

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση χρονοσειρών ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων δικτύου επίγειων
σταθμών για την ανίχνευση υπογραφών καταστροφικών γεωφυσικών
φαινομένων**

Μεταπτυχιακός Φοιτητής:

Δημήτριος Πολίτης, Αριθμός Μητρώου: 13

Τριμελής Επιτροπή (εξεταστική):

Επιβλέπων Διπλωματικής: Στυλιανός Ποτηράκης, Καθηγητής

Μέλος Επιτροπής: Δήμος Τριάντης, Καθηγητής

Μέλος Επιτροπής: Νικόλαος-Αλέξανδρος Τάτλας, Αν. Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ (ΑΙΓΑΛΕΩ), ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2020

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών
www.eee.uniwa.gr

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας



UNIVERSITY of WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
Department of Electrical & Electronics Engineering
www.eee.uniwa.gr

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece
Tel: +30 210 538-1225, Fax: +30 210 538-1226

Master of Science By Research in
Electrical & Electronics Engineering

MSc Thesis

Time series analysis of electromagnetic measurements from ground-based stations network for the detection of disastrous geophysical phenomena signatures

Postgraduate Student:

Dimitrios Politis, Registration Number 13

Three member committee:

MSc Thesis Supervisor: Stylianos Potirakis, Professor

Committee Member: Dimos Triantis, Professor

Committee Member: Nikolaos-Alexandros Tatlas, Associate Professor

ATHENS (EGALEO), FEBRUARY 2020

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Στυλιανός Ποτηράκης	Δήμος Τριάντης	Νικόλαος-Αλέξανδρος Τάτλας
Καθηγητής	Καθηγητής	Αν. Καθηγητής


ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Δημήτριος Πολίτης του Ζήνωνα, με αριθμό μητρώου MSCRES-13 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΠΟΛΙΤΗΣ

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

(Δημήτριος Πολίτης, Μεταπτυχιακού Φοιτητή)

Ιανουάριος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται αναφορά σε όλο το εύρος της εκπόνησης της έρευνας, καθ'όλη τη διάρκεια της φοίτησης στο πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας στο ερευνητικό αντικείμενο «Ανάλυση Χρονοσειρών ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων δικτύου επίγειων σταθμών για την ανίχνευση υπογραφών καταστροφικών γεωφυσικών φαινομένων». Η εργασία αυτή επικεντρώνεται στη διερεύνηση της δυνατότητας παρατήρησης προσεισμικών διεργασιών ως υπογραφές σε ηλεκτρομαγνητικά σήματα δικτύων επίγειων σταθμών, με την εφαρμογή στατιστικών μεθόδων ανάλυσης χρονοσειρών σε καταγραφές μεγάλης διάρκειας. Συγκεκριμένα μελετήθηκαν δεδομένα υποϊονοσφαιρικής διάδοσης VLF/LF που παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον καθώς διαταραχές σε αυτά ενδέχεται να σχετίζονται με διεργασίες που συμβαίνουν στη λιθόσφαιρα. Τα δεδομένα καταγράφηκαν από 8 δέκτες-σταθμούς του Ιαπωνικού δικτύου VLF/LF, για χρονικό διάστημα ~3 ετών μεταξύ του 2014 και του 2017. Η ανάλυση αυτών των δεδομένων έγινε με τη μέθοδο των κρίσιμων διακυμάνσεων (Method of Critical Fluctuations, MCF). Συγκεκριμένα αναλύθηκαν τμήματα των χρονοσειρών πλάτους λήψης που αντιστοιχούν σε χρονικά διαστήματα πριν από καθέναν από τους κύριους σεισμούς με μέγεθος $M_w \geq 5.5$ που το επίκεντρο τους βρισκόταν εντός της 5ης ζώνης Fresnel τουλάχιστον μίας υποϊονοσφαιρικής ζεύξης συγκεκριμένου πομπού της Ιαπωνίας με καθέναν από τους διαθέσιμους 8 δέκτες. Οι αναλύσεις, αποκάλυψαν κρίσιμη δυναμική στην χαμηλότερη ιονόσφαιρα πριν την εμφάνιση των σεισμικών αυτών γεγονότων σε τουλάχιστον μία ή περισσότερες υποϊονοσφαιρικές ζεύξεις, όπου ήταν δυνατόν να εφαρμοστεί η MCF. Στην μελέτη αυτή συμπεριλαμβάνονται επίσης και άλλα ακραία φαινόμενα, τοπικά ή παγκόσμια, τα οποία συνέβησαν σε κοντινή χρονική περίοδο με τους σεισμούς, όπως μαγνητικές καταιγίδες, ηλιακές εκλάμψεις και ηφαίστεια. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέθοδος ανάλυσης χρονοσειρών MCF ανιχνεύει κρίσιμη δυναμική πριν από όλα τα σεισμικά γεγονότα καθώς και πριν από κάθε άλλο ακραίο φαινόμενο.

ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ: Σεισμοί, Σεισμο-ηλεκτρομαγνητισμός, Υποϊονοσφαιρική Διάδοση VLF/LF, Μέθοδος Κρίσιμων Διακυμάνσεων, Κρισιμότητα

ABSTRACT

This thesis presents the whole research that has been done during the entire time of attendance in Master of Science by research in Electrical and Electronics Engineering, in the research field of “Time series analysis of electromagnetic measurements from ground-based stations network for the detection of disastrous geophysical phenomena signatures”. This work focuses on the investigation of the possibility for pre-earthquake processes to be observed as signatures in electromagnetic signals of ground-based stations networks, by applying statistical time-series analysis methods to long duration recordings. Specifically, subionospheric VLF/LF data were studied, which are of great interest since any ionospheric perturbations may be related with processes occurring in lithosphere. The data were recorded by a network of 8 VLF/LF receivers deployed throughout Japan during a time period of ~3 years between 2014 and 2017. The analysis of these data was done by the Method of Critical Fluctuations (MCF). Specifically, parts of reception amplitude time series corresponding to time intervals before each one of the main earthquake events with magnitude $M_w \geq 5.5$ and epicenter within the 5th Fresnel zone of at least one VLF subionospheric propagation paths, between of a specific transmitter and each one of the 8 available VLF/LF receivers, were analyzed. The analysis revealed critical dynamics in the lower ionosphere prior to these seismic events in at least one or more VLF subionospheric paths, where it was possible to apply MCF. This study also includes other extreme, local or global, phenomena that occurred close in time to the earthquakes, such as magnetic storms, solar flares and volcanoes. The results indicated that the MCF time series analysis method detects critical dynamics before all seismic events as well as before any other extreme event.

KEYWORDS: Earthquakes (EQs), Seismo-electromagnetics, Subionospheric VLF propagation, Method of Critical Fluctuations (MCF), Criticality

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου Στυλιανό Ποτηράκη για την αμέριστη και απλόχερη βοήθεια σε οτιδήποτε προέκυψε καθ' όλη τη διάρκεια της φοίτησής μου. Τον Δρ. Ιωάννη Κοντογιάννη (Ε.ΔΙ.Π.) για τις χρήσιμες συμβουλές που μου έδωσε σχετικά με την ορθή εφαρμογή της μεθόδου MCF, καθώς και των χρήσιμων παρατηρήσεων και διορθώσεων που χρειάστηκαν στη συγγραφή του θεωρητικού μέρους. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Άγγελο Χαριτόπουλο (Ε.ΔΙ.Π.) για την πολύ σημαντική βοήθεια που πρόσφερε στην εκτέλεση του λογισμικού UltraMSK, του δέκτη UNIWA, καθώς επίσης τον Ιωάννη Κοκκαλιάρη (Ε.ΔΙ.Π.) μαζί με το τεχνικό προσωπικό του ιδρύματος για την κατασκευή του δέκτη (VLF/LF) UNIWA. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου που διευκόλυναν την παρουσία μου στα μαθήματα και τις συναντήσεις, αλλά και για την στήριξη τους σε όλη την διάρκεια της φοίτησης.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Πολύπλοκα συστήματα-Κρίσιμη Κατάσταση-Μέθοδος Κρισίμων Διακυμάνσεων (MCF)	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μέθοδος Νυχτερινών Διακυμάνσεων (NFM)	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σήματα-Δίκτυα VLF/LF& Μηχανισμοί επηρεασμού της Ιονόσφαιρας - Σύζευξη Λιθόσφαιρας-Ατμόσφαιρας-Ιονόσφαιρας (LAI)	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση υποϊονοσφαιρικών δεδομένων (VLF/LF) με τη Μέθοδο των Κρισίμων Διακυμάνσεων (MCF) – Πιθανή προέλευση των κρίσιμων υπογραφών από άλλα φαινόμενα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Λειτουργία δέκτη VLF (UNIWA)	48
Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προτάσεις Έρευνας	52
Βιβλιογραφία-Πηγές	54

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Διάφορα ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, ονομαζόμενα σεισμο-ηλεκτρομαγνητικά, έχουν παρατηρηθεί πριν από σεισμούς, ενώ η πιθανή σύνδεσή τους με τις διεργασίες προετοιμασίας σεισμού έχει ερευνηθεί εκτεταμένα τις τελευταίες δύο δεκαετίες [1–4]. Η αιτία αυτών των φαινομένων έγκειται σε ηλεκτρομαγνητικές εκπομπές (EM emissions) από τη λιθόσφαιρα που παρατηρούνται σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων από συνεχές ρεύμα (DC) μέχρι πολύ υψηλές συχνότητες (VHF), ή σε δευτερογενή ηλεκτρομαγνητικά φαινόμενα, ενώ είναι πολύ πιθανό αντίστοιχα να υπάρχουν διαταραχές στην ατμόσφαιρα και την ιονόσφαιρα [5]. Μια εκτεταμένα μελετημένη μέθοδος αφορά την ανίχνευση των ιονοσφαιρικών διαταραχών που γίνεται με **ραδιοτεχνικές μεθόδους υποϊονοσφαιρικής διάδοσης στη μπάντα των χαμηλών ή πολύ χαμηλών συχνοτήτων (VLF/LF)**[1]. Οι ιονοσφαιρικές διαταραχές που έχουν πιθανή σεισμική προέλευση θεωρούνται ελπιδοφόροι για βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη σεισμού, ενώ η ερμηνεία τους μέσω της υπόθεσης της σύζευξης μεταξύ λιθόσφαιρας-ατμόσφαιρας-ιονόσφαιρας (LAIC model) γίνεται όλο και πιο διαδεδομένη [6–9]. Συγκεκριμένα, έχει αποδειχθεί στατιστικά και επιβεβαιωθεί πως η εμφάνιση διαταραχών στην ιονόσφαιρα συνδέεται με την εμφάνιση σεισμικών γεγονότων, που συμβαίνουν στη λιθόσφαιρα [10,11]. Σημειώνεται ωστόσο ότι εκτός από τη σεισμική δραστηριότητα και άλλα φαινόμενα όπως οι ηλιακές εκλάμψεις, μαγνητικές καταιγίδες, εκρήξεις ηφαιστειών, τυφώνες ακόμα και τσουνάμι έχουν παρατηρηθεί να επηρεάζουν την ιονόσφαιρα και αυτό αποτυπώνεται στις καταγραφές των VLF/LF χρονοσειρών [6,12,13].

Οι μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται αποκαλύπτουν διάφορα χαρακτηριστικά του σήματος (των αντίστοιχων χρονοσειρών) που οδηγούν σε χρήσιμα συμπεράσματα με κύριο ενδιαφέρον σε πρόδρομες «υπογραφές» που ανιχνεύονται πριν από σεισμικά γεγονότα. Συγκεκριμένα στη κατηγορία των VLF/LF σημάτων που εξετάστηκαν, εφαρμόστηκαν η **Μέθοδος των Κρισίμων Διακυμάνσεων (MCF)**, σε **ιαπωνικό δίκτυο δεδομένων VLF/LF την χρονική περίοδο 2014-2017** αναζητώντας ενδείξεις κρίσιμης δυναμικής σε τμήματα των χρονοσειρών πριν από τους σεισμούς. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοστεί με επιτυχία για πρώτη φορά σε χρονοσειρές των VLF/LF που σχετίζονταν με τους καταστροφικούς σεισμούς του 2016 που έγιναν στην Ιαπωνία στην πόλη Kumamoto [14]. Άλλες εφαρμογές της μεθόδου έχουν γίνει πάνω σε προσεισμικά σήματα θραπτο-ηλεκτρομαγνητικών εκπομπών (fracto-electromagnetic-emissions, EME), στις μπάντες των kHz και MHz αλλά και σε προσεισμικά σήματα μέτρησης μαγνητικού πεδίου (ULF) ($\leq 1\text{Hz}$) από επίγεια μαγνητόμετρα μέτρησης του μαγνητικού πεδίου της γης, ιδιαίτερα στον Ελλαδικό χώρο [15–20]. Επιπλέον άλλες εφαρμογές της μεθόδου είναι σε βιολογικά, οικονομικά και ηλεκτρονικά συστήματα [21–24].

Στη συνέχεια μία άλλη μέθοδος ανάλυσης η οποία έχει προταθεί για την ανάλυση των δεδομένων υποϊονοσφαιρικής διάδοσης είναι γνωστή ως **Μέθοδος Νυχτερινών Διακυμάνσεων (Night-time Fluctuation Method, NFM)**, από την οποία υπολογίζεται τρεις ποσότητες, μία τιμή ανά ημέρα από νυχτερινά δεδομένα, παρατηρώντας αποκλίσεις (υπογραφές) πριν το σεισμικά γεγονότα [25–28]. Επιπροσθέτως είναι δυνατό μετά την εφαρμογή της μεθόδου NFM να εφαρμοστεί πάνω σε αυτή η μέθοδος **Φυσικού Χρόνου (Natural Time Analysis, NTA)** από την οποία μπορεί να βρεθεί κρισιμότητα σε μικρό

μήκους χρονοσειρές πχ. 30 τιμών (ημερών) [29]. Η μέθοδος αυτή αρχικά είχε εφαρμοστεί και προταθεί αρχικά για την μελέτη ασθενών σεισμικών ηλεκτρικών σημάτων (SES signals), όπου παρατηρούνται στην Ελλάδα εδώ και αρκετά χρόνια [30]. Στη συνέχεια η μέθοδος εφαρμόστηκε και σε άλλους τύπους ηλεκτρομαγνητικών σημάτων όπως προαναφέρθηκε σε fracto-EME (kHz-MHz), ULF (≤ 1 Hz), αλλά και σε χρονοσειρές σεισμικής δραστηριότητας (ακολουθία σεισμικών γεγονότων) για την αποκάλυψη της κρισιμότητας [16,19,20,31,32].

Στην εργασία αυτή, και συγκεκριμένα στο τέταρτο κεφάλαιο, το οποίο θα επικεντρωθούμε θα αναφερθούμε στην ανάλυση των υποϊονοσφαιρικών δεδομένων για το διάστημα 1/1/2014-28/2/2014 (διαθέσιμα δεδομένα) σε δίκτυο 8 δεκτών (VLF/LF) όπου έχει εγκατασταθεί τα τελευταία χρόνια στην Ιαπωνία που έχει κύριο στόχο την μελέτη προ-σεισμικών ανωμαλιών στις καταγραφές των VLF/LF σημάτων [1,14,29]. Στις αναλύσεις όπου έγιναν με την μέθοδο MCF αναζητήθηκε τουλάχιστον ένα κρίσιμο παράθυρο (CW) σε νυχτερινά τμήματα χρονοσειρών ξεκινώντας από 1 ημέρα έως 15 μέρες πριν από καθένα από τους 15 κύριους σεισμούς, εκτός από τους σεισμούς του 2016 Kumamoto οι οποίοι μελετήθηκαν σε προηγούμενη έρευνα, και απλώς καταγράφηκαν στο συγκεντρωτικό πίνακα των αποτελεσμάτων ανάλυσης [14]. Συγκεκριμένα στη μελέτη αυτή εξετάστηκαν όλοι οι κύριοι σεισμοί με μέγεθος $M \geq 5.5$ σε όλα τα υποϊονοσφαιρικά μονοπάτια (paths-μεταξύ πομπού και δεκτών), όπου το επίκεντρο του κάθε σεισμού βρισκόταν μέσα στο όριο της πέμπτης ($5^{\text{η}}$) ζώνης Fresnel σε τουλάχιστον ένα μονοπάτι (path) (ή περισσότερα). Τα επίκεντρα των σεισμών που συνέβησαν την περίοδο που αφορά η έρευνα, δηλαδή για την περίοδο των περίπου τριών χρόνων μεταξύ 1/1/2014 και 28/2/2014, και ικανοποιούν το κριτήριο να βρίσκονται εντός της 5ης ζώνης Fresnel μεταξύ τουλάχιστον ενός ζεύγους πομπού-δέκτη καλύπτουν γεωγραφικά σχεδόν όλη την Ιαπωνία. Επιπλέον, έγινε αναζήτηση και για άλλα ακραία φαινόμενα, όπως μαγνητικές, ηλιακές καταιγίδες και ηφαίστεια που είναι γνωστό ότι επηρεάζουν την Ιονόσφαιρα, που συνέβησαν εντός 15 ημερών πριν και μετά από τον κάθε σεισμό που εξετάστηκε καθώς φαίνεται να παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον επειδή παρατηρείται επίσης κρισιμότητα (κρίσιμα παράθυρα) πριν από τα φαινόμενα αυτά.

Από τα αποτελέσματα επί του συνόλου των αναλύσεων που έγιναν φαίνεται πως η MCF δεν οδηγεί σε “false negative” ενδείξεις, καθώς κρίσιμα παράθυρα βρέθηκαν πριν από κάθε σεισμό με μέγεθος $M \geq 5.5$, σχεδόν σε όλα τα υποϊονοσφαιρικά μονοπάτια (paths), που συμπεριλαμβάνονταν το επίκεντρο του κάθε σεισμού. Ωστόσο, στις περιπτώσεις όπου ένας σεισμός ή άλλο ακραίο φαινόμενο (τοπικό ή παγκόσμιο) συνέβη μετά το κρίσιμο παράθυρο του εξεταζόμενου σεισμού, σε κοντινό χρονικό διάστημα μεταξύ των δύο φαινομένων, δεν υπάρχει απόλυτη βεβαιότητα για την αιτία της παρατηρούμενης κρίσιμης υπογραφής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Πολύπλοκα συστήματα- Κρίσιμη κατάσταση- Μέθοδος Κρίσιμων Διακυμάνσεων (MCF)

1.1 Πολύπλοκα Συστήματα

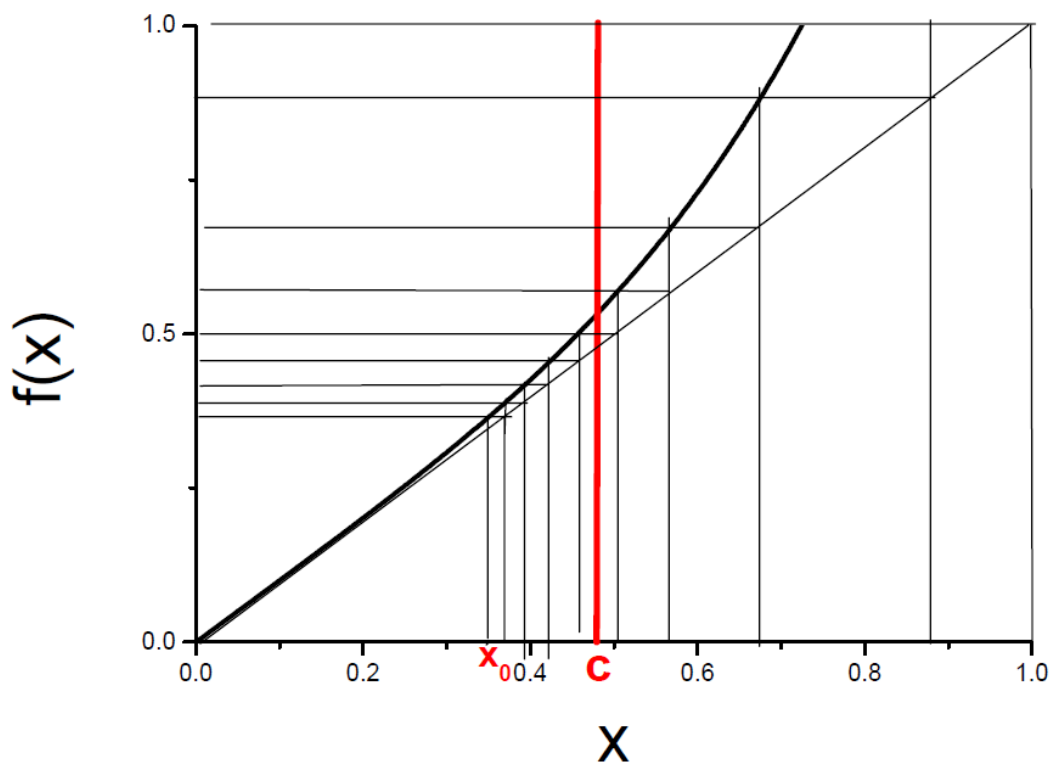
Τα πολύπλοκα συστήματα στις μέρες μας είναι ένα κατ' εξοχήν δι-επιστημονικό αντικείμενο καθώς τα συναντάμε σε πολλά επιστημονικά πεδία. Χαρακτηρίζονται από την μη γραμμική τους συμπεριφορά και την πολυδιάστατη εξάρτηση τους από πολλούς παράγοντες, η γνώση των οποίων πολλές φορές είναι αδύνατη όπως και η αναλυτική επίλυση αυτών των συστημάτων. Μια κατηγορία επίλυσης τους μπορεί να αναπτυχθεί μέσα από έννοιες στατιστικής φυσικής που οδηγεί σε μια περιγραφή της δυναμικής τους. Στην κατηγορία των πολύπλοκων συστημάτων ανήκουν (ενδεικτικά): μη γραμμικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, βιολογικά συστήματα, γεωφυσικά συστήματα, οικονομικά συστήματα, κοινωνικά συστήματα κ.α.

Η περιγραφή αυτών των συστημάτων όπως προαναφέραμε γίνεται μέσω στατιστικών περιγραφών και της θεωρίας του χάους. Βασικό μαθηματικό εργαλείο των θεωριών του χάους και των μη γραμμικών συστημάτων είναι οι μη γραμμικές μαθηματικές απεικονίσεις. Υπάρχουν διαφορετικές απεικονίσεις που περιγράφουν την συμπεριφορά του εκάστοτε συστήματος. Στην προκειμένη περίπτωση θα εστιάσουμε τη μελέτη μας στην απεικόνιση της διαλειπτότητας, που περιγράφει πολλά διακριτά συστήματα (στη πραγματικότητα όλα τα μετρούμενα συστήματα είναι διακριτά μιας και οι μετρήσεις λαμβάνονται από ψηφιακά συστήματα με δειγματοληψία του παρατηρήσιμου μεγέθους) όπως προετοιμασία σεισμών, μαγνητικών καταιγίδων, μετεωρολογικά φαινόμενα, οικολογικά συστήματα, μη γραμμικά ηλεκτρονικά κυκλώματα, γεωδυναμικά συστήματα και άλλα πολλά τα οποία θα μελετηθούν ή πρόκειται να μελετηθούν στο άμεσο μέλλον. Από τις τρεις μορφές διαλειπτότητας θα ασχοληθούμε με την πιο διαδεδομένη στη φύση όπου είναι η διαλειπτότητα τύπου 1 [33]. Η συνάρτηση αυτής είναι:

$$x_{n+1} = x_n + ux_n^z + \varepsilon_n, x_n \in [0,1] \quad (1)$$

Όπου έχει προστεθεί (εξ (1)) ένας όρος θορύβου ε_n για να κάνει το σύστημα εργοδικό. Εργοδικότητα σημαίνει ότι το σύστημα περνάει από όλες τις διαθέσιμες καταστάσεις που περιγράφουν την τροχιά του στο χώρο των φάσεων. Οι u και z είναι παράμετροι. Όπως παρατηρούμε από το Σχήμα 1, η απεικόνιση ακολουθεί την διχοτόμο μέχρι ένα σημείο και από εκεί και έπειτα αποκλίνει. Η περιοχή στην οποία η απεικόνιση παρακολουθεί τη διχοτόμο ονομάζεται laminar περιοχή (ευσταθής). Από εκεί και έπειτα είναι χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών να ξεφύγουν εκτός (out of laminar region) και να επανέλθουν πάλι στη laminar περιοχή (Σχήμα 1). Το τέλος της laminar περιοχής ονομάζεται end point ενώ αρχή αυτής fixed point που χαρακτηρίζεται ως το σημείο που έλκει τις τροχιές. Έτσι προκύπτει το διάστημα $[0,c]$ όπου έστω αν πάρουμε τυχαία ένα αρχικό σημείο (x_0) μέσα σε αυτό το διάστημα μετά από κάποιες επαναλήψεις (δεν είναι

γνωστό πόσες) θα βρεθεί στη χαοτική φάση μετά το ($x=c$) και θα επαναφερθεί με τυχαίο και ομοιόμορφο τρόπο σε ένα νέο x_0 .



Σχήμα 1: Η απεικόνιση της διαλειπτότητας (1). Παρατηρούμε τη διχοτόμο την οποία ακολουθεί η καμπύλη της απεικόνισης μέχρι ένα σημείο c (end point) και με fixed point να είναι η αρχή των αξόνων. Για $x > c$ η καμπύλη ξεφεύγει από την διχοτόμο σε μια χαοτική συμπεριφορά.

Εκκινώντας από το νέο x_0 , ο χρόνος παραμονής στη laminar region θα είναι διαφορετικός από τον προηγούμενο έτσι οι χρόνοι παραμονής ή αλλιώς (laminar lengths) είναι διαφορετικοί. Έτσι για κάθε laminar region υπάρχει μια κατανομή χρόνων $P(L)$, η κατανομή των laminar χρόνων, που εκφράζεται ως:

$$P(L) = L^{\frac{-z}{z-1}} \quad (2)$$

Από την Εξ (2) παρατηρούμε ότι υπάρχουν νόμοι βάθμισης (scaling laws, power laws), δηλαδή η απεικόνιση της διαλειπτότητας υπακούει σε scaling νόμους κάτι που επιτρέπει τις συμπεριφορές αυτοομοιότητας και μορφοκλασματικής γεωμετρίας (fractal δομές). Η κατανομή αυτή ομοιάζει με αυτή των συστημάτων στη κρίσιμη κατάσταση τους που θα περιγράψουμε στην συνέχεια.

