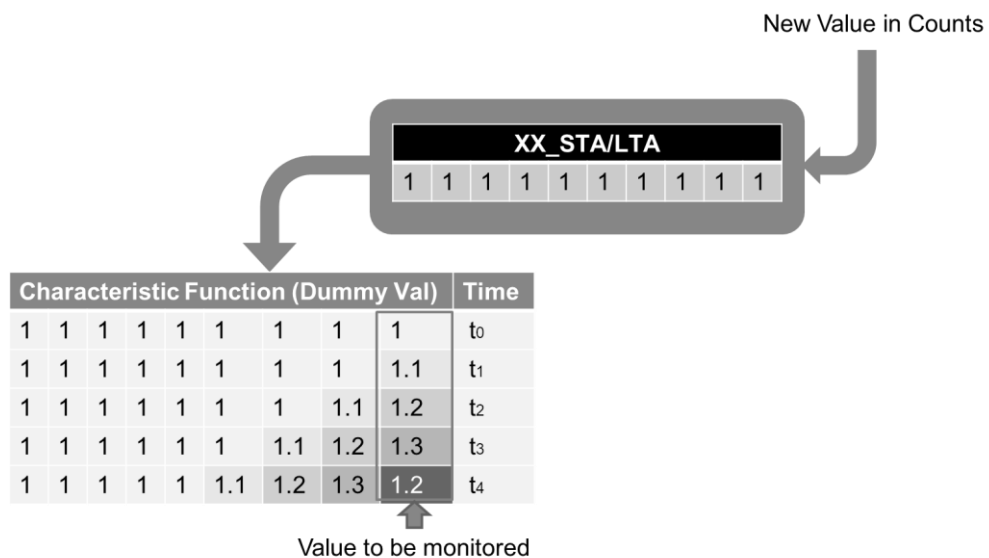
Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση η οποία είναι υπεύθυνη για την παρακολούθηση της σεισμικής δραστηριότητας, εκτός από τη χαρακτηριστική συνάρτηση παίρνει σαν είσοδο δύο επιπλέον τιμές, το κατώφλι διέγερσης και το κατώφλι αποδιέγερσης.



Σχήμα 32: Παράδειγμα χρήσης αλγόριθμου classic -STA/LTA. Με κόκκινο σημειώνεται το κατώφλι διέγερσης, ενώ με μπλέ το κατώφλι από-διέγερσης
Classic STA/LTA example

Στο χρονικό παράθυρο που παρακολουθείται (Σχήμα 32), όσο οι τιμές της χαρακτηριστικής συνάρτησης δεν υπερβαίνουν το κατώφλι διέγερσης, βρισκόμαστε πριν από το χρόνο εκδήλωσης του γεγονότος (Pre-event time - PEM). Μόλις ξεπεραστεί το κατώφλι στην κατακόρυφη συνιστώσα γίνεται η δήλωση της άφιξης της P φάσης, ενώ το σεισμικό γεγονός λήγει όταν η τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης γίνει μικρότερη από το κατώφλι αποδιέγερσης (Post-event time). Προφανώς, η χρήση ενός μεγάλου στατικού χρονικού παραθύρου, αντενδείκνυται για χρήση σε ένα σύστημα πραγματικού χρόνου, αφού θα υπήρχε τεράστια καθυστέρηση στην έκδοση των προειδοποιήσεων. Για τον λόγο αυτόν οι αλγόριθμοι που επιλέχθηκαν και υλοποιήθηκαν έχουν ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 33. Κάθε νέα είσοδος στον αλγόριθμο διέγερσης, αναγκάζει τη χαρακτηριστική συνάρτηση να ολισθήσει μια θέση προς τα αριστερά. Συνεπώς, δεν χρειάζεται η εκτέλεση

του αλγόριθμου να γίνεται κάθε φορά που θα συμπληρωθεί ο απαραίτητος αριθμός τιμών που αντιστοιχεί στο προκαθορισμένο χρονικό παράθυρο. Χρησιμοποιήθηκε ένα κυλιόμενο χρονικό παράθυρο σταθερού μεγέθους. Κάθε φορά που υπάρχει μια νέα τιμή σαν είσοδος στο παράθυρο, αφαιρείται το πιο παλιό στοιχείο του και προστίθεται το νέο δεδομένο στην κορυφή του παράθυρου. Πραγματοποιείται ο υπολογισμός της νέας χαρακτηριστικής συνάρτησης και το μόνο που χρειάζεται να παρακολουθείται είναι η τελευταία τιμή της χαρακτηριστικής συνάρτησης.

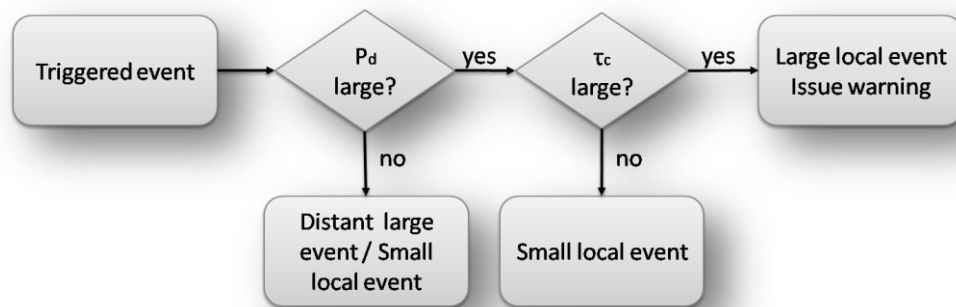


Σχήμα 33: Είσοδος/Εξοδος αλγόριθμου διέγερσης.

Time based I/O of the triggering algorithm

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι αλγόριθμοι διέγερσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για την ανίχνευση σεισμικών γεγονότων. Προκειμένου να εκτιμηθεί η ενδεχόμενη καταστρεπτικότητα του σεισμού χρησιμοποιούνται οι τιμές τ_c και P_d (Kanamori, 2005). Το P_d εκφράζει το μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης τη χρονική περίοδο $\tau_{trig} - \tau_0$, όπου τ_{trig} είναι ο χρόνος άφιξης της P φάσης και τ_0 ο μέγιστος χρόνος υπολογισμού των μετρήσεων. Η παράμετρος τ_c είναι η μέση περίοδος του σεισμικού κύματος P. Για τον υπολογισμό της περιόδου τ_c , ο υπολογισμός των απαιτούμενων ολοκληρωμάτων γίνεται μέσω της εξίσωσης 3.17. Σε περιοχές με μέγιστο μέγεθος σεισμού $M_w < 8$ η τιμή του τ_0 είναι ιδανική να τοποθετηθεί στα 3sec μετά το τ_{trig} , ενώ για μεγέθη $M_w > 8$ έχει αποδειχθεί ότι χρειάζεται περισσότερος χρόνος, προκειμένου να υπολογιστεί το μέγεθος από τα δεδομένα των κυμάτων P (Colombelli et al., 2012). Η συσχέτιση των δυο τιμών παρουσιάζεται στο

Σχήμα 34, ενώ η υλοποίηση του συγκεκριμένου αλγόριθμου παρουσιάζεται στο Σχήμα 35:



Σχήμα 34: Αλγόριθμος προσδιορισμού της ενδεχόμενης σεισμικής καταστρεπτικότητας (Zollo et al., 2010)

Algorithm for determining the potential destructive effects of an earthquake

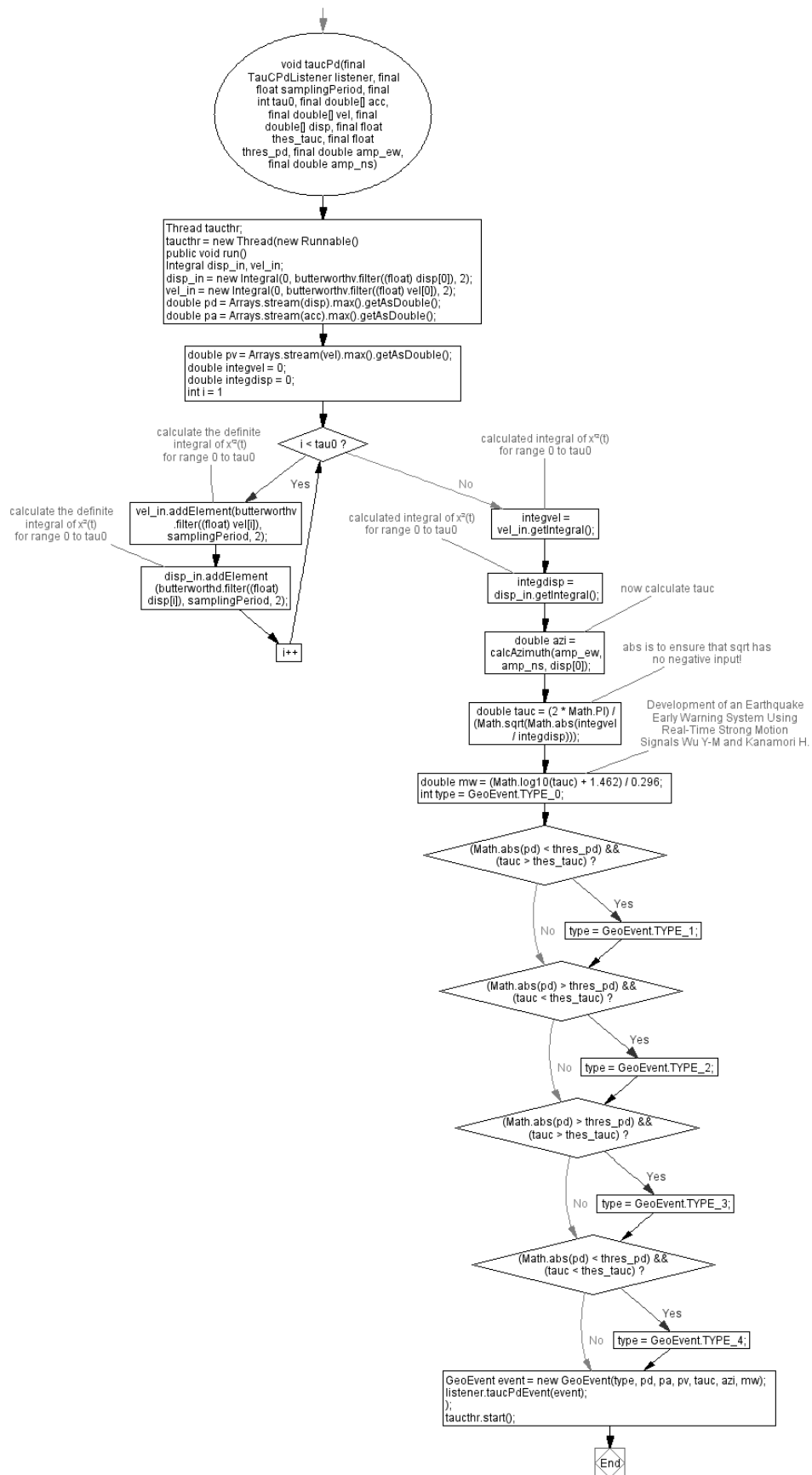
- Μικρό πλάτος P_d και μικρή περίοδο τ_c , το οποίο σημαίνει ότι το γεγονός είναι τοπικό μη καταστρεπτικό γεγονός.
- Μικρό πλάτος P_d και μεγάλη περίοδο τ_c , το οποίο σημαίνει ότι το γεγονός έχει μεγάλο μέγεθος, αλλά εκδηλώνεται σε μεγάλη απόσταση, πιθανότατα δεν θα είναι καταστρεπτικό στην περιοχή που έγινε η καταγραφή, αλλά πιθανώς να είναι καταστρεπτικό στις περιοχές που είναι κοντά στο επίκεντρο του.
- Μεγάλο πλάτος P_d και μικρή περίοδο τ_c , το οποίο σημαίνει ότι το γεγονός είναι τοπικό και πιθανά να είναι καταστρεπτικό μόνο στις περιοχές κοντά στο επίκεντρο του.
- Μεγάλο πλάτος P_d και μεγάλη περίοδο τ_c το οποίο σημαίνει ότι το καταγεγραμμένο σεισμικό γεγονός έχει μεγάλο μέγεθος και είναι καταστρεπτικό.

Σε περίπτωση εκδήλωσης σεισμικού γεγονότος πραγματοποιείται σάρωση για εντοπισμό σταθμών και τελικών συσκευών που βρίσκονται εντός εμβέλειας. Ταυτόχρονα, αποστέλλονται προς τους σταθμούς και τις τελικές συσκευές τα κατάλληλα μηνύματα και γίνεται ο έλεγχος των ακροδεκτών τους, ενώ αποστέλλονται και προειδοποιητικά email προς τον εκάστοτε οργανισμό πολιτικής προστασίας. Παράλληλα με τον αλγόριθμο τ_c - P_d , υπολογίζεται το οπισθαζιμούθιο του σταθμού (backazimuth) με χρήση της εξίσωσης 3.18

(Eisermann et al., 2015) και το μέγεθος της σεισμικής ροπής. Το συγκεκριμένο σύστημα κρίθηκε σκόπιμο να μη διαθέτει δυνατότητα υπολογισμού της επικεντρικής απόστασης, η μέθοδος αυτή θα καταργούσε την έννοια του πραγματικού χρόνου καθώς θα απαιτούσε σημαντική υπολογιστική δύναμη και χρόνο. Παράλληλα, η εκτίμηση της απόστασης μπορεί να γίνει από τα κλασσικά δίκτυα καταγραφών, μιας και ο σκοπός ενός Σ.Ε.Σ.Π. είναι η έκδοση έγκαιρης προειδοποίησης για ένα σεισμικό γεγονός και όχι ή πλήρης ανάλυση όλων των δεδομένων.

$$\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt \approx \sum_{t=1}^{\tau_0} \frac{1}{2} (u_{t-1}^2 + u_t^2) t_{sampling} \quad (3.17)$$

$$\varphi^\circ = \begin{cases} \tan^{-1} \frac{A_E}{A_N}, A_z * A_N < 0 \\ \tan^{-1} \frac{A_E}{A_N} + 180^\circ, A_z * A_N > 0 \end{cases} \quad (3.18)$$



Σχήμα 35: Μπλοκ διάγραμμα της υλοποίησης αλγόριθμου τ_c - P_d
Block diagram of the τ_c - P_d algorithm that has been developed

3.3.3.2 Χρονισμός - GPS

Ένα υπολογιστικό σύστημα φέρει ενσωματωμένο σύστημα μέτρησης χρόνου. Το σύστημα μέτρησης χρόνου, ανάλογα την αρχιτεκτονική, βασίζεται πάνω σε ένα κύκλωμα πραγματικού χρόνου (Real Time Clock – RTC) ή απευθείας στο ρολόι χρονισμού του επεξεργαστή. Το πρόβλημα έγκειται στο ότι το συγκεκριμένο ρολόι δεν είναι καθόλου ακριβές, διότι με το πέρασμα του χρόνου αποσυγχρονίζεται. Ο παλμός του ρολογιού για τον επεξεργαστή τυπικά παράγεται με ένα κύκλωμα ταλαντωτή βασισμένο σε κρύσταλλο χαλαζία. Ο ρυθμός εκτροπής της ακρίβειας του ρολογιού, ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ του ρολογιού του υπολογιστικού συστήματος και του ρολογιού υψηλής ακρίβειας το οποίο λειτουργεί σαν μονάδα αναφοράς. Η συγκεκριμένη απόκλιση επηρεάζεται άμεσα από τη θερμοκρασία του κυκλώματος, αφού από αυτήν εξαρτάται η συχνότητα του κρυστάλλου και κατά συνέπεια ο ρυθμός εκτροπής (Marouani & Dagenais, 2008). Τυπικές τιμές στον ρυθμό εκτροπής για ρολόγια υψηλής ακρίβειας που βασίζονται σε κρύσταλλο είναι της τάξης του 0.001 έως 1ppm, ενώ για πιο κοινούς κρυστάλλους η ακρίβεια κυμαίνεται από 20 έως 100ppm.

Το RTC που είναι ενσωματωμένο στον επεξεργαστή I.MX6 δεν είναι συνδεδεμένο σε αυτόνομη πηγή τάσης, συνεπώς δεν είναι ιδιαίτερης ακρίβειας. Για τον λόγο αυτόν πρέπει να προτιμηθεί άλλη λύση, προκειμένου ο χρονισμός του συστήματος να διατηρείται ακριβής. Μια απλή λύση είναι η εξής: εφόσον το σύστημα είναι συνδεδεμένο στο Διαδίκτυο, να επανασυγχρονίζεται με τη βοήθεια του πρωτόκολλου χρονισμού δικτύων (Network Time Protocol - NTP) που μπορεί να δώσει ακρίβεια μετρήσεων με απόκλιση από 1 έως 50 msec, με προϋπόθεση τη μόνιμη σύνδεση του συστήματος στο Διαδίκτυο, προκειμένου να υπάρχει συνεχής ρύθμιση του συστήματος χρονισμού. Η προτιμότερη λύση από άποψη ακρίβειας είναι ο συγχρονισμός του NTP με ένα δέκτη GPS, ο οποίος παρέχει την υπηρεσία PPS (Pulse per Second Signal). Η συγκεκριμένη υπηρεσία παράγει έναν παλμό χρονισμού που χρησιμοποιείται, ώστε να συγχρονιστεί ένα υπολογιστικό σύστημα με τον χρόνο του GPS, το οποίο είναι συμβατό με το πρότυπο της Συντονισμένης Παγκόσμιας Ώρας (Coordinated Universal Time - UTC). Ο δέκτης Venus638FLPx που φέρει το σύστημα παρέχει σύνδεση μέσω σειριακής θύρας, ενώ η υπηρεσία GPSD διοχετεύει τα δεδομένα του πρωτοκόλλου NMEA0183, καθώς και τον παλμό PPS του δέκτη στην υπηρεσία NTPD μέσω χρήσης κοινής μνήμης.

Τέλος, μέσω της εντολής `gpspipe`, μπορούμε να λάβουμε την τιμή του γεωγραφικού μήκους και πλάτους καθώς και άλλες χρήσιμες πληροφορίες που παρέχει το πρωτόκολλο NMEA.

3.3.3.3 Seedlink Service

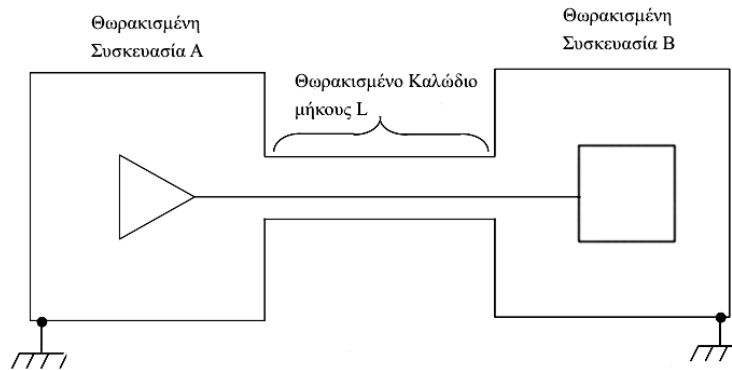
Εκτός από την ασύρματη επικοινωνία μεταξύ των σταθμών για την αποστολή μηνυμάτων εντός του δικτύου τους, κάθε σταθμός φέρει εγκατεστημένη την υπηρεσία IRIS ring server, η οποία λειτουργεί σαν Seedlink Server. Η συγκεκριμένη υπηρεσία ανοίγει ένα δίαυλο επικοινωνίας μεταξύ του σταθμού και της εφαρμογής Seiscomp3. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω ενός TCP socket το οποίο επικοινωνεί με τον server στη θύρα 18000. Με τον τρόπο αυτόν οι σταθμοί προλαβαίνουν να επεξεργαστούν τα δεδομένα προκειμένου να εντοπιστεί ενδεχόμενη σεισμική δραστηριότητα και στη συνέχεια αποστέλλουν τα δεδομένα στον κεντρικό εξυπηρετητή, ο οποίος μπορεί να υπολογίσει το επίκεντρο και το μέγεθος του γεγονότος, ενώ παράλληλα θα έχουν ενεργοποιηθεί οι αυτοματισμοί ελέγχου του δικτύου και θα έχουν ειδοποιηθεί οι αρμόδιοι φορείς. Με αυτό τον τρόπο, το Σ.Ε.Σ.Π. θα ειδοποιεί έγκαιρα την περιοχή που επιτηρεί, ενώ παράλληλα θα είναι πλήρως συμβατό στο επίπεδο υπηρεσιών με τα αντίστοιχα εμπορικά καταγραφικά. Για τον ρόλο του εξυπηρετητή έχει χρησιμοποιηθεί μια εικονική μηχανή η οποία φέρει δύο πυρήνες επεξεργασίας, 6GB RAM, 100GB αποθηκευτικού χώρου, η οποία παρέχεται δωρεάν από την υπηρεσία Okeanos του Εθνικού Δικτύου Έρευνας & Τεχνολογίας (ΕΔΕΤ). Ο συγκεκριμένος server φέρει λειτουργικό Ubuntu server 64bit και έχει εγκατεστημένη την υπηρεσία Seiscomp3 – Seattle.

3.3.3.4 Πρόληψη σφαλμάτων - Αποφυγή ηλεκτρομαγνητικού θορύβου

Οι σταθμοί που θα απαρτίζουν το Σ.Ε.Σ.Π., είναι πιθανό να είναι εγκατεστημένοι σε δύσβατα σημεία, στα οποία δεν υπάρχει δίκτυο ηλεκτροδότησης. Για τον λόγο αυτόν τροφοδοτούνται από μια μπαταρία 12V βαθιάς εκφόρτισης. Ένα μεγάλο πρόβλημα που αντιμετωπίζουν τα κυκλώματα τα οποία λειτουργούν σε περιβάλλον ηλεκτρομαγνητικών (H/M) παρεμβολών (Electromagnetic Interference - EMI) είναι η χρήση τεχνικών, ώστε να προστατευτούν και τα στοιχεία του συστήματος από φθορές, αλλά και οι πληροφορίες που ταξιδεύουν στα κυκλώματα.

Η συγκεκριμένη υλοποίηση, προκειμένου να θωρακιστεί από τις H/M παρεμβολές, χρησιμοποιεί θωρακισμένα καλώδια, θωρακισμένους συνδετήρες και ειδικές συσκευασίες – κλωβούς, προκειμένου να περιοριστούν οι

εξωτερικές παρεμβολές. Στο Σχήμα 36 παρουσιάζεται το μοντέλο με το οποίο συνδέονται οι αισθητήρες και οι λοιπές περιφερειακές μονάδες με την κεντρική μονάδα.

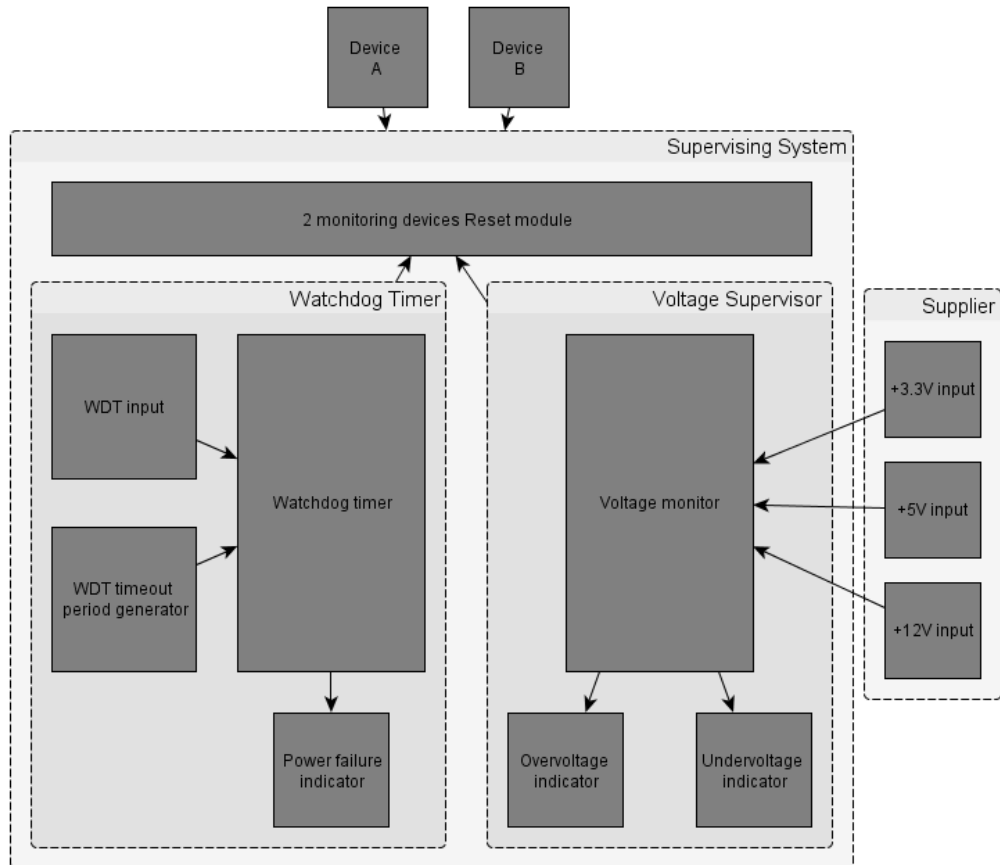


Σχήμα 36: Μοντέλο πλήρους εξωτερικής θωράκισης από Η/Μ παρεμβολές
EMI shielding diagram

Προκειμένου οι διασυνδεδεμένοι κλωβοί να μη λειτουργήσουν ως κεραία και να μην υπάρξει επιπλέον εισαγωγή παρεμβολών στο σύστημα, οι κλωβοί πρέπει να είναι γειωμένοι μεταξύ τους. Επιπλέον, το καλώδιο πρέπει να είναι θωρακισμένο, είτε με θωράκιση πλεξούδας, προκειμένου οι παρεμβολές να γειώνονται, είτε με λεπτό φιλμ αλουμινίου το οποίο αντανακλά τις παρεμβολές. Τέλος, ο τερματισμός των καλωδίων στους συνδετήρες θα πρέπει να γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε η θωράκιση του καλωδίου να εφάπτεται 360° γύρω από τον συνδετήρα, προκειμένου να μην υπάρχουν απώλειες θωράκισης στους συνδέσμους.

Εκτός από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές, ιδιαίτερα σημαντική είναι η προστασία του κυκλώματος από απότομες διακυμάνσεις τάσης. Τέτοιες διακυμάνσεις μπορούν να προκαλέσουν βλάβες στο υλικό, αλλά και σφάλματα στα δεδομένα. Σύμφωνα με έρευνες, η μείωση ενός Volt στην τάση λειτουργίας μιας SRAM οδήγησε σε δραματική αύξηση των σφαλμάτων σε αυτήν από 57 σε 658 (Narayanan & Xie, 2006).

Συνεπώς, ο έλεγχος της τάσης αλλά και της απρόσκοπτης λειτουργίας του συστήματος είναι ένα σημείο που θα πρέπει να ελέγχεται συνεχώς. Για τον λόγο αυτόν σχεδιάστηκε ένα κύκλωμα το οποίο επιτελεί τη συγκεκριμένη λειτουργία, όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 37.



Σχήμα 37: Υποσύστημα ελέγχου τάσης
Voltage control module

Ο έλεγχος τάσης είναι βασισμένος στο ολοκληρωμένο UC3903 της Texas Instruments. Το συγκεκριμένο ολοκληρωμένο παρέχει έλεγχο για τις τρεις τάσεις τροφοδοσίας (+3,3V, +5V, +12V) του κυκλώματος. Έχει κατώφλι ανοχής, το οποίο έχει ρυθμιστεί στα $\pm 250\text{mV}$. Σε περίπτωση που υπάρξει διακύμανση τάσης μεγαλύτερη από αυτό το κατώφλι, υπάρχει ενημέρωση της κεντρικής μονάδας επεξεργασίας και γίνεται παύση της λειτουργίας τόσο αυτής, όσο και της μονάδας ψηφιοποίησης των αναλογικών σημάτων, για όση ώρα υπάρχει αυτή η διακύμανση. Προκειμένου να εξασφαλισθεί η λειτουργία του συστήματος σε περίπτωση που αυτό δεν αποκρίνεται, έχει υλοποιηθεί ένα κύκλωμα WDT (Watchdog Timer), το οποίο σε περίπτωση που δεν λάβει σήμα αναστολής ανά τακτά χρονικά διαστήματα, θεωρεί ότι το σύστημα δεν ανταποκρίνεται και αναστέλλει τη λειτουργία του συστήματος.

3.3.4 Τελικές Συσκευές

Οι τελικές συσκευές αποτελούν το τελευταίο τμήμα του συστήματος έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης E.A.SY. Η υλοποίησή τους είναι σχετικά απλή, καθώς η ύπαρξη κάποιας μονάδας μικροελεγκτή - μΕ για τον έλεγχο τους κρίνεται αναγκαία μόνο στην περίπτωση της επικοινωνίας μέσω υπηρεσίας IoT (Internet of Things).

3.3.4.1 Πρωτόκολλα επικοινωνίας

3.3.4.1.1 IEEE 802.15.4 - Xbee module

Το σύστημα E.A.SY., εκτός από την ικανότητα σύνδεσης στο Διαδίκτυο για αποστολή δεδομένων στον κεντρικό εξυπηρετητή, φέρει μια μονάδα ασύρματης δικτύωσης συμβατή με το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4 - Zigbee και συγκεκριμένα τη μονάδα XBEEpro της εταιρίας Digi. Η συγκεκριμένη μονάδα μπορεί να δημιουργήσει ένα δίκτυο σταθμών σε πλήρως κατανομημένη τοπολογία. Η μέγιστη απόσταση μεταξύ δύο δομικών του στοιχείων σε αστικό περιβάλλον φτάνει τα 330m, ενώ σε μη αστικό περιβάλλον φτάνει τα 1600m. Η μονάδα μπορεί να λειτουργήσει με δύο τρόπους: ο πρώτος είναι ο transparent mode, δηλαδή μια απλή σειριακή ζεύξη μεταξύ των σταθμών και ο δεύτερος είναι το API mode, το οποίο παρέχει επιπλέον ικανότητες παραμετροποίησης των πακέτων και της εκπομπής. Όλες οι μονάδες XBEE στους σταθμούς λειτουργούν σε API mode. Όσον αφορά τη μετάδοση δεδομένων, έχει ρυθμιστεί προκειμένου να υπάρχει κρυπτογράφηση μεταξύ των επικοινωνιών με χρήση αλγόριθμου AES (Advanced Encryption Standard) 128bit και επανεκπομπή του πακέτου στην περίπτωση που δεν ληφθεί απάντηση (ACK) από τον παραλήπτη του πακέτου προς τον αποστολέα. Κατά την εκκίνηση της υπηρεσίας γίνεται εξερεύνηση του δικτύου για άλλους σταθμούς. Σε περίπτωση που οι αλγόριθμοι διέγερσης εντοπίσουν σεισμικό γεγονός, τότε γίνεται εκπομπή ενός μηνύματος προς όλους τους σταθμούς του δικτύου. Με αυτόν τον τρόπο ενημερώνονται όλοι οι σταθμοί και οι τελικές συσκευές για γένεση σεισμού.

Ένα δίκτυο βασισμένο στο πρωτόκολλο Zigbee αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία και παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 38:

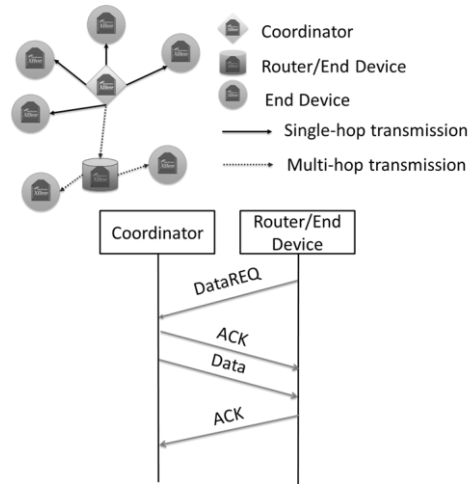
- Τους Coordinators - Συντονιστές, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την επιλογή του καναλιού και την αρχικοποίηση του προσωπικού δικτύου χώρου (Personal Area Network - PAN). Με την αρχικοποίηση του PAN, πλέον μπορούν να δεχτούν συνδέσεις και αιτήσεις από διάφορους

δρομολογητές ή από τελικές συσκευές. Η αποστολή δεδομένων προς τις συσκευές του δικτύου γίνεται μέσω μονής μεταπήδησης (Single-hop), εφόσον δεν εμπλέκεται κάποια άλλη συσκευή.

- Τους Routers – Δρομολογητές, οι οποίοι επιτρέπουν τη σύνδεση άλλων δρομολογητών και τελικών συσκευών στο PAN. Με την επανεκπομπή των δεδομένων του coordinator προς τις συσκευές που βρίσκονται εκτός ακτίνας κάλυψης του coordinator, ουσιαστικά επεκτείνεται η ακτίνα κάλυψης του PAN μέσω εκπομπών πολλαπλών μεταπηδήσεων (multi-hop). Επίσης, έχουν την ιδιότητα να δρομολογούν πακέτα δεδομένων εντός του δικτύου.
- Τις End Devices – Τελικές συσκευές, οι οποίες λειτουργούν σε αντιστοιχία με τους δρομολογητές, με τη μόνη διαφορά ότι οι τελικές συσκευές δεν μπορούν να επιτρέψουν τη σύνδεση άλλων δρομολογητών ή τελικών συσκευών πάνω τους.

Οι συντονιστές του δικτύου σε περίπτωση σεισμού αποστέλλουν τυποποιημένα μηνύματα και εντολές προς το δίκτυο. Σαν μέθοδος αποστολής έχει επιλεγεί το unicast έναντι του broadcast (μηνύματα εκπομπής). Χρησιμοποιώντας unicast εκπομπή τα δεδομένα αποστέλλονται σε κάθε μία τελική συσκευή ξεχωριστά, σε αντίθεση με το broadcast το οποίο θα αποστείλει ταυτόχρονα προς όλες τις συσκευές τα δεδομένα. Η μέθοδος του broadcast μπορεί να φαίνεται ιδανική για τη μετάδοση δεδομένων, στην πραγματικότητα όμως είναι ιδιαίτερα αργή σε σχέση με τη unicast, διότι όλες οι συσκευές που λαμβάνουν ένα μήνυμα θα αναμεταδώσουν το μήνυμα μέχρι και 3 φορές. Κάθε σταθμός που μεταδίδει το πακέτο δημιουργεί μια εγγραφή σε έναν πίνακα, ώστε να είναι δυνατό να παρακολουθείται κάθε μετάδοση εντός δικτύου και για να εξασφαλιστεί ότι τα πακέτα δεν μεταδίδονται ασταμάτητα. Κάθε εγγραφή διαρκεί 8 δευτερόλεπτα. Ο πίνακας μετάδοσης κατέχει 8 καταχωρήσεις. Για κάθε μετάδοση, το πακέτο αντιγράφεται στη στοίβα του ZigBee και από εκεί αποστέλλονται προς τον επόμενο αποδέκτη στο δίκτυο. Η χρήση των μηνυμάτων εκπομπής από τον κατασκευαστή δεν συνιστώνται σε περιπτώσεις που αποστέλλονται πολλά μηνύματα ανά μονάδα χρόνου, λόγω του φόρτου που θα προκαλείται στο δίκτυο. Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω λόγους, η χρήση της μετάδοσης unicast στο σύστημα E.A.SY κρίθηκε αναγκαία.

Στο σύστημα E.A.SY, τον ρόλο των coordinator έχουν οι σταθμοί του συστήματος. Κάθε coordinator φέρει την έκδοση firmware XBP24-B_ZigBee_1147, ενώ οι τελικές συσκευές του συστήματος έχουν ρόλο Router / End-Device και έχουν εγκατεστημένη την έκδοση firmware XBP24-B_ZigBee_1347. Παρακάτω ακολουθεί συνοπτικός πίνακας που παρουσιάζει τις ρυθμίσεις ενός συντονιστή και μιας τελικής συσκευής που ανήκουν στο ίδιο PAN (Πίνακας 9).



**Σχήμα 38: Μοντέλο ενός PAN
Personal Area Network model**

**Πίνακας 9: Συνοπτικές ρυθμίσεις δικτύου.
PAN settings**

Ρύθμιση	Συντονιστής	Τελική Συσκευή
PAN ID	1234	1234
CH (Operating Channel)	10	10
SC (Scan Channels)	1FFF	1FFF
NJ (Network Join)	FF (always)	FF (always)
AP (API Enable)	1 - API Enabled	1 - API Enabled
NI (Node Identifier)	Node	ED
DH (Destination Address High)	0	0
DL (Destination Address Low)	FFFF	0

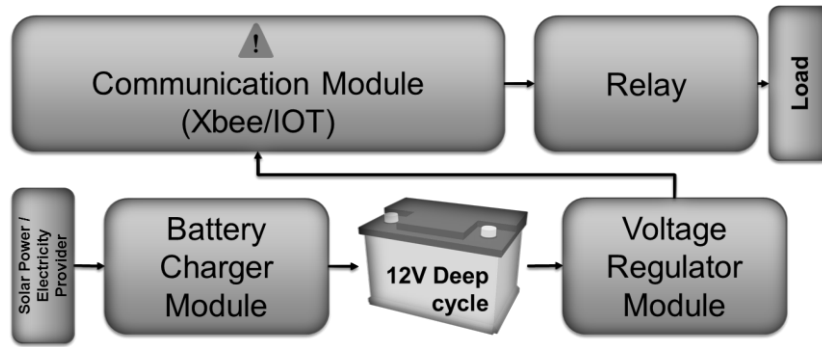
3.3.4.1.2 IEEE 802.3 - IoT service

Προκειμένου να ανταποκρίνεται το σύστημα στις σύγχρονες ανάγκες και να συμβαδίζει με την τεχνολογική ανάπτυξη, κρίθηκε αναγκαία η διασύνδεση του Σ.Ε.Σ.Π. E.A.SY με υπηρεσία IoT. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται οι τελικές συσκευές, οι οποίες δεν μπορούν να συνδεθούν μέσω κάποιας συσκευής XBEE, θα μπορέσουν να λειτουργήσουν όταν λάβουν το μήνυμα για τον επερχόμενο σεισμό. Υπηρεσίες IoT δίνουν τη δυνατότητα σε οποιαδήποτε συσκευή, κινητό

και γενικότερα οποιοδήποτε κύκλωμα διαθέτει ικανότητα σύνδεσης στο διαδίκτυο, να μπορεί να συνδεθεί στην υπηρεσία και να μεταδώσει τα δεδομένα που συλλέγει ή να λάβει κάποιου είδους ειδοποίηση για ένα γεγονός, όταν οι ελεγχόμενες τιμές ξεπεράσουν κάποιο κατώφλι. Τέτοιες υπηρεσίες έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται και στον χώρο των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης (Alphonsa & Ravi, 2016). Για την εύρυθμη λειτουργία του Σ.Ε.Σ.Π. E.A.SY κρίθηκε αναγκαία η διασύνδεση του με την υπηρεσία dweet.io, η οποία παρέχει API για την τυποποίηση των δεδομένων μέσω αντικειμένων JSON. Αυτά στη συνέχεια διαβάζονται μέσω της υπηρεσίας node-red, όπου και εμφανίζονται στο γραφικό περιβάλλον της εφαρμογής (Σχήμα 85 – Παράρτημα 2^ο).

3.3.4.2 Ανάλυση τελικών συσκευών

Οι τελικές συσκευές του συστήματος E.A.SY, όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 39 σαν μπλοκ διάγραμμα, αποτελούνται από ένα κύκλωμα τροφοδοσίας, το αντίστοιχο άρθρωμα επικοινωνίας και τέλος τον έλεγχο των ηλεκτρονόμων (relays). Το συγκεκριμένο κύκλωμα είναι ιδιαίτερα πολυχρηστικό, καθώς δύναται να εγκατασταθεί σε οποιαδήποτε κατοικία και μέσω ηχητικών και φωτεινών προειδοποιήσεων μπορεί να ενημερώσει τους κατοίκους για τον επερχόμενο σεισμό. Είναι χαμηλής κατανάλωσης (135mW). Επιπλέον φέρει ηλεκτρονόμο (relay), προκειμένου να ελέγχει την τάση μέσα στον χώρο εγκατάστασης μέσω ενός ηλεκτρονόμου, ο οποίος μπορεί να ελέγξει κάποιον ηλεκτρονόμο ισχύος ή κάποιο ηλεκτρονόμο στερεάς κατάστασης (solid state relay – SSR) που φέρει η εγκατάσταση. Μια μπαταρία κλειστού τύπου (Sealed Lead – Acid – SLA 12V, 1.3Ah) είναι ικανή να διατηρήσει τη συσκευή σε λειτουργία για πάνω από εκατό ώρες μετά από διακοπή της τάσης τροφοδοσίας. Τέλος, η τελική συσκευή μπορεί μέσω του ηλεκτρονόμου να ελέγξει την κατάσταση κάποιας σωληνοειδούς βαλβίδας. Με τον τρόπο αυτόν μπορεί να επιτευχθεί ο έλεγχος της ροής υγρών και αέριων καυσίμων μέσω της βαλβίδας.



