



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΓΕΩΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ – ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ

ΠΜΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΓΗΣ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ (ΓΕΩΦΥΣΙΚΗ – ΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ)

Προχωρημένη Σεισμολογία (ΓΣ-Υ04)

Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών

Περιεχόμενα μαθήματος

- Κλασικές μέθοδοι προσδιορισμού εστιακών παραμέτρων
- Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Σεισμών (ΣΕΠΣ)
- Κατηγορίες μεθόδων ΕΠΣ
- Ταχεία ανίχνευση άφιξης σεισμικών κυμάτων
- Ταχύς εντοπισμός υποκέντρου
- Ταχύς προσδιορισμός μεγέθους
- Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπτερασμένου ρήγματος
- Επιτόπιες μέθοδοι
- Δομοστοιχείο απόφασης
- Επιχειρησιακές προκλήσεις
- Εφαρμογές ΣΕΠΣ

Εστιακές παράμετροι σεισμού

Με τον όρο «εστιακές παράμετροι» ή «παράμετροι σεισμικής πηγής» (*source parameters*) εννοούμε ένα σύνολο από πληροφορίες οι οποίες ταυτοποιούν έναν ορισμένο σεισμό και τον διακρίνουν από άλλα σεισμικά γεγονότα.

Οι βασικές εστιακές παράμετροι είναι:

- Χρόνος γένεσης (*origin time*)
- Γεωγραφικές συντεταγμένες επικέντρου (*epicenter*)
- Εστιακό βάθος (*focal depth*)
- Μέγεθος (*magnitude*)

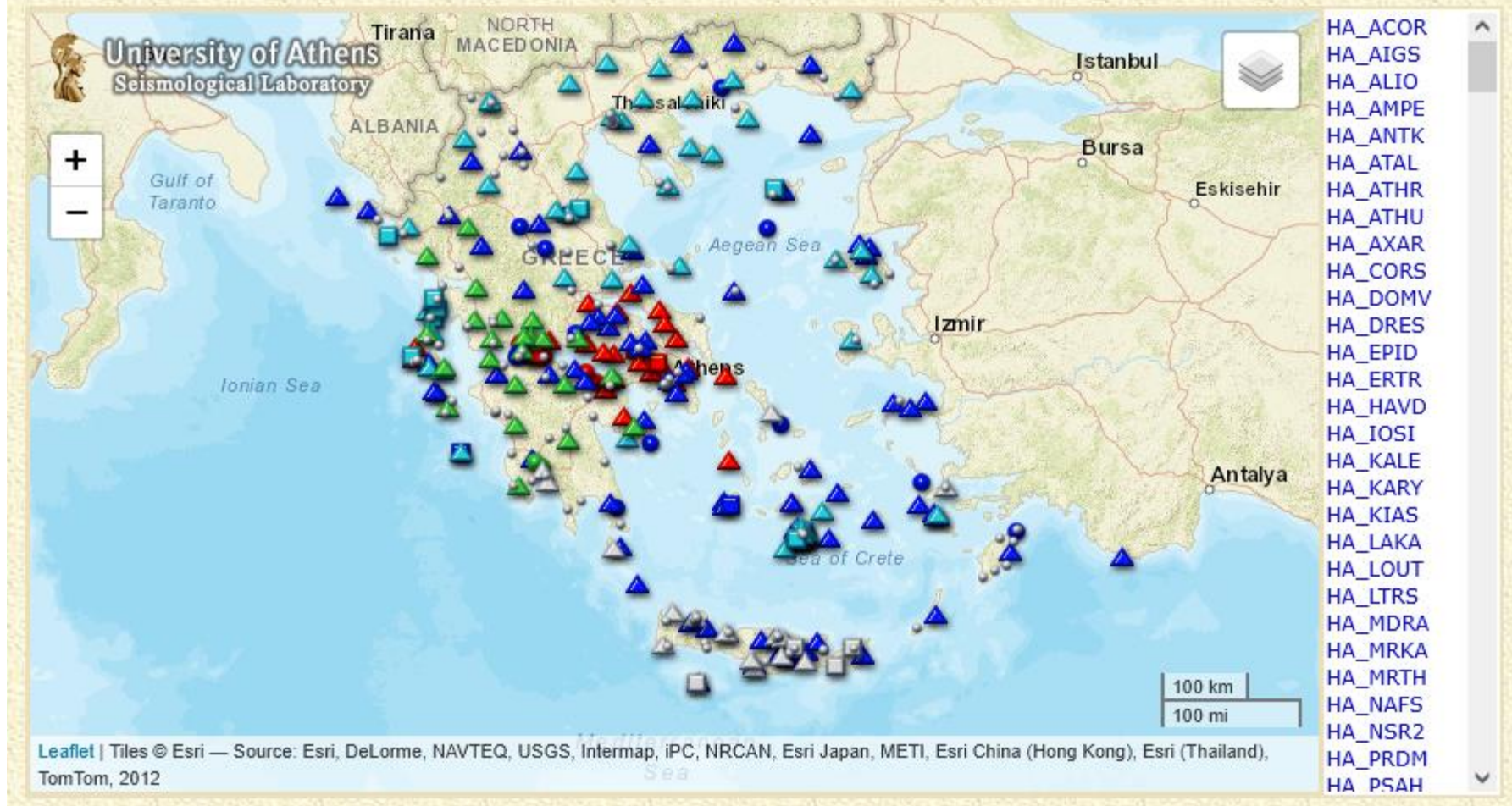
Επιπλέον σημαντικές πληροφορίες για μια σεισμική πηγή / διάρρηξη:

