



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ Θ. ΤΣΟΥΓΓΑΡΗΣ

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ
ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2019





ΓΕΩΡΓΙΟΣ ΦΙΛΙΠΠΟΣ Θ. ΤΣΟΥΓΓΑΡΗΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: 5484

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής,
Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής

Επιβλέπουσες

ΚΥΡΑΤΖΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΑ, καθ. Σεισμολογίας, ΑΠΘ
ΡΟΥΜΕΛΙΩΤΗ ΖΑΦΕΙΡΙΑ, Δρ Σεισμολόγος, επ. καθ. Πανεπ. Πατρών



© Γεώργιος ΦΙΛΙΠΠΟΣ Θ. Τσούγγαρης, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2019

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΕΝΑΝΤΙ ΣΕΙΣΜΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ – *Διπλωματική Εργασία*

© GEORGE FILIPPOS TH. TSOUNGARIS, School of Geology, Department of Geophysics, 2019

All rights reserved.

EARTHQUAKE EARLY WARNING SYSTEMS – *Bachelor Thesis*

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας 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 το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ	2
1.1 Στοιχεία θεωρίας ελαστικών κυμάτων.....	2
1.1.1 Κύματα χώρου	2
1.1.2 Επιφανειακά κύματα.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ	7
2.1 Τρόπος γένεσης επιφανειακών σεισμών	7
2.2 Τρόπος γένεσης πλουτώνιων σεισμών	7
2.3 Διάδοση στο εσωτερικό της γης.....	7
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	8
3.1 Πως λειτουργούν τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης.....	8
3.2 Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (EEW) ανά τον κόσμο	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ.....	15
4.1 Τι είναι το Presto;	15
4.1.1 Παράδειγμα 1 : 20140524_0925.....	17
4.1.2 Παράδειγμα 2 : 20131011_0515.....	22
4.1.3 Παράδειγμα 3 : 20160806_0517.....	26
4.1.4 Παράδειγμα 4 : 20180303_0525.....	31
4.1.5 Παράδειγμα 5 : 20180625_0821.....	35
4.1.6 Παράδειγμα 6 : 20180625_0820.....	39
4.2 Συμπεράσματα	42
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	43



Από την αρχή της καταγεγραμμένης ιστορίας υπάρχουν αναφορές για μεγάλες καταστροφές που συνέβησαν επειδή το έδαφος άρχισε ξαφνικά να δονείται. Πλέον ξέρουμε ότι αυτό δεν είναι κάποια υπερφυσική δύναμη αλλά μία φυσική διαδικασία. Αυτό που δεν έχει αλλάξει όμως είναι το γεγονός ότι οι υλικές καταστροφές αλλά και οι απώλειες ανθρωπίνων ζωών δύναται να είναι εξίσου τεράστιες με μακροχρόνιες συνέπειες. Η ανάπτυξη της τεχνολογίας όμως μας προσφέρει εφόδια τα οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για την προστασία τόσο δομών όσο και ζωών. Η δυνατότητα εκτίμησης του μεγέθους ενός σεισμού από τα χαρακτηριστικά του ρήγματος δίνει την δυνατότητα κατάλληλου σχεδιασμού των κτηρίων για να παραλάβουν τις δυνάμεις που θα τους ασκηθούν. Η χρονική στιγμή όμως της διάρρηξης δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια η οποία είναι μέσα σε λογικά πλαίσια. Τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης έρχονται να καλύψουν αυτό το κενό στον βαθμό που οι φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων επιτρέπουν. Τα συστήματα αυτά δύναται να εντοπίσουν την εστία ενός σεισμού, το μέγεθος του καθώς και την χρονική στιγμή που τα αποτελέσματα του θα γίνουν αισθητά στην περιοχή που μας ενδιαφέρει.

Στα παρακάτω κεφάλαια της παρούσας εργασίας θα γίνει περιγραφή των φυσικών ιδιοτήτων στις οποίες βασίζονται τα συστήματα αυτά καθώς θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έξι σεισμικών διαρρήξεων που σημειώθηκαν στον χώρο της Βορείου Ελλάδος, οι πέντε εκ των οποίων κοντά στην πόλη της Θεσσαλονίκης. Το μέγεθος αυτών των γεγονότων είναι σχετικά μικρό με εξαίρεση το παράδειγμα 1, αλλά η προσοχή μας πρέπει να στραφεί στον βαθμό της αποτελεσματικότητας εντοπισμού των εστιακών παραμέτρων των σεισμών αυτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

1.1 Στοιχεία θεωρίας ελαστικών κυμάτων

Για την μελέτη της διάδοσης των σεισμικών κυμάτων ώστε να προκύπτουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, χρειάζονται κάποιες υποθέσεις. Αυτές είναι, η συνέχεια του μέσου, η ελαστικότητα του μέσου και οι απειροστές παραμορφώσεις.

Για να θεωρηθεί ένα μέσο συνεχές γίνεται η παραδοχή ότι τα γειτονικά σημεία έχουν πολύ μικρή απόσταση μεταξύ τους ενώ η μοριακή και ατομική φύση του υλικού αγνοούνται. Η δεύτερη υπόθεση είναι ότι τα σημεία του ελαστικού μέσου επανέρχονται στην αρχική τους θέση μετά την διακοπή της δύναμης που τα επηρέασε, ενώ οι δυνάμεις αυτές προκαλούν πολύ μικρές κινήσεις μόνο. Με βάση την τελευταία αυτή παρατήρηση οδηγούμαστε στην τρίτη υπόθεση, αυτή της απειροστής παραμόρφωσης.

Κατηγορίες σεισμικών κυμάτων

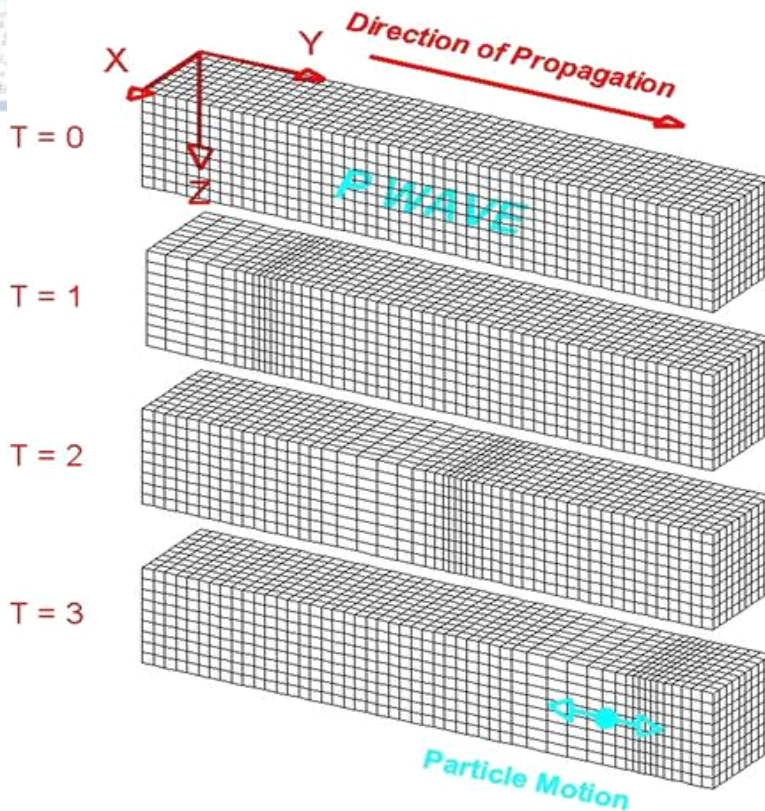
Οι 2 βασικές κατηγορίες κυμάτων που δημιουργούνται κατά την διάρρηξη των γήινων πετρωμάτων είναι τα κύματα χώρου και τα επιφανειακά κύματα.

1.1.1 Κύματα χώρου

Ως κύματα χώρου ορίζονται

α) P Κύματα

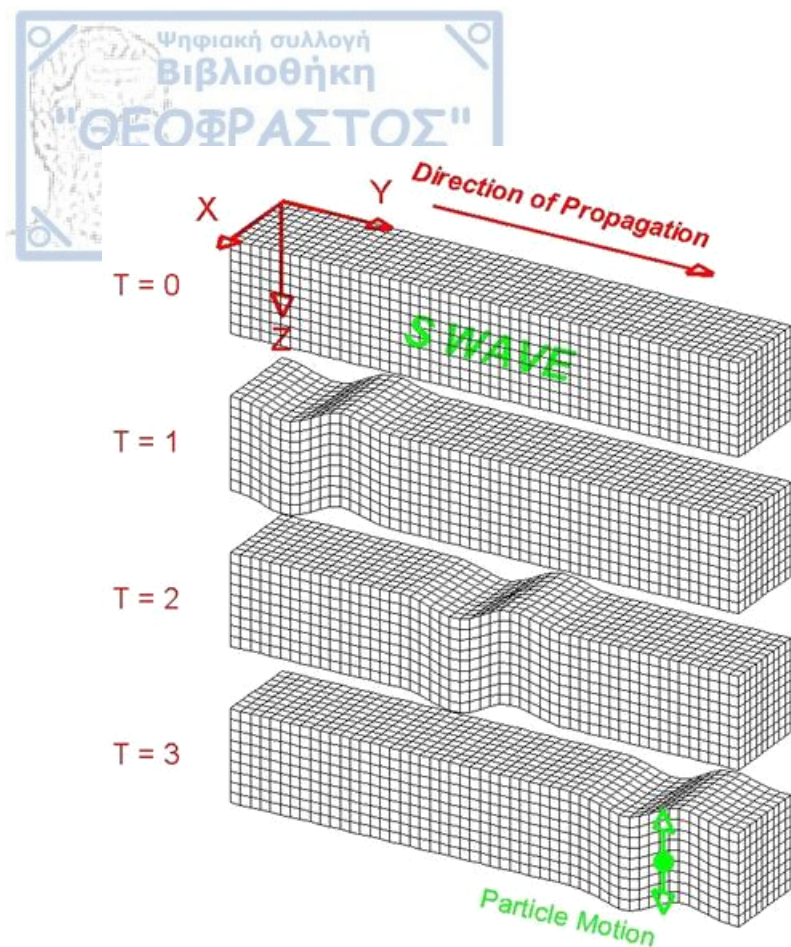
Τα επιμήκη κύματα συμβολίζονται με το γράμμα P από την αγγλική λέξη *primal*, καθώς είναι τα πρώτα κύματα τα οποία φτάνουν σε κάποιο σταθμό λόγω της μεγαλύτερης ταχύτητας διάδοσης τους. Κατά την διάδοση των P κυμάτων τα υλικά σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται παράλληλα με την διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Με αυτό τον τρόπο δημιουργούνται διαδοχικά αραιώματα και πυκνώματα. Όταν η φορά της κίνησης των υλικών σημείων συμπίπτει με την διεύθυνση διάδοσης των του κύματος έχουμε συμπίεση ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε αρραίωση (Εικ. 1).



Εικόνα 1 Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου διάδοσης των επιμήκων κυμάτων
[<http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>]

β) S Κύματα

Τα εγκάρσια κύματα συμβολίζονται με το γράμμα S από την αγγλική λέξη secondary καθώς είναι η δεύτερη κατηγορία κυμάτων που καταγράφονται σε ένα σεισμόγραμμα. Έχουν μικρότερη ταχύτητα διάδοσης από τα επιμήκη κύματα και τα υλικά σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Αν και κινούνται με μικρότερη ταχύτητα από τα επιμήκη, είναι πιο καταστροφικά καθώς έχουν μεγαλύτερα πλάτη και προκαλούν ταλαντώσεις στο κατακόρυφο και στο οριζόντιο επίπεδο ταυτόχρονα (Εικ. 2).

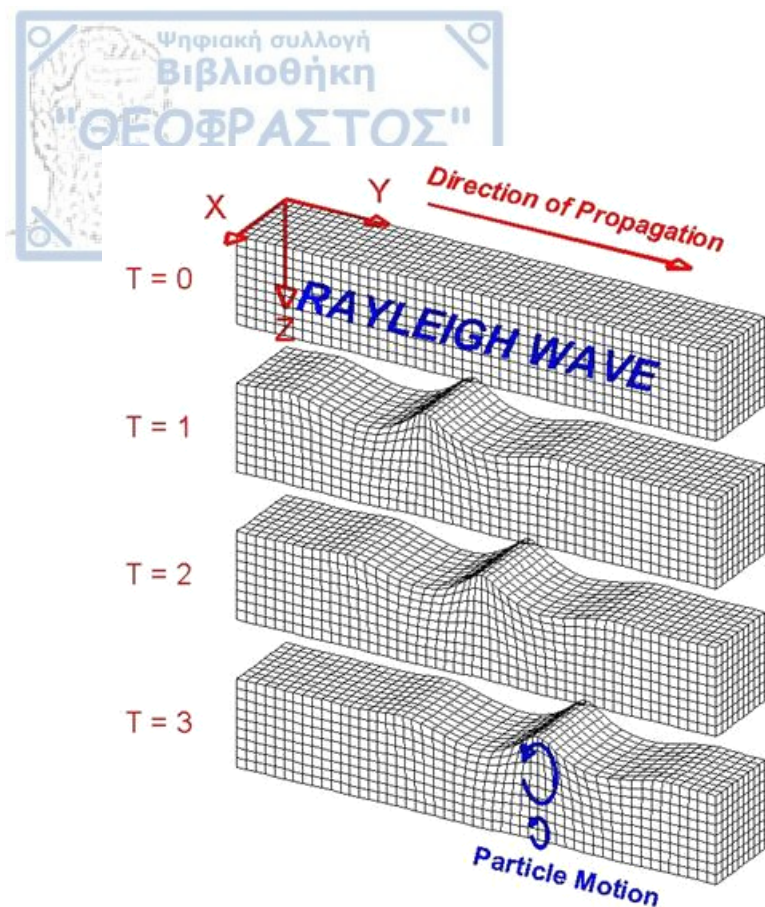


Εικόνα 2 Σχηματική αναπαράσταση του τρόπου διάδοσης των εγκάρσιων κυμάτων

1.1.2 Επιφανειακά κύματα

α) Κύματα Rayleigh

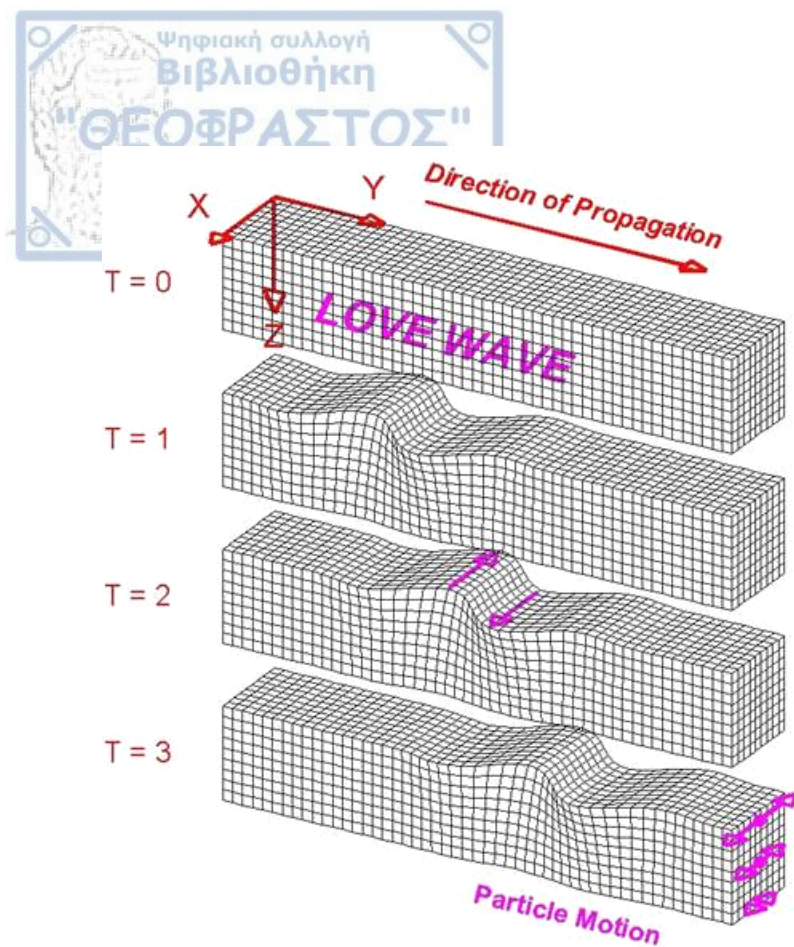
Τα υλικά σημεία του ελαστικού μέσου ταλαντώνονται σε ελλειπτικές τροχιές. Στα ανώτερα στρώματα και στο ανώτερο τμήμα της τροχιάς τα υλικά σημεία κινούνται με φορά αντίθετη από την φορά διάδοσης του κύματος ενώ σε βάθος ίσο με το μισό του μήκος κύματος τα πλάτη έχουν σχεδόν μηδενιστεί ενώ στο 0.192 του μήκους κύματος η φορά της κίνησης των σημείων είναι αντίθετη από αυτή στην επιφάνεια (Εικ. 3).



Εικόνα 3 Σχηματική αναπαράσταση της κίνησης των υλικών σημείων κατά τη διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Rayleigh.

β) Κύματα Love

Τα υλικά σημεία του ελαστικού σώματος πραγματοποιούν ταλαντώσεις κατά το οριζόντιο επίπεδο κάθετα στην διεύθυνση διάδοσης του κύματος. Όπως και σε όλα τα επιφανειακά κύματα έτσι και στην κύματα Love το πλάτος της ταλάντωσης μειώνεται κατά πολύ με την αύξηση του βάθους (Εικ. 4).



Εικόνα 4 Σχηματική αναπαράσταση των υλικών σημείων κατά την διάδοση των επιφανειακών κυμάτων Love

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΝΕΣΗ ΤΩΝ ΣΕΙΣΜΩΝ

2.1 Τρόπος γένεσης επιφανειακών σεισμών

Τα πετρώματα του φλοιού λόγω των πολύ μεγάλων ενδογενών δυνάμεων της γης που υπόκεινται, παραμορφώνονται ελαστικά κάτω το οποίο οδηγεί στην συσσώρευση ενέργειας ελαστικής παραμόρφωσης. Ως συνέπεια έχουμε αύξηση των τάσεων οι οποίες όταν υπερβούν την αντοχή του πετρώματος οδηγούν στην διάρρηξη την δημιουργία ρήγματος και την σχετική κίνηση των δύο τεμαχών. Για να έχουμε ξανά σεισμική ολίσθηση πάνω στην ίδια επιφάνεια θα πρέπει οι δυνάμεις που ασκούνται να υπερβαίνουν την στατική τριβή μεταξύ των δύο επιφανειών του ρήγματος.

2.2 Τρόπος γένεσης πλουτώνιων σεισμών

Κατά την κατάδυση των λιθοσφαιρικών πλακών αυτές διατηρούν τις ελαστικές τους ιδιότητες και έτσι είναι δυνατή η διάρρηξη τους. Αυτό υποστηρίζεται και από το γεγονός ότι η μεγάλη πλειοψηφία των πλουτώνιων σεισμών υφίστανται σε περιοχές κατάδυσης ωκεάνιων πλακών.

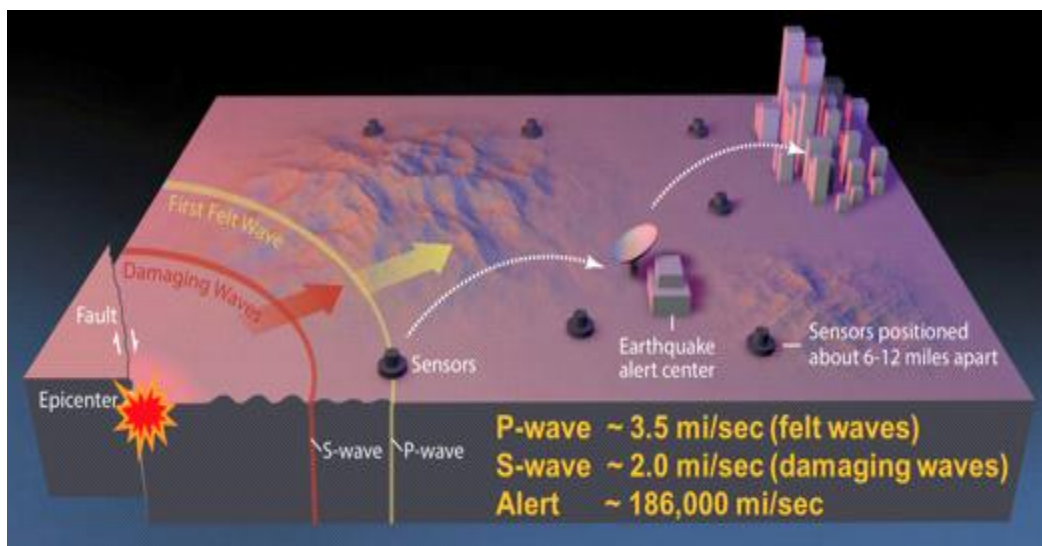
2.3 Διάδοση στο εσωτερικό της γης

Τα κύματα χώρου είναι τα μόνα που έχουν την δυνατότητα να ταξιδεύουν στο εσωτερικό της γης. Τα επιμήκη κύματα έχουν την δυνατότητα να κινούνται σε υγρά και στερεά ενώ τα εγκάρσια μόνο στα στερεά και ανάλογα με το τμήμα της γης στο οποίο κινούνται έχουν και τον αντίστοιχο συμβολισμό. Έτσι τα επιμήκη κύματα συμβολίζονται στον φλοιό και τον μανδύα με το γράμμα P, στον εξωτερικό πυρήνα με το γράμμα K, και στον εσωτερικό πυρήνα με το γράμμα I. Τα εγκάρσια κύματα αντίστοιχα συμβολίζονται για τον φλοιό και τον μανδύα με το γράμμα S και για τον εσωτερικό πυρήνα με το γράμμα J. Αντίστοιχο γράμμα για τον εξωτερικό πυρήνα δεν υπάρχει καθώς βρίσκεται σε ρευστή κατάσταση άρα είναι αδύνατη η διάδοση των εγκαρσίων κυμάτων σε αυτόν. Η ύπαρξη εγκαρσίων κυμάτων στο εσωτερικό πυρήνα εξηγείτε με την αρχή του Huygens σύμφωνα με την οποία κάθε σημείο της υλικού μέσου μέσα στο οποίο διαδίδεται ένα κύμα αποτελεί με την σειρά του πηγή δευτερογενούς ακτινοβολίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Πως λειτουργούν τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης

Κατά την διάρρηξη πετρωμάτων της γης δημιουργούνται δύο κατηγορίες κυμάτων, τα επιμήκη (που συμβολίζονται με το γράμμα P) και τα εγκάρσια (που συμβολίζονται με το γράμμα S). Παρόλο που η πλειονότητα των καταστροφών οφείλεται στην δεύτερη κατηγορία, τα κύματα της πρώτης κατηγορίας κινούνται με μεγαλύτερη ταχύτητα, το οποίο έχει ως συνέπεια αυτά να φτάνουν νωρίτερα από τα εγκάρσια σε οποιαδήποτε θέση. Την ιδιότητα αυτή χρησιμοποιούν τα συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης ώστε να σημάνουν συναγερμό. Πιο συγκεκριμένα, τα σεισμόμετρα καταγράφουν τις εδαφικές κινήσεις και όταν παρατηρηθεί μια απότομη μεταβολή των μετρήσεων σε ένα προκαθορισμένο αριθμό οργάνων, τότε ενεργοποιείται αυτόματα η διαδικασία επεξεργασίας των δεδομένων αυτών με σκοπό των υπολογισμό του επικέντρου του σεισμού, του μεγέθους αυτού και του χρόνου άφιξης των καταστρεπτικών S-κυμάτων σε περιοχές στόχους. Εφόσον η θέση στην οποία έγινε η διάρρηξη απέχει μια ελάχιστη απόσταση από ένα στόχο εκδίδεται ένα σήμα με μια πληθώρα διαφορετικών συστημάτων όπως συναγερμοί, μέσα μαζικής ενημέρωσης, κινητή τηλεφωνία, με σκοπό τη προστασία των πολιτών και την ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους της έντονης σεισμικής κίνησης (Εικ.5).