Σχήμα 39: Τελική συσκευή του συστήματος
End device block diagram

Κεφάλαιο 4^ο – Πειραματική μελέτη – Παρουσίαση αποτελεσμάτων

4.1 Εισαγωγή

Στις μέρες μας η πλειοψηφία των αλγορίθμων έχουν μελετηθεί εκτενώς και χρησιμοποιούνται ευρέως, από τον πολύ απλό αλγόριθμο διέγερσης πλάτους, μέχρι πολυσύνθετους αλγόριθμους βασισμένους σε προσαρμοστικές μεθόδους και νευρωνικά δίκτυα. Οι αλγόριθμοι αυτοί βασίζονται είτε στο πλάτος του σήματος, είτε στην ισχύ του σήματος σε κλίμακα χρόνου ή συχνοτήτων. Παρόλα αυτά, κανένας από αυτούς δεν αποτελεί τη βέλτιστη λύση για τα πιθανά σενάρια που περιλαμβάνουν διάφορες σεισμικές πηγές, όργανα καταγραφής και ανοχή στον θόρυβο υποβάθρου, σε συνάρτηση με τις παραμέτρους που ορίζονται από τον χειριστή (Withers et al., 1998).

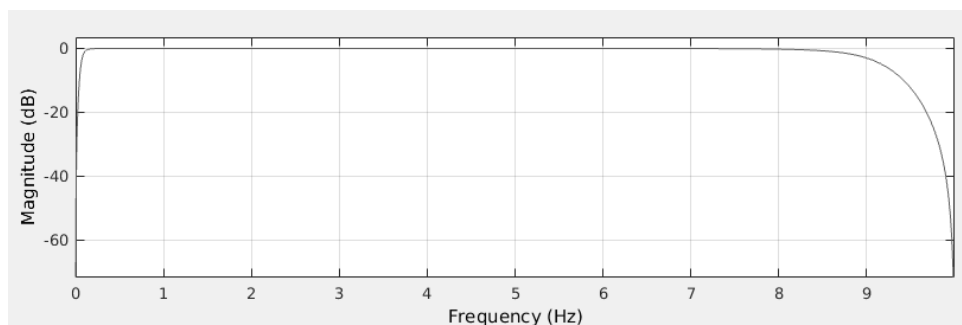
Παρά το γεγονός ότι τα πειραματικά δεδομένα και η επιστημονική βιβλιογραφία τεκμηριώνουν επαρκώς τη λειτουργία πολλών εξελιγμένων αλγορίθμων διέγερσης, η χρήση τους είναι αρκετά περιορισμένη λόγω της πολύπλοκης φύσης τους. Μεταξύ των αλγορίθμων που προαναφέρθηκαν (Κεφάλαιο 2), οι παραλλαγές του αλγόριθμου διέγερσης STA/LTA είναι ίσως σήμερα οι πιο διαδεδομένες. Ο στόχος ενός Σ.Ε.Σ.Π. είναι η έγκαιρη επεξεργασία των σεισμολογικών σημάτων σε πραγματικό χρόνο, χωρίς απώλειες δεδομένων, και ταυτόχρονα η προσπάθεια μείωσης των εσφαλμένων προειδοποιήσεων, προς αποφυγή πανικού στον γενικό πληθυσμό της εποπτευόμενης από ένα τέτοιο σύστημα περιοχής.

4.2 Ανάλυση πειραματικής διαδικασίας

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε προκειμένου να ελεγχθεί η αξιοπιστία των διεγέρσεων, η βαθμονόμηση (καλιμπράρισμα) και η σύγκριση της απόδοσης ενός σταθμού του συστήματος E.A.SY. με έτοιμες καταγραφές, ως προς τον έγκαιρο και έγκυρο εντοπισμό σεισμικής δραστηριότητας ανεξαρτήτως μεγέθους. Στη συνέχεια ο σταθμός θα εγκατασταθεί σε χώρο δοκιμών για να γίνει λήψη πειραματικών μετρήσεων σε πραγματικό χρόνο. Προκειμένου να επιτευχθεί ο συγκεκριμένος σκοπός, λίγο πριν εγκατασταθεί το Σ.Ε.Σ.Π. σε χώρο δοκιμών και αρχίσει η λειτουργία του, πραγματοποιήθηκε έλεγχος του προγράμματος με χρήση προ-καταγεγραμμένων δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά προέρχονται

είτε από όργανα καταγραφής του Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών (Ε.Κ.Π.Α.), είτε μέσω της υπηρεσίας IRIS Wilber3 (IRIS - Incorporated Research Institutions for Seismology, 2016), η οποία δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει συγκεκριμένες καταγραφές ανά τον κόσμο, ανάλογα με τις επιθυμητές προδιαγραφές του (σεισμολογικό δίκτυο καταγραφής, κανάλι, απόσταση σταθμού από το επίκεντρο, αζιμούθιο και μέγεθος). Η διαδικασία λήψης πειραματικών μετρήσεων με χρήση προ-καταγεγραμμένων δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε μηχάνημα με τις παρακάτω προδιαγραφές:

- Intel(R) Core(TM) i5-2520M
- 4Gb ram
- Fedora 25 (64-bit)
- 20 sps
- 60s LTA frame
- 1.5s STA frame
- Αλγόριθμος διέγερσης: Classic STA/LTA (κατ. Διέγερσης 4. Αποδιέγερσης 2)
- Τα δεδομένα της επιτάχυνσης, της ταχύτητας και της μετατόπισης φιλτράρονται με ένα κατωπερατό IIR φίλτρο butterworth τέταρτης τάξης με $f_c=10\text{Hz}$
- Τα δεδομένα της ταχύτητας και της μετατόπισης για τον αλγόριθμο $\tau_c\text{-}P_d$ φιλτράρονται με ένα ανωπερατό IIR φίλτρο butterworth τέταρτης τάξης με $f_c=0.075\text{Hz}$. Συνολικά το φίλτρο που αφορά τον αλγόριθμο $\tau_c\text{-}P_d$ περιγράφεται από τη συνάρτηση μεταφοράς που παρουσιάζεται στο Σχήμα 40.



Σχήμα 40: Συνολική συνάρτηση μεταφοράς φίλτρου για τον $\tau_c\text{-}P_d$ αλγόριθμο. $\tau_c\text{-}P_d$ filter frequency response

Αναλυτικότερα, τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να καθοριστούν με ακρίβεια τα κατώφλια διέγερσης και αποδιέγερσης των αλγορίθμων, ώστε

να είναι εφικτός ο προσδιορισμός της ικανότητας ανίχνευσης σεισμών. Στη συνέχεια ακολούθησε καταγραφή του μεγέθους της σεισμικής ροπής και της μέσης περιόδου τ_c των καταγραφών, προκειμένου να δημιουργηθεί εκ νέου η συσχέτιση της μέσης περιόδου τ_c με το μέγεθος της σεισμικής ροπής. Ταυτόχρονα, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις χρόνου για την εκτίμηση της απόδοσης των αλγορίθμων και ακολούθησε σύγκριση μεταξύ των τιμών του Αζιμούθιου του γεγονότος και αυτού που υπολογίστηκε από την εφαρμογή.

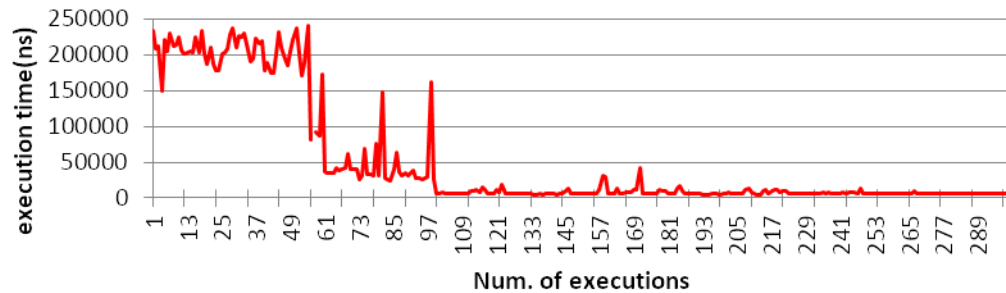
Στην τελική επεξεργασία, έγινε εισαγωγή των νέων δεδομένων με παραμετρική μορφή στην εφαρμογή και εγκατάσταση του οργάνου που σχεδιάστηκε σε χώρο, για τη λήψη πραγματικών μετρήσεων. Η λήψη των μετρήσεων τόσο από τα προ-καταγεγραμμένα δεδομένα όσο και από τις ληφθείσες τιμές, η οργάνωση και η παρουσίασή τους σε πίνακες για στατιστική επεξεργασία και η ανάλυση τόσο των αποτελεσμάτων ακολουθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

4.3 Χρόνοι εκτέλεσης αλγορίθμων

Η μέγιστη ταχύτητα επεξεργασίας των δεδομένων είναι το πιο κρίσιμο στοιχείο, ώστε να καθίσταται δυνατή η έγκαιρη σεισμική προειδοποίηση. Έτσι κρίνεται αναγκαία και απαραίτητη η αξιολόγηση της ταχύτητας επεξεργασίας των βασικών μεθόδων που σχετίζονται με τη διέγερση, την εκτίμηση και την έκδοση ειδοποιήσεων.

Οι μετρήσεις για τον χρόνο εκτέλεσης της κάθε μεθόδου (Πίνακας 10) παρουσιάζονται με χρήση της μέσης τιμής αφού έχουν καταμετρηθεί τριακόσιες κλήσεις της κάθε μεθόδου, ώστε να γίνεται εξομάλυνση τυχαίων αυξομειώσεων που οφείλονται πιθανότατα στον διαφορετικό φόρτο εργασίας του χρονοπρογραμματιστή του Λειτουργικού Συστήματος κατά την λήψη των μετρήσεων. Οι μετρήσεις έλαβαν χώρα σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του προγράμματος, η διαδικασία της βαθμολόγησης επιδόσεων (Benchmarking) έγινε με ακρίβεια nanosecond ενώ στον χρόνο εκτέλεσης της συνάρτησης έχει υπολογιστεί και ο χρόνος κλήσης της συνάρτησης και επιστροφής της στο κυρίως νήμα όταν αυτή τερματίζει. Ένας επιπλέον λόγος χρήσης της μέσης τιμής είναι η ενσωμάτωση των διαφορών στον χρόνο εκτέλεσης. Οι διαφορές προκύπτουν λόγω της μεταγλώττισης just-in-time (JIT), κατά την οποία μέθοδοι του κώδικα που καλούνται επανειλημμένα για να βελτιώσουν σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης τους, μεταγλωττίζονται σε κώδικα μηχανής για τον επεξεργαστή που εκτελεί την εφαρμογή. Η μεταγλώττιση

τέτοιου τύπου μειώνει σημαντικά τον χρόνο εκτέλεσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 41.



Σχήμα 41: Χρόνος εκτέλεσης πριν και μετά τη μεταγλώττιση JIT.
Execution time before and after JIT compiler

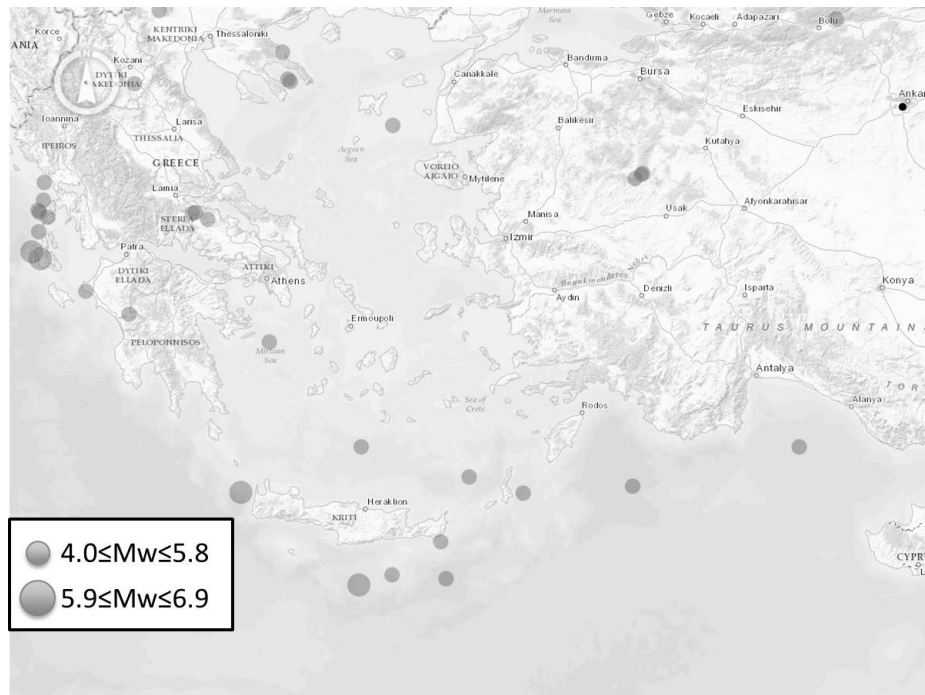
Πίνακας 10: Χρόνοι εκτέλεσης.
Execution times

Μέθοδος	Χρόνος εκτέλεσης
Classic STA/LTA	11.35μs
Delayed STA/LTA	18.05μs
Recursive STA/LTA	17.45μs
Z-Detect	270.16μs
Tauc-Pd	12.81ms
Dweet.IO	1.11s
mySQL	297.56ms
e-mail Notifie	1.88s
Xbee (single-hop 40Byte len, zero distance)	18.80μs (round trip time)

4.4 Έτοιμες καταγραφές

Χρησιμοποιώντας την υπηρεσία Wilber3 (IRIS - Incorporated Research Institutions for Seismology, 2016), συλλέχθηκαν τριάντα πέντε (35) καταγραφές σεισμικών γεγονότων, τα οποία έλαβαν χώρα στον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο, τη χρονική περίοδο 2010-2016 (Πίνακας 11). Το επίκεντρο κάθε γεγονότος φαίνεται στο Σχήμα 42. Τα κριτήρια επιλογής των συγκεκριμένων σεισμικών γεγονότων ήταν: α) το μέγεθός τους ($> M_w 4.9$) και β) να έχουν καταγραφεί από τον σταθμό ANTO(IU/GSN) με συντεταγμένες φ: 39.868°N και λ: 32.793°E - μέλος του Παγκόσμιου Σεισμικού Δικτύου (Global Seismic Network - GSN), που είναι εγκατεστημένος στην Άγκυρα-Τουρκία. Οι

καταγραφές έγιναν από ένα αισθητήρα Geotech KS-36000-I Borehole sensor, η συνάρτηση μεταφοράς του οποίου είναι διαθέσιμη στη σελίδα της υπηρεσίας.



Σχήμα 42: Χάρτης επικέντρων επιλεγμένων σεισμών, τη χρονική περίοδο 2010-2016.

Seismic events and their locations

Έπειτα από την επιλογή των επιθυμητών σεισμικών γεγονότων, βάσει των προδιαγραφών που αναφέρθηκαν, ακολούθησε ο έλεγχος λειτουργίας των αλγορίθμων διέγερσης, με είσοδο τις καταγραφές από τα 35 γεγονότα

Πίνακας 11: Επιλεγμένα σεισμικά γεγονότα, την περίοδο 2010-2016, στον ελλαδικό χώρο. Για κάθε γεγονός σημειώνεται το μέγεθός του, Το γεωγραφικό πλάτος/μήκος, το αζιμούθιο και η επικεντρική του απόσταση.

Seismic events list

A/A	Όνομα Γεγονότος	Γ. Πλάτος (°N)	Γ. Μήκος (°E)	Αζιμούθιο (°N)	M _w	Επικ. απόστ. (km)
1	2016-05-22 Mwr4.0 Greece	38.63	22.90	77.7	4.0	862.8
2	2016-05-30 Mwr4.0 Crete, Greece	34.56	25.52	45.4	4.0	873.2
3	2015-04-02 mwr4.1 Greece	40.92	22.21	94.0	4.1	903.6
4	2015-07-26 mwr4.1 Greece	40.46	23.96	92.2	4.1	752.8
5	2015-10-13 mwr4.2 Turkey	39.08	28.99	73.8	4.2	338.1

A/A	Όνομα Γεγονότος	Γ. Πλάτος (°N)	Γ. Μήκος (°E)	Αζιμούθιο (°N)	M _w	Επικ. απόστ. (km)
6	2015-11-17 mwr4.2 Greece	38.49	20.49	77.9	4.2	1070.6
7	2015-11-17 mwr4.3 Greece	38.71	20.51	79.2	4.3	1064.4
8	2015-12-14 mwr4.3 Greece-Albania B.	39.04	20.57	81.1	4.3	1052.9
9	2015-03-13 mwr4.4 Southern Greece	36.43	3.22	62.6	4.4	2602.2
10	2015-05-17 mwr4.4 Crete, Greece	34.52	26.29	42.2	4.4	827.4
11	2015-12-12 mwr4.5 Southern Greece	37.83	21.16	73.7	4.5	1031.8
12	2015-11-21 mwr4.7 Greece	38.73	20.48	79.3	4.7	1066.6
13	2013-09-16 MW4.8 Greece	38.70	22.72	78.3	4.8	876.2
14	2013-11-24 MW4.8 Turkey	40.82	31.85	142.8	4.8	132.7
15	2013-05-23 MW4.9 Greece	38.65	20.61	78.6	4.9	1056.7
16	2013-07-03 MW4.9 Greece	40.12	21.85	88.2	4.9	931.9
17	2015-11-18 mww5.0 Greece	38.84	20.56	79.8	5.0	1057.6
18	2012-02-14 MW5.2 Aegean Sea	40.15	24.08	89.6	5.2	742.9
19	2012-05-03 MW5.2 Turkey	39.14	29.09	74.5	5.2	327.8
20	2015-03-27 mww5.2 Crete, Greece	35.71	26.62	47.7	5.2	712.4
21	2015-12-26 mww5.2 Dodecanese Is.	35.52	27.39	42.9	5.2	678.3
22	2012-03-04 MW5.3 Aegean Sea	40.17	24.03	89.8	5.3	746.3
23	2016-02-15-mww53-southern-greece	37.56	21.78	71.6	5.3	988.5
24	2016-05-25-mww53-crete-greece	34.95	26.21	44.8	5.3	797.6
25	2012-01-27 MW5.4 Dodecanese Is.	36.06	25.09	55.6	5.4	797.1
26	2013-08-07 MW5.4 Greece	38.70	22.68	78.3	5.4	879.6
27	2014-04-04-MW56-Southern-Greece	37.25	23.77	66.9	5.6	835.9
28	2012-07-09 MW5.8 East. Med. Sea	35.60	28.95	34.3	5.8	582.8
29	2013-01-08 MW5.8 Aegean Sea	39.67	25.54	85.6	5.8	620.4
30	2011-05-19 MW5.9 Turkey	39.13	29.07	74.4	5.9	329.9

A/A	Όνομα Γεγονότος	Γ. Πλάτος (°N)	Γ. Μήκος (°E)	Αζιμούθιο (°N)	M _w	Επικ. απόστ. (km)
31	2013-12-28 MW5.9 Turkey	36.05	31.32	16.5	5.9	443.8
32	2015-04-16-mww60-crete-greece	38.26	20.39	43.6	6.0	1084.7
33	2014-01-26-mw61-greece	38.19	20.51	76.2	6.1	1076.6
34	2013-06-15-mw63-crete-greece	34.45	25.04	46.5	6.3	912.8
35	2013-10-12-mw68-crete-greece	35.53	23.37	57.0	6.8	958.4

4.4.1 Αποτελέσματα επιτυχίας διεγέρσεων

Στο σύνολο των τριάντα πέντε σεισμικών καταγραφών, που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία, οι αλγόριθμοι διέγερσης διεγέρθηκαν με επιτυχία, δίνοντας αποτέλεσμα σεισμικής δραστηριότητας, και στις τριάντα πέντε περιπτώσεις. Έτσι, το ποσοστό επιτυχίας των διεγέρσεων ανέρχεται στο **100.0%** (Πίνακας 12).

Πίνακας 12: Ποσοστό επιτυχών διεγέρσεων. Σε σύνολο 35 δειγμάτων υπήρξαν 35 διεγέρσεις. Percentage of successful triggering

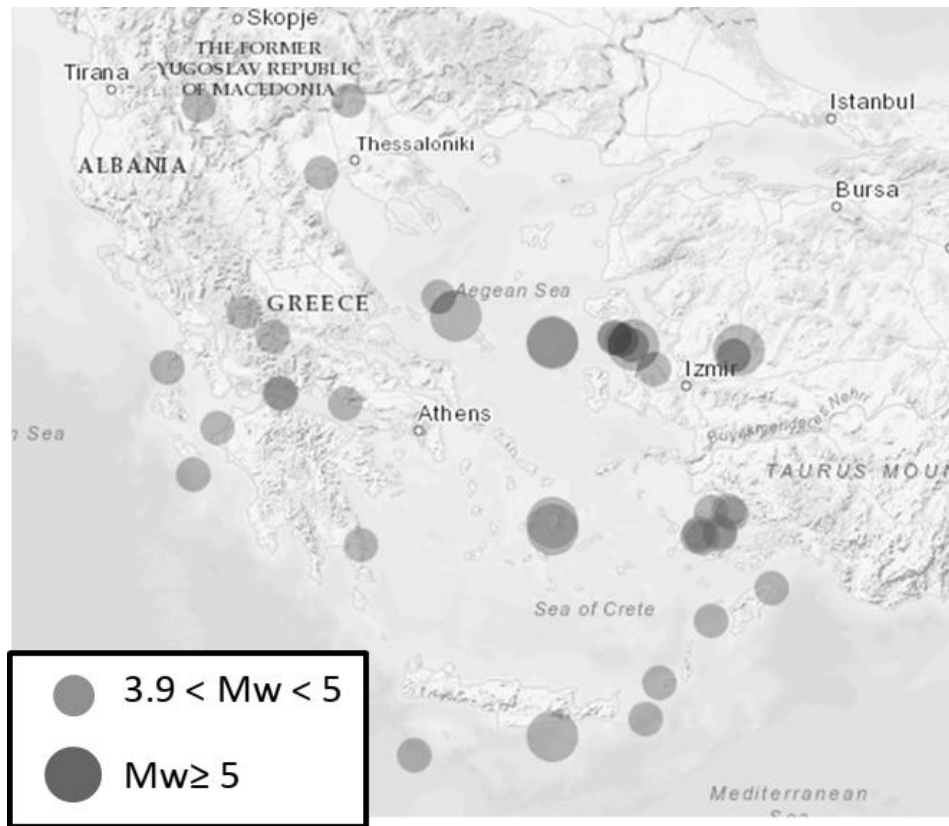
Ευαισθησία διέγερσης	
Ομάδες	Αρίθμηση
Διεγέρθηκαν	35
Δεν διεγέρθηκαν	0
Άθροισμα	35
%	100.0%

4.4.2 Αποτελέσματα μεγέθους Σεισμικής Ροπής

2.4.5.4 Δεύτερη ομάδα μετρήσεων

Τα δεδομένα είναι και αυτά από τον ευρύτερο Ελλαδικό χώρο (Σχήμα 43) έχουν μεγέθη $3.9 \leq M_w \leq 6.4$ και καταγράφηκαν το χρονικό διάστημα 3/5/2017 – 1/1/2018. Οι σταθμοί καταγραφής που επιλέχθηκαν έχουν επικεντρική απόσταση από τα γεγονότα $< 180\text{km}$, προκειμένου να θεωρηθεί η μέση σεισμική περίοδος σταθερή. Επιπλέον, για το ίδιο γεγονός επιλέχθηκαν διαφορετικοί σταθμοί καταγραφής και διαφορετικές δειγματοληψίες. Η χρήση διαφορετικών οργάνων και δειγματοληψιών θα βοηθήσει στον έλεγχο της συμπεριφοράς των αλγορίθμων διέγερσης καθώς και του $\tau_c\text{-}P_d$ για διαφορετικό συχνοτικό περιεχόμενο στο σήμα εισόδου. Αναλυτικά παρέχονται

παρακάτω (Πίνακας 13) πληροφορίες σχετικά με κάθε καταγραφή που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 43: Τα νέα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν. *Locations of the events.*

Πίνακας 13: Αναλυτικά δεδομένα σεισμών και καταγραφών. *Seismic events detailed data*

ID	Όνομα γεγονόςτος	Γ. Πλάτος (°N)	Γ. Μήκος (°E)	Εστιακό βάθος (km)	M_L	M_w	Σταθμοί καταγραφής			Ελάχιστη / Μέγιστη Απόσταση (km)	
1	15-Jun-17_10:37:04	38.897	26.259	13.5	4.1	3.9	CHOS	SMG		59.5	141.7
2	03-May-17_13:53:25	35.380	26.823	5.8	4.1	3.9	KARP	ZKR	ARG	35.9	149.4
3	01-Jan-18_22:13:52	41.207	22.869	7.6	4.0	4.0	GRG	SOH	THE	48.1	64.3
4	28-Sep-17_10:00:30	37.526	20.897	12.8	4.1	4.1	RLS	KEF3	LAKA	77.2	123.8
5	15-Jul-17_3:05:14	38.343	22.027	3.8	4.0	4.1	KLV	DRO	VLS	34.9	127.2
6	15-Jul-17_1:22:02	38.340	21.992	4.4	4.1	4.1	KLV	PVO	VLS	35.7	124.2
7	19-Jun-17_4:55:37	37.999	21.205	9.7	4.0	4.1	DRO	VLS	KEF3	44.8	79.1

ID	Όνομα γεγονόςτος	Γ. Πλάτος (°N)	Γ. Μήκος (°E)	Εστιακό βάθος (km)	M _L	M _w	Σταθμοί καταγραφής			Ελάχιστη / Μέγιστη Απόσταση (km)	
8	24-Sep-17_16:57:17	36.931	27.329	11.9	4.5	4.2	KOSK	ARG	KARP	37.0	154.3
9	16-Jun-17_13:25:52	38.814	26.482	30.3	4.1	4.2	CHOS	SMG		60.4	127.0
10	12-Jun-17_14:19:47	38.870	26.354	11.6	4.4	4.2	PRK	SIGR		42.4	57.4
11	14-May-17_4:46:06	38.907	21.912	24.1	4.1	4.2	ANX	SERG	XOR	34.8	121.8
12	25-Dec-17_23:47:05	38.594	20.561	4.7	4.4	4.3	LKD2	KEF4	EVR	23.2	99.0
13	22-Nov-17_22:37:35	40.508	22.523	5.6	4.2	4.3	THE	GRG	FNA	39.8	101.0
14	13-Aug-17_16:35:22	37.127	27.758	9.0	4.1	4.3	ARG	KARP		106.4	183.5
15	21-Jul-17_5:04:01	36.915	27.593	12.3	4.4	4.3	KOSK	ARG	KARP	53.3	138.8
16	21-Jul-17_1:35:44	36.941	27.600	8.4	4.4	4.3	KOSK	ARG	KARP	59.3	159.6
17	17-Sep-17_14:29:34	39.288	24.012	6.9	4.1	4.4	SKY	XOR		64.6	71.2
18	21-Jul-17_2:12:35	36.880	27.378	7.7	4.5	4.4	KOSK	ARG	KARP	38.4	149.2
19	14-Jun-17_7:10:04	34.620	23.707	16.0	4.2	4.4	GVD	IMMV	IDI	42.5	131.0
20	07-Nov-17_2:40:34	36.366	28.250	55.9	4.7	4.5	ARG	KOSK	KARP	20.5	133.8
21	16-Jun-17_23:42:45	36.809	23.018	59.0	4.8	4.5	KTHA	ATH		61.4	143.4
22	25-Dec-17_5:13:50	38.577	26.768	10.6	4.6	4.6	CHOS	PRK		66.1	86.1
23	11-Sep-17_16:20:15	39.147	21.526	8.3	4.9	4.6	EVR	THL	VLS	35.5	135.1
24	31-Dec-17_4:02:19	38.239	22.837	9.2	4.6	4.7	KLV	ATH		27.2	82.6
25	21-Jul-17_17:09:50	36.890	27.315	23.1	4.8	4.7	KOSK	ARG	KARP	57.7	156.6
26	03-Jul-17_13:53:44	35.000	26.642	5.0	4.3	4.7	ZKR	KARP	IACM	40.8	147.1
27	17-Jun-17_3:40:37	38.883	26.259	14.1	4.6	4.7	SIGR	CHOS		50.5	58.0
28	14-Aug-17_2:43:49	37.153	27.704	4.8	4.4	4.8	KOSK	ARG		78.4	110.7
29	03-Jul-17_11:18:21	41.164	20.967	10.0	4.9	4.8	FNA	KZN	GRG	55.1	122.9
30	28-May-17_11:04:59	38.710	27.778	30.2	4.6	4.8	SMG	PRK	CHOS	138.7	154.8
31	17-May-17_11:30:32	36.029	27.494	21.8	5.1	4.8	ARG	KARP	ZKR	60.0	153.9
32	13-Aug-17_11:16:53	37.130	27.679	7.8	4.6	4.9	KOSK	ARG	KARP	75.2	181.7
33	27-May-17_15:53:23	38.761	27.830	23.6	5.2	4.9	PRK	SMG	CHOS	145.8	160.5
34	11-Oct-17_22:49:44	39.114	24.227	11.6	5.0	5.0	SKY	KYMI	XOR	37.8	93.6
35	22-Jun-17_2:48:53	38.810	26.492	13.5	4.8	5.0	CHOS	SIGR	SMG	60.7	126.5
36	15-Jul-17_20:30:15	34.819	25.461	5.0	5.3	5.1	IACM	ZKR		64.7	76.5
37	08-Aug-17_7:42:21	37.028	27.605	5.2	5.1	5.2	ARG	KARP	KARP	101.5	169.1

ID	Όνομα γεγονόςτος	Γ. Πλάτος (°N)	Γ. Μήκος (°E)	Εστιακό βάθος (km)	M _L	M _w	Σταθμοί καταγραφής			Ελάχιστη / Μέγιστη Απόσταση (km)	
							CHOS	SIGR		61.1	64.0
38	17-Jun-17_19:50:05	38.850	26.430	12.4	5.2	5.3	CHOS	SIGR		61.1	64.0
39	12-Jun-17_12:28:38	38.839	26.362	11.8	6.1	6.3	PRK	SIGR		45.9	60.3
40	20-Jul-17_22:31:11	36.964	27.433	10.2	6.2	6.4	ARG	KARP		103.6	159.1

Το σύνολό των 126 καταγραφών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται παρακάτω (Πίνακας 14). Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την λήψη των μετρήσεων είναι από την σελίδα του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου (Bianchi et al., 2013-2016). Χρησιμοποιήθηκαν όπου ήταν διαθέσιμοι, ρυθμοί δειγματοληψίας 100, 80 και 20 SPS. Οι σταθμοί έφεραν τους παρακάτω αισθητήρες CMG-3ESPC-100, CMG-3ESPC-120, CMG-3ESPC-60, CMG-3T-120, CMG-40T-30, KS2000M, LE-3D-20, STS-2 και TRILLIUM 120P (Πίνακας 15). Αφού υπολογίστηκε η μέση σεισμική περίοδος ανά γεγονός, εφαρμόστηκε η εξίσωση 2.15 προκειμένου να υπολογιστεί η σεισμική ροπή. Από τις 126 καταγραφές το σύστημα διεγέρθηκε 115 φορές (Πίνακας 16), ποσοστό 91.27%.

Πίνακας 14: Μετρήσεις σταθμών ανά σεισμικό γεγονός. Με X σημειώνονται οι ανεπιτυχείς διεγέρσεις ενώ στα πεδία που είναι κενά, δεν υπήρχαν διαθέσιμες μετρήσεις. Measurements per event. Notice that X marks unsuccessful triggering.

Null cells indicate lack of data.

A/A	Όνομα γεγονόςτος	M _w	Σταθμός 1 100, 80, 20 sps			Σταθμός 2 100, 80, 20 sps			Σταθμός 3 100, 80, 20 sps			μέσο τ _c (s)	M _w - Kanamori
1	15-Jun-17_10:37:04	3.9	0.38		0.7	0.72					0.60	4.2	
2	03-May-17_13:53:25	3.9	0.27			0.7			0.48		0.48	3.9	
3	01-Jan-18_22:13:52	4			0.37			0.25		0.34	0.32	3.3	
4	28-Sep-17_10:00:30	4.1	0.77			X			0.71		0.74	4.5	
5	15-Jul-17_3:05:14	4.1	0.66			0.52			1.5		0.89	4.8	
6	15-Jul-17_1:22:02	4.1	0.88			0.42			0.31		0.54	4.0	
7	19-Jun-17_4:55:37	4.1	X			0.42			1.44		0.93	4.8	
8	24-Sep-17_16:57:17	4.2	0.32			0.48			0.3		0.37	3.5	

A/A	Όνομα γεγονότος	M _w	Σταθμός 1 100, 80, 20 sps			Σταθμός 2 100, 80, 20 sps			Σταθμός 3 100, 80, 20 sps			μέσο τ _c (s)	M _w -Kanamori
9	16-Jun-17_13:25:52	4.2	0.27		0.33	0.3					0.30	3.2	
10	12-Jun-17_14:19:47	4.2	0.5			0.3	0.33				0.38	3.5	
11	14-May-17_4:46:06	4.2	0.29			0.45		0.71			0.48	3.9	
12	25-Dec-17_23:47:05	4.3	0.38			0.33		1.13			0.61	4.2	
13	22-Nov-17_22:37:35	4.3	0.33		3.78	2.08	2.13	1.38	1.29		1.72	5.7	
14	13-Aug-17_16:35:22	4.3				0.39		0.59			0.49	3.9	
15	21-Jul-17_5:04:01	4.3	0.33			0.55		0.6			0.49	3.9	
16	21-Jul-17_1:35:44	4.3	0.35			0.35		0.69			0.46	3.8	
17	17-Sep-17_14:29:34	4.4	0.37			1.28	X				0.83	4.7	
18	21-Jul-17_2:12:35	4.4	0.34			0.43		0.33			0.34	3.3	
19	14-Jun-17_7:10:04	4.4	0.19			0.55			0.86		0.53	4.0	
20	07-Nov-17_2:40:34	4.5	2.25			0.53		0.46			1.08	5.1	
21	16-Jun-17_23:42:45	4.5	0.8		0.74	0.54					0.69	4.4	
22	25-Dec-17_5:13:50	4.6	0.39		0.33	1.58					0.77	4.5	
23	11-Sep-17_16:20:15	4.6	0.77			0.48		0.63			0.63	4.3	
24	31-Dec-17_4:02:19	4.7	0.65			0.61					0.63	4.3	
25	21-Jul-17_17:09:50	4.7	0.52			0.36		0.43			0.44	3.7	
26	03-Jul-17_13:53:44	4.7	0.64			1.18		0.65			0.92	4.8	
27	17-Jun-17_3:40:37	4.7	0.47		0.6	0.31	0.5				0.47	3.8	
28	14-Aug-17_2:43:49	4.8				0.61		0.42			0.52	4.0	
29	03-Jul-17_11:18:21	4.8	0.88		X	0.35	X	1.2			0.81	4.6	
30	28-May-17_11:04:59	4.8	0.77			0.56		1.03	X		0.79	4.6	
31	17-May-17_11:30:32	4.8	0.42			0.63		0.42			0.49	3.9	
32	13-Aug-17_11:16:53	4.9	0.35			0.68		0.44			0.49	3.9	
33	27-May-17_15:53:23	4.9	0.65			1.2		X		X	0.93	4.8	
34	11-Oct-17_22:49:44	5	0.3			0.43		0.56	0.79		0.52	4.0	
35	22-Jun-17_2:48:53	5	X		X	0.28	2.93	0.54			1.25	5.3	
36	15-Jul-17_20:30:15	5.1	0.37			0.43					0.40	3.6	
37	08-Aug-17_7:42:21	5.2				1.11		0.65			0.88	4.8	
38	17-Jun-17_19:50:05	5.3	0.53		1.23	1.85	1.73				1.34	5.4	
39	12-Jun-17_12:28:38	6.3	3.03			1.18	1.54				1.92	5.9	
40	20-Jul-17_22:31:11	6.4	0.81			1.11					0.96	4.9	

Πίνακας 15: Αντιστοίχιση σταθμών - αισθητήρων. List of the sensors used on the stations

Σταθμός	Αισθητήρας	Σταθμός	Αισθητήρας
ALN	CMG-3ESPC-100	KSTL	CMG-3ESPC-60
CHOS		STIA	
FNA		EVR	
GRG		KYMI	
HORT		ATH	
IGT	CMG-3ESPC-120	KLV	STS-2
KPRO		KZN	
KRND		THL	
LKD2		IACM	
OUR		PRK	
SIGR		GVD	
XOR		ZKR	
KOSK		IMMV	
MAKR		KARP	
TSLK		KTHA	
LOUT		IDI	
PSDA	CMG-40T-30	DRO	TRILLIUM 120P
THAL		PVO	
VILL		NEST	
NISR		SMG	
AXAR		SOH	
SKY	KS2000M	THE	CMG-3T-120
EAG2	LE-3D-20	VLS	
EAG3		SERG	
KEF3		ATAL	
KEF4		LAKA	
RLS		ANX	
ARG			

Πίνακας 16: Ποσοστό επιτυχίας. Σε σύνολο 126 δειγμάτων υπήρξαν 115 διεγέρσεις με 60% ορθή εκτίμηση μεγέθους, Percentage of successful triggering - magnitude estimation

Kanamori M_w - Control M_w >0.5		Ευαισθησία διεγέρσεων	
Ομάδες	Αρίθμηση	Ομάδες	Αρίθμηση
$\Delta M_w \leq 0.5$	16	Διεγέρθηκαν	115
$\Delta M_w > 0.5$	24	Δεν διεγέρθηκαν	11
Άθροισμα	40	Άθροισμα	126
%	60%	%	91.27%

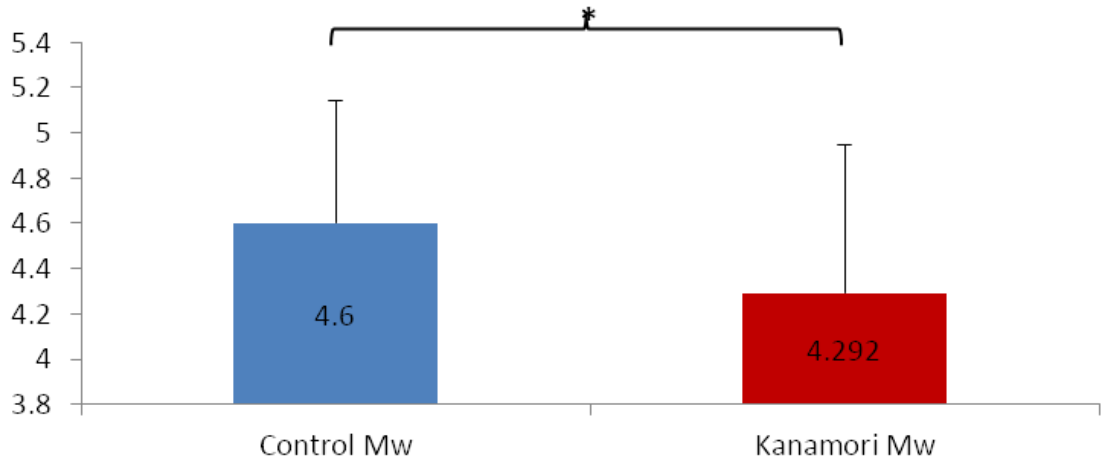
Η στατιστική επεξεργασία που ακολουθήθηκε περιλαμβάνει περιγραφικά στατιστικά (Πίνακας 17) μεταξύ των δύο πληθυσμών (control M_w - Kanamori M_w). Παρατίθενται η μέση τιμή, η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή η τυπική απόκλιση και η διακύμανση των τιμών του κάθε συνόλου τιμών. Η σύγκριση των μέσων τιμών της εξίσωσης 2.15, σε σύγκριση με την μέση τιμή των γεγονότων που ανήκουν στην ομάδα ελέγχου έδωσαν τα εξής:

Συγκρίνοντας την μέση τιμή του μεγέθους σεισμικής ροπής που υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 2.15 ως προς την μέση τιμή του μεγέθους σεισμικής ροπής του πληθυσμού ελέγχου, παρατηρείται μια μείωση της μέσης τιμής του μεγέθους σεισμικής ροπής ως προς την μέση τιμή του M_w του πληθυσμού που υπολογίστηκε με βάση την εξίσωση 2.15. (εξ.2.15: 4.3 ± 0.7 vs control: 4.6 ± 0.5)

Έπειτα από τα περιγραφικά χαρακτηριστικά των πληθυσμών χρησιμοποιήθηκε η δοκιμασία t-test, θεωρώντας ότι οι διακυμάνσεις των δύο συγκρινόμενων πληθυσμών είναι ίσες. Η δοκιμασία έδειξε ότι η σύγκριση της εξίσωσης 2.15 παρουσιάζει στατιστική σημαντικότητα ως προς τον πληθυσμό ελέγχου ($p=0.03$). Η σύγκριση των μέσων τιμών των 2 ομάδων παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 44

Πίνακας 17: Περιγραφικά χαρακτηριστικά. Descriptive statistics

Descriptive Statistics	N	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μ. Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Διακύμανση
Control M_w	40	3.9	6.4	4.6	0.543	0.295
Kanamori M_w	40	3.2	5.9	4.292	0.652	0.425



Σχήμα 44: Σύγκριση μέσων τιμών σεισμικής ροπής. Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή των καταγραφών, το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην ομάδα ελέγχου, το κόκκινο χρώμα στην εξίσωση 2.15. Οι αγκύλες αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση (standard deviation) και $*= p \leq 0.05$.