1.2 Κρίσιμη Κατάσταση

Η κρίσιμη κατάσταση είναι μια κατάσταση στην οποία το σύστημα έχει οδηγηθεί από μια παράμετρο ελέγχου, όπως για παράδειγμα θερμοκρασία, πυκνότητα, διατμηματικές τάσεις, ή ακόμα το αποτέλεσμα μιας ιδιότυπης αυτοοργάνωσης[34]. Εμφανίζεται κυρίως με την μορφή κατωφλίου, δηλαδή κάποιας τιμής της παραμέτρου που αν το σύστημα περάσει από αυτή, προς τα πάνω ή προς τα κάτω, το σύστημα περνάει σε διαφορετική οργάνωση, γίνεται αυτό που λέμε αλλαγή φάσης. Μαθηματικά αυτό έχει να κάνει με την ασυνέχεια ή όχι των 1ης τάξης παραγώγων της ελεύθερης ενέργειας. Συγκεκριμένα εάν οι παράγωγοι είναι ασυνεχείς έχουμε 1ης τάξης αλλαγή φάσης αλλιώς έχουμε συνεχείς αλλαγές φάσης. Η μελέτη αυτή σχετίζεται με την ελεύθερη ενέργεια Landau (free energy) του συστήματος (που θα μελετήσουμε στη συνέχεια). Συγκεκριμένα, στον πρώτο τρόπο μετάβασης, η πρώτη παράγωγος της ελεύθερης ενέργειας είναι ασυνεχής ενώ στο δεύτερο τρόπο μετάβασης η δεύτερη παράγωγος της ελεύθερης ενέργειας είναι συνεχής στο κρίσιμο σημείο. Για να μπορούμε να ποσοτικοποιούμε τις αλλαγές φάσης εισάγουμε την παράμετρο τάξης. Η παράμετρος τάξης έχει μια πολύ χαρακτηριστική ιδιότητα, προς το κρίσιμο σημείο. Προς τη φάση όπου το σύστημα έχει την υψηλότερη συμμετρία αυτή έχει την τιμή μηδέν ενώ προς το μέρος της φάσης με τη χαμηλότερη συμμετρία αυτή έχει τιμή διάφορη του μηδενός. Στα περισσότερα συστήματα η μέση τιμή κάποιου παρατηρήσιμου μεγέθους είναι η παράμετρος τάξης. Ένα παράδειγμα είναι το Z(2) Ising μοντέλο με δύο καταστάσεις (+,-), όπου τα spins έχουν τυχαίους προσανατολισμούς και η παράμετρος τάξης είναι η μέση μαγνήτιση. Θεωρώντας λοιπόν ένα πλέγμα το οποίο θερμαίνεται σε μια κρίσιμη τιμή της θερμοκρασίας T_c θα έχουμε μέση μαγνήτιση μηδέν. Όταν όμως είμαστε στο κρίσιμο σημείο ή στην κρίσιμη κατάσταση τότε αναπτύσσεται μια 'συνεννόηση' των spins δημιουργώντας ομάδες (clusters) που όσο και να μεγαθύνουμε σε οποιοδήποτε σημείο θα παρατηρούμε την ίδια εικόνα με την αρχική δηλαδή fractal γεωμετρία. Αυτή η εικόνα είναι οικουμενική των κρίσιμων φαινομένων καθώς όλα τα συστήματα στη φύση παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά στο κρίσιμο σημείο τους που οφείλεται στις συσχετίσεις μακράς εμβέλειας. Άρα λόγω αυτών των δομών κάνοντας την κατανομή αυτών, περιγράφουμε αυτήν την κατάσταση με την συνάρτηση συσχέτισης στη μονονυμική μορφή της:

$$G(x) = x^{-p} \quad (3)$$

Όπου παρατηρείται με μετασχηματισμούς κλίμακας $x \rightarrow \frac{x}{a}$ ότι υπάρχει αυτοομοιότητα.

$$G\left(\frac{x}{a}\right) = a^p G(x) \quad (4)$$

Η παραπάνω μορφή λέγεται νόμος δύναμης (powerlaw) και είναι ο χαρακτηριστικός τρόπος της μαθηματικής περιγραφής στο κρίσιμο σημείο πολλών μεγεθών καθώς και κατανομών. Έτσι γι' αυτό το λόγο δημιουργείται η ανάγκη κατάταξης των συστημάτων αυτών στη φύση σύμφωνα με τη κατηγορία παγκοσμιοτητας (universality class) ως προς την κρίσιμη συμπεριφορά τους. Η κατάταξη αυτή γίνεται με τους κρίσιμους εκθέτες. Οι εκθέτες αυτοί είναι εκθέτες νόμων δύναμης για ορισμένες θερμοδυναμικές ποσότητες

όπως η ειδική θερμότητα, παράμετρος τάξης, η επιδεκτικότητα, η συνάρτηση συσχέτισης καθώς έχει παρατηρηθεί ότι οι ποσότητες αυτές παρουσιάζουν στον εκθέτη ένα κανονικό (πεπερασμένο) μέρος και ανώμαλο (singular) κομμάτι που αποκλίνει με νόμο δύναμης (power law) πλησιάζοντας το κρίσιμο σημείο. Οι εκθέτες αυτοί είναι 6 και συνδέονται μεταξύ τους με 4 σχέσεις. Με λίγα λόγια αρκεί η γνώση των δύο για να τους υπολογίσουμε όλους. Ένα παράδειγμα που αναφέρουμε είναι η αλλαγή φάσης υγρού-αερίου όπου ανήκει στην ίδια κατηγορία με την αλλαγή φάσης σε έναν τρισδιάστατο μαγνήτη.

Στους κρίσιμους εκθέτες και ιδιαίτερα στα θερμικά συστήματα εισάγουμε την ποσότητα:

$$t = \frac{T-T_C}{T} \quad (5)$$

Στο όριο $t \rightarrow 0$ κάθε θερμοδυναμική ποσότητα αποσυντίθεται, όπως ήδη έχουμε αναφέρει σε δύο μέρη, ένα που παραμένει πεπερασμένο και ένα όπου αποκλίνει ή έχει αποκλίνουσες παραγώγους. Το ανώμαλο (singular) ακολουθεί νόμους δύναμης και δηλαδή fractal δομών. Επιπλέον εξαρτώνται από το t και είναι οι εξής:

- Heat Capacity: $C \sim |t|^{-a}$ (6)

- Order parameter: $M \sim |t|^\beta, \beta > 0$ (7)

- Susceptibility: $\chi \sim |t|^{-\gamma}, \gamma > 0$ (8)

- Ο τέταρτος εκθέτης ορίζεται πάνω στο κρίσιμο σημείο $t=0$:

$$M \sim H^{\frac{1}{\delta}} \quad (9)$$

όπου H το μαγνητικό πεδίο αλλά και γενικότερα το orderingfield δηλαδή το πεδίο της παραμέτρου τάξης του ίδιου του συστήματος. Απομένουν δύο ακόμα εκθέτες που ορίζονται μέσω της συνάρτησης συσχέτισης του Ornstein-Zernike:

$$C(r) = r^{-p} e^{\frac{r}{\xi}} \quad (10)$$

Όπου r η απόσταση μεταξύ των spins, τότε οι εκθέτες ν και η ορίζονται από το μήκος συσχέτισης (correlation length):

$$\xi \sim |t|^{-\nu} \quad (11)$$

και από τον εκθέτη νόμου δύναμης στο $t = 0$:

$$p = d - 2 + \eta \quad (12)$$

όπου d η διάσταση του χώρου του συστήματος. Μόνο δύο από τους 6 εκθέτες είναι ανεξάρτητοι καθότι μεταξύ των εκθετών υφίσταται οι παρακάτω 4 scaling νόμοι:

- Fisher: $\gamma = \nu(2 - \eta)$ (13)

- Rushbrooke: $\alpha + 2\beta + \gamma = 2$ (14)

- Widom : $\gamma = \beta(\delta - 1)$ (15)

- Joshephson : $vd = 2 - a$ (16)

Καταλαβαίνουμε ότι από την τρίτη σχέση επειδή $\beta > 0$, $\gamma > 0$ προκύπτει $\delta > 1$ μια ανισότητα όπως θα δούμε χρήσιμοι στα κρίσιμα φαινόμενα. Οι δύο ανεξάρτητοι εκθέτες προσδιορίζουν τη universality class του συστήματος αν και τις περισσότερες φορές αρκεί ο υπολογισμός μόνο ενός εκθέτη για να οδηγηθούμε σε κάποιο συμπέρασμα. Όπως βλέπουμε από τους ορισμούς των εκθετών αυτοί που είναι πέρα από τα θερμικά συστήματα είναι ο ισόθερμος κρίσιμος εκθέτης δ και ο εκθέτης της ανώμαλης διάστασης η . Επειδή ο η έχει πολύ μικρές τιμές και έτσι είναι δύσκολο να προσδιορισθεί πειραματικά εστιάζομαστε στο εκθέτη δ ως τον πιο κατάλληλο για να περιγράψει ποσοτικά τα κρίσιμα φαινόμενα πέρα από τα θερμικά. Αναφέρουμε ενδεικτικά τις τιμές του δ για κάποιες παγκόσμιες κλάσεις : Μέση θεωρία πεδίου $\delta = 3$, 2D-Ising $\delta = 15$, 3D-Ising $\delta = 5$.

Στη στατιστική μελέτη ενός συστήματος εφαρμόζουμε τον υπολογισμό της συνάρτησης επιμερισμού (partition function) του συστήματος. Αυτή η συνάρτηση προκύπτει από την κατανομή όλων των δυνατών καταστάσεων του συστήματος (configurations) και μαθηματικά ορίζεται ως:

$$Z(H, T) = \int Dm e^{\frac{-E[m, H]}{T}} \quad (17)$$

Όπου η ενέργεια E είναι το άθροισμα του κινητικού και του δυναμικού όρου δηλαδή $E=U+T$ όπου ο Landau μελέτησε την κρίσιμη κατάσταση χωρίς τον κινητικό όρο για εξωτερικό πεδίο $H=0$ ως ένα ανάπτυγμα:

$$U(m) = \frac{1}{2}r_0m^2 + \frac{1}{3}s_0m^3 + \frac{1}{4}u_0m^4 + \frac{1}{5}q_0m^5 + \frac{1}{6}c_0m^6 + \dots \quad (18)$$

Για να μπορεί να περιγράψει η ελεύθερη ενέργεια τη συμμετρική κατάσταση θα πρέπει να παραμείνει αναλλοίωτη κάτω από την αντιστροφή $m \leftrightarrow -m$. Επομένως κρατάμε μόνο τους όρους με άρτιες δυνάμεις. Έτσι ο Landau μελέτησε δύο αλλαγές φάσης και εισήγαγε

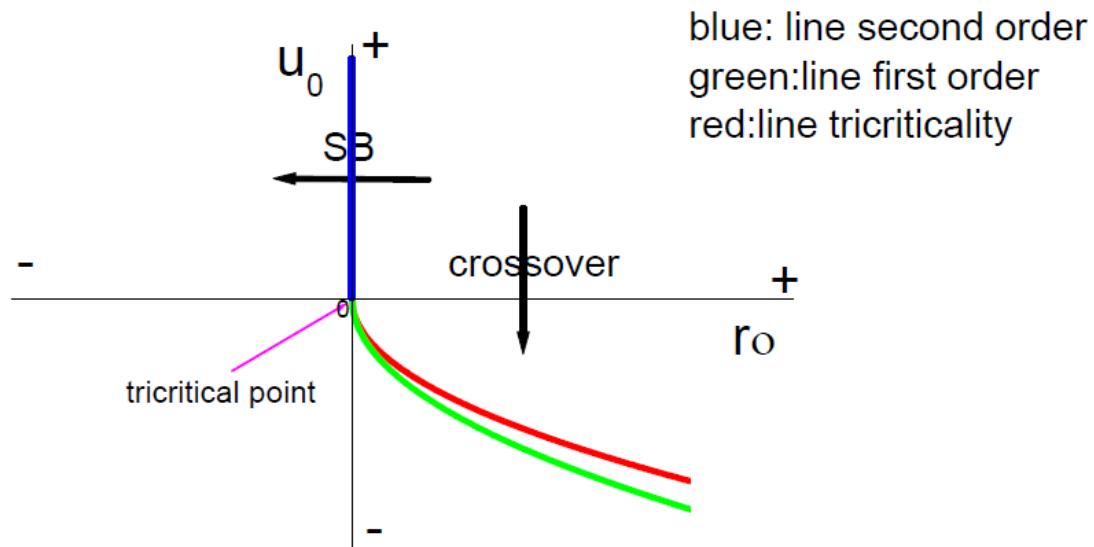
- Την ελεύθερη ενέργεια του μέσου πεδίου:

$$U_{MFT}(m) = \frac{1}{2}r_0m^2 + \frac{1}{4}u_0m^4 \quad (19)$$

- Την ελεύθερη ενέργεια της τρικρισιμότητας:

$$U_{tr}(m) = \frac{1}{2}r_0m^2 + \frac{1}{4}u_0m^4 + \frac{1}{6}c_0m^6 \quad (20)$$

Η παράμετρος r_0 , u_0 εξαρτώνται από την ανηγμένη θερμοκρασία t και η παράμετρος c_0 είναι πάντοτε θετική. Έτσι η περιγραφή της κρίσιμης κατάστασης και των αλλαγών φάσης γίνεται μέσω της ελεύθερης ενέργειας Landau όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.

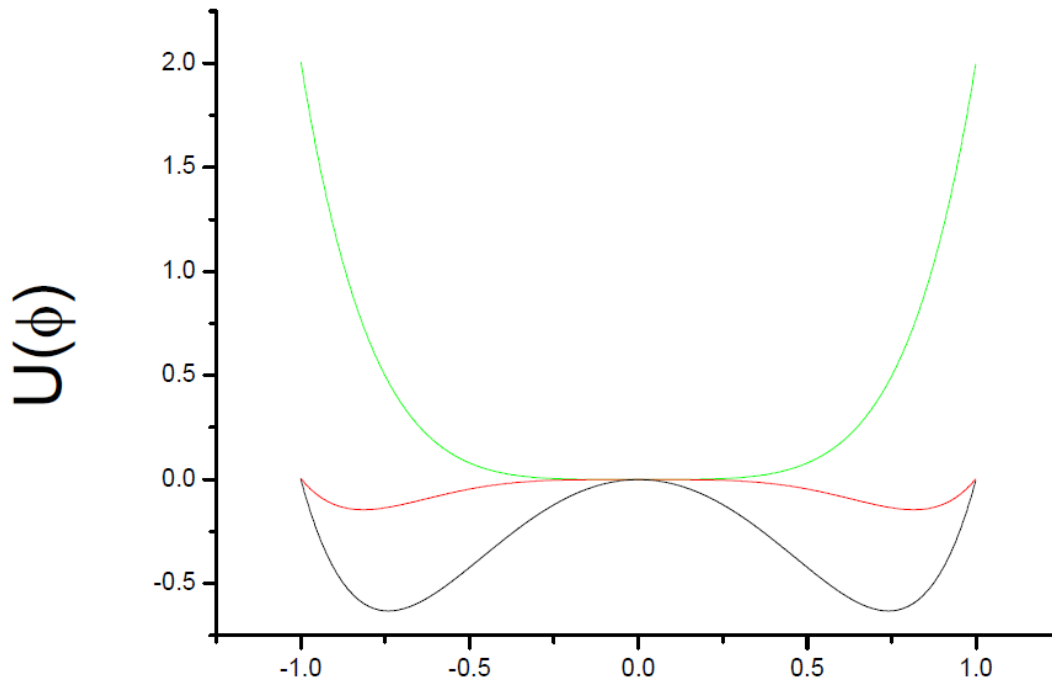


Σχήμα 2: Το φασικό διάγραμμα στο παραμετρικό χώρο

Στο πρώτο τεταρτημόριο παρατηρούμε την συμμετρική φάση δηλαδή με τους συντελεστές θετικούς περιγράφοντας την (19), (20). Διακρίνουμε δύο τρόπους με τους οποίους φεύγουμε από την συμμετρική φάση.

A) Αυθόρμητο σπάσιμο της συμμετρίας (SB).

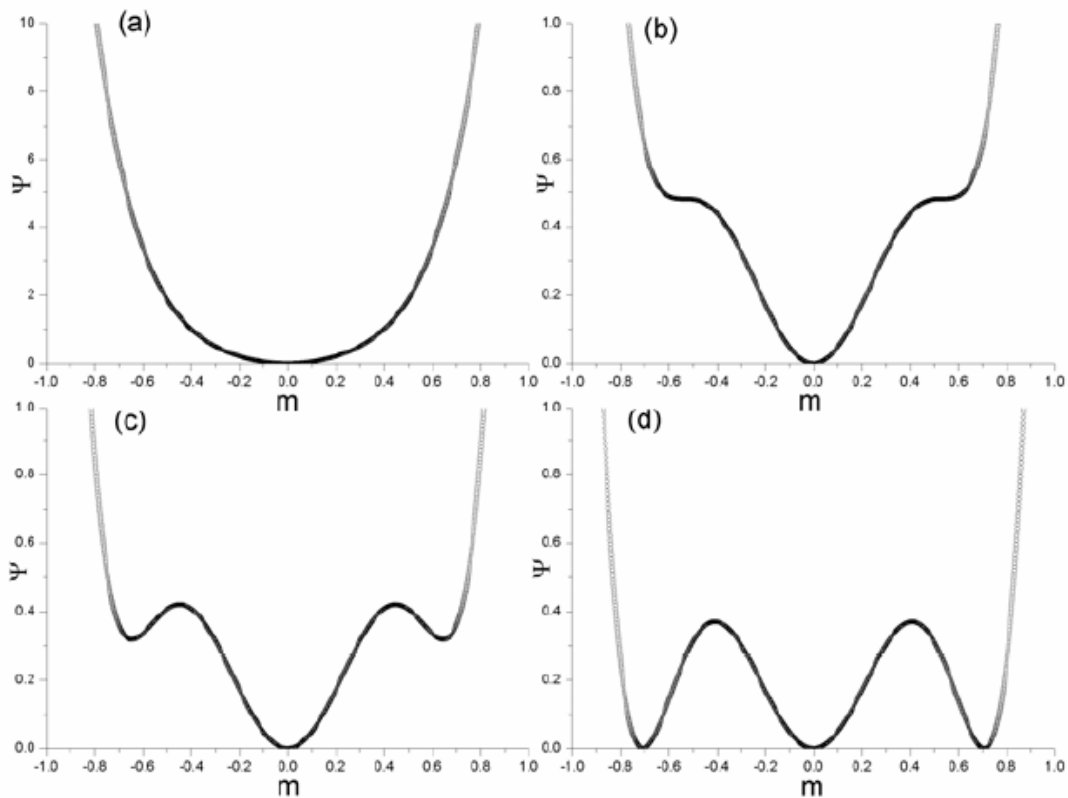
Ενώ είμαστε στη κρίσιμη κατάσταση με παράμετρο ελέγχου ($T=T_c$)-(πράσινη καμπύλη) φεύγουμε από αυτή και πηγαίνουμε με ($T < T_c$) σε ενδιάμεσες καταστάσεις διότι η συνάρτηση αλλάζει πρόσημο λόγω του r_0 (κόκκινη καμπύλη) όπου καταλήγει στη μαύρη καμπύλη όπου βλέπουμε. Τα ελάχιστα αντιστοιχούν στη παράμετρο τάξης του συστήματος καθώς έχει φύγει από την συμμετρική φάση που ήταν μηδέν και το σύστημα είναι μακριά από την κρίσιμη κατάσταση. Παρακάτω παρουσιάζεται το Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Η σπασμένη συμμετρία όπως παρατηρείται με την μαύρη καμπύλη το σύστημα έχει φύγει από την κρίσιμη κατάσταση και το σύστημα έχει αλλαγή φάσης δεύτερης τάξης.

B) Το τρικρίσιμο crossover

Στο Σχήμα 2 βλέπουμε το κατακόρυφο βελάκι, δηλαδή αλλαγή προσήμου στη παράμετρο u_0 στην εξίσωση (20), όπου το πέρασμα από τη συμμετρική φάση σε μια φάση σπασμένης συμμετρίας όπου όμως τώρα εμφανίζονται τρία πηγάδια δυναμικού και αντιστοιχούν σε έναν τριπλό εκφυλισμό. Ο τριπλός εκφυλισμός τώρα συνιστάται σε δύο συμμετρικά κενά (όπως και στο SB προηγουμένως) αλλά τώρα υπάρχει και το αρχικό κενό στη τιμή $\phi = 0$ που στο SB έχει καταργηθεί. Αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν κατά απόλυτη τιμή δύο διαφορετικές τιμές της παραμέτρου τάξης δηλαδή εμφανίζεται μια ασυνέχεια στη παράμετρο τάξης. Οι ασυνέχειες είναι το χαρακτηριστικό της πρώτης τάξης αλλαγής φάσης. Έτσι το τρικρίσιμο crossover είναι μια μετασταθή μετάβαση από τη δεύτερης σε πρώτης τάξης αλλαγή φάσης. Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται η συμμετρική φάση με δύο ενδιάμεσες καταστάσεις και στο τέλος τη τελική κατάσταση.



Σχήμα 4: Οι καταστάσεις καθώς φεύγουμε από την κρίσιμη κατάσταση προς την 1ης τάξης αλλαγή φάσης με την σειρά (a)→(d). Η ασυνέχεια των ελαχίστων είναι χαρακτηριστική της παραμέτρου τάξης.[35]

Έχει δειχθεί ότι [36] η δυναμική της παραμέτρου τάξης περιγράφεται την μιας διαστασης μη γραμμική απεικόνιση διαλειπτότητας

$$\Phi_{n+1} = \Phi_n + u \cdot \Phi_n^z + \varepsilon_n \quad (21)$$

1.3 Μέθοδος Κρίσιμων Διακυμάνσεων- ο αλγόριθμος

Η κατανομή των μηκών των ευσταθών περιοχών στο όριο που $\varepsilon = 0$ δίνεται όπως είδαμε στη σχέση 2, για την απεικόνιση διαλειπτότητας, από το νόμο δύναμης (power-law):

$$P(l) \sim l^{-\frac{z}{z-1}} \quad (22)$$

Για τα Θερμικά συστήματα ο εκθετής z συνδέεται με το ισοθερμο κρίσιμο εκθετή δ με τη σχέση [37]:

$$z = \delta + 1 \quad (23)$$

Όμως ο παγκόσμιος χαρακτήρας του κρίσιμου φαινόμενου δίνει νόημα σε ένα εκθέτη $\rho_l = 1 + \frac{1}{z-1}$ και πέρα από τη θερμική αλλαγή φάσης.

Για την ανάλυση χρονοσειρών (σε πραγματικό ή αλγοριθμικό χρόνο) ακολουθούμε την εξής διαδικασία:

- Αναζητούμε παράθυρο(α) που να επειδεικνύει(ουν) μια συσσωρευτική συμπεριφοράς στασιμότητας (cumulative stationarity). Αυτό αποτελεί προϋπόθεση εφαρμογής της μεθόδου καθότι η οργάνωση της κρίσιμης κατάστασης μιας δεύτερης τάξης αλλαγής φάσης γίνεται σε κατάσταση ισορροπίας ή σε κατάσταση stationary για δυναμικά συστήματα.

- Ορίζουμε τους χρόνους παραμονής l στη laminar περιοχή και προσδιορίζουμε τη κατανομή τους $P(l)$. Ως laminar περιοχή ορίζουμε τη περιοχή των τιμών της χρονοσειράς $[\phi_o, \phi_l]$ όπου ϕ_o το fixed point που ως τέτοιο εκλαμβάνεται το πλέον απότομο άκρο της κατανομής των τιμών της χρονοσειράς όπου είναι μετατοπισμένο το στατιστικό βάρος της κατανομής ή η αρχή της κατανομής σε περίπτωση που αυτή έχει συμμετρική μορφή, και ϕ_l το σημείο εξόδου που αντιμετωπίζεται ως μεταβλητή παράμετρος καθότι όπως φαίνεται και από το σχήμα 1 δεν είναι αυστηρά καθορισμένο που η τροχιά εγκαταλείπει τη laminar περιοχή.

Τότε, ο προσδιορισμός των laminar χρόνων γίνεται μετρώντας τον αριθμό των διαδοχικών τιμών της χρονοσειράς για τις οποίες ισχύει $\phi_o \leq \phi \leq \phi_l$. Η κατανομή αυτών των χρόνων δίνει την $P(l)$.

- Τον προσδιορισμό του εκθέτη p_l θα πετύχουμε μέσα από τη κατανομή των laminar χρόνων. Στο διάγραμμα κατανομής $P(l)-l$ χρησιμοποιούμε ως fitting function την συνάρτηση:

$$P(l) \sim l^{-p_2} e^{-p_3 l} \quad (24)$$

Στη συνάρτηση αυτή ανταγωνίζονται δύο παράγοντες, ο νόμος δύναμης με εκθέτη τον p_2 και ο εκθετικός παράγοντας με εκθέτη τον p_3 . Ο εκθέτης p_3 είναι ένα μέτρο της απομάκρυνσης από τη κρίσιμη κατάσταση. Πράγματι για $p_3 = 0$ έχουμε $p_2 = p_l$ όποτε είμαστε ακριβώς πάνω στο κρίσιμο σημείο όπου κυριαρχεί ο νόμος δύναμης (εξ. 22). Όσο το p_3 αυξάνει ενισχύεται ο εκθετικός decay παράγοντας και αυτό σημαίνει ενίσχυση της τυχειότητας και απομάκρυνση από τη κρίσιμη κατάσταση. Οι δύο εκθέτες έχουν μια σχέση ανταγωνιστική, δηλαδή όταν ο ένας αυξάνει ο άλλος ελαττώνεται.

Στη πράξη θεωρούμε ότι βρισκόμαστε στη κρίσιμη κατάσταση όταν ισχύουν οι προϋποθέσεις (συνθήκη κρισιμότητας):

$$p_2 > 1 \quad \text{και} \quad p_3 \approx 0$$

Όπως έχουμε αναφέρει το τέλος της laminar περιοχής δεν είναι σαφές και για αυτό το αντιμετωπίζουμε ως μεταβλητή παράμετρο.