Εικόνα.5: σχηματική αναπαράσταση του τρόπου λειτουργίας των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης (<https://www.shakealert.org/>)

3.2 Συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (EEW) ανά τον κόσμο

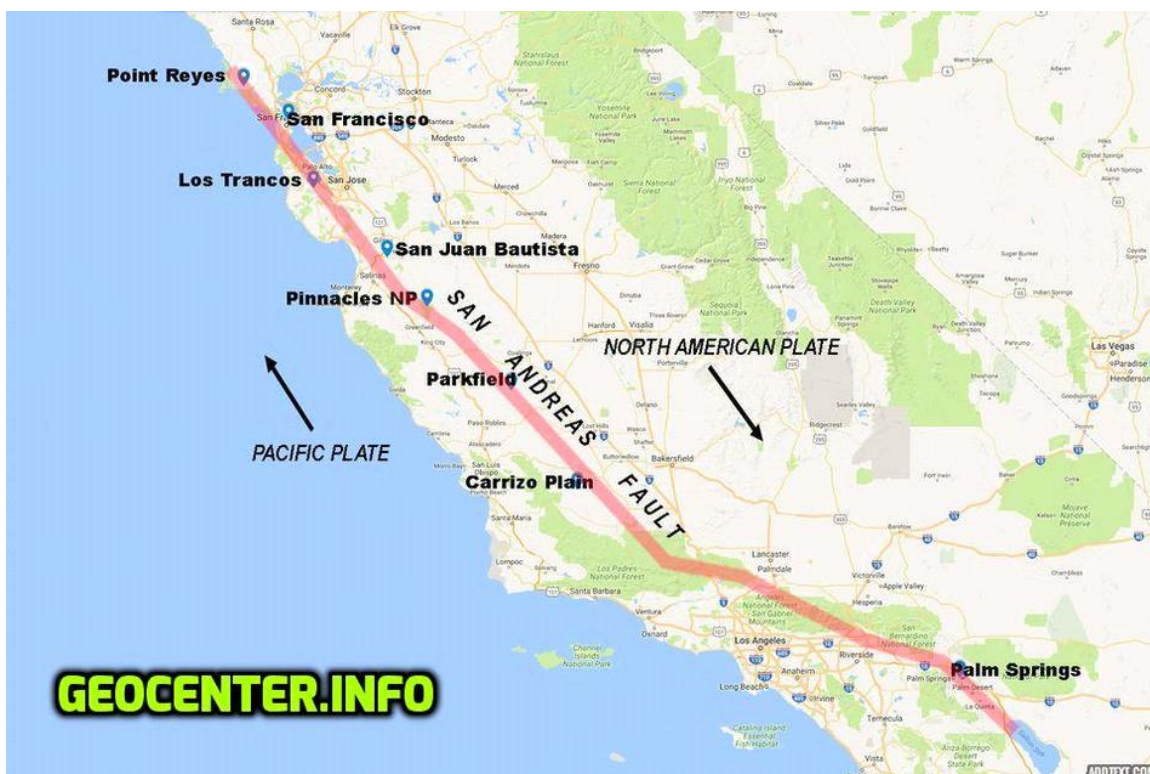
α) Ιαπωνία

Η Japan Meteorological Agency (JMA) είναι μια υπηρεσία η οποία έχει σαν στόχους, την πρόληψη και την άμβλυνση φυσικών καταστροφών, την ασφάλεια των μεταφορών, την ανάπτυξη της βιομηχανίας και την ευημερία των πολιτών. Για την επίτευξη αυτών των στόχων η παρακολούθηση του περιβάλλοντος είναι πρωτεύουσας σημασίας. Οι σεισμοί ως μία από τις σοβαρότερες φυσικές καταστροφές αποτελούν μέρος των ερευνών της JMA. Το 2004 ξεκίνησαν δοκιμές για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα του συστήματος και δόθηκε πρόσβαση σε ορισμένα άτομα για την επίτευξη του στόχου αυτού (Kamigaichi, 2004). Το πρόγραμμα μετά από μία μεγάλη καμπάνια ενημέρωσης του κοινού σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος, τις τεχνικές παραμέτρους και περιορισμούς δόθηκε για χρήση από το κοινό. Για την μετάδοση της προειδοποίησης στους πολίτες χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι. Πιο συγκεκριμένα για να διασφαλιστεί η αποτελεσματικότητα στην έγκαιρη ειδοποίηση του κοινού κρίνεται απαραίτητη η εδραίωση πολλαπλών τρόπων ενημέρωσης αν και οι κύριοι τρόποι είναι η τηλεόραση και το ραδιόφωνο, τηλεφωνικές εταιρείες αναλαμβάνουν χωρίς επιπλέον χρέωση την μετάδοση του συναγερμού (Kamigaichi et al. 2009). Ο σεισμός του 2011 ήταν ένας από τους πιο καταστρεπτικούς και ισχυρούς στην ιστορία και κόστισε την ζωή περίπου 20.000 ανθρώπων. Κατά την διάρρηξη στις 11 Μαρτίου του 2011 η χρήση των πρώτων 5 με 10 δευτερολέπτων οδήγησε σε μία αρχική εκτίμηση μικρότερη της πραγματικής έντασης του σεισμού, χωρίς αυτό να μειώνει την σημασία της έγκαιρης προειδοποίησης των πολιτών. Το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης το οποίο χρησιμοποιείται από το σιδηροδρομικό δίκτυο ακινητοποίησε τους συρμούς με τα πρώτα δευτερόλεπτα στα οποία ανιχνεύτηκε έντονη σεισμική κίνηση.

β) Δυτικές ακτές Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής

Το Σαν Φρανσίσκο είναι μία από τις πιο γνωστές πόλεις στην ήπειρο της Αμερικής. Ένας από τους λόγους που είναι τόσο φημισμένη είναι και η γεωλογία της καθώς διατρέχεται από ένα από τα μεγαλύτερα ρήγματα στον κόσμο, το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα (Εικ. 6). Όπως είναι αναμενόμενο η ανάγκη για την ελαχιστοποίηση του κόστους των καταστροφών είναι μεγάλη. Βασικό μέρος αυτής της προσπάθειας αποτελεί το ShakeAlert system (Given et al. 2014, Kohler et al. 2017). Όπως και το αντίστοιχο ιαπωνικό σύστημα, έτσι και αυτό χρησιμοποιεί τις αφίξεις των πρώτων επιμηκών κυμάτων για τον υπολογισμό του μεγέθους και του χρόνου άφιξης των καταστρεπτικών εγκάρσιων κυμάτων. Από τα τέλη του 2018 και μετά έχει ξεκινήσει η λειτουργία της έκδοσης 2.0 η οποία έχει σαν

περιοχές-στόχους το Όρεγκον, την Καλιφόρνια και την Ουάσιγκτον. Ευρύτερη ειδοποίηση του κοινού θα ξεκινήσει όταν καταστεί δυνατή η ενημέρωση μεγάλου μέρους του κοινού στα απαιτούμενα χρονικά πλαίσια, εφόσον το μέγεθος του σεισμού είναι μεγαλύτερο ή ίσο των 5 βαθμών στην κλίμακα τοπικού μεγέθους που ορίστηκε από τον Ρίχτερ. Για να καταστεί δυνατό αυτό χρησιμοποιούνται ιδιωτικές και δημόσιες υπηρεσίες όπως η FEMA (Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Διαχείρισης Καταστάσεων Έκτακτης Ανάγκης) και εταιρείες κινητής τηλεφωνίας. Φυσικά πρέπει ακόμα να γίνουν βήματα προς την ενημέρωση των πολιτών όσον αφορά το σύστημα και τον σωστό τρόπο αντίδρασης στο ενδεχόμενο έκδοσης συναγερμού.



Εικόνα 6: Το ρήγμα του Αγίου Ανδρέα και η θέση μεγάλων αστικών κέντρων (<https://geocenter.info/en/new/the-san-andreas-fault-the-earthquake-in-mexico-was-a-foreshock-a-larger-earthquake-on-the-way>)

γ) Χιλή (G-FAST)

Τα κλασικά συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης, χρησιμοποιούν αρκετά δευτερόλεπτα καταγραφής εγκαρσίων κυμάτων για τον υπολογισμό του μεγέθους και της εστίας. Βέβαια υπάρχει το πρόβλημα του κορεσμού του μεγέθους (Brendan W. et al 2018). Όταν συμβαίνει αυτό η εκτίμηση ενός σεισμού από ένα όριο και πάνω είναι λανθασμένα

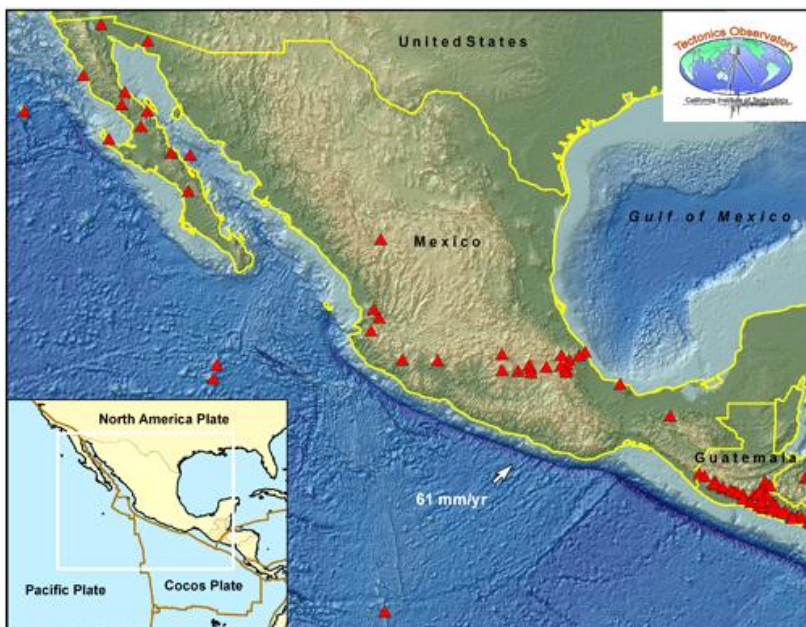
μικρότερη σε ένα ανώτατο όριο. Συστήματα όπως αυτό της Χιλής δεν αντιμετωπίζουν αυτό το πρόβλημα καθώς σε αυτά γίνεται απευθείας μέτρηση της εδαφικής μετάθεσης με την βοήθεια του παγκόσμιου συστήματος πλοηγήσεως μέσω δορυφόρων. Παρόλο που τα δεδομένα που προκύπτουν από αυτή την μέθοδο έχουν επιπλέον θόρυβο, φαίνεται να είναι αξιόπιστα για μεγέθη 6 και πάνω στην κλίμακα σεισμικής ροπής στο κοντινό πεδίο. Το σύστημα του G-FAST (Crowell *et al.* 2016) αποτελείται από δύο τμήματα. Το πρώτο τμήμα χρησιμοποιεί την μέγιστη εδαφική μετάθεση για τον άμεσο υπολογισμό του μεγέθους, ενώ το δεύτερο τμήμα με την διαδικασία της αντιστροφής υπολογίζει στοιχεία σχετικά με το σεισμογόνο ρήγμα.

δ) Μεξικό (Sasmex)

Η λειτουργία αυτού το συστήματος ξεκίνησε το 1993 (Espinosa *et al.* 1995) και ήταν το πρώτο στον κόσμο το οποίο δόθηκε για χρήση από τους πολίτες. Στα 26 χρόνια κατά τα οποία είναι ενεργό έχει εκδοθεί μόνο ένας λανθασμένος συναγερμός στους πρώτους μήνες μετά την ενεργοποίησή του λόγω πολιτικών πιέσεων για πρόωμη χρήση. Η σημασία για την κατασκευή ενός τέτοιου συστήματος έγινε αισθητή μετά τον καταστροφικό σεισμό στις 19 Σεπτεμβρίου του 1985 που προκάλεσε μεγάλες καταστροφές και την απώλεια ανθρωπίνων ζωών. Το γεγονός ότι η απόσταση του επικέντρου και της πόλης του Μεξικού ήταν μεγάλη (εικ. 7) προκάλεσε εντύπωση και εξηγείται από το γεγονός ότι η πόλη είναι χτισμένη πάνω σε χαλαρά υλικά αργιλικής φύσεως τα οποία προκαλούν ενίσχυση της σεισμικής κίνησης.

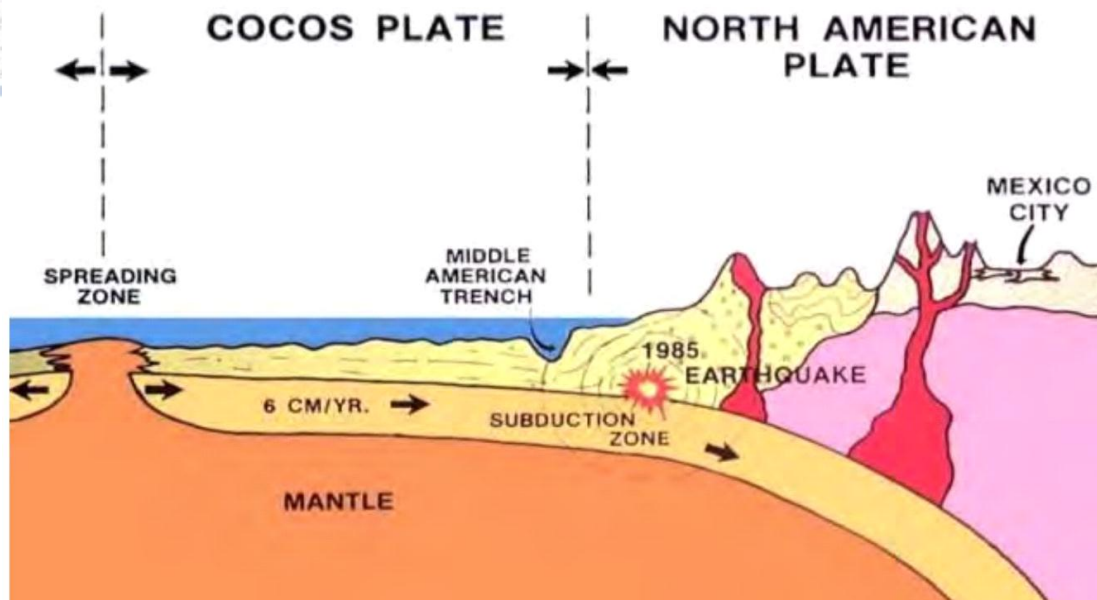
Στα πρώτα χρόνια λειτουργίας λόγω του περιορισμένου δικτύου οργάνων (12), το σύστημα αδυνατούσε να εκδώσει συναγερμό για σεισμούς πέρα από τα όρια του δικτύου. Φυσικά με την επέκταση του συστήματος και την τοποθέτηση περισσότερων σταθμών οι δυνατότητες και η αξιοπιστία αυξάνουν. Για την μετάδοση του συναγερμού χρησιμοποιούνται ραδιοφωνικοί και τηλεοπτικοί σταθμοί, μεγάφωνα καθώς και εφαρμογή για κινητά τηλέφωνα. Για να διασφαλιστεί η σωστή ειδοποίηση του κοινού τα παραπάνω μέσα ενεργοποιούνται απομακρυσμένα και ελεγχόμενα αποκλειστικά από το sasmex. Επιπλέον έχει καταστεί δυνατή και η ενημέρωση του κοινού με βάση την περιοχή στην οποία βρίσκονται οι πολίτες με την επιλεκτική ενεργοποίηση δεκτών για πολλαπλές φυσικές καταστροφές. Από τη αρχή της λειτουργίας του το σύστημα έχει καταγράψει περίπου 7000 σεισμούς (Gerardo Suárez *et al* 2018) και έχει εκδώσει περισσότερους από 150 συναγερμούς. Στο ενδεχόμενο σεισμού η μετάδοση των δεδομένων από τους σταθμούς γίνεται με κεραίες υψηλής συχνότητας καθώς και πολύ υψηλής συχνότητας για να απαλειφθεί ο κίνδυνος παρεμβολών από γειτονικές πηγές (Gerardo Suárez *et al* 2018).

Όπως φαίνεται και από τις εικόνες 7, 8 η πλάκα Cocos βρίσκεται πολύ κοντά στην πόλη του Μεξικού για αυτό είναι επιτακτική η ταχύτατη επεξεργασία των δεδομένων και η αναμετάδοση τους. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε ένας καινούργιος αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιεί μόνο τα πρώτα 3 δευτερόλεπτα των κυμάτων ουράς των επιμηκών κυμάτων για τους υπολογισμούς. Η αποτελεσματικότητα του sasnex έγινε αισθητή με την ειδοποίηση 70 δευτερολέπτων για τον σεισμό του 1995 (14/9/1995) καθώς και πιο πρόσφατα με τον σεισμό στις 7/9/2017 στον οποίο ο χρόνος αντίδρασης ήταν περίπου 2 λεπτά και στις 19/9/2017 όπου λόγω μικρής επικεντρικής απόστασης ο χρόνος αντίδρασης μέχρι την άφιξη των εγκαρσίων κυμάτων ήταν μερικά δευτερόλεπτα.



Εικόνα 7 Η περιοχή του Μεξικού, οι τεκτονικές πλάκες και οι τα ηφαιστειακά κέντρα (κόκκινο χρώμα). Η έντονη μπλε γραμμή κατά μήκος της ακτογραμμής είναι η τάφος που δημιουργείται από την υποβύθιση της πλάκας Cocos κάτω από την πλάκα της βορείου Αμερικής.

(<http://www.tectonics.caltech.edu/outreach/highlights/mase/>)



Εικόνα 8 Αναπαράσταση της υποβύθισης της πλάκας κόκκος κάτω από την πλάκα της βορείου Αμερικής

ε) Ρουμανία (ResyR)

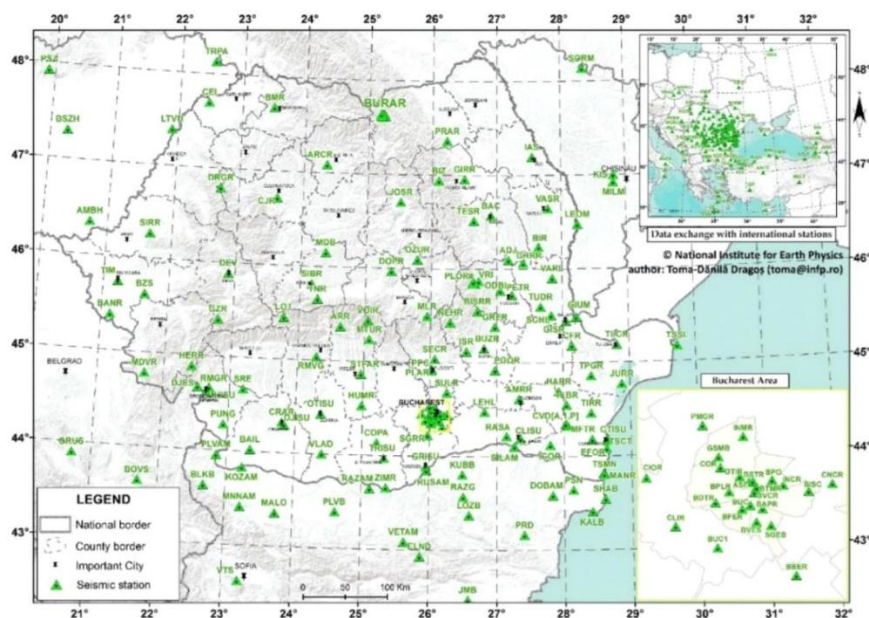
Αν και οι περισσότεροι σεισμοί στην περιοχή των Καρπαθίων είναι μικρού βάθους, περιορισμένοι στον φλοιό, η επαρχία Βράντσεα αποτελεί εξαίρεση (Εικ.9). Μερικά από τα καταστροφικότερα σεισμικά γεγονότα συνέβησαν σε αυτή την περιοχή και το βάθος αυτών κυμαινόταν από 5 μέχρι και 140 χιλιόμετρα. Αν και η πόλη του Βουκουρεστίου βρίσκεται σε απόσταση μεγαλύτερη των 150 χιλιομέτρων οι επιπτώσεις σε υλικές καταστροφές και απώλειες ανθρωπίνων ζωών είναι σημαντικές. Ο κυριότερος λόγος είναι, όπως και στην περίπτωση της πόλης του Μεξικού, το μεγάλο πάχος των ιζημάτων πάνω στα οποία είναι θεμελιωμένα τα κτήρια. Τα χαλαρά αυτά υλικά έχουν επικαθίσει επάνω στο βραχώδες υπόστρωμα και κατά την διάδοση των σεισμικών κυμάτων έχουμε το φαινόμενο της κυματικής εμπέδησης στην επαφή των δύο υλικών. Το φαινόμενο αυτό προκαλεί αύξηση του πλάτους των κυμάτων μεγιστοποιώντας τις κινήσεις και την καταπόνηση στις κατασκευές.