M_w Mean values comparison

4.4.3 Αποτελέσματα υπολογισμού Αζιμούθιου

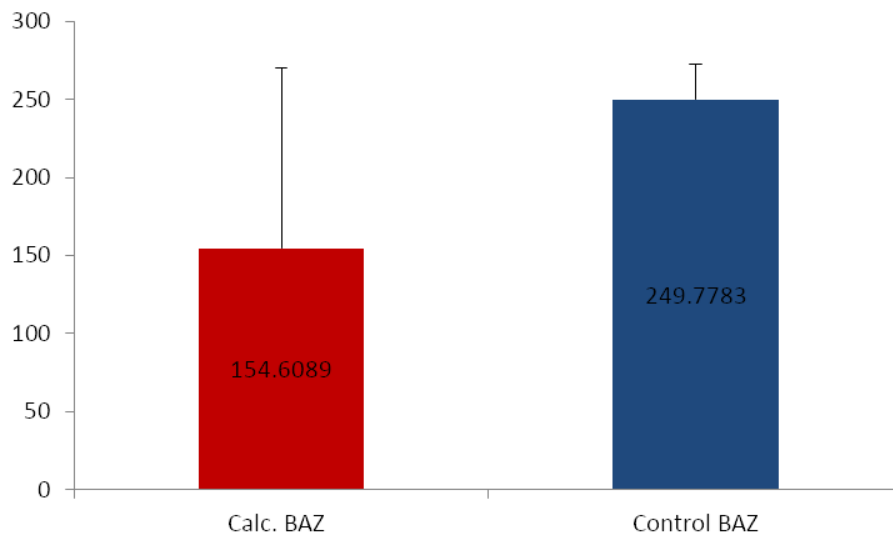
Κατά αντιστοιχία της στατιστικής επεξεργασίας που πραγματοποιήθηκε για τις τιμές του μεγέθους των σεισμικών γεγονότων, στην προηγούμενη παράγραφο, θα ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία στο τελευταίο σύνολο δεδομένων. Η μέση τιμή του οπισθοαζιμούθιου που υπολογίστηκε μέσω της εξίσωσης 3.18 από τον πληθυσμό που των δεδομένων που συλλέχθηκε από τον σταθμό του συστήματος E.A.SY, σε σχέση με τον πληθυσμό ελέγχου, εμφανίστηκε μικρότερη (Πίνακας 18), σε σχέση με τη θεωρητική μέση τιμή του οπισθοαζιμούθιου της ομάδας ελέγχου (εξ.3.18: 154.6 ± 115.4 vs control: 249.77 ± 22.77) η δε διακύμανση του οπισθοαζιμούθιου εμφανίζεται πενταπλασιασμένη σε σχέση με την διακύμανση του πληθυσμού ελέγχου. Ο έλεγχος για τη στατιστική διαφορά μεταξύ των δυο πληθυσμών πραγματοποιήθηκε μέσω της δοκιμασίας student's t test, θεωρώντας ότι οι διακυμάνσεις των δύο πληθυσμών είναι ίσες. Η σύγκριση των μέσων τιμών των 2 ομάδων παρουσιάζεται γραφικά στο Σχήμα 45. Η δοκιμασία T-Test δεν έδειξε στατιστική διαφορά, που σημαίνει ότι η υπόθεση ότι οι διακυμάνσεις των πληθυσμών των υπολογισμένων τιμών σε σχέση με τις τιμές έλεγχου ταυτίζονται, καταρρίπτεται. Λόγω της τεράστιας διαφοράς στην διακύμανση των δυο συνόλων πως η χρήση της εξίσωσης 3.18 σε συνάρτηση με τα

δεδομένα ενός γεώφωνου με συχνότητα συντονισμού 4.5Hz δεν ενδείκνυται για την συγκεκριμένη εφαρμογή

Πίνακας 18: Σύγκριση περιγραφικής στατιστικής των τιμών Οπισθοαζιμούθιου που υπολογίστηκαν με τις τιμές της ομάδας ελέγχου. Υπολογίζονται οι μέσοι όροι, η τυπική απόκλιση, το τυπικό σφάλμα και οι ελάχιστες/ μέγιστες τιμές.

Descriptive statistics

Descriptive Statistics	N	Ελάχιστη Τιμή	Μέγιστη Τιμή	Μ. Τιμή	Τυπική Απόκλιση	Διακύμανση
Cal. BAZ	35	7.58	357.23	154.6089	115.49691	13339.535
Control BAZ	35	196.49	322.82	249.7783	22.77545	518.721



Σχήμα 45: Σύγκριση μέσων τιμών Αζιμούθιου. Οι μπάρες αντιπροσωπεύουν τη μέση τιμή των καταγραφών, το μπλε χρώμα αντιστοιχεί στην ομάδα ελέγχου και το κόκκινο χρώμα στην υπολογιζόμενη τιμή του Αζιμούθιου. Οι αγκύλες αντιστοιχούν στην τυπική απόκλιση (standard deviation)

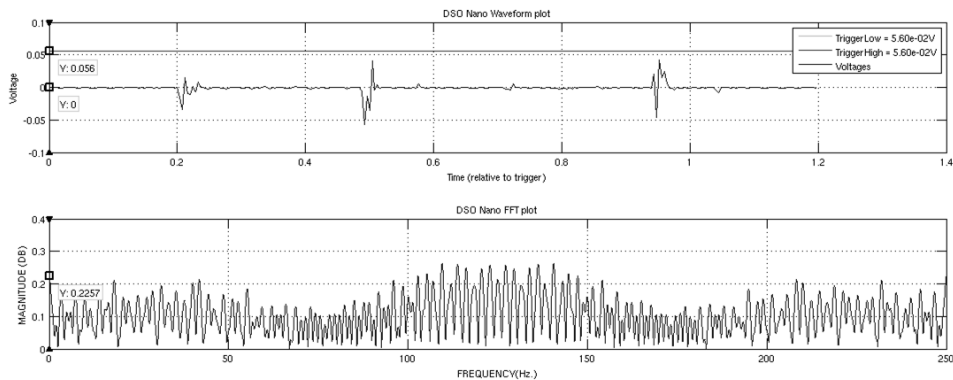
Azimuth means compared

4.5 Αποτελέσματα λειτουργίας σταθμού

Ο έλεγχος του γεώφωνου πραγματοποιήθηκε με χρήση ψηφιακού παλμογράφου, τοποθετημένου στην κατακόρυφη συνιστώσα του αισθητήρα. Τα δεδομένα αποθηκεύτηκαν σε .xml αρχείο, το οποίο επεξεργάστηκε και παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Σχήμα 46).

Η λειτουργία του καταγραφικού του σταθμού ελέγχθηκε με βάσει τις τιμές ρυθμίσεων που θα έπρεπε να έχει αφού προγραμματίστηκε στις επιθυμητές

ρυθμίσεις από τον μικροελεγκτή που καθορίζει τις λειτουργίες του καταγραφικού (Πίνακας 19).

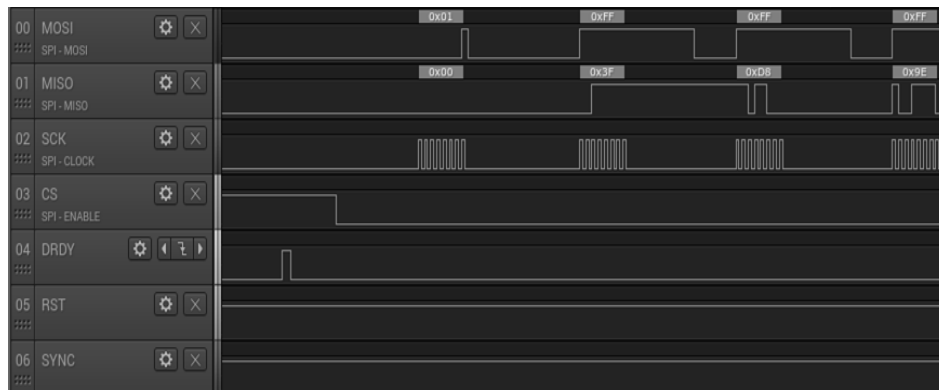


Σχήμα 46: Δεδομένα ψηφιακού παλμογράφου (πάνω καταγραφή πλάτους, κάτω καταγραφή φασματογράφου). DSO data

Πίνακας 19: Προκαθορισμένες ρυθμίσεις καταγραφικού – Τάσεις αναφοράς (στάθμες). Default digitiser settings – Voltage references (counts)

Καταχωρητής	Τιμή	Ανάλυση	
STATUSreg	00110000 ₍₂₎	FactID = 0011, Most Significant Bit First, Auto-Calibration = Disabled, Buffer = Disabled, Reserved	
MUXreg	00001000 ₍₂₎	AIN0 – AINCOM	
ADCONreg	00100000 ₍₂₎	0 - Reserved, F _{CLKIN} , Sensor Detect = OFF, PGA=1	
DRATEreg	10100001 ₍₂₎	1000sps	
IOreg	11100001 ₍₂₎	(default state)	
Δοκιμαστικές τάσεις από τον ψηφιοποιητή	Καθ. Τιμή (στάθμες)	Τάση αναφοράς	ΔV (μV)
	8388607 ₍₁₀₎	5V	390.228
	5518097 ₍₁₀₎	3.3V	11214.188

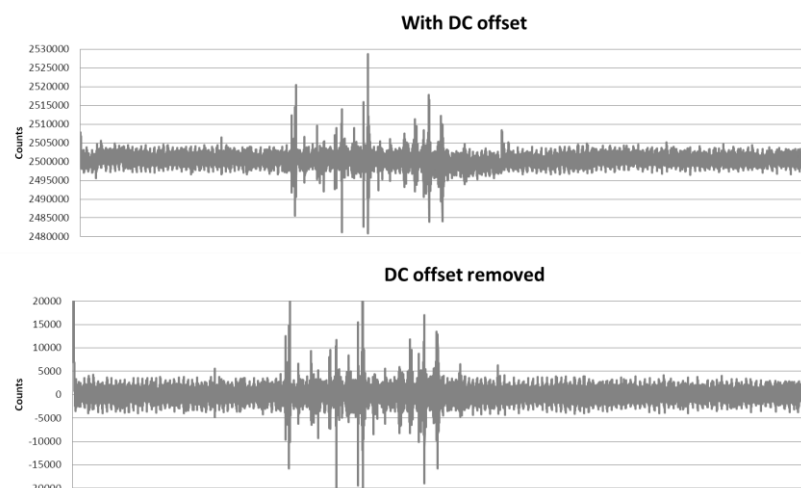
Συνεχίζοντας, το καταγραφικό ελέγχθηκε μέσω λογικού αναλυτή για την ορθή επικοινωνία μεταξύ μικροελεγκτή και μονάδας ψηφιοποίησης. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 47, ο χρονισμός γίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.



Σχήμα 47: Δεδομένα λογικού αναλυτή.

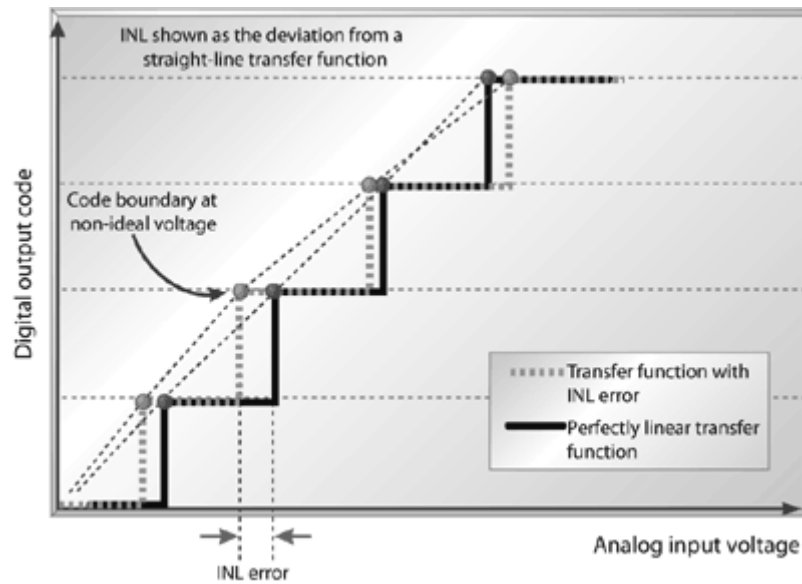
Logic analyzer data

Η έξοδος από την μονάδα ASP έχει εύρος 0-5V αλλά χρησιμοποιείται διαφορετική αντισταθμιστική τάση (offset voltage) για τη δημιουργία άξονα συμμετρίας. Το γεώφωνο χρησιμοποιεί τα +2.5V και δημιουργεί μια συμμετρική έξοδο $\pm 2.5V$, ενώ το επιταχυνσιόμετρο χρησιμοποιεί τα +1.65V και δημιουργεί μια συμμετρική έξοδο $\pm 1.32V$. Για να αποφευχθούν αλλοιώσεις στο σήμα εξόδου του ψηφιοποιητή εξαιτίας μικροδιαφορών που παρατηρούνται στις τιμές των αντισταθμιστικών τάσεων σε σχέση με τις ονομαστικές τιμές τους, πραγματοποιείται η αφαίρεση τους αλγοριθμικά, με χρήση ανωπερατού φίλτρου. Όπως φαίνεται και παρακάτω (Σχήμα 48), η αντισταθμιστική τάση εξαλείφεται μόλις έρθει σε ηρεμία το φίλτρο, για αυτό κατά την εκκίνηση αγνοούνται τα πρώτα δεδομένα, με βάση τον απαιτούμενο χρόνο ηρεμίας.



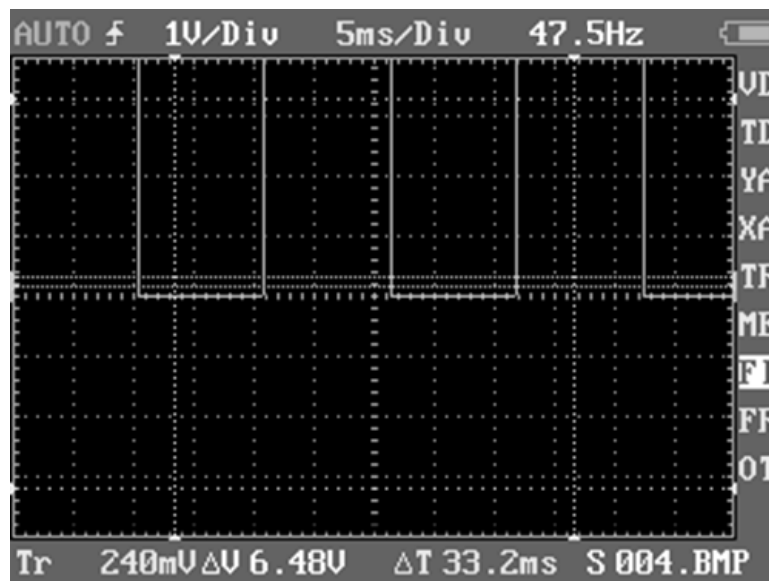
Σχήμα 48: Πριν (πάνω) και μετά (κάτω) την αφαίρεση της αντισταθμιστικής τάσης. Before and after DC offset removal

Μόλις ολοκληρωθεί η ψηφιοποίηση των δεδομένων από τους αισθητήρες, αφαιρούνται από αυτά οι αντίστοιχες αντισταθμιστικές τάσεις. Η ψηφιοποίηση γίνεται μέσω της εξίσωσης 3.13β (όπου στα FSC και OSC αντιστοιχούνται τιμές καταχωρητών και α , β σταθερές) και του firmware της μονάδας ψηφιοποίησης. Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε έλεγχος λειτουργίας με τάσεις αναφοράς +5V +3.3V (Πίνακας 19). Οι διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται μεταξύ των μετρούμενων τιμών και των τάσεων αναφοράς δεν οφείλονται σε σφάλματα αντιστάθμισης-κέρδους (offset-gain errors), καθώς και τα δύο έχουν αφαιρεθεί από το καταγραφικό, χρησιμοποιώντας τις λειτουργίες βαθμονόμησης του ψηφιακού μετατροπέα. Συνεπώς η παρουσία τους μπορεί να οφείλεται σε διακυμάνσεις των τάσεων αναφοράς που χρησιμοποιήθηκαν για τη λήψη των μετρήσεων. Ο σταθεροποιητής τάσης του κυκλώματος (TPS735) του MSP432 launchpad έχει σφάλμα $\pm 1\%$ στην τάση εξόδου, γεγονός που αντιστοιχεί σε $\pm 33\text{mV}$ για την τάση τροφοδοσίας +3.3V. Η τάση +5V του MSP432 launchpad δεν διέρχεται από κάποιον σταθεροποιητή, αλλά προέρχεται κατευθείαν από το τροφοδοτικό του σταθμού. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή, η έξοδος +5V έχει διακύμανση $\pm 1.5\%$ που αντιστοιχεί σε $\pm 75\text{mV}$, συνεπώς οι διαφορές που παρατηρήθηκαν είναι δικαιολογημένες. Ένας άλλος λόγος για την πρόκληση των συγκεκριμένων διακυμάνσεων, είναι το μη γραμμικό σφάλμα ολοκλήρωσης (Integral Non-linear - INL) που προκύπτει από τη συσσώρευση μη γραμμικών σφαλμάτων διαφορίσης (Differential Non-Linear - DNL). Ορίζεται ως η απόκλιση σε στάθμες από την αρχή της χαρακτηριστικής μεταφοράς του μετατροπέα, μέχρι τη μετρούμενη τιμή (Σχήμα 49). Τα συγκεκριμένα σφάλματα, δεδομένου ότι οφείλονται στην εκάστοτε αρχιτεκτονική που ακολουθείται για την κατασκευή του μετατροπέα, δεν μπορούν να αφαιρεθούν από το καταγραφικό με τη λειτουργία βαθμονόμησης. Στον μετατροπέα από αναλογικό σε ψηφιακό, που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία (ADS1256), μεταβολές $\pm 3\text{-}10\text{mV}$ θεωρούνται αναμενόμενες λόγω τέτοιων σφαλμάτων.



Σχήμα 49: Μη γραμμικό σφάλμα ολοκλήρωσης (Staller, 2005). INL error

Η μονάδα ελέγχου απρόσκοπτης λειτουργίας λειτουργεί ικανοποιητικά. Το άρθρωμα ελέγχου τάσης ειδοποιεί για τυχόν υπερτάσεις/ υποτάσεις που συμβαίνουν σε περίπτωση που οι εποπτευόμενες τάσεις διαφοροποιηθούν κατά $\pm 250\text{mV}$ από την ονομαστική τους τιμή. Το άρθρωμα του watchdog χρονιστή, αν δεν απενεργοποιηθεί μέσα σε μια χρονική περίοδο 240 sec, ειδοποιεί για σφάλμα. Για τον λόγο αυτόν ο watchdog χρονιστής επανεκκινείται με τετραγωνικό παλμό, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 50.



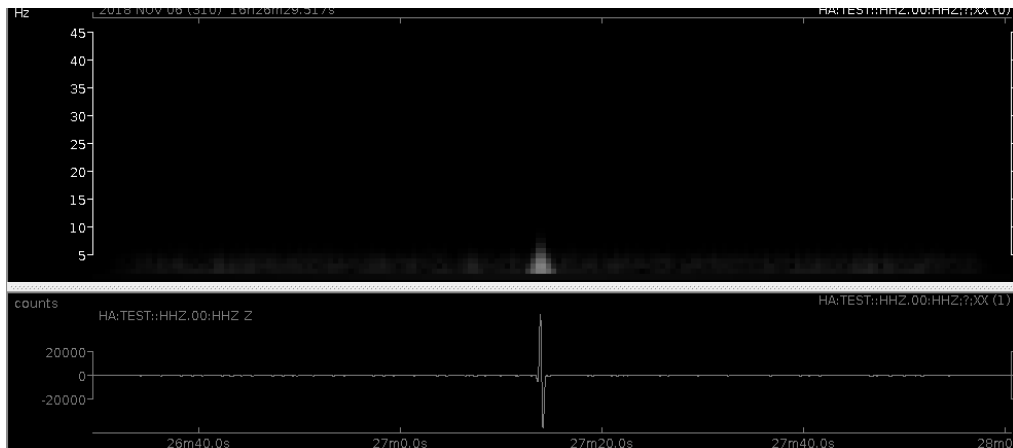
Σχήμα 50: Παλμοσειρά επανεκκίνησης WDT.

WDT reset pulse

Εφόσον το υλικό και το λογισμικό του σταθμού λειτουργεί ικανοποιητικά, το επόμενο βήμα ήταν η δοκιμή της συσκευής πρώτα σε ελεγχόμενο περιβάλλον, με χρήση σεισμικής πηγής, και στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε εγκατάστασή της σαν σταθμός σε σταθμό του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, με προσδιοριστικό “TES5”.

4.5.1 Σεισμική πηγή

Το πείραμα που πραγματοποιήθηκε ήταν καταγραφή πτώσης αντικειμένου από ύψος και της πρόσκρουσης του στο έδαφος. Συγκεκριμένα, αντικείμενο μάζας $m=1\text{Kg}$ αφέθηκε ελεύθερο από ύψος ενός μέτρου και προσέκρουσε σε επίπεδη μεταλλική πλάκα με διαστάσεις $(8.5 \times 12.5 \times 0.8\text{cm})$. Πραγματοποιήθηκε οριζοντίωση του οργάνου, κάνοντας χρήση της αεροστάθμης τύπου κάψας που φέρει το όργανο, ενώ για τον προσανατολισμό του ως προς τον Βορρά έγινε χρήση πυξίδας. Η απόσταση αισθητήρα - πηγής ορίστηκε στο ένα μέτρο. Παρακάτω παρουσιάζεται η καταγραφή του γεγονότος (Σχήμα 51).



**Σχήμα 51: Καταγραφή πρόσκρουσης αντικειμένου μάζας 1 kg από ύψος 1m.
Impact of object with mass 1kg falling freely from 1m height**

4.5.2 Καταγραφή σε σταθμό

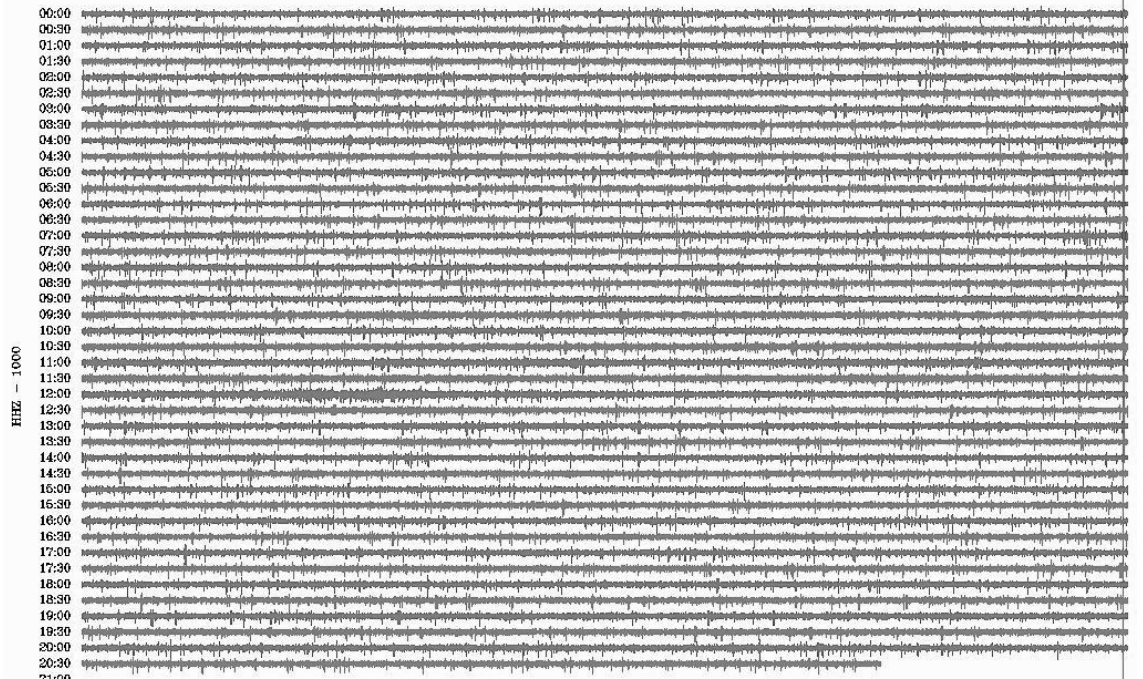
Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε χώρο του Εθνικού και Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών. Σαν σεισμόμετρο χρησιμοποιήθηκε ο αισθητήρας LGT45D και το επιταχυνσιόμετρο LIS344ALH. Η εγκατάσταση του σταθμού πραγματοποιήθηκε τη Δευτέρα 28/1/2019 και ο σταθμός φέρει το αναγνωριστικό HA_TES5, Η αποστολή των δεδομένων του σταθμού προς τον seiscomp server του Πανεπιστημίου γίνεται με επιτυχία, (Σχήμα 52).

Ο σταθμός TES5 ήταν εγκατεστημένος εντός του Τμήματος Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, σε συντεταγμένες φ: 37.9665°N και λ: 23.7845°E. Η διαδικασία των μετρήσεων διήρκεσε ένα μήνα (28/1/2019 – 28/2/2019) Οι μετρήσεις που έλαβαν χώρα, πραγματοποιήθηκαν με τις εξής παραμέτρους: Για τον αλγόριθμο STA/LTA επιλέχθηκαν χρονικά παράθυρα 60s για το LTA παράθυρο, και 1.5s για το STA παράθυρο. Σαν κατώφλι διέγερσης ορίστηκε το 4, ενώ για κατώφλι αυτοδιέγερσης ορίστηκε το 2. Όσον αφορά τον αλγόριθμο τ_c - P_d Επιλέχθηκαν κατώφλι $\tau_c = 1s$ και για το $P_d = 100\mu m$. Κατά την διάρκεια των μετρήσεων έλαβαν χώρα 266 σεισμοί, σε ακτίνα 170km γύρω από τον σταθμό TES5. Σαν σταθμός ελέγχου επιλέχθηκε ο σταθμός HA_ATHU.

Test station EEW

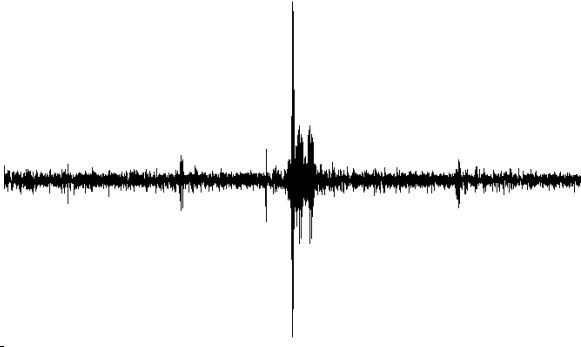
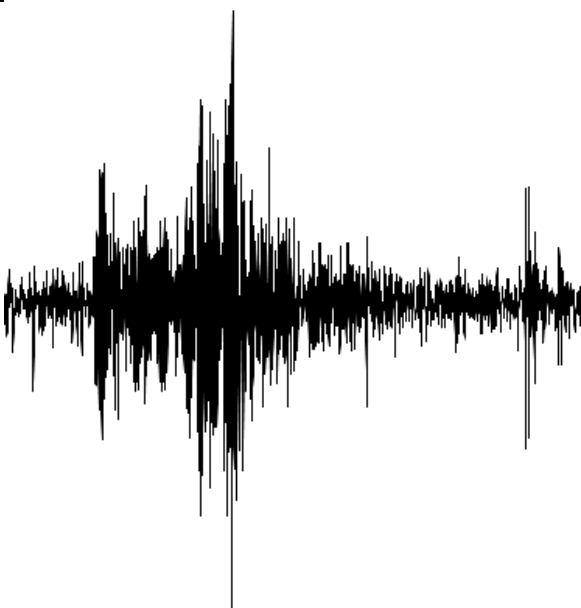
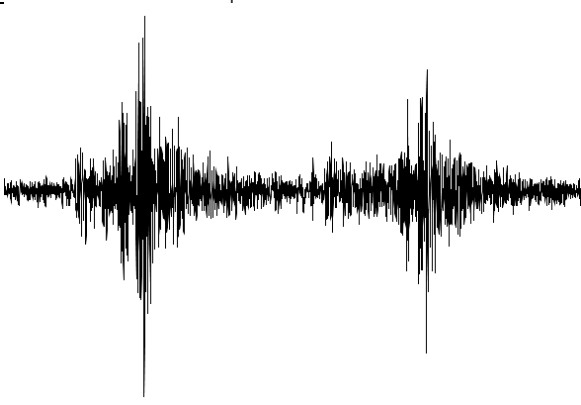
2019-02-09

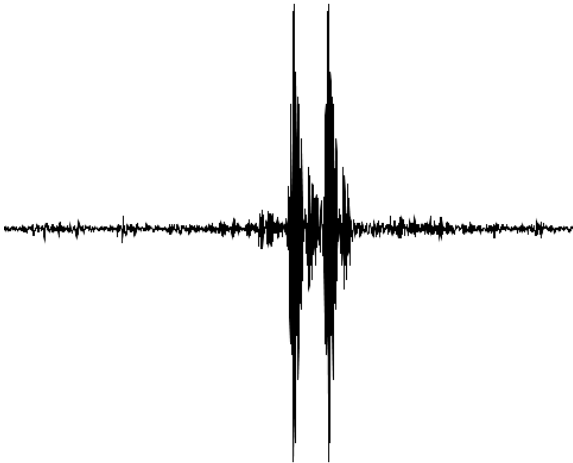
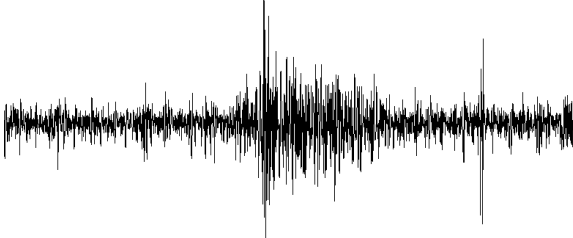
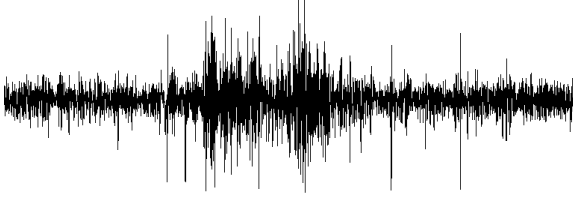
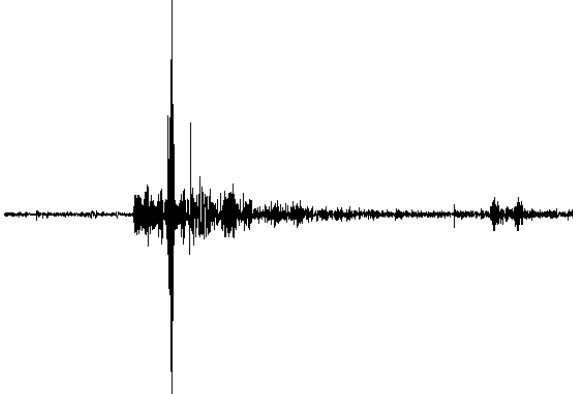
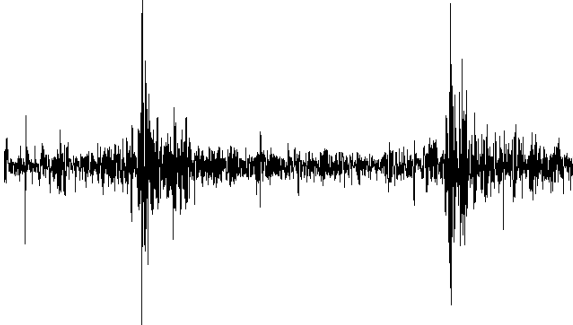
Applied filter: WSSN-SP

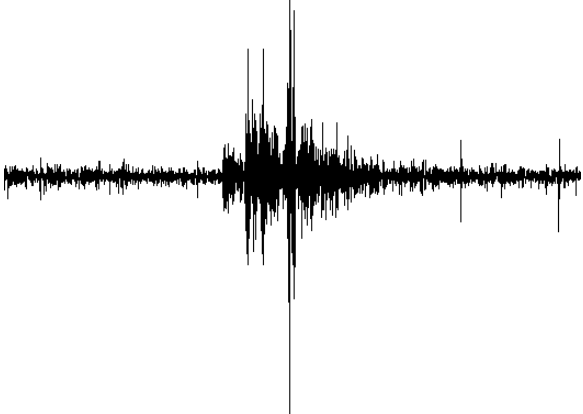
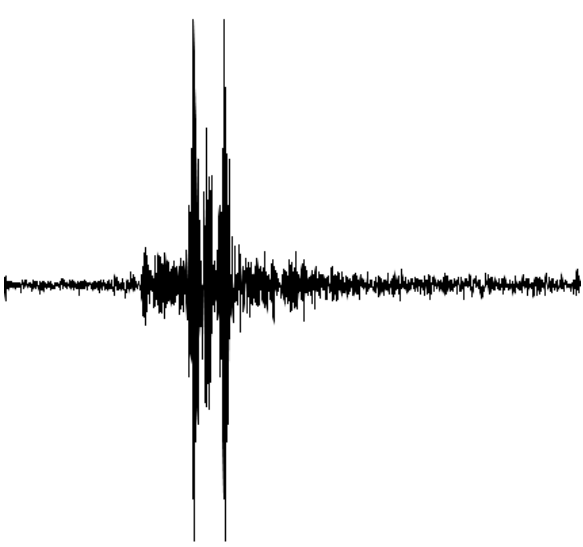
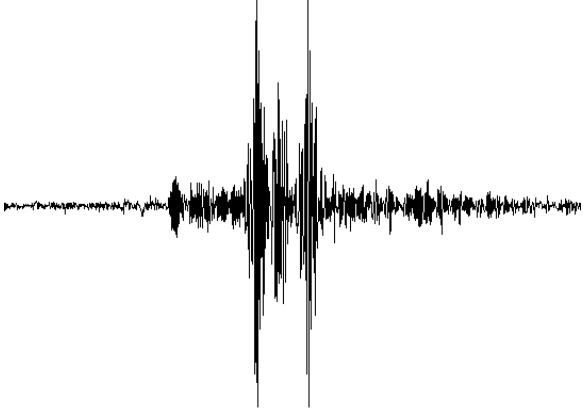


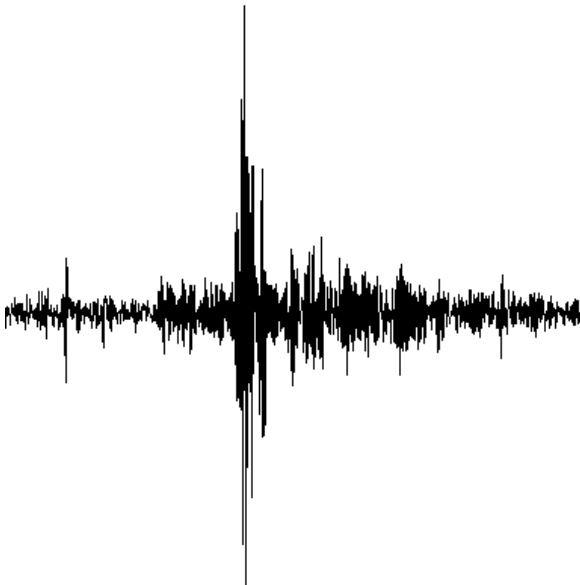
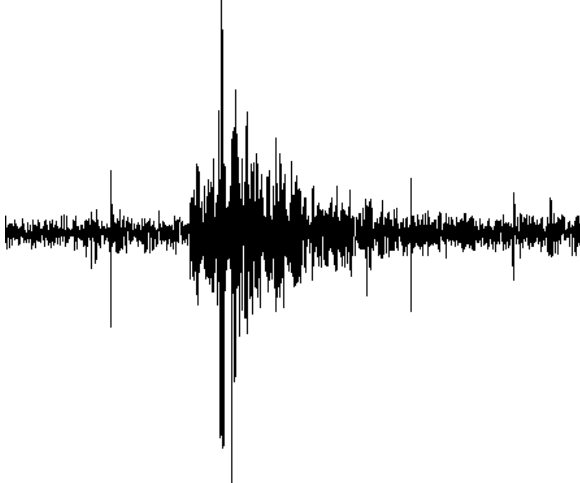
Σχήμα 52: Εικόνα από το ημερήσιο αρχείο καταγραφής του σταθμού. Daily drum plot

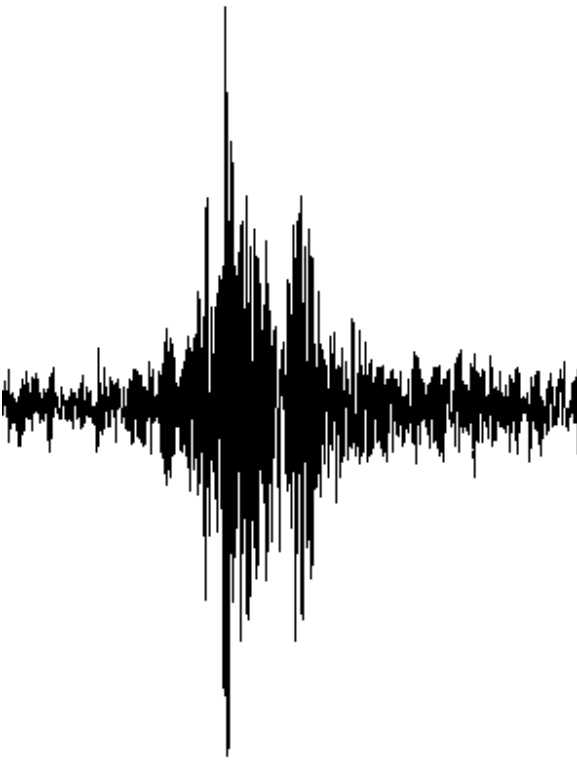
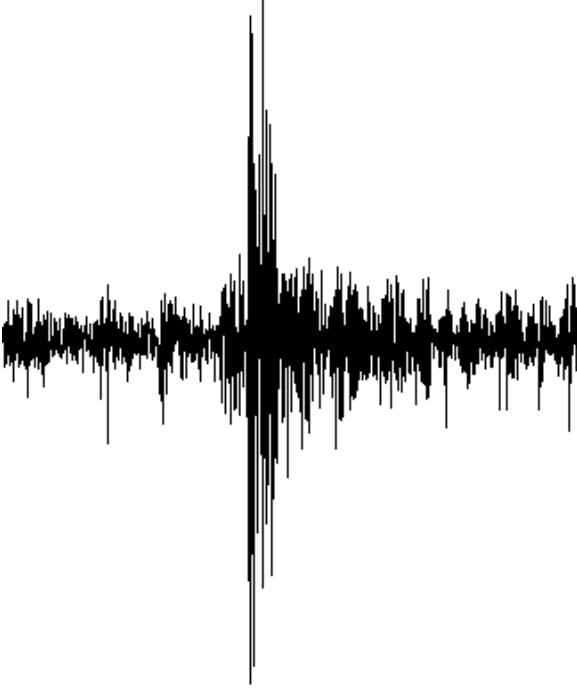
Πίνακας 20: Γεγονότα που καταγράφηκαν. Recorded events

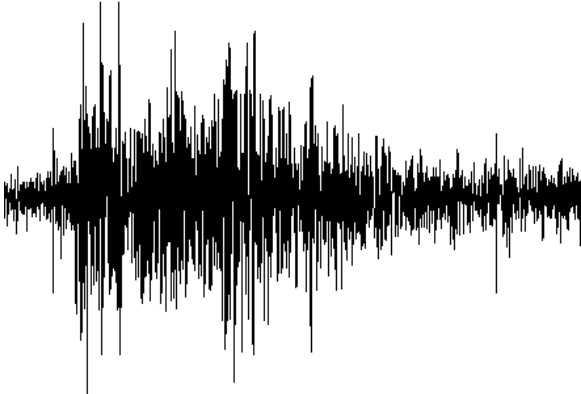
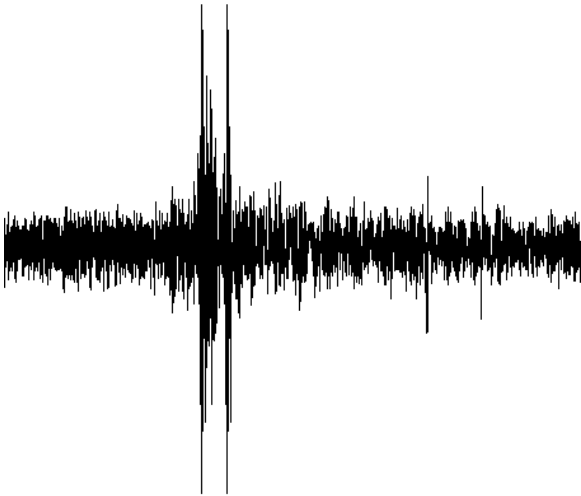
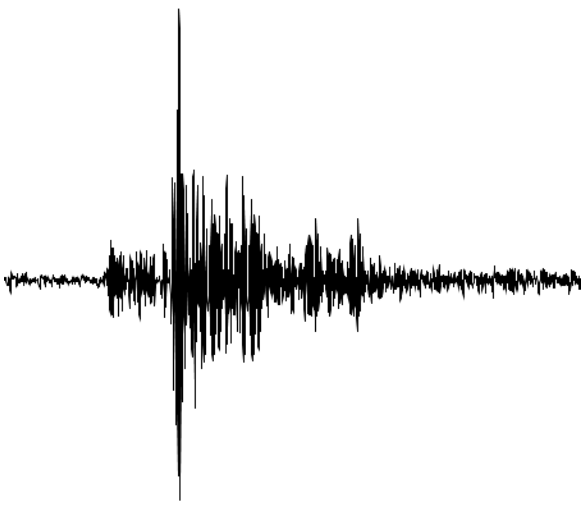
Α/Α	Όνομα γεγονόςτος	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
1	2019-02-01 06:09:56 8.5 km N of Athens M 1.9	
2	2019-02-03 06:33:32 61.8 km NNE of Athens M 2.2	
3	2019-02-03 07:07:50 63.5 km NNE of Athens M 2.9	