- Μηχανισμός γένεσης (*focal mechanism*) ή τανυστής σεισμικής ροπής (*moment tensor*)
- Σεισμική ροπή (*seismic moment*)
- Χρονική συνάρτηση πηγής (*source time function*)
- Μοντέλο ολίσθησης (*slip model*) ή πεπερασμένου ρήγματος (*finite fault*).
- Πτώση τάσης (*stress drop*)
- Ταχύτητα διάρρηξης (*rupture velocity*)

Τι χρειαζόμαστε για να εντοπίσουμε έναν σεισμό

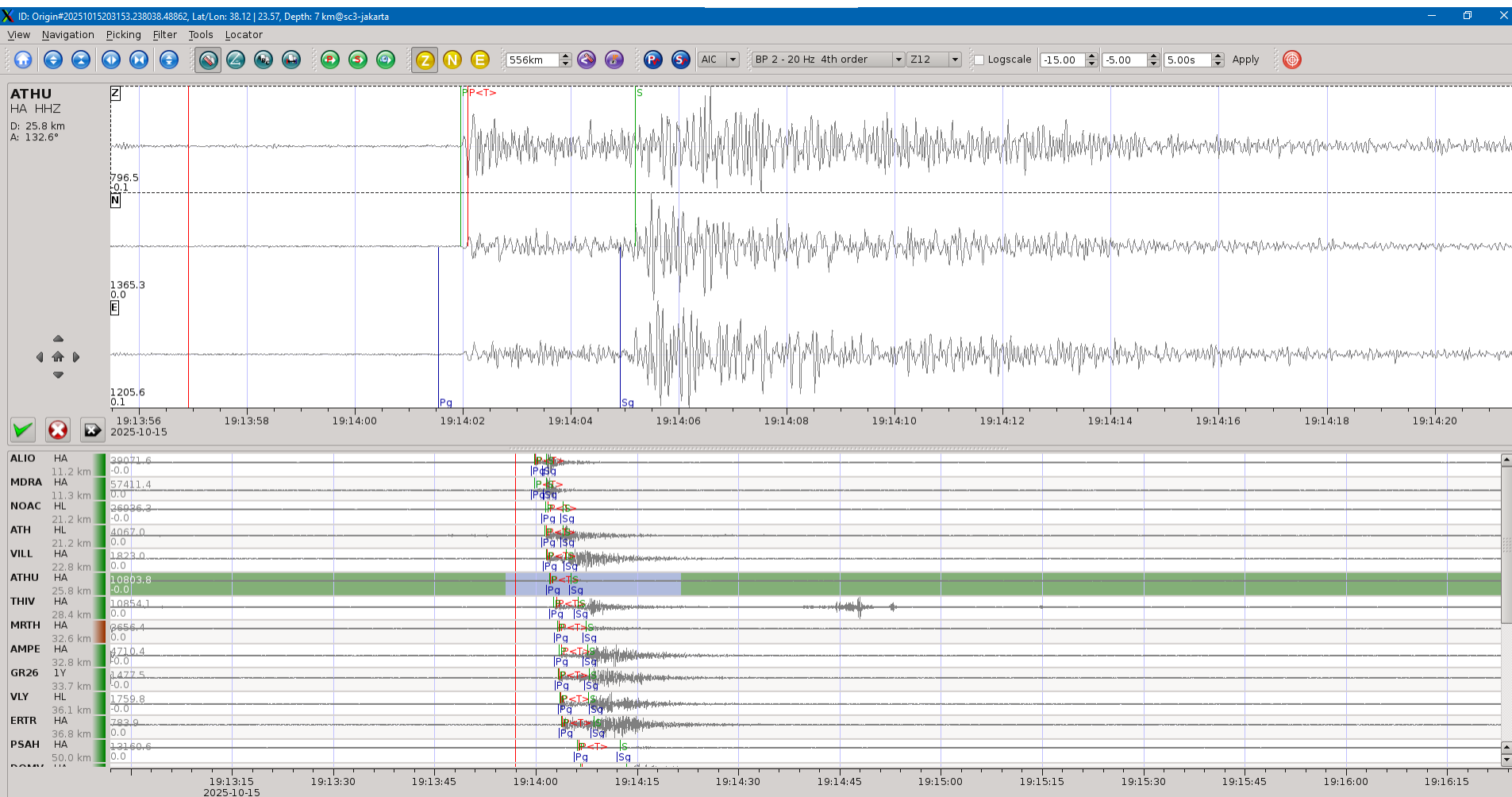
- Δίκτυο σεισμολογικών σταθμών.
- Στην Ελλάδα υπάρχει το Ενοποιημένο Ελληνικό Σεισμολογικό Δίκτυο (Ε.Ε.Σ.Δ)