Για να προσδιορίσουμε τη χαρακτηριστική τιμή του εκθέτη $p_1(p_2)$ από όπου έχουμε μια πληροφορία για κλάση παγκοσμιότητας του φαινομένου που έδωσε τη μελετούμενη χρονοσειρά θα πρέπει να υπολογίσουμε αρκετές τιμές του εκθέτη p_2 για τα διάφορα σημεία εξόδου ϕ_i . Στην ιδανική περίπτωση θα πρέπει όλες οι τιμές αυτές να είναι ίδιες το οποίο σημαίνει ότι όλες οι τροχιές των διαδοχικών σημείων της χρονοσειράς μεταφέρουν την ίδια πληροφορία για το δυναμικό όρο της απεικόνισης. Στη πραγματικότητα όμως λόγω της στοχαστικής φύσης του θορύβου που εδώ εκφράζεται από το όρο μετατόπισης ε_n οι τιμές αυτές είναι διαφορετικές. Τότε για το προσδιορισμό του p_1 έχουμε (α) αν οι τιμές είναι αρκετά κοντά ως p_1 θεωρούμε το μέσο όρο και (β) αν οι τιμές διαφέρουν πολύ τότε ως p_1 θεωρούμε τη μεγαλύτερη τιμή του p_2 καθότι αυτή αντιστοιχεί στη μικρότερη τιμή του p_3 και άρα η κατανομή είναι πιο κοντά στο νόμο δύναμης. Ως σημεία εξόδου δεν παίρνουμε τα άκρα της κατανομής των τιμών της χρονοσειράς για να αποφύγουμε τα λεγόμενα end effects.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μέθοδος Νυχτερινών Διακυμάνσεων – Night-time Fluctuation Method

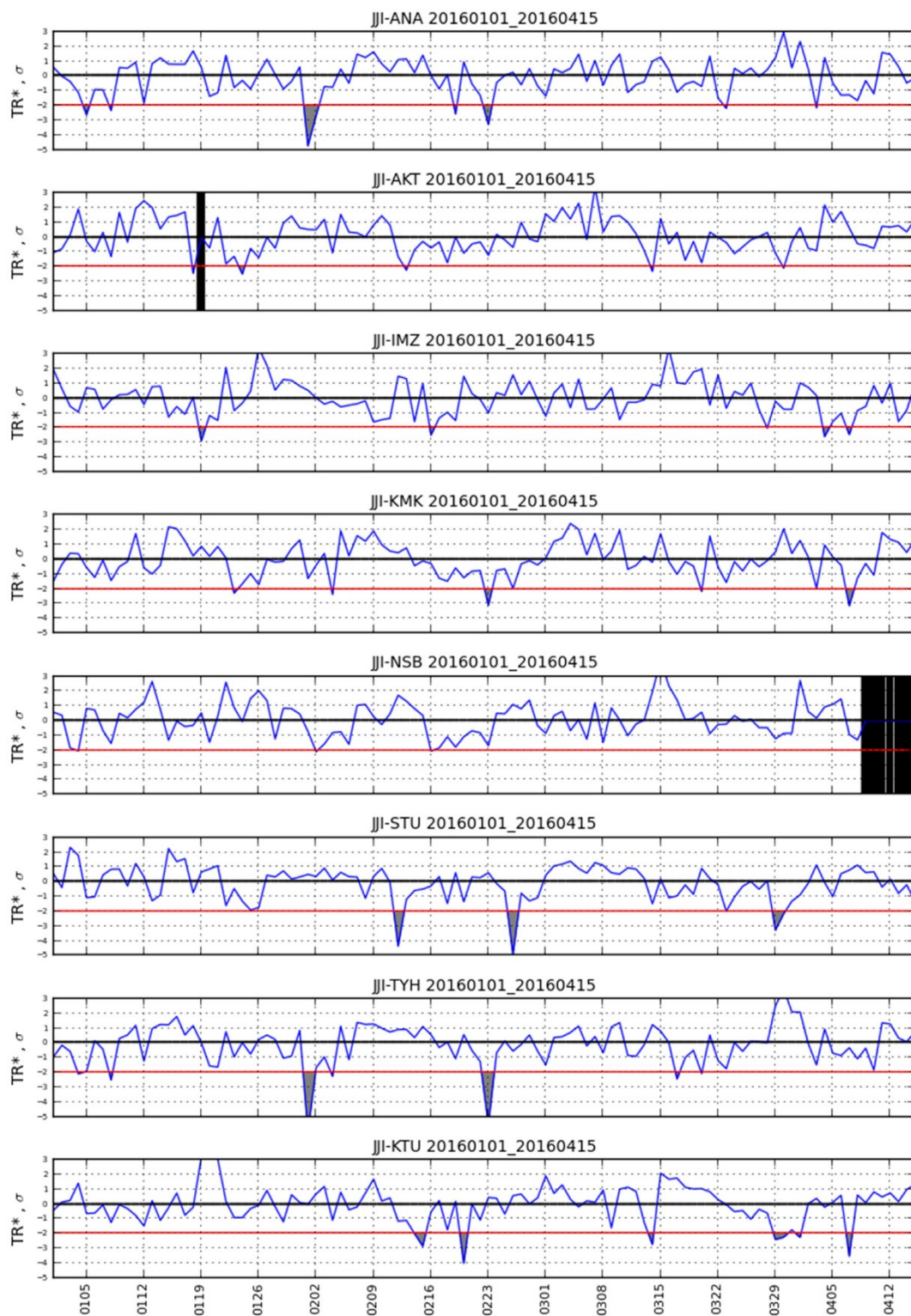
Η μέθοδος αυτή μια στατιστική μέθοδος, έχει προταθεί για την μελέτη των σημάτων VLF/LF και η υλοποίησή της φαίνεται κατ' αρχήν απλή αλλά παρουσιάζει ιδιαιτερότητες [11]. Αρχικά γνωρίζοντας την χρονοσειρά του λογαριθμικού πλάτους (σε dB) σήματος που λαμβάνει ο δέκτης $A(t)$ για κάθε δευτερόλεπτο, υπολογίζεται η μέση τιμή $\langle A(t) \rangle$ δεκαπέντε μέρες πριν και δεκαπέντε μέρες μετά από κάθε συγκεκριμένη μέρα (προσθέτοντας και την συγκεκριμένη μέρα στη μέση τιμή). Μετά υπολογίζεται η διαφορά $dA(t) = A(t) - \langle A(t) \rangle$ και προκύπτει μια νέα χρονοσειρά. Στη συνέχεια ξεχωρίζεται το νυχτερινό διάστημα της νέας χρονοσειράς από το ημερήσιο που καθορίζεται ανάλογα με την εποχή, χρησιμοποιώντας την τοπική ώρα. Συγκεκριμένα (για την Ιαπωνία) επιλέγουμε: 10:00–20:00 UT για 22/11–21/02, 11:00– 19:00 UT για 22/02–21/05, 11:30–17:30 UT για 22/05–21/09, 10:30–19:00 UT για 22/09– 21/11, υπολογίζοντας με αυτό τον τρόπο τρεις ποσότητες «trend-TR», «dispersion-DP», «night-time fluctuation –NF » που αντιστοιχούν σε 1 τιμή/ανά ημέρα [29]. Οι παράμετροι αυτές υπολογίζονται όπως παρακάτω, όπου (N_e, N_s) το χρονικό διάστημα αρχή και τέλος της νυχτερινής περιόδου. Το trend πρακτικά αντιστοιχεί στη μέση τιμή του $dA(t)$ και το dispersion στην τυπική απόκλισή του, ενώ το night-time fluctuation στην ισχύ.

$$TR = \frac{\sum_{N_s}^{N_e} dA(t)}{N_e - N_s} \quad (25)$$

$$DP = \sqrt{\frac{1}{N_e - N_s} \sum_{N_s}^{N_e} (dA(t) - TR)^2} \quad (26)$$

$$NF = \sum_{N_s}^{N_e} (dA(t))^2 \quad (27)$$

Επιπλέον δεδομένου ότι, όπως έχει αποδειχθεί από σχετικές έρευνες [27,28], σημαντικές για σεισμογενή φαινόμενα είναι οι τιμές $dA(t) < 0$ και χρησιμοποιούνται μόνο αυτές για να υπολογίζουμε την NF. Επίσης, έχει παρατηρηθεί ότι μείωση του trend συνιστά ταυτόχρονη αύξηση DP και NF. Επιπλέον, λόγω των πολλών paths που μελετώνται, οι τιμές των TR, DP, NF κανονικοποιούνται ώστε να μπορεί να υπάρχει σύγκριση μεταξύ τους, ως εξής: $X^* = (X - \langle X \rangle_{\pm 15}) / \sigma_{\pm 15}$, όπου $\langle X \rangle_{\pm 15}$, $\sigma_{\pm 15}$ η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση αντίστοιχα των δεκαπέντε ημερών πριν και μετά την ημέρα που μελετάται. Το Σχήμα 4 φαίνεται ως παράδειγμα η περίοδος από 01/01/2016 έως 15/04/2016 στους σεισμούς του Kumamoto 2016 των τιμών του TR^* για τους 8 σταθμούς του ιαπωνικού δικτύου που παρουσιάστηκε σε προηγούμενη έρευνα [29].



Σχήμα 5: Οι 8 δέκτες-σταθμοί οι οποίοι παρατηρήθηκαν για την υπολογισμένη ποσότητα Trend (TR^*) για το χρονικό διάστημα από 01/01/2016 έως 15/04/2016. Από τα αποτελέσματα φαίνονται αποκλίσεις οι οποίες ξεπερνούν τα -2σ (κόκκινη οριζόντια γραμμή). Τα «γεμάτα» μπλε αφορούν κάτω από -2σ . Επιπλέον οι μαύρες περιοχές αποτελούν ελλιπή δεδομένα. Ο άξονας (x-) αναφέρεται σε ημερομηνίες (UT). [29]

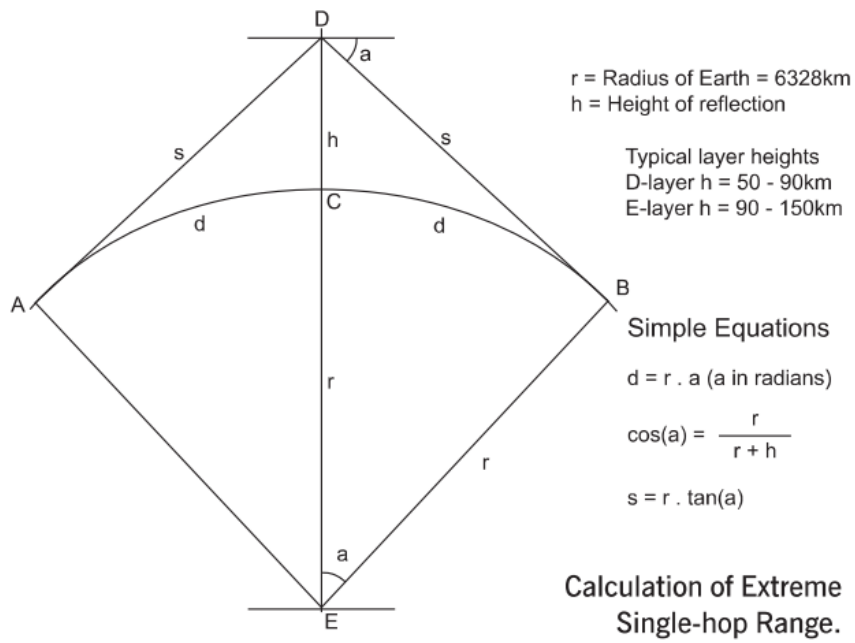
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Σήματα-Δίκτυα VLF/LF & Μηχανισμοί επηρεασμού της Ιονόσφαιρας - Σύζευξη Λιθόσφαιρας-Ατμόσφαιρας - Ιονόσφαιρας (LAI)

3.1 Σήματα-Δίκτυα VLF/LF

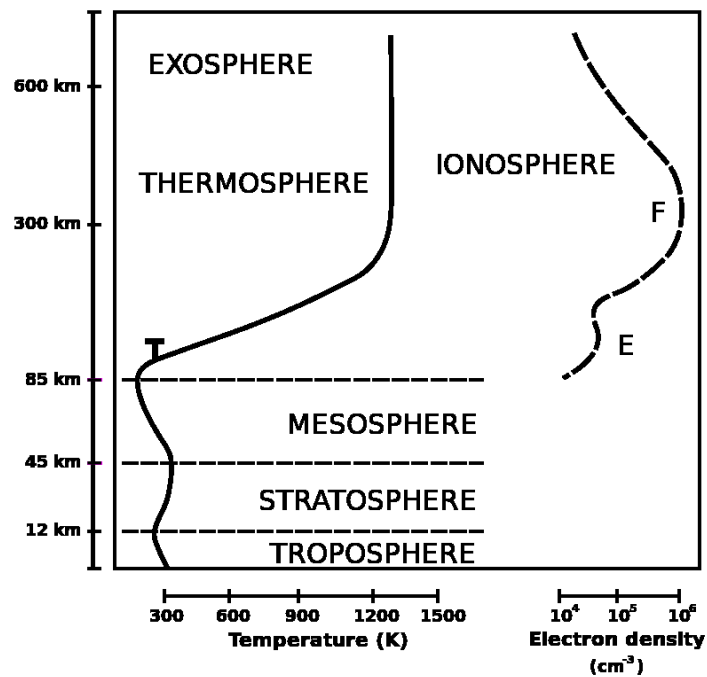
Η διάδοση των VLF/LF ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων αποτελεί κύριο εργαλείο εντοπισμού σειсмо-ιονοσφαιρικών διαταραχών (υπογραφών) και έχουν προκύψει αρκετές ερευνητικές εργασίες πάνω σε αυτό π.χ. [6,11,40]. Συγκεκριμένα τα VLF (very low frequencies, πολύ χαμηλές συχνότητες) κυμαίνονται στην περιοχή 3 – 30 kHz και τα LF (low frequencies, χαμηλές συχνότητες) κυμαίνονται στην περιοχή 30 -300 kHz. Οι πομποί διακρίνονται για την πολύ μεγάλη σε μήκος κεραία. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενες κατακόρυφες κεραίες είναι δυστυχώς κακής απόδοσης (εκπέμπουν συνήθως από 10% έως το πολύ 50% της ισχύος του πομπού) λόγω του ότι αντιστοιχούν σε πολύ μικρό κλάσμα του μήκους κύματος, μιας και μια κλασική κατακόρυφο $\lambda/4$ κεραία είναι ανέφικτο να υλοποιηθεί (στα 30 kHz θα είχε μήκος 2.5 km). Η διάδοση αυτών των κυμάτων γίνεται με 2 τρόπους: (α) τα κύματα εδάφους (ground waves) που διαδίδονται έως και 2000 km ακολουθώντας το ανάγλυφο του εδάφους και (β) τα κύματα ουρανού (skywaves) που διαδίδονται με διαδοχικές ανακλάσεις μεταξύ του εδάφους και του κατώτερου μέρους της ιονόσφαιρας. Κάθε μία ανάκλαση χαρακτηρίζεται ως μία one hop διαδικασία, όπου υπολογίζεται ή απόσταση του πομπού ή δέκτη και του κατώτατου μέρους της ιονόσφαιρας όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.

Η διάδοση των skywaves ακολουθεί μια προβλέψιμη ημερήσια περιοδικότητα:

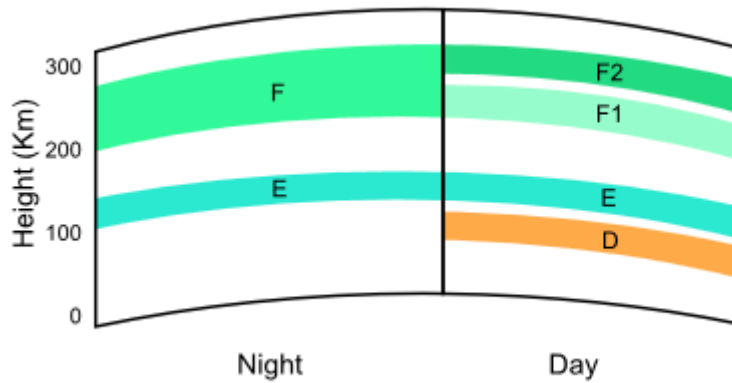
Κατά τη διάρκεια της ημέρας το στρώμα D είναι μερικώς ιονισμένο, ενώ τη νύχτα (όταν ο Ήλιος δε φωτίζει το στρώμα D) δεν είναι ιονισμένο (πρακτικά εξαφανίζεται), ενώ ο ιονισμός του στρώματος E κατά τη διάρκεια της νύχτας μειώνεται σε μικρό βαθμό. Έτσι, συνήθως το «επίπεδο ανάκλασης» κατά την ημέρα βρίσκεται στα χαμηλότερα επίπεδα του στρώματος D σε υψόμετρο ~ 50 km από το έδαφος, ενώ τη νύχτα το επίπεδο ανάκλασης βρίσκεται στο ανώτερο στρώμα D κοντά στο κάτω μέρος του E-στρώματος σε υψόμετρο ~ 100 km (Σχήμα 7,8). Αποτέλεσμα αυτής της ημερήσιας μεταβολής της σύστασης της ιονόσφαιρας είναι την ημέρα τα skywaves να διαδίδονται διαμέσου του μερικώς ιονισμένου στρώματος D, αλληλεπιδρούν με αυτό, και έτσι να χάνουν μέρος της ισχύος τους κατά τη διαδρομή τους. Για το λόγο αυτό κατά τη διάρκεια της νύχτας η λαμβανόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτή που λαμβάνεται κατά τη διάρκεια της ημέρας [41]. Προφανώς η μεταβολή αυτή επηρεάζεται από τις θέσεις πομπού και δέκτη, καθώς και από τη θέση του Ήλιου σε σχέση με τη συγκεκριμένη περιοχή της Γης ανά θέση, ώρα, εποχή και έτος (τοπική ώρα, γεωγραφικό πλάτος, εποχή και ηλιακό κύκλο). Στο Σχήμα 9 παρουσιάζεται από το Ιαπωνικό δίκτυο VLF/LF το θεωρητικό διάγραμμα μεταβολής της λαμβανόμενης ισχύος σε σχέση με την απόσταση που είναι τοποθετημένοι οι δέκτες σταθμοί.



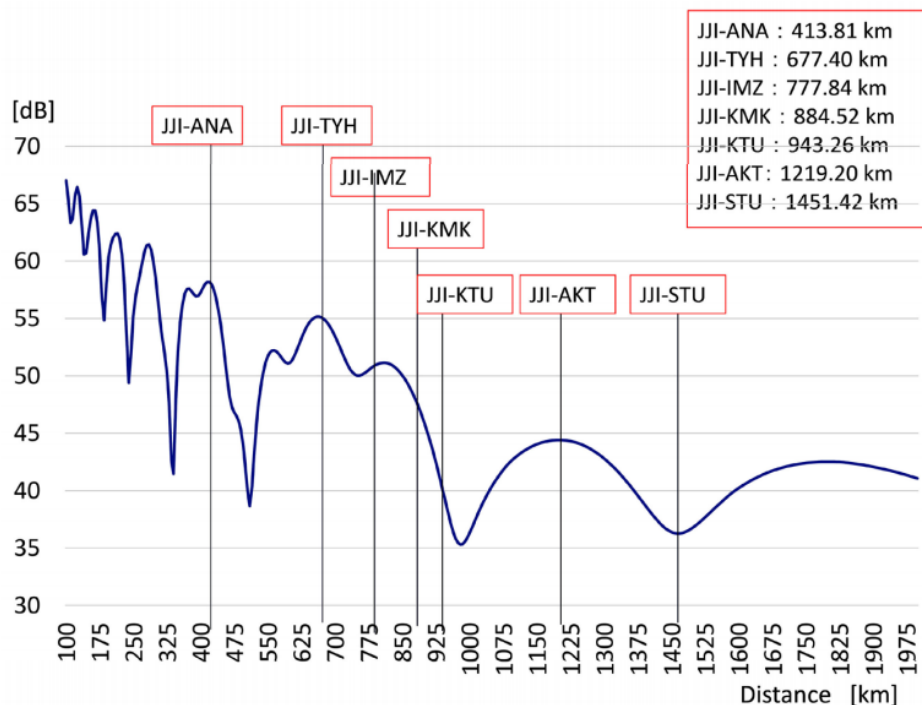
Σχήμα 6: Σχηματικό αναπαράστασης Onehop διάδοσης.[42]



Σχήμα 7: Τα επίπεδα της γης πάνω από την λιθόσφαιρα, καθώς και το υψόμετρο τους. Τα στρώματα E και F στην περιοχή της ιονόσφαιρας σε σχέση με το ηλεκτρικό φορτίο.[41]



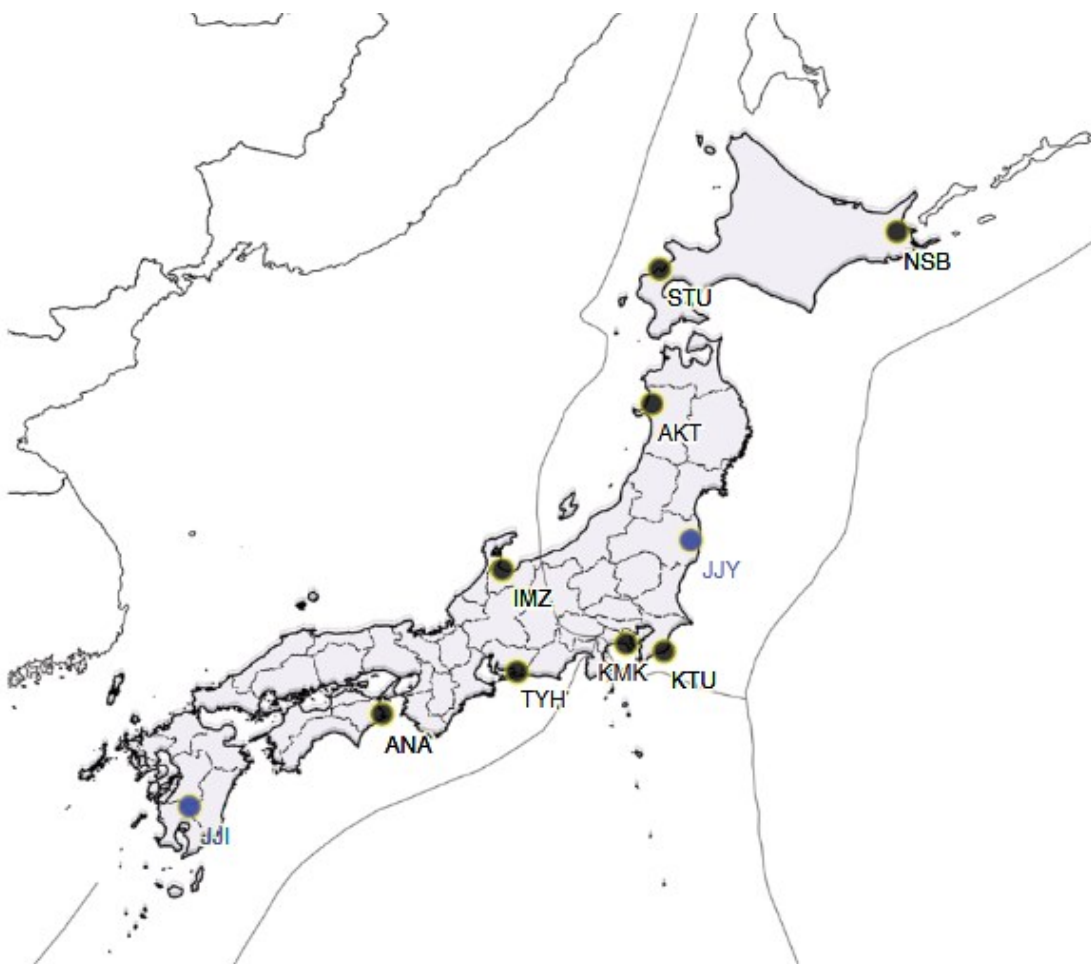
Σχήμα 8: Η κατάσταση των στρωμάτων την ημέρα και την νύχτα. Τα D και E ξεχωρίζουν λόγω του ιονισμού του D, την ημέρα. [41]



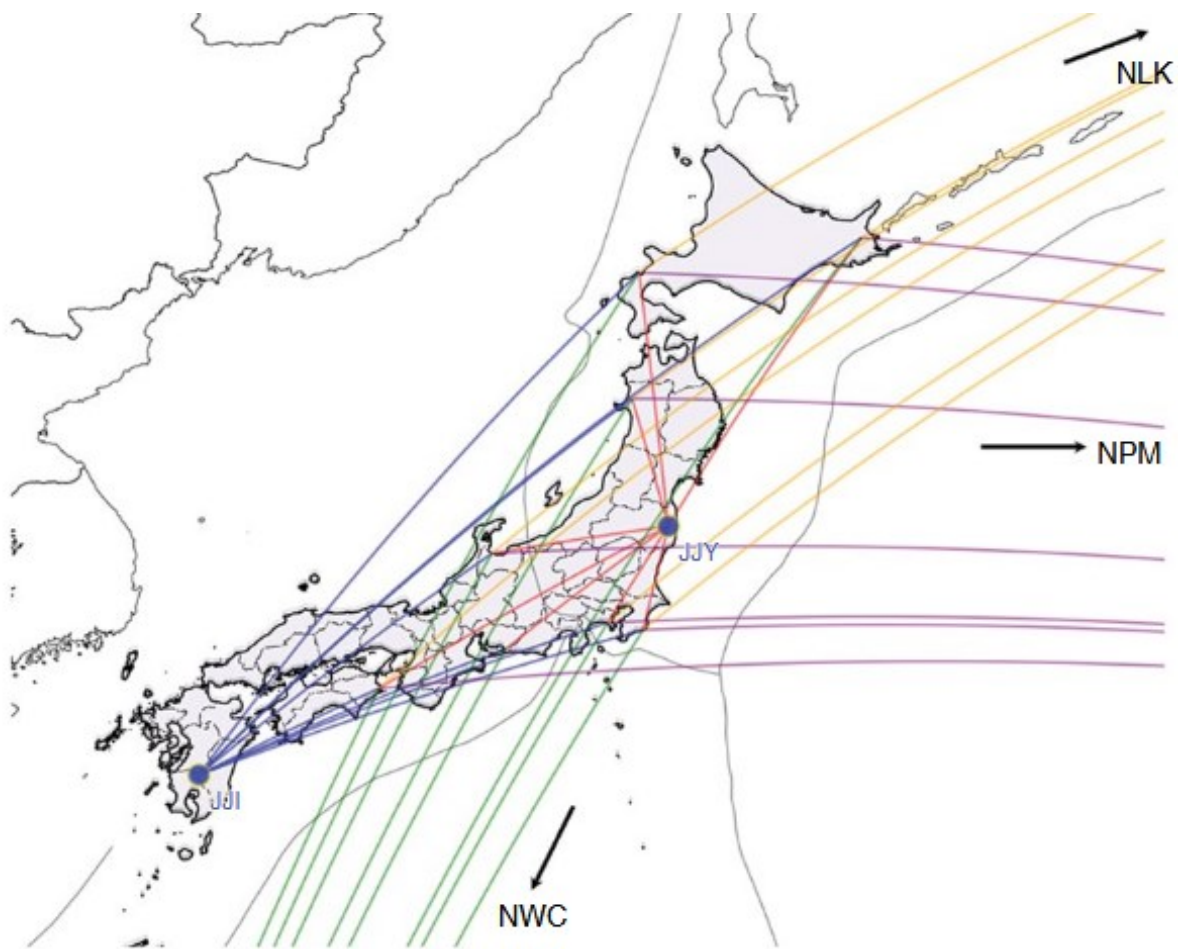
Σχήμα 9: Θεωρητικό διάγραμμα μεταβολής της λαμβανόμενης ισχύος (dB) από τον πομπό JJI (22.2 kHz, Μιγιαζάκι) σε σχέση με την απόσταση. Οι δέκτες είναι τοποθετημένοι στις αποστάσεις που εμφανίζονται. [40]

Επηρεασμός του ιονισμού του πλάσματος της ιονόσφαιρας από οποιαδήποτε αιτία έχει σαν αποτέλεσμα αλλαγές στο πλάτος και στη φάση των σημάτων VLF/LF που λαμβάνουν οι δέκτες. Αυτές οι διαταραχές (ανωμαλίες) μπορούν να συμβαίνουν για διάφορους λόγους στα σήματα των VLF/LF όπως π.χ. λόγω ηλιακών εκλάμψεων, μαγνητικών καταιγίδων, κεραυνών και εκρήξεων ηφαιστειών [6]. Σε αυτές τις αιτίες δημιουργίας ανωμαλιών έχει προστεθεί και η προσεισμική δραστηριότητα. Η συζήτηση αυτή ξεκίνησε από το σεισμό του Kobe το 1995 (17 Ιανουαρίου 1995, Long: 34:59 N|135:07

Ε, $M = 6.9$) στην Ιαπωνία [8] από τον καθ. Masashi Hayakawa αναδεικνύοντας ως πιθανή αιτία επηρεασμού των VLF/LF τις διαδικασίες προετοιμασίας ισχυρών σεισμών. Μετά από αυτό η κυβέρνηση της Ιαπωνίας αποφάσισε [43,44] την ίδρυση ενός project που θα περιλαμβάνει και τα VLF/LF σε σχέση με τους σεισμούς με το όνομα NASDA (National Space Development Agency of Japan) με επικεφαλής το Masashi Hayakawa, στοχεύοντας σε μικρή χρονική διάρκεια πρόβλεψης. Στο Σχήμα 10 παρουσιάζεται το Ιαπωνικό δίκτυο σύμφωνα με το τελευταίο review paper του Hayakawa το 2018 με τους πομπούς. Εκτός από τους δέκτες που αποτελούν το δίκτυο, φαίνονται και δυο από τους πομπούς επί Ιαπωνικού εδάφους JJI (22.2 kHz, Μιγιαζάκι) και JJY (40 kHz, Φουκουσίμα) που αυτοί παρακολουθούν, ενώ οι εκτός Ιαπωνίας σταθμοί NWC (19.8 kHz, Αυστραλία), NPM (21.4 kHz, Χαβάη), και NLK (24.8 kHz, Τζιμ Γκρικ, ΗΠΑ) να μην περιλαμβάνονται σε αυτό τον χάρτη αλλά να υποδεικνύονται στο Σχήμα 11. Οι δέκτες λειτουργούν αντίστοιχα με κωδικοποιήσεις ASK (AmplitudeShiftKeying) και MSK (MinimumshiftKeying).