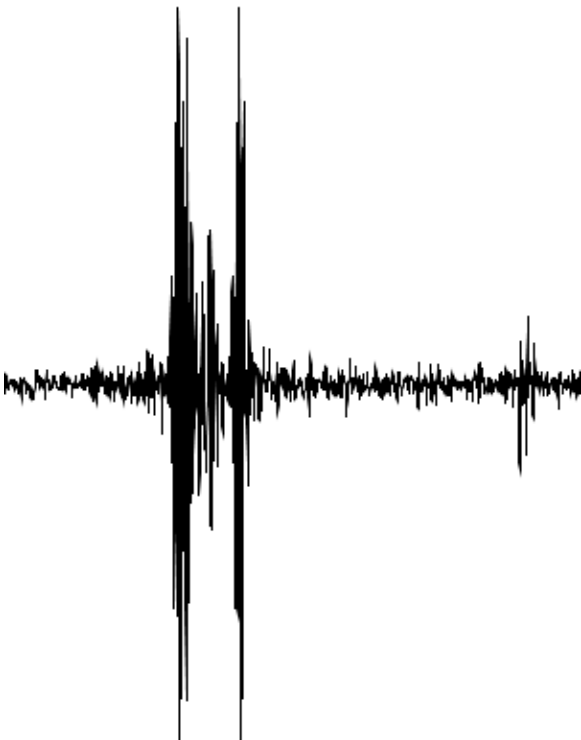
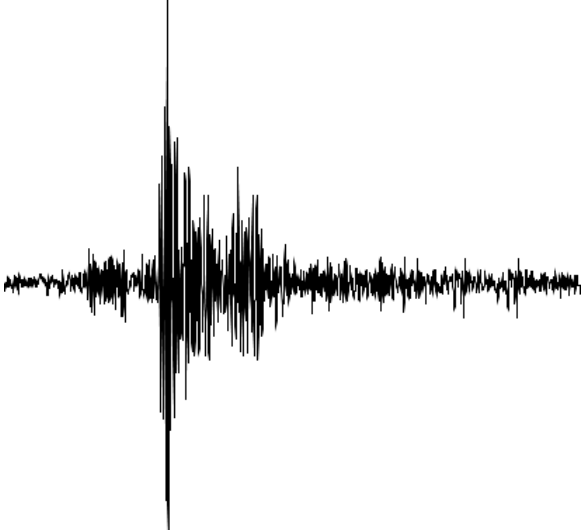
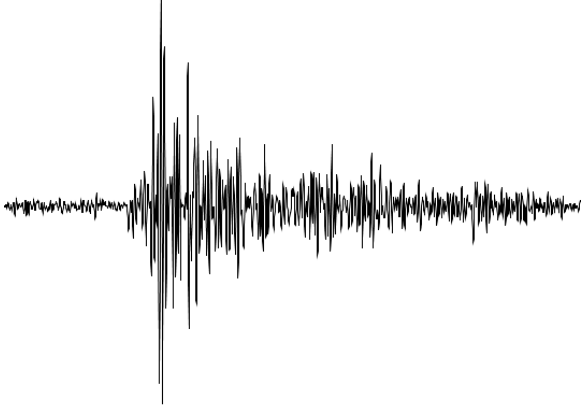
Α/Α	Όνομα γεγονόςτος	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
4	2019-02-04 08:43:38 6.6 km NNE of Athens M 1.8	
5	2019-02-10 21:48:56 28.5 km N of Athens M 3.0	
6	2019-02-13 15:16:00 95.8 km NE of Athens M 3.0	
7	2019-02-14 02:02:53 27.6 km ENE of Athens M 2.8	
8	2019-02-14 04:15:13 27.1 km ENE of Athens M 2.1	

Α/Α	Όνομα γεγονός	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
9	2019-02-14 06:02:27 27.3 km ENE of Athens M 2.4	
10	2019-02-14 06:14:07 27.1 km ENE of Athens M 2.4	
11	2019-02-14 06:14:07 22.7 km ENE of Athens M 1.4	

Α/Α	Όνομα γεγονός	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
12	2019-02-15 06:14:47 27.5 km ENE of Athens M 2.1	
13	2019-02-15 09:25:19 27.0 km ENE of Athens M 2.5	

Α/Α	Όνομα γεγονόςτος	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
14	<p data-bbox="427 600 641 734">2019-02-15 09:45:06 27.6 km ENE of Athens M 2.0</p>	
15	<p data-bbox="427 1361 641 1496">2019-02-16 02:54:27 129.8 km NNE of Athens M 2.5</p>	

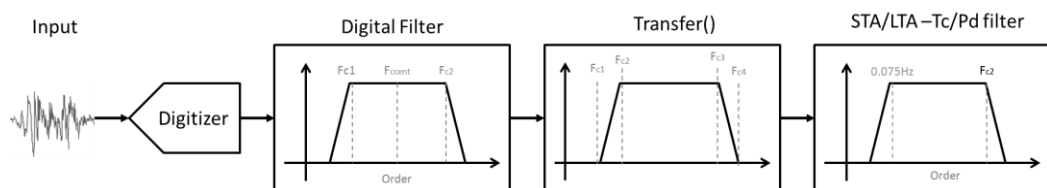
Α/Α	Όνομα γεγονόςτος	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
16	2019-02-17 19:07:41 172.5 km SSW of Athens M 4.6	
17	2019-02-19 00:57:50 27.9 km ENE of Athens M 1.9	
18	2019-02-24 02:54:04 27.1 km ENE of Athens M 2.8	

Α/Α	Όνομα γεγονός	Αρχείο καταγραφής mseed του σταθμού TES5
19	2019-02-24 06:50:14 166.9 km N of Athens M 3.0	
20	2019-02-25 05:20:33 27.3 km ENE of Athens M 2.6	
21	2019-02-28 13:15:21 27.1 km ENE of Athens M 2.5	

Από τα 266 γεγονότα ο σταθμός ATHU κατέγραψε 80 γεγονότα, ενώ ο σταθμός TES5 κατέγραψε 29, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 20. Από αυτά τα γεγονότα 8 δεν αξιολογούνται είτε λόγω του ότι είχαν μεγάλη επικεντρική απόσταση ή δεν παρατηρήθηκε η άφιξη των p, s φάσεων λόγω υπερβολικού θορύβου. Από τα δεδομένα που καταγράφηκαν τέσσερα γεγονότα είχαν επικεντρική απόσταση μεγαλύτερη από 150km. Έγιναν σε επικεντρικές αποστάσεις 9.1 – 291.1km από τον σταθμό καταγραφής. Από τις παραπάνω μετρήσεις συμπεραίνεται ότι ο σταθμός καταγραφής δύναται να καταγράψει μικρά και μεγάλα σεισμικά γεγονότα σε τοπικό επίπεδο, και γεγονότα μεγάλου μεγέθους τα οποία είναι πιο απομακρυσμένα. Ο θόρυβος που παρατηρείται στο σήμα, οφείλεται στον χώρο εγκατάστασης του καταγραφικού, ο οποίος είναι εντός του data center του τμήματος, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλοί κραδασμοί. Παρόλα αυτά δεν παρατηρήθηκε κάποιος ψευδής γεγονός (false alarm).

4.5.3 Πιστοποίηση μετρήσεων

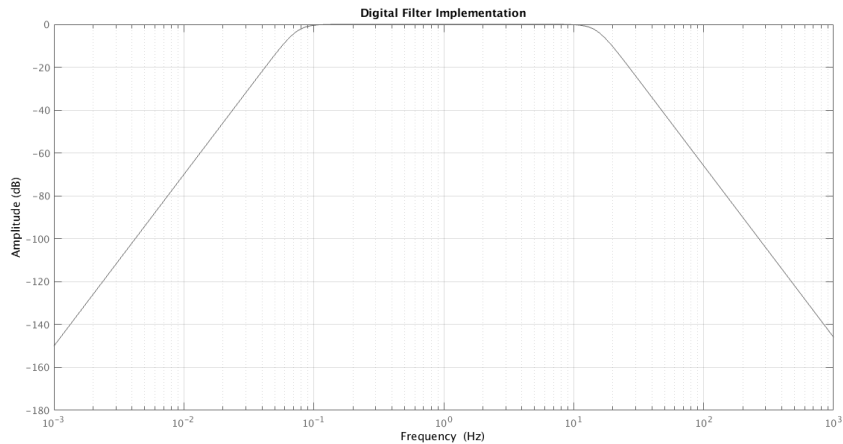
Η διαδικασία υπολογισμού των φυσικών μεγεθών και του φιλτραρίσματος των δεδομένων περιγράφεται στο Σχήμα 53. Με μπλε χρώμα παρουσιάζονται οι συχνότητες θλάσεως των φίλτρων οι οποίες είναι στατικές στην εφαρμογή, ενώ με κόκκινο παρουσιάζονται οι συχνότητες οι οποίες μπορούν να αλλάξουν, τροποποιώντας το αρχείο ρυθμίσεων. Συνοπτικά, οι παράμετροι των φίλτρων παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 21).



Σχήμα 53: Διαδικασία φιλτραρίσματος. Filtering process

Πριν την κλήση της συνάρτησης Transfer(), η οποία υλοποιεί την ομώνυμη εφαρμογή του οργανισμού IRIS, για την αποσυνέλιξη της συνάρτησης μεταφοράς από τα δεδομένα εισόδου, κρίνεται αναγκαίο το αρχικό φιλτράρισμα των δεδομένων. Αυτό είναι αναγκαίο καθώς το ενσωματωμένο ψηφιακό φίλτρο του ADS1256 (σύμφωνα με την εξ. 3.12) και ο ρυθμός δειγματοληψίας που απαιτείται, ώστε να επιτευχθεί ρυθμός δειγματοληψίας 100SPS/κανάλι, έχει $F_c=441\text{Hz}$, το οποίο το καθιστά ανεπαρκές για την τρέχουσα εφαρμογή.

Το ζωνοπερατό φίλτρο που υλοποιήθηκε έχει $F_{cH}=0.075\text{Hz}$ και $F_{cL}=10\text{Hz}$ και παρουσιάζεται στο Σχήμα 54



Σχήμα 54: Ψηφιακό φίλτρο που υλοποιήθηκε. Digital filter.

Το φίλτρο που χρησιμοποιεί η συνάρτηση `transfer()` δίνει μοναδιαίο κέρδος μεταξύ των συχνοτήτων $F_2=4.5\text{Hz}$ και $F_3=10\text{Hz}$, ενώ ακολουθήθηκε η οδηγία του κατασκευαστή $F_1 = F_2/2$ και $F_4 \geq 2 \cdot F_3$ με $F_{3,4} \leq F_{\text{Nyquist}}$. Για τα δεδομένα που εισέρχονται στους αλγόριθμους STA/LTA και $\tau_c - P_d$, εφαρμόζεται φίλτρο με $F_{cH}= 0.075\text{Hz}$ και $F_{cL}=10\text{Hz}$.

Πίνακας 21: Παράμετροι φίλτρων. Filter parameters

Προσδιοριστικό	Τάξη	F_{cH} (Hz)	F_{cL} (Hz)
Κατωπερατό ψηφ. φίλτρο	4	0.075	
Ανωπερατό ψηφ. φίλτρο	4		10
Φίλτρο συνάρτησης <code>Transfer()</code> (Γεώφωνο)		4.5	10
Φίλτρο συνάρτησης <code>Transfer()</code> (Επιταχυνσιόμετρο)		0.075	1
Κατωπερατό φίλτρο για STA/LTA	4		10
Ανωπερατό φίλτρο για $\tau_c - P_d$	4	0.075	

Η βαθμονόμηση του οργάνου έγινε χρησιμοποιώντας τα μεγέθη των σεισμικών γεγονότων που κατέγραψε το Εργαστήριο Σεισμολογίας του ΕΚΠΑ (Πίνακας 22). Για τη μετατροπή των μεγεθών από τοπικό μέγεθος M_L σε μέγεθος σεισμικής ροπής M_w , έγιναν οι παρακάτω υπολογισμοί:

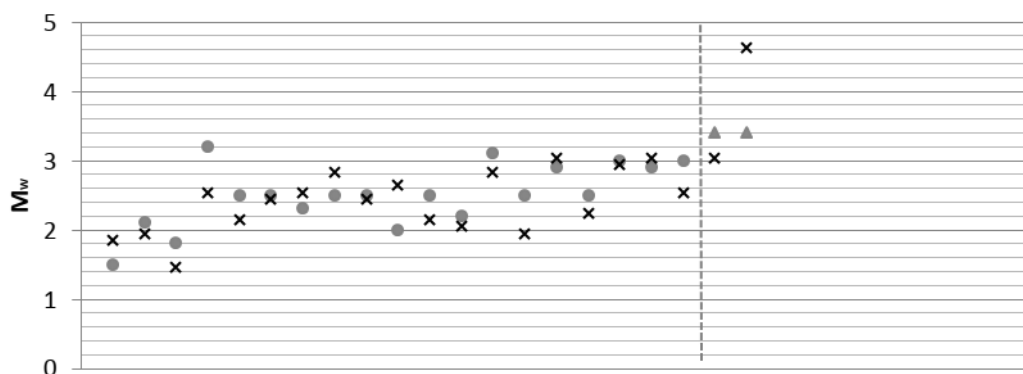
- Για τα σεισμικά γεγονότα με $M_L \geq 3.6$, το Εργαστήριο Σεισμολογίας του ΕΚΠΑ έχει υπολογισμένα τα μεγέθη των γεγονότων σε M_w .
- Για τα σεισμικά γεγονότα με $M_L < 3.6$ έγινε η χρήση της εξίσωσης $M_w = 0.991M_L + 0.06$ (Konstantinou & Melis, 2017).

Πίνακας 22: Μετρήσεις μεγέθους σεισμικής ροπής για την βαθμονόμηση του οργάνου. Moment magnitude comparison for Instrument's experimental Calibration

A/A	Χρόνος γένεσης γεγονότος	Απόσταση (Km)	M _w TES5	M _w control	Απόκλιση
1	2/4/2019 8:43	6.6	1.5	1.8	0.3
2	2/1/2019 6:09	8.5	2.1	1.9	0.2
3	2/14/2019 6:14	22.7	1.8	1.4	0.4
4	2/15/2019 9:25	27	3.2	2.5	0.7
5	2/14/2019 4:15	27.1	2.5	2.1	0.4
6	2/14/2019 6:14	27.1	2.5	2.4	0.1
7	2/28/2019 13:15	27.1	2.3	2.5	0.2
8	2/24/2019 2:54	27.1	2.5	2.8	0.3
9	2/14/2019 6:02	27.3	2.5	2.4	0.1
10	2/25/2019 5:20	27.3	2	2.6	0.6
11	2/15/2019 6:14	27.5	2.5	2.1	0.4
12	2/15/2019 9:45	27.6	2.2	2.0	0.2
13	2/14/2019 2:02	27.6	3.1	2.8	0.3
14	2/19/2019 0:57	27.9	2.5	1.9	0.6
15	2/10/2019 21:48	28.5	2.9	3.0	0.1
16	2/3/2019 6:33	61.8	2.5	2.2	0.3
17	2/3/2019 7:07	63.5	3	2.9	0.1
18	2/13/2019 15:16	95.8	2.9	3.0	0.1
19	2/16/2019 2:54	129.8	3	2.5	0.5
20	2/24/2019 6:50	166.9	3.4	3.0	0.4
21	2/17/2019 19:07	172.5	3.4	4.6	1.2

Σύγκριση μετρούμενου (TES5) και υπολογισμένου M_w

- TES5 Επικεντρική απόσταση<150km ▲ TES5 Επικεντρική απόσταση>150km
- × Μετρούμενο M_w



Σχήμα 55: Σύγκριση μετρούμενου και υπολογισμένου M_w. Με μπλε κύκλο εμφανίζονται τα μεγέθη M_w όπως αυτά υπολογίσθηκαν από την εξ. 2.15. με κόκκινο τρίγωνο εμφανίζονται τα μεγέθη του M_w για επικεντρικές αποστάσεις μεγαλύτερες των 150km, ενώ με μαύρο εμφανίζονται τα πραγματικά μεγέθη του M_w. M_w measurements

Συγκρίνοντας τα μεγέθη των σεισμικών γεγονότων που υπολόγισε ο σταθμός, με τις πραγματικές τιμές (Πίνακας 22 και Σχήμα 55), η μέση απόκλιση των τιμών που καταγράφηκαν από τον σταθμό είναι 0.34 μονάδες. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στον υπολογισμό του μεγέθους για τα γεγονότα τα οποία είχαν επίκεντρο σε απόσταση μεγαλύτερη των 150 χιλιομέτρων σε σχέση με τον σταθμό. Χωρίζοντας τις μετρήσεις με βάση την επικεντρική τους απόσταση παρατηρήθηκε η σχέση 4.1

$$\Delta_{Mwmeas-Mwctrl} = \begin{cases} 0.29, Epic. < 150km \\ 0.79, Epic. > 150km \end{cases} \quad (4.1)$$

Κεφάλαιο 5ο Συζήτηση αποτελεσμάτων - Συμπεράσματα

5.1 Συζήτηση αποτελεσμάτων

Στο τρέχον κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η επεξεργασία των αποτελεσμάτων και ο τελικός σχολιασμός για την επιτυχία ή μη του σκοπού της εργασίας αυτής.

5.1.1 Εκτίμηση χρόνων εκτέλεσης - Σενάριο λειτουργίας

Αρχικά, στον πίνακα 10 μπορεί να παρατηρηθεί ότι ο χρόνος εκτέλεσης και στους 4 αλγόριθμους διέγερσης είναι πολύ μικρότερος από την συχνότητα δειγματοληψίας (θεωρώντας για τα 100sps \rightarrow 1 δείγμα / 10000 μ s), γεγονός που σημαίνει ότι δεν υπάρχουν καθυστερήσεις που να οφείλονται στην επεξεργασία των δεδομένων. Μόλις δηλωθεί το σεισμικό γεγονός, χρειάζονται 3s για συλλογή δεδομένων και λιγότερα από 13ms για να γίνει η εκτίμηση των ενδεχόμενων καταστρεπτικών συνεπειών του γεγονότος. Έπειτα, στα πλαίσια της αποφυγής καθυστερήσεων στην έκδοση της προειδοποίησης, χρησιμοποιούνται ξεχωριστά νήματα για να γίνει η δήλωση του γεγονότος προς τις τέσσερις υπηρεσίες ειδοποίησης που υποστηρίζει η εφαρμογή (Xbee, Dweet.io, MySQL, e-mail).

Συνοψίζοντας, το σύστημα απαιτεί λιγότερο από 2 δευτερόλεπτα, (Πίνακας 10) προκειμένου να εκτελέσει τις απαραίτητες ενέργειες και να προειδοποιήσει για κάποιο επικίνδυνο σεισμικό γεγονός.

Η συγκεκριμένη ικανότητα του σταθμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στον Ελλαδικό χώρο, μιας και έχει πολλά ενεργά ρήγματα - 963 συμφώνα με τους (Ganas et al., 2013)(Σχήμα 57). Ο συνολικός χρόνος που απαιτείται από την εκδήλωση του γεγονότος μέχρι και την αποστολή των ειδοποιήσεων είναι μικρότερος από 5s (Αυτό προκύπτει από την άθροιση: 10ms για την δειγματοληψία, 11.35 μ s για την εκτέλεση του αλγόριθμου διέγερσης classic STA/LTA, 3.013ms για την εκτέλεση του αλγόριθμου $\tau_c - P_d$ και 1.88s για την αποστολή των ειδοποιήσεων). Σαν παράδειγμα λοιπόν, παρατηρώντας το γράφημα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 56 και τους Πίνακες 36 - 37 (Kennett et al., 1991) από το Παράρτημα 3, για να προστατευθούν περιοχές στην ευρύτερη περιοχή του Κορινθιακού κόλπου από δύο καταστρεπτικούς σεισμούς, έναν σεισμό στο ρήγμα των Αλκυονίδων νήσων, ο οποίος θα λάβει χώρα σε εστιακό βάθος από 10km, και έναν που θα συμβεί στον υποθαλάσσιο χώρο έξω από την πόλη του

Αιγίου, πρέπει να υπάρχουν εγκατεστημένοι σταθμοί περιμετρικά από τα ρήγματα, προκειμένου να λειτουργήσει το σύστημα σωστά και έγκαιρα.

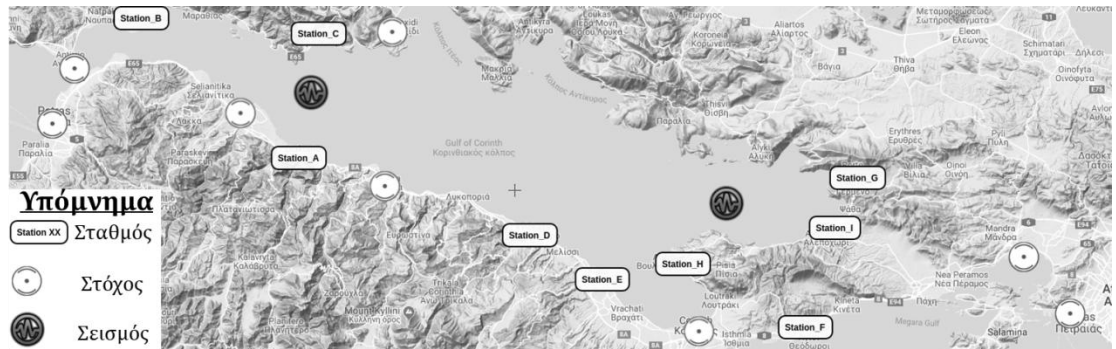
Πίνακας 23: Χρόνοι άφιξης σεισμικών φάσεων και χρόνοι προειδοποίησης.

P-S phase travel times and EEWs response time

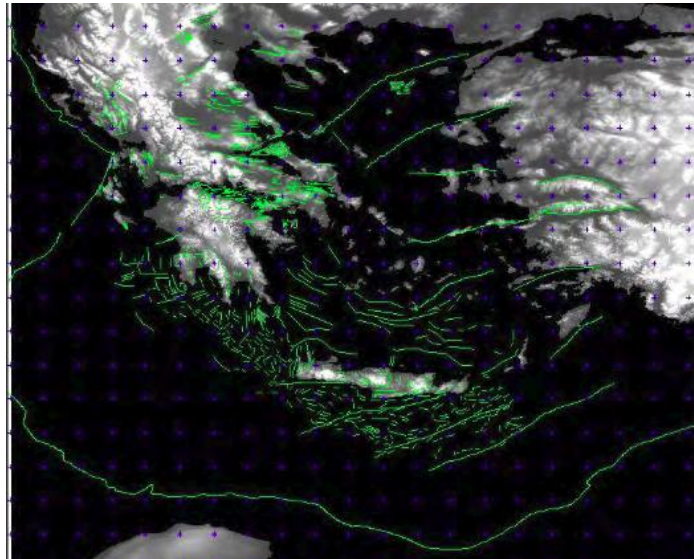
Όνομα σταθμού	Απόσταση από επίκεντρο - Km (Αλκυονίδες)	Tp (s)	Χρόνος έκδοσης Προειδοποίησης (s)	Απόσταση από επίκεντρο - Km (Αίγιο)	Tp (s)	Χρόνος έκδοσης Προειδοποίησης (s)
Station_A	70	12.18	17.08	10	2.44	7.34
Station_B	100	17.31	22.21	30	5.45	10.35
Station_C	70	12.18	17.08	10	2.44	7.34
Station_D	30	5.45	10.35	40	7.10	12.00
Station_E	20	3.85	8.75	60	10.48	15.38
Station_F	40	7.10	12.00	90	15.60	20.50
Station_G	20	3.85	8.75	90	15.60	20.50
Station_H	10	2.44	7.34	70	12.18	17.08
Station_I	20	3.85	8.75	90	15.60	20.50
Περιοχή που εποπτεύεται	Απόσταση από επίκεντρο - Km (Αλκυονίδες)	Ts (s)	Χρόνος μετά την Προειδοποίηση (s)	Απόσταση από επίκεντρο - Km (Αίγιο)	Ts (s)	Χρόνος μετά την Προειδοποίηση (s)
Πάτρα	110	32.85	24.10	40	12.26	1.91
Γέφυρα Ρίου	110	32.85	24.10	40	12.26	1.91
Αιγείρα	60	18.09	9.34	20	6.65	-3.70
Αίγιο	80	23.98	15.23	10	4.21	-6.14
Γαλαξίδι	60	18.09	9.34	20	6.65	-3.70
Κόρινθος	20	6.65	-2.10	80	23.98	13.63
Ελευσίνα	50	15.16	6.41	120	35.81	25.46
Πειραιάς	60	18.09	9.34	130	38.77	28.42

Το παραπάνω σενάριο περιλαμβάνει την εγκατάσταση εννέα σταθμών γύρω από το ρήγμα (Σχήμα 56). Στην περίπτωση του ρήγματος των Αλκυονίδων νήσων, η πρώτη ειδοποίηση θα φτάσει στις περιοχές εποπτείας έπειτα από 9 περίπου δευτερόλεπτα (Πίνακας 23) από την γένεση του γεγονότος. Αυτό σημαίνει ότι όλες οι περιοχές θα προλάβουν να ειδοποιηθούν εγκαίρως από τους σταθμούς, εκτός από την πόλη της Κορίνθου, που λόγω της κοντινής της απόστασης με το ρήγμα δεν θα προλάβει να λειτουργήσει το σύστημα ορθά. Αντίστοιχα στον σεισμό του Αιγίου δεν θα προλάβει να γίνει ειδοποίηση για τις περιοχές Αιγείρα, Αίγιο και Γαλαξίδι. Συνεπώς για την ομαλή λειτουργία ενός

τέτοιου συστήματος δεν παίζει ρόλο μόνο η απόκριση του χρόνου που έχει, αλλά και δυσκολίες που προκύπτουν στην εγκατάσταση των σταθμών λόγω της μορφολογίας που έχει η εκάστοτε περιοχή εποπτείας.



Σχήμα 56: Σενάριο εγκατάστασης και ορθής λειτουργίας. Scenario of operation



**Σχήμα 57: Τα ενεργά ρήγματα του Ελλαδικού χώρου (Ganas et al., 2013),
Greek active faults**

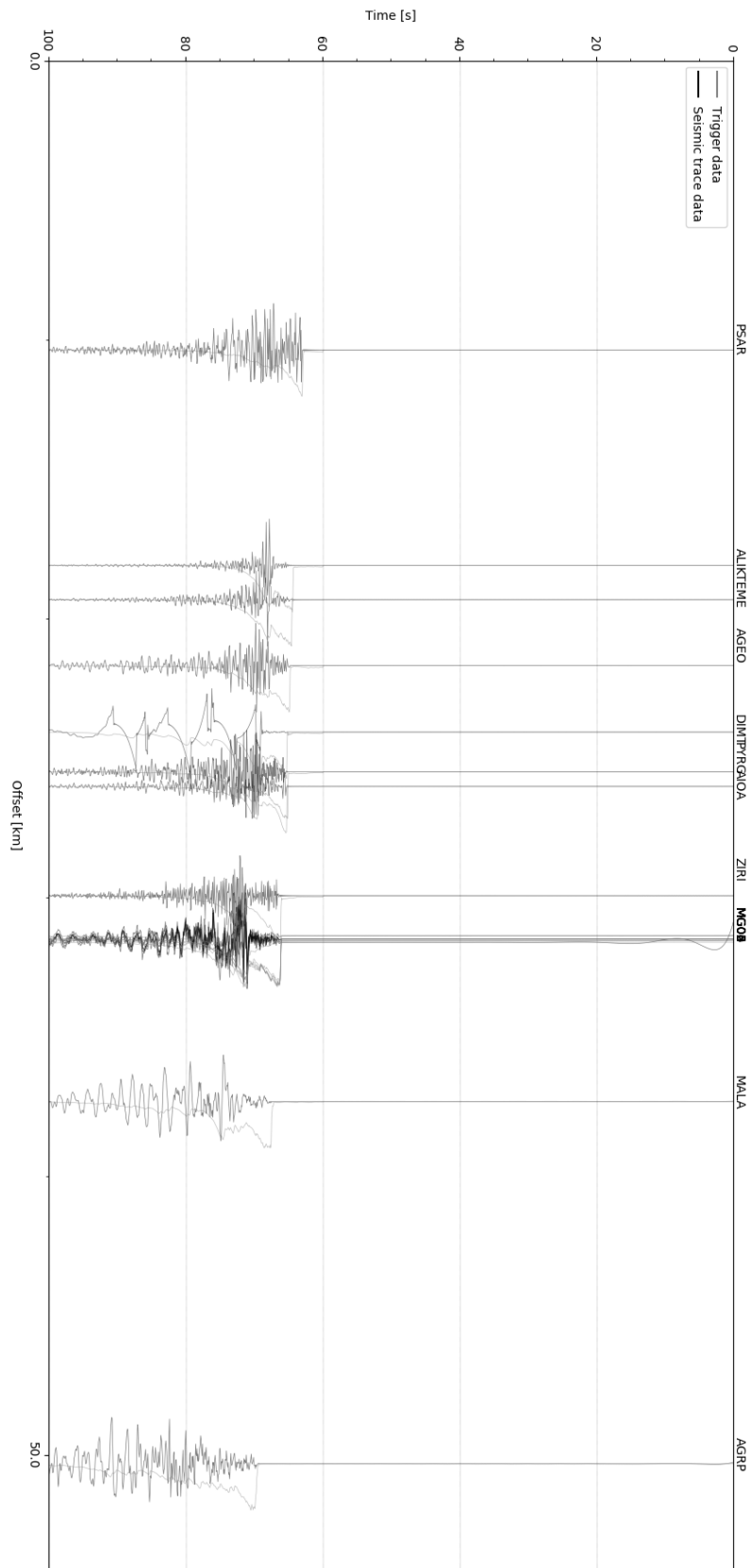
Συνεχίζοντας τον έλεγχο απόκρισης του συστήματος έγινε χρήση καταγραφών από το δίκτυο CL (Corinth Rift Laboratory Network) προκειμένου να γίνει έλεγχος λειτουργίας με βάση πραγματικά δεδομένα. Στον έλεγχο λειτουργίας χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δύο σεισμικά γεγονότα, ένα με μέγεθος 5.2 (16 καταγραφές) και ένα με μέγεθος 3.9 (17 καταγραφές). Για τον αλγόριθμο STA/LTA επιλέχθηκαν χρονικά παράθυρα 60s για το LTA παράθυρο, και 1.5s για το STA παράθυρο. Σαν κατώφλι διέγερσης ορίστηκε το 4, ενώ για κατώφλι αυτοδιέγερσης ορίστηκε το 2. Τα δεδομένα και οι χρόνοι τους παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 24, Σχήμα 58 - 59)

Πίνακας 24: Καταγραφές δικτύου CL. CL network recordings

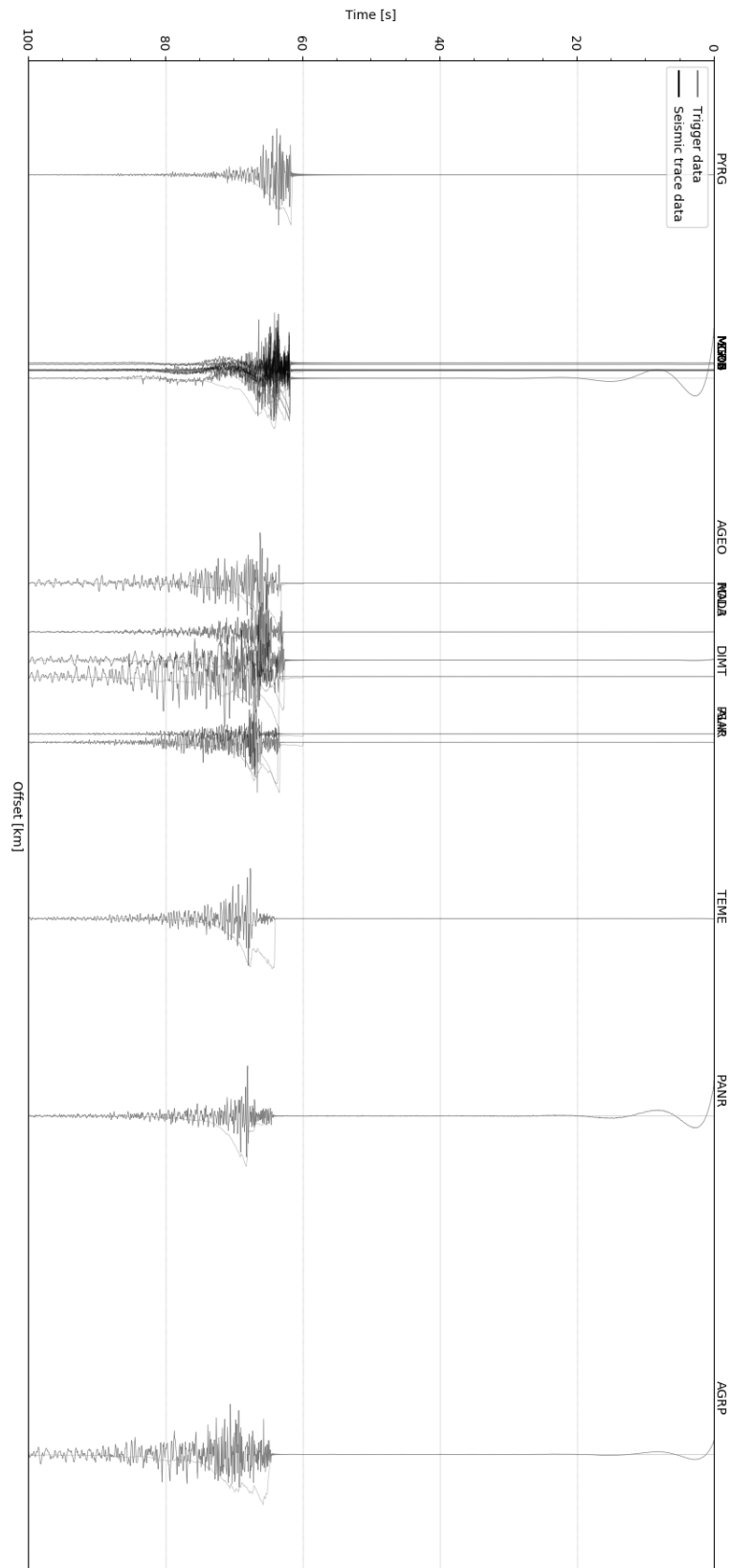
Όνομα γεγονόςτος	2019-03-30 10:46:19 (GMT) M5.2 Depth 7			Όνομα γεγονόςτος	2019-03-06 01:54:45 (GMT) M3.9 Depth 9		
Όνομα σταθμού	Απόσταση από επίκεντρο (Km)	Χρόνος διέγερσης (s)	Χρόνος έκδοσης Προειδοποίησης (s)	Όνομα σταθμού	Απόσταση από επίκεντρο (Km)	Χρόνος διέγερσης (s)	Χρόνος έκδοσης Προειδοποίησης (s)
PSAR	10.4	3.90	8.80	PYRG	5.1	2.73	7.63
ALIK	18.1	5.41	10.31	MG04	8.2	2.78	7.68
TEME	19.3	5.44	10.34	MG06	8.2	2.80	7.70
AGEO	21.7	6.37	11.27	MG00	8.3	2.96	7.86
DIMT	24.1	6.03	10.93	ZIRI	8.3	3.95	8.85
PYRG	25.5	5.97	10.87	MG03	8.3	3.06	7.96
AIOA	26.0	6.18	11.08	MG02	8.3	2.91	7.81
ZIRI	29.9	6.95	11.85	MG05	8.4	Δεν διεγέρθηκε	
MG04	31.4	7.44	12.34	AGEO	11.7	4.06	8.96
MG02	31.5	7.42	12.32	ROD3	12.5	3.79	8.69
MG06	31.5	7.50	12.40	MALA	13.0	3.82	8.72
MG00	31.5	7.50	12.40	DIMT	13.3	4.30	9.20
MG03	31.5	7.25	12.15	ALIK	14.2	4.53	9.43
MG05	31.6	13.61	18.51	PSAR	14.3	4.19	9.09
MALA	37.3	8.86	13.76	TEME	17.2	5.15	10.05
AGRP	50.3	11.27	16.17	PANR	20.4	Δεν διεγέρθηκε	
				AGRP	25.9	11.60	16.50
Περιοχή που εποπτεύεται	Απόσταση από επίκεντρο (Km)	Ts(s)	Χρόνος μετά την έκδοση Προειδοποίησης (s)	Περιοχή που εποπτεύεται	Απόσταση από επίκεντρο (Km)	Ts(s)	Χρόνος μετά την έκδοση Προειδοποίησης (s)
Πάτρα	49.8	14.96	4.62	Πάτρα	27.5	8.61	0.91
Γέφυρα Ρίου	45.1	13.58	3.24	Γέφυρα Ρίου	21.4	6.91	-0.80
Αιγείρα	23.2	7.21	-1.59	Αιγείρα	38.2	11.67	3.97
Αίγιο	21.2	6.64	-3.67	Αίγιο	13.7	4.88	-2.82
Γαλαξίδι	8.7	3.32	-7.02	Γαλαξίδι	32.0	9.89	2.19
Κόρινθος	72.5	21.66	11.32	Κόρινθος	93.1	27.82	20.12
Ελευσίνα	114.7	34.18	23.84	Ελευσίνα	138.4	41.25	33.55

Τα δεδομένα από τις 33 καταγραφές των δύο σεισμικών γεγονότων συμβαδίζουν με το θεωρητικό σενάριο, ότι δηλαδή, όσο πιο κοντά βρίσκεται ένας σταθμός καταγραφής στο επίκεντρο του σεισμού, τόσο πιο έγκαιρα εκδίδεται η αντίστοιχη προειδοποίηση, όμως οι περιοχές εποπτείας οι οποίες βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο δεν προλαβαίνουν να ειδοποιηθούν ενώ οι πιο απομακρυσμένες προλαβαίνουν. Για το λόγο αυτό, πρέπει να υπολογιστεί ποια είναι η ελάχιστη απόσταση από το σταθμό προκειμένου να γίνει ειδοποίηση σε μία περιοχή. Θεωρώντας ότι υπάρχει ένας σταθμός ακριβώς στο επίκεντρο του σεισμού (επικεντρική απόσταση = 0) η άφιξη της p φάσης αναμένεται στα 1.2

και 1.55s αντίστοιχα για τα δύο γεγονότα (2019-03-30 10:46:19 (GMT) M5.2 D=7 και 2019-03-06 01:54:45 (GMT) M3.9 D=9) που σημαίνει ότι ο ελάχιστος χρόνος που απαιτείται προκειμένου ένας σταθμός να ειδοποιήσει γειτονικές περιοχές είναι 6.1 και 6.45s αντίστοιχα. Αυτός ο χρόνος αντιστοιχεί στα 20km τα οποία ορίζονται και σαν το κατώφλι της περιοχής σκίασης, οποιαδήποτε περιοχή με απόσταση μικρότερη των 20 χιλιομέτρων δεν θα προλάβει να ειδοποιηθεί. Παρατηρώντας τον πίνακα 37 μέχρι και το βάθος των 30 χιλιομέτρων η ζώνη σκίασης παραμένει στα 20km. Πρέπει να σημειωθεί ότι από τα δεδομένα παρατηρείται όπως είναι και αναμενόμενο μια περιοχή εποπτείας να προστατεύεται από ένα γεγονός, ενώ στο επόμενο να μην προλαβαίνει να αντιδράσει. Για τον λόγο αυτό απαιτείται ένα πυκνό δίκτυο από σταθμούς προκειμένου να υπερκαλύπτονται οι περιοχές σκίασης των σταθμών και να καλύπτεται όσο περισσότερη περιοχή από το Σ.Ε.Σ.Π.