Hellenic Unified Seismological Network (HUSN)



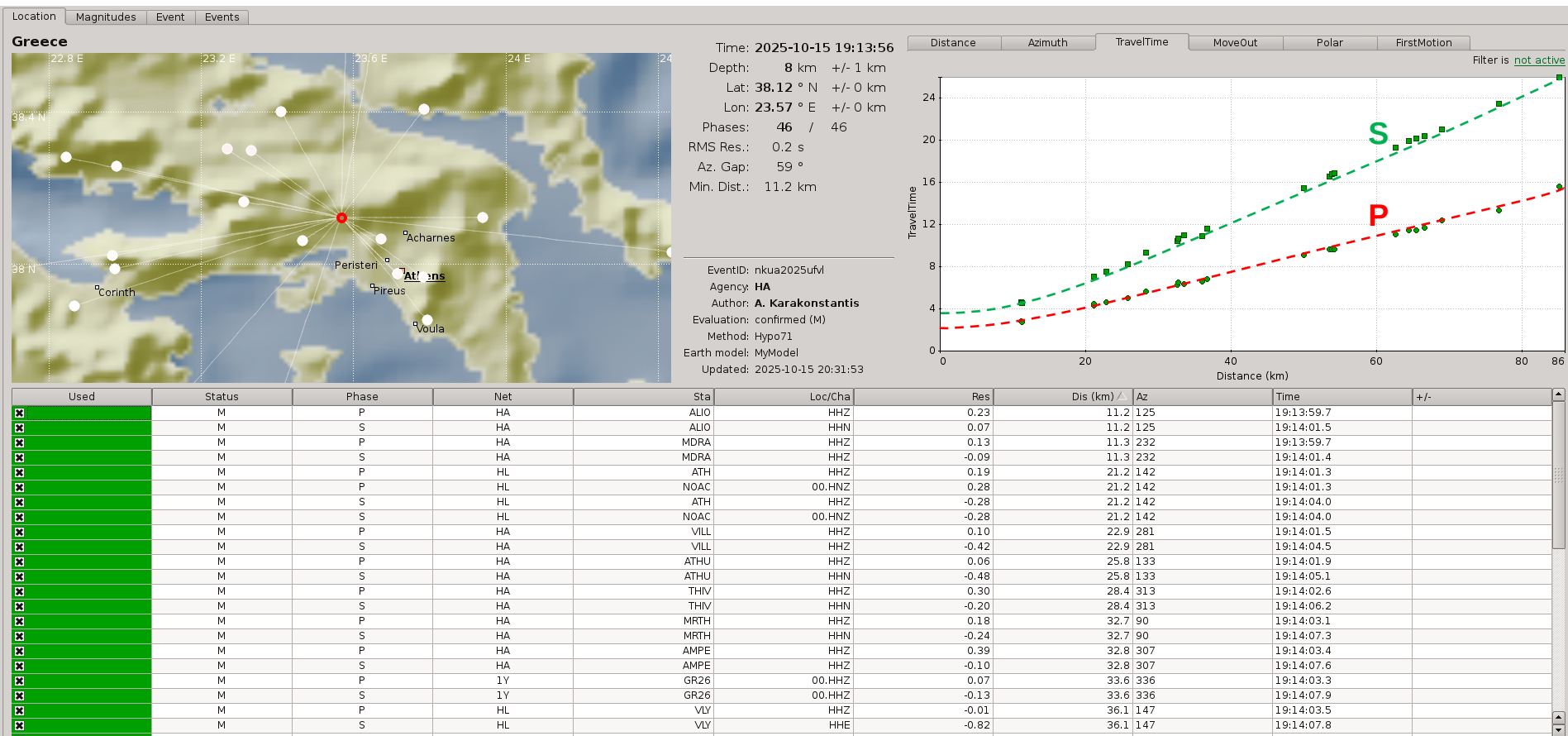
Τι χρειαζόμαστε για να εντοπίσουμε έναν σεισμό

- Βασικές μετρήσεις στη σεισμική ανάλυση:
 - Χρόνοι άφιξης των κυμάτων P και S σε σεισμολογικούς σταθμούς.
 - Μέγιστο πλάτος εδαφικής κίνησης.