Αν και η πλειονότητα των υποδομών για της κατασκευή συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης υπήρχαν, με το ευρωπαϊκό πρόγραμμα SAFER (Seismic eArly warning For EuRope) σημειώθηκε πρόοδος στο κομμάτι του άμεσου υπολογισμού του μεγέθους και την βελτιστοποίηση του συστήματος. Επιπλέον αναπτύχθηκε καινούργια αυτοματοποιημένη διαδικασία με την οποία το μέγεθος το σεισμού μπορεί να υπολογιστεί από τα πρώτα δευτερόλεπτα καταγραφής των επιμηκών κυμάτων. Δοκιμή αυτού έγινε στις 25/4/2009 όπου υπολογίστηκε με ακρίβεια ένας σεισμός $M_w=5.7$ μέσα σε 5 δευτερόλεπτα (http://www.amracenter.com/SAFER/doc/dissemination/SAFER_Final_Report.pdf p. 43). <<Με επιπρόσθετες βελτιώσεις το σύστημα είναι πλέον σε θέση να εκτελέσει υπολογισμούς ακόμα και σε μικρές επικεντρικές αποστάσεις (<20 km), γεγονός που αυξάνει τον χρόνο αντίδρασης>> (Marmureanu et al. 2019, p. 2). Με διάφορες προσομοιώσεις προηγούμενων σεισμών έγινε εκτίμηση της αποτελεσματικότητας για την έκδοση συναγερμού σε 3

επίπεδα. Παρατηρήθηκε πώς όταν το σύστημα απαιτούσε 6 σταθμούς σαν το ελάχιστο αριθμό για τους υπολογισμούς, ο χρόνος ειδοποίησης και άφιξης των πρώτων επιμηκών κυμάτων ήταν πολύ μικρός και για 2 συγκεκριμένα σεισμικά γεγονότα για ένα επίπεδο τα κύματα έφταναν την στιγμή του συναγεμού. Έτσι για αυτή την ειδική περίπτωση το πρόγραμμα προσαρμόστηκε για την ολοκλήρωση των υπολογισμών με λιγότερους από 6 σταθμούς, παρόλο που αυτό θα μείωνε την ακρίβεια στην εύρεση των παραμέτρων.



Εικόνα 9 Χάρτης της Ρουμανίας. Η περιοχή με το περίγραμμα κόκκινου χρώματος είναι η περιοχή της Vrancea (Βράντσεα)



Εικόνα 10 Χάρτης των σεισμολογικών σταθμών στην Ρουμανία (Marmereanu et al. 2019).

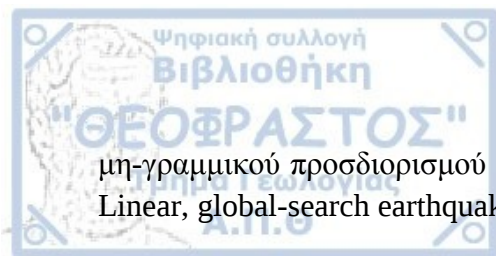
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΓΚΑΙΡΗΣ ΠΡΟΕΙΔΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΒΟΡΕΙΑ ΕΛΛΑΔΑ

4.1 Τι είναι το Presto;

Το συγκεκριμένο λογισμικό είναι ένα πρόγραμμα ανοικτού κώδικα το οποίο επιτρέπει τον γρήγορο και σε πραγματικό χρόνο υπολογισμό των παραμέτρων ενός σεισμού (Satriano *et al.* 2008, 2011; Zollo *et al.* 2010). Η χρήση του δεν περιορίζεται μόνο στην Ιταλία όπου και αναπτύχθηκε αλλά και άλλες χώρες όπως Ρουμανία, Νότια Κορέα και Τουρκία. Η επιλογή του προγράμματος βασίζεται στο γεγονός ότι σχεδιάστηκε με παραμέτρους σε σχέση με την δομή των βαθύτερων στρωμάτων παρόμοιες με αυτές που συναντάμε στον ελληνικό χώρο. Αυτή η ομοιότητα δεν είναι τυχαία αλλά εξηγείται με το γεγονός ότι η Νότια Ιταλία και ο Ελληνικός χώρος είναι σε μικρή σχετικά απόσταση μεταξύ τους οπότε είναι πιθανότερο να υπάρχουν ομοιότητες στην γεωλογία σε μεγάλη κλίμακα. Στην δική μας περίπτωση θα εξετάσουμε 6 σεισμικά γεγονότα στην παρακάτω περιοχή, καθώς και την αποτελεσματικότητα του συστήματος έγκαιρης προειδοποίησης στην προσδιορισμό των παραμέτρων για την έκδοση συναγερμού καθώς και τα χρονικά πλαίσια μέσα στα οποία επιτυγχάνεται αυτό. Για την συλλογή των δεδομένων χρησιμοποιούνται ένας αριθμός σεισμολογικών σταθμών οι οποίοι αναγράφονται στον πίνακα 1.

Όλοι οι σταθμοί είναι εξοπλισμένοι με σεισμόμετρα ευρέως φάσματος καταγραφής (τύπου CMG-3ESP/100, TRILLIUM 120P ή CMG-6T/30), κατάλληλων για την ανίχνευση ακόμα και των πιο ανεπαίσθητων εδαφικών κινήσεων μεγάλης περιόδου. Η καταγραφή της εδαφικής κίνησης γίνεται μέσω ψηφιοποιητών υψηλής ανάλυσης (24 bit), συνδεδεμένων με σύγχρονους δέκτες του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης (Global Positioning System, GPS) οι οποίοι παρέχουν τόσο την ακριβή θέση του εκάστοτε σταθμού, όσο και τον ακριβή χρόνο καταγραφής της εδαφικής κίνησης.

Το πρόγραμμα Presto απαιτεί για την λειτουργία του την εισαγωγή δεδομένων σε σχέση με τον σεισμό και ειδικότερα τις κινήσεις που καταγράφει κάθε σεισμόμετρο. Από την θέση της συγκεκριμένης σεισμικής διάρρηξης είναι προφανές ότι ο αριθμός των οργάνων μέτρησης θα κατέχει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα του όλου συστήματος. Πιο συγκεκριμένα πρέπει να εισάγουμε αρχεία που να καθορίζουν το περιβάλλον στο οποίο θέλουμε να διεξάγουμε την έρευνα. Αρχικά πρέπει να οριστεί η περιοχή η οποία θα εξεταστεί το οποίο ονομάζεται grid και δημιουργείται με την βοήθεια του προγράμματος NonLinLoc. Το επόμενο στάδιο είναι οι θεωρητικοί χρόνοι διαδρομής. Αυτοί προκύπτουν μετά την δημιουργία του δικτύου και είναι κοινοί για όλα τα σεισμικά γεγονότα μέσα στο δίκτυο. Οι θεωρητικοί χρόνοι διαδρομής, δεδομένα εισόδου για το λογισμικό PRESTo, υπολογίζονται για κάθε σταθμό και για κάθε σημείο του κανάβου που έχει προηγουμένως προσδιοριστεί. Για τον υπολογισμό τους χρησιμοποιούνται οι κώδικες "Vel2Grid" και "Grid2Time", οι οποίοι αποτελούν τμήματα του κώδικα πιθανολογικού,



μη-γραμμικού προσδιορισμού της θέσης σεισμικών εστιών NLLOC (Probabilistic, Non-Linear, global-search earthquake LOCation algorithm; <http://alomax.free.fr/nlloc/>).

Πίνακας 1: Οι σεισμολογικοί σταθμοί που θα χρησιμοποιήσουμε για τα παρακάτω παραδείγματα, ο κωδικός, η ονομασία τους και τεχνικά χαρακτηριστικά τους.

Κωδικός	Όνομα Θέσης	Γεωγρ. Πλάτος (°)	Γεωγρ. Μήκος (°)	Υψόμετρο (μ)	Τύπος Αισθητήρα	Τύπος Ψηφιοποιητή
ALN	Alexandroupoli	40.8957	26.0497	110	CMG-3ESP/100	TRIDENT
GRG	Griva	40.9558	22.4029	600	CMG-3ESP/100	TAURUS
HORT	Hortiatis mt.	40.5978	23.0995	925	CMG-3ESP/100	TRIDENT
KAVA	Kavala	40.9941	24.5119	95	TRILLIUM 120P	TAURUS
KNT	Kentriko	41.1620	22.8980	380	CMG-3ESP/100	HRD-24
KOKK	Kokkinochori	40.8178	23.9992	261	TRILLIUM 120P	TAURUS
LIT	Litochorio	40.1033	22.4892	568	CMG-3ESP/100	TRIDENT
LOS	Limnos	39.933	25.081	460	S-13	TRIDENT
OUR	Ouranoupoli	40.3325	23.9791	117	CMG-3ESP/100	CENTAUR
PAIG	Paliouri	39.9363	23.6768	217	CMG-3ESP/100	TAURUS
SOH	Sochos	40.8206	23.3556	731	TRILLIUM 120P	TAURUS
SRS	Serres	41.1087	23.5950	314	CMG-3ESP/100	TRIDENT
THAS	Thassos Isl.	40.6064	24.7194	67	CMG-3ESP/100	TRIDENT
THE	Thessaloniki	40.6319	22.9628	132	CMG-6T/30	TRIDENT

Οι υπολογισμοί των θεωρητικών χρόνων διαδρομής βασίζονται σε ορισμένο μοντέλο ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων, κατάλληλο για την περιοχή μελέτης. Για την περίπτωση των εφαρμογών υιοθετήθηκε το μονοδιάστατο μοντέλο του Panagiotopoulos (1984), το οποίο περιγράφεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Μοντέλο ταχυτήτων των σεισμικών κυμάτων από τον Panagiotopoulos (1984), που υιοθετήθηκε κατά τον υπολογισμό των θεωρητικών χρόνων διαδρομής των σεισμικών κυμάτων.

Βάθος Στρώματος (km)	Ταχύτητα P κυμάτων V_P (km/s)	Ταχύτητα S κυμάτων V_S (km/s)
0	5.0	2.86
1.5	6.0	3.43
19	6.6	3.77
31	7.9	4.51

Αρχικά, με εφαρμογή του υπολογιστικού κώδικα "Vel2Grid" γίνεται αντιστοίχιση των τιμών του μοντέλου σε κάθε σημείο του κανάβου που έχει δημιουργηθεί. Σε δεύτερο στάδιο και με εφαρμογή του κώδικα "Grid2Time", οι αποθηκευμένες πληροφορίες εξόδου από το προηγούμενο βήμα χρησιμοποιούνται για να υπολογιστούν οι θεωρητικοί χρόνοι διαδρομής των επιμήκων (P) και των εγκάρσιων (S) κυμάτων που προβλέπει το υιοθετημένο μοντέλο ταχυτήτων. Οι υπολογισμοί των θεωρητικών χρόνων διαδρομής γίνονται από κάθε ένα σημείο του κανάβου (υποθετική σεισμική πηγή) προς όλες τις θέσεις που αντιστοιχούν σε σταθμούς καταγραφής ή σημεία ενδιαφέροντος (δηλ. θέσεις για τις οποίες επιδιώκεται η έκδοση έγκαιρων ειδοποιήσεων). Τα αρχεία εξόδου που δημιουργούνται αφορούν κάθε θέση και κάθε είδος κύματος (P ή S) ξεχωριστά και ενσωματώνονται στο περιβάλλον του PRESTo προκειμένου να χρησιμοποιηθούν για τον εντοπισμό των σεισμικών γεγονότων.

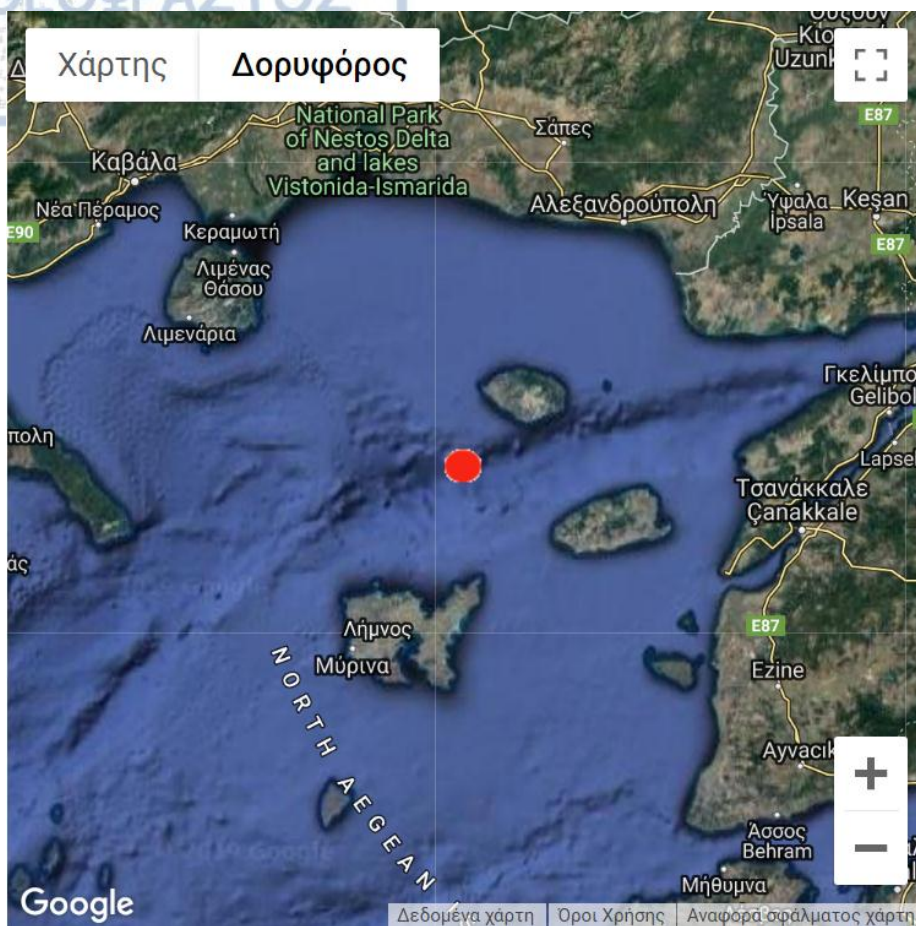
Στην συνέχεια είναι απαραίτητο να προσθέσουμε τους σεισμολογικούς σταθμούς των οποίων την θέση και τις παραμέτρους πρέπει να καθορίσουμε, ενώ σε άλλο αρχείο προσθέτουμε τα Sac files. Αυτά είναι τα αρχεία που παράχθηκαν κατά την πραγματική σεισμική δόνηση και την αντίστοιχη εδαφική κίνηση σε κάθε σταθμό. Για την χρήση τους φυσικά θα πρέπει να γίνει αφαίρεση της επίδρασης του οργάνου, έτσι ώστε όταν γίνει εργαστηριακή δοκιμή θα χρησιμοποιηθούν οι πραγματικές κινήσεις που η σεισμική διάρρηξη προκάλεσε.

Τα γεγονότα τα οποία θα εξετάσουμε είναι τα εξής

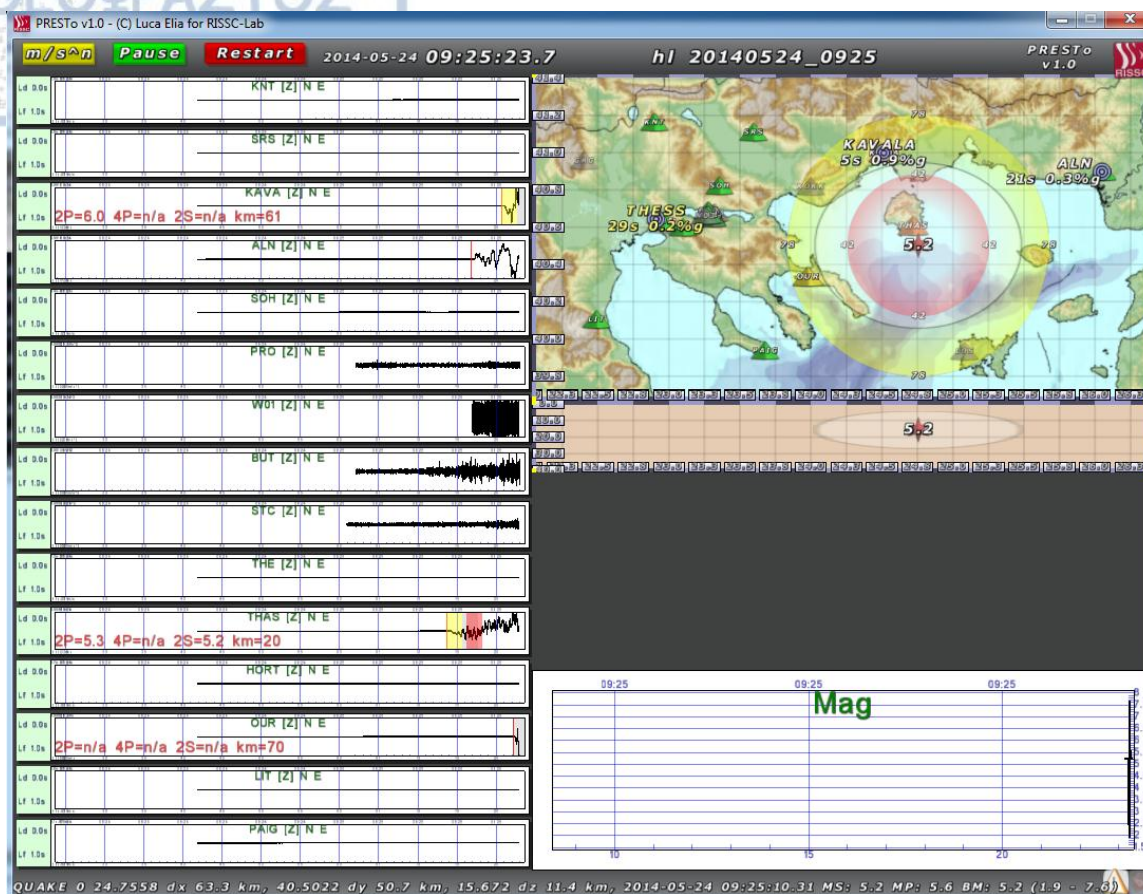
- 1) Χρόνος γένεσης : 14/05/2014 09:25 ML 6.3
- 2) Χρόνος γένεσης : 11/10/2013 05:15 ML 4.4
- 3) Χρόνος γένεσης : 06/08/2016 05:17 ML 4.0
- 4) Χρόνος γένεσης : 03/03/2018 05:25 ML 3.0
- 5) Χρόνος γένεσης : 25/06/2018 08:21 ML 4.2
- 6) Χρόνος γένεσης : 25/06/2018 08:24 ML 3.6

4.1.1 Παράδειγμα 1 : 20140524_0925

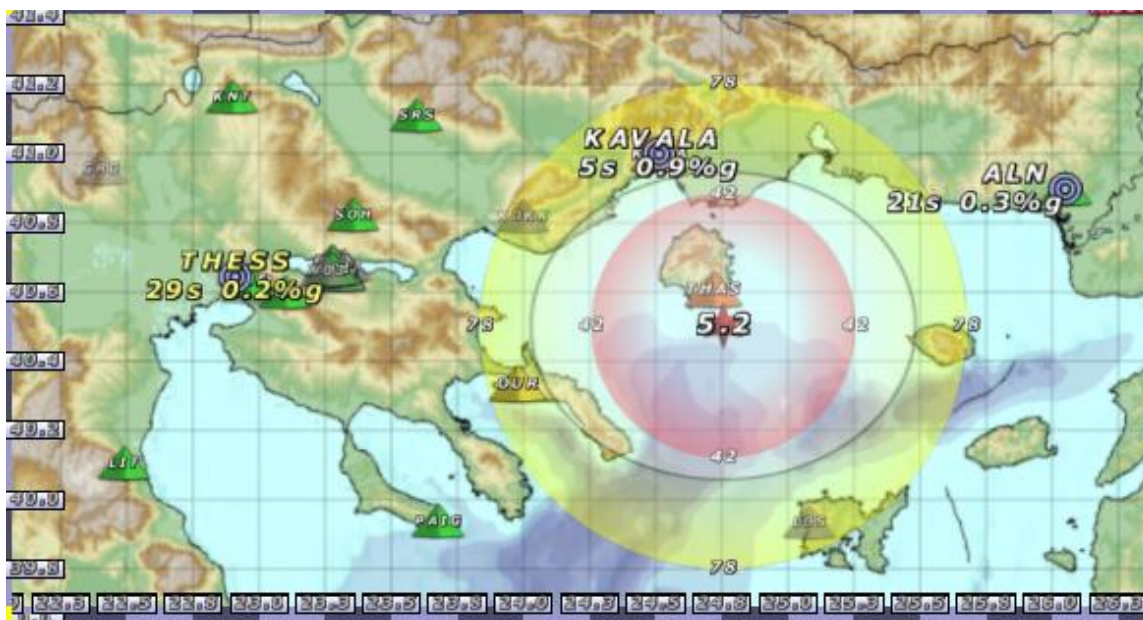
Ο πρώτος σεισμός που θα χρησιμοποιηθεί ως παράδειγμα σημειώθηκε στις 14 Μαΐου του 2014. Το εστιακό του βάθος υπολογίστηκε στα 28.3 χιλιόμετρα ενώ το μέγεθος του στην κλίμακα τοπικού μεγέθους που ορίστηκε από τον Ρίχτερ ήταν $ML = 6.3$. Η θέση προσδιορίστηκε 21 χιλιόμετρα νότια-νοτιοδυτικά της Σαμοθράκης (Εικ.11)



Εικόνα 11 (http://bbnet.gein.noa.gr/alerts_manual/2014/05/evman140524092501_info.html)



Εικόνα 12 (20140524_0925.wmv)