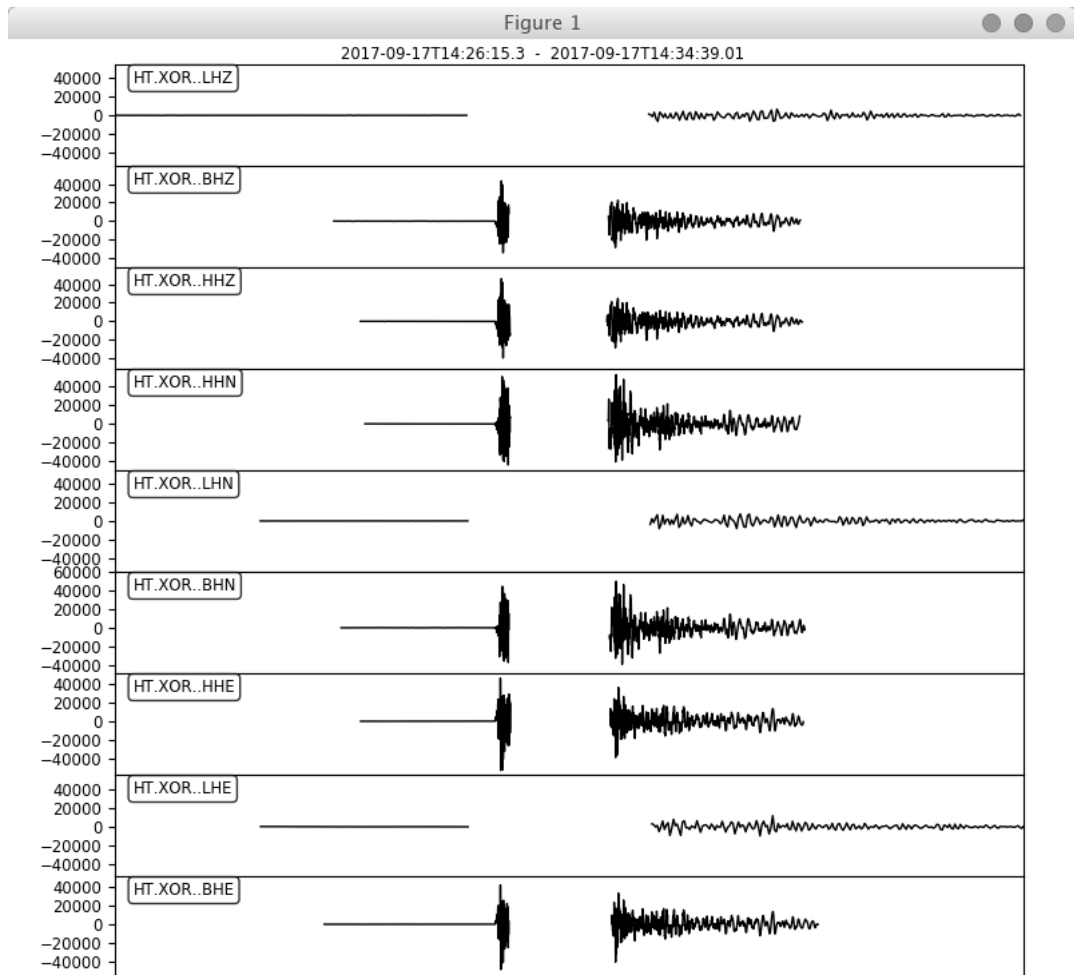
Σχήμα 58: Καταγραφές για το γεγονός 2019-03-30 10:46:19 . Stations recordings for the event 2019-03-30 10:46:19



Σχήμα 59: Καταγραφές για το γεγονός 2019-03-06 01:54:45. Stations recordings for the event 2019-03-06 01:54:45

5.1.2 Εκτίμηση αντίληψης σεισμικών γεγονότων

Εξετάζοντας τα δύο σετ μετρήσεων (75 γεγονότα και 161 καταγραφές), που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία, το σύστημα διεγέρθηκε με επιτυχία, δείχνοντας σεισμική δραστηριότητα, σε σύνολο 150 καταγραφών. Έτσι, το ποσοστό επιτυχίας των διεγέρσεων ανέρχεται στο 93.16%, τιμή ιδιαίτερα ικανοποιητική, μιας και αυτό σημαίνει ότι το σύστημα δύναται να διεγερθεί από διαφορετικά γεγονότα, ανεξάρτητα από μέγεθος και απόσταση. Το ποσοστό αυτό δεν είναι αντικειμενικό και στην πραγματικότητα είναι μεγαλύτερο. Κατόπιν εξέτασης μέσω του λογισμικού OBSpy στις καταγραφές του δεύτερου σετ μετρήσεων που δεν κατάφεραν να διεγείρουν τον αλγόριθμο, παρατηρήθηκαν ασυνέχειες στα αρχεία .mseed τους, όπως για παράδειγμα διακρίνεται παρακάτω (Σχήμα 60).



Σχήμα 60: Παράδειγμα αρχείου με ασυνέχειες. *File with blocketes inconsistencies.*

Αυτή η ασυνέχεια των δεδομένων οδήγησε στη μη ορθή λειτουργία της εφαρμογής και για αυτόν τον λόγο δεν διεγέρθηκε ο αλγόριθμος.

Συνεχίζοντας την αξιολόγηση των αλγορίθμων, το πρώτο σετ μετρήσεων λόγω των μεγάλων επικεντρικών αποστάσεων (>800km). χρησιμοποιήθηκε σαν είσοδος μόνο για τον έλεγχο των αλγορίθμων διέγερσης, Οι (Wu et al., 2007), απέδειξαν ότι η μέση σεισμική περίοδος μπορεί να θεωρηθεί σταθερή για τιμές < 150Km. Οπότε το πρώτο σετ μετρήσεων θα εμφάνιζε σημαντικές αποκλείσεις στον υπολογισμό του μεγέθους σεισμικής ροπής.

Τα σεισμικά γεγονότα της δεύτερης ομάδας μετρήσεων επιλέχθηκαν με αρχή την μικρή επικεντρική τους απόσταση. Ομοίως η σχέση 2.15 έδειξε στατιστική σημαντικότητα μεταξύ της σχέσης 2.15 και του πληθυσμού ελέγχου. Ορίζοντας ένα κατώφλι μισής μονάδας για τη διαφορά μεταξύ του πραγματικού και του υπολογισμένου μεγέθους του σεισμού, το 60% μπορεί να θεωρηθεί ότι προσέγγισε το πραγματικό μέγεθος.

Πρέπει να σημειωθεί πως ο υπολογισμός του μεγέθους της σεισμικής ροπής που υπολογίζει ο σταθμός, είναι απλώς μια λειτουργία του σταθμού για τον υπολογισμό μιας πρώτης λύσης για το μέγεθος του σεισμού. Σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να συγκριθεί και να αντικαταστήσει τις μετρήσεις από ένα κλασικό σεισμικό δίκτυο. Ο υπολογισμός του δεν επηρεάζει τον αλγόριθμο $\tau_c - P_d$ και την έκδοση των προειδοποιήσεων του, μιας και οι προειδοποιήσεις του τελευταίου βασίζονται αποκλειστικά στο μέγεθος της μέσης σεισμικής περιόδου, και στο μέγιστο πλάτος της εδαφικής κίνησης, όπως φαίνεται και στον παρακάτω συνοπτικό πίνακα:

Πίνακας 25: Οι τέσσερις δυνατές καταστάσεις που μπορεί να αντιμετωπιστούν από έναν σταθμό του συστήματος. Four possible states of EEW

P_d	τ_c	0	1
0	0	Μικρού μεγέθους τοπικός σεισμός	Μεγάλου μεγέθους απομακρυσμένος σεισμός
1	1	Μεγάλου μεγέθους τοπικός σεισμός (έκδοση προειδοποίησης)	Μεγάλου μεγέθους καταστρεπτικός σεισμός (έκδοση προειδοποίησης)

Τελειώνοντας, με βάση τα παραπάνω δεδομένα η εξίσωση 2.15 πλέον μπορεί να πάρει την μορφή της εξίσωσης 5.1 για τον Ελλαδικό χώρο, και να χρησιμοποιηθεί με ακρίβεια ± 0.65 για τον πρώτο υπολογισμό του M_w στο σύστημα EASY.

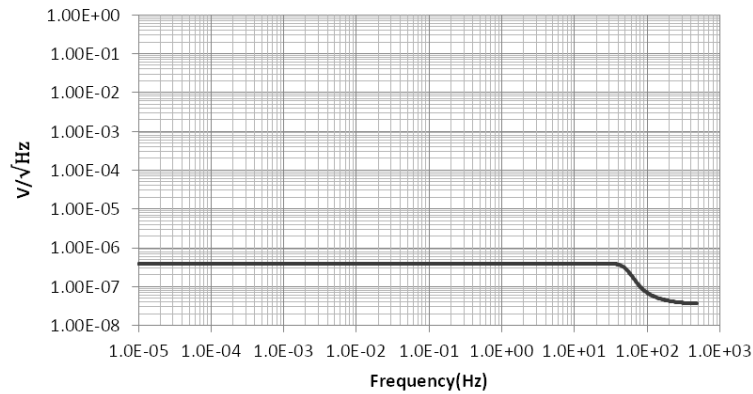
$$\log \tau_c = 0.296 M_w - 1.462 \pm 0.65 \quad (5.1)$$

5.1.3 Εκτίμηση υπολογισμού αζιμούθιου

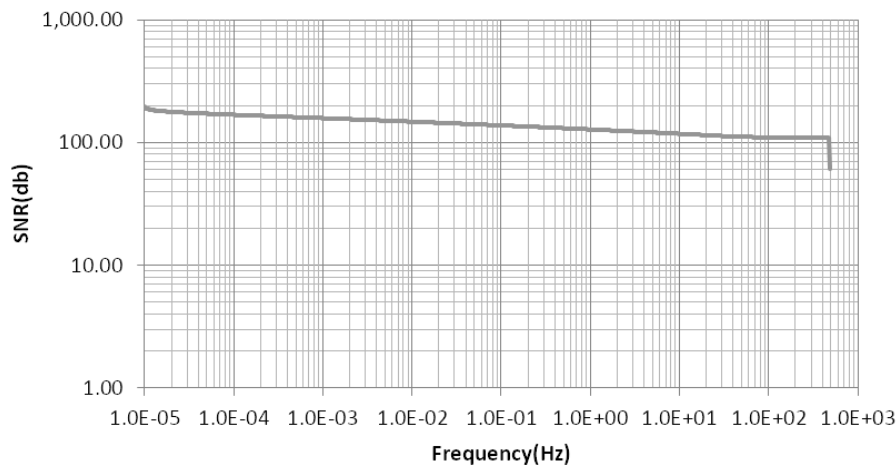
Εξετάζοντας και αναλύοντας τα δεδομένα που υπολόγισαν το αζιμούθιο των σεισμικών καταγραφών, εύκολα συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος παρουσιάζει μικρή ακρίβεια στο αποτέλεσμα που δίνει. Η σύγκριση των μέσων τιμών των μετρήσεων σε σχέση με τις τιμές των ομάδων ελέγχου (control) δεν εντόπισε συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων ελέγχου και των υπολογισμένων τιμών. Αξίζει να σημειωθεί το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό λειτουργίας του αλγορίθμου, δηλαδή ο υπολογισμός του εξαγόμενου προϊόντος χρησιμοποιώντας δεδομένα από την στιγμή δήλωσης του γεγονότος. Κάτι τέτοιο όμως, μπορεί υπολογιστικά να οδηγήσει σε χρονική κύλιση του γεγονότος, ανάλογα με την ευαισθησία του αλγόριθμου διέγερσης και για τον λόγο αυτόν το αποτέλεσμα δεν είναι το αναμενόμενο. Ο υπολογισμός του αζιμούθιου με χρήση της εξίσωσης 3.18 είναι ιδανικός μόνο για εκπαιδευτική χρήση προκειμένου να εξοικειωθεί κάποιος με την ανάγνωση και ανάλυση δεδομένων σε έτοιμη καταγραφή. Η ακριβέστερη μέθοδος παραμένει η χρήση δεδομένων από τρεις ή και περισσότερους σταθμούς, για τον προσδιορισμό του αζιμούθιου του γεγονότος.

5.1.4 Εκτίμηση συμπεριφοράς πρωτότυπου σταθμού

Η συνολική εκτίμηση του σταθμού κρίνεται θετική, σε επίπεδο λογισμικού, (όπως σχολιάστηκε στην ενότητα 4.4) και ανεκτή σε επίπεδο υλικού. Οι ημιαγωγοί που χρησιμοποιήθηκαν επιλέχθηκαν με γνώμονα το μικρότερο δυνατό περιθώριο θορύβου, και την οικονομία από άποψη ενέργειας. Παρατηρώντας τη μονάδα ψηφιοποίησης με την τρέχουσα ρύθμισή (Πίνακας 19), το καταγραφικό μας δίνει **22bit καθαρής πληροφορίας (noise free)**. Ο φασματικός θόρυβος της ASP μονάδας παρουσιάζεται στο Σχήμα 61. Τα δεδομένα του γραφήματος προκύπτουν από προσομοίωση της μονάδας ASP μέσω του δωρεάν λογισμικού προσομοίωσης TINA-TI και αντιστοιχούν στο εύρος του φίλτρου που σχεδιάστηκε ($f < 50\text{Hz}$). Ο λόγος σήματος προς θόρυβο (signal to noise ratio – SNR) παρουσιάζεται στο Σχήμα 62.



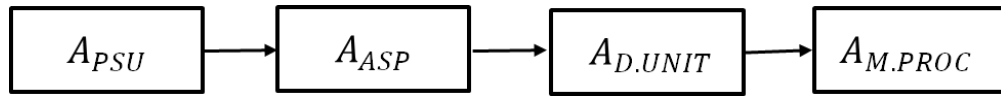
Σχήμα 61: Φασματικός θόρυβος μονάδας ASP.
ASP unit noise spectrum



Σχήμα 62: Λόγος σήματος προς θόρυβο.
SNR ratio

Σημαντικό κριτήριο για την αξιοπιστία της συσκευής είναι η διαθεσιμότητα του συστήματος, η οποία προκύπτει από τον λόγο του μέσου χρόνου ανάμεσα σε διαδοχικές αστοχίες (Mean time between failure - MTBF) προς το άθροισμα του μέσου χρόνου ανάμεσα σε διαδοχικές αστοχίες μαζί με τον μέσο χρόνο επισκευής (Mean time to repair - MTTR). Θεωρήθηκε σενάριο όπου ο μέσος χρόνος επισκευής είναι 72 ώρες, σε αυτό τον χρόνο συνυπολογίζεται η αγορά του εξαρτήματος, η μεταφορά στον τόπο εγκατάστασης του σταθμού και η επιδιόρθωσή του. Το κρίσιμο κομμάτι του συστήματος για το οποίο και υπολογίζεται η διαθεσιμότητα του περιγράφεται από το Σχήμα 63. Πρακτικά αποτελείται από τέσσερα υποσυστήματα σε σειρά. Σε αυτό δεν περιλαμβάνονται τα υποσυστήματα του Χρονισμού (GPS) και του ελέγχου

τάσης, μιας και τα προηγούμενα υποσυστήματα δεν είναι καίρια για την λειτουργία του σταθμού.



Σχήμα 63: Αναπαράσταση της διαθεσιμότητας του συστήματος σε σειρά.
System's availability expressed in series

Η συνολική διαθεσιμότητα του σταθμού είναι της τάξης του **99.8%** που αντιστοιχεί σε 87.6 ώρες εκτός λειτουργίας ανά χρόνο (Rohani & Roosta, 2014), ενώ ο μέσος χρόνος ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αστοχίες του σταθμού υπολογίζεται περίπου στα τέσσερα χρόνια. Προφανώς το MTBF του σταθμού είναι θεωρητικό και προκύπτει από τους χρόνους MTBF των υποσυστημάτων που το απαρτίζουν, όπως αυτά προκύπτουν από τεχνικά χαρακτηριστικά που παρέχονται από τους κατασκευαστές. Σε αυτό τον χρόνο δεν υπολογίζεται η εκτίμηση κινδύνου (Risk assessment) λόγω της εγκατάστασης του σταθμού σε εξωτερικό χώρο στον οποίο ενδέχεται να υπάρχουν κίνδυνοι από εκδήλωση ακραίων καιρικών φαινομένων. Μια περιοχή η οποία είναι επιρρεπής σε τέτοια φαινόμενα, οδηγεί σε επιτάχυνση της φυσικής φθοράς του συστήματος, με αποτέλεσμα την μείωση του προσδόκιμου ζωής του σταθμού. Επειδή τα καιρικά φαινόμενα είναι μη γραμμικά συστήματα, αυτό τα καθιστά μη προβλέψιμα μακροπρόθεσμα (Rausand, 2011) Συνεπώς δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί το ποσοστό της φθοράς που θα προκληθεί στο σύστημα. Προκειμένου να διατηρηθεί λοιπόν ο χρόνος ζωής του σταθμού όσο το δυνατόν πλησιέστερα στον αντίστοιχο θεωρητικό το μόνο που μπορεί να γίνει είναι η παθητική προστασία των σταθμών από τέτοια επικίνδυνα φαινόμενα (π.χ. εγκατάσταση μέσα σε κατασκευές, χρήση αλεξικέραυνου)

Ένα ακόμα στοιχείο προς αξιολόγηση είναι η ενεργειακή κατανάλωση του σταθμού. Στον πίνακα 26 παραθέτονται ενδεικτικά τα βασικά στοιχεία που απαρτίζουν τον σταθμό. Με αυτά και με κάποια υπόλοιπα παρελκόμενα στοιχεία η κατανάλωση του σταθμού δεν ξεπερνά τα 12W. Εάν η εγκατάσταση του σταθμού γίνει εντός προστατευμένης περιοχής (π.χ. κατοικία, βιομηχανικός χώρος), η παροχή της απαραίτητης ενέργειας γίνεται εύκολα μέσω κατάλληλου μετασχηματιστή τάσης. Η χρήση του σταθμού σε κάποια δύσβατη περιοχή που δεν καλύπτεται από ηλεκτρικό δίκτυο μπορεί να γίνει κάνοντας χρήση φωτοβολταϊκών στοιχείων και συσσωρευτή βαθιάς εκφόρτισης. Ένας τέτοιος συσσωρευτής με στοιχεία 12V/40Ah-C10 μπορεί

άνετα να διατηρήσει την λειτουργία της συσκευής για 40 περίπου ώρες, πράγμα που σημαίνει ότι ο συσσωρευτής θα προλαβαίνει να φορτίσει κατά τη διάρκεια της μέρας μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων, εξασφαλίζοντας την απρόσκοπτη λειτουργία του σταθμού.

Πίνακας 26: Καταναλώσεις στοιχείων του σταθμού. Node power consumption

Ονομασία υποσυστήματος	Ενεργειακή κατανάλωση (W)
msp432	0.0164
ads1256	0.036
Μονάδα χρονισμού	0.067
xbee pro	0.063
wandboard quad	10
max697	0.6
ASP	0.605
Συνολική κατανάλωση (W)	<u>11.4714</u>

Πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι ο συγκεκριμένος σταθμός δεν κρίνεται ιδιαίτερα ενεργοβόρος σε σχέση με αντίστοιχα καταγραφικά σεισμών του εμπορίου (1-2W/channel (Havskov & Alguacil, 2016)), παρόλη τη χρήση της μονάδας επεξεργασίας (μέγιστη κατανάλωση 10W), η οποία ουσιαστικά είναι ένας υπολογιστής με πλήρεις λειτουργίες. Συνολικά, συγκρίνοντας τις προδιαγραφές του σταθμού με αυτές που έχουν οριστεί σαν πρότυπο για τα καταγραφικά από τον οργανισμό IRIS (Collins et al., 2001), μπορεί να θεωρηθεί ότι οι προδιαγραφές - πρότυπο προσεγγίζονται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων (Πίνακας 27). Μια μικρή διαφορά υφίσταται όσον αναφορά στο περιθώριο θορύβου, το οποίο στον σταθμό είναι πιο αυξημένο σε σχέση με την προδιαγραφή που ορίζει ο οργανισμός IRIS (θόρυβος \leq NLNM). Αυτό οφείλεται στη χρήση ποιοτικότερων ημιαγωγών, ή ακόμα και στην χρήση ενισχυτών κατασκευασμένων με διακριτά στοιχεία. Επίσης, η χρήση ποιοτικότερων αισθητήρων θα βελτίωνε σημαντικά την καταγραφόμενη πληροφορία. Το επιταχυνσιόμετρο που επιλέχθηκε είναι ναι μεν το καλύτερο επιταχυνσιόμετρο στην κατηγορία του, αλλά έχει αρκετά υψηλό θόρυβο. Το γεώφωνο που φέρει ο σταθμός έχει περιθώριο θορύβου συμβατό με τις προδιαγραφές του IRIS, αλλά έχει σχετικά μεγάλη συχνότητα συντονισμού (4.5Hz). Ένα γεώφωνο με $F_c \cong 1\text{Hz}$, όπως για παράδειγμα το Lenartz LE-3D/DIN, το οποίο είναι και συμβατό με την υποδοχή εισόδου των αισθητήρων, θα βελτίωνε σημαντικά την

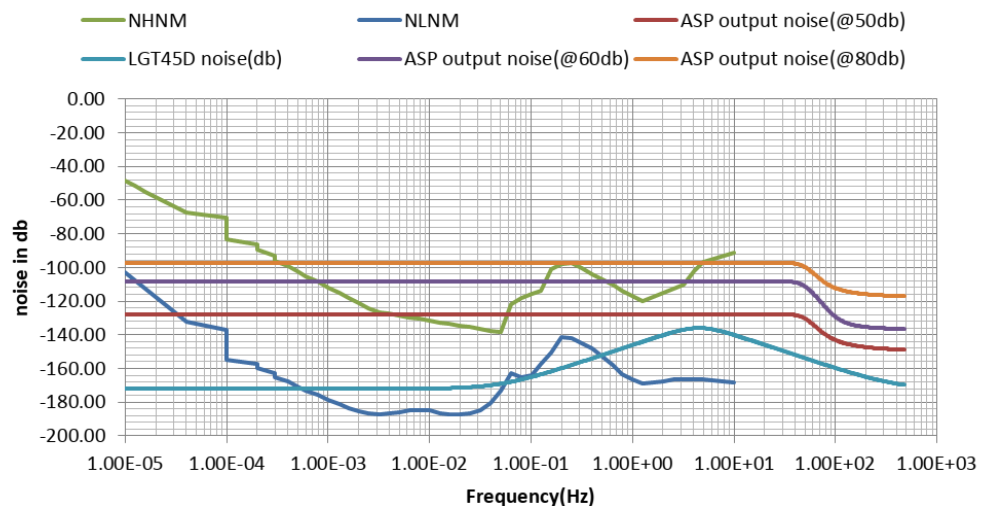
πιστότητα στην καταγεγραμμένη πληροφορία, και θα αύξανε σημαντικά τον αριθμό των σεισμικών γεγονότων που καταγράφονται Βέβαια κάτι τέτοιο θα οδηγούσε στην κατακόρυφη αύξηση του κόστους του σταθμού. Συμπερασματικά, ο σταθμός φέροντας τους αισθητήρες που προαναφέρθηκαν και αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 3, δύναται να καταγράψει με ακρίβεια μισής μονάδας τοπικά γεγονότα με επικεντρική απόσταση $\approx 150\text{km}$, αλλά και απομακρυσμένα ($\sim 300\text{km}$) τα οποία όμως έχουν μεγάλο σφάλμα (μίας μονάδας) στον υπολογισμό του μεγέθους τους. Αυτό οφείλεται στον περιορισμό του συχνοτικού φάσματος που λαμβάνεται από απομακρυσμένους σεισμούς, όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο υποκεφάλαιο η μέση σεισμική περίοδος είναι σταθερή για επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες των 150km (Wu et al., 2007). Συνεπώς, το σφάλμα στα απομακρυσμένα σεισμικά γεγονότα δεν οφείλεται σε κάποιο προγραμματιστικό λάθος, αλλά στη συχνότητα συντονισμού του επιλεγμένου γεώφωνου η οποία δεν είναι κατάλληλη, προκειμένου να καταγράψει συχνοτικό περιεχόμενο από πιο απομακρυσμένα γεγονότα τα οποία έχουν μεγαλύτερες σεισμικές περιόδους. Η εν λόγω επιλογή αισθητήρων, δεν κρίνεται περιοριστική για χρήση σε Σ.Ε.Σ.Π, αφού τέτοια συστήματα αποτελούνται από πολλούς σταθμούς και κάθε σταθμός επιτηρεί μια συγκεκριμένη περιοχή. Με βάση τα παραπάνω ο υπολογισμός του μεγέθους της σεισμικής ροπής με βάση την εξίσωση 6.1 είναι ακριβής για επικεντρικές αποστάσεις μικρότερες των 150 χιλιομέτρων.

Πίνακας 27: Σύγκριση προδιαγραφών IRIS-σταθμού. Specification comparison

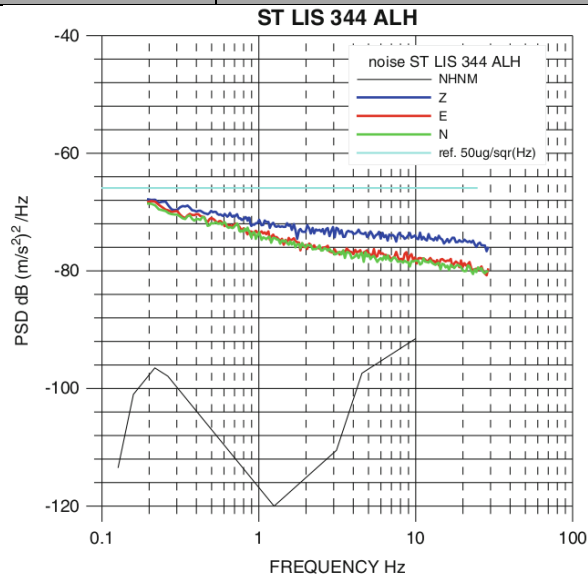
Προδιαγραφές GSN	Προδιαγραφές σταθμού E.A.Sy
<u>Ψαλιδισμός</u>	
• 20 V _{pp} διαφορικές είσοδοι	• 8 διαφορικές είσοδοι (αναλογικές), 18V _{pp}
<u>Παραμετροποιήσιμο κέρδος</u>	
• 1db , 20db, 30db ή 40db	• 50db, 60db ή 80db
<u>Μνήμη</u>	
• Αφαιρούμενη, 1 έτος τηλεμετρία	• Αφαιρούμενη, 1 έτος τηλεμετρία με 6 κανάλια ανά ημέρα ($\sim 47\text{GB/Y}$) έξι έτη τηλεμετρία με ένα κανάλι ανά ημέρα ($\sim 50\text{GB}$) υποστηρίζει δύο αρθρώματα SDHC και μια συσκευή SATA
<u>Περιθώριο θορύβου</u>	
• Περιθώριο θορύβου βασισμένο στο NLNM?	$f_{\text{signal}} < 50\text{Hz}$ <ul style="list-style-type: none"> • θόρυβος -128.05db (Σχήμα 61) • SNR 195 - 111db (Σχήμα 62)
<u>Ισχύς</u>	

Προδιαγραφές GSN	Προδιαγραφές σταθμού E.A.Sy
<ul style="list-style-type: none"> • 2W/ κανάλι. • Τάση τροφοδοσίας 11.5 V - 18 V 	<ul style="list-style-type: none"> • 12V/8 κανάλια. • Τάση τροφοδοσίας +12VDC
Αξιοπιστία	
<ul style="list-style-type: none"> • 40,000 ώρες MTBF με προσδόκιμο ζωής 10 έτη. 	<ul style="list-style-type: none"> • 32533 ώρες MTBF, τέσσερα έτη προσδόκιμο ζωής. Θερμοκρασία λειτουργίας -25 - 85 °C
Συντήρηση	
<ul style="list-style-type: none"> • Σχηματικά σχέδια, ικανότητα αλλαγής αρθρώματος 	<ul style="list-style-type: none"> • Σχηματικά σχέδια, ικανότητα αλλαγής αρθρώματος
Συνδεσιμότητα	
<ul style="list-style-type: none"> • Διόρθωση σφαλμάτων στα δεδομένα της Τηλεμετρίας • Πληθώρα πρωτοκόλλων επικοινωνίας. • Ικανότητα απομακρυσμένου ελέγχου. • Ασφαλής επικοινωνία 	<ul style="list-style-type: none"> • Μετάδοση σε σχεδόν πραγματικό χρόνο στην υπηρεσία Seiscomp3 • Υπηρεσία καταγραφής συμβάντων της εφαρμογής • Αλγόριθμοι διόρθωσης σφαλμάτων • IEEE 802.3, IEEE 802.11a/b/g/n/ac, IEEE 802.15.4 πρωτόκολλα επικοινωνίας. • Ασφαλής επικοινωνία μέσω SSH Ικανότητα απομακρυσμένου ελέγχου.

Μοντέλα περιβάλλοντα θορύβου NLNM/NHNM σε σύγκριση με τον θόρυβο των ASP & LGT45D

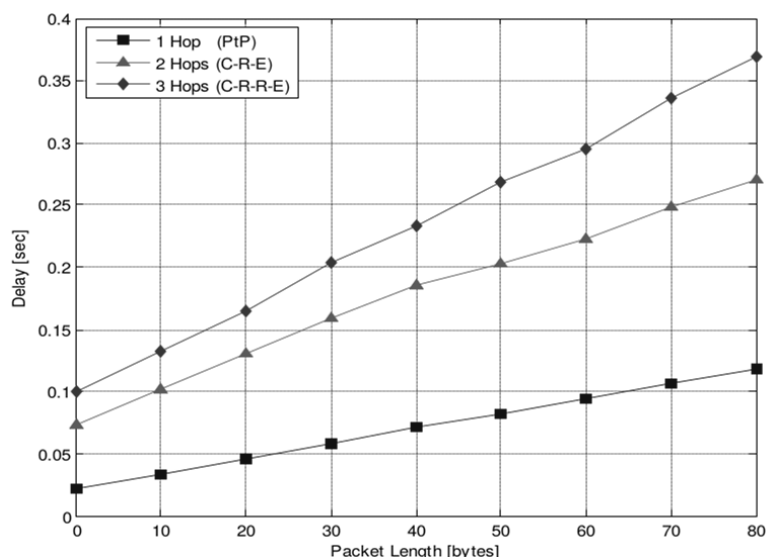


Μοντέλα περιβάλλοντα θορύβου NHNM σε σύγκριση με τον θόρυβο του LIS344ALH instrument noise (Havskov & Alguacil, 2016)



5.1.5 Εκτίμηση συμπεριφοράς τελικών συσκευών

Παρατηρώντας τα δεδομένα του πίνακα 10 και κυρίως τα σημεία που αφορούν τους χρόνους επικοινωνίας που απαιτεί η αποστολή δεδομένων μέσω του XBee και μέσω της IoT υπηρεσίας, το πρωτόκολλο XBee θα μπορούσε να θεωρηθεί ταχύτερο. Η πραγματικότητα όμως είναι λίγο διαφορετική, γιατί το XBee σαν άρθρωμα επικοινωνίας δεν απαιτεί 18.8μs για κάθε απόσταση εντός της περιοχής κάλυψής του. Όσο αυξάνεται η απόσταση, αυξάνεται και ο χρόνος επικοινωνίας (RTT). Επίσης, εντός ενός αστικού περιβάλλοντος, η περιοχή εποπτείας ενός coordinator περιορίζεται σημαντικά (330m), γεγονός που σημαίνει ότι για να υπάρξει ένα μεγάλο δίκτυο, θα χρειαστούν ενδιάμεσοι δρομολογητές που να επαναπροωθούν τα δεδομένα που στέλνει ο συντονιστής προς τις τελικές συσκευές. Το σκεπτικό αυτό όμως, θα οδηγούσε σε σημαντικές χρονικές καθυστερήσεις, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 64 (Piyare & Lee, 2013).



Σχήμα 64: Χρονική καθυστέρηση συναρτήσει του μήκους και του αριθμού των μεταπηδήσεων

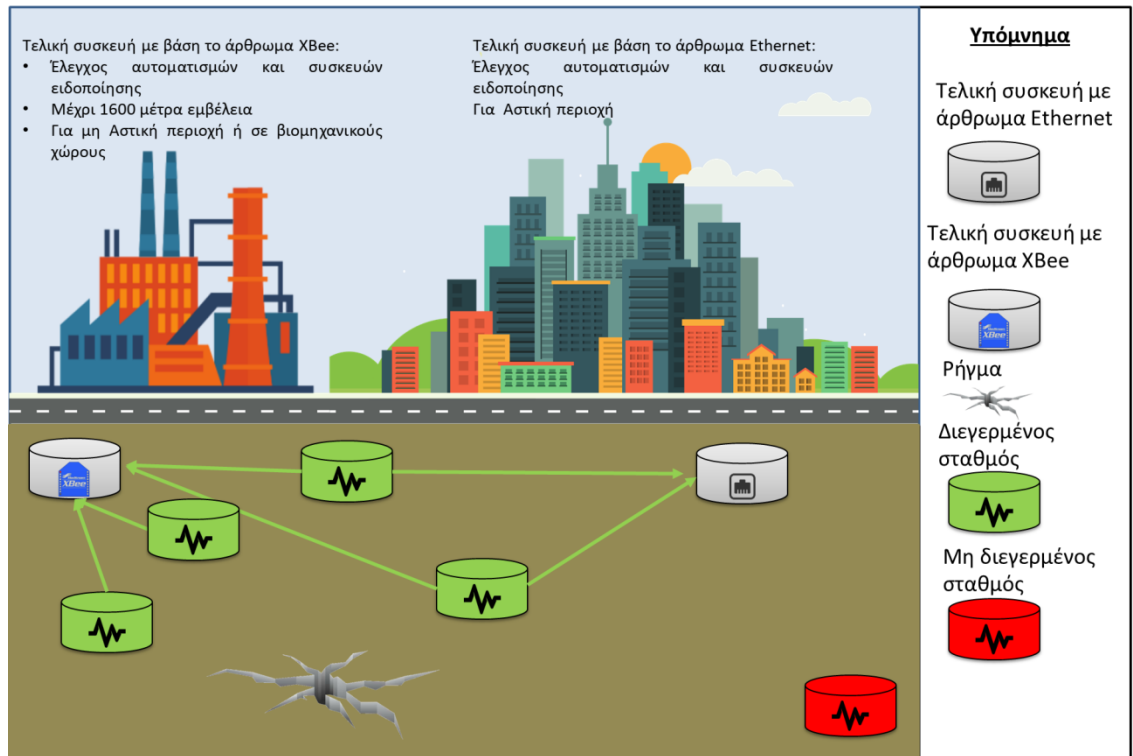
(Piyare & Lee, 2013). Time delay related with packet size and number of hops.

Η ανάγκη τοποθέτησης ανά τακτά μέτρα δρομολογητών, θα αύξανε σημαντικά την πολυπλοκότητα του συνολικού δικτύου. Σε αντίθεση με το άρθρωμα XBee, ο χρόνος επικοινωνίας μιας τελικής συσκευής δεν επηρεάζεται από την απόσταση σταθμού-συσκευής, απαιτεί ωστόσο διαρκή σύνδεση στο διαδίκτυο. Συνοψίζοντας, καμία από τις δύο υλοποιήσεις δεν είναι τέλεια και ικανή να χρησιμοποιηθεί σε οποιοδήποτε περιβάλλον. Μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν ξεχωριστά, αξιοποιώντας τα πλεονεκτήματα του κάθε ενός αρθρώματος. Για παράδειγμα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 65, τελικές συσκευές με άρθρωμα XBee θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν σε μη αστικές περιοχές, επειδή έχουν μεγάλο εύρος κάλυψης και πιθανότατα σε μια μη αστική περιοχή δεν υπάρχει κάλυψη δικτύου. Αντίστοιχα, τελικές συσκευές με άρθρωμα Ethernet, μπορούν εύκολα να χρησιμοποιηθούν σε αστικές περιοχές, αφού η κάλυψη του δικτύου αγγίζει το 100% περίπου των αστικών περιοχών.

Η κατανάλωση των τελικών συσκευών που βασίζονται στο άρθρωμα XBee κυμαίνεται από 120mW μέχρι 3W, ανάλογα με την τάση εισόδου που θα τροφοδοτηθεί το κύκλωμα, ενώ οι τελικές συσκευές με άρθρωμα Ethernet έχουν κατανάλωση 0.77W έως και 2W.

Προκειμένου να αποφευχθούν περιττές διακοπές στην λειτουργία των μονάδων που επιβλέπουν οι τελικές συσκευές, οι τελευταίες πρέπει να λάβουν οδηγία τερματισμού από περισσότερους από έναν γειτονικούς σταθμούς. Με

αυτό τον τρόπο, μια τυχαία διέγερση που μπορεί να προκύψει σε έναν σταθμό από κάποιον εξωτερικό παράγοντα (π.χ. ριπή αέρα, κάποια έντονη δόνηση προερχόμενη από ανθρώπινη δραστηριότητα), παραβλέπεται.



Σχήμα 65: Εγκατάσταση τελικών συσκευών. End Devices installation

5.2 Συνολική εκτίμηση - Μελλοντικές Προεκτάσεις

Το σύστημα E.A.Sy. είναι σχεδιασμένο με τεχνολογίες ανοιχτού υλικού/λογισμικού. Το γεγονός αυτό καθιστά ιδιαίτερα εύκολη την προσθήκη προεκτάσεων από μελλοντικούς ερευνητές, καθώς ο κώδικάς του είναι ανοιχτός και προσβάσιμος από όλο τον κόσμο. Το κόστος τόσο των σταθμών όσο και των τελικών συσκευών θεωρείται ιδιαίτερα χαμηλό (Πίνακας 28), ειδικά αν συγκριθεί με το κόστος που απαιτείται για να την απόκτηση ενός καταγραφικού με έναν ή δύο αισθητήρες (Πίνακας 29), Η τιμή του κόστους κατασκευής ενός σταθμού του συστήματος E.A.SY αφορά προϊόντα λιανικής αγοράς, που σημαίνει ότι το κόστος παραγωγής θα μειώνονταν σημαντικά σε μια μαζική παραγωγή του συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη την αρθρωτή κατασκευή του, το σύστημα καθίσταται εύκολα επιδιορθώσιμο, αφού σε μια ενδεχόμενη βλάβη το μόνο που θα πρέπει να γίνει είναι η αφαίρεση του κατεστραμμένου αρθρώματος και η αντικατάστασή του από ένα καινούριο.

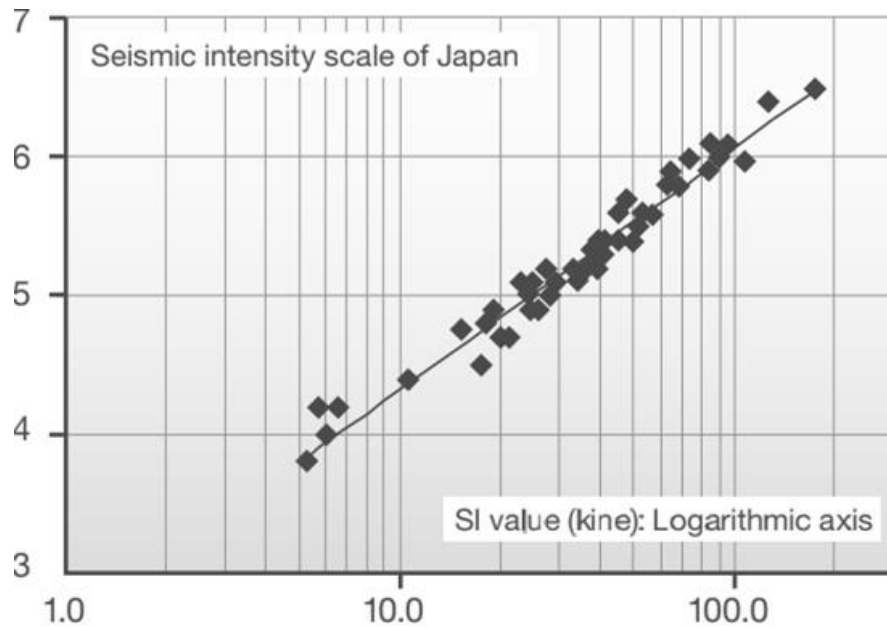
Όσον αφορά τη μονάδα ψηφιοποίησης, πέραν της εύκολης επιδιόρθωσης της, δίνει τη δυνατότητα εύκολης αναβάθμισης, καθώς μπορεί να φέρει οποιοδήποτε αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα συμβατό με το πρωτόκολλο SPI. Συνεπώς, μια αναβάθμιση σε 32bit ADC μελλοντικά καθίσταται εφικτή. Επιπρόσθετα, η χρήση του ADS1256 απαιτεί ιδιαίτερα απαιτητικό χειρισμό, λόγω της πολυπλεξίας που πραγματοποιείται μεταξύ των εισόδων που έχει. Το αποτέλεσμα της πολυπλεξίας είναι να απαιτούνται πολύ περισσότερα δείγματα προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό αποτέλεσμα. Πιο συγκεκριμένα, το καταγραφικό για να αποστείλει δεδομένα με ρυθμό 100 sps χρειάστηκε να ρυθμισθεί ο καταχωρητής DRATE του στην τιμή των 1000 δειγμάτων/δευτερόλεπτο. Σαν συνέπεια αυτού, η συχνότητα αποκοπής του ενσωματωμένου φίλτρου που έχει το ADS1256 βρίσκεται στα 441Hz (βάσει της εξ. 3.12), πράγμα που καθιστά το φίλτρο άχρηστο μιας και οι συχνότητες των σεισμικών κυμάτων είναι υπερβολικά μικρότερες. Η χρήση ενός ADC με ν αυτόνομα κανάλια θα απλούστευε πολύ τον κώδικα του καταγραφικού και θα παρείχε περισσότερες επιλογές δειγματοληψίας στην τελική συσκευή. Μελλοντικά, μπορεί να αντικατασταθεί και ο επεξεργαστής της μονάδας προεπεξεργασίας με κάποιο μελλοντικό μοντέλο, μιας και ακολουθείται συμβατότητα προς τα πίσω (Backward Compatibility) στην οικογένεια επεξεργαστών MSP43x που χρησιμοποιήθηκε στη διατριβή. Καταλήγοντας με το σκέλος του υλικού, αξίζει να τονιστεί ότι η χρήση συσκευών τύπου USB τόσο στην μονάδα προεπεξεργασίας, όσο και σε κάποια περιφερειακά (XBee, GPS), παρουσίασε προβλήματα από τυχόν επανεκκινήσεις του USB δίαυλου επικοινωνίας. Συνεπώς, μια μελλοντική αλλαγή που θα μπορούσε να γίνει, είναι η χρήση κάποιας μονάδας επεξεργασίας (π.χ. Beaglebone Black) η οποία θα φέρει ικανό αριθμό σειριακών θυρών για απευθείας σειριακή ζεύξη περιφερειακών με τη μονάδα επεξεργασίας.