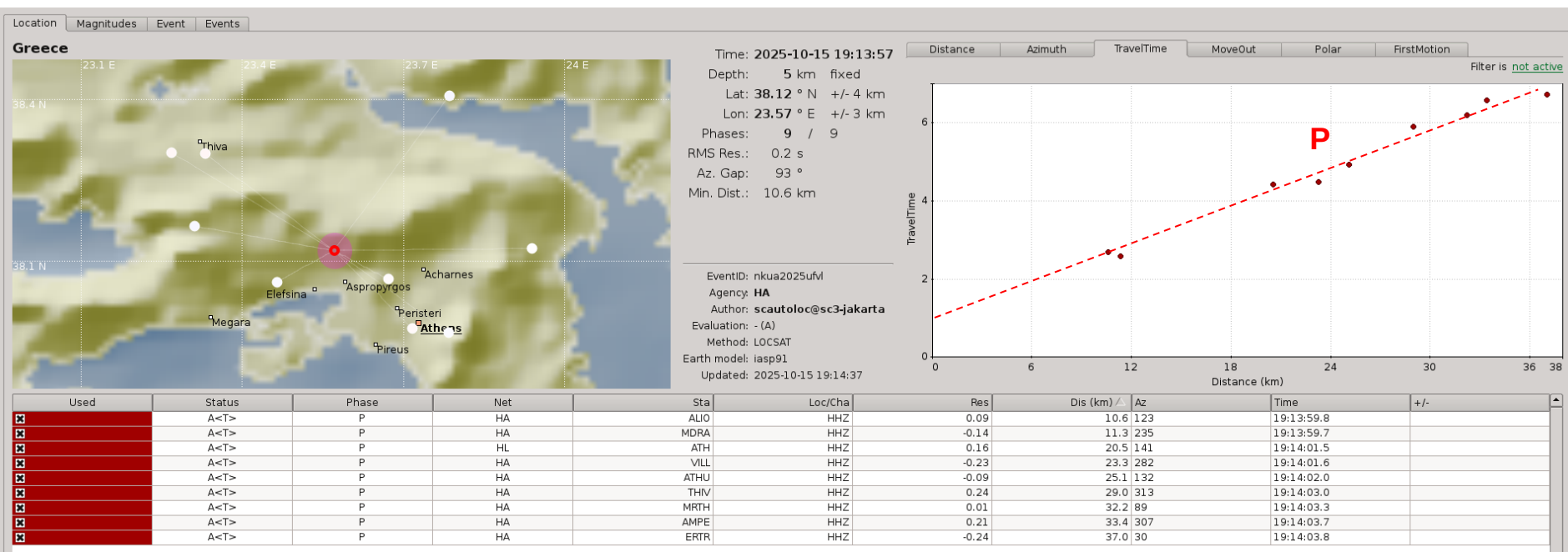
Τι χρειαζόμαστε για να εντοπίσουμε έναν σεισμό

- Βασικές μετρήσεις στη σεισμική ανάλυση:
 - Χρόνοι άφιξης των κυμάτων P και S σε σεισμολογικούς σταθμούς.
 - Μέγιστο πλάτος εδαφικής κίνησης.