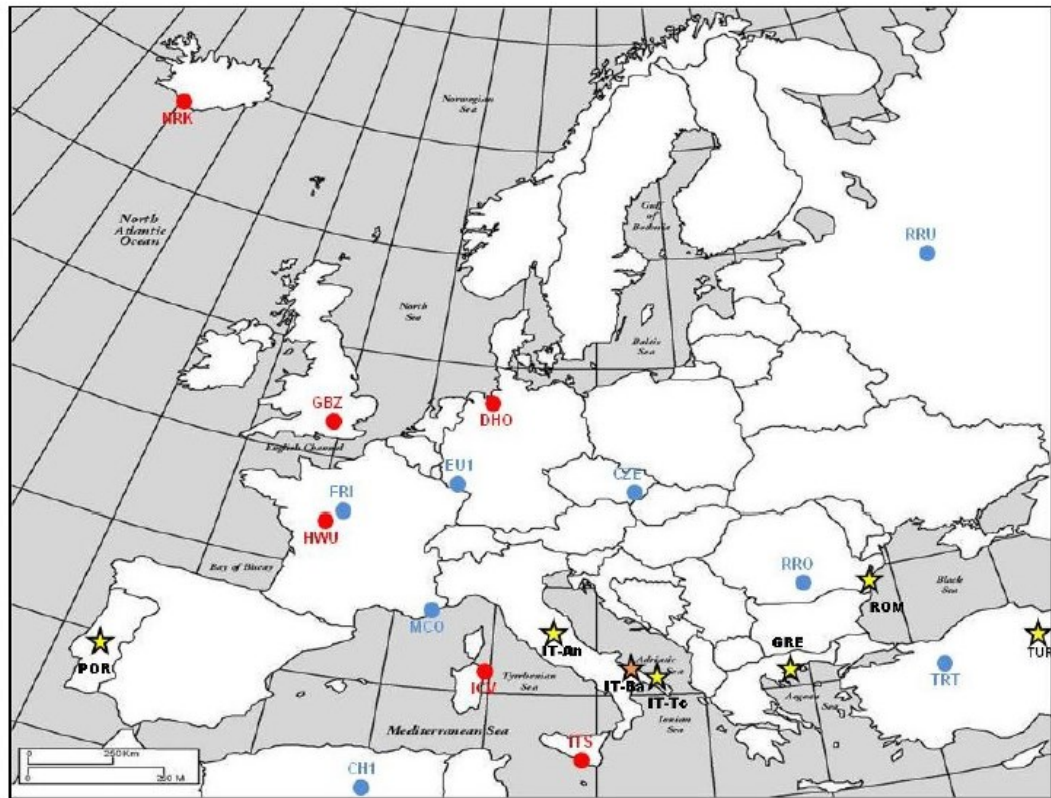


Σχήμα 10: Το Ιαπωνικό δίκτυο όπου διακρίνονται οι δύο πομποί : JJY (40 kHz, Φουκουσίμα) σε ASK και JJI (22.2 kHz, Μιγιαζάκι) [6].



Σχήμα 11: Οι πομποί NWC (19.8 kHz, Αυστραλία), NPM (21.4 kHz, Χαβάη), και NLK (24.8 kHz, Τζιμ Γκρικ, ΗΠΑ), όλοι σε διαμόρφωση MSK[6].

Στο Σχήμα 12 παρουσιάζουμε τους δέκτες (και τους αντίστοιχους πομπούς που αυτοί παρακολουθούν) του ευρωπαϊκού δικτύου INFREP (International Network for Frontier Research for Earthquake Precursors). Τα δεδομένα συλλέγονται από το πανεπιστήμιο του Μπάρι στην Ιταλία. Οι παρακολουθούμενοι πομποί φαίνονται στον πίνακα 1 [45]. Διακρίνονται επτά δέκτες από τους οποίους, ο ένας στο Μπάρι της Ιταλίας είναι τύπου Omnipal (ιαπωνικός δέκτης μόνο VLF) χρησιμοποιώντας ένα GSM modem, μια ψηφιακή κάρτα επεξεργασίας ήχου και μια GPS κεραία καθώς και την κεραία VLF [46]. Τα δεδομένα δειματοληπτούνται με περίοδο δειγματοληψίας των 20 δευτερολέπτων καταγράφοντας το πλάτος και την φάση των σημάτων VLF σε παράλληλη λήψη 5-8 καναλιών το λιγότερο [45]. Στη συνέχεια δημιουργήθηκαν οι σταθμοί δεκτών τύπου Elettronica στο Palodel Colle, Bari, στην Ιταλία όπου επεκτάθηκαν στη Μεσόγειο και χρησιμοποιούν δύο κεραίες VLF και LF μήκους 1,5 m (LF) και 2,0 m (VLF) [46]. Τα δεδομένα που συλλέγονται δειματοληπτούνται με περίοδο δειγματοληψίας του 1 λεπτού καταγράφοντας το πλάτος σε παράλληλη λήψη 10 καναλιών [45].



Σχήμα 12: Παρατηρούμε τον ευρωπαϊκό χάρτη με τους πομπούς όπου με μπλε είναι οι πομποί των LF και με κόκκινο οι πομποί των VLF. Με πορτοκαλί αστέρι είναι ο δέκτης τύπου OmniPal ενώ με κίτρινο οι έξι δέκτες τύπου Elettronika που εγκαταστάθηκαν μετά.[45]

Label	Country	Power (kW)	Frequency (kHz)
VLF transmitters			
GBZ	United Kingdom		19.58
ICV	Sardinia, Italy		20.27
HWU	France		21.75
DHO	Germany		23.40
NRK	Iceland		37.50
ITS	Sicily, Italy		45.90
LF transmitters			
RRO	Romania	1200	153
FRI	France	2000	162
TRT	Turkey	1200	180
EU1	Germany	2000	183
CH1	Algeria	2000	198
MCO	France	1200	216
RRU	Russia	2500	261
CZE	Czech Republic	500	270

Πίνακας 1: Οι συχνότητες και τα Callsigns των πομπών VLF/LF στον Ευρωπαϊκό χάρτη.[45]

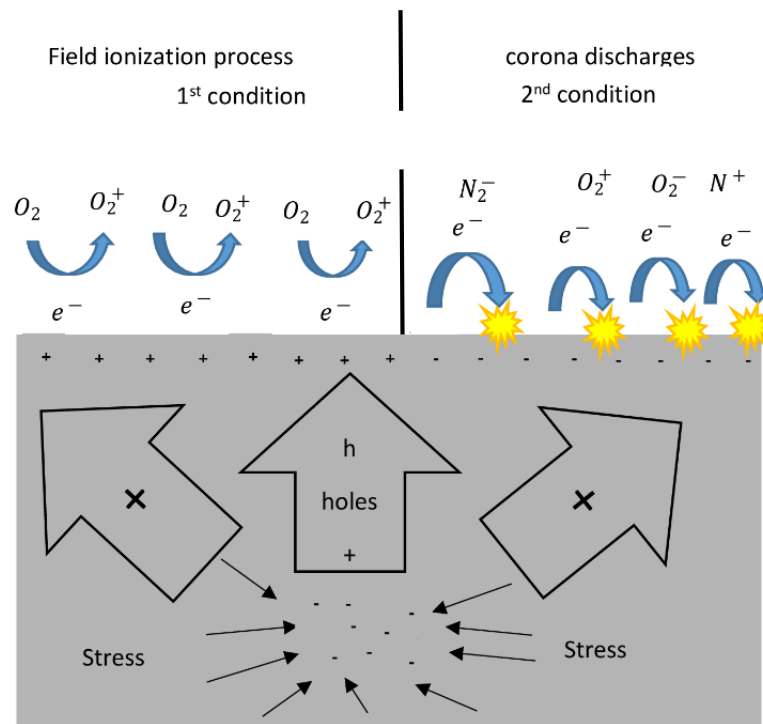
3.1 Μηχανισμοί επηρεασμού της Ιονόσφαιρας – Σύζευξη LAI

Έχουν γίνει πολλές έρευνες γύρω από αυτό το ζήτημα σχετικά με το πώς το σύστημα λιθόσφαιρα-ατμόσφαιρα-ιονόσφαιρα συνδέεται με την προσεισμική δραστηριότητα. Η λεγόμενη λιθοσφαιρική-ατμοσφαιρική-ιονοσφαιρική σύζευξη (Lithosphere-Atmosphere-Ionosphere coupling. LAI coupling) είναι ζήτημα σημαντικού επιστημονικού ενδιαφέροντος τα τελευταία χρόνια, καθώς, λόγω της πολυπλοκότητας των διαδικασιών που εμπλέκονται, αλλά και της αδυναμίας να παρατηρηθούν οι διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στη λιθόσφαιρα, είναι δύσκολο να κατανοηθεί [6]. Ωστόσο έχουν διατυπωθεί τέσσερις πιθανές προτάσεις [43] που επηρεάζουν το χημικό κανάλι (chemical channel) (ραδόνιο), τα βαρυτικά κύματα (Atmospheric Gravity Waves. AGW)-(acoustic channel)-(ακουστικό κανάλι), το ηλεκτρομαγνητικό κανάλι (electromagnetic channel) και το ηλεκτροστατικό κανάλι [6,47]. Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται η σύζευξη (λιθόσφαιρας-ατμόσφαιρας-ιονόσφαιρας) με τα κανάλια, δεν συμπεριλαμβάνεται το ηλεκτροστατικό κανάλι.

Βέβαια, κανένας μηχανισμός δεν έχει ακόμα αναγνωριστεί επίσημα είτε πειραματικά είτε θεωρητικά. Πολλές όμως θεωρητικές προσομοιώσεις του LAI βρίσκονται σε εξέλιξη [48]. Ωστόσο η έννοια των βαρυτικών κυμάτων (AGW) είναι μια πιθανή αιτία. Ενδεικτικά, μετρήσεις από δορυφόρους στην συνολική συγκέντρωση ηλεκτρικού φορτίου (Total Electron Content) στο ιονοσφαιρικό πλάσμα σχετικά με το ηλεκτρικό πεδίο, έδειξαν [49] την συσχέτιση με θεωρητικές προσομοιώσεις των βαρυτικών κυμάτων.

3.1.1 Θετικά αερομεταφερόμενα ιόντα [6,47,50,51]

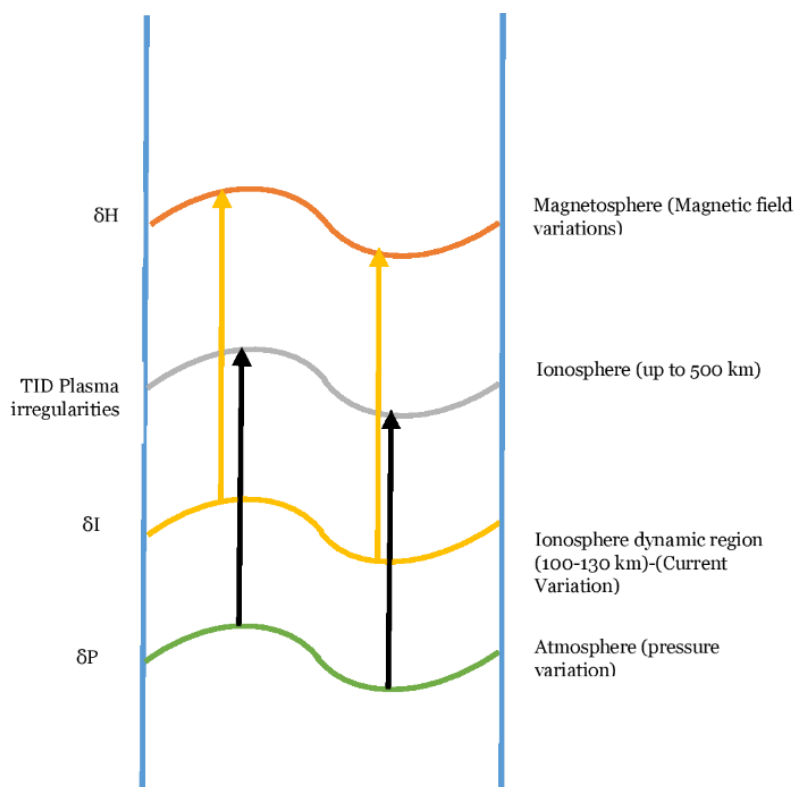
Για το ηλεκτροστατικό κανάλι ένας μηχανισμός ο οποίος έχει προταθεί, βασίζεται στο σπάσιμο των δεσμών των υπεροξειδίων στα μόρια των πετρωμάτων λόγω κάποιας συμπίεσης στο εσωτερικό του φλοιού της γης πριν από έναν σεισμό. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να φορτίζεται η επιφάνεια του εδάφους θετικά λόγω του σπασίματος των δεσμών με την απελευθέρωση ηλεκτρονίων και οπών. Τα ηλεκτρόνια συγκεντρώνονται σε μια περιοχή όπου συμβαίνει η συμπίεση ενώ οι οπές κινούνται κατά μήκος του βράχου φορτίζοντας θετικά και την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τον ιονισμό του αέρα σε αιωρούμενα θετικά ιόντα αποδίδοντας ηλεκτρόνια προς την επιφάνεια του εδάφους, φορτίζοντας την σταδιακά αρνητικά. Έχοντας φορτιστεί αρνητικά η επιφάνεια λόγω της προηγούμενης κατάστασης, είναι δυνατόν αν ξεπεράσει ένα κατώφλι δυναμικού να επιταχύνει ηλεκτρόνια σε ενέργειες ικανές να ιονίσουν, με κρούση, τα ουδέτερα μόρια του αέρα. Αυτό θα οδηγούσε σε ιονισμούς χιονοστιβάδας (ionization avalanches), διεγείροντας εκφορτίσεις κορώνας. Οι εκφορτίσεις κορώνας παράγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια όπως επίσης και θετικά και αρνητικά αιωρούμενα ιόντα. Στο Σχήμα 13 παρατηρούμε τις δύο καταστάσεις ιονισμού.



Σχήμα 13: Παρατηρούμε τις δύο καταστάσεις ιονισμού του αέρα κατά την διαδικασία που ασκείται κάποια πίεση στο εσωτερικό του φλοιού της γης αποδίδονται ηλεκτρόνια και σπές λόγω του σπασίματος των υπεροξειδίων. Στη πρώτη κατάσταση έχουμε τη δημιουργία θετικών ιόντων και στη δεύτερη κατάσταση έχουμε τις εκφορτίσεις κορώνας.

3.1.2 Βαρυτικά κύματα (AGW)(Ακουστικό κανάλι)[6,52]

Η έννοια των βαρυτικών κυμάτων είναι και αυτή μία πιθανή αιτία πριν από τη γένεση ενός σεισμικού γεγονότος. Συγκεκριμένα δημιουργείται μια διαταραχή στο πλάσμα της ιονόσφαιρας, καθώς διάφορα φυσικά φαινόμενα συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα όπως μετεωρολογικές διακυμάνσεις (πίεση, θερμοκρασία). Οι διακυμάνσεις στην πίεση θα μπορούσαν να οφείλονται στις προσεισμικές διεργασίες και σε άλλες πηγές, εκτός από τις καιρικές συνθήκες και το βιομηχανικό παράγοντα. Τα (ακουστικά) κύματα που προκαλούνται από τις διακυμάνσεις της πίεσης στην ατμόσφαιρα διαδίδονται σε διάφορες ταχύτητες και κατά επέκταση με διαφορετικά μήκη κύματος περνώντας από όλα τα επίπεδα (τροπόσφαιρα, στρατόσφαιρα, μεσόσφαιρα) και φτάνοντας στην ιονόσφαιρα. Το ενδιαφέρον σχετικά με τα AGW ως παράγων επηρεασμού της ιονόσφαιρας βασίζεται πρώτα απ' όλα σε ενεργειακές εκτιμήσεις, με δεδομένο ότι το πλάσμα είναι μικρό μέρος της ουδέτερης ατμόσφαιρας σε όλα τα ύψη της ιονόσφαιρας (η πυκνότητα ιόντων είναι της τάξης του 10^{-4} - 10^{-3} της πυκνότητας των ουδέτερων μορίων). Έτσι έστω και ένα μικρό τμήμα της ενέργειας των διαταραχών της πυκνότητας ουδέτερου μέρους είναι ικανό να προκαλέσει σημαντικές διαταραχές του πλάσματος [53]. Τα βαρυτικά κύματα μπορούν να διαδοθούν έως 500 km δημιουργώντας ανωμαλίες (ταλαντώσεις) μετατρέποντας το σε ένα πλάσμα με ανομοιογένειες λόγω του (TID – Travelling Ionosphere Disturbances). Οι διακυμάνσεις στο πλάσμα μπορούν να παρατηρηθούν με διάφορους τρόπους επίγειους και δορυφορικούς [54–60]. Στο Σχήμα 14 παρατηρείται ένα σχηματικό διάδοσης των AGW.

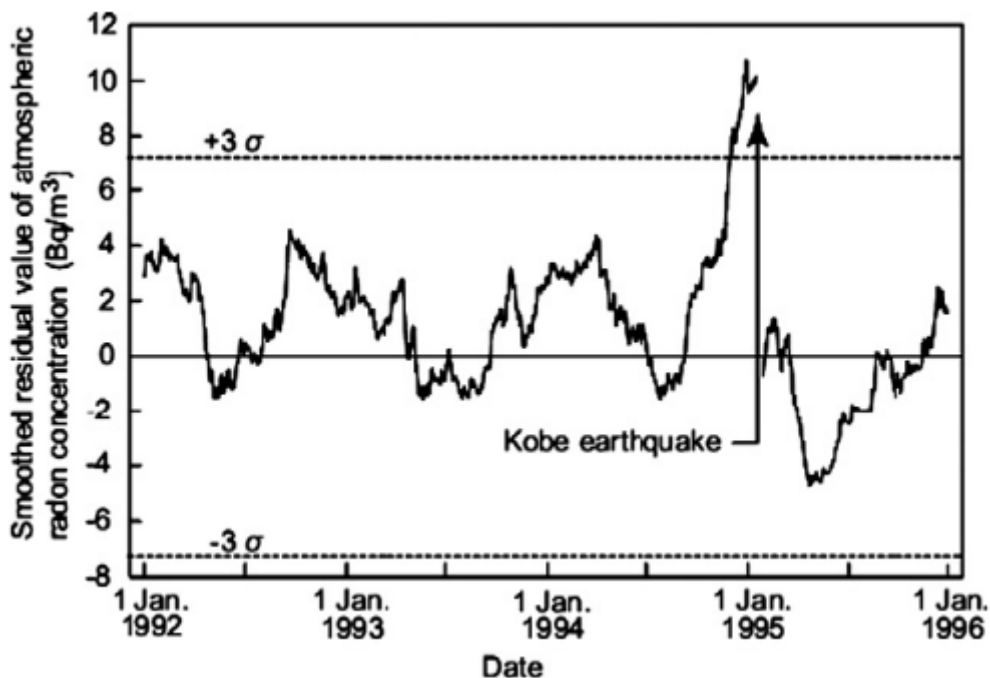


Σχήμα 14: Παρατηρούμε ότι διακυμάνσεις στην πίεση (ατμόσφαιρα) που μπορεί να οφείλεται από προσεισμικές διεργασίες, επηρεάζει την δυναμική περιοχή στην οποία υπάρχουν διαταραχές ηλεκτρικού ρεύματος λόγω της κίνησης των ιονισμένων μορίων (πλάσματος) και αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στη μαγνητόσφαιρα. Γενικά η διάδοση των βαρυτικών κυμάτων διατρέχεται σε υψόμετρο έως 500 km από την επιφάνεια της γης.

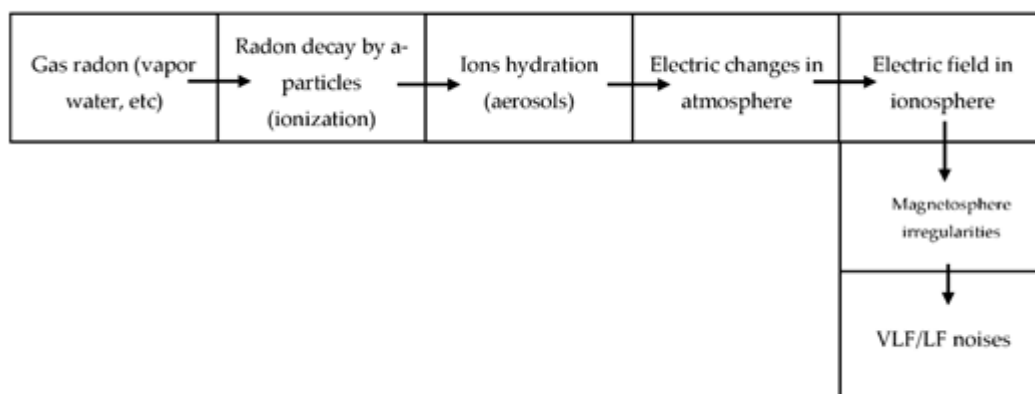
3.1.3 Απελευθέρωση Ραδονίου (Χημικό κανάλι) [9]

Το ραδόνιο που προέρχεται από το έδαφος σε μεγάλες ποσότητες μπορεί να ιονίσει σε μεγάλο βαθμό τον αέρα. Υπάρχουν τεχνικές και μεθοδολογίες για την καταγραφή του ραδονίου. Κάποιες έρευνες έχουν δείξει μετρήσεις στο νερό άλλες υπόγεια από το έδαφος, ορισμένα σε υπαίθριο χώρο καθώς πολλοί και διαφορετικοί αισθητήρες (ανιχνευτές) μέχρι σταθμούς ελέγχου του ραδονίου παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο την εξέλιξη του. Βέβαια το ερώτημα έγκειται στο εάν το ραδόνιο είναι ένα πρόδρομο φαινόμενο του σεισμού. Οι εκτιμήσεις που έχουν γίνει είναι πως το ραδόνιο εκλύεται συνεχώς από το φλοιό της γης, ακόμη και χωρίς σεισμούς. Αυτό που παρατηρούμε ως πρόδρομη διαδικασία είναι η απόκλιση της έντασης εκπομπής ραδονίου. Επιπλέον παρατηρούνται θερμικές ανωμαλίες όπου αποδεικνύει σαφώς ότι η παρατηρούμενη διεργασία συνδέεται με την τεκτονική δραστηριότητα, επειδή οι δορυφορικές εικόνες δείχνουν ξεκάθαρα την ενεργοποίηση των τεκτονικών πλακών και την αύξηση της απελευθέρωσης της θερμότητας στα όρια της τεκτονικής πλάκας που βρίσκεται το επίκεντρο του σεισμού. Η ανώμαλη δραστηριότητα σταματά λίγες μέρες μετά από το σεισμό.