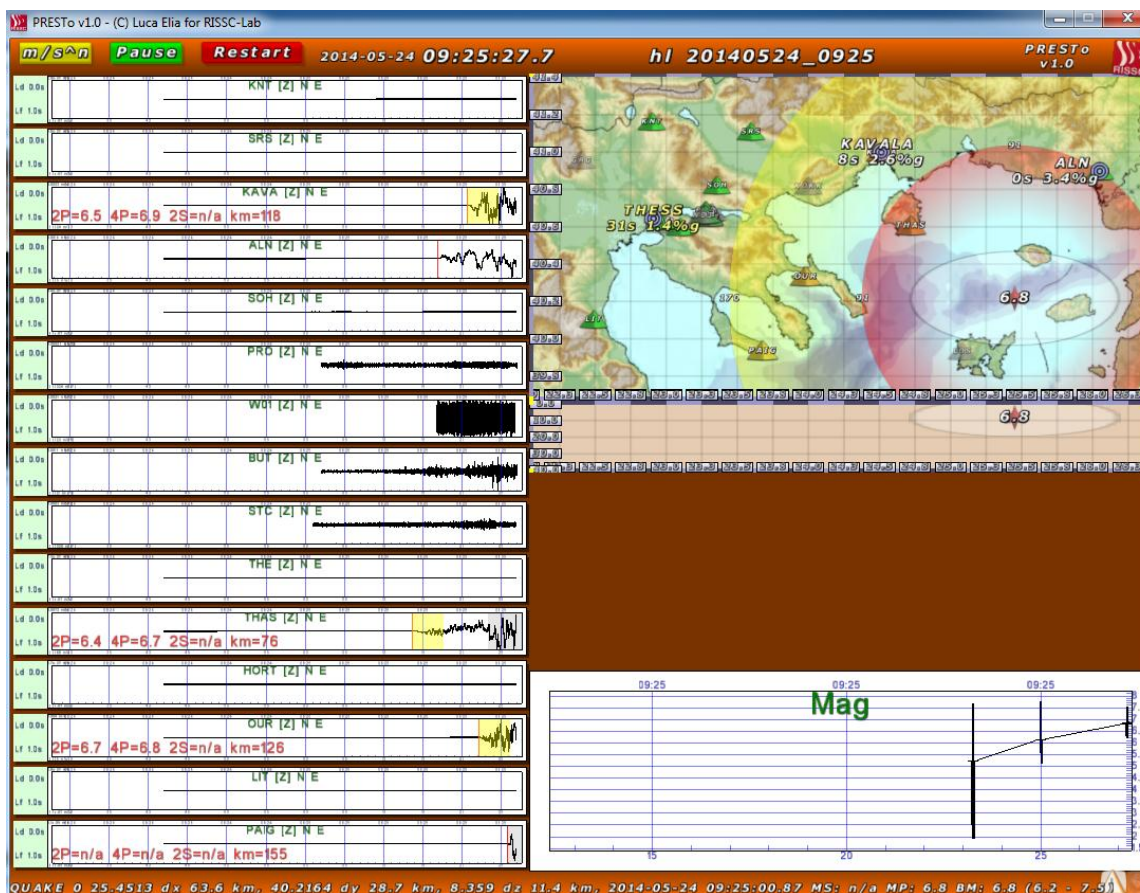


Εικόνα 13 (20140524_0925.wmv)

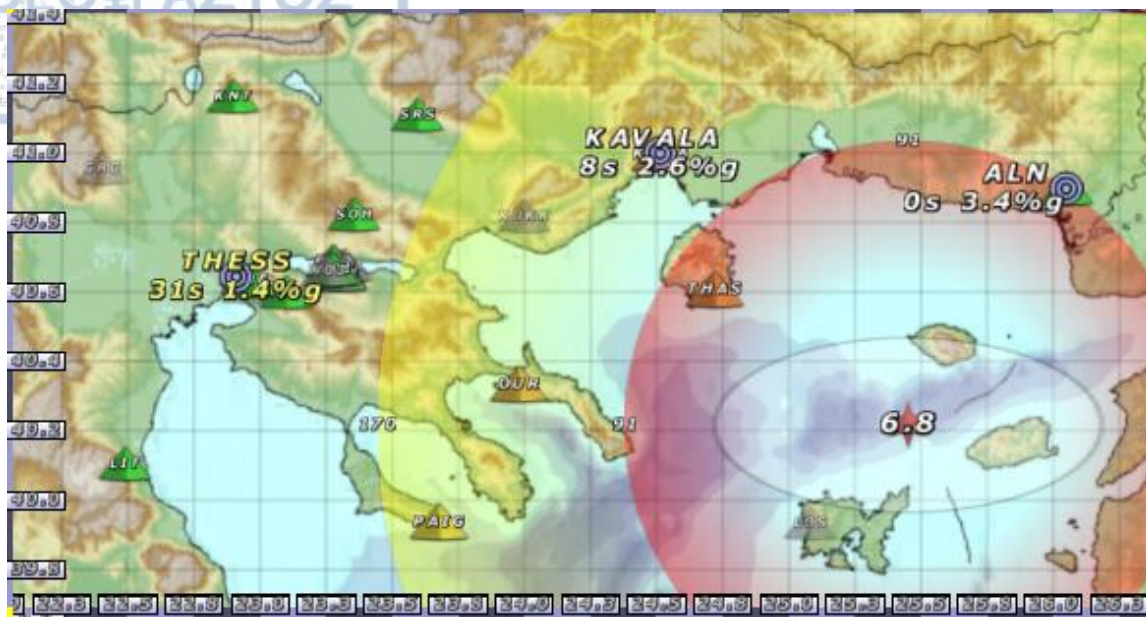
Όπως φαίνεται και από τις εικόνες 12 και 13 στα πρώτα δευτερόλεπτα των υπολογισμών ο προσδιορισμός της θέσης αλλά και του μεγέθους είναι αρκετά λάθος.

Η εικόνα 13 αποτελεί μεγέθυνση του χάρτη στο πάνω αριστερό τμήμα της εικόνας 12. Το Presto προβάλλει την θέση το μέγεθος του σεισμού αλλά και το χρόνο άφιξης σε συγκεκριμένες περιοχές στόχους καθώς και το ποσοστό της αρχικής επιτάχυνσης g που θα πλήξει τον στόχο. Ο κύκλος κίτρινου χρώματος προσομοιάζει την διασπορά των επιμηκών κυμάτων στο χώρο ενώ ο κόκκινος την διασπορά των εγκαρσίων κυμάτων)

Κατά την συνέχιση της ανάλυσης η χρήση περισσότερων πληροφοριών από τους σταθμούς καθιστά δυνατή την βελτίωση της λύσης ώστε να πλησιάζει την πραγματικότητα (εικ.14 και εικ.15)

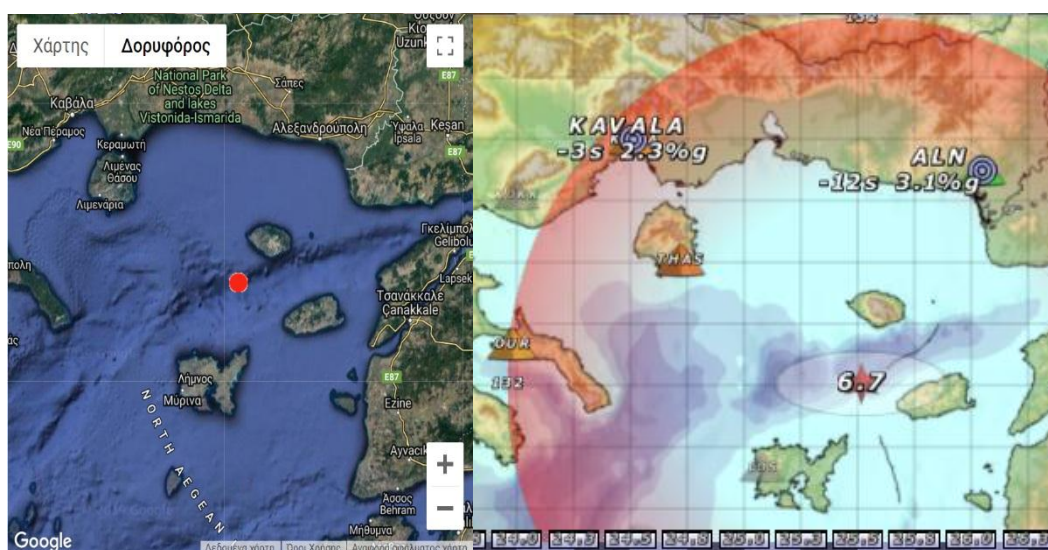


Εικόνα 14 (20140524_0925.wm v)



Εικ.15 (20140524_0925.wm v)

Παρατηρούμε πως την στιγμή που οι υπολογισμοί δίνουν μια ικανοποιητική λύση τα εγκάρσια κύματα έχουν ήδη φτάσει στην Αλεξανδρούπολη ενώ απέχουν μόνο μερικά δευτερόλεπτα από την πόλη της Καβάλας. Και στις δύο περιπτώσεις η επιτάχυνση είναι σχετικά μεγάλη αλλά μόνο στην περίπτωση της Καβάλας υπάρχει πιθανότητα για έκδοση συναγερμού. Αυτό δείχνει της μεγάλης σημασία που έχει η πυκνότητα του δικτύου των οργάνων μέτρησης και την επίδραση που έχει στο τελικό αποτέλεσμα.

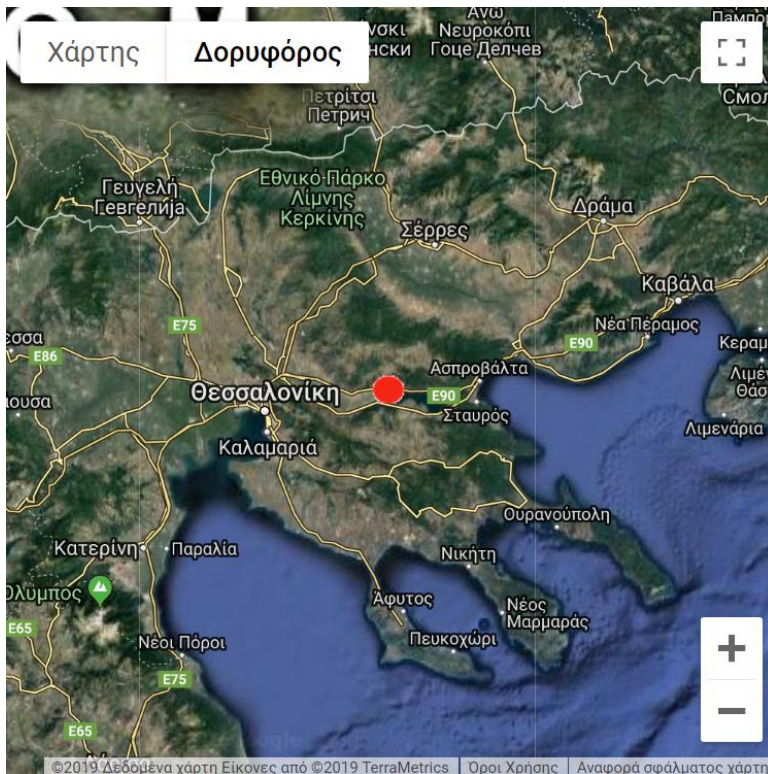


Εικόνα 16 (Σύγκριση της πραγματικής θέσης με την θέση που προέκυψε από το πρόγραμμα)

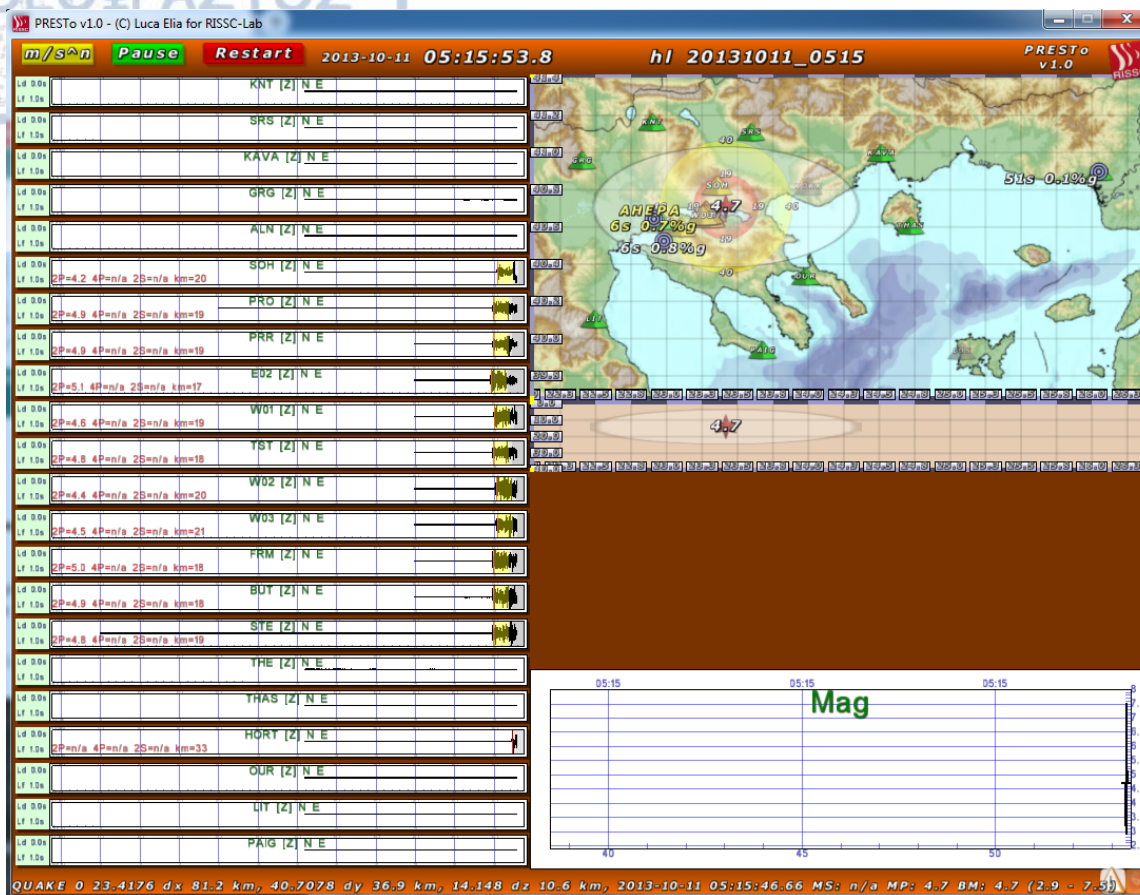
Το συμπέρασμα για το συγκεκριμένο παράδειγμα είναι πως με το υπάρχον δίκτυο σταθμών τα δεδομένα που παράγονται κατά την διάρκεια έντονης σεισμικής κίνησης είναι αρκετά ώστε να προκύψει ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα σε σχέση με τον προσδιορισμό των παραμέτρων ώστε να ληφθεί η απόφαση για την έκδοση συναγερμού στις περιοχές στόχους.

4.1.2 Παράδειγμα 2 : 20131011_0515

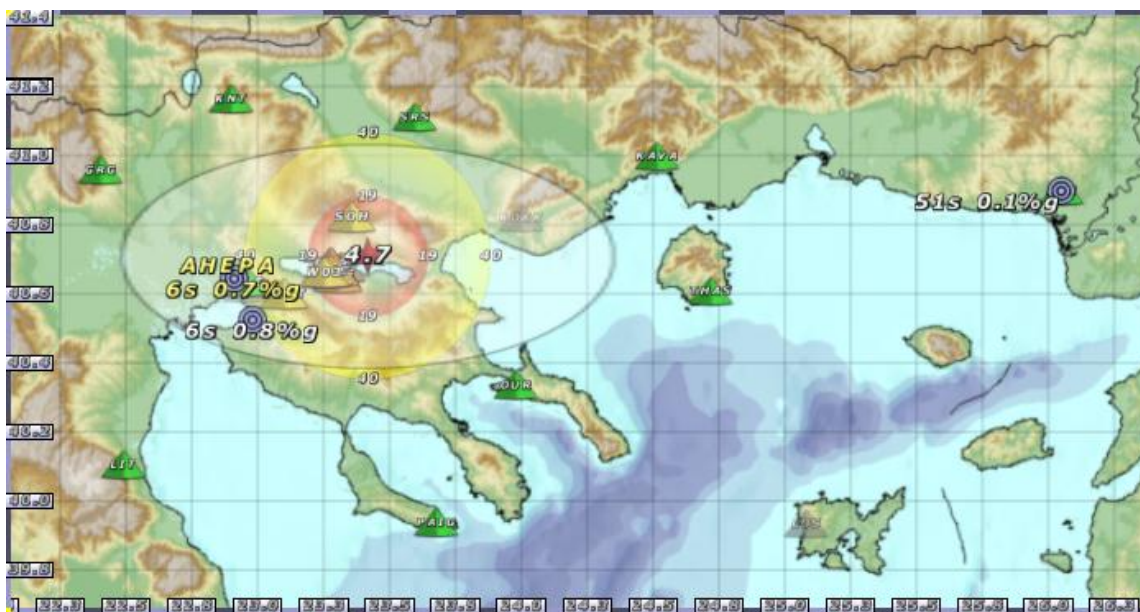
Ο δεύτερος σεισμός που θα εξετάσουμε έγινε στις 10 Οκτωβρίου 2013 ώρα 05:15 και είχε μέγεθος ML 4.4 στην κλίμακα τοπικού μεγέθους που ορίστηκε από τον Ρίχτερ και εστιακού βάθους 18.9 χιλιομέτρων (εικ. 17)



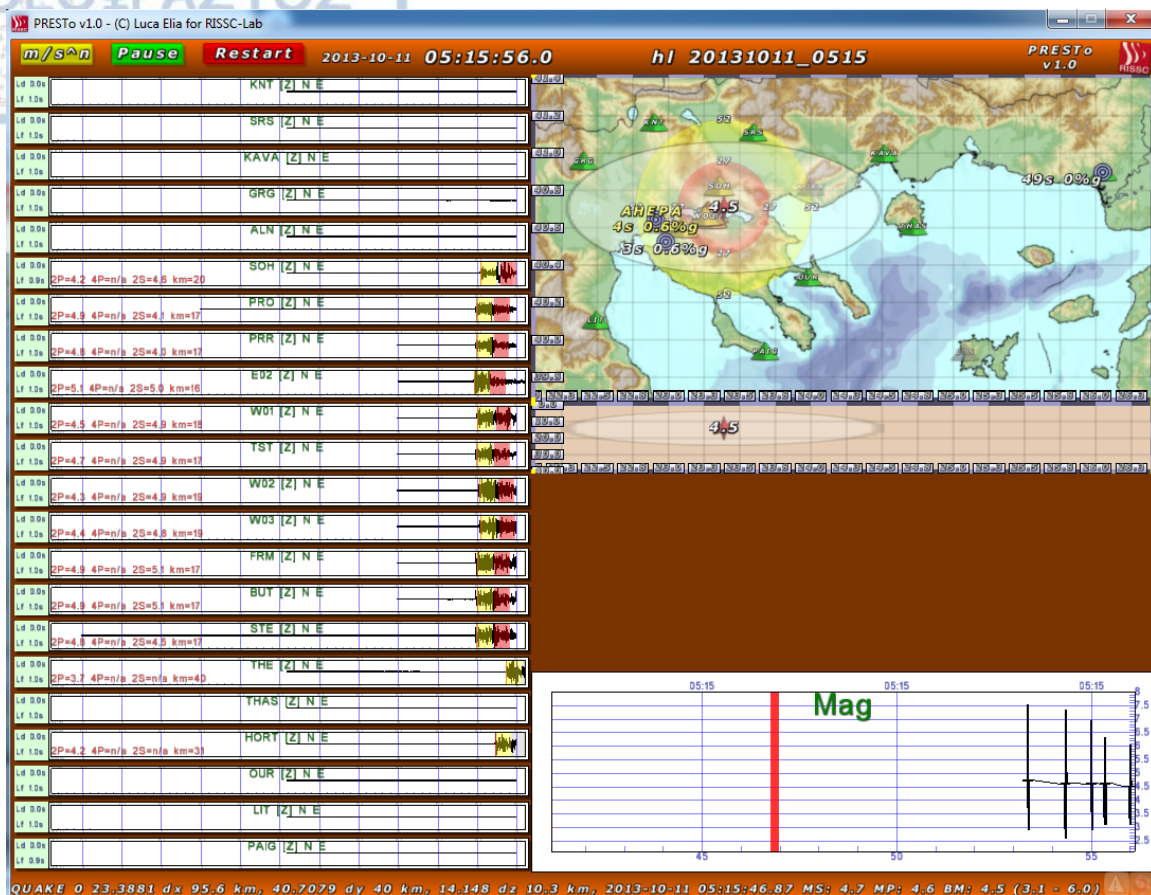
Εικόνα 17(http://bbnet.gein.noa.gr/alerts_manual/2013/10/evman131011051546_info.html)



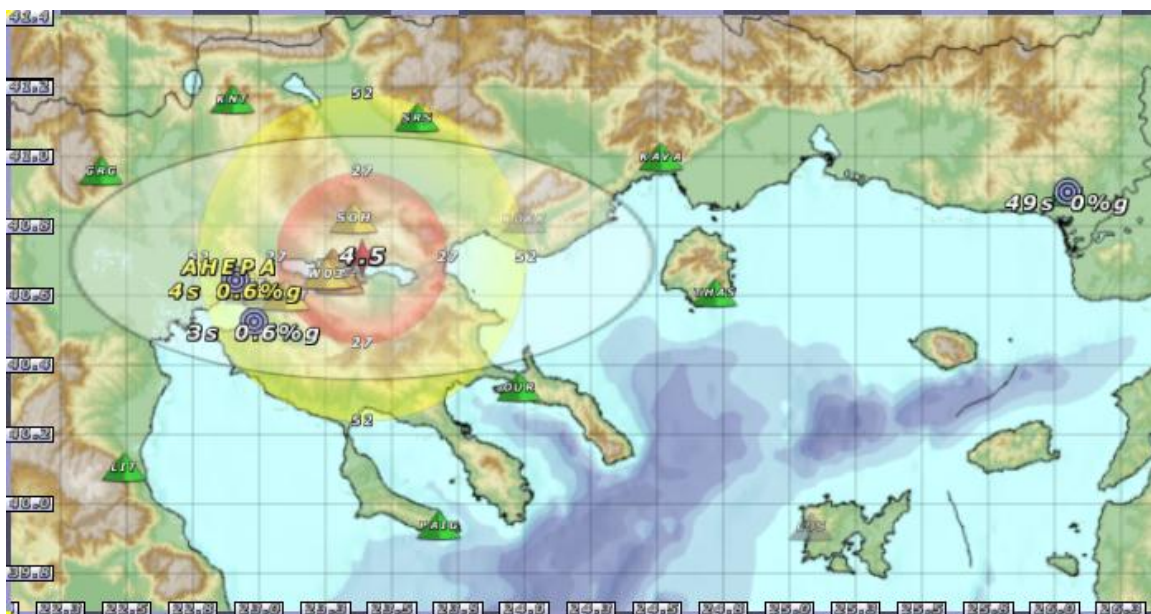
Εικόνα 18 (20131011_0515.wmv)