Τι χρειαζόμαστε για να εντοπίσουμε **αυτόματα** έναν σεισμό

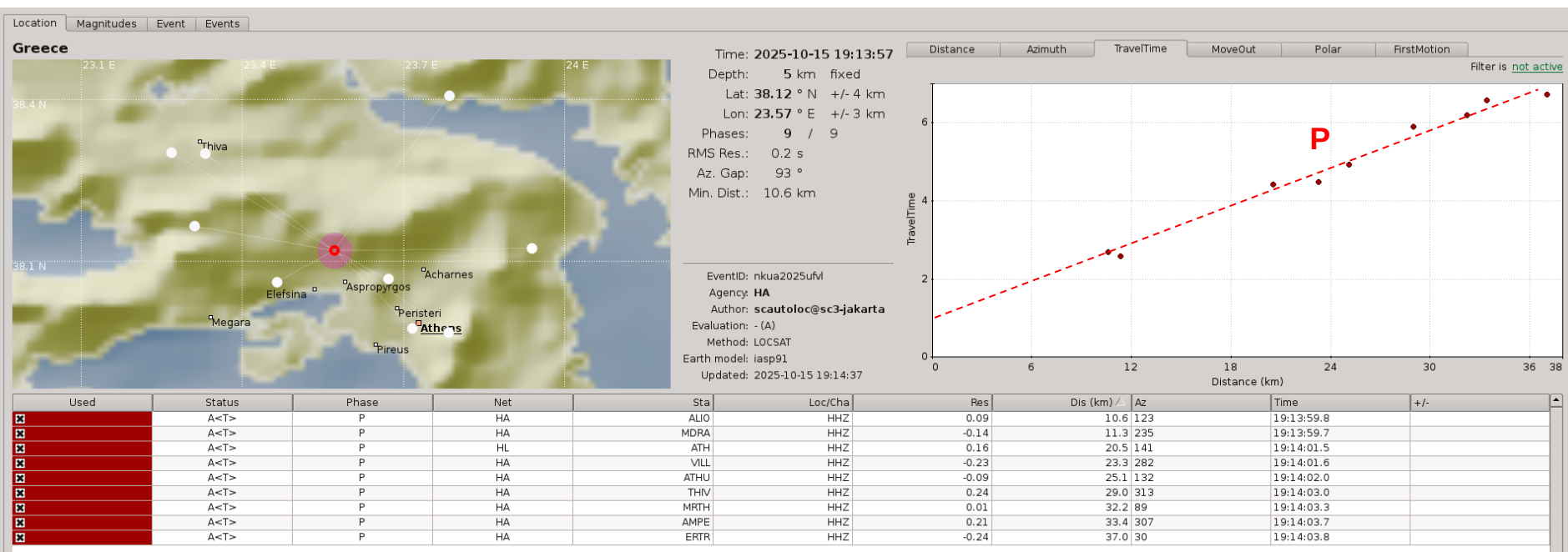
- Αλγόριθμο αναγνώρισης άφιξης κυμάτων P (κατά κύριο λόγο) σε σταθμούς (π.χ., STA/LTA).
- Αλγόριθμο συσχέτισης φάσεων με σεισμικά γεγονότα (*event association*).
- Μέτρηση μέγιστου πλάτους εδαφικής κίνησης σε σταθμούς για υπολογισμό μεγέθους.
- Επαρκή αριθμό χρόνων άφιξης και μετρήσεων πλάτους για ασφαλές αποτέλεσμα:
 - Περιορισμένα σφάλματα εντοπισμού υποκεντρικής θέσης.
 - Περιορισμένο RMS υπόλοιπο χρόνων διαδρομής.
 - Επαρκή αζιμουθιακή κάλυψη.



Τι χρειαζόμαστε για να εντοπίσουμε **αυτόματα** έναν σεισμό

Παράδειγμα:

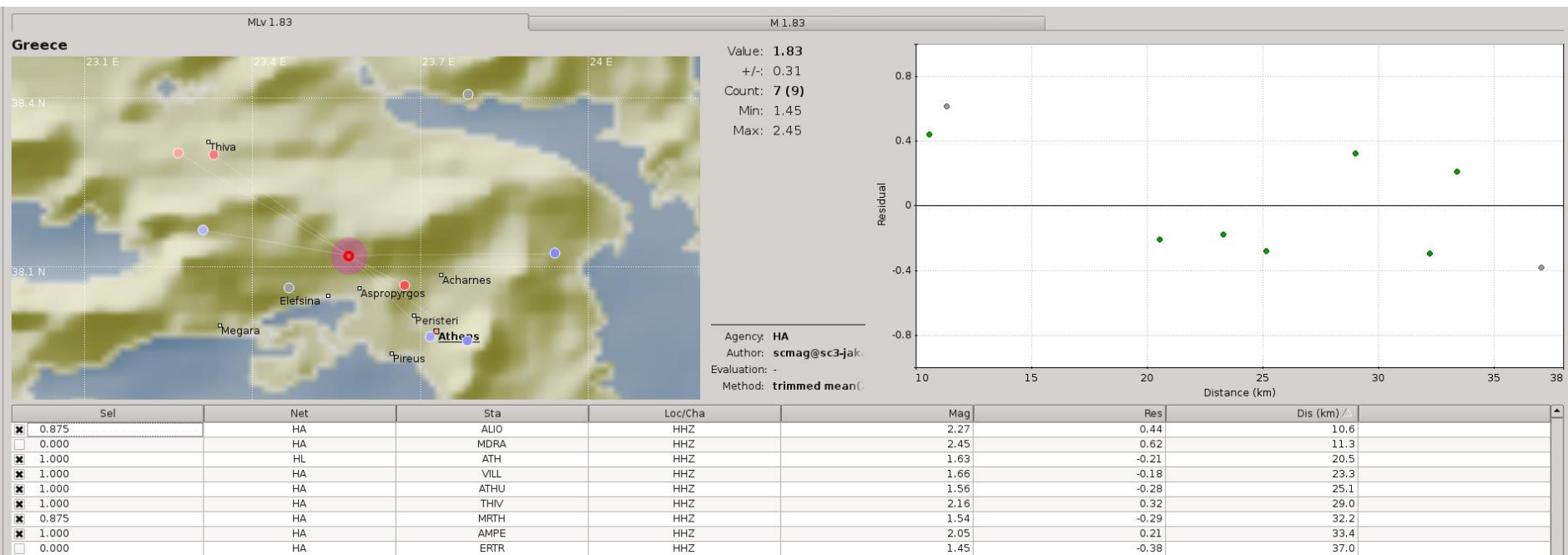
- Αυτόματος εντοπισμός σεισμού μεγέθους M1.8 με χρόνο γένεσης 2025-10-15 19:13:57 GMT (αυτόματο), και επίκεντρο την Πάρνηθα.
- Οι αφίξεις των κυμάτων P έχουν ανιχνευθεί και προσδιοριστεί σε **9 σταθμούς**, σε αποστάσεις από 10.6 έως **37.0 km**.
- Τελευταίος χρόνος άφιξης P: 2025-10-15 19:14:03.8 GMT (χρόνος διαδρομής ~7.8 sec).
- Πρώτη αυτόματη λύση: στις 2025-10-15 19:14:37 GMT (**40 sec μετά τον χρόνο γένεσης**).