Στο Σχήμα 15 παρουσιάζεται ένα γράφημα από το σεισμό του Kobe το 1995 στην Ιαπωνία και την αύξηση του ραδονίου ξεπερνώντας τα 3σ απόκλιση. Στο Σχήμα 16 παρατηρείται μια πιθανή ροή για το πώς επηρεάζονται τα VLF/LF από το ραδόνιο.



Σχήμα 15: Τέσσερα έτη αναφοράς των διακυμάνσεων του ραδονίου που μετρήθηκαν στην περιοχή του Kobe σε υψόμετρο 5 μ. Πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Βλέπουμε την στιγμή του σεισμού όπου η απόκλιση ξεπερνά τα 3σ.[61]



Σχήμα 16: Το ραδόνιο απελευθερώνεται σαν αέριο μαζί με το νερό, το οποίο στη συνέχεια διασπάται σε παράγωγα (άλλα στοιχεία όπως πολώνιο) καθώς ιονίζει τον αέρα πάνω από την επιφάνεια. Στη συνέχεια τα ιόντα αυτά ενώνονται με νερό (aerosols), το οποίο έχει σαν συνέπεια αλλαγές στην ηλεκτρική συμπεριφορά της ατμόσφαιρας και κατά επέκταση της μαγνητόσφαιρας όπου παρατηρείται θόρυβος στο σήμα των VLF.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Ανάλυση υποϊονοσφαιρικών δεδομένων (VLF/LF) με τη Μέθοδο των Κρισίμων Διακυμάνσεων (MCF) – Πιθανή προέλευση των κρίσιμων υπογραφών από άλλα φαινόμενα

4.1 Πληροφορίες ιαπωνικού δικτύου VLF/LF και σεισμών

Στη συνέχιση αυτής της εργασίας όπως ήδη έχουμε αναφέρει θα παρουσιαστεί το ιαπωνικό δίκτυο VLF/LF όπου έγινε η ανάλυση των υποϊονοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF με τη μέθοδο MCF στο χρονικό διάστημα από 01/01/2014-28/02/2017. Συγκεκριμένα ο πομπός με τον οποίο θα ασχοληθήκαμε είναι ο JJI με συχνότητα λειτουργίας 22,2 kHz, ο οποίος βρίσκεται νοτιοδυτικά της Ιαπωνίας κοντά στο Miyazaki με γεωγραφικές συντεταγμένες (32.045°N, 130.811°E) όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 17 με κόκκινο τετράγωνο, ενώ οι δέκτες παρουσιάζονται με τρίγωνο και είναι διάσπαρτοι σε όλη την Ιαπωνία (συνοπτικά όλοι οι πομποί και οι δέκτες παρουσιάζονται στο Πίνακα 1). Ακόμα ένας άλλος πομπός ο JJY (παρουσιάζεται σαν μαύρο τετράγωνο – βλ. Σχήμα 17), ο οποίος βρίσκεται εντός της χώρας, εκτός των άλλων πομπών οι οποίοι βρίσκονται σε άλλες χώρες και καταγράφονται και αυτοί από τους δέκτες (βλ. Πίνακα 1), αλλά δεν παρουσιάζονται στο Σχήμα 17.

Στο Σχήμα 17 παρουσιάζονται οι 8 διαδρομές διάδοσης (propagation paths) μεταξύ πομπού JJI και κάθε σταθμού-δέκτη όπου καθορίζονται από την 5η ζώνης Fresnel, όπου θεωρείται το ανώτατο όριο όπου μπορεί να εντοπιστεί επίδραση των σεισμιοσφαιρικών διαταραχών στις καταγραφές των VLF/LF δεδομένων, όταν το επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται εντός αυτής [12]. Στο συγκεκριμένο Σχήμα 17 παρουσιάζονται όλοι οι σεισμοί με μέγεθος ($M \geq 5,5$) όπου το επίκεντρό τους βρέθηκε εντός της 5ης ζώνης Fresnel, το χρονικό διάστημα από 01/01/2014 έως 28/02/2017 και στον Πίνακα 2 δίνονται αναλυτικά οι πληροφορίες που αφορούν τους σεισμούς. Τα δεδομένα για τους σεισμούς πάρθηκαν από <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.

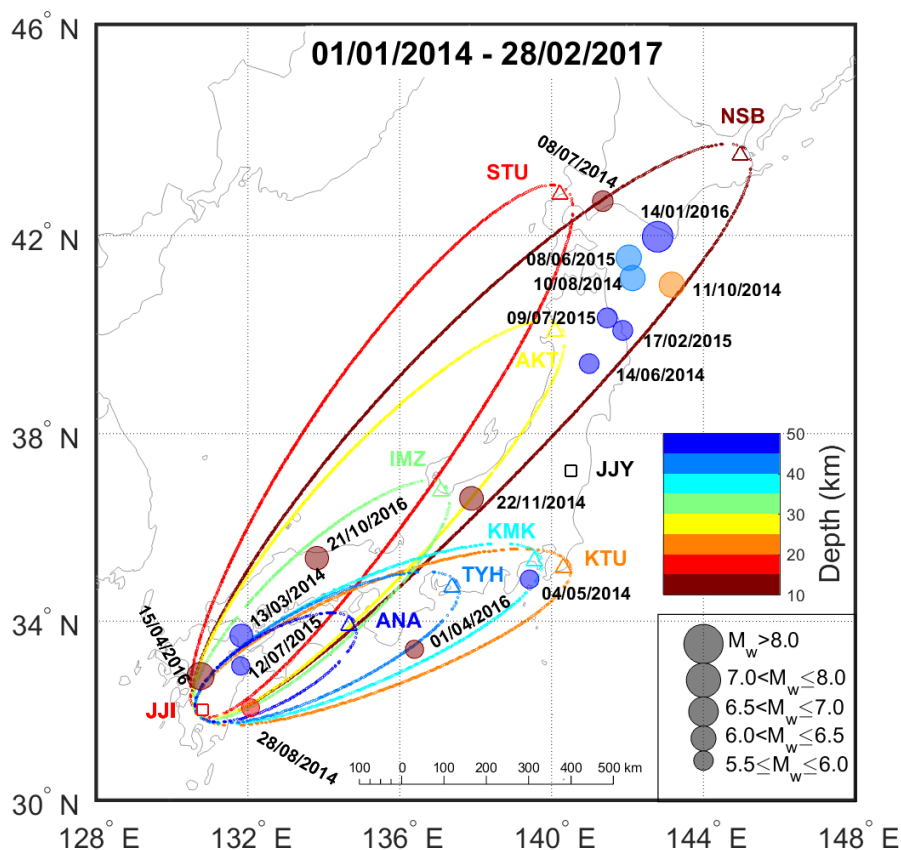
Επιπλέον σε κανέναν από τους σεισμούς δεν έχει εντοπιστεί κάποιος μετασεισμός ή πριν από κύριο σεισμό με μέγεθος $M \geq 5,5$, εκτός από το κύριο σεισμό του Kumamoto (15/04/2016, 16:25:15.7 UTC, 32.791°N, 130.754°E, $M = 7$, εστιακό βάθος 10 km), όπου παρουσιάζεται στο Σχήμα 17. Συγκεκριμένα για τον σεισμό του Kumamoto εμφανίζονται δύο σεισμοί πριν, με μέγεθος $M = 6,2$ και $M = 6,0$ αντίστοιχα και δεν παρουσιάζονται στο Σχήμα 17. Για αυτό τον λόγο μόνο ο κύριος σεισμός του Kumamoto έχει προστεθεί στο Πίνακα 2, καθώς έχει αναφερθεί σε προηγούμενη έρευνα ανάλυσης υποϊονοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF [14]. Συνολικά παρουσιάζονται 16 κύριοι σεισμοί για το διάστημα 1/1/2014-28/2/2017 όπως φαίνεται στο Πίνακα 2.

Στη μελέτη των χρονοσειρών (σημάτων ή δεδομένων) χρησιμοποιήθηκαν τα ανεπεξέργαστο πλάτος $A(t)$ και όχι το λογαριθμικό (dB) με συχνότητα δειγματοληψίας 1 Hz. Συγκεκριμένα εφαρμόστηκε η MCF απευθείας σε αυτά τμήματα των χρονοσειρών όπως περιγράφεται στη προηγούμενη έρευνα ανάλυσης υποϊονοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF [14]. Από τα δεδομένα ολόκληρων ημερών (24 h) πάρθηκαν μόνον τα νυχτερινά τμήματα (τοπική ώρα), όπου το χρονικό διάστημα καθορίζεται ανάλογα με την εποχή (βλ. Κεφάλαιο 2). Ο λόγος που προτιμούνται τα νυχτερινά από τα ημερήσια δεδομένα είναι λόγω της παρουσίας του στρώματος D στην ιονόσφαιρα την ημέρα που απορροφά

σημαντικό ποσοστό της ενέργειας του σήματος (βλ. Κεφάλαιο 3). Δηλαδή παρατηρούνται μικρότερες διακυμάνσεις του σήματος την ημέρα από την νύχτα.

Πομποί		Δέκτες	
Όνομα	Τοποθεσία(Συχνότητα)	Όνομα	Τοποθεσία
JJI	Miyazaki (22.2 kHz)	AKT	Akita
JJY	Fukushima (40 kHz)	ANA	Anan
NLK	JimCreek, Seattle (24.8 kHz)	IMZ	Imizu
NPM	Hawaii (21.4 kHz)	KMK	Kamakura
NWC	W. Australia (19.8 kHz)	KTU	Katsuura
		NSB	Nakashibetsu
		STU	Suttsu
		TYH	Toyohashi

Πίνακας 1: Πληροφορίες των πομπού και των δεκτών στη ευρύτερη περιοχή του Ειρηνικού.



Σχήμα 17: Χάρτης της Ιαπωνίας, όπου φαίνονται οι 8 δέκτες VLF/LF (παρουσιάζονται ως τρίγωνα) και οι πομποί JJI και JJY (ως τετράγωνα), οι 5^{ες} ζώνες Fresnel καλύπτουν τις υποϊονοσφαιρικές διαδρομές JJI-STU, JJI-NSB, JJI-AKT, JJI-IMZ, JJI-ANA, JJI-KMK, JJI-KTU, JJI-TYH όπου εντός βρίσκονται οι σεισμοί. Παρουσιάζονται όλοι οι σεισμοί με μέγεθος μεγαλύτερο ($M \geq 5.5$), όπου το επίκεντρό τους έπεφτε μέσα στη 5^η ζώνη Fresnel από 01/01/2014-28/02/2017, συμπεριλαμβανομένου και του μεγάλου σεισμού Kumamoto 2016. Το μέγεθος του κύκλου εκφράζει το μέγεθος του σεισμού, ενώ το χρώμα το εστιακό του βάθος.

Date (UT)	Time (UT)	Latitude	Longitude	M _w	Depth (km)	JJI-STU	JJI-NSB	JJI-AKT	JJI-IMZ	JJI-ANA	JJI-KMK	JJI-KTU	JJI-TYH	EQ Alias (Based on Epicenter Location)
13/03/2014	17:06:50	33.684°N	131.825°E	6.3	79	X	X	X	X					Kunishaki
04/05/2014	20:18:24	34.912°N	139.419°E	6.0	153						X	X		Ito
14/06/2014	17:31:41	39.438°N	140.988°E	5.5	12		X							Hanamaki
08/07/2014	09:05:22	42.668°N	141.347°E	5.5	13		X							Shiraoi
10/08/2014	03:43:17	41.158°N	142.131°E	6.1	41		X							Mutsu-1
28/08/2014	19:14:35	32.086°N	132.068°E	5.8	20					X	X	X	X	Takanabe
11/10/2014	02:35:47	41.027°N	143.165°E	6.1	22		X							Hachinohe-1
22/11/2014	13:08:18	36.641°N	137.887°E	6.2	15		X							Omachi
17/02/2015	04:46:38	40.109°N	141.891°E	5.5	51		X							Ichinohe
08/06/2015	06:01:08	41.562°N	142.031°E	6.1	42		X							Mutsu-2
09/07/2015	18:32:51	40.363°N	141.465°E	5.5	15		X							Hachinohe-2
12/07/2015	17:52:06	33.023°N	131.749°E	5.5	53	X	X	X	X	X	X	X	X	Usuki
14/01/2016	03:25:33	41.972°N	142.781°E	6.7	46		X							Shizunai
01/04/2016	02:39:08	33.381°N	136.390°E	5.9	54						X	X		Shinghu
15/04/2016	16:25:15	32.791°N	130.754°E	7.0	10	X	X	X	X					Kumamoto
21/10/2016	05:07:22	35.374°N	133.809°E	6.2	5.6	X	X	X	X					Kurayoshi

Πίνακας 2: Παρουσιάζονται όλοι οι σεισμοί και οι πληροφορίες (περιοχή, ημερομηνία, ώρα, συντεταγμένες) σε κάθε ένα από τα μονοπάτια (paths-links) που συνέβησαν για το χρονικό διάστημα από 1/1/2014-28/2/2017. Με (X) σημειώνονται τα path/s (μονοπάτι/α) εντός των οποίων το επίκεντρο του σεισμού βρισκόταν εντός της 5ης ζώνης Fresnel μεταξύ ζεύγους πομπού και κάθε δέκτη. Συνολικά αναφέρονται 16 σεισμοί μαζί με τον κύριο σεισμό του Kumamoto 2016.

4.2 Ανάλυση υποϊονοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται η έρευνα η οποία έχει γίνει για την ανάλυση των υποϊονοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF για το διάστημα από 01/01/2014-28/02/2017, στις υποϊονοσφαιρικές διαδρομές μεταξύ πομπού JJI και κάθε δέκτη από τους 8 συνολικά δέκτες του δικτύου VLF/LF, που βρίσκονται διάσπαρτοι σε όλη την Ιαπωνία. Η αναζήτηση έγινε ώστε να αποκαλυφθεί κρίσιμη δυναμική (κρίσιμες υπογραφές) στις διακυμάνσεις των σημάτων, η οποία εντοπίζεται εντός 15 ημερών πριν από κάθε σεισμό (βλ. Πίνακα 2) με την μέθοδο MCF.

Ωστόσο η εφαρμογή της μεθόδου MCF σε υποϊονοσφαιρικά δεδομένα VLF/LF στο συγκεκριμένο αυτό δίκτυο (μεταξύ του πομπού JJI και δεκτών), έχει γίνει για πρώτη φορά σε προηγούμενη έρευνα, όπου εντοπίστηκε κρίσιμη δυναμική στην υποϊόνσφαιρα πριν από τους σεισμούς του Kumamoto 2016 [14]. Επιπλέον στην συγκεκριμένη έρευνα λόγω της πρώτης εφαρμογής της μεθόδου MCF σε αυτού τους είδους τα δεδομένα, αποκαλύφθηκαν και αναλύθηκαν τμήματα χρονοσειρών που παρουσίαζαν τεχνητούς παλμούς (ξαφνικούς παλμούς δύο επιπέδων), όπου ενσωματώνουν τις διακυμάνσεις του σήματος και οφείλονταν στην λειτουργία του πομπού JJI [14]. Η παρατήρηση αυτών τεχνητών παλμών φαίνεται σχεδόν από όλους τους δέκτες-σταθμούς για συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, οι οποίοι λαμβάνουν σήμα από τον πομπό JJI. Οι λεπτομέρειες καθώς και τα χαρακτηριστικά της ανάλυσης των δεδομένων VLF/LF με τη μέθοδο MCF

θα παρουσιαστούν εδώ. Γι αυτό τον λόγο θα αναφερθούν συγκεκριμένες κατηγορίες (κλάσεις) σημάτων που παρατηρούνται στις καταγραφές αυτών των δεδομένων.

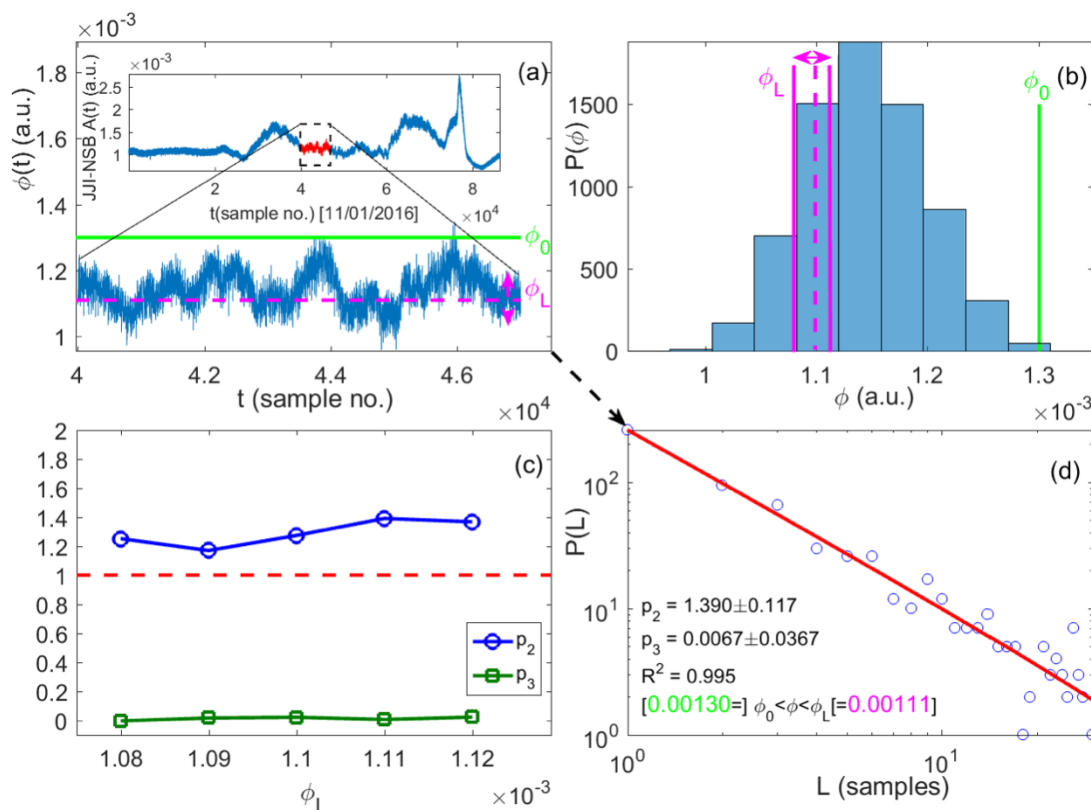
Όπως έχουμε αναφερθεί στο προηγούμενο υπο-κεφάλαιο, η MCF έχει εφαρμοστεί απευθείας σε νυχτερινά τμήματα (τοπική ώρα) από ολόκληρες μέρες (24 h), παίροντας το απολογαριθμοποιημένο πλάτος $A(t)$ για τον κάθε σταθμό-δέκτη. Σημειώνεται ότι για την εφαρμογή της μεθόδου MCF χρειάζονται τμήματα του σήματος με τουλάχιστον ($> \sim 5000$) σημεία, καθώς και με καλή stationarity, ώστε να μπορεί να παραχθεί ένα αξιόπιστο αποτέλεσμα [14]. Επιπλέον σε σήματα όπου εμφάνιζαν πολύ χαμηλό πλάτος διακυμάνσεων στις καταγραφές και γι αυτό το λόγο προστίθεται ένα μικρό ποσό ομοιόμορφου θορύβου με εύρος τιμών από $[-\varepsilon_0, \varepsilon_0]$, $\varepsilon_0 > 0$ της τάξης του 10^{-2} , αφού κανονικοποιηθεί αρχικά το σήμα στο $[0,1]$. Η διαδικασία της προσθήκης θορύβου αποτελεί ένα προεραϊκό βήμα και περιγράφεται στα βήματα εφαρμογής της μεθόδου MCF στο Κεφάλαιο 1 [14]. Όσον αφορά για την διακοπτόμενη λειτουργία του πομπού JJI, λόγω ξαφνικών δύο επιπέδων παλμών που παρουσιάζονταν σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, όπου γίνονται ορατοί παράλληλα σχεδόν από όλους τους δέκτες, χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση με τη μέθοδο MCF το επάνω επίπεδο παλμών, λόγω των περισσότερων τιμών (σημείων) που περιείχαν [14].

Παίροντας υποψή όλα τα παραπάνω σχετικά με τις βασικές πτυχές της εφαρμογής της μεθόδου MCF στα υποϊονοσφαιρικά δεδομένα διάδοσης VLF/LF, γίνεται η διάκριση σετέσσερις (4) κατηγορίες (κλάσεις) σημάτων. Μια κατηγορία (κλάση) (a) είναι τμήματα σημάτων που δεν παρουσιάζουν καμία stationarity και άρα είναι αδύνατον να αναλυθούν με τη μέθοδο MCF. Επιπλέον σήματα μικρών διακυμάνσεων πλάτους ως κατηγορία (b), όπου η προσθήκη ομοιόμορφου θορύβου πριν την εφαρμογή της μεθόδου MCF είναι απαραίτητη. Σήματα τα οποία εμφανίζουν επαρκής διακυμάνσεις πλάτους ώστε να γίνει εφαρμογή της μεθόδου MCF, χαρακτηρίζονται ως κατηγορία (c). Ακόμα σήματα τα οποία εμφανίζουν ξαφνικούς τεχνητούς παλμούς δύο επιπέδων, από όπου επιλέγονται οι επάνω διακυμάνσεις από τις κάτω για την εφαρμογή της μεθόδου MCF, θα χαρακτηρίζονται ως κατηγορία (κλάση) (d).

Αξίζει να αναφερθεί ακόμα πως οι αναλύσεις οι οποίες προέρχονται από την υποϊονοσφαιρική διάδοση JJI-NSB ανήκουν στις περισσότερες περιπτώσεις στην κατηγορία (κλάση) (b), για το λόγο ότι μια σπειροειδής κεραία (coil antenna) χρησιμοποιείται στον δέκτη NSB με αποτέλεσμα να φιλτράρει του ξαφνικούς τεχνητούς παλμούς δύο επιπέδων του πομπού JJI, την στιγμή που οι υπόλοιποι επτά (7) δέκτες χρησιμοποιούν μονοπολική κεραία (monopole antenna) [14].

Στο Σχήμα 18 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ανάλυσης ενός σήματος, το οποίο παρουσιάζει κρίσιμα χαρακτηριστικά και ονομάζεται κρίσιμο παράθυρο (CW). Στο Σχήμα 18 φαίνονται όλα τα βασικά βήματα υλοποίησης της μεθόδου MCF. Συγκεκριμένα το συγκεκριμένο κομμάτι του σήματος που παρουσιάζεται ανήκει στην κατηγορία κλάσης (b), δηλαδή έχει επαρκές διακυμάνσεις πλάτους για να μπορεί να αναλυθεί. Το κρίσιμο παράθυρο αναφέρεται ~ 3 μέρες πριν το σεισμό Shizunai (βλ. Πίνακα 2,3), όπου το επίκεντρό του εντοπίζεται 57 km νοτιοανατολικά της πόλης Shizunai στο μονοπάτι JJI-NSB και είναι ο δεύτερος μεγαλύτερος σεισμός μετά τον σεισμό του Kumamoto. Αρχικά στο Σχήμα 18 στο πάνελ (a) φαίνεται το κομμάτι του σήματος (κρίσιμο παράθυρο) με κόκκινο το οποίο έχει ξεχωριστεί από ολόκληρο το σήμα (24 ώρες). Παρόμοια στο πάνελ

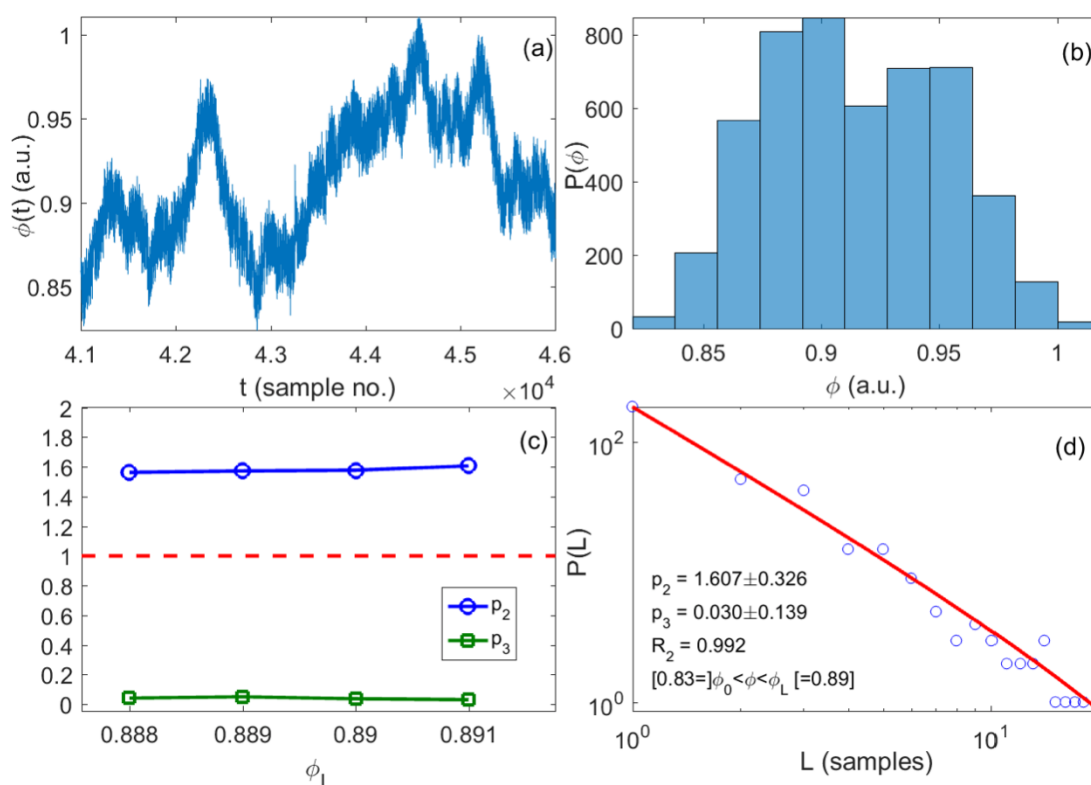
(b) φαίνεται η κατανομή του σήματος όπου φαίνονται το αρχικό σημείο (fix point) ϕ_0 το οποίο έχει επιλεγεί (πράσινη κατακόρυφη ευθεία), καθώς και η περιοχή του τέλους των σημείων εξόδου ϕ_L (περιοχή με τις δύο μη διακεκομμένες μωβ κατακόρυφες ευθείες), φανερώνουν τις εφαρμογές της μεθόδου MCF για το συγκεκριμένο αρχικό σημείο (fix point) σε σχέση με τις διαδοχικές τιμές σημείων εξόδου ϕ_L που εκτελέστηκαν και βρέθηκε κρισιμότητα. Αντίστοιχα στο πάνελ (a) φαίνεται η ίδια εικόνα με την κατανομή του σήματος στο πάνελ (b) σε σχέση με το αρχικό σημείο (fix point) ως πράσινη οριζόντια ευθεία και τα διαδοχικά σημεία εξόδου ϕ_L ως περιοχή με τις δύο μη διακεκομμένες μωβ οριζόντιες ευθείες. Τα σετ (ϕ_0, ϕ_L) παρουσιάζονται στο πάνελ (c), απ' όπου ισχύουν τα κριτήρια κρισιμότητας $p_2 > 1, p_3 \approx 0$ και επιβεβαιώνουν μια ευρεία κρίσιμη περιοχή του σήματος για τα σημεία εξόδου ϕ_L που εκτέλεστηκαν και βρέθηκε κρισιμότητα. Στο πάνελ (d) φαίνεται για μια συγκεκριμένη περίπτωση ζευγαριού ϕ_0, ϕ_L όπου η κατανομή των χρόνων παραμονής (laminar) μέσα στη περιοχή (laminar region) έχει συγκεκριμένα αρχικό σημείο (fix point) $\phi_0 = 0.00130$ και τελικό σημείο εξόδου (end of laminar region) $\phi_L = 0.00111$ (διακεκομμένη μωβ ευθεία, πάνελ (a),(b)), αφού επιπλέον χρησιμοποιήθηκε για “fitting” η συνάρτηση κατανομής $P(L)$ (εξ. 25, βλ. Κεφάλαιο 1).