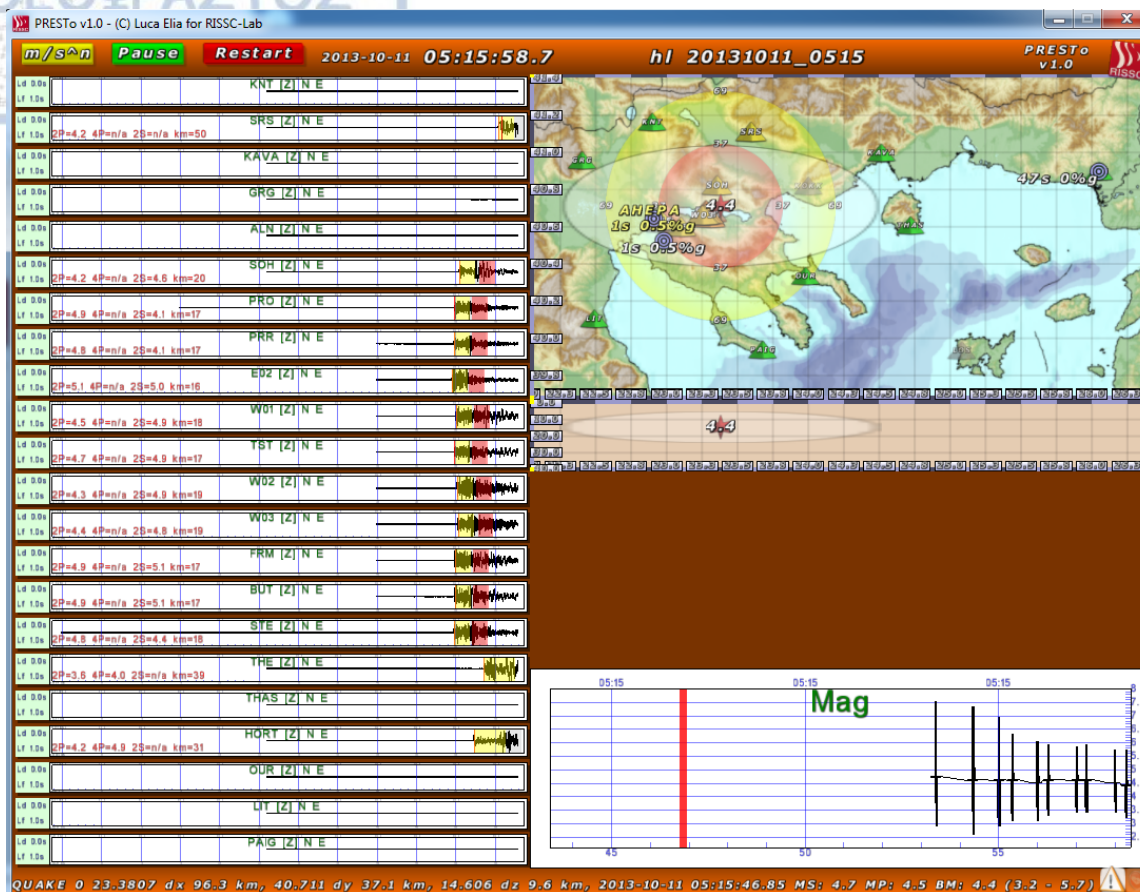
Εικόνα 19 (20131011_0515.wmv)



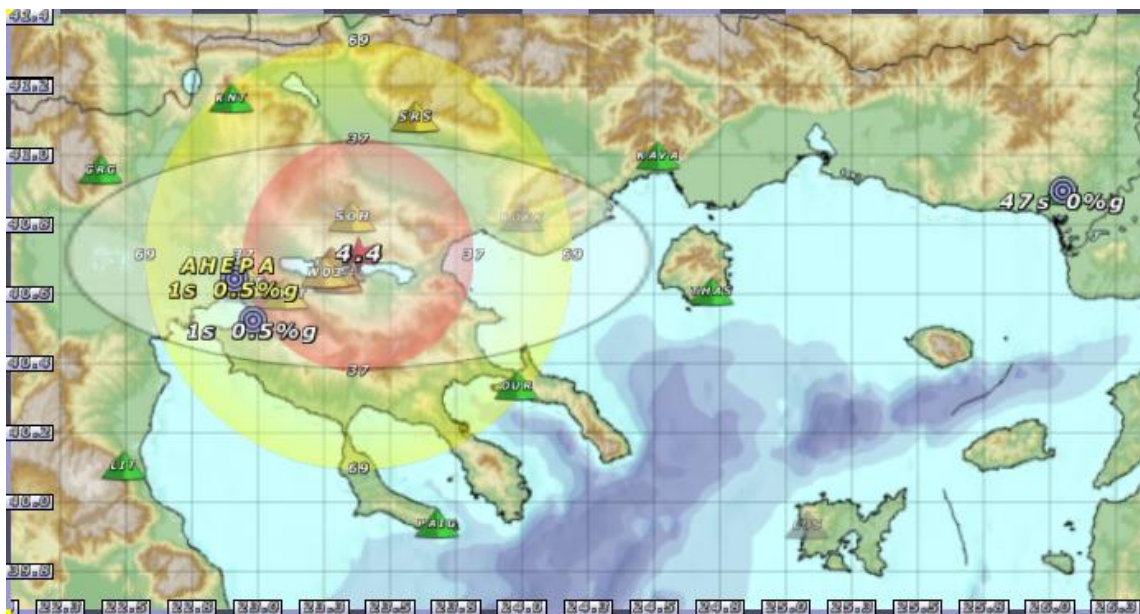
Εικόνα 20 (20131011_0515.wmv)



Εικόνα 21 (20131011_0515.wmv)



Εικόνα 22 (20131011_0515.wmv)

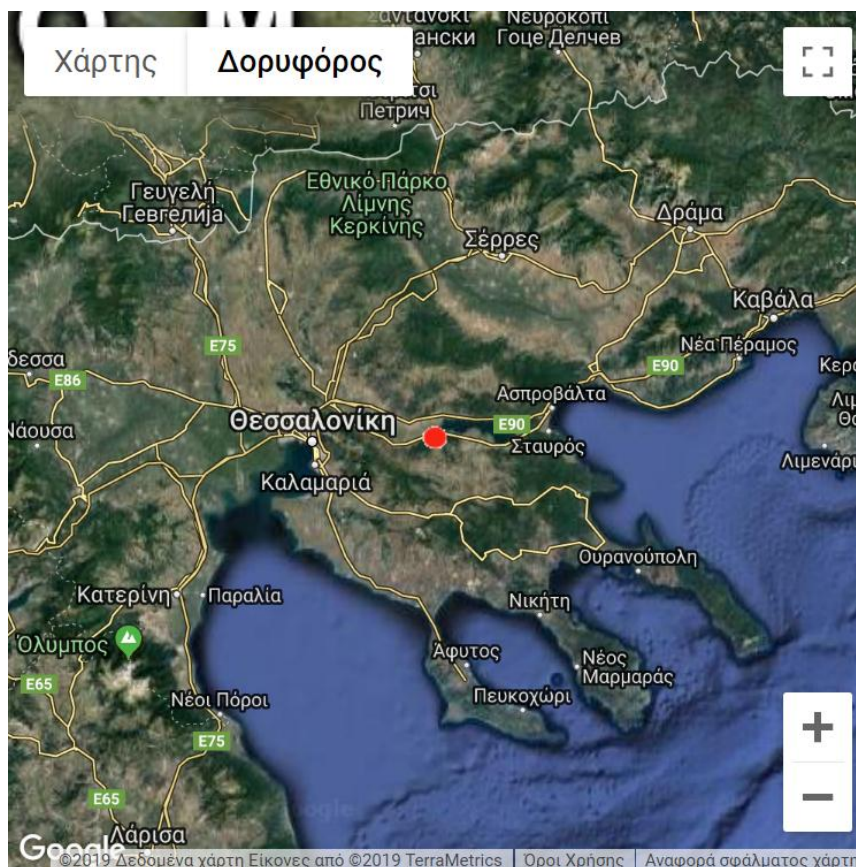


Εικόνα 23 (20131011_0515.wmv)

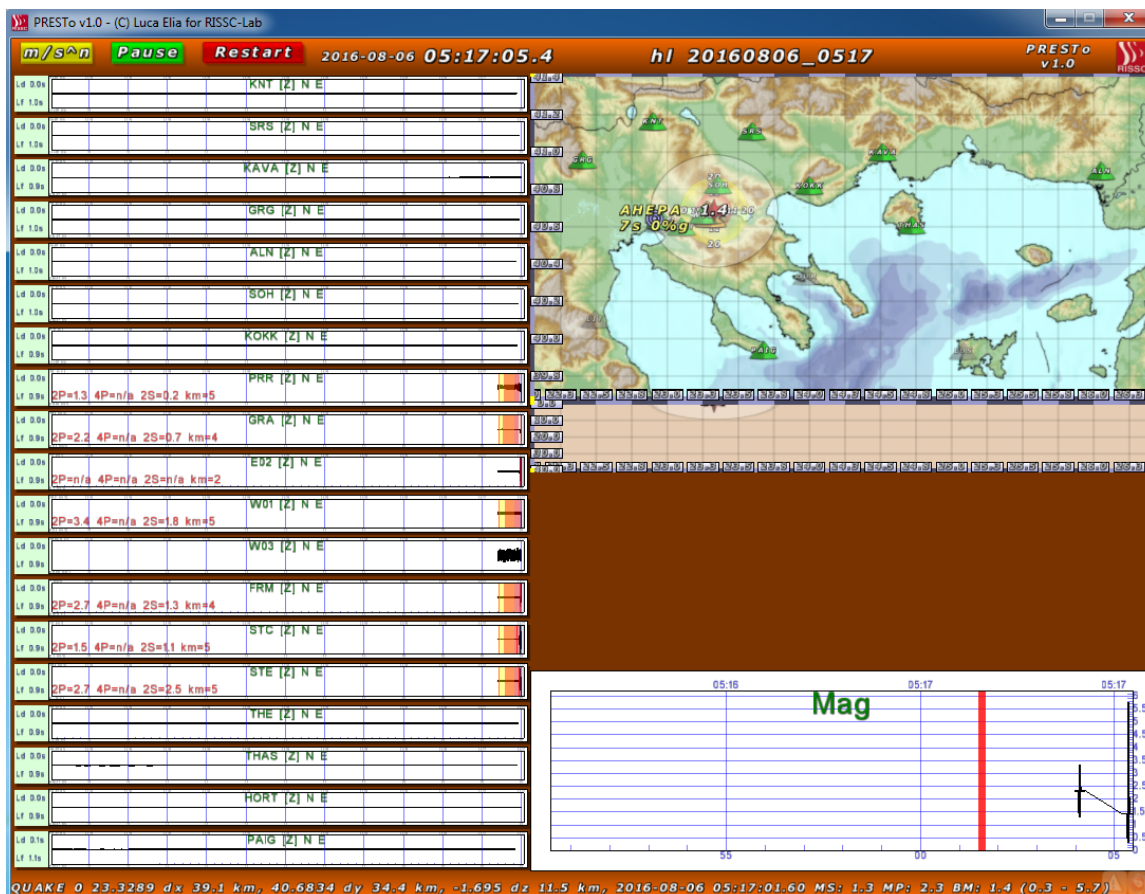
Η σημαντικότερη διαφορά από το πρώτο παράδειγμα που θα πρέπει να παρατηρήσουμε έχει να κάνει με τον χρόνο αντίδρασης που υπολείπεται από την στιγμή της διάρρηξης μέχρι τη στιγμή άφιξης των εγκαρσίων κυμάτων στην περιοχή στόχο. Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω εικόνες(εικ.18 μέχρι εικ.23) ακόμα και στην περίπτωση έκδοσης συναγερμού την στιγμή της ανίχνευσης έντονης σεισμικής κίνησης ο χρόνος αντίδρασης είναι περίπου 6 δευτερόλεπτα. Πρέπει επίσης να επισημανθεί ότι από την αρχή της επεξεργασίας μέχρι την στιγμή της άφιξης των εγκαρσίων κυμάτων η λύση που παρέχεται από το πρόγραμμα είναι ικανοποιητική και βελτιώνεται με την πάροδο των δευτερολέπτων. Αυτό αποτελεί ένδειξη για την καλή εφαρμογή και προσαρμογή του προγράμματος στην χώρα της Βορείου Ελλάδος.

4.1.3 Παράδειγμα 3 : 20160806_0517

Σαν τρίτο παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε τον σεισμό που σημειώθηκε στις 6 Αυγούστου 2016 ώρα 05:17 (εικ.24). Το μέγεθος του σεισμού ήταν $M_L=4.0$ εστιακό βάθος 14.1 χιλιόμετρα



Εικόνα 24 (http://bbnet.gein.noa.gr/alerts_manual/2016/08/evman160806051701_info.html)

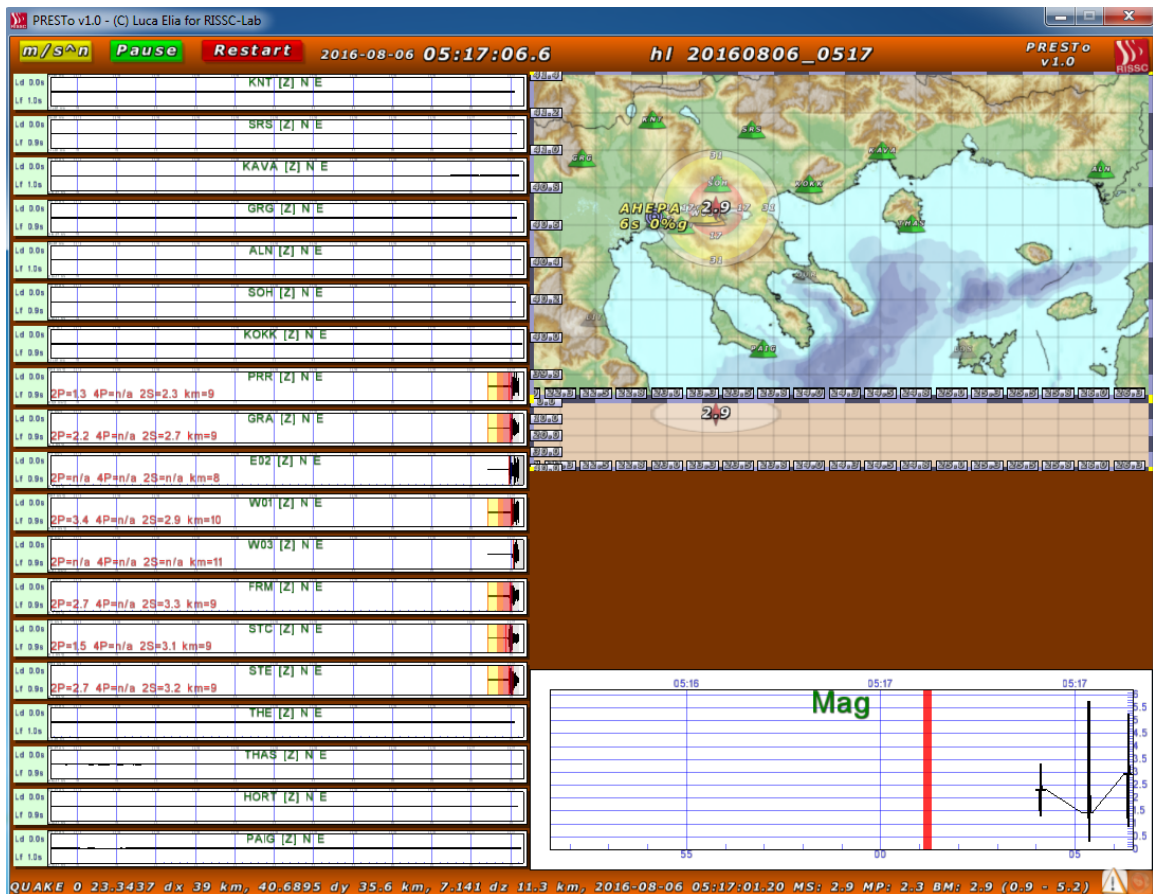


Εικόνα 25 (20160806_0517.wmv)

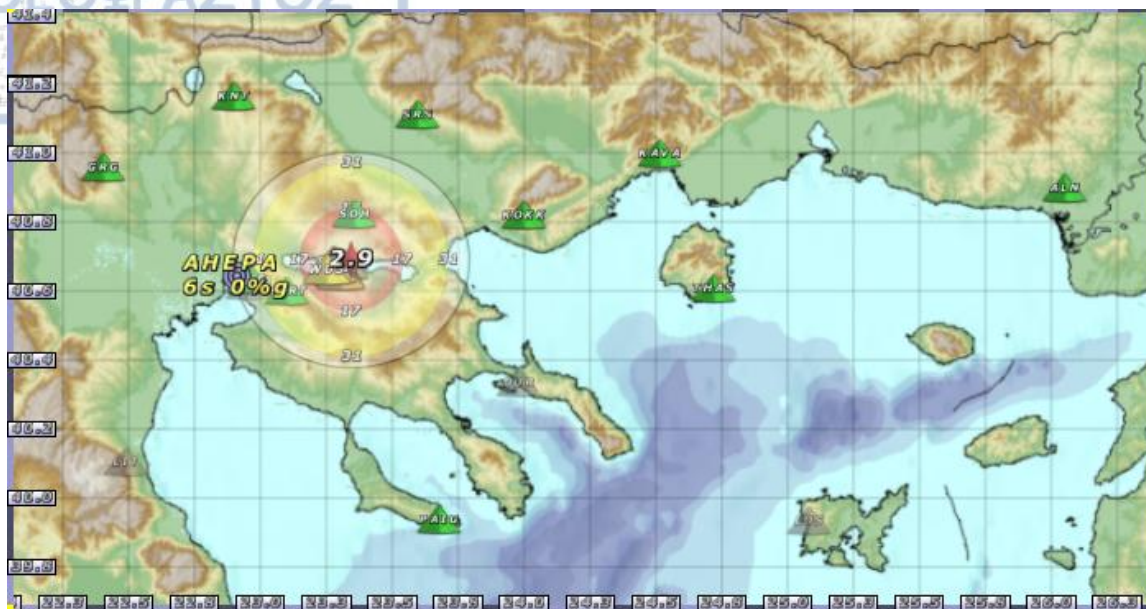
Η αρχική εκτίμηση του προγράμματος απέχει αρκετά από την πραγματική ένταση της σεισμικής κίνησης ενώ η θέση φαίνεται να είναι αρκετά σωστή. Επίσης όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα ακόμα και στην άμεση αυτή λύση, υπάρχουν το πολύ περίπου 7 δευτερόλεπτα σαν χρόνος αντίδρασης κάτι το οποίο προϋποθέτει όμως και το μέγεθος την παρούσα χρονική στιγμή να είναι μεγαλύτερο ενός ορίου, το οποίο σίγουρα δεν καλύπτεται από το $ML=1.4$ που προβάλλεται σαν λύση εκείνη την στιγμή. Έτσι υπογραμμίζεται η σημασία που έχει σαν φυσικό περιορισμό το πρόγραμμα να μην μπορεί να υπολογίζει ικανοποιητικά σωστά και γρήγορα σε μικρές αποστάσεις από την θέση της αρχικής διάρρηξης (εικ.25 και 36).



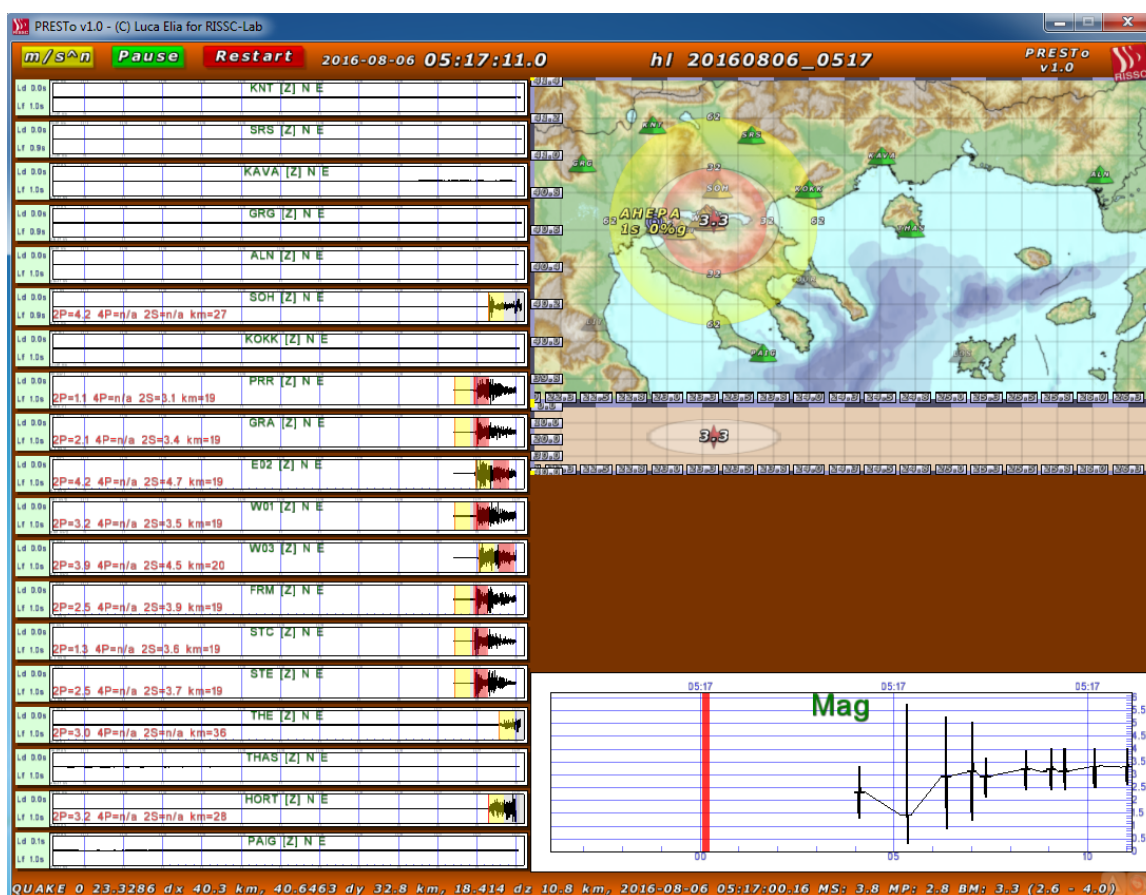
Εικόνα 26 (20160806_0517.wmv)