Τι χρειαζόμαστε για να εντοπίσουμε **αυτόματα** έναν σεισμό

Παράδειγμα:

- Χρήση 7 από τις 9 μετρήσεις μεγίστων πλατών για προσδιορισμό μεγέθους.
- Τα μέγιστα πλάτη στο παράδειγμα μετρώνται από τα κύματα S.
- Όταν το κύμα P έφτασε στον 9^ο σταθμό (~37km, σε χρόνο διαδρομής ~7.8sec), το μέτωπο των κυμάτων S βρισκόταν σε επικεντρική απόσταση ~21km
- Για να φτάσουν τα κύματα S στα 37km χρειάστηκαν χρόνο διαδρομής ~12 sec.
- Το μέγιστο πλάτος καταγράφεται μετά την άφιξη των κυμάτων S.



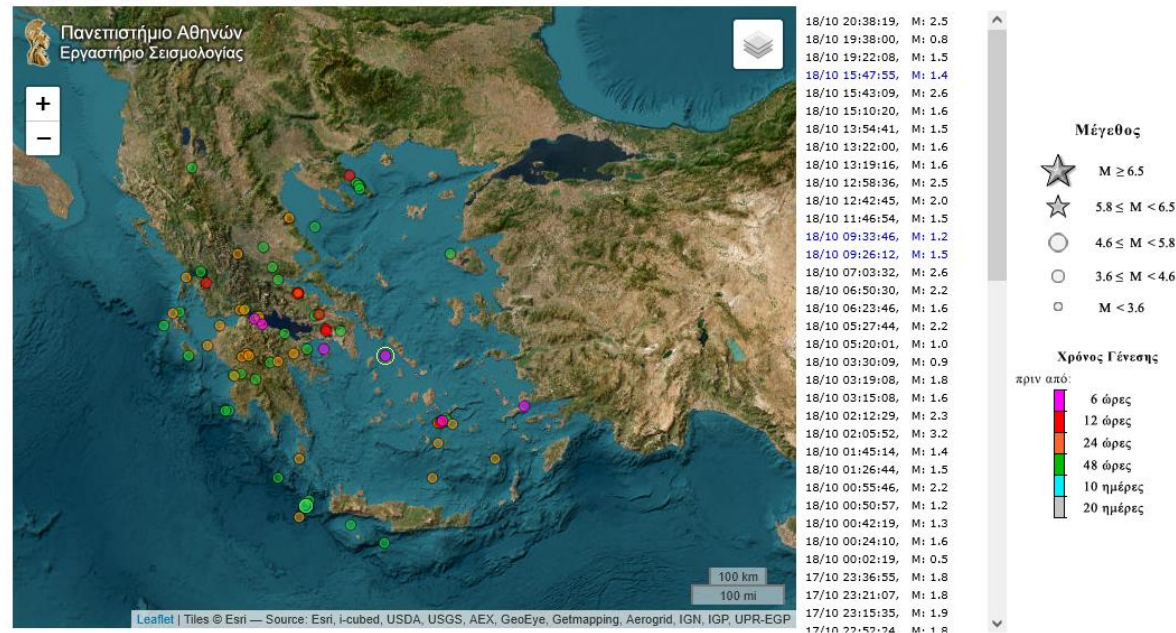
Αυτόματη ανάλυση σεισμικότητας

Σκοπός αυτόματης καθημερινής ανάλυσης:

- Επαρκώς αξιόπιστα αποτελέσματα σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα.
- Εντοπισμός σεισμικότητας σε όλο τον Ελλαδικό χώρο