Σχήμα 18: Κρίσιμο παράθυρο εντοπίστηκε πριν από τον σεισμό Shizunai μεταξύ των ωρών 11:06:40-13:03:20 (UT) την 11/01/2016 στην υποϊνσοσφαιρική διάδοση JJI-NSB. Στα πάνελ (a), (b) διακρίνονται με διπλή μη διακεκομμένη μωβ ευθεία η περιοχή των σημείων εξόδου (end points) και με πράσινη ευθεία το αρχικό σημείο (fix point). Στο Σχήμα (a) φαίνεται το σήμα που αναλύθηκε, καθώς και την χρονοσειρά ολόκληρης μέρας (24 h) από την οποία πάρθηκε το σήμα. Στο Σχήμα (b) φαίνεται η κατανομή του σχήματος. Στο Σχήμα (c) φαίνεται μια περιοχή σημείων εξόδου (διάγραμμα p_2, p_3 vs ϕ_L) όπου επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα, καθώς φαίνεται κρίσιμη διαχωριστική διακεκομμένη οριζόντια κόκκινη ευθεία, από όπου ισχύει $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$ (κρισιμότητα). Στο (d) διακρίνεται η κατανομή των laminar χρόνων όπου αποκαλύπτεται η power

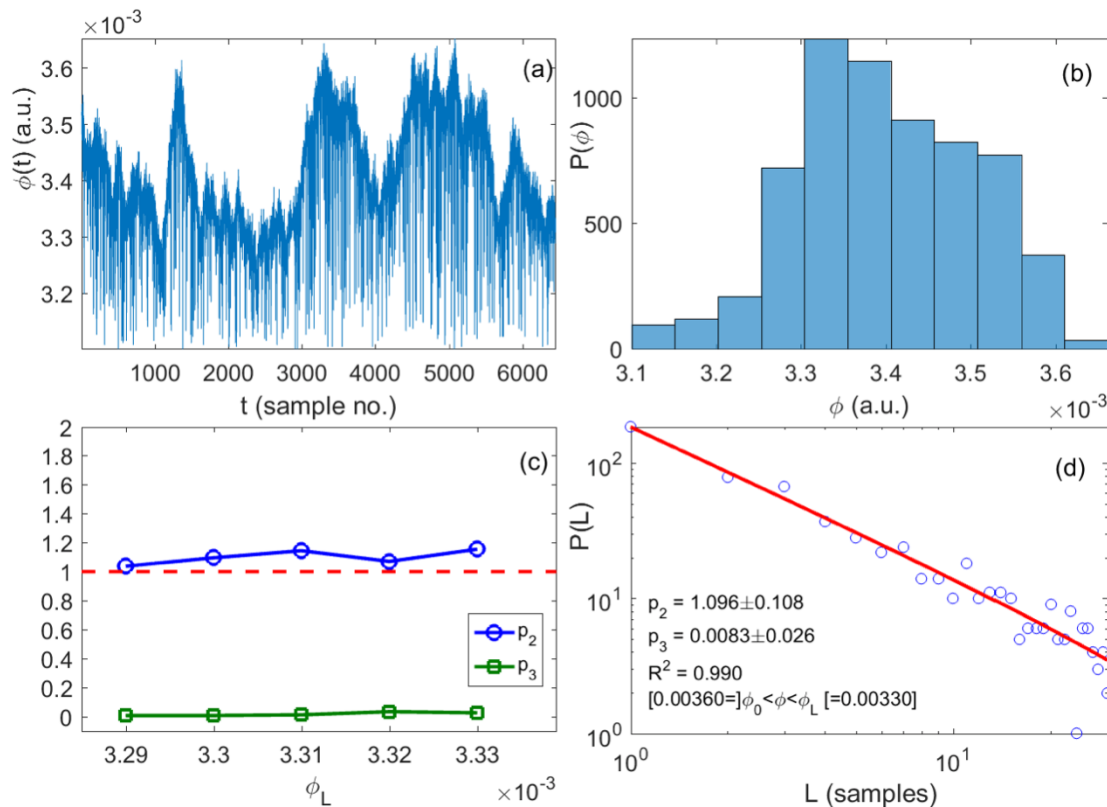
- law συμπεριφορά (κόκκινη γραμμή) με $p_2 = 1.390$ και $p_3 = 0.0067$ όπου ισχύει $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$ με end point (σημείο εξόδου) $\phi_L = 0.00111$ (μώβ διακεκομμένη ευθεία) και αρχή (fixpoint) $\phi_0 = 0.00130$ (πράσινη διακεκομμένη ευθεία).

Στο Σχήμα 19 παρουσιάζεται άλλη μία περίπτωση σήματος η οποία ανήκει στην κατηγορία (κλάσης) (b), παρουσιάζοντας πολύ μικρές διακυμάνσεις στο σήμα και η προσθήκη ομοιόμορφου θορύβου είναι αναγκαία. Συγκεκριμένα παρουσιάζεται στο Σχήμα 19 ο σεισμός Hachinohe (βλ. Πίνακα 2) που συνέβη 152 km βορειοανατολικά της πόλης Hachinohe, όπου το επίκεντρο βρισόταν εντός της υποϊνσοσφαιρικής διάδοσης JJI-NSB, και το κρίσιμο παράθυρο (CW) εντοπίστηκε ~ 2 μέρες πριν το κύριο σεισμό (πάνελ a), με μια ευρεία περιοχή σημείων εξόδου ϕ_L που φανερώνουν κρισιμότητα με $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$, όπως φαίνεται από το πάνελ (c). Για το συγκεκριμένο σήμα χρησιμοποιήθηκε ομοιόμορφος θόρυβος με εύρος τιμών από $[-0.02, 0.02]$, κανονικοποιώντας το σήμα στο εύρος $[0, 1]$ πριν την εφαρμογή της MCF.



Σχήμα 19: Κρίσιμο παράθυρο εντοπίστηκε πριν από τον σεισμό Hachinohe-1 μεταξύ των ωρών 11:23:20-12:46:40 (UT) την 09/10/2014 στην υποϊνσοσφαιρική διάδοση JJI-NSB. Στο Σχήμα (a) φαίνεται το κανονικοποιημένο σήμα στο $[0, 1]$ όπου έχει προστεθεί ομοιόμορφος θόρυβος 0.02. Στο Σχήμα (b) φαίνεται η κατανομή του σήματος. Στο πάνελ (c) φαίνεται μια περιοχή σημείων εξόδου ϕ_L όπου επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα (διάγραμμα p_2, p_3 vs ϕ_L), καθώς η διακεκομμένη οριζόντια κόκκινη γραμμή καθορίζει την περιοχή $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$. Στο πάνελ (d) διακρίνεται η κατανομή των laminae χρόνων όπου αποκαλύπτεται η power-law (κόκκινη γραμμή) συμπεριφορά με $p_2 = 1.607$ και $p_3 = 0.030$ όπου ισχύει $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$ με end point (σημείο εξόδου) $\phi_L = 0.89$ και αρχή (fix point) $\phi_0 = 0.83$.

Τελευταία περίπτωση υποϊνοσφαιρικής ανάλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 20, όπου υπάρχουν ξαφνικές διακυμάνσεις τεχνητών παλμών δύο επιπέδων, δηλαδή κατηγορία (κλάσης) (d). Όπως έχει αναφερθεί στην ανάλυση χρησιμοποιήθηκε το επάνω επίπεδο των παλμών που περιέχουν φυσικές διακυμάνσεις του σήματος (πάνελ a), όπου εφαρμόστηκε στη συνέχεια απευθείας η μέθοδος MCF. Το σήμα στο Σχήμα 20 έχει παρθεί από την υποϊνοσφαιρική διάδοση JJI-IMZ για τον σεισμό στο Kunishaki στον οποίο το επίκεντρο σημειώθηκε 15 km βορειοανατολικά της πόλης Kunishaki. Όπως παρατηρείται από την πάνελ c, τα διαδοχικά σημεία εξόδου που εντοπίστηκαν ικανοποιούν ένα μεγάλο εύρος τιμών σημείων εξόδου ϕ_L που φανερώσουν κρισιμότητα με $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$.



Σχήμα 20: Κρίσιμο παράθυρο εντοπίστηκε πριν από τον σεισμό Kunishaki μεταξύ των ωρών 11:40:00-14:26:40 (UT) την 11/03/2014 στη υποϊνοσφαιρική διάδοση JJI-IMZ. Στο Σχήμα (a) φαίνεται το σήμα όπου ένα κατώτατο όριο $3.1 \cdot 10^{-3}$, έχει επιβληθεί ώστε να διατηρηθούν οι επάνω διακυμάνσεις. Στο Σχήμα (b) φαίνεται η κατανομή του σήματος. Στο Σχήμα (c) φαίνεται μια περιοχή σημείων εξόδου ϕ_L όπου επιβεβαιώνει το αποτέλεσμα (διάγραμμα p_2, p_3 vs ϕ_L), καθώς η διακεκομμένη οριζόντια κόκκινη γραμμή καθορίζει την περιοχή $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$. Στο (d) διακρίνεται η κατανομή των laminae χρόνων όπου αποκαλύπτεται η power-law (κόκκινη γραμμή) με $p_2 = 1.096$ και $p_3 = 0.0083$ όπου ισχύει $p_2 > 1$ και $p_3 \approx 0$ με end point (σημείο εξόδου) $\phi_L = 0.00330$ και αρχή (fix point) $\phi_0 = 0.0036$.

Όλες οι αναλύσεις μαζί με αυτές που παρουσιάστηκαν, στην περίοδο από 01/01/2014-28/02/2017, για την ανάλυση των υποϊνοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF, που πιθανόν σχετίζονται με τους σεισμούς του Πίνακα 2 παρουσιάζονται στο Πίνακα 3. Συγκεκριμένα

παρουσιάζονται τα κρίσιμα παράθυρα (CWs) τα οποία βρέθηκαν εντός 15 μερών πριν από κάθε σεισμό, όπου το επικεντρό εντοπίστηκε εντός της 5ης ζώνης Fresnel, της υποϊονοσφαιρικής διάδοσης μεταξύ του πομπού JJI και κάθε δέκτη. Στις περιπτώσεις όπου το επίκεντρο του σεισμού βρισκόταν σε περισσότερα από ένα υποϊονοσφαιρικά μονοπάτια, αναλύθηκαν όλα τα αντίστοιχα σήματα και τα αποτελέσματα υπάρχουν στο Πίνακα 3. Σχεδόν όλες τις περιπτώσεις των αναλύσεων το επίκεντρο του σεισμού βρισκόταν σε περισσότερα από ένα μονοπάτια (paths) υποϊονοσφαιρικής διάδοσης. Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι αρκετές περιπτώσεις ανάλυσης βρέθηκαν περισσότερα κρίσιμα παραθυρα (CWs) από ένα, αλλά στο Πίνακα 3 παρουσιάζεται το πιο κοντινό χρονικά κρίσιμο παράθυρο που βρέθηκε πριν το σεισμικό γεγονός για οποιαδήποτε συνδυασμό υποϊονοσφαιρικής διάδοσης-σεισμού εντοπίστηκε το επίκεντρο. Κρίσιμο παραθυρο (CW) εντοπίστηκε πριν από όλους τους σεισμούς του Πίνακα 2. Μόνο δύο από τις υποϊονοσφαιρικές διαδόσεις (paths-links) ο JJI-STU για τον σεισμό Usuki και ο JJI-TYH για τον σεισμό Takanabe, δεν εντοπίστηκε κρίσιμο παράθυρο λόγω ότι πιθανόν δεν υπήρχε “stationarity” (σταθερότητα) σε τμήματα της χρονοσειράς, όπου η εφαρμογή της MCF ήταν αδύνατη. Τέτοιες περιπτώσεις σημάτων είναι κατηγορίας (κλάσης) a .Σε όσους διαπιστώθηκε κρίσιμο παράθυρο CW (βλ. Πίνακα 3) σημειώθηκε το βέλτιστο ζευγάρι (p_2 , p_3 , δηλαδή p_2 (mean/maximum), p_3 (mean/minimum), καθώς η ημερομηνία, το διάστημα της ώρας της ανάλυσης και το όνομα του δέκτη για την κάθε περίπτωση που αναλύθηκε τμήμα του σήματος (τελευταία στήλη).

Γνωρίζοντας ότι η ιονόσφαιρα επηρεάζεται από άλλα φαινόμενα όπως μαγνητικές καταιγίδες, ηλιακές καταιγίδες, ηφαιστειακές εκρήξεις, είναι σημαντικό να εξετάσουμε αυτά τα ακραία φαινόμενα (τοπικά ή παγκόσμια) ειδικά πριν αλλά και μετά από σεισμικά γεγονότα [6,12,13]. Από την άλλη πλευρά, η εύρεση κρίσιμου παραθύρου (CW) πριν από έναν σεισμό, που παρατηρούνται στις καταγραφές των VLF/LF δεδομένων, περιγράφονται κατάλληλα από μια δεύτερης τάξης αλλαγής φάσης σε θερμική ισορροπία (βλ. Κεφάλαιο 1). Τέτοια κρίσιμα παράθυρα αναμένονται να βρεθούν και πριν από άλλα ακραία φαινόμενα όπου πιθανόν να επηρεάζουν την ιονόσφαιρα (σε αρχικό στάδιο της προετοιμασίας τους). Αντίθετα, κατά την διάρκεια του τελικού σταδίου προετοιμασίας ή της εξέλιξης ενός ακραίου φαινομένου αναμένεται να εντοπιστεί δυναμική εκτός ισορροπίας [18,35,62,63]. Γι’ αυτό τον λόγο εξετάστηκαν ο γεωμαγνητικοί δείκτες Dst (ανά 1 ώρα), Kp (ανά 3 ώρες) με Σkp (ανά 1 μέρα), ap (ανά 3 ώρες) με Ap(ανά 1 μέρα), ώστε να αποκαλυφθούν τυχόν γεωμαγνητικά φαινόμενα, όπου εμφάνιζαν κρίσιμα παράθυρα (CWs) πριν την εκδηλώσή τους και συνέβησαν την περίοδο 15 μέρες μετά από κάθε σεισμό, δηλαδή χρονικά μετά το κρίσιμο παράθυρο της κάθε ανάλυσης που περιείχε αυτά φαινόμενα όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 3 (η προτελευταία στήλη του Πίνακα 3). Επιπλέον αναζητήθηκαν ξεχωριστά οι ηλιακές εκλάμψεις τύπου M και X στις ίδιες χρονικές περιόδους, καθώς επίσης και εκρήξεις ηφαιστειών. Βέβαια οι ηλιακές εκλάμψεις πιθανόν να επηρεάζουν την ιονόσφαιρα (ή την μαγνητόσφαιρα) περισσότερο την ημέρα λόγω της εμφάνισης του ήλιου, αλλά στις αναλύσεις που γίνονται με την MCF, όπως προαναφέρθηκε, χρησιμοποιούνται μόνο τα νυχτερινά τμήματα της ημέρας όπου βρέθηκαν τουλάχιστον ένα ή περισσότερα κρίσιμα παράθυρα από λίγες ώρες έως λίγες μέρες πριν τα γεγονότα αυτά, φανερώνοντας την ύπαρξη κρίσιμης δυναμικής σε αρχικό

στάδιο της προετοιμασίας τους. Γι αυτόν τον λόγο η ηλιακές εκλάμψεις δεν εξαιρούνται ως πιθανή αιτία να επηρεάζεται η ιονόσφαιρα και συμπεριλαμβάνονται στα στοιχεία του Πίνακα 3.

Critical window date	Critical window time (UT)	Receiver	$P_{2,max}/P_{2,mean}$	$P_{3,min}/P_{3,mean}$	Other events after CW date	Location
10/03/2014	11:06:40-13:53:20	STU	1.378/1.271	0.0048/0.0125		Kunisaki
11/03/2014	11:40:00-14:26:40	IMZ	1.155/1.101	0.0265/0.0181		Kunisaki
12/03/2014	15:16:40-18:03:20	AKT	1.348/1.302	0.0099/0.0179		Kunisaki
12/03/2014	16:56:40-18:36:40	NSB	1.522/1.495	0.0291/0.0311		Kunisaki
30/04/2014	11:23:20-14:10:20	KTU	1.098/ 1.063	0.0294/0.0281		Ito
03/05/2014	14:23:20-17:30:00	KMK	1.561/1.443	0.0300/0.0275		Ito
13/06/2014	15:16:40-16:40:00	NSB	1.705/1.625	0.0179/0.0431		Hanamaki
03/07/2014	12:13:20-13:53:20	NSB	1.581/1.453	0.0860/0.0514		Shiraoi
09/08/2014	15:50:00-17:38:20	NSB	1.515/1.417	0.0256/0.0406		Mutsu-1
26/08/2014	11:30:00-17:30:00	KMK	1.564/1.551	0.0561/ 0.0627	Moderate magnetic storms ($Dst_{min} = -79$ nT) detected on 27/08/2014 and 12/09/2014, as well as X-class solar flare ($10^{-3.79} \frac{W}{m^2}$) [*] on 10/09/2014	Takanabe
26/08/2014	13:03:20-15:50:00	ANA	1.226/1.138	0.0044/0.0495	Moderate (VEI [†] = 2) volcanic eruption (Asosan volcano) on 30/08/2014	Takanabe
27/08/2014	13:03:20-16:06:40	KTU	1.139/1.138	0.0410/ 0.0495		Takanabe
-	-	TYH	-	-		Takanabe [‡]
09/10/2014	11:23:20-12:46:40	NSB	1.607/1.580	0.0300/0.0396	Five X-class solar flares ($10^{-3.95} \frac{W}{m^2}$, $10^{-3.79} \frac{W}{m^2}$, $10^{-3.50} \frac{W}{m^2}$, $10^{-4.00} \frac{W}{m^2}$, $10^{-3.70} \frac{W}{m^2}$) occurred during 19-26/10/2014	Hachinohe-1
21/11/2014	11:56:40-14:26:40	NSB	1.623/1.584	0.0235/0.0352		Omachi
14/02/2015	11:06:40-12:55:00	NSB	1.373/1.380	0.0214/0.0487	Five M-class solar flares ($10^{-5.00} \frac{W}{m^2}$, $10^{-4.65} \frac{W}{m^2}$, $10^{-4.43} \frac{W}{m^2}$, $10^{-4.38} \frac{W}{m^2}$, $10^{-4.08} \frac{W}{m^2}$) occurred during 02-03/03/2015	Ichinohe
06/06/2015	16:06:40-17:30:00	NSB	1.429/1.419	0.0826/0.0852	One moderate ($Dst_{min} = -73$ nT) and one strong ($Dst_{min} = -204$ nT) magnetic storm detected on 08/06/2015 and 23/06/2015, respectively. Small (VEI = 1) volcanic eruption (Asamayama volcano) on 16/06/2015.	Mutsu-2
07/07/2015	13:20:00-15:16:40	NSB	1.588/1.501	0.0169/0.0359	Usuki EQ occurrence on 10/07/2015	Hachinohe-2
10/07/2015	14:43:20-17:30:20	KMK	1.438/1.315	0.0348/0.0361		Usuki
10/07/2015	13:50:23-17:13:20	NSB	1.441/1.419	0.0676/0.0717		Usuki
11/07/2015	12:30:00-16:40:00	ANA	1.419/1.332	0.0267/0.0625		Usuki
11/07/2015	13:03:20-17:30:00	AKT	1.155/1.086	0.018/0.0322		Usuki
11/07/2015	13:36:40-16:23:20	IMZ	1.359/1.317	0.0449/0.0563		Usuki
11/07/2015	13:20:00-16:06:40	KTU	1.493/1.426	0.0413/0.0690		Usuki
11/07/2015	12:30:00-15:16:40	TYH	1.706/1.492	0.0070/0.0607		Usuki
-	-	STU	-	-		Usuki [‡]
11/01/2016	11:06:40-13:03:20	NSB	1.390/1.289	0.0067/0.0132	Moderate ($Dst_{min} = -93$ nT) magnetic storm detected on 20/01/2016	Shizunai
23/03/2016	15:16:40-18:03:20	KTU	1.210/1.170	0.0677/0.0711		Shinghu
24/03/2016	11:06:40-13:53:20	KMK	1.505/1.459	0/0.0355		Shinghu
07/04/2016	13:45:00-19:18:20	NSB	1.98/1.7	0.03/-	$Dst > -60$ nT during 15/03-15/04/2016	Kumamoto
11/04/2016	11:06:40-14:26:40	IMZ	1.96/1.9	0/-		Kumamoto
12/04/2016	12:05:00-15:41:40	KMK	1.18/1.1	0/-		Kumamoto
19/10/2016	10:33:20-12:13:20	IMZ	1.311/1.246	0.0607/0.0745		Kurayoshi
20/10/2016	13:20:00-15:00:00	AKT	1.283/1.246	0.0386/0.0490		Kurayoshi
20/10/2016	13:20:00-14:43:20	NSB	1.629/1.604	0.0008/0.0112		Kurayoshi
20/10/2016	11:40:00-13:36:40	STU	1.409/1.214	0.0088/0.0501		Kurayoshi

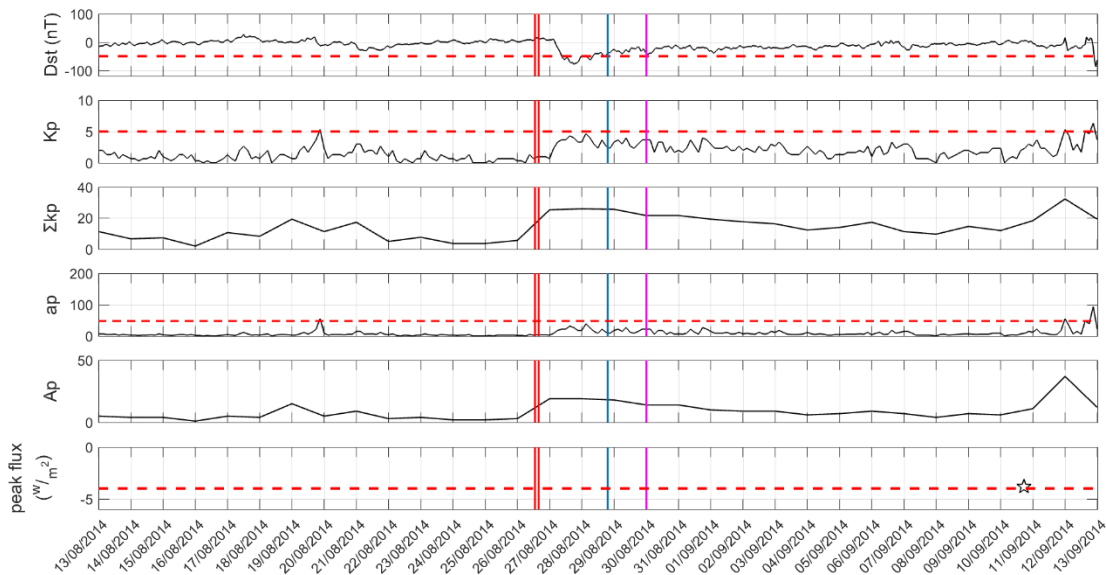
* 100 to 800 picometer X-rays peak flux, † volcanic explosivity index, ‡ MCF analysis not possible due to lack of stationarity in the time series

Πίνακας 3: Τα αποτελέσματα των αναλύσεων με την MCF σε όλα τα paths για κάθε σεισμό που ήταν εντός της 5ης ζώνη Fresnel για κάθε path. Δίνεται η ημερομηνία της ανάλυσης, η ώρα, ο δέκτης και οι βέλτιστες τιμές των εκθετών p_2 , p_3 . Με (-) σημειώνονται όσες από τις αναλύσεις δεν έδειξαν κρισιμότητα, καθώς επίσης και παρατηρήσεις (σχόλια) από άλλα φαινόμενα τα οποία συνέβησαν χρονικά μετά τα κρίσιμα παράθυρα.

Ακόμα σημαντικό είναι να αναφερθεί ως παρατήρηση από τον Πίνακα 3, σχετικά με δύο σεισμούς Usuki και Hachinohe-2, για την υποϊονοσφαιρική διάδοση JJI-NSB, οι οποίοι συνέβησαν σε μικρο χρονικό διάστημα μεταξύ τους, τις ημερομηνίες 09/07/2015 και 12/07/2015 αντίστοιχα (βλ. πρώτη στήλη του Πίνακα 2). Συγκεκριμένα κρίσιμο παράθυρο για τον σεισμό Usuki βρέθηκε στις 10/7/2015 ενώ για τον Hachinohe-2 στις 07/07/2015 (βλ. πρώτη στήλη του Πίνακα 3), το οποίο δηλώνει πως το κρίσιμο παράθυρο την 07/07/2015 πιθανόν ανήκει και στα δύο σεισμικά γεγονότα. Οι δύο σεισμοί βέβαια όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2 έχουν ίδιο μέγεθος σεισμού $M_w = 5.5$ και το εστιακό βάθος του Usuki εντοπίζεται στα 55 km και του Hachinohe-2 στα 15 km. Επίσης το κρίσιμο παράθυρο στις 07/07/2015 αποτελεί και το μοναδικό παράθυρο για τον σεισμό Hachinohe-2.