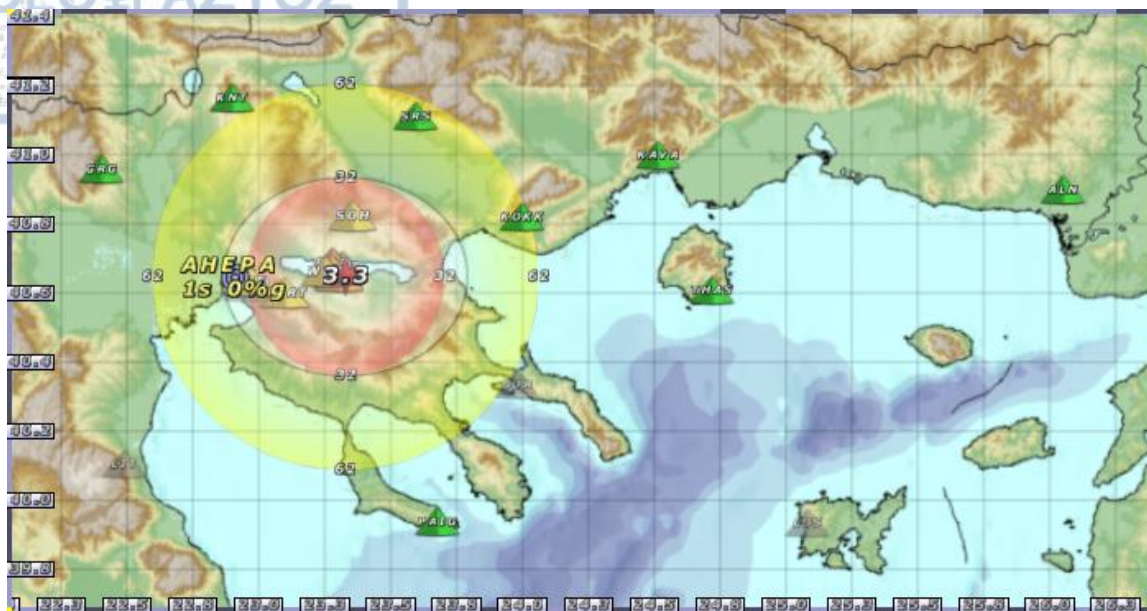
Εικόνα 27 (20160806_0517.wmv)



Εικόνα 28 (20160806_0517.wmv)



Εικόνα 29 (20160806_0517.wmv)



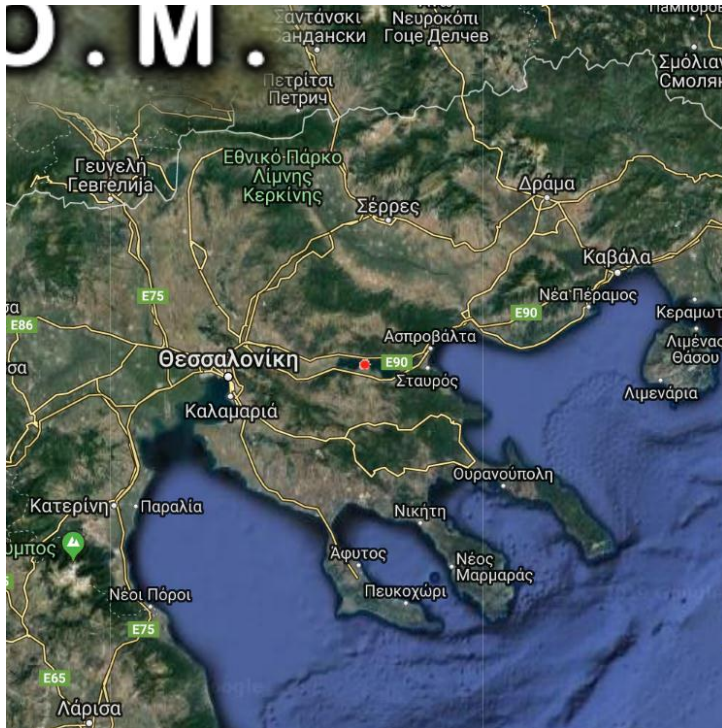
Εικόνα 30 (20160806_0517.wmv)

Με την συνέχεια της επεξεργασίας τα αποτελέσματα σε σχέση με το μέγεθος παρουσιάζουν κάποια βελτίωση χωρίς όμως να είναι έγκυρα εντός κάποιου αποδεκτού χρονικού πλαισίου (εικ. 27-30).

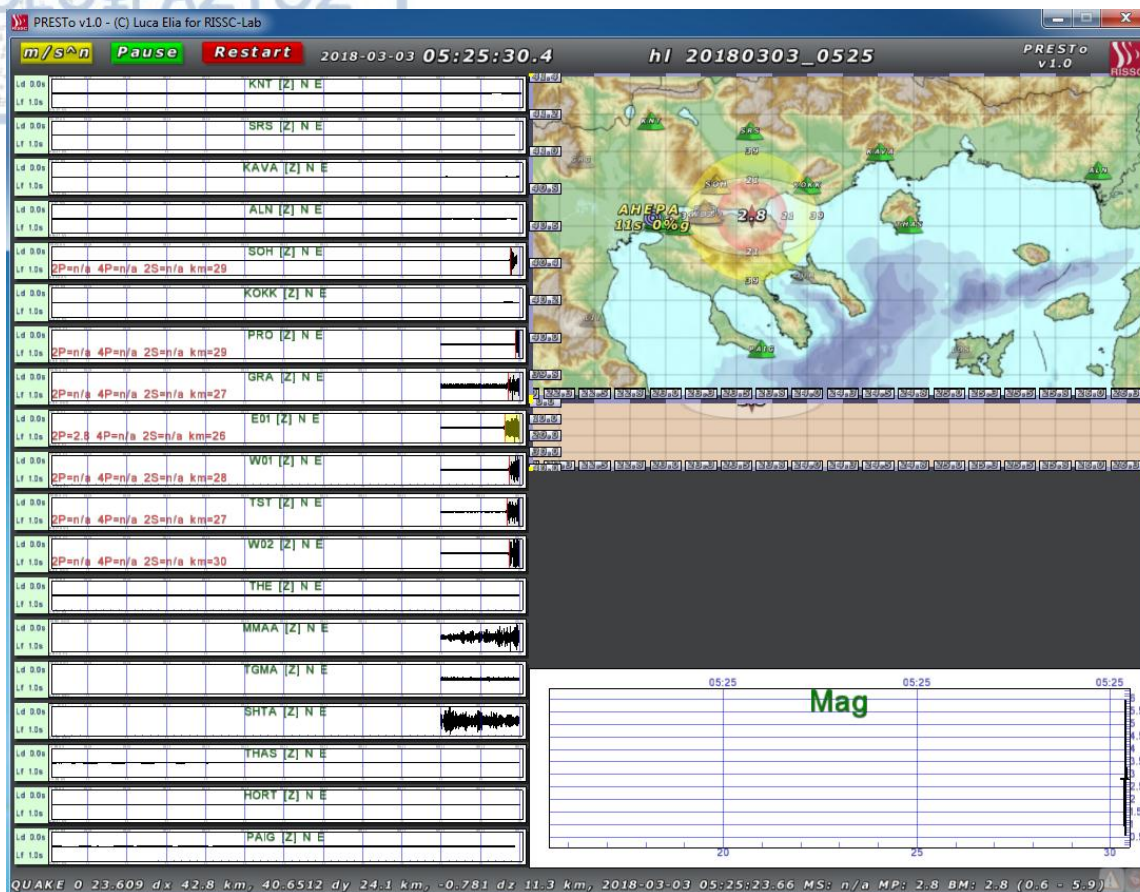
Στην συγκεκριμένη περίπτωση το πρόγραμμα αδυνατούσε να υπολογίσει σωστά το πραγματικό μέγεθος του σεισμού μέσα στο λίγο χρόνο που είχε τεθεί σαν όριο από της απόσταση εστίας και στόχου. Για άλλη μία φορά γίνεται εμφανές ότι όσο πιο κοντά στον στόχο είναι η διάρρηξη τόσο δυσκολότερο είναι να έχουμε μία λύση ακριβείας σε μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πως σε όλη την διάρκεια δοκιμής το ποσοστό g το οποίο θα πλήξει τον στόχο παραμένει σταθερά στο 0%g. Το συγκεκριμένο παράδειγμα δεν αποτελούσε απειλή για κάποια κατασκευή ή εξέθεσε ανθρώπινες ζωές σε κίνδυνο αλλά φαίνεται να δίνει μία πρώτη εικόνα στην περίπτωση κάποιας μεγαλύτερης διάρρηξης στην περιοχή και τις πιθανότητες να υπάρξει προετοιμασία σε καίριους στόχους.

4.1.4 Παράδειγμα 4 : 20180303_0525

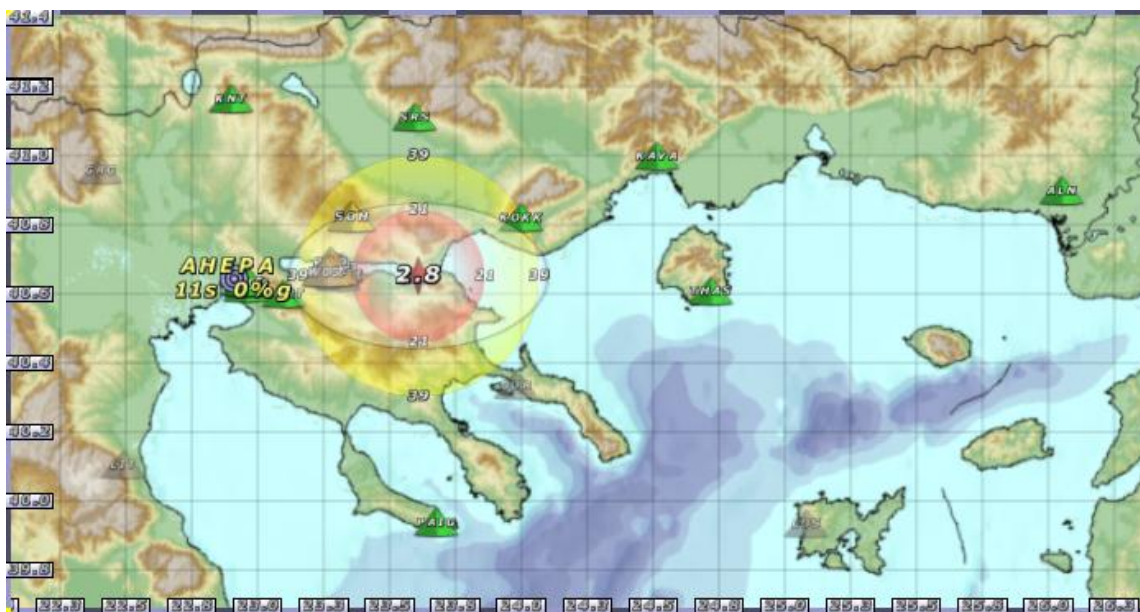
Σαν επόμενο παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε τον σεισμό που σημειώθηκε στις 3 Μαρτίου 201 ώρα 05:25 με εστιακό βάθος 4.9 χιλιόμετρα και μέγεθος ML=3.0 (εικ.31)



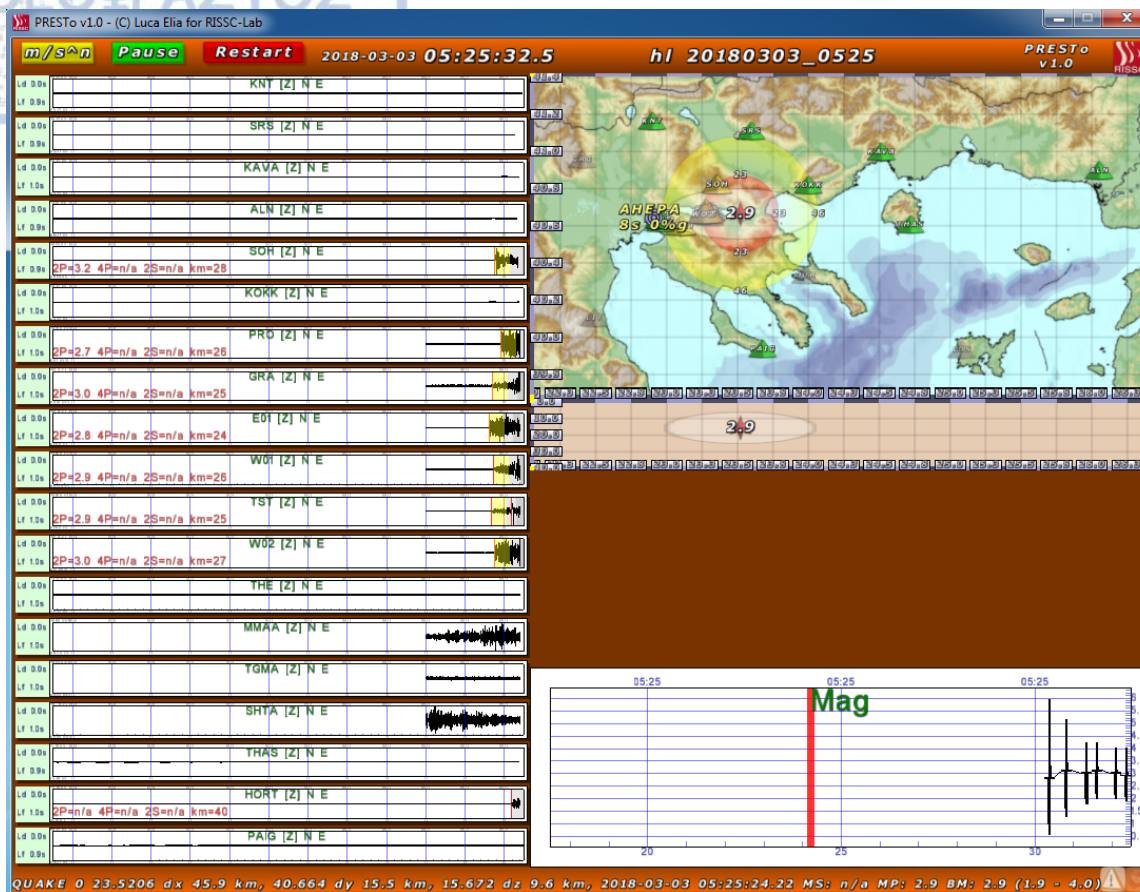
Εικόνα 31 (http://bbnet.gein.noa.gr/alerts_manual/2018/03/evman180303052525_info.html)



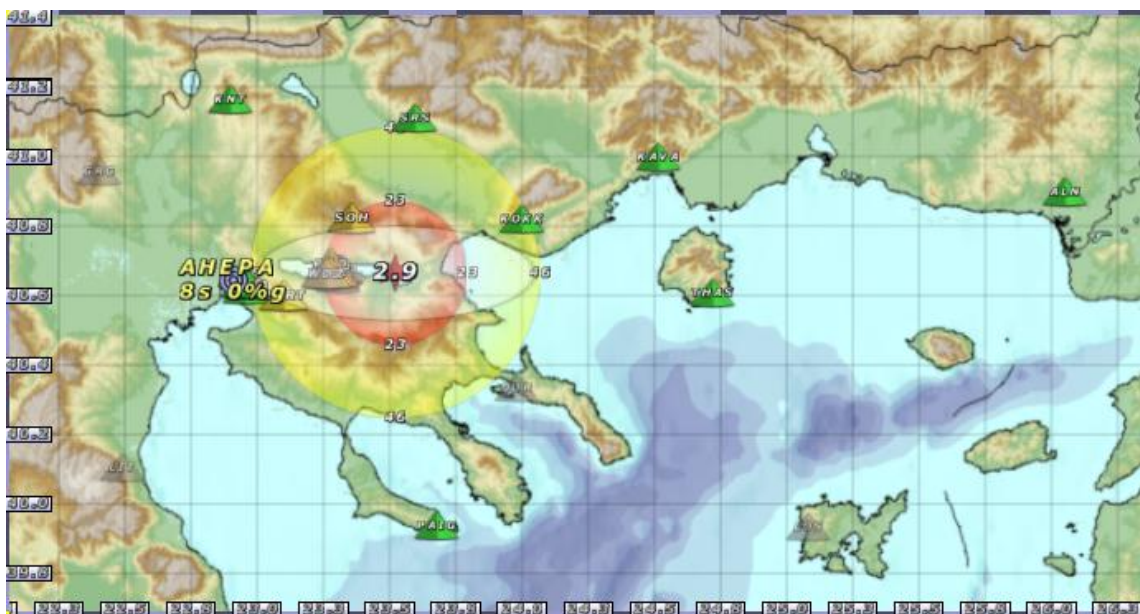
Εικόνα 32 (20180303_0525.wmv)



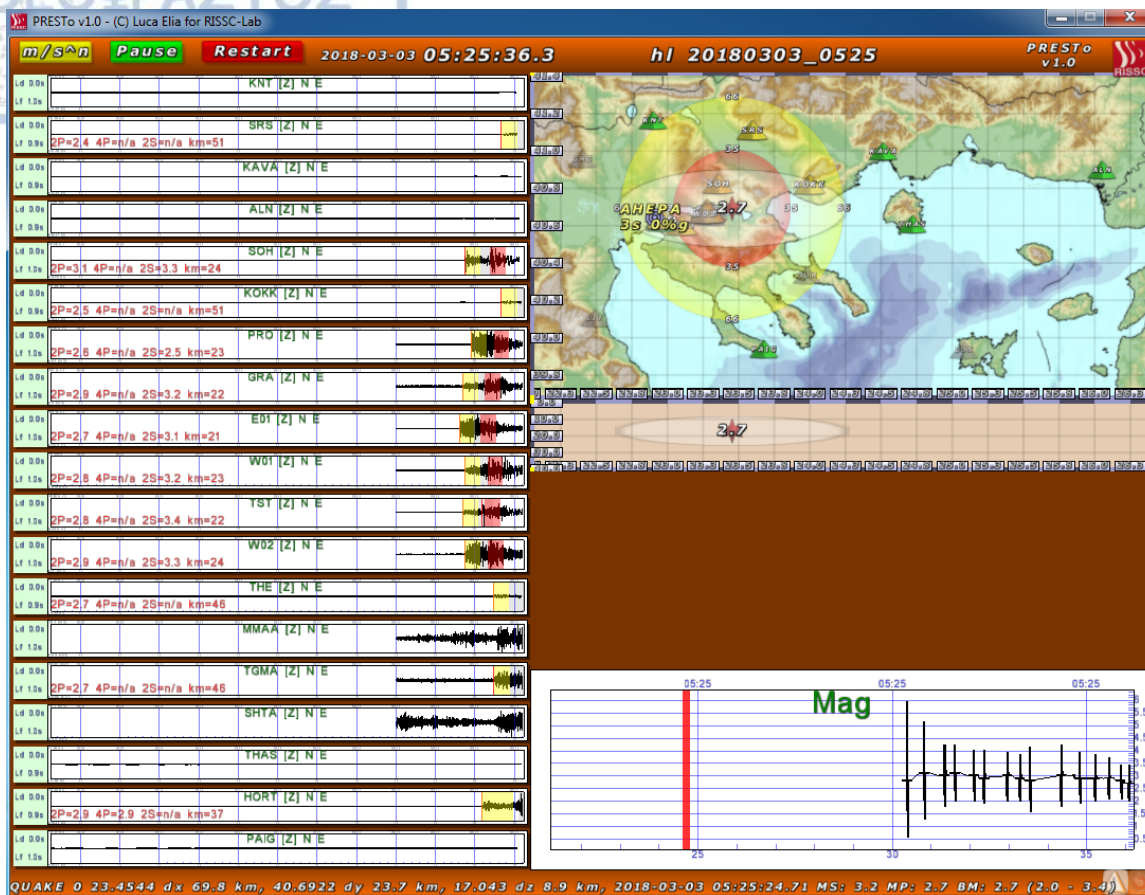
Εικόνα 33 (20180303_0525.wmv)



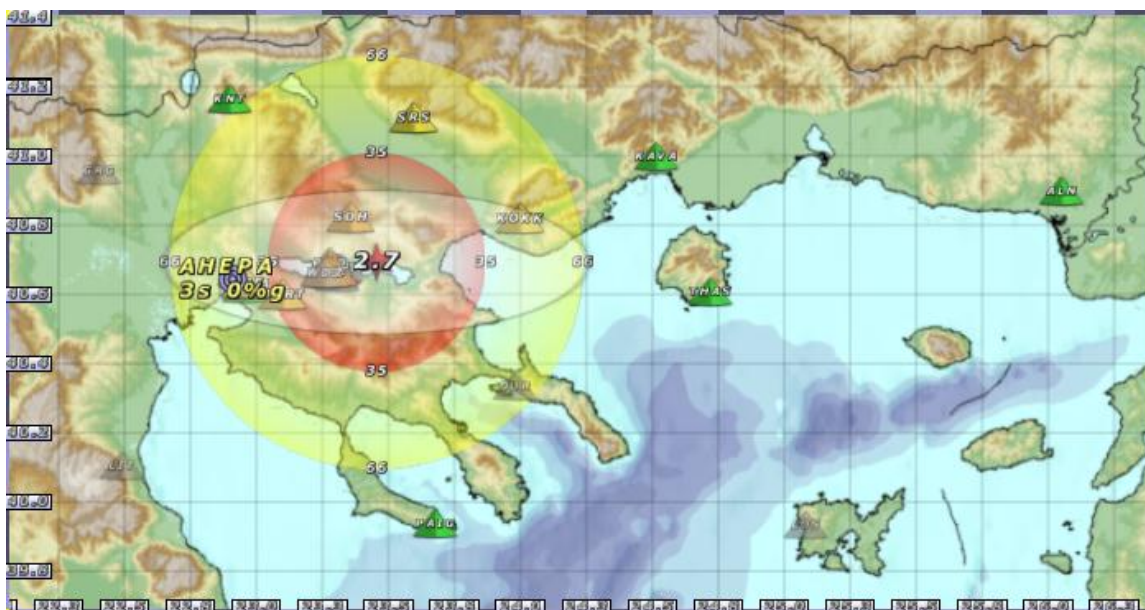
Εικόνα 34 (20180303_0525.wmv)



Εικόνα 35 (20180303_0525.wmv)



Εικόνα 36 (20180303_0525.wmv)