Σεισμοί των τελευταίων 2 ημερών στον Ελλαδικό χώρο

🇬🇷 🇬🇷 🇬🇷 | 🌐 | 📡 RSS Feed | 🔍 Αναζήτηση Καταλόγου | Κατάλογος Γεγονότων



Σεισμοί των τελευταίων: 24 ωρών - 48 ωρών - 10 ημερών - 20 ημερών ~ Σημαντικοί σεισμοί του 2023

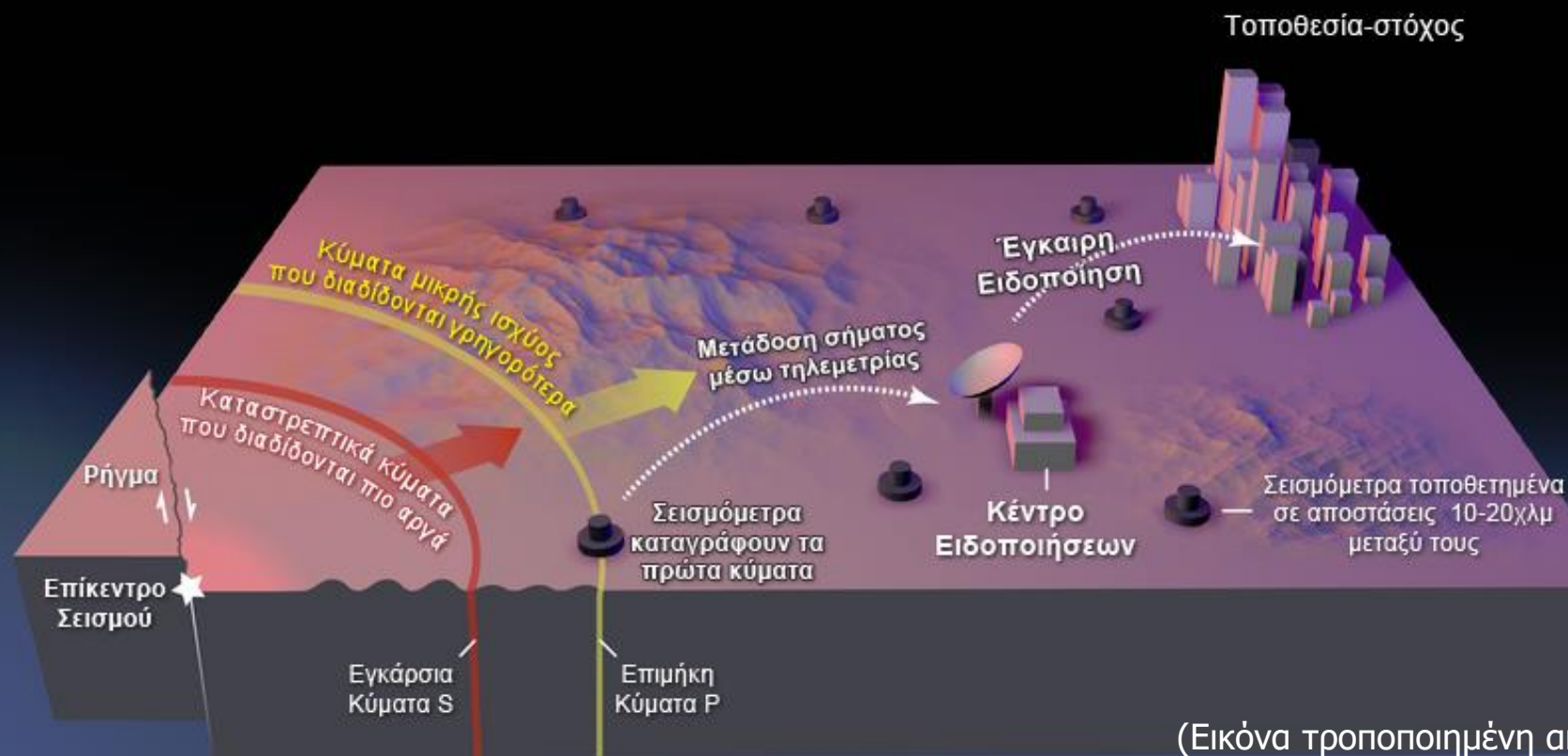
Κλικ στις κεφαλίδες για ταξινόμηση

A/A	Τύπος Δύσης	Χρόνος Γένεσης (GMT)	Επίκεντρο	Γεωγρ.Πλάτος (°B)	Γεωγρ.Μήκος (°A)	Βάθος (χμ)	Μέγ.	Μηχ.Γέν.
1	A	18/10/2025 20:38:19	30.3 χμ ΔΝΔ της Ανδρου	37.6965	24.6355	10.0	2.5	-
2	A	18/10/2025 19:38:00	13.3 χμ ΑΝΑ του Αγίου	38.1911	22.2148	2.0	0.8	-
3	A	18/10/2025 19:22:08	34.0 χμ ΝΔ της Αθήνας	37.8073	23.4170	2.0	1.5	-
4	M	18/10/2025 15:47:55	3.3 χμ ΒΒΔ του Αγίου	38.2760	22.0665	9.0	1.4	-