Επιπλέον στη συνέχεια θα παρουσιαστούν αναλυτικά κάποιες περιπτώσεις σεισμών όπου παρατηρείται ενδιαφέρον σε σχέση με μαγνητικές, ηλιακές καταιγίδες καθώς και ηφαιστεια, όπου αυτά τα φαινόμενα επηρεάζουν ή όχι την ιονόσφαιρα, καθώς και την σχέση του κρίσιμων παραθύρων με αυτά τα φαινόμενα, όπου χρονικά συνεβησαν μετά τα κρίσιμα αυτά παράθυρα εντός 15 ημερών. Όλα τα φαινόμενα (εκτός σεισμών) τα οποία συνέβησαν εντός 15 ημερών μετά τα κρίσιμα παράθυρα που βρέθηκαν παρουσιάζονται στη πρωτελευταία στήλη του Πίνακα 3.

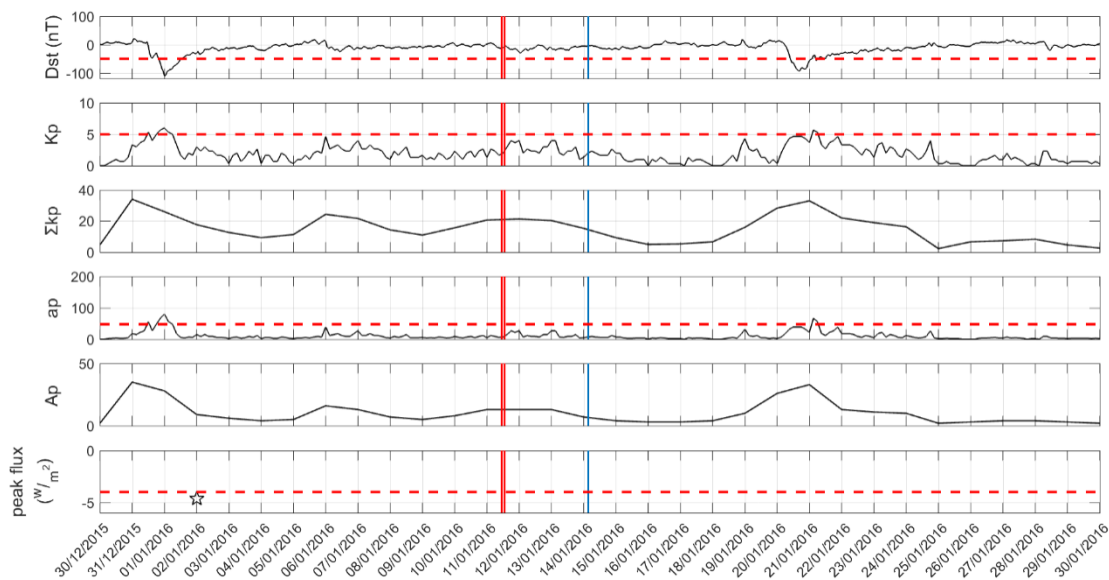
Συγκεκριμένα, στο Σχήμα 21 παρουσιάζονται οι γεωμαγνητικοί δείκτες Dst (nT), Kp, ΣKp, ap, Ap καθώς και στο έκτο πάνελ η ένταση των ηλιακών καταιγίδων (100 to 800 picometer X-rays peak flux) για τον σεισμό Takanabe (βλ. Πίνακα 2,3) στην υποϊονοσφαιρική διάδοση JJI-ANA. Η περίοδος μετά το κρίσιμο παράθυρο (26/08/2014- διπλή κόκκινη κατακόρυφη γραμμή) παρουσιάζει μία μεσαία μαγνητική καταιγίδα με ελάχιστο Dst -79 nT (βλ. Πίνακα 3) την 27/08/2014 δηλαδή μετά από λίγες ώρες, ενώ το σεισμικό γεγονός συνέβη μετά από ~ 2 μέρες (μπλε κατακόρυφη γραμμή) και μπορεί να ανήκει και στις δύο περιπτώσεις. Επιπλέον, ένα ηφαιστειακό γεγονός (Asosan) όπου σημειώθηκε ~ 1 μέρα πριν το σεισμό με μεσαίου μεγέθους έκρηξη VEI = 2 (Volcanic Eruption Index) παρουσιάζεται στις 30/08/2014 (μωβ κατακόρυφη γραμμή), καθώς επίσης παρουσιάζεται μία ηλιακή έκλαμψη τύπου X (100 to 800 picometer X-rays peak flux = $10^{3.79} \frac{W}{m^2}$) την 10/09/2014 (βλ. Πίνακα 3) την περίοδο μετά το κρίσιμο παράθυρο, όπως παρουσιάζεται στο έκτο πάνελ (panel). Βέβαια δεν παρουσιάζεται κάποιο κρίσιμο παράθυρο μετά το ηφαιστειακό γεγονός και τον σεισμό μέχρι την ημερομηνία 09/09/2014, δηλαδή ~ 1 ημέρα πριν την ηλιακή έκλαμψη όπου εντοπίστηκε κρίσιμο παράθυρο και πιθανό οφείλεται σε αυτή την ηλιακή έκλαμψη, καθώς και στην μαγνητική καταιγίδα με ελάχιστο Dst -88 nT, που σημειώθηκε στις 12/09/2014, δηλαδή πριν ~ 3 μέρες από το κρίσιμο παράθυρο στις 09/09/2014. Μετά από αυτή την καταιγίδα δεν εντοπίζεται άλλο κρίσιμο παράθυρο.



Σχήμα 21: Το σχήμα δείχνει τους γεωμαγνητικούς δείκτες Dst, Kp, ΣKp, ap, Ap και την ένταση της ηλιακής έκλαμψης (100 to 800 picometer X-rays peak flux $\frac{W}{m^2}$) στο μονοπάτι (path) JJI-ANA σε διάρκεια μέρες από την εμφάνιση του σεισμικού γεγονότος Takanabe (μπλε κατακόρυφη γραμμή στα έξι πάνελ). Η διπλή κόκκινη γραμμή στα έξι πάνελ αναφέρεται χρονικά στο πρώτο κρίσιμο παράθυρο που εντοπίστηκε (βλ. Πίνακα 3). Οι ηλιακές καταιγίδες διακρίνονται με αστέρι. Στις καμπύλες Dst, Kp, ap υπάρχει οριζόντια κόκκινη διακεκομμένη (όριο) εκδήλωσης μαγνητικής καταιγίδας. Η μωβ (magenta) κατακόρυφη γραμμή και στα 6 πάνελ αναφέρεται χρονικά στην έκρηξη του ηφαιστείου Asonan με VEI = 2 (Volcanic Eruption Index) στις 30/08/2014.

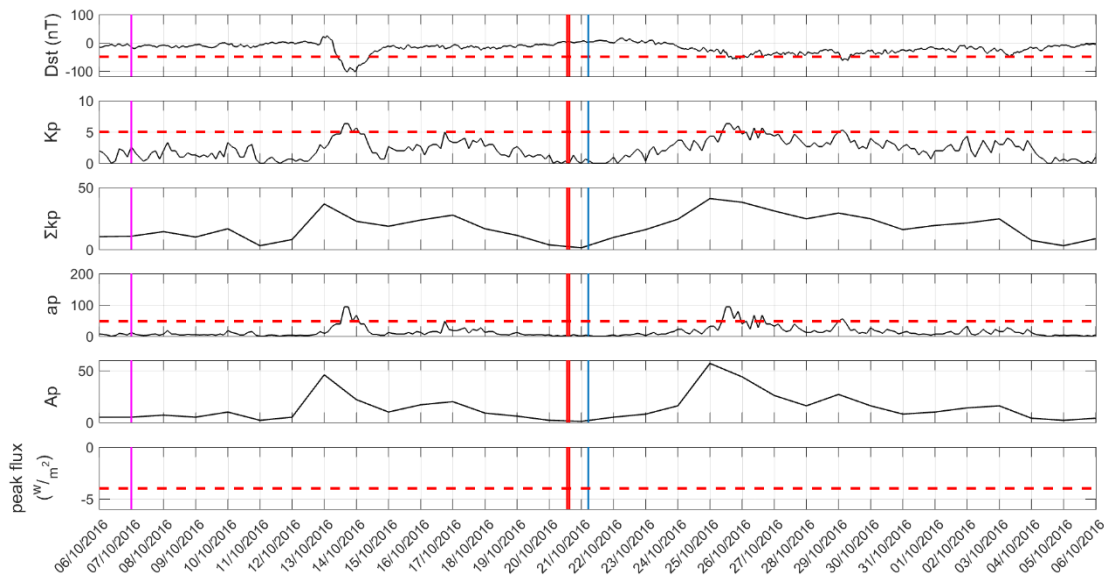
Στην συνέχεια, στο Σχήμα 22 παρουσιάζονται οι γεωμαγνητικοί δείκτες Dst (nT), Kp, ΣKp, ap, Ap καθώς και στο έκτο πάνελ η ένταση των ηλιακών καταιγίδων (100 to 800 picometer X-rays peak flux) για τον σεισμό Shizunai (βλ. Πίνακα 2,3) στην υποϊονοσφαιρική διάδοση JJI-NSB. Όπως φαίνεται από την εικόνα στις 14/01/2016 φαίνεται ο σεισμός Shizunai (μπλέ κατακόρυφη γραμμή), ενώ στις 11/01/2016 παρουσιάζεται (διπλή κόκκινη κατακόρυφη γραμμή) το πρώτο κρίσιμο παράθυρο ~ 3 μέρες, πριν το σεισμικό γεγονός. Ακόμα παρατηρείται μία μαγνητική καταιγίδα η οποία σημειώνεται στις 20/01/2016, ~ 9 μέρες μετά το κρίσιμο παράθυρο, με ελάχιστο (Dst -93 nT), καθώς τις ημερομηνίες 16-18/01/2016 βρέθηκαν κρίσιμα παράθυρα που πιθανόν ανήκει στη μαγνητική καταιγίδα, καθώς επίσης μετά το κρίσιμο παράθυρο αυτό δεν βρέθηκε άλλο κρίσιμο παράθυρο. Το κρίσιμο παράθυρο της 11/01/2016, πιθανόν να οφείλεται στον σεισμό ή την μαγνητική καταιγίδα. Βέβαια λόγω του μικρότερου χρονικού διαστήματος μεταξύ κρίσιμου παραθύρου και σεισμικού γεγονότος, πιθανόν να ανήκει στον σεισμό.

Επιπρόσθετα μία άλλη μαγνητική καταιγίδα με ελάχιστο Dst (-108 nT) εντοπίζεται την 01/01/2016 και μια ηλιακή έκλαμψη τύπου M (βλ. Πίνακα 3) στις 02/01/2016, ενώ κρίσιμο παράθυρο βρέθηκε στις 31/12/2015, και μάλλον θεωρείται πρόδρομος και των δύο φαινομένων. Το κρίσιμο παράθυρο της 31/12/2015 πιθανόν δεν σχετίζεται με το κρίσιμο παράθυρο της 11/01/2016 που αφορά το σεισμικό γεγονός, λόγω του μεγάλου χρονικού διαστήματος μεταξύ των δύο ημερομηνιών.



Σχήμα 22: Το σχήμα δείχνει τους γεωμαγνητικούς δείκτες Dst, Kp, ΣKp, ap, Ap και την ένταση της ηλιακής έκλαμψης ($100 \text{ to } 800 \text{ picometer X-rays peak flux } \frac{W}{m^2}$) στο μονοπάτι (path) JJI-NSB σε διάρκεια μέρες από την εμφάνιση του σεισμικού γεγονότος Shizunai (μπλε κατακόρυφη γραμμή στα έξι πάνελ). Η διπλή κόκκινη γραμμή στα έξι πάνελ αναφέρεται χρονικά στο πρώτο κρίσιμο παράθυρο που εντοπίστηκε (βλ. Πίνακα 3). Οι ηλιακές καταιγίδες διακρίνονται με αστέρι. Στις καμπύλες Dst, Kp, ap υπάρχει οριζόντια κόκκινη διακεκομμένη (όριο) εκδήλωσης μαγνητικής καταιγίδας.

Τελευταία περίπτωση στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται οι γεωμαγνητικοί δείκτες Dst (nT), Kp, ΣKp, ap, Ap καθώς και στο έκτο πάνελ η ένταση των ηλιακών καταιγίδων ($100 \text{ to } 800 \text{ picometer X-rays peak flux}$) για τον σεισμό Kurayoshi όπου συνέβη στις 28/10/2016 (μπλέ κατακόρυφη γραμμή, βλ. Πίνακα 2) στην υποϊονοσφαιρική διάδοση JJI-AKT. Όπως παρατηρείται από το Σχήμα 23 δεν υπάρχει κάποια μαγνητική καταιγίδα μετά το κρίσιμο παράθυρο στις 20/10/2016 (διπλή κόκκινη κατακόρυφη γραμμή, βλ. Πίνακα 3). Την ημερομηνία 14/10/2016 βρίσκεται μία μαγνητική καταιγίδα η οποία έχει ελάχιστο (Dst - 104 nT), καθώς επίσης τις ημερομηνίες 10-12/10/2016, εντοπίστηκαν κρίσιμα παράθυρα που πιθανόν οφείλονται στην μαγνητική καταιγίδα και τον σεισμό. Τέλος δεν έχει εντοπιστεί κάποιο κρίσιμο παράθυρο το χρονικό διάστημα των 15 ημερών μετά από τον σεισμό.



Σχήμα 23: Το σχήμα δείχνει τους γεωμαγνητικούς δείκτες Dst, Kp, ΣKp, ap, Ap και την ένταση της ηλιακής έκλαμψης (100 to 800 picometer X-rays peak flux $\frac{W}{m^2}$) στο μονοπάτι (path) JJI-AKT σε διάρκεια μέρες από την εμφάνιση του σεισμικού γεγονότος Takanahe (μπλε κατακόρυφη γραμμή στα έξι πάνελ). Η διπλή κόκκινη γραμμή στα έξι πάνελ αναφέρεται χρονικά στο πρώτο κρίσιμο παράθυρο που εντοπίστηκε (βλ. Πίνακα 3). Οι ηλιακές καταιγίδες διακρίνονται με αστέρι. Στις καμπύλες Dst, Kp, ap υπάρχει οριζόντια κόκκινη διακεκομμένη (όριο) εκδήλωσης μαγνητικής καταιγίδας. Η μωβ (magenta) κατακόρυφη γραμμή και στα 6 πάνελ αναφέρεται χρονικά στην έκρηξη του ηφαιστείου Asonan με VEI = 3 (Volcanic Eruption Index) στις 10/07/2016.

Γενικά από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3, της εφαρμογής της μεθόδου της MCF σε αυτά τα υποϊονοσφαιρικά δεδομένα, παίρνοντας υπόψη τον Πίνακα 2 με τους σεισμούς αλλά και όλα τα ακραία φαινόμενα που συνέβησαν χρονικά κοντά με κάποια από τα σεισμικά γεγονότα, μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Τουλάχιστον ένα κρίσιμο παράθυρο (CW) βρέθηκε πριν από κάθε σεισμό. Στις περισσότερες περιπτώσεις περισσότερα κρίσιμα παράθυρα βρέθηκαν. Μόνο σε δύο περιπτώσεις δεν ανιχνεύθηκε κρίσιμη δυναμική, λόγω της απουσίας “stationarity” (σταθερότητας) του μέρους του σήματος, αναζητώντας από 1 έως 15 μέρες πριν τον σεισμό.
- Σε κάθε περίπτωση του Πίνακα 3, για το κοντινότερο διάστημα που βρέθηκε κρίσιμο παράθυρο είναι από 1 μέρα έως 9 μέρες πριν τον σεισμό. Στις περισσότερες από αυτές τις περιπτώσεις το διάστημα είναι από 1 έως 2 μέρες πριν τον σεισμό.
- Στις περιπτώσεις όπου δεν υπήρχαν ακραία φαινόμενα μετά από σεισμικά γεγονότα, δεν εντοπίστηκε κρίσιμο παράθυρο (CW).
- Στις περιπτώσεις όπου υπήρχαν ακραία φαινόμενα μετά από σεισμικά γεγονότα, εντοπίστηκε μόνο τουλάχιστον ένα κρίσιμο παράθυρο πριν από σεισμό και τουλάχιστον ένα κρίσιμο παράθυρο πριν από ακραίο φαινόμενο. Μετά από ακραία φαινόμενα κανένα κρίσιμο παράθυρο δεν εντοπίστηκε.

- Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 (με τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία) δεν υπάρχει κάποια κατηγοριοποίηση του εκθέτη p_2 , για τα κρίσιμα παράθυρα πριν τον σεισμό, ώστε να εξεταστεί το ενδεχόμενο μέγεθος του σεισμού να εξαρτάται από την τιμή του εκθέτη. Επιπλέον δεν προκύπτει (με τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία) κάποια κατηγοριοποίηση σχετικά με το χρόνο που εμφανίζεται ένα κρίσιμο παράθυρο (CW) πριν από ένα σεισμικό γεγονός σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού. Από την άλλη βέβαια ο εντοπισμός ενός κρίσιμου παραθύρου εντός 15 ημερών πριν από ακραία φαινόμενα (και σεισμοί), στις περιπτώσεις όπου τουλάχιστον δύο ή παραπάνω ακραία φαινόμενα (και σεισμοί) συμβαίνουν σε σύντομη χρονική ακολουθία, δεν μπορεί να εξαχθεί συγκεκριμένα η συσχέτιση του κρίσιμου παραθύρου (CW) με οποιοδήποτε από αυτά τα φαινόμενα ξεχωριστά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Λειτουργία δέκτη VLF (callsign: UWA)

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή του σταθμού-δέκτη VLF (call sign: UWA), που βρίσκεται εντός του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών μηχανικών στο χώρο του Εργαστηρίου Τεχνολογιών Ηλεκτρονικής και Υπολογιστών και συγκεκριμένα στον εργαστηριακό χώρο της Ομάδας Ψηφιακής Επεξεργασίας Σήματος και Οπτικοακουστικών Τεχνολογιών (αίθουσα ZB103). Η λειτουργία του δέκτη VLF (έως 40 kHz) η οποία έχει ολοκληρωθεί κατασκευαστικά σε όλα τα περιφερειακά του τμήματα (κεραίες, προενισχυτής, δέκτης, Η/Υ) (βλ. Σχήμα 24, 25, 26). Η εγκατάσταση έγινε στην ταράτσα του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών μηχανικών. Τοποθετήθηκαν αρχικά οι βάσεις στήριξης του εξοπλισμού για να μπορέσουν να τοποθετηθούν οι δύο κεραίες GPS και VLF (Σχήμα 25). Επιπλέον τοποθετήθηκε ο προενισχυτής της κεραίας δίπλα στη κεραία VLF (Σχήμα 25). Τρία καλώδια GND(γείωση), VLF (LAN καλώδιο) και GPS (ομοαξονικό), συνδέονται με τον δέκτη (Σχήμα 24, 25, 26) από την ταράτσα προς το εργαστήριο (ZB103), καθώς η ρίψη τους έχει γίνει από ψηλά προς τα κάτω. Η είσοδος τους έχει γίνει από το παράθυρο. Οι συνδέσεις είναι αυτές που φαίνονται στο Σχήμα 26 αντίστοιχα, καθώς και η ανεξάρτητη γείωση του δέκτη, η οποία έχει εγκατασταθεί ώστε να μπορούν να αποφεύγονται ηλεκτρονικές παρεμβολές (θόρυβος).

Επιπλέον έχει γίνει η εγκατάσταση του λογισμικού UltraMSK, όπου χρησιμοποιείται για να μπορεί ο δέκτης να ανιχνεύει σήμα από πομπούς VLF[64] το οποίο έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα από μια ροή πολλών καναλιών ταυτόχρονα. Συγκεκριμένα το λογισμικό διαβάζει από την κάρτα ήχου του υπολογιστή (Σχήμα 25, 26) μέσω ενός καλωδίου τύπου (jack), ο οποίος εκτελείται σε λογισμικό Linux (Fedora). Στο λογισμικό ορίζεται η συχνότητα του κάθε πομπού (κανάλι), το Baudrate, την διαμόρφωση του σήματος (ASK, MSK, FSK κ.λ.π.) καθώς και το όνομα του κάθε πομπού που απαρτίζεται από τρία γράμματα και λέγεται Call-Sign.

Η εκτέλεση του λογισμικού γίνεται με μία εντολή στο terminal του Linux όπου αποθηκεύονται οι σταθμοί (πομποί) και γίνεται παράλληλη λήψη αυτών, καθώς επίσης ορίζεται το όνομα και την θέση του αρχείου. Τα δεδομένα αποθηκεύονται σε txt αρχεία, είναι μεγάλης διάρκειας και περιέχουν το πλάτος (σε dB) και την φάση σε (degrees) καθώς και χρονική σφραγίδα σε δευτερόλεπτα μετρώντας από τα μεσάνυχτα και μηδενίζοντας στο επόμενο 24 ώρο, που μπορεί όμως να μετατραπεί σε πραγματικό χρόνο UTC (ημερομηνία ώρες-λεπτά-δευτερόλεπτα) μέσω του software. Όλα τα δεδομένα θα μπορούν να μεταφορτωθούν online, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια δεδομένων λόγω του υπολογιστή.

Στο Σχήμα 27 παρουσιάζεται το σχηματικό του δέκτη-σταθμού, καθώς επίσης ο χάρτης με υποψήφιους πομπούς (βλ. Σχήμα 28, Πίνακα 4), όπου η λειτουργία τους είναι δοκιμαστική. Το κύριο κριτήριο μεταξύ σταθμού-δέκτη (UWA) και πομπών είναι να καλύπτεται όσο το δυνατό μεγαλύτερη επιφάνεια του Ελλαδικού χώρου από τις περιοχές που περικλείονται από την 5η ζώνη Fresnel (της διάδοσης μεταξύ κάθε πομπού και του δέκτη). Οι συχνότητες που επιλέγονται βρίσκονται στην περιοχή από (10 kHz έως 40 kHz) καθώς και διαμορφώσεις τύπου FSK, MSK. Επιπλέον εξετάζεται το ενδεχόμενο προσθήκης μίας μονάδας ενίσχυσης, επειδή τα περισσότερα σήματα που παρατηρούνται είναι της τάξης των -60 dB, καθώς επίσης και μιας (dummy) συχνότητας (κανάλι) για την παρατήρηση του ηλεκτρονικού θορύβου.



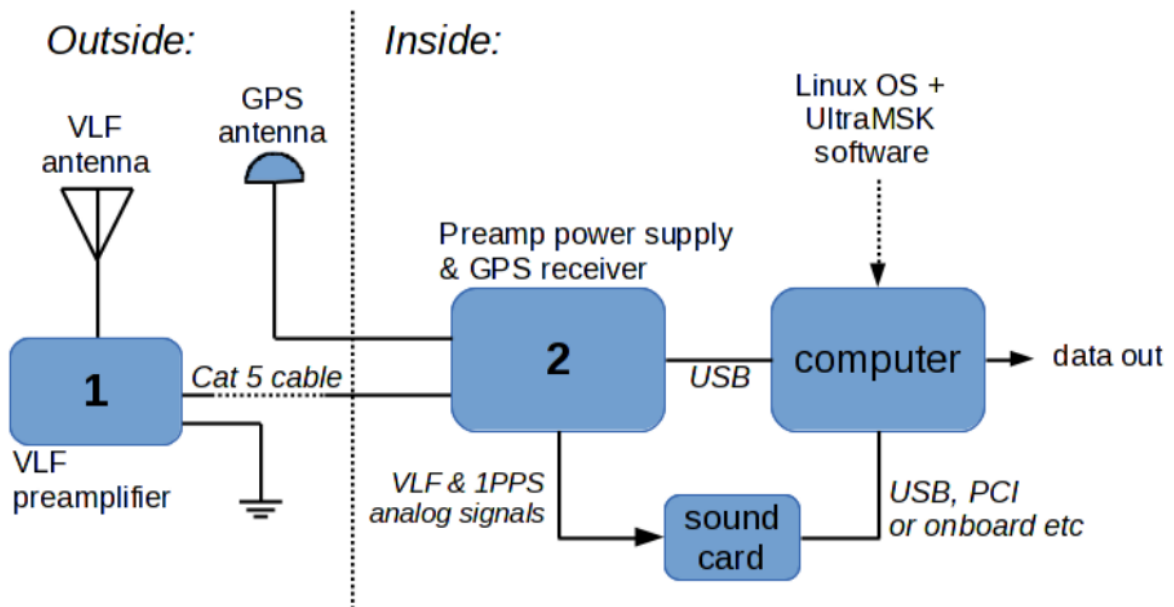
Σχήμα 24: Εγκατάσταση σταθμού VLF UWA στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (ταράτσα κτιρίου Z): κεραία VLF μαζί με τον προενισχυτή της και την κεραία GPS.