Σχολιάζοντας το λογισμικό, η επιλογή της γλώσσας java σαν πυρήνα της εφαρμογής ήταν απαραίτητη προκειμένου η εφαρμογή να μπορεί να εκτελεστεί σε οποιοδήποτε λειτουργικό και σε επεξεργαστή οποιασδήποτε αρχιτεκτονικής. Το συντακτικό της γλώσσας είναι συμβατό με τις νεότερες εκδόσεις της, με αποτέλεσμα να μη χρειαστεί σύντομα ριζική αλλαγή στον πυρήνα του προγράμματος.

Αλγοριθμικά, ο κώδικας είναι εύκολα επεκτάσιμος μέσω των διάφορων διεπαφών (interfaces) και των βιβλιοθηκών που έχουν αναπτυχθεί για τους

αλγόριθμους διέγερσης και εκτίμησης της εδαφικής κίνησης. Συνεπώς, οι μελλοντικοί ερευνητές μπορούν εύκολα να προσθέσουν νέους αλγόριθμους διέγερσης, η ακόμα και να προσθέσουν τον αλγόριθμο εκτίμησης τ_p που πρότειναν οι Allen και Kanamori (Allen & Kanamori, 2003), προκειμένου να γίνει το σύστημα E.A.Sy πιο πλούσιο σε επιλογές. Επίσης, θα πρέπει μελλοντικά να μελετηθεί η συμπεριφορά του αλγόριθμου για καταγραφές πολύ μεγάλου μεγέθους ($M_w \geq 6.5$), προκειμένου να γίνει πιθανή αναπροσαρμογή της εξίσωσης υπολογισμού του μεγέθους σεισμικής ροπής.

Στο πεδίο των αισθητήρων, προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα ευαισθησίας του γεώφωνου, προτείνεται η μέθοδος μετατροπής του γεώφωνου σε χωρητικό αισθητήρα (Barzilai, 2000). Αυτός ο τρόπος λειτουργίας είναι ανάλογος με τον τρόπο λειτουργίας των κλασικών αισθητήρων και αποφέρει συγκρίσιμα αποτελέσματα θορύβου και ωφέλιμης πληροφορίας σε σχέση με τα συμβατικά σεισμόμετρα. Τέλος, προτείνεται η αντικατάσταση του επιταχυνσιόμετρου με το ψηφιακό αισθητήρα **Omnion-d7s**. Το συγκεκριμένο όργανο, είναι χαμηλής κατανάλωσης, φέρει επιταχυνσιόμετρο και μονάδα επεξεργασίας και είναι ικανό να καταγράψει επιταχύνσεις $\pm 2000\text{gal}$. Βαθμονομεί τους άξονές του αυτόματα και έχει δυνατότητα αποθήκευσης των πέντε τελευταίων σεισμικών γεγονότων, ενώ μπορεί να παραμετροποιηθεί από τον χρήστη μέσω του πρωτοκόλλου I²C. Λειτουργεί πλήρως αυτόματα, οδηγώντας την έξοδό του σε χαμηλό επίπεδο στην περίπτωση που υπάρχει σεισμός μεγέθους 5 της κλίμακας M_{JMA} (Japan Meteorological Agency), Αρχή λειτουργίας του συγκεκριμένου οργάνου είναι η γραμμική σχέση που παρατηρείται μεταξύ της κλίμακας M_{JMA} (Σχήμα 66) και της φασματικής έντασης (Spectral Intensity – SI), η οποία υπολογίζεται από την κανονικοποιημένη τιμή του ολοκληρώματος του φάσματος της ψευδο-ταχύτητας (S_v) με συντελεστή απόσβεσης h (συνήθως 0.05) για περίοδο 0.1 s - 2.5 s (εξίσωση 6.2.) (Bradley et al., 2009).



Σχήμα 66: Γραφική παράσταση SI - M_{JMA}
SI - M_{JMA} correlation (Omron, 2017)

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(t, h) dt \quad (6.2)$$

$$M_W = \begin{cases} 0.58M_{JMA} + 2.25, & 3 < M_{JMA} < 5.5 \\ 0.97M_{JMA} + 0.04, & 5.6 < M_{JMA} < 8.2 \end{cases} \quad (6.3)$$

Η συγκεκριμένη κλίμακα (M_{JMA}) μετά από έρευνα με χρήση 20,967 σεισμικών γεγονότων από όλο τον κόσμο (1976-2003), αντιστοιχίστηκε γραμμικά με το μέγεθος σεισμικής ροπής (Scordilis, 2005) (εξ. 6.3). Συνεπώς, η χρήση ενός τέτοιου αισθητήρα μπορεί να δώσει στους σταθμούς μια επιπλέον λειτουργία: Της διαχείρισης κρίσης. Με ένα πυκνό δίκτυο τέτοιων αισθητήρων μπορεί λίγα λεπτά μετά από ένα καταστρεπτικό σεισμό να υπάρχει εκτίμηση καταστροφών ανά περιοχή, οπότε να υπάρξει καλύτερος συντονισμός και οργάνωση στις μονάδες υγείας/διάσωσης/πρώτων βοηθειών. Επίσης μέσω αλγόριθμου, ο οποίος δεν περιγράφεται από τον κατασκευαστή, μπορεί να ξεχωρίσει τα σεισμικά σήματα από πηγές θορύβου που θα μπορούσαν να προκαλέσουν εσφαλμένη προειδοποίηση.

Μελλοντικά θα μπορούσε να γίνει χρήση αρθρωμάτων μεγάλης εμβέλειας, όπως για παράδειγμα το XBee-PRO® 900HP το οποίο παρέχει εμβέλεια κάλυψης μέχρι και 45 χιλιόμετρα. Κάτι τέτοιο θα ήταν ωφέλιμο γιατί θα μείωνε τον χρόνο απόκρισης του συστήματος μιας που δεν θα χρειάζεται η παρουσία

ενδιάμεσων δρομολογητών ανάμεσα σε σταθμούς και τελικές συσκευές, όπως είναι τώρα απαραίτητο στις τελικές συσκευές με άρθρωμα Ethernet. Επιπλέον μια τέτοια μεταφορά θα μειώσει τον κίνδυνο κατάρρευσης του δικτύου σε περίπτωση κάποιου καταστρεπτικού γεγονότος

Κλείνοντας, ένα τέτοιο σύστημα κρίνεται ιδιαίτερα χρήσιμο, όχι μόνο για την προστασία του αστικού και μη ιστού, αλλά και για την προστασία διαφόρων βιομηχανικών μονάδων, οι οποίες φέρουν ευαίσθητα υλικά, όπως:

- Πετρελαϊκές βιομηχανίες
- Χημικές βιομηχανίες
- Data Centers σε εταιρίες πληροφορικής / Παρόχους Τηλεπικοινωνίας
- Βιομηχανίες Φαρμάκων

Παρόλα τα θετικά που αναφέρθηκαν, πρέπει να τονιστεί ιδιαίτερα, πως τέτοιου είδους συστήματα, δεν αποτελούν πανάκεια. Υπάρχει πάντα η πιθανότητα κάποιας εσφαλμένης προειδοποίησης, ενώ όπως αποδείχθηκε και πειραματικά η μορφολογία του εδάφους αλλά και η ίδια η εγκατάσταση των πόλων στο χώρο επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του συστήματος. Επίσης ο πληθυσμός ο οποίος διαμένει σε μια περιοχή που εποπτεύεται από ένα Σ.Ε.Σ.Π. θα πρέπει να είναι εκπαιδευμένος στην λειτουργία τέτοιων συστημάτων, αλλιώς μπορεί να υπάρχουν τραυματισμοί από τον πανικό.

Η χρήση κατανεμημένων σειсмоγραφικών δικτύων παράλληλα με την χρήση νέων τεχνολογιών επικοινωνίας είναι μια προσέγγιση που έχει ξεκινήσει ήδη να εφαρμόζεται (Kazushige et al., 2005) και οι τάσεις δείχνουν ότι μελλοντικά όλα τα δίκτυα υποδομής (Hines et al., 2017) θα βασίζονται σε αντίστοιχες προσεγγίσεις. Χαρακτηρίζονται από οικονομία, μιας και δεν απαιτείται η ύπαρξη ενός ισχυρού κεντρικού διακομιστή, και από ταχύτητα αφού οι ίδιοι οι σταθμοί – κόμβοι ενός τέτοιου δικτύου είναι αυτοί υπεύθυνοι για την λήψη των αποφάσεων σε ένα ενδεχόμενο σεισμικό γεγονός. Το Σ.Ε.Σ.Π. Ε.Α.ΣΥ. είναι σε πειραματικό ακόμα επίπεδο, αλλά είναι βασισμένο σε όλες τις παραπάνω αρχές.

Πέραν από τον αρχικό σκοπό λειτουργίας (η παρακολούθηση και η εκτίμηση της ενδεχόμενης καταστρεπτικότητας σεισμικών γεγονότων, το σύστημα Ε.Α.Συ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Αναφορικά μερικά παραδείγματα είναι τα εξής:

- Στη Δευτεροβάθμια εκπαίδευση, σαν επιμορφωτική διάλεξη προς τους μαθητές, προκειμένου να έρθουν σε επαφή με τις εφαρμοσμένες νέες τεχνολογίες.
- Στην Τριτοβάθμια εκπαίδευση, για εκμάθηση αλγορίθμων και πολυπλοκότητας, καθώς και ενσωματωμένων συστημάτων σε σχολές μηχανικών. Επιπλέον, δίνει τη δυνατότητα στους φοιτητές των τμημάτων Γεωλογίας για εκπόνηση σεισμολογικών μελετών, εκμάθηση διαφορετικών αλγορίθμων διέγερσης, τεχνικών δειγματοληψίας και φιλτραρίσματος δεδομένων, καθώς επίσης να έρθουν σε επαφή με βασικές αρχές λειτουργίας των οργάνων που θα χρησιμοποιήσουν στην μελλοντική τους καριέρα .

ΠΙΝΑΚΑΣ ΟΡΟΛΟΓΙΑΣ

Ξενόγλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Accelerometer	Επιταχυνσιόμετρο
Amplitude threshold trigger	Αλγόριθμος διέγερσης πλάτους
Analog Signal Preparation	Προετοιμασία Αναλογικού Σήματος
Analog to digital conversion	Μετατροπή από αναλογικό σε ψηφιακό
Anti-Aliasing Filter	Φίλτρο αντι-επικάλυψης
Autoregressive	αντι-ψευδοφάνειας
Backward Compatibility	Συμβατότητα προς τα πίσω
Bandpass filter	Ζωνοδιαβατό φίλτρο
Body wave	Κύματα χώρου
Cluster	Συστοιχία
Commercial off the shelf	Εμπορικά διαθέσιμα προϊόντα
Coordinated Universal Time	Συντονισμένη Παγκόσμια Ώρα
Coordinator	Συντονιστής
Corner Frequency	Γωνιακή συχνότητα
Cumulative envelope function	Συνάρτηση συσσωρευτικής περιβάλλουσας
Differential Non-Linear	Μη γραμμικό σφάλμα διαφόρισης
Digital Signal Processing	Ψηφιακή Επεξεργασία Σήματος
Earthquake early warning system	Σύστημα έγκαιρης σεισμικής προειδοποίησης
End Device	Τελική συσκευή
Geophone	Γεώφωνο
Global Seismic Network	Παγκόσμιο Σεισμικό Δίκτυο
Highpass filter	Ανωπερατό φίλτρο
Integral Non-linear	Μη γραμμικό σφάλμα ολοκλήρωσης
Interface	Διεπαφή
Instrumentation amplifier	Ενισχυτής οργανολογίας
Lowpass filter	Κατωπερατό φίλτρο
Modified Mercalli Intensity scale	Τροποποιημένη κλίμακα έντασης Mercalli
Multi-hop	Πολλαπλής μεταπήδησης
Network Time Protocol	Πρωτόκολλο χρονισμού δικτύων
Node	Κόμβος
Onsite warning	Επιτόπια προειδοποίηση
P-coda	Κύμα ουράς P
PAN	Δίκτυο Προσωπικού χώρου
Primary wave	P - κύμα
Probability Density Function	Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας
Regional warning	Περιφερική προειδοποίηση
Router	Δρομολογητής
Secondary wave	S -κύμα
Server	Εξυπηρετητής
Spectral Intensity	Φασματική Ένταση
Sigma-Delta Modulator	Σίγμα Δέλτα διαμορφωτής

Ξενογλωσσος όρος	Ελληνικός Όρος
Signal to Noise Ratio	Λόγος σήματος προς το θόρυβο
Single-hop	Μονής μεταπήδησης
Singular Value Decomposition	Ανάλυση Ιδιαζουσών Ιδιοτιμών
Spectral Ratio	Φασματικός λόγος
System of Systems	Σύστημα συστημάτων
Surface wave	Επιφανειακό κύμα

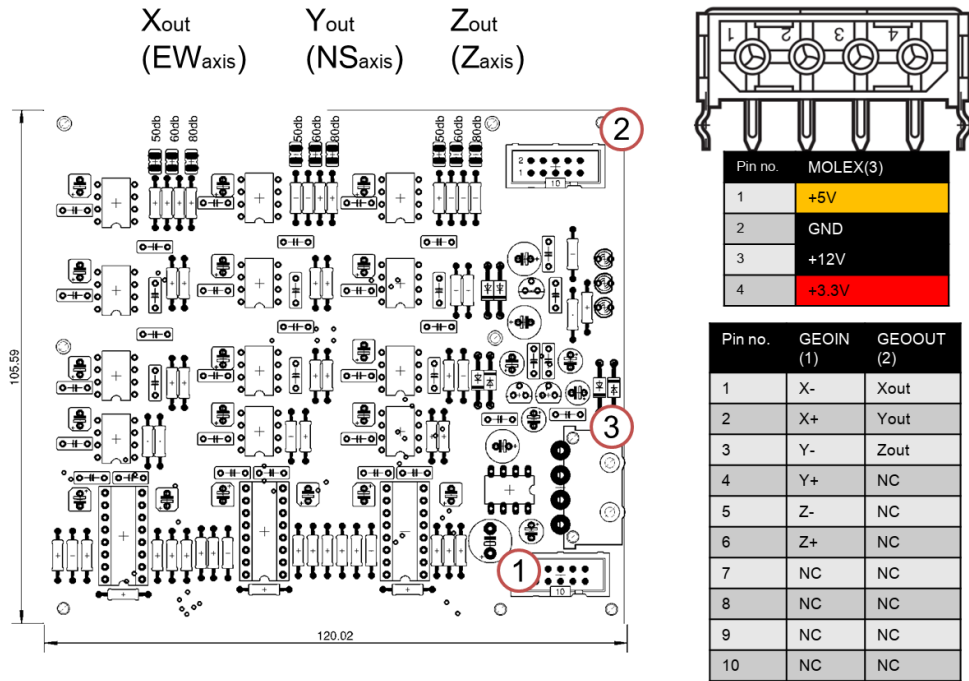
ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ

Αρκτικόλεξο	Πλήρης Μορφή
AAF	Anti Aliasing filter
ADC	Analog to Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
ASP	Analog Signal Preparation
BB	Broad-Band
CISN	California Integrated Seismic Network
CLI	Command-line Interface
COTS	Commercial off the shelf
DFT	Discrete Fourier Transform
DNL	Differential Non-Linear
DSP	Digital Signal Processing
EASY	Earthquake Alert System
EMI	Electromagnetic Interference
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulse Response
GPIO	General Purpose Input Output
GPS	Global Positioning System
GSN	Global Seismic Network
I ₂ C	Inter-Integrated Circuit
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IERREWS	Istanbul Earthquake Rapid Response and Early Warning System
IIR	Infinite Impulse Response
INL	Integral Non-Linear
IoT	Internet of Things
JMA	Japan Meteorological Agency
KS	Kalman Smoother
LP	Long Period
LTA	Long Term Average
MEMS	Micro-Electro Mechanical Systems
MMI	Modified Mercalli Intensity Scale
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time To Repair
NC	Normal Close
NHNM	New High-Noise Model
NLNM	New Low-Noise Model
NO	Normal Open
NTP	Network Time Protocol
PAN	Personal Area Network
PDF	Probability Density Function
PGA	Peak Ground Acceleration

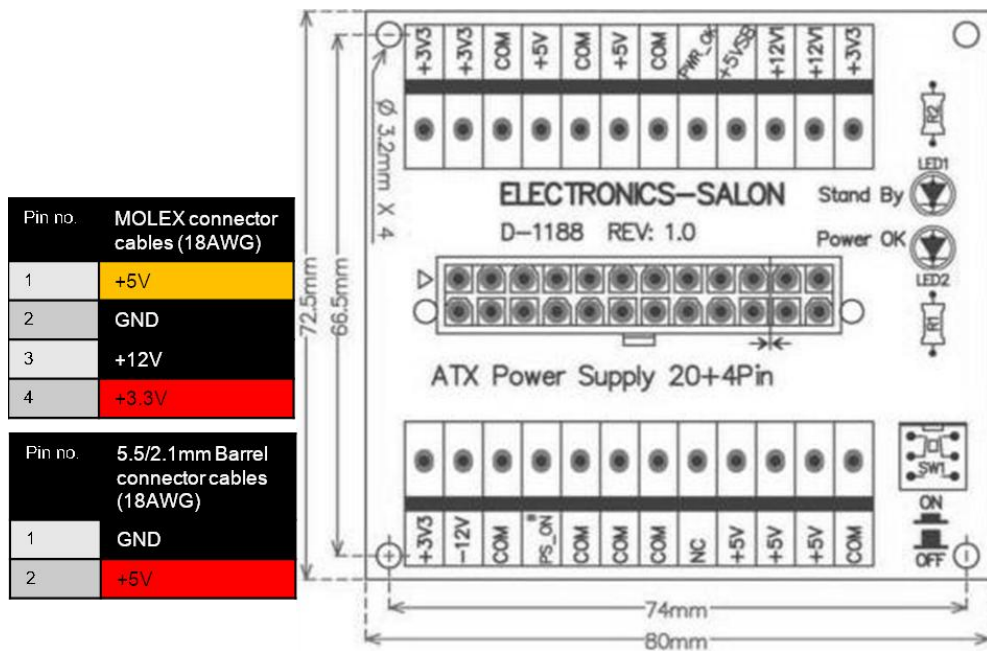
Αρκτικόλεξο Πλήρης Μορφή

PGD	Peak Ground Displacement
PGV	Peak ground velocity
PreSEIS	Pre Seismic
PRESTO	PRobabilistic and Evolutionary early warning SysTem
PSD	Power Spectral Density
PZC file	Pole Zero Constant file
RAN	Rete Accelerometrica Nazionale
REAKT	Strategies and tools for Real Time EArthquake RiSk ReducTion
RTC	Real Time Clock
SAC	Seismic Analysis Code
SAFER	Seismic Early Warning for Europe
SAFER	Seismic eArly warning For EuRope
SDCS	sensor detect current sources
SDM	Sigma-Delta Modulator
SI	Spectral Intensity
SLA Battery	Sealed Lead – Acid Battery
SM	Strong Motion
SNR	Signal to Noise Ratio
SoS	System of Systems
SP	Short Period
SPI	Serial Peripheral Interface
STA	Short Term Average
ST-AR	Short-time autoregressive
STFT	Short Time Fourier Transform
SVD	Singular Value Decomposition
UTC	Coordinated Universal Time
VBB	Very Broad-Band
VS	Virtual Seismologist
VSN	Virtual Sub-Network
WDT	Watchdog Timer
ΒΔ	Βάση Δεδομένων
ΕΔΕΤ	Εθνικό Δίκτυο Έρευνας & Τεχνολογίας
Σ.Ε.Σ.Π.	Σύστημα Έγκαιρης Σεισμικής Προειδοποίησης

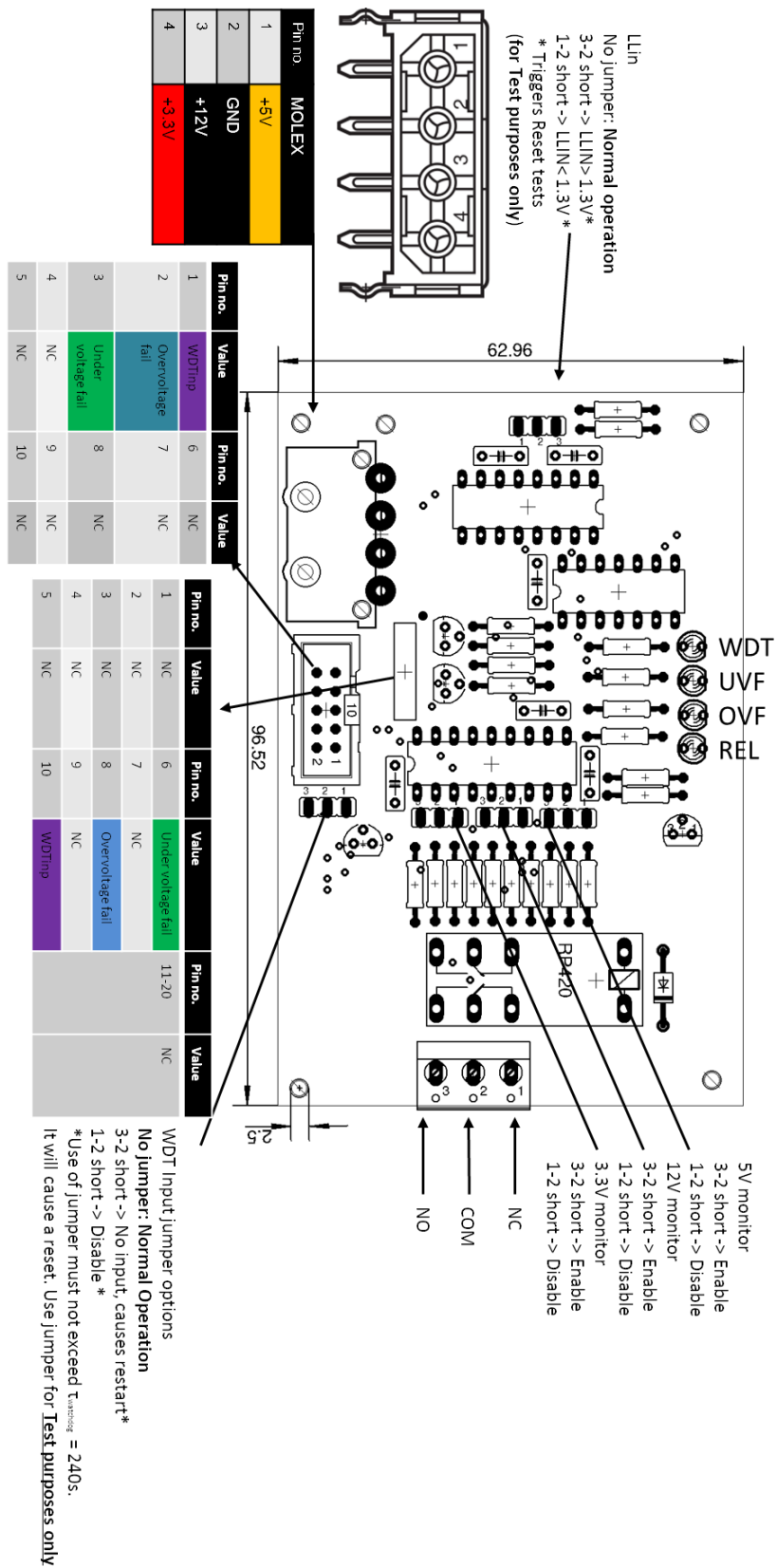
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι - Υλικό



Σχήμα 67: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας ASP
Dimensions and pinout of ASP unit



Σχήμα 68: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας τροφοδοσίας
Dimensions and pinout of supplier unit

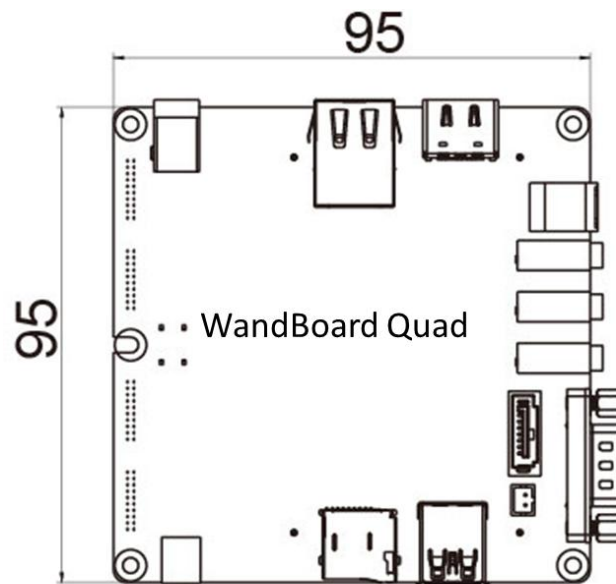
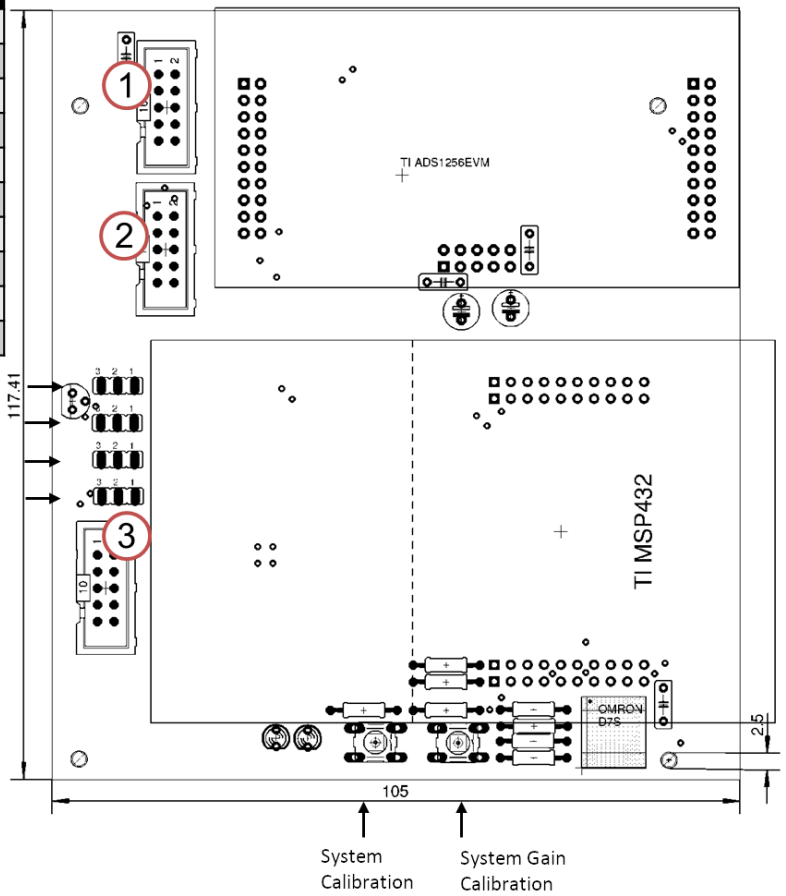


Σχήμα 69: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας ελέγχου τάσης

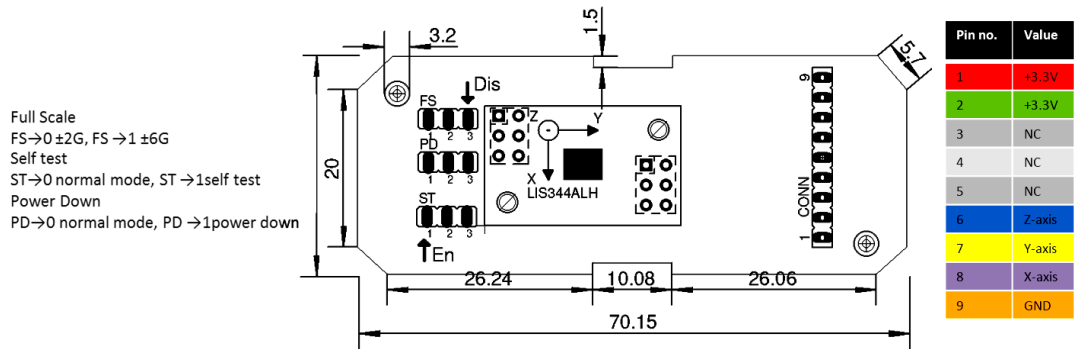
Dimensions and pinout of voltage monitor unit

Pin no.	ACC (1)	GEOOUT (2)	WDT (3)
1	+3.3V	Xout	WDTinp
2	+3.3V	Yout	Overvoltage fail
3	Z	Zout	Under voltage fail
4	X	NC	NC
5	Y	NC	NC
6	GND	NC	NC
7	NC	NC	NC
8	NC	NC	NC
9	NC	NC	NC
10	NC	NC	NC

CH7EN(pin3 Voltmon, pin1 gnd)
 CH7EN(pin3 Tempmon, pin1 gnd)
 SYSREFP(pin3 5v, pin1 gnd)
 SYSREFN(pin3 5v, pin1 gnd)

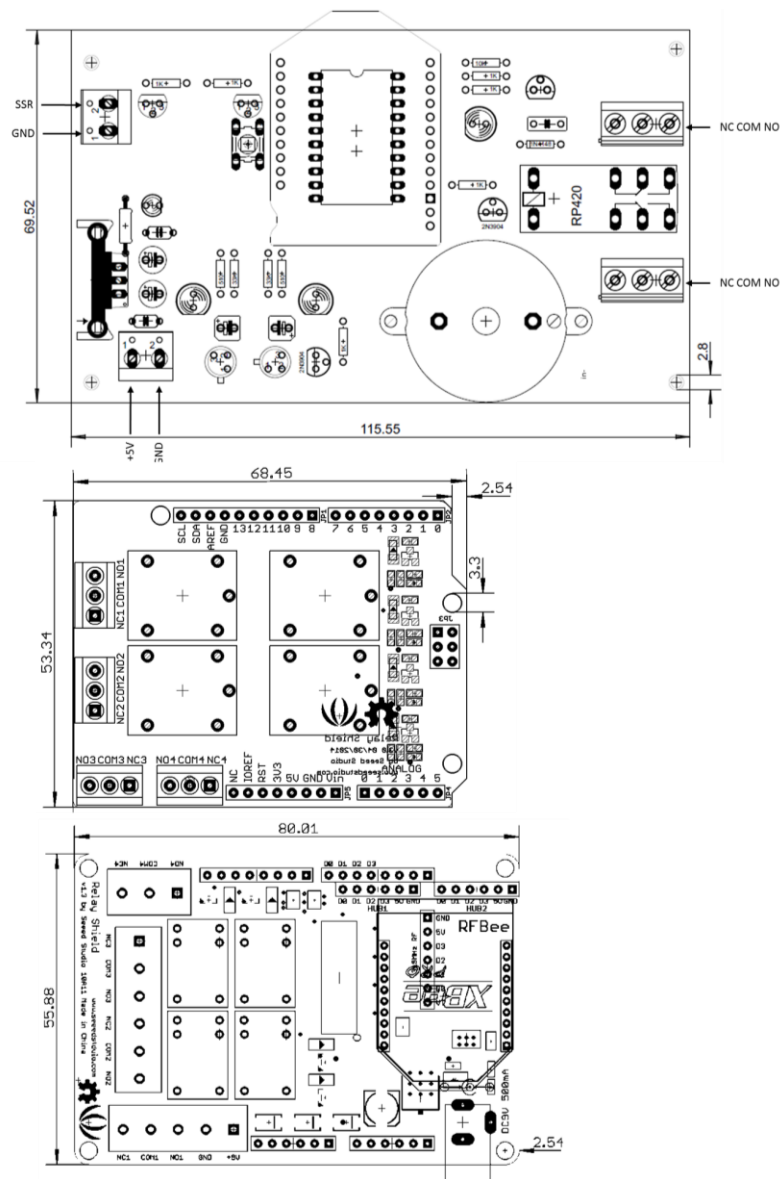


Σχήμα 70: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων μονάδας προεπεξεργασίας και επεξεργασίας σήματος. Dimensions and pinout of the pre-processing and the processing unit



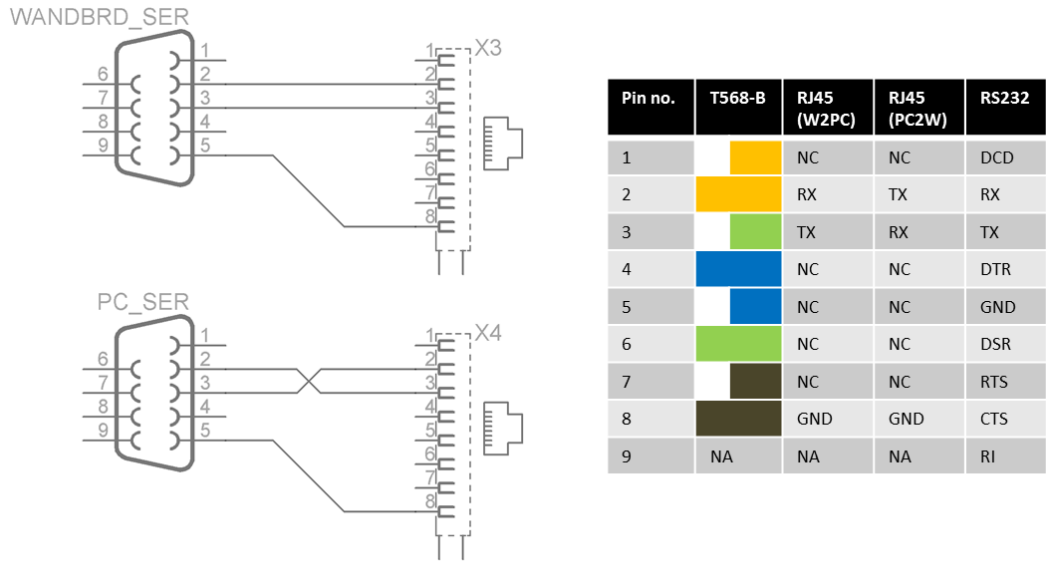
Σχήμα 71: Διαστάσεις και θέση ακροδεκτών εξαρτημάτων αισθητήριου επιτάχυνσης

Dimensions and pinout of accelerometer sensor

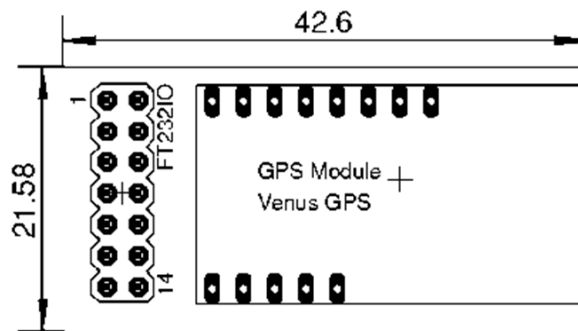


Σχήμα 72: Τελικές Συσκευές

End Devices

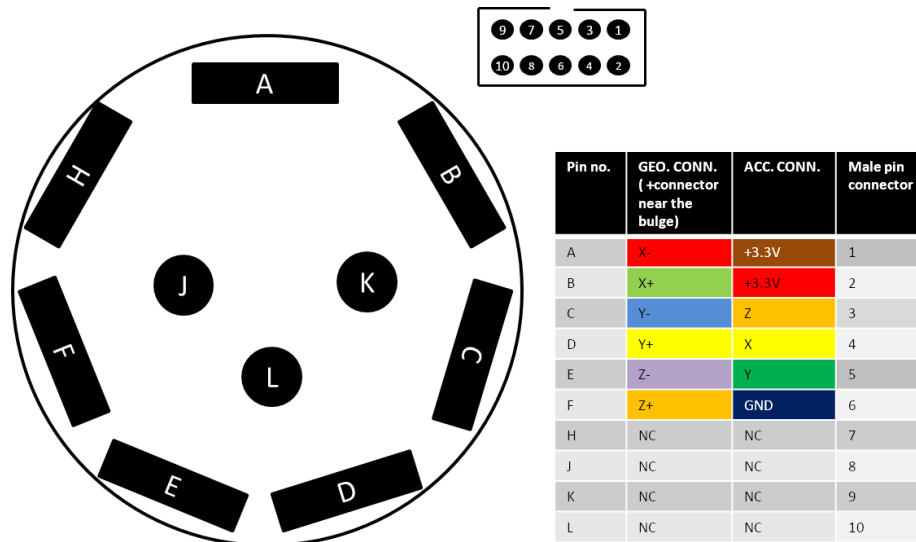


Σχήμα 73: Διασύνδεση σειριακής πόρτας με βύσμα RJ-45
RJ-45 to RS-232 pin out

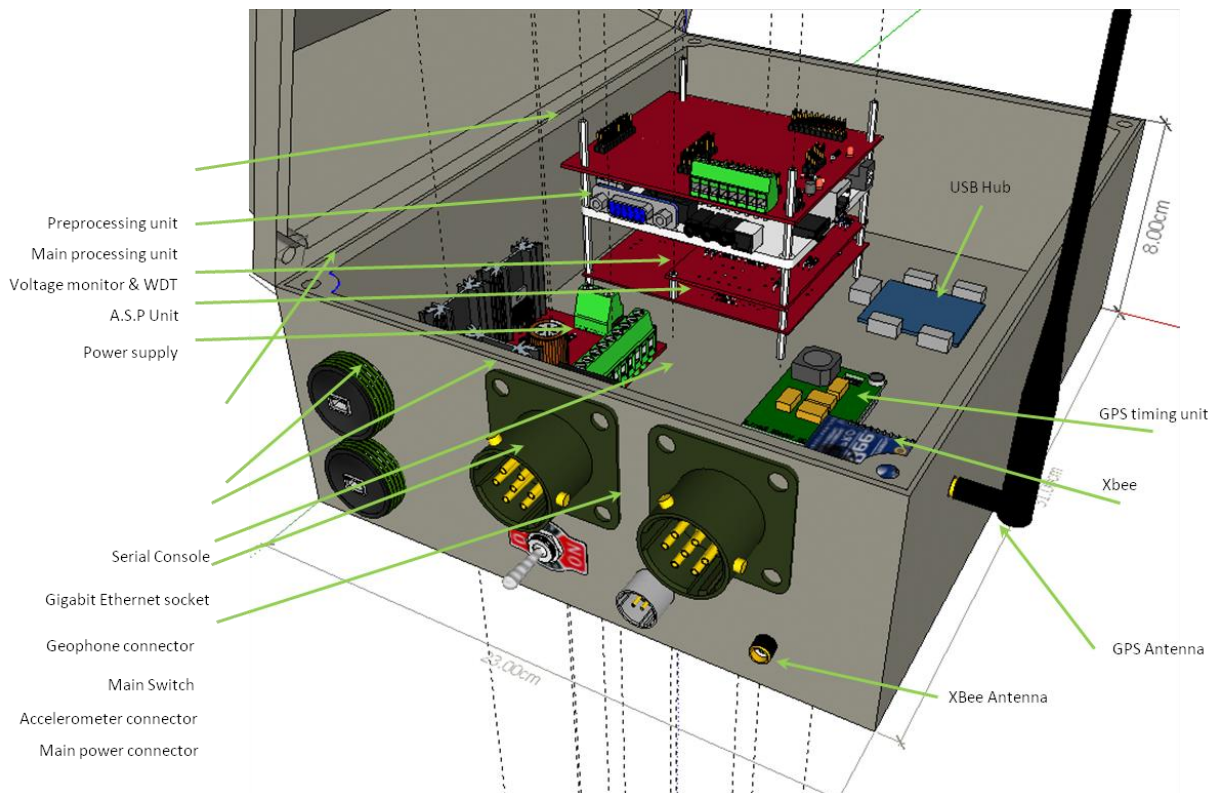


Pin no.	Value
1	
2	TX
3	
4	RX
5	
6	+3.3V
7	
8	PPS
9	
10	GPIO#1
11	
12	GPIO#2
13	GND
14	GPIO#20