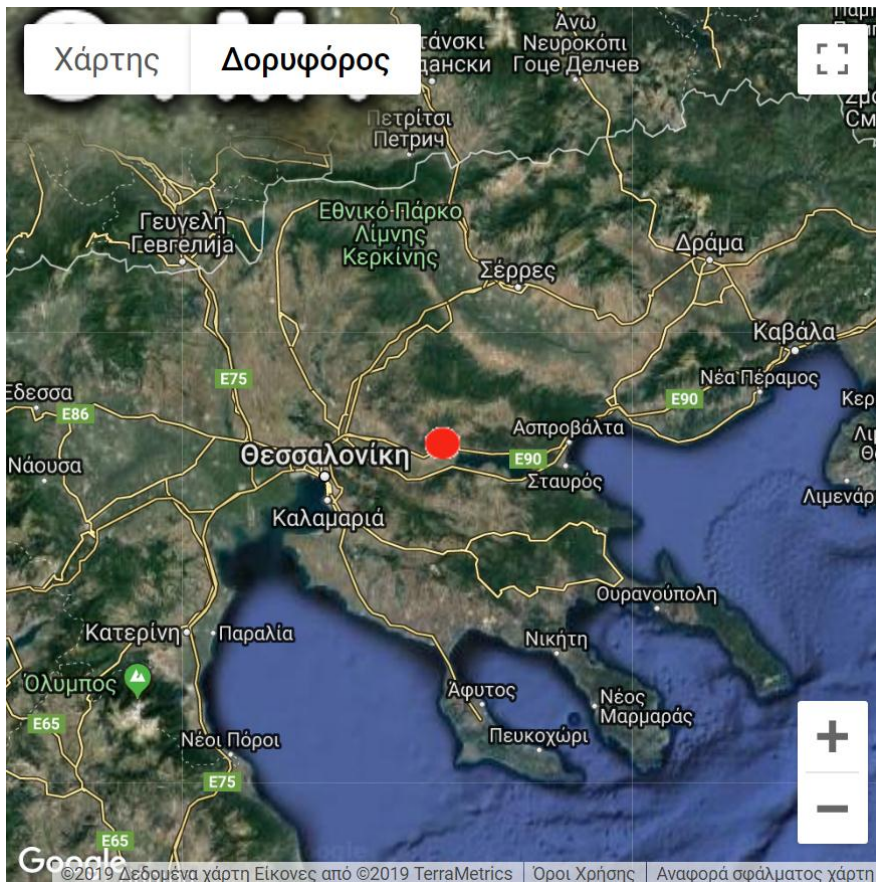


Εικόνα 37 (20180303_0525.wmv)

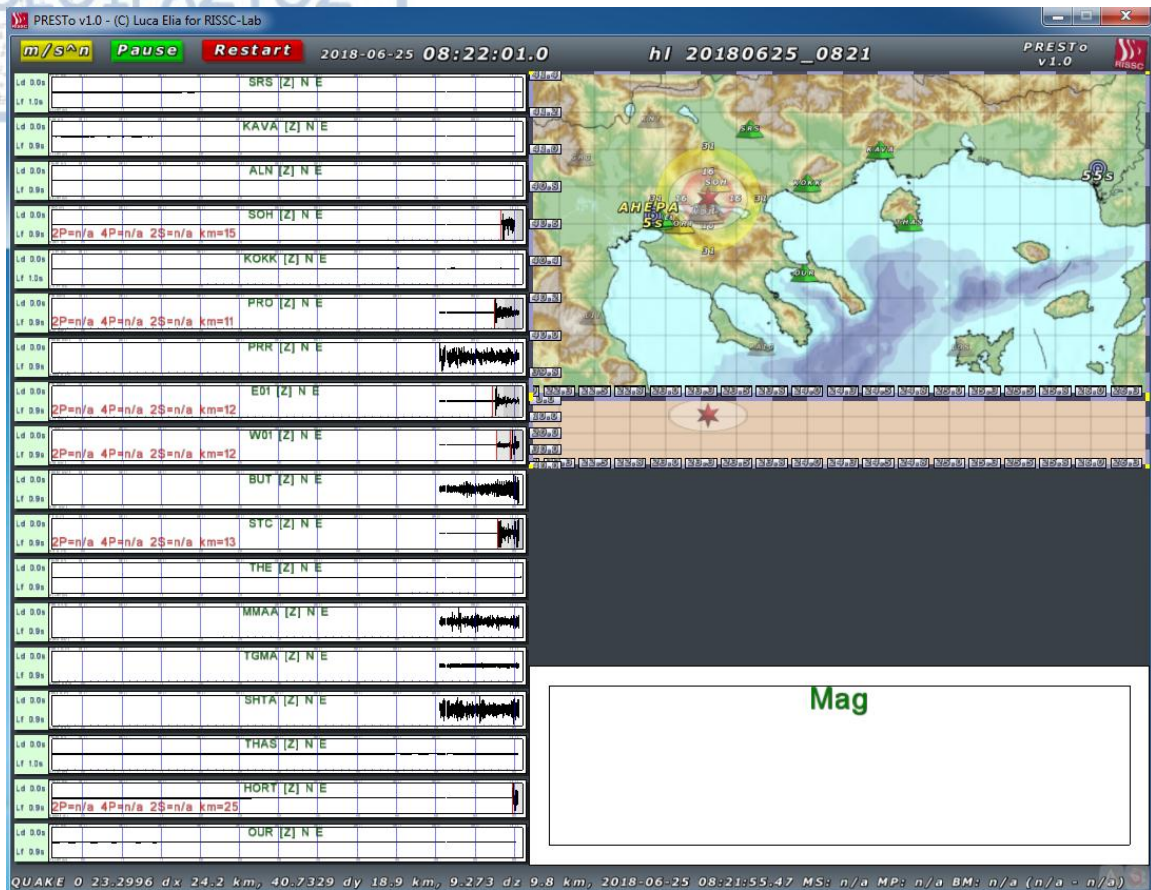
Όπως και στο προηγούμενο παράδειγμα έτσι και σε αυτό ο υπολειπόμενος χρόνος μετράτε σε μερικά μόνο δευτερόλεπτα. Η διαφορά φυσικά είναι ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση οι παράμετροι του σεισμού προσδιορίστηκαν με ικανοποιητική ακρίβεια. Επιπροσθέτως το ποσοστό της επιτάχυνσης g το οποίο επηρεάζει την πόλη της Θεσσαλονίκης υπολογίζεται στο 0% (εικ. 32-37).

4.1.5 Παράδειγμα 5 : 20180625_0821

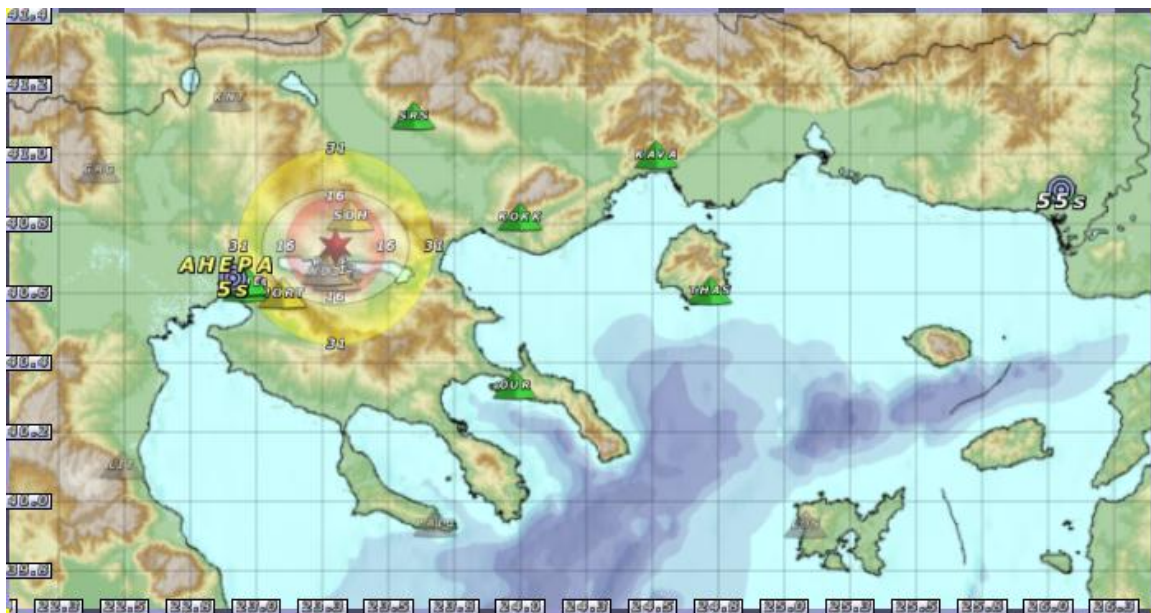
Σαν προτελευταίο παράδειγμα θα χρησιμοποιήσουμε τον σεισμό που σημειώθηκε στις 25 Ιουνίου του 2018 ώρα 08:24 με εστιακό βάθος 6.9 χιλιόμετρα και μέγεθος $ML=4.2$ (εικ.38).



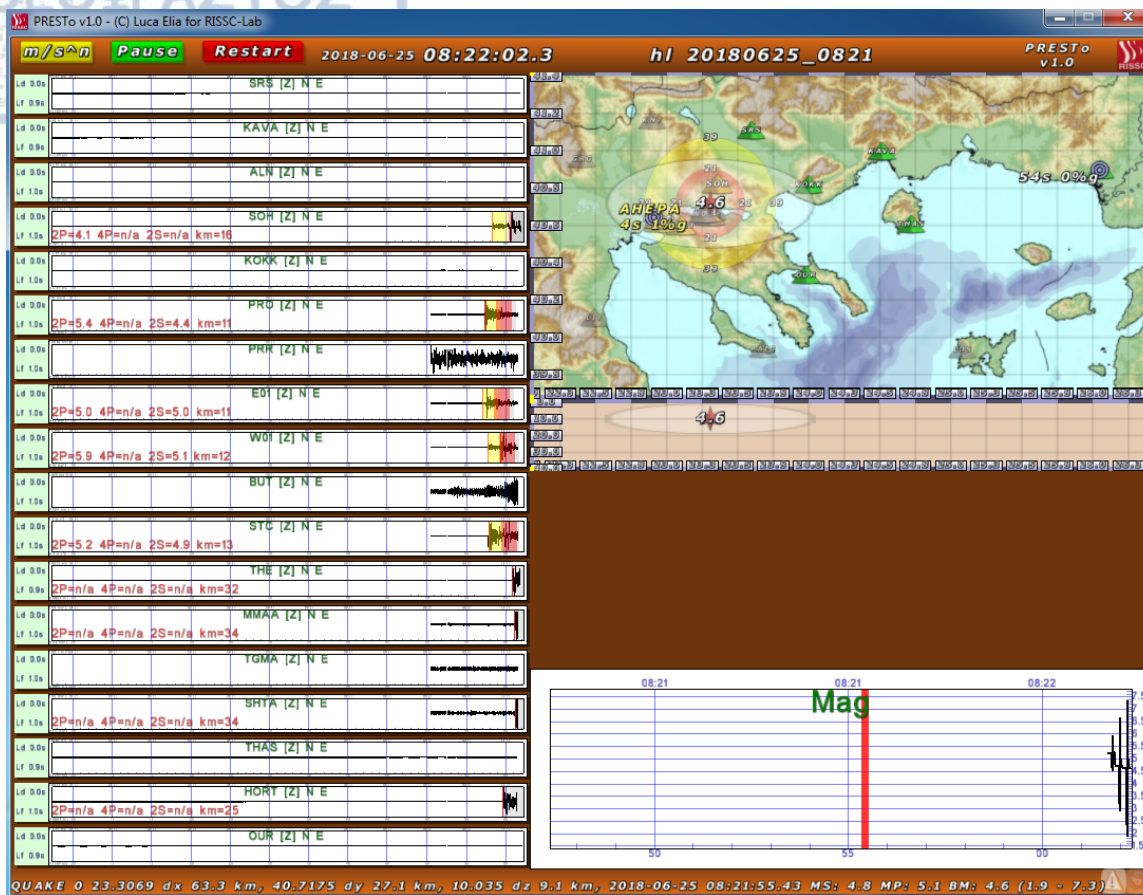
Εικόνα 38 (http://bbnet.gein.noa.gr/alerts_manual/2018/06/evman180625082155_info.html)



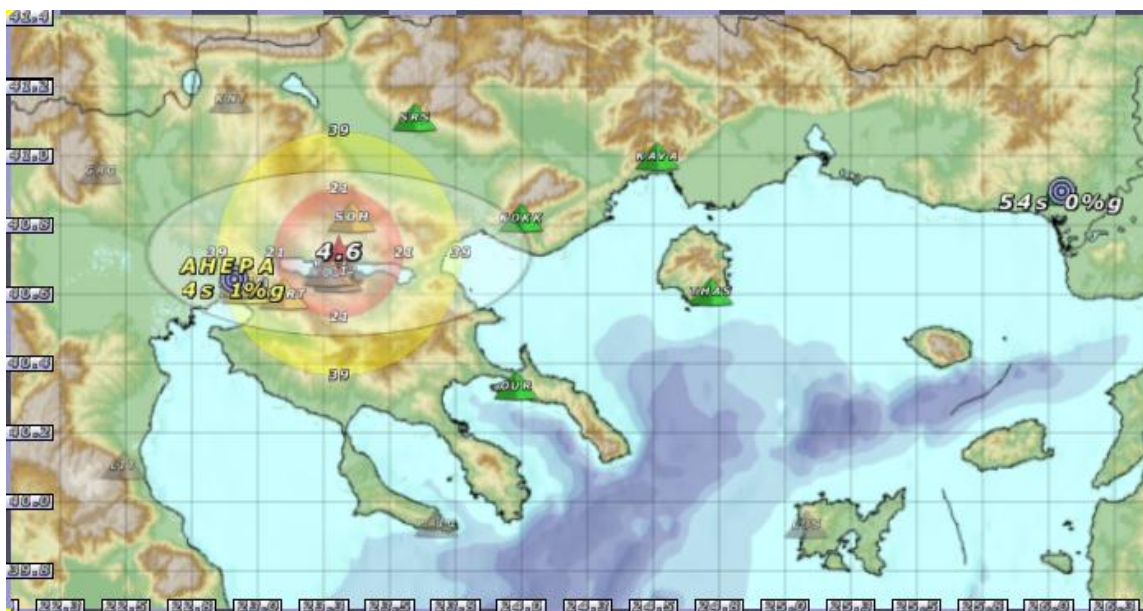
Εικόνα 39 (20180625_0821.wmv)



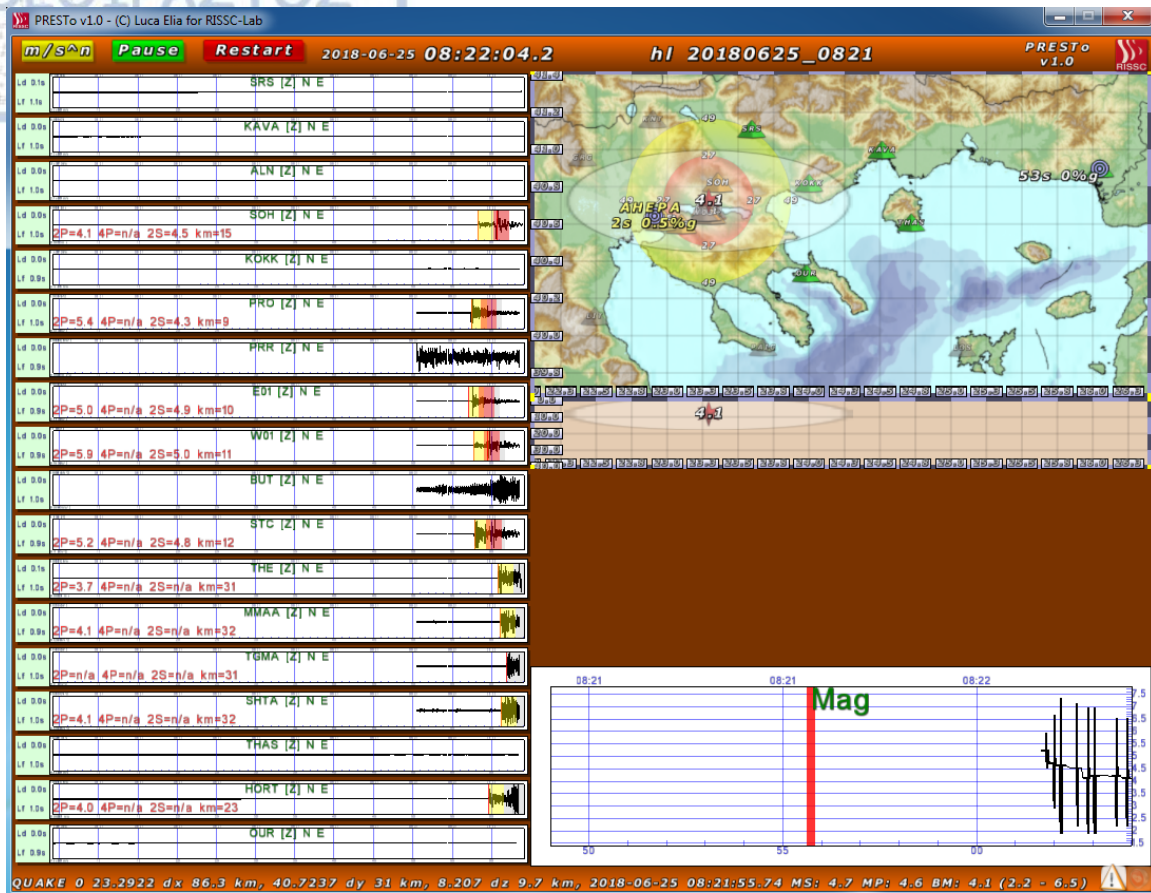
Εικόνα 40 (20180625_0821.wmv)



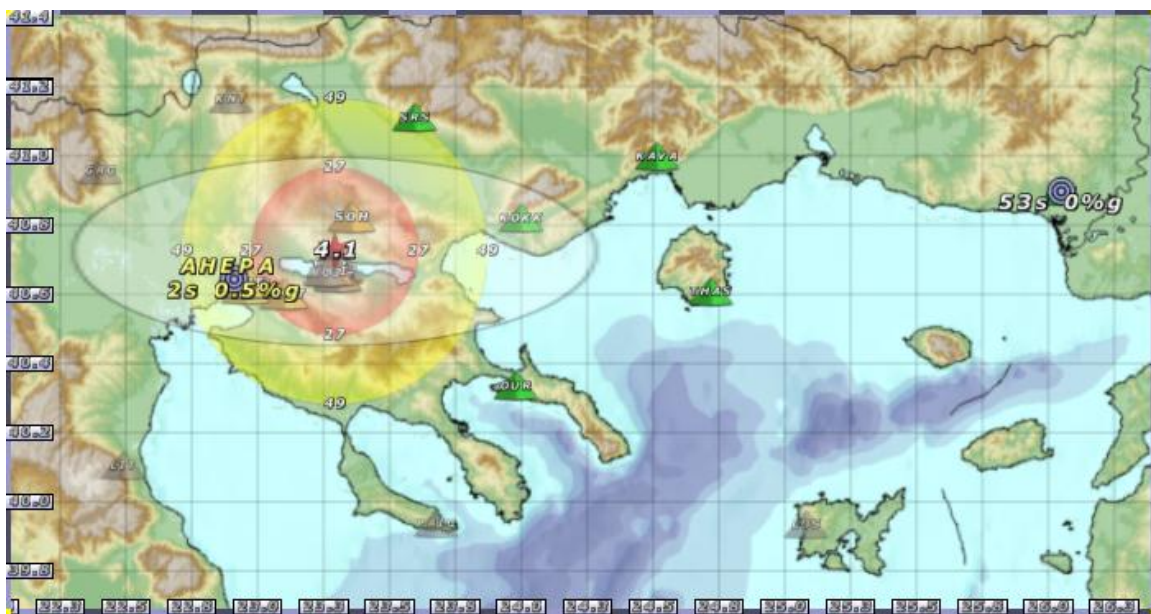
Εικόνα 41 (20180625_0821.wmv)



Εικόνα 42(20180625_0821.wmv)



Εικόνα 43 (20180625_0821.wmv)

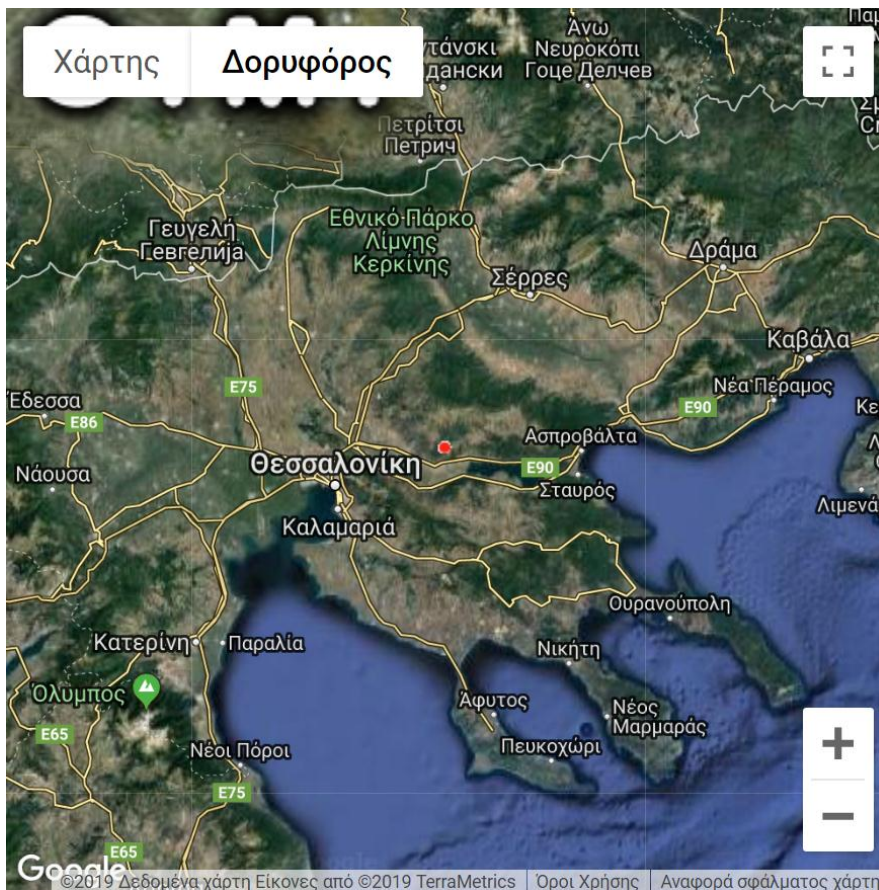


Εικόνα 44 (20180625_0821.wmv)

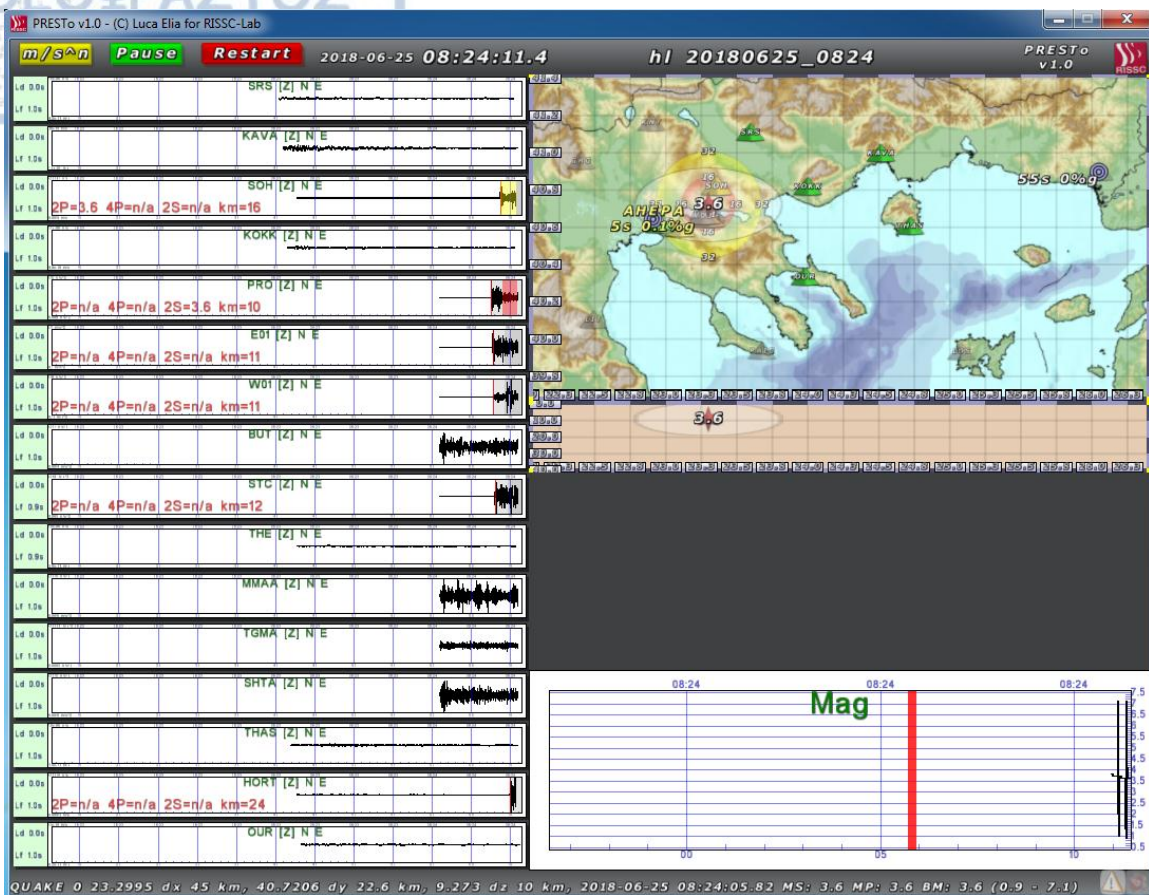
Στην αρχή της ανάλυσης το πρόγραμμα δεν προβάλλει καμία λύση σε σχέση με το μέγεθος του σεισμού αλλά σχηματικά μία κατά προσέγγιση το για τον χρόνο άφιξης των εγκαρσίων κυμάτων στην Θεσσαλονίκη (εικ.39 & εικ.40). Στην συνέχεια 4 δευτερόλεπτα πριν την άφιξη των S κυμάτων στον στόχο η λύση που μας παρέχεται από το πρόγραμμα συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τις πραγματικές παραμέτρους που προκύπτουν από μεταγενέστερη επεξεργασία των δεδομένων, ενώ η επιτάχυνση g υπολογίζεται στο 0.5% (εικ. 41-44).