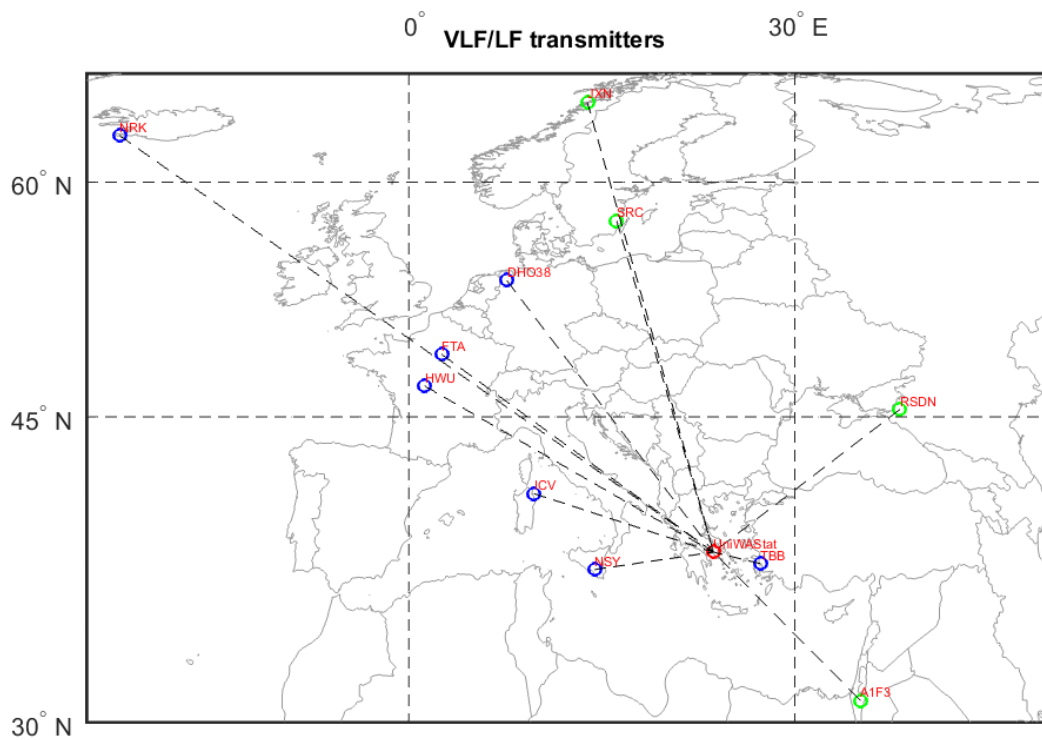
Σχήμα 25: Εγκατάσταση σταθμού VLF UWA στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (αίθουσα ZB103): ο δέκτης μαζί με τις εισόδους (VLF, GPS) και την έξοδο προς την κάρτα ήχου.



Σχήμα 26: Εγκατάσταση σταθμού VLF UWA στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής (αίθουσα ZB103): ο δέκτης συνδεδεμένος με τον υπολογιστή (με λειτουργικό Linux) στον οποίο γίνεται η εγκατάσταση δοκιμαστικής έκδοσης του λογισμικού UltraMSK που τον ελέγχει και αποκτά τις μετρήσεις



Σχήμα 27:Block διάγραμμα αναπαράστασης ενός τυπικού δέκτη VLF που χωρίζεται: (α) στο εξωτερικό μέρος (εκτός του κτιρίου), με την κεραία VLF, τον προενισχυτή και την κεραία GPS και (β) στο εσωτερικό (εντός του κτιρίου), με το δέκτη στον οποίο συνδέονται τρία καλώδια από έξω (GND, GPS, VLF antenna). Τα δεδομένα στέλνονται στην κάρτα ήχου του υπολογιστή. Ο υπολογιστής χρησιμοποιεί λειτουργικό Linux όπου τρέχει το λογισμικό UltraMsk [64] σε terminal.



Σχήμα 28: Ο ευρωπαϊκός χάρτης με τους πομπούς που αυτή τη στιγμή παρακολουθούνται από το δέκτη UWA. Με μπλε χρώμα είναι οι πομποί που παρακολουθούνται από το δίκτυο INFREP (International Network for Frontier Research on Earthquake Precursors) και με πράσινο εκτός του συγκεκριμένου δικτύου.

Call-name	Area	Frequency (kHz)	Coordinates (Lat.,Long.)
NAA	Cutler (USA)	24	44.64639, -67.281069
FTA	Sainte-Assise (France)	20.90	48.544722, 2.578333
ICV	Isola di travolara (Italy)	20.3	9.731000,40.923133
JXN	Gildeskål/Novik(Norway)	16,4	66.982778,13.873056
NSY	Niscemi (Italy)	45,90	37.125658,14.436350
DHO38	Rhauderfehn(Germany)Marinefunksendestelle	23,4	53.081944,7.616389
TBB	Denizköy-Bafa (Turkey)	26,70	37.412722,27.323347
SHR	Ruda (Sweeden)	38	57.120328,16.153083
NRK	Grindavík (Iceland)	37.5	63.850378,-
ISR	Negev Desert (Israel)	29,7	30.969167,35.095556
RSDN-	Revda (Russia)	11.9/20.9/21.75	68.036667,34.679167
HWU	Rosnay(France)	18,30/20,9/21,75/22.6	46.713056, 1.244444

Πίνακας 4: Πληροφορίες που αφορούν το call name, την περιοχή εγκατάστασης και την συχνότητα των πομπών που αυτή τη στιγμή παρακολουθούνται από το δέκτη UWA.

Συμπεράσματα-Μελλοντικές Προτάσεις Έρευνας

Σε αυτή τη διπλωματική εργασία και συγκεκριμένα στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των αναλύσεων των δεδομένων VLF/LF υποϊονοσφαιρικής διάδοσης των 8 σταθμών-δεκτών του Ιαπωνικού δικτύου από με τον πομπό JJI για το διάστημα από 1/1/2014 έως 28/2/2017, καλύπτοντας την ευρύτερη περιοχή της Ιαπωνίας, και για σεισμούς με μέγεθος $M \geq 5.5$ που το επίκεντρό τους βρισκόταν εντός της 5^{ης} ζώνης Fresnel, μεταξύ του πομπού JJI και κάθε δέκτη (υποϊονοσφαιρικό μονοπάτι). Χρησιμοποιώντας την μέθοδο MCF βρέθηκαν υποϊονοσφαιρικές ανωμαλίες (υπογραφές), στο διάστημα από 1 έως και 15 ημέρες πριν το κάθε σεισμό, αναλύοντας για κάθε υποϊονοσφαιρικό μονοπάτι που βρισκόταν το επίκεντρο του κάθε σεισμού. Στις αναλύσεις συμπεριλήφθηκαν και οι σεισμοί του Kumamoto 2016 από προηγούμενη έρευνα [14].

Κατά την προσπάθεια ανάλυσης διαπιστώθηκε ότι πολλά από τα σήματα σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους εμφάνιζαν τεχνητούς παλμούς επί των οποίων εμφανίζονταν οι χρήσιμες φυσικές διακυμάνσεις του σήματος λήψης. Στις περιπτώσεις αυτές για την ανάλυση απομονώθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν οι διακυμάνσεις των υψηλών επιπέδων των παλμών. Λόγω διαφορετικής κεραίας που φιλτράρει τους πιο πάνω τεχνητούς παλμούς τα σήματα από τον σταθμό NSB δε χρειάστηκαν την πιο πάνω προ-επεξεργασία. Από την άλλη πλευρά, λόγω εξομάλυνσης των φυσικών διακυμάνσεων από το φιλτράρισμα της κεραίας αποδείχθηκε αναγκαίο να προστεθεί μικρό ποσό ομοιόμορφου στοχαστικού θορύβου, που αντιστοιχεί στην παράμετρο μετατόπισης για τη δημιουργία της εργοδικότητας. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων έδειξαν ότι από τους 15 σεισμούς που μελετήθηκαν ανιχνεύεται κρίσιμη δυναμική στα σήματα υποϊονοσφαιρικής διάδοσης πριν από όλες τις περιπτώσεις και σε όλα τα path, εκτός από δύο path για τα οποία το σήμα δεν ήταν δυνατό να αναλυθεί λόγω απουσίας stationarity, η οποία είναι προϋπόθεση για την εφαρμογή της MCF (βλ. Πίνακα 3).

Από τα αποτελέσματα του Πίνακα 3 επιβεβαιώνει για κάθε μια ανάλυση ότι οι διακυμάνσεις των υποϊονοσφαιρικών δεδομένων (χρονοσειρών) παρουσιάζουν κρισιμότητα και κατά συνέπεια μία δεύτερης τάξης αλλαγής φάσης σε ισορροπία, σε μια περίοδο 2 εβδομάδων περίπου πριν το σεισμικό γεγονός. Όπως φαίνεται από τις αναλύσεις των υποϊονοσφαιρικών δεδομένων VLF/LF, δεν υπήρξε καμία περίπτωση που να μην ανιχνεύθηκε κρίσιμη δυναμική πριν το ακραίο γεγονός, δηλαδή η μέθοδος MCF δεν οδηγεί σε “false negative” αποτελέσματα. Ωστόσο στις περιπτώσεις που τουλάχιστον δύο ή περισσότερα ακραία φαινόμενα (και σεισμούς) υπήρχαν σε χρονική ακολουθία και πριν είχε βρεθεί κρίσιμο παράθυρο, ήταν αδύνατο να διακριθεί σε κάποιο από αυτά τα φαινόμενα αντιστοιχούσε η ανιχνευθείσα κρίσιμη δυναμική.

Για αυτό το λόγο υπάρχει η ανάγκη στο μέλλον να γίνει όσο το δυνατόν “αυτοματοποίηση” της μεθόδου MCF ώστε να αναλυθούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Έτσι θα αποκτηθούν περισσότερα αποτελέσματα αναλύσεων που πιθανόν να επιτρέψουν κάποια κατηγοριοποίηση που στη συνέχεια ενδέχεται να επιτρέψει την ταυτοποίηση της αιτίας των ενδείξεων κρίσιμης δυναμικής στις ιονοσφαιρικές διακυμάνσεις μεταξύ των ακραίων φαινομένων που επηρεάζουν την ιονόσφαιρα (σεισμοί, μαγνητικές καταιγίδες, ηλιακές εκλάμψεις, εκρήξεις ηφαιστειών). Αυτό θα

επέτρεπε να απομονωθούν οι διαταραχές που σχετίζονται με σεισμούς και έτσι να αυξηθεί η βεβαιότητα εκτίμησης σεισμικού κινδύνου, αν όχι πρόβλεψης επερχόμενου σεισμού. Προς την ίδια κατεύθυνση δέον είναι να εφαρμοστούν και άλλες μέθοδοι ανάλυσης όπως συμβατική μέθοδος νυχτερινών διακυμάνσεων (NFM) [7], καθώς στη συνέχεια μπορεί να εφαρμοστεί επάνω σε αυτή τη μέθοδο και η μέθοδος φυσικού χρόνου (NT) [29,30], ώστε να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των αναλύσεων της MCF. Επιπρόσθετα μπορεί να γίνει έρευνα και σύγκριση με τις VLF/LF αναλύσεις από άλλες ηλεκτρομαγνητικές παρατηρήσεις που σχετίζονται με σεισμούς, καθώς και αναλύσεις σεισμικής δραστηριότητας (χρονικής ακολουθίας) μέσα σε μια συγκριμένη γεωγραφική περιοχή που προσδιορίζεται από σεισμοτεκτονική οριοθέτηση [20]. Τέλος γίνεται προσπάθεια αξιοποίησης της λειτουργίας του σταθμού-δέκτη UWA VLF/LF ώστε να συμβάλει στη μελέτη του Ελλαδικού χώρου σε πρόδρομες παρατηρήσεις υποϊονοσφαιρικών ανωμαλιών (υπογραφών) πριν από σεισμούς.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ – ΠΗΓΕΣ

Βιβλιογραφία στα Ελληνικά

Σημειώσεις μαθήματος Πολύπλοκων Συστημάτων

Βιβλιογραφία στα Αγγλικά

1. Hayakawa, M. *Earthquake prediction with radio techniques*; John Wiley & Sons: Singapore ; Hoboken, NJ, 2015; ISBN 978-1-118-77037-5.
2. Molchanov, O.A.; 早川正士 *Seismo-electromagnetics and related phenomena: history and latest results*; Terrapub: Tokyo, 2008; ISBN 978-4-88704-143-1.
3. Uyeda, S. On Earthquake Prediction in Japan. *Proceedings of the Japan Academy, Series B* **2013**, *89*, 391–400.
4. Uyeda, S.; Nagao, T.; Kamogawa, M. Short-term earthquake prediction: Current status of seismo-electromagnetics. *Tectonophysics* **2009**, *470*, 205–213.
5. *Pre-earthquake processes: a multidisciplinary approach to earthquake prediction studies*; Ouzounov, D., Pulinets, S., Hattori, K., Taylor, P., Eds.; Geophysical monograph; John Wiley & Sons, Inc: Hoboken, NJ, 2018; ISBN 978-1-119-15693-2.
6. Hayakawa, M.; Asano, T.; Rozhnoi, A.; Solovieva, M. Very-Low- to Low-Frequency Sounding of Ionospheric Perturbations and Possible Association with Earthquakes. In *Geophysical Monograph Series*; Ouzounov, D., Pulinets, S., Hattori, K., Taylor, P., Eds.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2018; pp. 275–304 ISBN 978-1-119-15694-9.
7. Hayakawa, M. Probing the lower ionospheric perturbations associated with earthquakes by means of subionospheric VLF/LF propagation. *Earthq Sci* **2011**, *24*, 609–637.
8. HAYAKAWA, M. The precursory signature effect of the Kobe earthquake on VLF subionospheric signals. *J. Comm. Res. Lab.* **1996**, *43*, 169–180.
9. Pulinets, S.; Ouzounov, D. Lithosphere–Atmosphere–Ionosphere Coupling (LAIC) model – An unified concept for earthquake precursors validation. *Journal of Asian Earth Sciences* **2011**, *41*, 371–382.
10. LIU, J.Y. Earthquake precursors observed in the ionospheric F-region. *Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes* **2009**, 187–204.
11. Hayakawa, M.; Kasahara, Y.; Nakamura, T.; Muto, F.; Horie, T.; Maekawa, S.; Hobara, Y.; Rozhnoi, A.; Solovieva, M.; Molchanov, O. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* **2011**, *115*.
12. Rozhnoi, A.; Solovieva, M.; Hayakawa, M. VLF/LF signals method for searching of electromagnetic earthquake precursors. *Earthquake Prediction Studies: Seismo Electromagnetics* **2013**, 31–48.
13. Rozhnoi, A.; Solovieva, M.; Levin, B.; Hayakawa, M.; Fedun, V. Meteorological effects in the lower ionosphere as based on VLF/LF signal observations. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2014**, *14*, 2671–2679.
14. Potirakis, S.M.; Contoyiannis, Y.; Asano, T.; Hayakawa, M. Intermittency-induced criticality in the lower ionosphere prior to the 2016 Kumamoto earthquakes as embedded in the VLF propagation data observed at multiple stations. *Tectonophysics* **2018**, *722*, 422–431.
15. Contoyiannis, Y.; Potirakis, S.M.; Eftaxias, K.; Hayakawa, M.; Schekotov, A. Intermittent criticality revealed in ULF magnetic fields prior to the 11 March 2011 Tohoku earthquake ($M_W = 9$). *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* **2016**, *452*, 19–28.

16. Potirakis, S.; Schekotov, A.; Contoyiannis, Y.; Balasis, G.; Koulouras, G.; Melis, N.; Boutsis, A.; Hayakawa, M.; Eftaxias, K.; Nomicos, C. On Possible Electromagnetic Precursors to a Significant Earthquake (Mw = 6.3) Occurred in Lesvos (Greece) on 12 June 2017. *Entropy* **2019**, *21*, 241.
17. Contoyiannis, Y.F.; Diakonos, F.K.; Kapiris, P.G.; Peratzakis, A.S.; Eftaxias, K.A. Intermittent dynamics of critical pre-seismic electromagnetic fluctuations. *Physics and Chemistry of the Earth* **2004**, *29*, 397–408.
18. Contoyiannis, Y.F.; Kapiris, P.G.; Eftaxias, K.A. Monitoring of a preseismic phase from its electromagnetic precursors. *Physical Review E* **2005**, *71*.
19. Potirakis, S.M.; Contoyiannis, Y.; Eftaxias, K.; Koulouras, G.; Nomicos, C. Recent Field Observations Indicating an Earth System in Critical Condition Before the Occurrence of a Significant Earthquake. *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* **2015**, *12*, 631–635.
20. Potirakis, S.M.; Contoyiannis, Y.; Melis, N.S.; Kopanas, J.; Antonopoulos, G.; Balasis, G.; Kontoes, C.; Nomicos, C.; Eftaxias, K. Recent seismic activity at Cephalonia (Greece): a study through candidate electromagnetic precursors in terms of non-linear dynamics. *Nonlinear Processes in Geophysics* **2016**, *23*, 223–240.
21. Contoyiannis, Y.F.; Potirakis, S.M.; Eftaxias, K. The Earth as a living planet: human-type diseases in the earthquake preparation process. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2013**, *13*, 125–139.
22. Kosmidis, E.K.; Contoyiannis, Y.F.; Papatheodoropoulos, C.; Diakonos, F.K. Traits of criticality in membrane potential fluctuations of pyramidal neurons in the CA 1 region of rat hippocampus. *Eur J Neurosci* **2018**, *48*, 2343–2353.
23. Contoyiannis, Y.F.; Diakonos, F.K.; Papaefthimiou, C.; Theophilidis, G. Criticality in the Relaxation Phase of a Spontaneously Contracting Atria Isolated from a Frog's Heart. *Phys. Rev. Lett.* **2004**, *93*, 098101.
24. Ozun, A.; Contoyiannis, Y.F.; Diakonos, F.K.; Haniyas, M.; Magafas, L. Intermittency in Stock Market Dynamics. *JOT* **2014**, *9*, 34–41.
25. Hayakawa, M.; Kasahara, Y.; Nakamura, T.; Muto, F.; Horie, T.; Maekawa, S.; Hobara, Y.; Rozhnoi, A.A.; Solovieva, M.; Molchanov, O.A. A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes: SEISMO-IONOSPHERIC PERTURBATIONS. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **2010**, *115*, n/a-n/a.
26. Rozhnoi, A.; Solovieva, M.S.; Molchanov, O.A.; Hayakawa, M. Middle latitude LF (40 kHz) phase variations associated with earthquakes for quiet and disturbed geomagnetic conditions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2004**, *29*, 589–598.
27. Maekawa, S.; Horie, T.; Yamauchi, T.; Sawaya, T.; Ishikawa, M.; Hayakawa, M.; Sasaki, H. A statistical study on the effect of earthquakes on the ionosphere, based on the subionospheric LF propagation data in Japan. *Annales Geophysicae* **2006**, *24*, 2219–2225.
28. Kasahara, Y.; Muto, F.; Horie, T.; Yoshida, M.; Hayakawa, M.; Ohta, K.; Rozhnoi, A.; Solovieva, M.; Molchanov, O.A. On the statistical correlation between the ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation anomalies and earthquakes. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2008**, *8*, 653–656.
29. Potirakis, S.; Asano, T.; Hayakawa, M. Criticality Analysis of the Lower Ionosphere Perturbations Prior to the 2016 Kumamoto (Japan) Earthquakes as Based on VLF Electromagnetic Wave Propagation Data Observed at Multiple Stations. *Entropy* **2018**, *20*, 199.
30. Varotsos, P.; Sarlis, N.V.; Skordas, E.S. *Natural time analysis: the new view of time: precursory seismic electric signals, earthquakes and other complex time series*; Springer Praxis books; Softcover reprint of the hardcover 1st ed. 2011.; Springer: Berlin, 2011; ISBN 978-3-642-16449-1.
31. Potirakis, S.M.; Karadimitrakis, A.; Eftaxias, K. Natural time analysis of critical phenomena: The case of pre-fracture electromagnetic emissions. *Chaos* **2013**, *23*, 023117.

32. Potirakis, S.M.; Schekotov, A.; Asano, T.; Hayakawa, M. Natural time analysis on the ultra-low frequency magnetic field variations prior to the 2016 Kumamoto (Japan) earthquakes. *Journal of Asian Earth Sciences* **2018**, *154*, 419–427.
33. Schuster, H.G. *Deterministic chaos: an introduction*; 3., augm. ed.; VCH: Weinheim, 1995; ISBN 978-3-527-29315-5.
34. Huang, K. *Statistical mechanics*; 2nd ed.; Wiley: New York, 1987; ISBN 978-0-471-81518-1.
35. Contoyiannis, Y.; Potirakis, S.M.; Eftaxias, K.; Contoyianni, L. Tricritical crossover in earthquake preparation by analyzing preseismic electromagnetic emissions. *Journal of Geodynamics* **2015**, *84*, 40–54.
36. Contoyiannis, Y.F.; Diakonou, F.K. Criticality and intermittency in the order parameter space. *Physics Letters A* **2000**, *268*, 286–292.
37. Contoyiannis, Y.F.; Diakonou, F.K.; Malakis, A. Intermittent Dynamics of Critical Fluctuations. *Phys. Rev. Lett.* **2002**, *89*, 035701.
38. Diakonou, F.K.; Schmelcher, P. Turning point properties as a method for the characterization of the ergodic dynamics of one-dimensional iterative maps. *Chaos* **1997**, *7*, 239–244.
39. Contoyiannis, Y.F.; Diakonou, F.K. Unimodal maps and order parameter fluctuations in the critical region. *Phys. Rev. E* **2007**, *76*, 031138.
40. Asano, T.; Hayakawa, M. On the Tempo-Spatial Evolution of the Lower Ionospheric Perturbation for the 2016 Kumamoto Earthquakes from Comparisons of VLF Propagation Data Observed at Multiple Stations with Wave-Hop Theoretical Computations. *OJER* **2018**, *07*, 161–185.
41. Constable, C. Earth's Electromagnetic Environment. *Surveys in Geophysics* **2016**, *37*, 27–45.
42. Melia, A. Understanding LF Propagation-Alan Melia, G3NYK explains how the sun affects the LF bands. *Radcom* **2009**, *85*, 22.
43. Hayakawa, M.; Molchanov, O.A. Summary report of NASDA's earthquake remote sensing frontier project. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2004**, *29*, 617–625.
44. Hayakawa, M.; Molchanov, O.A. A and NASDA/UEC team (2004a). Achievements of NASDA's Earthquake Remote Sensing Frontier Project. *Terr Atmos Ocean* **15**, 311–328.
45. Biagi, P.F.; Righetti, F.; Maggipinto, T.; Schiavulli, L.; Ligonzo, T.; Ermini, A.; Moldovan, I.A.; Moldovan, A.S.; Silva, H.G.; Bezzeghoud, M.; et al. Anomalies Observed in VLF and LF Radio Signals on the Occasion of the Western Turkey Earthquake (Mw = 5.7) on May 19, 2011. *International Journal of Geosciences* **2012**, *03*, 856.
46. Biagi, P.F.; Maggipinto, T.; Righetti, F.; Loiacono, D.; Schiavulli, L.; Ligonzo, T.; Ermini, A.; Moldovan, I.A.; Moldovan, A.S.; Buyuksarac, A.; et al. The European VLF/LF radio network to search for earthquake precursors: setting up and natural/man-made disturbances. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2011**, *11*, 333–341.
47. Freund, F. Earthquake forewarning — A multidisciplinary challenge from the ground up to space. *Acta Geophysica* **2013**, *61*, 775–807.
48. Kuo, C.L.; Huba, J.D.; Joyce, G.; Lee, L.C. Ionosphere plasma bubbles and density variations induced by pre-earthquake rock currents and associated surface charges. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **2011**, *116*.
49. Klimenko, M.V.; Klimenko, V.V.; Zakharenkova, I.E.; Karpov, I.V. Modeling of local disturbance formation in the ionosphere electron concentration before strong earthquakes. *Earth Planet Sp* **2012**, *64*, 441–450.
50. Freund, F. Toward a unified solid state theory for pre-earthquake signals. *Acta Geophysica* **2010**, *58*, 719–766.
51. Freund, F.T.; Takeuchi, A.; Lau, B.W.S. Electric currents streaming out of stressed igneous rocks – A step towards understanding pre-earthquake low frequency EM emissions. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2006**, *31*, 389–396.
52. Korepanov, V.; Hayakawa, M.; Yampolski, Y.; Lizunov, G. AGW as a seismo-ionospheric coupling responsible agent. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* **2009**, *34*, 485–495.

53. Yampolski, Yu.M.; Zalizovski, A.V.; Litvinenko, L.M.; Lizunov, G.V.; Groves, K.; Moldwin, M. Magnetic Field Variations in Antarctica and the Conjugate Region (New England) Stimulated by Cyclone Activity. *Russian Radio Physics and Radio Astronomy* **2004**, *9*, 130.
54. FEDORENKO, A.K. Satellite observations of quasi-wave atmospheric disturbances at heights of the F region caused by powerful earthquakes. *Geomag. Aeronomy* **2005**, *45*, 403–410.
55. Galushko, V.G.; Paznukhov, V.V.; Yampolski, Y.M.; Foster, J.C. Incoherent scatter radar observations of AGW/TID events generated by the moving solar terminator. *Annales Geophysicae* **1998**, *16*, 821–827.
56. Galushko, V.G.; Beley, V.S.; Koloskov, A.V.; Yampolski, Y.M.; Paznukhov, V.V.; Reinisch, B.W.; Foster, J.C.; Erickson, P. Frequency-and-angular HF sounding and ISR diagnostics of TIDs. *Radio Science* **2003**, *38*.
57. Afraimovich, E.L.; Boitman, O.N.; Zhovty, E.I.; Kalikhman, A.D.; Pirog, T.G. Dynamics and anisotropy of traveling ionospheric disturbances as deduced from transionospheric sounding data. *Radio Science* **1999**, *34*, 477–487.
58. Afraimovich, E.L.; Kosogorov, E.A.; Lesyuta, O.S.; Ushakov, I.I. Geomagnetic Control of the Spectrum of Traveling Ionospheric Disturbances Based on Data from a Global GPS Network. *Radiophysics and Quantum Electronics* **2001**, *44*, 763–773.
59. Tsugawa, T.; Saito, A.; Otsuka, Y. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **2004**, *109*.
60. Shiokawa, K.; Ihara, C.; Otsuka, Y.; Ogawa, T. Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **2003**, *108*.
61. Omori, Y.; Yasuoka, Y.; Nagahama, H.; Kawada, Y.; Ishikawa, T.; Tokonami, S.; Shinogi, M. Anomalous radon emanation linked to preseismic electromagnetic phenomena. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2007**, *7*, 629–635.
62. Balasis, G.; Daglis, I.A.; Contoyiannis, Y.; Potirakis, S.M.; Papadimitriou, C.; Melis, N.S.; Glannakis, O.; Papaioannou, A.; Anastasiadis, A.; Kontoes, C. Observation of Intermittency-Induced Critical Dynamics in Geomagnetic Field Time Series Prior to the Intense Magnetic Storms of March, June, and December 2015. *J. Geophys. Res. Space Physics* **2018**, *123*, 4594–4613.
63. Eftaxias, K.; Potirakis, S.M.; Contoyiannis, Y. 13 - Four-Stage Model of Earthquake Generation in Terms of Fracture-Induced Electromagnetic Emissions: A Review. In *Complexity of Seismic Time Series*; Chelidze, T., Vallianatos, F., Telesca, L., Eds.; Elsevier, 2018; pp. 437–502 ISBN 978-0-12-813138-1.
64. UltraMSK Available online: <http://ultramsk.com/hardware/> (accessed on Jan 27, 2019).