Σχήμα 74: Διασύνδεση μονάδας χρονισμού
Timing unit pinout



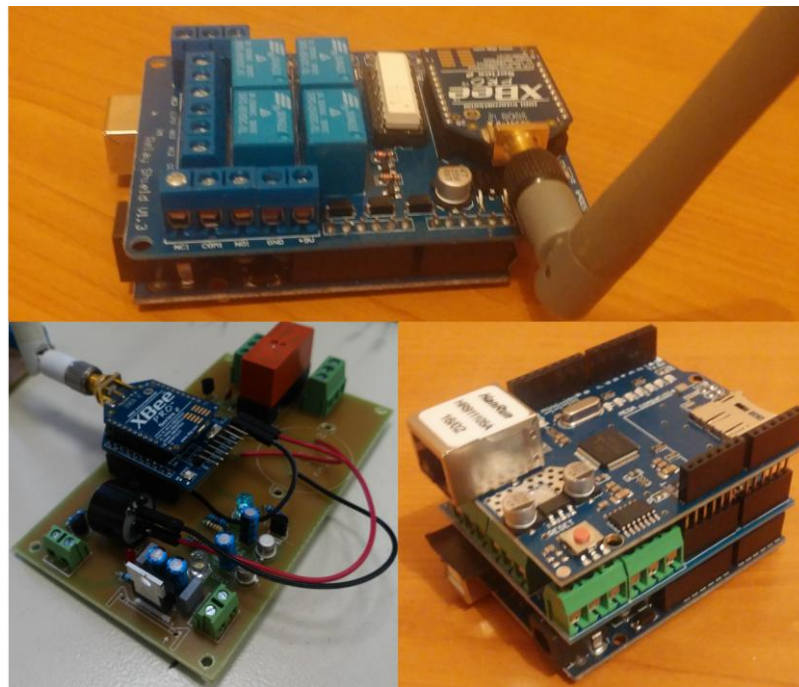
Σχήμα 75: Οι ακροδέκτες του συνδέσμου για το γεώφωνο και το επιταχυνσιόμετρο σε συνδυασμό με τον χρωματικό κώδικα του καλωδίου που συνδέεται πάνω τους
Connectors pinouts for the geophone and the accelerometer sensor and cable color code



Σχήμα 76: Αναπαράσταση σειράς τοποθέτησης κυκλωμάτων του συστήματος E.A.SY. Representation of the system's circuits mounting series



Σχήμα 77: Ο σταθμός συναρμολογημένος.
An assembled node



Σχήμα 78: Τελικές συσκευές.
Assembled end-devices

**Πίνακας 28: Υπολογιζόμενο κόστος ανά σταθμό & τελική συσκευή Calculated Cost
per node & end device**

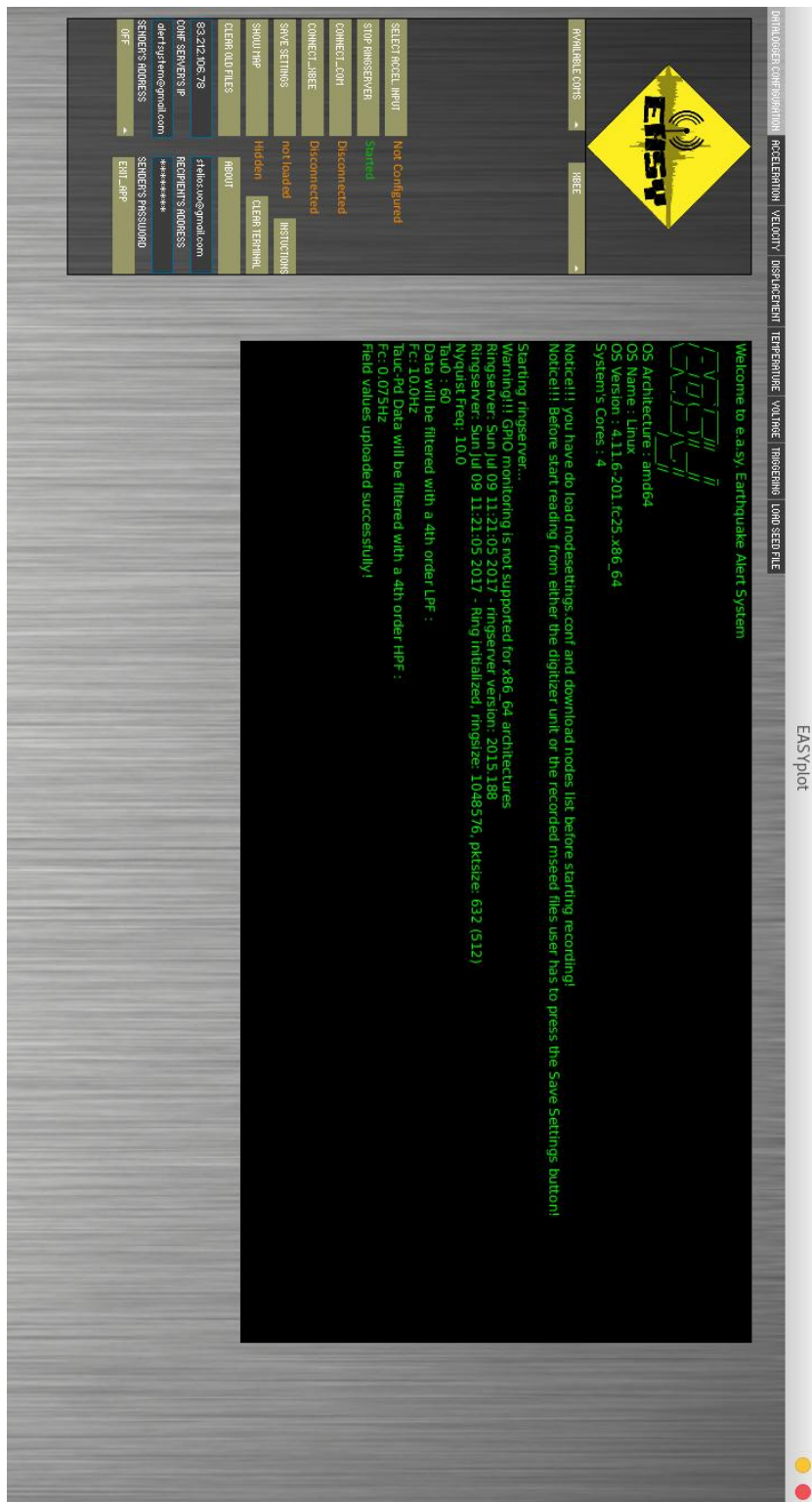
A/A	Εξάρτημα - Άρθρωμα	Τεμάχια	Κόστος/τιμχ.	Κόστος εξαρτημ.
1	Wandboard Quad	1	\$130.00	\$130.00
2	MSP-EXP432P401R	1	\$13.00	\$13.00
3	Longet 4.5Hz triaxial Geophone	1	\$180.00	\$180.00
4	LIS344ALH accelerometer Module	1	\$12.00	\$12.00
5	Xbee Pro Series 2	2	\$80.00	\$160.00
6	GPS timing unit	1	\$50.00	\$50.00
8	Xbee explorer	1	\$4.00	\$4.00
9	USB Hub	1	\$5.00	\$5.00
10	Ft232 usb to serial Adapter	1	\$6.00	\$6.00
11	CP1064 IP55 enclosure box	1	\$20.00	\$20.00
12	INA103	3	\$10.67	\$32.01
13	OPA27	12	\$3.52	\$42.24
14	UC3903	1	\$3.09	\$3.09
15	MAX697	1	\$13.16	\$13.16
17	Double layer PCB	5	\$3.40	\$17.00
18	Τροφοδοτικό 12VDC/3A	1	\$17.00	\$17.00
19	U-79-U - Appliance socket 10-pin - Telegärtner	2	\$75.90	\$151.80
20	U-127-U - Cable connector, 10-pin - Telegärtner	2	\$60.25	\$120.50
21	pico psu	1	\$25.00	\$25.00
22	Cannon 2 pin power connector	1	\$3.00	\$3.00
23	Heavy Duty 20A 125V DPST 4 Terminal ON/OFF Toggle Switch	1	\$1.18	\$1.18
24	28dB LNA Gain 1575.42MHz RP-SMA Male GPS Antenna	1	\$1.71	\$1.71
26	RJ-45 Ethernet LAN Waterproof Outdoor Connector	2	\$3.48	\$6.96
27	Παρελκόμενα/Αναλώσιμα	1	\$30.00	\$30.00
EASY node Total Cost				\$1,044.65
A/A	Εξάρτημα - Άρθρωμα	Τεμάχια	Κόστος/τιμχ.	Κόστος εξαρτημ.
1	Xbee Pro Series 2	1	\$80.00	\$80.00
2	UartSbee	1	\$20.00	\$20.00
3	G10-IP67 enclosure box	1	\$20.00	\$20.00
4	Double layer PCB	1	\$3.40	\$3.40
5	Τροφοδοτικό 12VDC/3A	1	\$17.00	\$17.00
6	Παρελκόμενα/Αναλώσιμα	1	\$20.00	\$20.00
EASY End Device v1 Total Cost				\$183.40
A/A	Εξάρτημα - Άρθρωμα	Τεμάχια	Κόστος/τιμχ.	Κόστος εξαρτημ.
1	Arduino uno R3	1	\$4.00	\$4.00
2	Four channel Relay Shield 5V 4 Channel Relay Shield Module for Arduino S3	1	\$2.89	\$2.89
3	G10-IP67 enclosure box	1	\$20.00	\$20.00
4	Ethernet Shield W5100 For Arduino Main Board 2009 UNO ATmega 328 1280 MEGA2560	1	\$4.36	\$4.36
5	Τροφοδοτικό ραγας/ups	1	\$17.00	\$17.00
6	Παρελκόμενα/Αναλώσιμα	1	\$10.00	\$10.00
EASY End Device v2 Total Cost				\$81.25

A/A	Εξάρτημα - Άρθρωμα	Τεμάχια	Κόστος/τμχ.	Κόστος εξαρτημ.
1	Xbee Pro Series 2	1	\$80.00	\$80.00
2	DC 5V 70W 4 Mechanical Relay Module Shield UNO R3 XBEE	1	\$5.00	\$5.00
3	G10-IP67 enclosure box	1	\$20.00	\$20.00
4	Arduino uno R3	1	\$4.00	\$4.00
5	Τροφοδοτικό 12VDC/3A	1	\$17.00	\$17.00
6	Παρελκόμενα/Αναλώσιμα	1	\$20.00	\$20.00
	EASY End Device v3 Total Cost			\$169.00

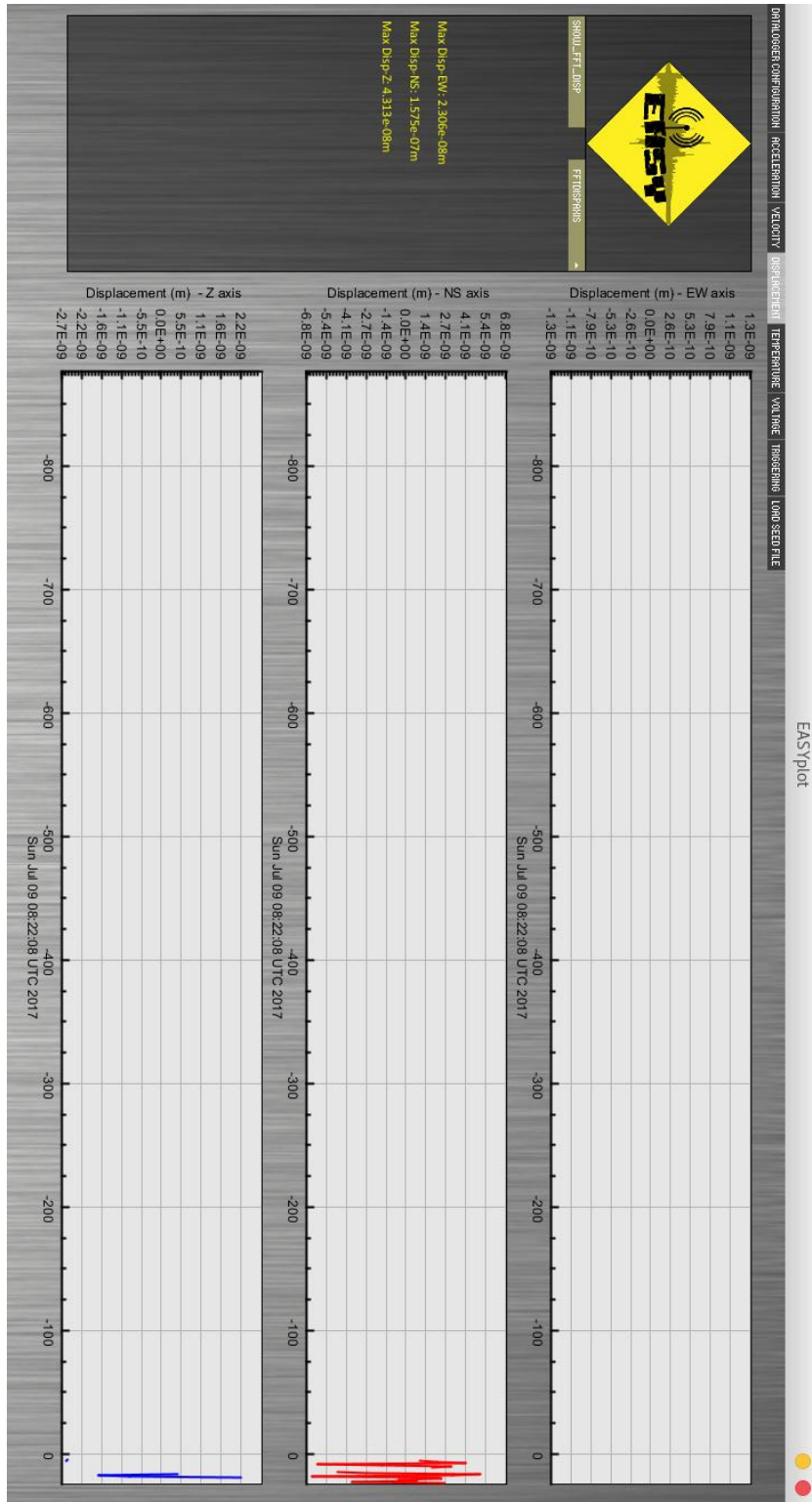
Πίνακας 29: Τυπικά κόστη εμπορικών αισθητήρων και καταγραφικών (IRIS, 2014). Typical sensor and digitiser costs.

A/A	Κατασκευαστής	Μοντέλο	Τύπος	Κόστος
1	Streckeisen	STSB2.5	Sensor	\$19,000.00
2	Streckeisen	STSB5A	Sensor	\$26,500.00
3	Guralp	3T	Sensor	\$16,000.00
4	Guralp	ESP	Sensor	\$6,200.00
5	Metrozet	PBBB200S	Sensor	\$12,000.00
6	Metrozet	MBS	Sensor	\$7,400.00
7	Nanometrics	T240	Sensor	\$19,000.00
8	Nanometrics	T120PA	Sensor	\$13,000.00
9	Nanometrics	T120PHQ	Sensor	\$19,000.00
10	Nanometrics	T120PHC	Sensor	\$9,000.00
11	Reftek	151	Sensor	\$11,200.00
12	Geotech	KSB2000	Sensor	\$11,000.00
13	Reftek,	130	Digitiser	\$6,000
14	Quanterra,	Q330	Digitiser	\$10,500
15	Kinemtrics	Basalt	Digitiser	\$8,500
16	Nanometrics	Centaur+	Digitiser	\$6,200
17	Geotech	SMART	Digitiser	\$8,000
18	Guralp	SM24+	Digitiser	\$5,250
19	EDS	EDRB210	Digitiser	\$8,100

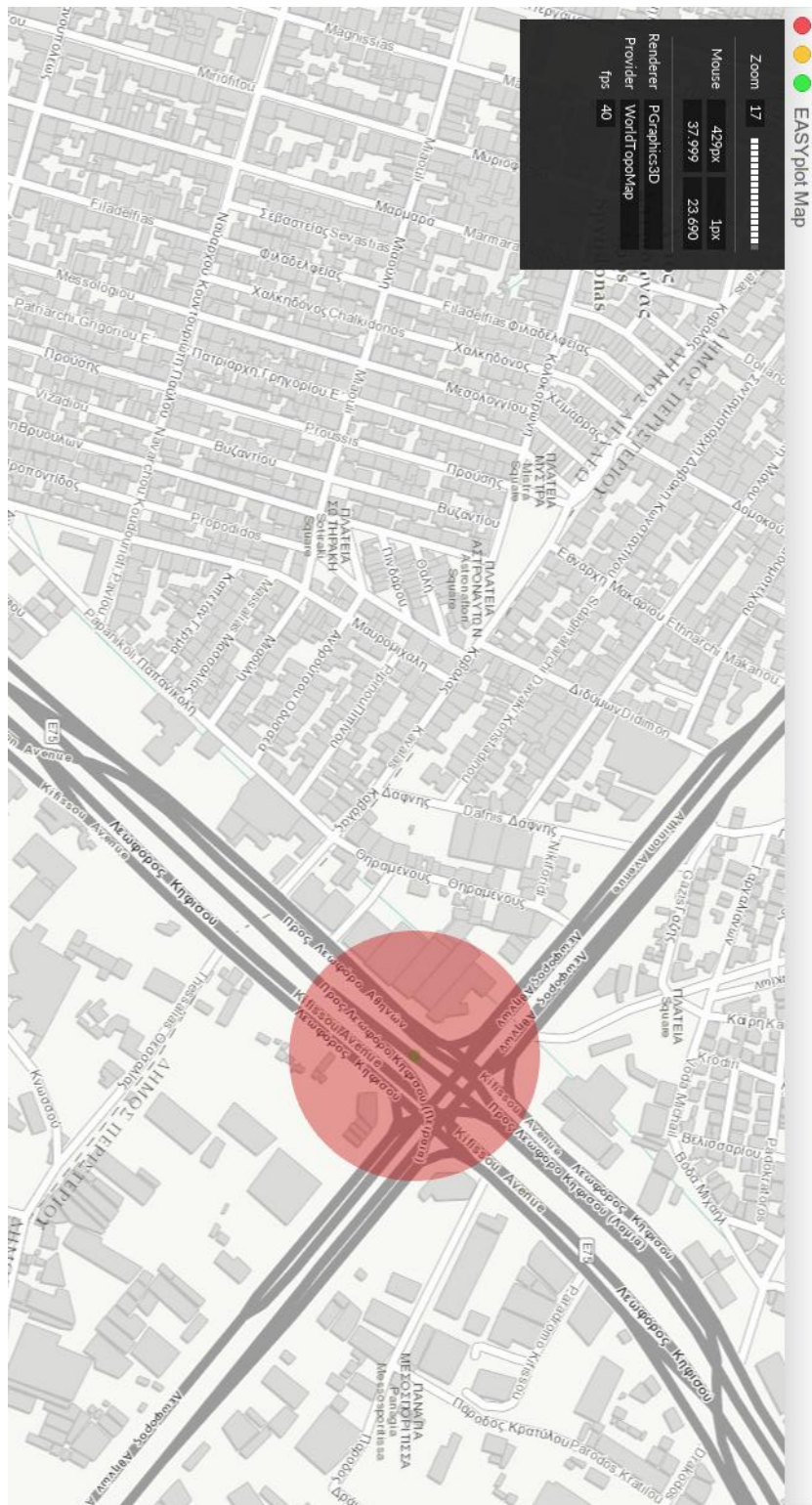
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ – Λογισμικό



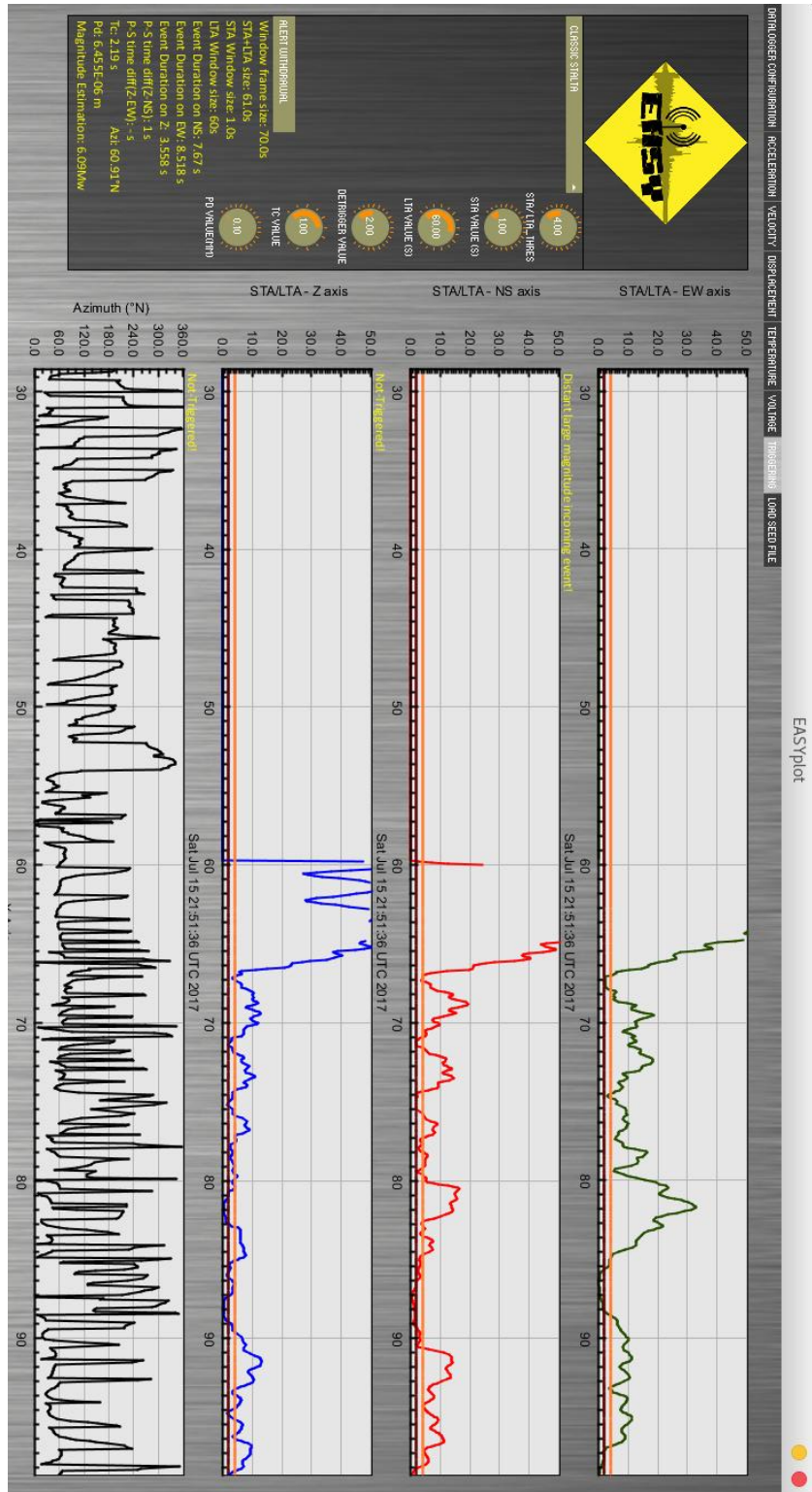
Σχήμα 79: Η κεντρική φόρμα της εφαρμογής
Main form of the application



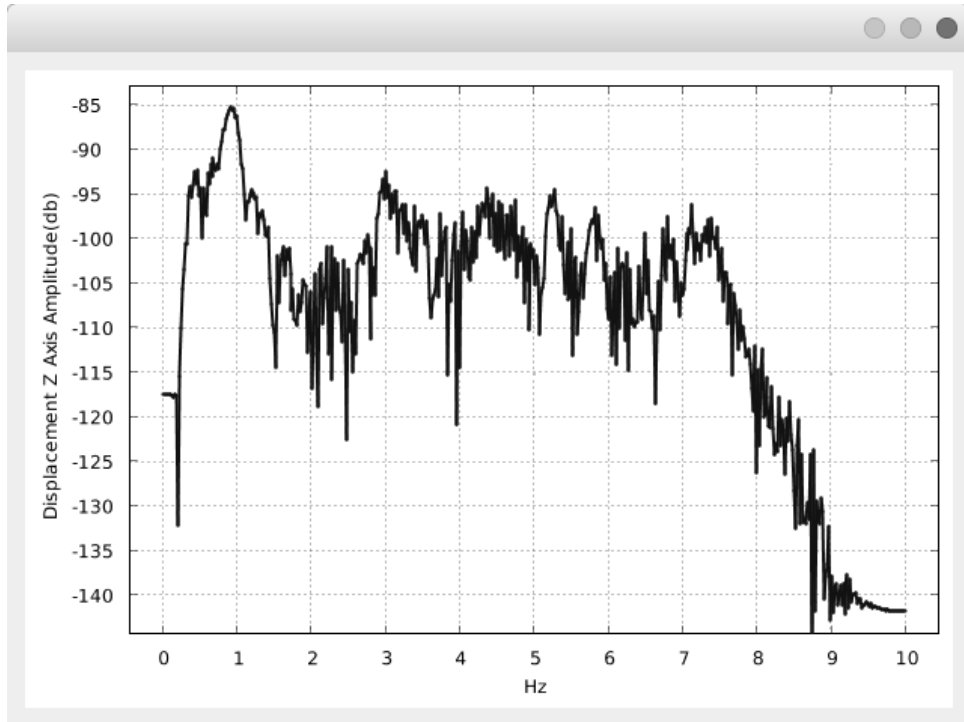
**Σχήμα 80: Καταγραφή δεδομένων μετατόπισης (dummy)
Displacement plot (dummy data)**



Σχήμα 81: Απεικόνιση κάλυψης σταθμών στον χάρτη
Nodes effective range displayed on map



Σχήμα 82: Γράφημα Διέγερσης
Triggering plot



Σχήμα 83: Φασματογράφημα
Spectrogram

The image shows the 'Node Configuration tool' interface. At the top center is the ENSY logo. Below the logo, the title 'Node Configuration tool' is displayed. The interface contains several configuration sections:

- Channel Selection:** Eight dropdown menus labeled Channel_0 through Channel_7, all currently set to 'HHE'.
- Sample_rate:** A dropdown menu set to '25'.
- Location:** A dropdown menu set to 'U'.
- GPIO:** A dropdown menu set to 'ON'.
- Channels_to_write:** A dropdown menu set to 'up'.
- DFOrdH:** An empty text input field.
- Network Codes:** A vertical list of ten text input fields: NetworkCode, StationID, LocationID, Latitude, Longitude, HPForder, LPForder, LPFFc, DFOrdL, DFFcL, DFFcH, TLPFFC, and THPFFC.
- Get Configuration:** A button located at the bottom center of the configuration area.

Σχήμα 84: Εφαρμογή δημιουργίας αρχείου ρυθμίσεων
Node configuration tool

Stations Data
Map
Legend
log (prel. data)
PGA

Legend

- MW ≥ 5,8
- 4.6 ≤ MW < 5,8
- 3.6 ≤ MW < 4.6
- MW < 3,6
- ▲ Current event
- Node event

log (prel. data)

- Node: node1 Mw: 5 - Threat: 50% - At: Tue Apr 10 13:06:41 UTC 2018 - Coordinates: 38.111378 - 20.573811
- Node: node1 Mw: 4 - Threat: 25% - At: Tue Apr 10 13:06:36 UTC 2018 - Coordinates: 37.8811 - 24.030405
- Node: node-2 PGA: 0.25331 - At: Tue Apr 10 13:07:18 UTC 2018 - Coordinates: 37.8811 - 24.030405
- Node: node-1 PGA: 0.34036 - At: Tue Apr 10 13:07:16 UTC 2018 - Coordinates: 37.8811 - 24.030405

PGA

Node: node-2
PGA: 0.25331
At: Tue Apr 10 13:07:18 UTC 2018
Coordinates: 37.8811 - 24.030405

Node: node-1
PGA: 0.34036
At: Tue Apr 10 13:07:16 UTC 2018
Coordinates: 37.8811 - 24.030405

Magnitude plot

Node data

Threat

50

Azimuth

180

Recent earthquakes (UOA, department of Geophysics-Geothermics feed)

- 34.5 km WSW of Korinthos Time: 25-Mar-2018 21:53:00 (UTC) Latitude: 37.81N Longitude: 22.57E depth: 5km M 2.0
- 8.0 km WSW of Aegion Time: 25-Mar-2018 21:51:32 (UTC) Latitude: 38.22N Longitude: 22.00E depth: 5km M 1.0
- 28.9 km NW of Tripolis Time: 25-Mar-2018 21:14:19 (UTC) Latitude: 37.72N Longitude: 22.18E depth: 5km M 2.1
- 37.7 km S of Larissa Time: 25-Mar-2018 21:06:49 (UTC) Latitude: 39.30N Longitude: 22.36E depth: 10km M 2.7
- 3.1 km S of Kalavrita Time: 25-Mar-2018 20:47:31 (UTC) Latitude: 37.95N Longitude: 22.11E depth: 5km M 2.0
- 16.7 km NE of Patras Time: 25-Mar-2018 20:22:19 (UTC) Latitude: 38.34N Longitude: 21.88E depth: 5km M 0.6
- 95.2 km E of Iraklion Time: 25-Mar-2018 14:45:12 (UTC) Latitude: 35.26N Longitude: 26.18E depth: 10km M 3.3
- 3.4 km E of Polyviros Time: 25-Mar-2018 13:17:11 (UTC) Latitude: 40.38N Longitude: 23.48E depth: 10km M 1.5
- 21.6 km NE of Patras Time: 25-Mar-2018 11:45:19 (UTC) Latitude: 38.38N Longitude: 21.91E depth: 5km M 1.0
- 18.4 km W of Pyrgos Time: 25-Mar-2018 09:46:10 (UTC) Latitude: 37.68N Longitude: 21.24E depth: 10km M 2.0
- 15.8 km SSW of Skiathos Time: 25-Mar-2018 09:21:57 (UTC) Latitude: 39.04N Longitude: 23.40E depth: 10km M 2.4
- 28.3 km NW of Korinthos Time: 25-Mar-2018 08:13:30 (UTC) Latitude: 38.12N Longitude: 22.71E depth: 8km M 1.6
- 19.1 km NW of Aegion Time: 25-Mar-2018 08:09:28 (UTC) Latitude: 38.37N Longitude: 21.92E depth: 30km M 0.9
- 17.9 km NNW of Aegion Time: 25-Mar-2018 07:49:13 (UTC) Latitude: 38.39N Longitude: 21.98E depth: 5km M 2.3
- 1.5 km S of Pyrgos Time: 25-Mar-2018 05:14:31 (UTC) Latitude: 37.67N Longitude: 21.45E depth: 5km M 1.9
- 24.5 km NE of Mesolonghi Time: 25-Mar-2018 04:58:36 (UTC) Latitude: 38.49N Longitude: 21.66E depth: 25km M 1.3
- 22.7 km NW of Aegion Time: 25-Mar-2018 04:17:56 (UTC) Latitude: 38.40N Longitude: 21.91E depth: 5km M 0.6
- 20.2 km SSW of Amfissa Time: 25-Mar-2018 03:35:01 (UTC) Latitude: 38.36N Longitude: 22.29E depth: 5km M 1.2
- 29.2 km ENE of Veria Time: 25-Mar-2018 02:35:30 (UTC) Latitude: 40.63N Longitude: 22.52E depth: 10km M 1.6
- 2.3 km NE of Argostoli Time: 25-Mar-2018 02:27:49 (UTC) Latitude: 38.19N Longitude: 20.50E depth: 9km M 2.1
- 17.4 km NW of Aegion Time: 25-Mar-2018 02:03:34 (UTC) Latitude: 38.35N Longitude: 21.93E depth: 5km M 1.2
- 27.6 km NW of Athens Time: 25-Mar-2018 01:57:04 (UTC) Latitude: 38.19N Longitude: 23.56E depth: 10km M 1.7
- 18.9 km S of Patras Time: 25-Mar-2018 00:38:30 (UTC) Latitude: 38.07N Longitude: 21.73E depth: 5km M 1.4
- 12.9 km NNW of Aegion Time: 24-Mar-2018 23:38:35 (UTC) Latitude: 38.36N Longitude: 22.05E depth: 5km M 0.5
- 19.8 km ENE of Aegion Time: 24-Mar-2018 22:55:47 (UTC) Latitude: 38.34N Longitude: 22.28E depth: 11km M 1.2
- 21.5 km SSE of Patras Time: 24-Mar-2018 22:38:02 (UTC) Latitude: 38.08N Longitude: 21.85E depth: 5km M 1.6
- 51.4 km SSE of Sparta Time: 24-Mar-2018 22:14:36 (UTC) Latitude: 36.68N Longitude: 22.73E depth: 10km M 3.2
- 20.4 km SSW of Amfissa Time: 24-Mar-2018 21:58:00 (UTC) Latitude: 38.36N Longitude: 22.28E depth: 5km M 1.2
- 16.9 km NW of Aegion Time: 24-Mar-2018 20:56:46 (UTC) Latitude: 38.35N Longitude: 21.94E depth: 5km M 1.5
- 24.7 km S of Zakynthos Time: 24-Mar-2018 18:16:37 (UTC) Latitude: 37.57N Longitude: 20.91E depth: 10km M 2.4

Node-RED

Flow 1

**Σχήμα 85: IoT Διεπαφή
IoT interface (Node-red)**

Πίνακας 30: Συντομεύσεις εφαρμογής. Application's shortcuts

Πλήκτρο:	Ενέργεια:
+/-	Μεγέθυνση / σμίκρυνση του χάρτη
↑	Δοκιμή υπηρεσίας Xbee
↓	Δοκιμή υπηρεσίας Dweet.io
←	Δοκιμή υπηρεσίας email
→	Δημιουργία δοκιμαστικού πακέτου .mseed
F1	Βοήθεια
F2	Καθαρισμός τερματικού

Πίνακας 31: Χειριστήρια εφαρμογής. Application's controls

Κουμπί:	Ενέργεια:	Καρτέλα εφαρμογής
START/STOP RING - SERVER	Διακοπή/εκκίνηση Ringserver	
CONNECT/DISCONNECT COM	Σύνδεση/Αποσύνδεση ψηφιοποιητή (Επιλέγεται από την λίστα available coms)	
CONNECT/DISCONNECT XBEE	Σύνδεση/Αποσύνδεση Μονάδας XBEE (Επιλέγεται από την λίστα available XBEE)	
SAVE SETTINGS	Αποθήκευση ρυθμίσεων	
INSTRUCTIONS	Εμφάνιση βοήθειας	
SHOW MAP	Εμφάνιση/Εξαφάνιση Χάρτη	
CLEAR TERMINAL	Καθαρισμός κονσόλας εφαρμογής	
CONF SERVER IP	IP διεύθυνση εξυπηρετητή	DATALOGGER
RECIPIENT ADDRESS	Διεύθυνση email αποστολέα	CONFIGURATION
SENDER ADDRESS	Διεύθυνση email παραλήπτη	
SENDER PASSWORD	Κωδικός εισαγωγής Αποστολέα	
EXIT APP	Έξοδος εφαρμογής, με παράλληλο τερματισμό υπηρεσιών	
ABOUT	Πληροφορίες εφαρμογής	
MONITOR GPIO	Ενεργοποίηση/Απενεργοποίηση ελέγχου τάσης - WDT (υπηρεσία διαθέσιμη σε συμβατά με POSIX λειτουργικά)	
CLEAR OLD FILES	Καθαρισμός του καταλόγου logs από τα αρχεία που είναι παλαιότερα των 30 ημερών	
SHOW FFT	Εμφάνιση παραθύρου FFT για την επιλογή από την λίστα (NS, EW,Z) στα δεδομένα επιτάχυνσης, ταχύτητας και μετατόπισης (Επιλέγεται από την	ACCELERATION VELOCITY DISPLACEMENT

Κουμπί:	Ενέργεια:	Καρτέλα εφαρμογής
	λίστα FFTACCAXIS, FFTVELAXIS, FFTDISPAXIS)	
TEMP_THRES	Καταχώρηση κατωφλίου θερμοκρασίας	TEMPERATURE
STA/LTA THRES	Καταχώριση κατωφλίου διέγερσης	
STA VALUE	Καταχώριση τιμής παραθύρου STA	
LTA VALUE	Καταχώριση τιμής παραθύρου LTA	
DETRIGGER VALUE	Καταχώριση τιμής Κατωφλίου αποδιέγερσης	TRIGGERING
TC VALUE	Καταχώριση τιμής τ_c	
PD VALUE	Καταχώριση τιμής P_d	
SELECT MSEED FILES	Φόρτωση αρχείων προσομοίωσης	LOAD MSEED FILE

Πίνακας 32: Απαιτήσεις Συστήματος. System Requirements

OS(32/64bit)	Windows 7 +/OSX/Linux kernel 4.4+				
Java version	1.8 +				
CPU	CPU 2 πυρήνων				
HDD space (installation)	200MB				
HDD space (usage)	7.776MB*SPS/Ημέρα				
RAM	2GB +				
Display	1280x720 (min)				
Internet connection	Ethernet / WiFi				
At least 3 Serial ports	115200 8N1 (Digitiser)				
	19200 8N1 (XBee)				
	9600 8N1 (GPS)				
Features	Windows		Linux		OSX
	x86/64	ARM	x86/64	ARM	x86/64
GUI	X	X	X	X	X
CLI	NA	NA	X	X	X
GPIO	NA*	NA*	NA*	X *	NA*
* ΧειρισμόςGPIO σημάτων επιτυγχάνεται συνδεσμολογώντας την πλακέτα WDT με το καταγραφικό μέσω του συνδέσμου IDC #3 (βλ. Σχήμα 69 & Σχήμα 70)					
GPS	NA	NA	X	X	NA
Άδεια χρήσης	GPLv3				
Άδειες χρήσης τρίτων βιβλιοθηκών	Apache-v2, BSD-3, GPL-v2, LGPL-v2.1, LGPL-v3, GPL-v2, GPL-v3, MIT, Mozilla-v2, SGI-v2, CDDL-v1, UBUNTU-Font-v1, Other				

Πίνακας 33: Εντολές εφαρμογής - CLI. CLI commands

Εκτελέσιμο:	Περιγραφή:
sudo easyservice start	Έναρξη υπηρεσίας
sudo easyservice stop	Τερματισμός υπηρεσίας
sudo easyservice status	Επιστροφή της κατάστασης λειτουργίας
sudo easyservice execcmd <CMD>	Εκτέλεση μιας απο τις παρακάτω εντολές
Εντολή	Περιγραφή
EOWARN	Τερματισμός προειδοποίησης
TESTMAIL	Δοκιμαστικό email
TESTXBEE	Δοκιμαστικό xbee μήνυμα
TESTIOT	Δοκιμαστικό IoT μήνυμα
STOPR	Τερματισμός υπηρεσίας ringserver
STARTR	Εκκίνηση υπηρεσίας ringserver
DELF	Διαγραφή παλαιών καταγραφών
ABOUT	Πληροφορίες
GPIOEN	Ενεργοποίηση ελέγχου GPIO
GPIODIS	Απενεργοποίηση ελέγχου GPIO
HELP	Εμφάνιση λίστας διαθέσιμων εντολών
EXIT	Τερματισμός εφαρμογής

Πίνακας 34: Δομή καταλόγων της εφαρμογής EASY

Κατάλογος	Περιγραφή
.	Ριζικός κατάλογος της εφαρμογής
├─ bin	Εκτελέσιμα που χρησιμοποιούνται από την υπηρεσία
└─ SeedlinkServer	Κατάλογος του Seedlink service
├─ data	Multimedia αρχεία απαραίτητα για την εφαρμογή
├─ Documentation	Το documentation όλης της εφαρμογής
├─ etc	Αρχεία ρυθμίσεων
└─ easy	
└─ Instruments	.sacrz αρχεία αισθητήρων
├─ lib	Απαραίτητες βιβλιοθήκες για την εφαρμογή
├─ mseed	Καταγραφές ημέρας προς αποστολή
├─ utils	Βοηθητικές εφαρμογές / Drivers
└─ var	
└─ log	Καταγραφές της εφαρμογής
└─ digitiser_logs	Καταγραφές μετρήσεων (rawδεδομένα)
└─ mseed-archive	Καταγραφές προηγούμενων ημερών σε mseed τυποποίηση
└─ system_logs	Καταγραφές συστήματος

Πίνακας 35: Node configuration tool & Ονοματοδοσία καναλιών (Halbert, 2012).