4.1.6 Παράδειγμα 6 : 20180625_0820

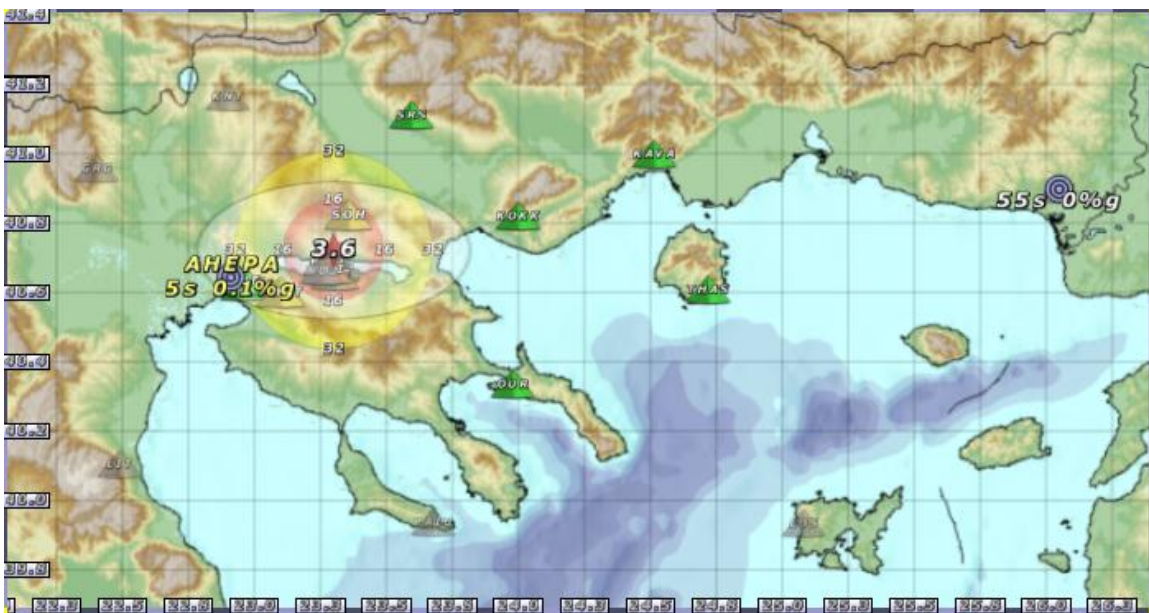
Σαν τελευταίο παράδειγμα θα πάρουμε τον σεισμό που έγινε 3 λεπτά μετά το παράδειγμα 5 δηλαδή στις 25 Ιουνίου 2018 ώρα 08:24, εστιακό βάθος 8.4 χιλιόμετρα και μέγεθος ML=3.6 (εικ. 45)



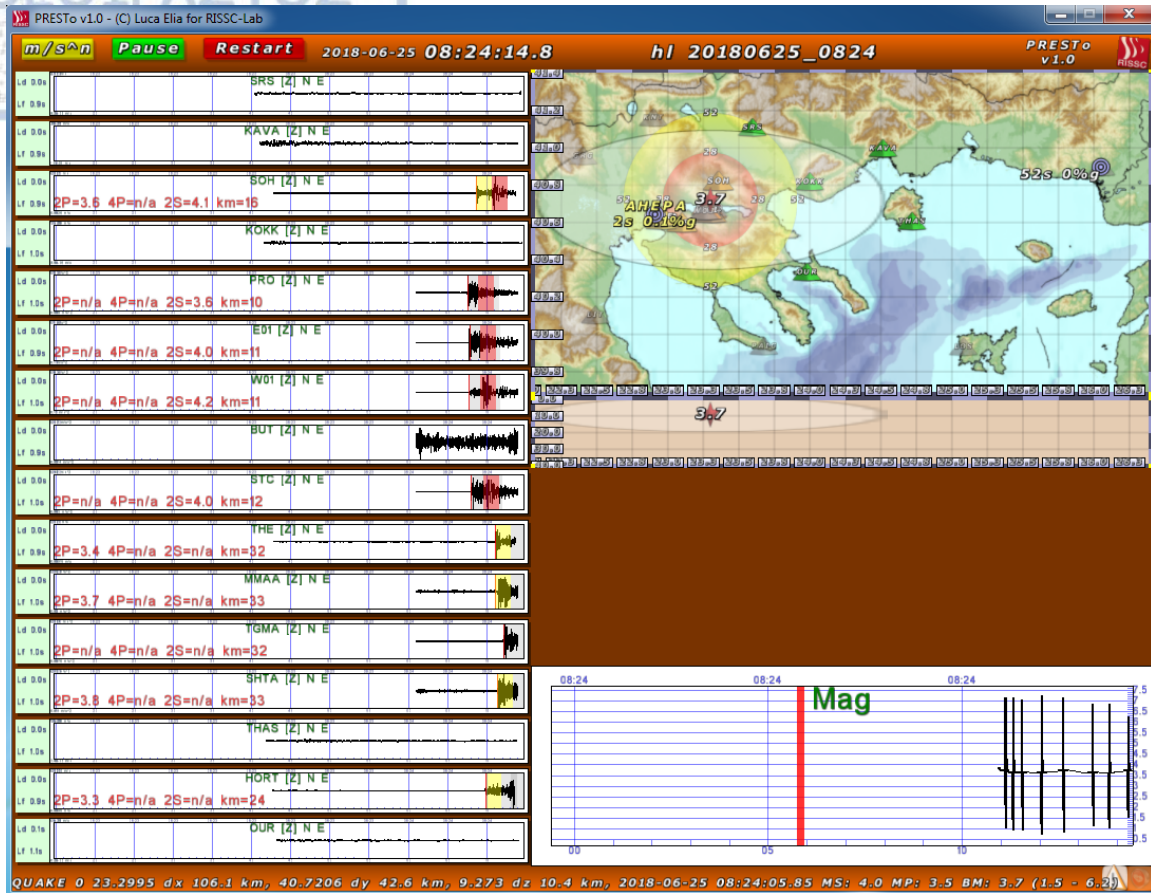
Εικόνα 45 (http://bbnet.gein.noa.gr/alerts_manual/2018/06/evman180625082406_info.html)



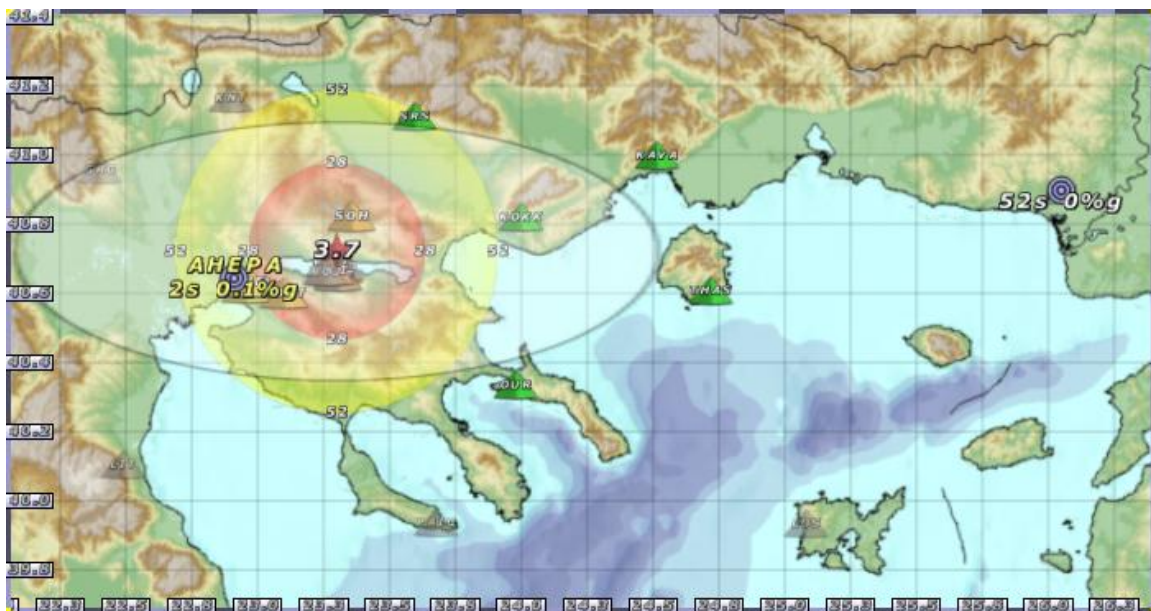
Εικόνα 46 (20180625_0820.wmv)



Εικόνα 47 (20180625_0820.wmv)



Εικόνα 48 (20180625_0820.wmv)



Εικόνα 49 (20180625_0820.wmv)

Αρχικά η όλη διαδικασία υπολογισμού έχει συνολικό χρόνο 6 δευτερόλεπτα καθώς η απόσταση στόχου πηγής όπως και στα προηγούμενα παραδείγματα είναι πολύ μικρή. Από την αρχή επεξεργασίας (εικ.46 & εικ.47) η λύση είναι ακριβώς η ίδια με αυτή που προκύπτει και από μη αυτοματοποιημένες μεθόδους, ενώ στην συνέχεια (εικ.48 & εικ.49) υπάρχουν απειροστές διαφορές οι οποίες δεν επηρεάζουν την ερμηνεία των αποτελεσμάτων

4.2 Συμπεράσματα

Από την εξέταση των παραπάνω παραδειγμάτων προκύπτει πως το presto λειτουργεί με μεγάλη ακρίβεια στο χώρο της βορείου Ελλάδος. Όταν η απόσταση μεταξύ στόχου και επικέντρου είναι μεγαλύτερη τόσο βελτιώνεται η ποιότητα των αποτελεσμάτων και πλησιάζουν περισσότερο στην πραγματικότητα ενώ παράλληλα παρέχεται και η δυνατότητα έκδοσης προειδοποίησης σε δομές υψηλής σημασίας. Όπως επίσης φάνηκε η πυκνότητα του σεισμολογικού δικτύου παίζει μεγάλο ρόλο στην αποτελεσματικότητα του συνόλου του συστήματος. Ένας μεγαλύτερος αριθμός σεισμομέτρων θα έδινε την δυνατότητα μεγαλύτερης ακρίβειας και ταχύτερης επεξεργασίας των δεδομένων ο όγκος των οποίων θα αύξανε σημαντικά.

Στην περιοχή γύρω από την πόλη της Θεσσαλονίκης αν και τα σεισμόμετρα είναι αρκετά παρουσιάζεται το πρόβλημα του χρόνου. Λόγω της μικρής απόστασης είναι απαραίτητη η μέγιστη ταχύτητα στο επίπεδο των υπολογισμών αλλά και στην μετάδοση των πληροφοριών στο κεντρικό υπολογιστή στον οποίο τελούνται οι διεργασίες για την απόφαση σε σχέση με την έκδοση συναγερμού. Επιπλέον θα πρέπει να ληφθεί υπόψιν και ο χρόνος που απαιτείται από τα διάφορα δίκτυα να μεταφέρουν την πληροφορία. Τα 5 τελευταία παραδείγματα μπορεί να ήταν μικρού μεγέθους αλλά αναδεικνύουν την λεπτή ισορροπία ανάμεσα στην σωστή προειδοποίηση και την έλλειψη αυτής στην περίπτωση μίας έντονης σεισμικής κίνησης στην κοντινή περιοχή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

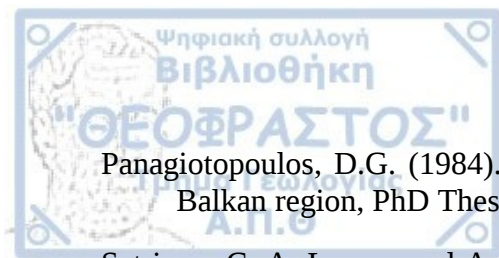
Κατά την διάρρηξη των πετρωμάτων του φλοιού, υφίσταται απελευθέρωση ενέργειας με την μορφή ελαστικών κυμάτων. Τα κύματα αυτά διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες κάθε μία από τις οποίες έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά. Για την περίπτωση των συστημάτων έγκαιρης προειδοποίησης μας ενδιαφέρουν ιδιαίτερος τα κύματα χώρου, τα οποία χωρίζονται σε υψηλής ταχύτητας επιμήκη και σε μικρότερης ταχύτητας και καταστρεπτικά εγκάρσια. Λόγω αυτής της ιδιότητας μετρώντας την διαφορά στον χρόνο άφιξης ανάμεσα σε αυτές τις κατηγορίες κυμάτων σε συγκεκριμένους σταθμούς, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της χρονικής στιγμής κατά την οποία τα εγκάρσια κύματα θα πλήξουν μία περιοχή.

Η ανάπτυξη και χρήση τέτοιων συστημάτων γίνεται σε αρκετές ευάλωτες σε έντονη σεισμική κίνηση περιοχές στον κόσμο όπως, Ιαπωνία Ηνωμένες πολιτείες της Αμερικής, Ιταλία, Μεξικό, Χιλή, Ρουμανία. Σε πληθώρα περιπτώσεων η άμεση ενημέρωση του κοινού προστάτευσε ανθρώπινες ζωές και απέτρεψε ένα μέρος υλικών καταστροφών υπογραμμίζοντας την χρησιμότητα τέτοιων εργασιών.

Στον χώρο της βορείου Ελλάδος η ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος βρίσκεται υπό εξέλιξη και για τους υπολογισμούς χρησιμοποιείται το Ιταλικής ανάπτυξης πρόγραμμα Presto. Το Presto αποτελεί μία φορητή εφαρμογή ανοικτού κώδικα η οποία επιτρέπει την προσομοίωση της λειτουργίας του συνόλου του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Με αυτό τον τρόπο καθορίζεται η πιθανότητα αποτελεσματικής λειτουργίας σε πραγματικό χρόνο. Από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν παραπάνω φαίνεται πως στην πλειοψηφία των περιπτώσεων η εύρεση των παραμέτρων μιας σεισμικής διάρρηξης προσδιορίζονται αρκετά ικανοποιητικά. Επιπλέον γίνεται ξεκάθαρο ότι ο αριθμός των σεισμολογικών σταθμών και η κατανομή τους στον χώρο επηρεάζει σημαντικά την αυτοματοποιημένη ερμηνεία, ενώ όταν η θέση της εστίας είναι πολύ κοντά στον στόχο η έγκαιρη ερμηνεία είναι αδύνατη



- Brendan W. Crowell, David A. Schmidt, Paul Bodin, John E. Vidale, Ben Baker, Sergio Barrientos, and Jianghui Geng (2018). G-FAST Earthquake Early Warning Potential for Great Earthquakes in Chile, *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220170180
- Crowell, B. W., D. A. Schmidt, P. Bodin, J. E. Vidale, J. Gombert, J. R. Hartog, V. C. Kress, T. I. Melbourne, M. Santillan, S. E. Minson, et al. (2016). Demonstration of the Cascadia G-FAST geodetic earthquake early warning system for the Nisqually, Washington, earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 87, no. 4, doi: 10.1785/0220150255.
- Espinosa-Aranda, A. J. M., A. Jimenez, G. Ibarrola, F. Alcantar, A. Aguilar, M. Inostroza, and S. Maldonado (1995). Mexico City seismic alert system, *Seism. Res. Lett.* 66, no. 6, 42–53, doi: 10.1785/gssrl.66.6.42.
- Gerardo Suárez, J. M. Espinosa-Aranda, Armando Cuéllar, Gerardo Ibarrola, Armando García, Martín Zavala, Samuel Maldonado, and Roberto Islas (2018). A Dedicated Seismic Early Warning Network: The Mexican Seismic Alert System (SASMEX), *Seismol. Res. Lett.*, doi:10.1785/0220170184
- Given, D., E. Cochran, T. Heaton, E. Hauksson, R. Allen, M. Hellweg, J. Vidale, and P. Bodin (2014). Technical implementation plan for the ShakeAlert Production Prototype system—An earthquake early warning system for the West Coast of the United States, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2014–1097, 25 pp.
- Japan Meteorological Agency (JMA). Ανακτήθηκε από <https://www.jma.go.jp/jma/en/Background/mission.html>
- Kamigaichi, O. (2004). JMA Earthquake Early Warning, *JAEE Journal*, 134-137
- Kamigaichi, O., Makoto Saito, Keiji Doi, Toshiyuki Matsumori, Shin'ya Tsukada, Kiyoshi Takeda, Toshihiro Shimoyama, Kouji Nakamura, Masashi Kiyomoto, and Yukihiro Watanabe (2009). Earthquake Early Warning in Japan: Warning the General Public and Future Prospects, *Seismol. Res. Lett.*, doi: 10.1785/gssrl.80.5.717
- Kohler, M. D., E. S. Cochran, D. Given, S. Guivits, D. Neuhauser, I. Henson, R. Hartog, P. Bodin, V. Kress, S. Thompson, et al. (2017). Earthquake early warning ShakeAlert system: West coast wide Production Prototype, *Seismol. Res. Lett.* doi: 10.1785/0220170140.
- Lay, T. and Hiroo Kanamori (2011) Insights from the great 2011 Japan earthquake *Phys. Today* 64(12), 33 (2011); doi: 10.1063/PT.3.1361
- Marmureanu, I.A. Moldovan, V.E. Toader, GH. Marmureanu, C. Ionescu (2019). Seismic Warning Time For Vrancea Earthquakes In Three Large Dams Sites Situated In The Eastern Part of Romania, *Rom. Rep. in Physics*, article no.703



Panagiotopoulos, D.G. (1984). Travel time curves and crustal structure in the southern Balkan region, PhD Thesis, Aristotle University of Thessaloniki.

Satriano, C, A. Lomax and A. Zollo (2008). Real-time evolutionary earthquake location for seismic early warning, Bull. Seism. Soc. Am. 98(3), 1482-1494.

Satriano, C., L. Elia, C. Martino, M. Lancieri, A. Zollo and G. Iannaccone (2011). PRESTo, the earthquake early warning system for southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives, Soil Dyn. & Earthq. Eng. 31(2), 137-153.

Zollo, A., O. Amoroso, M. Lancieri, Y.-M. Wu and H. Kanamori (2010). A threshold-based earthquake early warning using dense accelerometer networks, Geophys. J. Int. 183(2), 963-974.

Web-references

<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/159365/G-FAST-Earthquake.pdf?sequence=1>

http://www.amracenter.com/SAFER/doc/dissemination/SAFER_Final_Report.pdf

<http://www.geo.mtu.edu/UPSeis/waves.html>

<http://www.resyr.infp.ro/>

<http://www.rrp.infm.ro/IP/2018/AN71703.pdf>

https://authors.library.caltech.edu/28770/1/Lay2011p16763Phys_Today.pdf

https://www.iris.edu/hq/files/programs/education_and_outreach/aotm/6/SeismicWaveBehavior_Building.pdf

<https://www.jma.go.jp/jma/en/Background/mission.html>

https://www.jstage.jst.go.jp/article/jaee2001/4/3/4_3_134/_pdf

https://www.researchgate.net/publication/322999028_A_Dedicated_Seismic_Early_Warning_Network_The_Mexican_Seismic_Alert_System_SASMEX

<https://www.shakealert.org/implementation/shakealert-phase-1/>

<https://www.ucl.ac.uk/EarthSci/people/lidunka/GEOL2014/Geophysics4%20-%20Seismic%20waves/SEISMOLOGY%20.htm>