Channel naming & Node Configuration tool

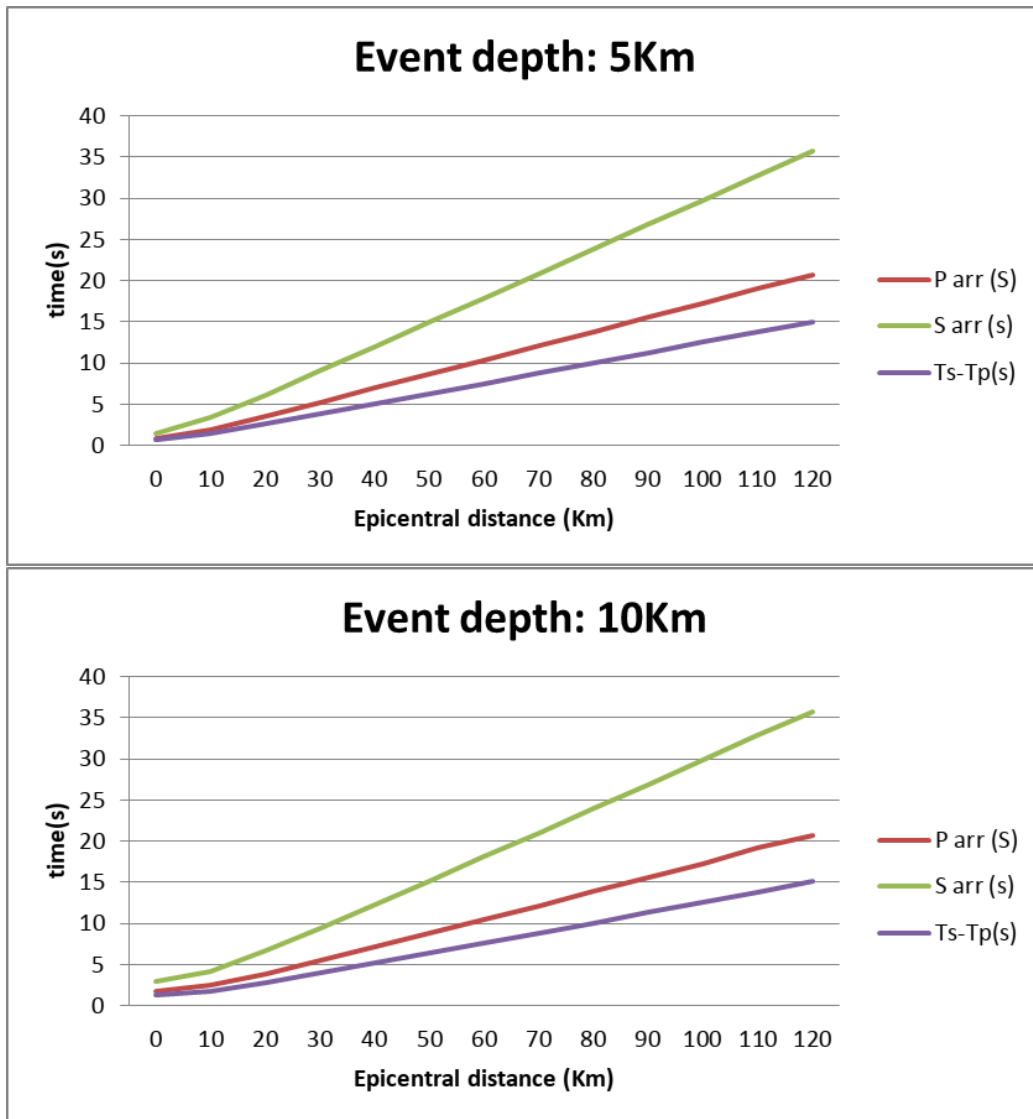
Ονοματοδοσία καναλιών					
1ος χαρακτήρας	Δειγματοληψία	2ος χαρακτήρας	Τύπος οργάνου	3ος χαρακτήρας	Προσανατολισμός
H	≥ 80 to < 250	H	High gain Seismometer	N	North-South
S	≥ 10 to < 80			E	East-West
B	≥ 10 to < 80	N	Accelerometer	Z	Up-Down
L	≈ 1				
Αρχείο ρυθμίσεων σταθμού					
Channel_0 Channel_1 Channel_2	Επιταχυνσιόμετρο	NetworkCode StationID LocationID	Αλφαριθμητικές τιμές		
Channel_3 Channel_4 Channel_5	Σεισμόμετρο	LpfOrd HpfOrd DFOrdH DFOrdL DFFcL DFFcH Lpffc TLpffc THpffc	Αριθμητικές τιμές της τάξης και της συχνότητας αποκοπής του φίλτρου		
Channel_6 Channel_7	Βοηθητικά κανάλια				
Samplerate	50,100 sps	Seed	<ul style="list-style-type: none"> all: όλες οι συνιστώσες up: μόνο οι κατακόρυφες συνιστώσες urgeo: μόνο η κατακόρυφη συνιστώσα του γεωφωνου ew: μόνο οι συνιστώσες με προσανατολισμό (East-West) ns: μόνο οι συνιστώσες με προσανατολισμό (North-South) 		
Location	U: Αστική, R: Μη - Αστική εγκατάσταση	GPIO	Ενεργοποίηση ακίδων Εισόδου - Εξόδου για τον χειρισμό της μονάδας ελέγχου τάσης		
RS	Ενεργοποίηση αλγόριθμου Reed - Solomon	DIGILOG	Ενεργοποίηση αρχείου καταγραφής ψηφιοποιητή		
Lattitude	Γ. Πλάτος	Longitude	Γ. Μήκος		
XBEEID	Προσδιοριστικό για τις Τ.Συσκευές	KF	Ενεργ. Φίλτρου Kalman		
ME,EE	Παράμετροι φίλτρου Kalman	PN	Παράμετροι φίλτρου Kalman		

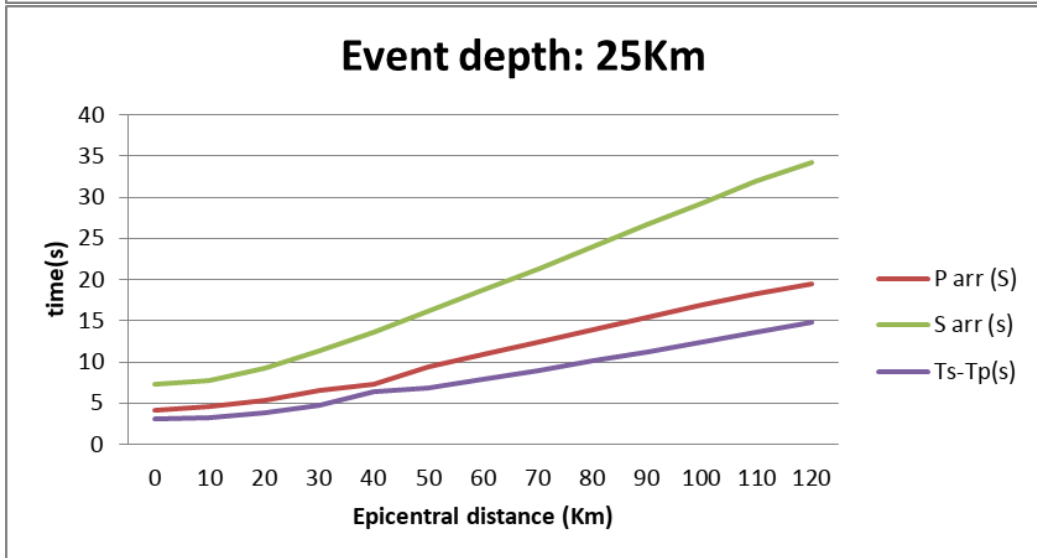
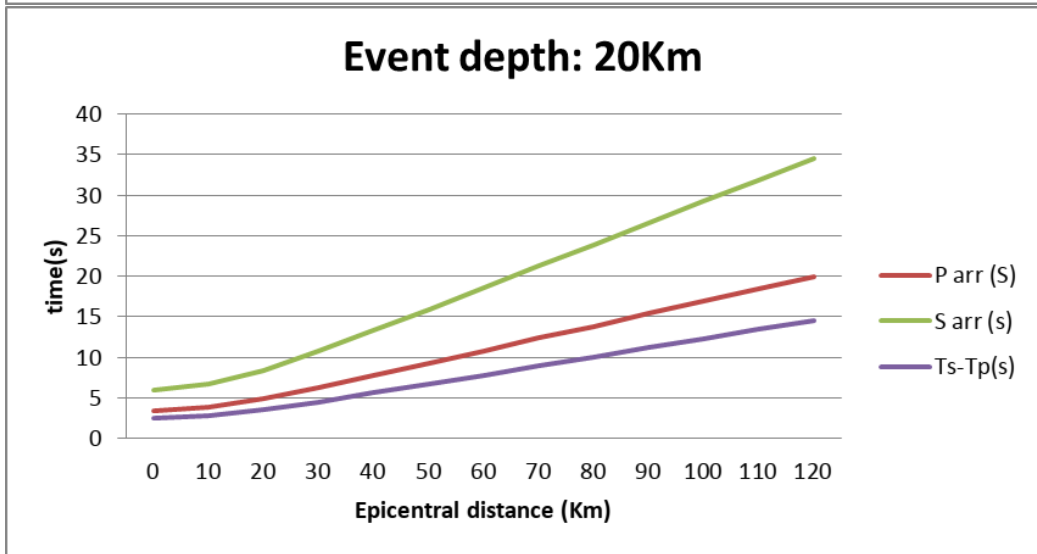
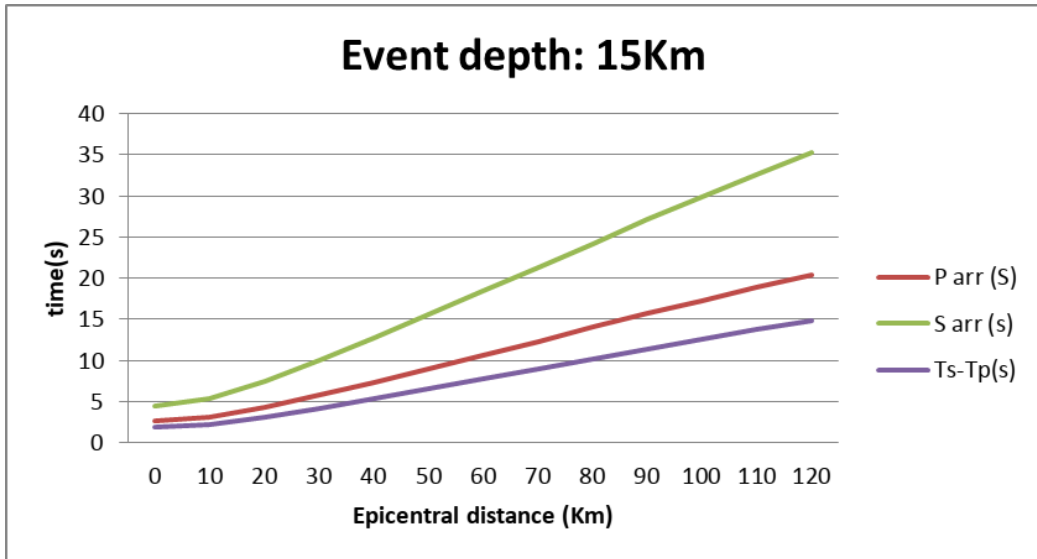
**ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ - Συσχέτιση χρόνου αντίδρασης -
Εστιακού βάθους**

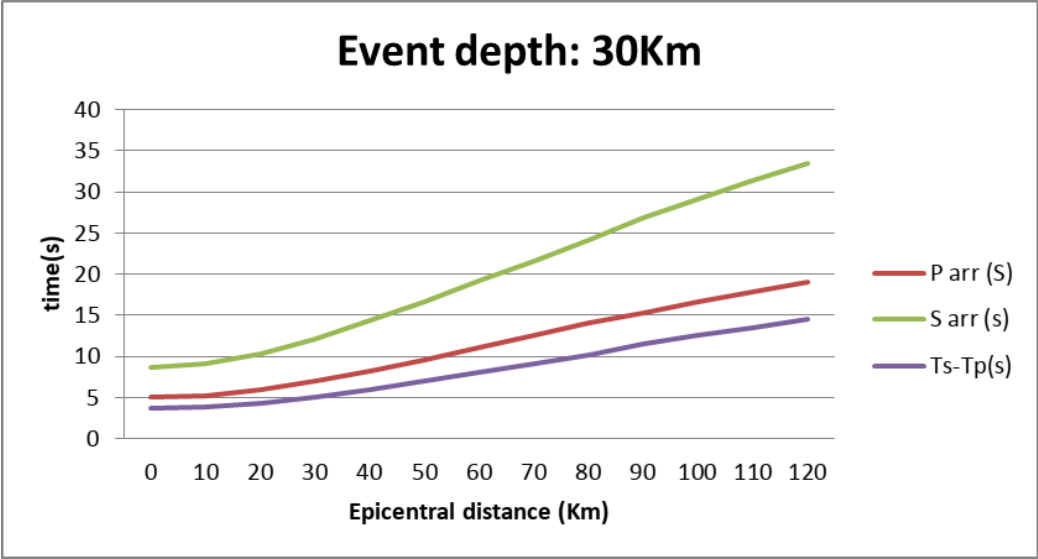
Πίνακας 36: Χρόνοι διαδρομής κυμάτων P- και S- συναρτήσει της επικεντρικής απόστασης για διάφορα εστιακά βάθη. (Kennett et al., 1991 (IRIS, 2018)). P-S travel times related to focal depth

Km	Εστιακό βάθος 5km $t_{alert}=5.76s$			Εστιακό βάθος 10km $t_{alert}= 6.62$			Εστιακό βάθος 15km $t_{alert}=7.49s$		
	P	S	Δt	P	S	Δt	P	S	Δt
0	0.86	1.49	0.63	1.72	2.98	1.26	2.59	4.46	1.87
10	1.93	3.33	1.40	2.44	4.21	1.77	3.11	5.36	2.25
20	3.55	<u>6.13</u>	2.58	3.85	<u>6.65</u>	2.80	4.31	<u>7.44</u>	3.13
30	5.24	9.05	3.81	5.45	9.40	3.95	5.78	9.97	4.19
40	6.95	11.99	5.04	7.10	12.26	5.16	7.36	12.70	5.34
50	8.66	14.95	6.29	8.78	15.16	6.38	8.99	15.52	6.53
60	10.38	17.91	7.53	10.48	18.09	7.61	10.65	18.39	7.74
70	12.09	20.88	8.79	12.18	21.03	8.85	12.33	21.28	8.95
80	13.81	23.85	10.04	13.89	23.98	10.09	14.02	24.20	10.18
90	15.53	26.82	11.29	15.60	26.93	11.33	15.71	27.12	11.41
100	17.26	29.79	12.53	17.31	29.89	12.58	17.41	30.06	12.65
110	18.98	32.76	13.78	19.13	32.85	13.72	19.12	33.00	13.88
120	20.70	35.73	15.03	20.74	35.81	15.07	20.83	35.95	15.12
Km	Εστιακό βάθος 20km $t_{alert}=8.35s$			Εστιακό βάθος 25km $t_{alert}=9.12s$			Εστιακό βάθος 30km $t_{alert}=9.89$		
	P	S	Δt	P	S	Δt	P	S	Δt
0	3.45	5.95	2.50	4.22	7.29	3.07	4.99	8.62	3.63
10	3.85	6.65	2.80	4.54	7.84	3.30	5.25	9.08	3.83
20	4.87	<u>8.41</u>	3.54	5.39	<u>9.32</u>	3.93	5.98	<u>10.34</u>	4.36
30	6.21	10.72	4.51	6.57	11.35	4.78	7.03	12.16	5.13
40	7.70	13.29	5.59	7.92	13.69	5.77	8.28	14.31	6.03
50	9.27	16.01	6.74	9.36	16.18	6.82	9.63	16.65	7.02
60	10.89	18.80	7.91	10.85	18.76	7.91	11.06	19.12	8.06
70	12.53	21.64	9.11	12.36	21.37	9.01	12.52	21.65	9.13
80	14.20	24.51	10.31	13.88	24.00	10.12	14.01	24.23	10.22
90	15.87	27.40	11.53	15.40	26.65	11.25	15.51	26.83	11.32
100	17.56	30.31	12.75	16.93	29.29	12.36	17.02	29.45	12.43
110	19.25	33.22	13.97	18.46	31.94	13.48	18.53	32.07	13.54
120	20.94	36.15	15.21	19.99	34.59	14.60	20.05	34.71	14.66

Πίνακας 37: Γραφήματα χρόνου διαδρομής κυμάτων P- και S- συναρτήσει της επικεντρικής απόστασης για διάφορα εστιακά βάθη.. Response time - focal depth plots (Kennett et al., 1991) (IRIS, 2018)







BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

1. Akazawa, T., 2004. A technique for automatic detection of onset time of P and S phases in strong motion records. In 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, 2004.
2. Aki, K., 1966. Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 14, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy and stress-strain drop from G wave spectrum. Bulletin of the Earthquake Research Institute, 44, pp.73-88.
3. Allen, R., 1978. Automatic earthquake recognition and timing from signal traces. Bulletin of the Seismological Society of America, 68, pp.1521-32.
4. Allen, R.M., 2011. Earthquakes, Early and Strong Motion Warning. In Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Gupta, Harsh.
5. Allen, R., Gasparini, P., Kamigaichi, O. & Bose, M., 2009. The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview. Seismological Research Letters, 80(5), pp.682-93.
6. Allen, R., Heaton, T. & Vidale, J., 2011. Pros and cons of earthquake early warning – a quick review. [<https://seismo.berkeley.edu>] Available at: https://seismo.berkeley.edu/~rallen/meetings/2011EEWsummit/EEWone-pager_westcoast.pdf.
7. Allen, R. & Kanamori, H., 2003. The potential for earthquake early warning in. Science.
8. Alphonsa, A. & Ravi, G., 2016. Earthquake Early Warning System by IoT using Wireless Sensor Networks. In International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET), 2016.
9. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012. ANSI/AIAA Guide to the Preparation of Operational Concept Documents (ANSI/AIAA G-043A-2012e). USA.
10. Andrejašic, M., 2008. MEMS accelerometers. Ljubljana.

11. Baer, M. & Kradolfer, U., 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(4), pp.1437-45.
12. Bai, C.Y. & Kennett, B.N.L., 2000. Automatic phase-detection and identification by full use of a single three-component broadband seismogram. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90, pp.187–98.
13. Barzilai, A., 2000. Improving a Geophone to Produce an Affordable, Broadband Seismometer.
14. Betbeder, J., 2008. *Seismic Engineering*. Wiltshire, United Kingdom: Wiley.
15. Bianchi, M., Evans, P.L., Heinloo, A. & Quinteros, J., 2013-2016. WebDC3 Web Interface. [Online] Available at: <http://eida.gein.noa.gr/webdc3/>.
16. Big-O complexity, 2012. [Online] Available at: <http://bigocheatsheet.com/>.
17. Bilham, R., 2009. The seismic future of cities. *Bull Earthquake Eng*, pp.839-77.
18. Bisztricsany, E.A., 1958. A new method for the determination of the magnitude of earthquakes. *Geofiz. Kozl.*
19. Bormann, P., 2012. *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*. 2nd ed. Potsdam: IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences.
20. Bormann, P., Storchak, D. & Schweitzer, J., 2013. The IASPEI standard nomenclature of seismic phases.
21. Böse, M. et al., 2014. CISN ShakeAlert: An Earthquake Early Warning Demonstration System for California. In J.Z. Friedemann Wenzel, ed. *Early Warning for Geological Disasters*. Berlin, Germany: Springer. Ch. 3.
22. Böse, M., Wenzel, F. & Erdik, M., 2008. PreSEIS: A Neural Network-Based Approach to Earthquake Early Warning for Finite Faults. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(1), pp.366–82.

23. Bradley, A.B., Cubrinovski, M., MacRae, G.A. & Dhakal, R.P., 2009. Ground-Motion Prediction Equation for SI Based on Spectral Acceleration Equations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(1), pp.277-85.
24. Bullen, K.E., 1940. The problem of the earth's density variation. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 30(3), pp.235-50.
25. Burg, J.P., 1972. The relationship between maximum entropy spectra and maximum likelihood spectra. *Geophysics*, 37(2), pp.375-76.
26. Caltech, n.d. <http://www.eew.caltech.edu/research/vs.html>. [Online] Available at: <http://www.eew.caltech.edu/>.
27. Carranza, M., Buforn, E., Colombell, S. & Zollo, A., 2013. Earthquake early warning for southern Iberia: A P wave threshold-based approach. *Geophysical Research Letters*, 40, pp.4588-93.
28. Cichowicz, A., 1993. An automatic S-phase picker. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83, pp.180-89.
29. Clayton, R. et al., 2011. Community Seismic Network. *Annals of Geophysics*, 54(6).
30. Cochran, E., Lawrence, J., Christensen, C. & Jakka, R., 2009. The Quake-Catcher Network: Citizen science expanding seismic horizons. *Seismological Research Letters*, 80(1).
31. Collins, J. et al., 2001. IRIS Instrumentation Committee Meeting DIA Marriott Courtyard., 2001.
32. Colombelli, S., Zollo, A., Festa, G. & Kanamori, H., 2012. Early magnitude and potential damage zone estimates for the great Mw 9 Tohoku-Oki earthquake. *Geophysical Research Letters*, 39.
33. Crotwell, P., 2011. [Online] University of South Carolina, Department of Earth and Ocean Sciences Available at: <http://www.seis.sc.edu/software/maven2/edu/iris/dmc/fissuresUtil/>.
34. Crotwell, P., 2015. IRIS SeisCode. [Online] Available at: <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/seisfile>.

35. Cua, G., 2008. Earthquake Early Warning Systems: An Investment that Pays off in Seconds. *Natural hazards observer*, May. pp.1-3.
36. Diehl, T., Deichmann, N., Kissling, E. & Husen, S., 2009. Automatic S-Wave Picker for Local Earthquake Tomography. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3), pp.1906–20.
37. Dziewonski A.M., D.L.A., 1981. Preliminary Reference Earth Model (PREM). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 25(4), pp.297-356.
38. Eisermann, A., Ziv, A. & Wust-Bloch, G.H., 2015. Real-Time Back Azimuth for Earthquake Early Warning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4).
39. Ellis, D., 2010. Examples of Audio Processing in "Processing". [Online] Available at: <https://www.ee.columbia.edu/~dpwe/resources/Processing/>.
40. Emolo, A. et al., 2014. Feasibility Study on Earthquake Early Warning for Schools in Southern Italy. Second European conference on earthquake engineering and seismology.
41. Emolo, A. et al., 2011. Toward an integrated regional and on-site Earthquake Early Warning System for Southern Italy: test and performances. In AGU Fall Meeting. San Francisco, California, 2011.
42. Espinosa-Aranda, J.M. et al., 2009. Evolution of the Mexican Seismic Alert System (SASMEX). *Seismological Research Letters*.
43. Evans, J. & Allen, S., 1983. A teleseismic-specific detection algorithm for single short period traces. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(4), pp.1173-86.
44. Fletcher, S.K., 1983. Walsh Transforms in Seismic-Event Detection. *IEEE Electromagnetic Compatibility*, 25(3), pp.367-69.
45. Flinn, E.A., 1965. Signal analysis using rectilinearity and direction of particle motion. In *Proceedings of the IEEE*, 1965.

46. Ganas, A., Oikonomou, A. & Tsimi, C., 2013. NOAfaults: a digital database for active faults in Greece. Bulletin of the Geological Society of Greece. Available at: <http://gredass.unife.it/gredassGM/>.
47. Gasparini, P. & Manfredi, G., 2014. Development of Earthquake Early Warning Systems in the European Union. In J.Z. Friedemann Wenzel, ed. Early Warning for Geological Disasters. Berlin, Germany: Springer. Ch. 5. pp.89-101.
48. Gasparini, P., Manfredi, G. & Zschau, J., 2011. Earthquake early warning as a tool for improving society's resilience and crisis response. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp.267-70.
49. Gledhill, K.R., Randal, M.J. & Chadwick, M.P., 1991. The EARSS digital seismograph: System description and field trials. Bulletin of the Seismological Society of America, 81(4), pp.1380-90.
50. Glendhill, K.R., 1985. An earthquake detector employing frequency domain techniques. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(6), pp.1827-35.
51. Güralp, 2016. Breve Ocean Bottom Seismometer System. [Online] Güralp Available at: <http://www.guralp.com/documents/html/MAN-BRV-0001/s6.html>.
52. Gutenberg, B., 1945. Amplitudes of surface waves and magnitudes of shallow earthquakes. Bulletin Seismological Society of America, 35(1), pp.3-12.
53. Gutenberg, B. & Richter, C.F., 1956. Magnitude and energy of earthquakes. Annals of Geophysics, 9(1), pp.1-15.
54. Hafez, A.G., Khan, T.A. & Kohda, T., 2009. Earthquake onset detection using spectro-ratio on multi-threshold time-frequency sub-band. Digital Signal Processing, 19, pp.118-26.
55. Halbert, S., 2012. Appendix A: Channel Naming. In Standard for the Exchange of Earthquake Data - Reference Manual. 24th ed. Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS).

56. Hanks, T.C. & Kanamori, H., 1979. A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), pp.2348-50.
57. Havskov, J. & Alguacil, G., 2016. *Instrumentation in Earthquake Seismology*. 2nd ed. Netherlands : Springer.
58. Hines, P., Blumsack, S. & Schläpfer, M., 2017. When are Decentralized Infrastructure Networks Preferable to Centralized Ones? In *Hawaii International Conference on System Sciences.*, 2017.
59. Hoshiba, M. et al., 2008. Earthquake Early Warning Starts Nationwide in Japan. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(8), pp.73-80.
60. Hsiao, N.-C. et al., 2009. Development of earthquake early warning system in Taiwan. *Geophysical Research Letters*, 36.
61. Hyogo, 2005. *Hyogo Framework for Action*. In *World Conference on Disaster Reduction*. Hyogo, 2005.
62. IRIS - Incorporated Research Institutions for Seismology, 2016. wilber3. [Online] Available at: <http://ds.iris.edu/wilber3/>.
63. IRIS, 2014. *New Technology Report PASSCAL Standing Committee Summary*. [Online] Available at: https://www.iris.edu/hq/files/publications/brochures_onepaggers/doc/PASSCAL-SC_NewTechnologiesRpt-Exec-summary-2014_Final.pdf.
64. IRIS, 2018. *URL Builder: travelttime v.1*. [Online] (1.1.12) Available at: <https://service.iris.edu/irisws/traveltime/docs/1/builder/>.
65. Joswig, M., 1990. Pattern recognition for earthquake detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 80(1), pp.170-86.
66. Kanamori, H., 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 33, pp.195-214.
67. Kanamori, H., Hauksson, E. & Heaton, T., 1991. TERRAScope and CUBE Project at Caltech. *EOS*, pp.564-66.

68. Kanamori, H., Hauksson, E. & Heaton, T., 1997. Real-time seismology and earthquake hazard mitigation. *Nature*, 390, pp.461-64.
69. Kapetanidis, V., Papadimitriou, P. & Kaviris, G., 2019. Earthquake Early Warning application in Central Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, Sp. Publ. 15th International Congress of the Geological Society of Greece, 22-24 May.
70. Kaviris, G., 2003. Study of Seismic Source Properties of the Eastern Gulf of Corinth. Athens: Geophysics-Geothennics Department, Faculty of Geology, University of Athens.
71. Kayal, J.R., 2008. *Microearthquake Seismology and Seismotectonics of South Asia*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
72. Kazushige, O., Keiji, K., Sadaki, H. & O., Y., 2005. A densely distributed high-sensitivity seismograph network in Japan: Hi-net by National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention. *Review of Scientific Instruments* .
73. Keilis-Borok, V., 1959. On the estimation of the displacement in an earthquake source and of source dimensions. *Ann. di Geofis*, 12, pp.205-14.
74. Kennett, B.L.N., Engdahl, E.R. & Buland, R., 1995. Constraints on seismic velocities in the earth from travel times. *Geophysical Journal International*, 122(1), pp.108-24.
75. Kennett, B.L.N., Engdahl & R., E., 1991. Traveltimes for global earthquake location and phase identification. *Geophysical Journal International*, 105(2), pp.429-65.
76. Kimiyuki A., T.I.K.I., 2003. Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations. *Earth Planets and Space*, 55(4), pp.e5-e8.
77. Kimiyuki, A., Tomotaka, I. & Kojiro, I., 2003. Source characteristics of shallow intraslab earthquakes derived from strong-motion simulations. *Earth Planets and Space*, 55(4), pp.e5-e8.

78. Kiratzi, A. & Papazachos, B.C., 1986. Magnitude determination from ground amplitudes recorded by short- period seismographs in Greece. *Ann. Geophys.*
79. Kohiyama, M. et al., 2019. Update of control parameters for semi-actively controlled base-isolated building to improve seismic performance. *Jpn Archit Rev.*
80. Kong, Q., Allen, R., Schreier, L. & Kwon, Y.-W., 2016. MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond. *Science Advances*, 2(2).
81. Konstantinou, K. & Melis, N., 2017. The relationship between local and moment magnitude in Greece during the period 2008–2016. *Pure and Applied Geophysics*, Springer International Publishing AG.
82. Kouskouna, V. & Makropoulos, K., 2004. Historical earthquake investigations in Greece. *Annals of Geophysics*, 47, pp.723-31.
83. Kulhánek, O., 2012. *Anatomy of Seismograms: For the IASPEI/Unesco Working Group on Manual of Seismogram Interpretation*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier.
84. Kuperkoch, L. et al., 2012. Automated determination of S-phase arrival times using autoregressive prediction: application to local and regional distances. *Geophysical Journal International*, 188, pp.687–702.
85. Kurzon, I., Vernon, F.L., Rosenberger, A. & Ben-Zion, Y., 2014. Real-time automatic detectors of P and S waves using singular value decomposition. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(4), pp.1696–708.
86. Kustowski, B., Ekstrom, G. & Dziewonski, A.M., 2008. Anisotropic shear-wave velocity structure of the Earth's mantle: A global model. *Journal of Geophysical Research*, 113(B6), pp.1-33.
87. Leonard, M., 2000. Comparison of Manual and Automatic Onset Time Picking. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(6), pp.1384–1390.

88. Leonard, M. & Kennett, B.L.N., 1999. Multi-component autoregressive techniques for the analysis of seismograms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 111, pp.247–63.
89. Linville, L., Pankow, K., Kilb, D. & Velasco, A., 2014. Exploring remote earthquake triggering potential across EarthScope’s Transportable Array through frequency domain array visualization. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, pp.8950–63.
90. Lomax, A., Satriano, C. & Vassallo, M., 2012. Automatic picker developments and optimization FilterPicker a robust broadband picker for real-time seismic monitoring and earthquake early-warning. *Seismological Research Letters*, pp.531-40.
91. Love, A.E.H., 1911. *Some problems of geodynamics*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University press.
92. Lowrie, W., 2007. *Fundamentals of Geophysics*. New York, United States of America : Cambridge University Press.
93. Maier, M.W., 1996. Architecting Principles for Systems-of-Systems. *INCOSE International Symposium*, 6, pp.565–73.
94. Makropoulos, K., Kaviris, G. & Kouskouna, V., 2012. An updated and extended earthquake catalogue for Greece and adjacent areas since 1900. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(5), pp.1425-30.
95. Marouani, H. & Dagenais, M.R., 2008. Internal Clock Drift Estimation in Computer Clusters. *Journal of Computer Systems, Networks, and Communications*, 2008(-), pp.1-7.
96. Michael, M. et al., 2007. Scale-up x Scale-out: A Case Study using Nutch/Lucene. In *Parallel and Distributed Processing Symposium*. Long Beach, CA, March 2007. IEEE.
97. Montagner, J.P. & Kennett, B.L.N., 1996. How to reconcile body-wave and normal-mode reference Earth models? *Geophysical Journal International*, 125(1), pp.229-48.

98. Montalbetti, J.F. & Kanasewich, R.E., 1970. Enhancement of teleseismic body phases with a polarization filter. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 21, pp.119–29.
99. Müller, S., Dias, R.d.S. & Santos, I.D.d.S., 2011. MEMS accelerometer performance. In 18th International Congress on Sound and Vibration. Rio De Janeiro, July 2011.
100. Nakamura, Y. & Saita, J., 2007. FREQL and AcCo for a Quick Response to Earthquakes. In P.M.G.Z.J. Gasparini, ed. *Earthquake Early Warning Systems*. Springer. pp.307-24.
101. Narayanan, V. & Xie, Y., 2006. Reliability concerns in embedded system designs. *Computer*, 39(1), pp.118-20.
102. National and Kapodistrian University of Athens, 2014. Important Earthquakes in Greece during 2013-14. [Online] Available at: <http://www.geophysics.geol.uoa.gr/>.
<http://www.geophysics.geol.uoa.gr/stations/maps/2013.html>.
103. NXP, 07/2015. i.MX 6Dual/6Quad Applications Processors for Industrial Products. NXP.
104. Omron, 2017. Omron D7s Manual. [Online] Available at: <https://eu.mouser.com/ds/2/307/en-d7s-957666.pdf>.
105. Papazachos, B. & Vassilicou, A., 1966. Studies on the magnitudes of earthquakes. Progress Report in seismology and Physics of the Earth's interior, 1964-1966.
106. Peng, H. et al., 2012. Developing a Prototype Earthquake Early Warning System in the Beijing Capital Region. *Seismological Research Letters*, 82(3), pp.394-403.
107. Peng, C. et al., 2013. Development of an integrated onsite earthquake early warning system and test deployment in Zhaotong, China. *Computers & Geosciences*, March. pp.170-77.

108. Picozzi, M. et al., 2015. Exploring the feasibility of a nationwide earthquake early warning system in Italy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120(4), pp.2446–65.
109. Piyare, R. & Lee, S.R., 2013. Performance Analysis of XBee ZB Module Based Wireless Sensor Networks. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 4(5).
110. Quansah, J.E., Engel, B. & Rochon, G.L., 2010. Early Warning Systems: A Review. *Journal of Terrestrial Observation*, pp.24-44.
111. Rausand, M., 2011. *Risk Assessment: Theory, Methods, and Applications*. John Wiley & Sons, Inc.
112. Rayleigh, L., 1885. On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. In *Proceedings London Mathematical Society*, 1885.
113. Reading, A.M., Weijian, M. & Gubbins, D., 2001. Polarization filtering for automatic picking of seismic data and improved converted phase detection. *Geophysical Journal International*, 147, pp.227–34.
114. Richter, C.F., 1935. An instrumental earthquake magnitude scale. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 25(1), pp.1-32.
115. Rohani, H. & Roosta, A.K., 2014. *Calculating Total System Availability*.
116. Rosenberger, A., 2010. Real-time ground motion analysis: Distinguishing P and S arrivals in a noisy environment. *Bulletin of the Seismological Society of America* , 100(3), pp.1252–62.
117. RSUW, 2012. An Equivalent Electrical Model for a Geophone. [Online] Available at: http://www.rsuw.daleh.id.au/Equivalent_Electrical_Model_for_a_Geophone.pdf.
118. Ruud, B. & Husebye, E., 1992. A new three-component detector and automatic single-station bulletin production. *Bulletin of the Seismological Society of America*, February. pp.221-37.

119. Satriano, C. et al., 2010. PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(2), pp.137–53.
120. Satriano, C., Wu, Y.-M., Zollo, A. & Kanamori, H., 2011. Earthquake early warning: Concepts, methods and physical grounds. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, February. pp.106-18.
121. Scordilis, E., 2005. Globally valid relations converting Ms, mb and MJMA to Mw. In *Nato Advanced Research Workshop on “Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries”*. Borovetz – Rila Mountain – Bulgaria, 2005.
122. Scordilis, E.M., 2006. Empirical global relations converting M S and m b to moment magnitude. *Journal of Seismology*.
123. Sharma, B.K., Amod, K. & Murthy, V.M., 2010. Evaluation of Seismic Events Detection Algorithms. *Journal of the Geological Society of India*, 75, pp.533-38.
124. Shensa, M., 1977. TR-77-03 The deflection detector, its theory and evaluation on short-period seismic data. Virginia: Texas Instruments.
125. Smith, K., 2013. *Environmental Hazards: Assessing Risk and Reducing Disaster*. 6th ed. Routledge.
126. Staller, 2005. Understanding analog to digital converter specifications. [Online] Available at: <https://www.embedded.com/design/configurable-systems/4025078/Understanding-analog-to-digital-converter-specifications>.
127. Stewart, S.W., Lee, W.H.K. & Eaton, J.P., 1971. Location and real-time detection of microearthquakes along the San Andreas fault system in central California. *Bulletin of the Royal Society New Zealand*, pp.205-09.
128. Structuremag, 2015. <http://www.structuremag.org>. [Online] Available at: <http://www.structuremag.org/wp-content/uploads/2015/02/0315-sd-5.jpg>.

129. Summerson, S., 2009. Computational Complexity of DFT. [Online] Rice University Available at: http://www.ece.rice.edu/~srs1/files/Circuits_10_26.pdf.
130. Swindell, H. & Snell, N., 1997. Station processor automatic signal detection system, phase I: final report, station processor software development. Texas Instruments.
131. Tary, J.B., Herrera, R.H. & Baan, M., 2013. Time-varying autoregressive model for spectral analysis of microseismic experiments and long-period volcanic events. *Geophysical Journal International*.
132. Terra Technology, 1980. Operating and maintenance manual of Digital Cassette Seismograph (DCS-302).
133. TexasInst., 2013. Very Low Noise, 24-Bit Analog-to-Digital Converter. [Online] Texas Instruments Available at: <http://www.ti.com/>.
134. Trabant, C., 2015. IRIS SeisCode. [Online] Available at: <https://seiscode.iris.washington.edu/projects/ringserver>.
135. Tsapanos, T., 2008. Seismicity and Seismic Hazard Assessment in Greece. In E.S. Husebye, ed. *Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries*. The Netherlands: Springer. pp.253-70.
136. UN, S., 2015. Formulae for ammunition management. UN - International ammunition technical guideline.
137. Vanek, J. et al., 1962. Standardization of the earthquake magnitude scale. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 6(1), pp.41-48.
138. Wang, J. & Teng, T.-L., 1995. Artificial neural network-based seismic detector. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(1), pp.308-19.
139. Wang, J. & Teng, T., 1997. Identification and picking of S phase using an artificial neural network. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87, pp.1140-49.

140. Weber, E. et al., 2007. An Advanced Seismic Network in the Southern Apennines (Italy) for Seismicity Investigations and Experimentation with Earthquake Early Warning. *Seismological Research Letters*, 78(6).
141. Wenzel, F., Oncescu, M., Baur, M. & Fiedrich, F., 1999. An early warning system for Bucharest. *Seismological Research Letters*.
142. Withers, M. et al., 1998. A Comparison of Select Trigger Algorithms for Automated Global Seismic Phase and Event Detection. *Bulletin of the Seismological Society of America*, February. pp.95-106.
143. Wu, Y.-M. et al., 2013. A High-Density Seismic Network for Earthquake Early Warning in Taiwan Based on Low Cost Sensors. *Seismological Research Letters*, 84(6), p.5.
144. Wu, Y.-M. & Kanamori, H., 2005a. Experiment on an Onsite Early Warning Method for the Taiwan Early Warning System. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(1), pp.347-53.
145. Wu, Y.-M. & Kanamori, H., 2005b. Rapid Assessment of Damage Potential of Earthquakes in Taiwan from the Beginning of P Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), pp.1181-85.
146. Wu, Y.-M. & Kanamori, H., 2008. Development of an Earthquake Early Warning System Using Real-Time Strong Motion Signals. *Sensors*, 8(1), pp.1-9.
147. Wu, Y.-M., Kanamori, H., Allen, R. & Hauksson, E., 2007. Determination of earthquake early warning parameters, τ_c and P_d , for southern California. *Geophysical Journal International*, 170(2).
148. Wu, Y.-M. & Teng, T.-l., 2002. A Virtual Subnetwork Approach to Earthquake Early Warning. *Bulletin of the Seismological Society of America*, June. pp.2008-18.
149. Wu, Y.-M. & Zhao, L., 2006. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning. *Geophysical Research Letters*, 33.

150. Xin, L. et al., 2014. A new type seismic intensity meter. *Geodesy and Geodynamics*, p.73 – 78.
151. ZHAO, Y.H., WANG, L.M. & YAN, X.L., 2017. The Principle and Simulation of Moving-coil Velocity Detector. In 2nd International Conference on Electrical and Electronics: Techniques and Applications (EETA 2017), 2017.
152. Zollo, A., Lancieri, M. & Nielsen, S., 2006. Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records. *Geophysical Research Letters*, December.
153. Zollo, A. et al., 2010. Earthquake early warning. European Seismological Commission 32 General Assembly, September.
154. Zschau, J., Gasparini, P. & Papadopoulos, G., 2009. 36935 SAFER Seismic Early Warning for Europe final report. Report of the FP6 project.
155. ΙΤΣΑΚ, Ι.Τ.Σ.κ.Α.Κ., ND. <http://shakemaps.itsak.gr/index.html>. [Online] Available at: <http://shakemaps.itsak.gr/about.html>.
156. Παπαζάχος, Β. & Παπαζάχου, Κ., 2003. Οι σεισμοί της Ελλάδας. Θεσσαλονίκη, Ελλάδα: Εκδόσεις Ζήτη.