http://www.geophysics.geol.uoa.gr/realtime_gr.html

Τι είναι η Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών

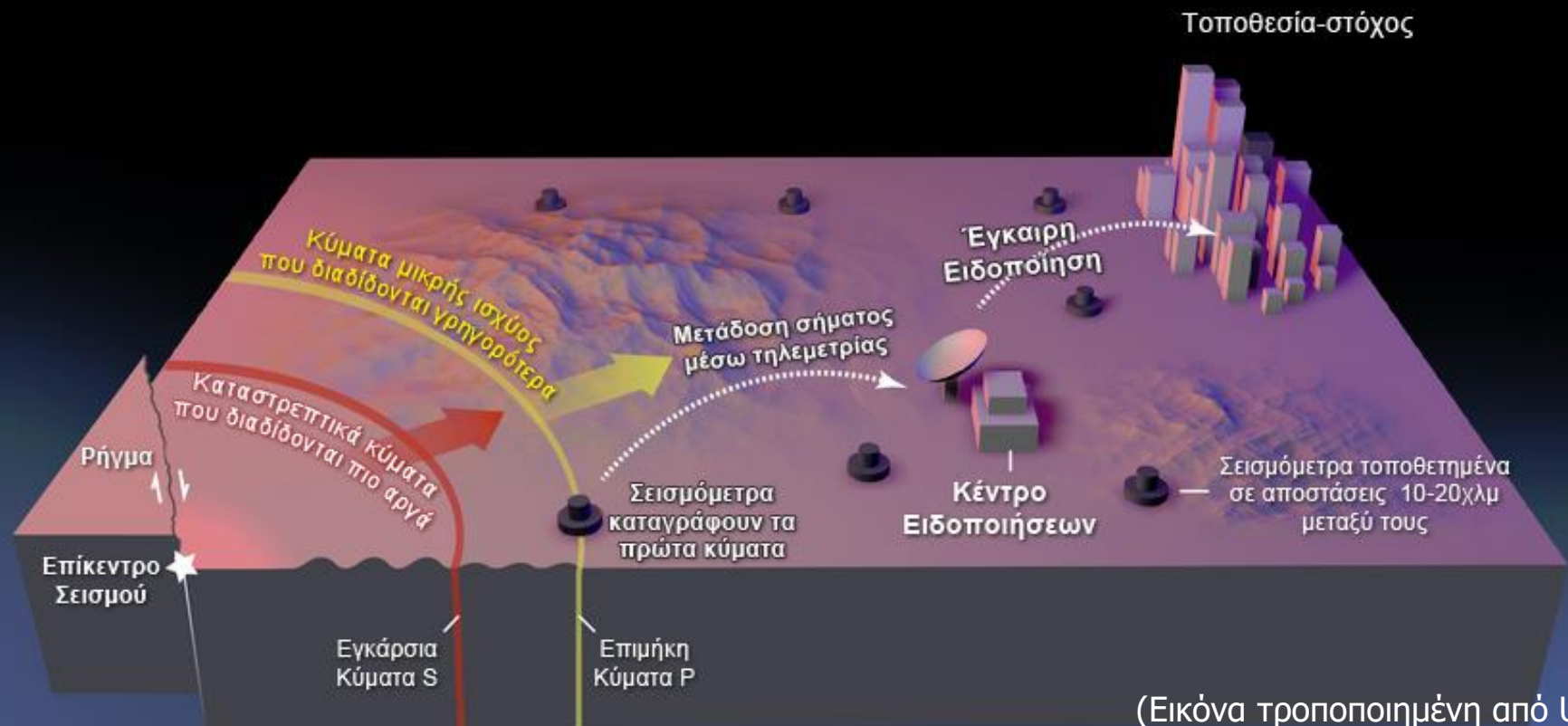
- Τα Συστήματα Έγκαιρης Προειδοποίησης Σεισμών (ΣΕΠΣ) (Earthquake Early Warning Systems, EEWS) παρέχουν προειδοποίηση για επικείμενη ισχυρή εδαφική κίνηση λόγω ενός σημαντικού σεισμού που έχει ήδη λάβει χώρα (διάρρηξη των πετρωμάτων στην εστία), προτού η σεισμική δόνηση φτάσει σε τοποθεσίες-στόχους ενδιαφέροντος.



(Εικόνα τροποποιημένη από USGS)

Τι είναι η Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών

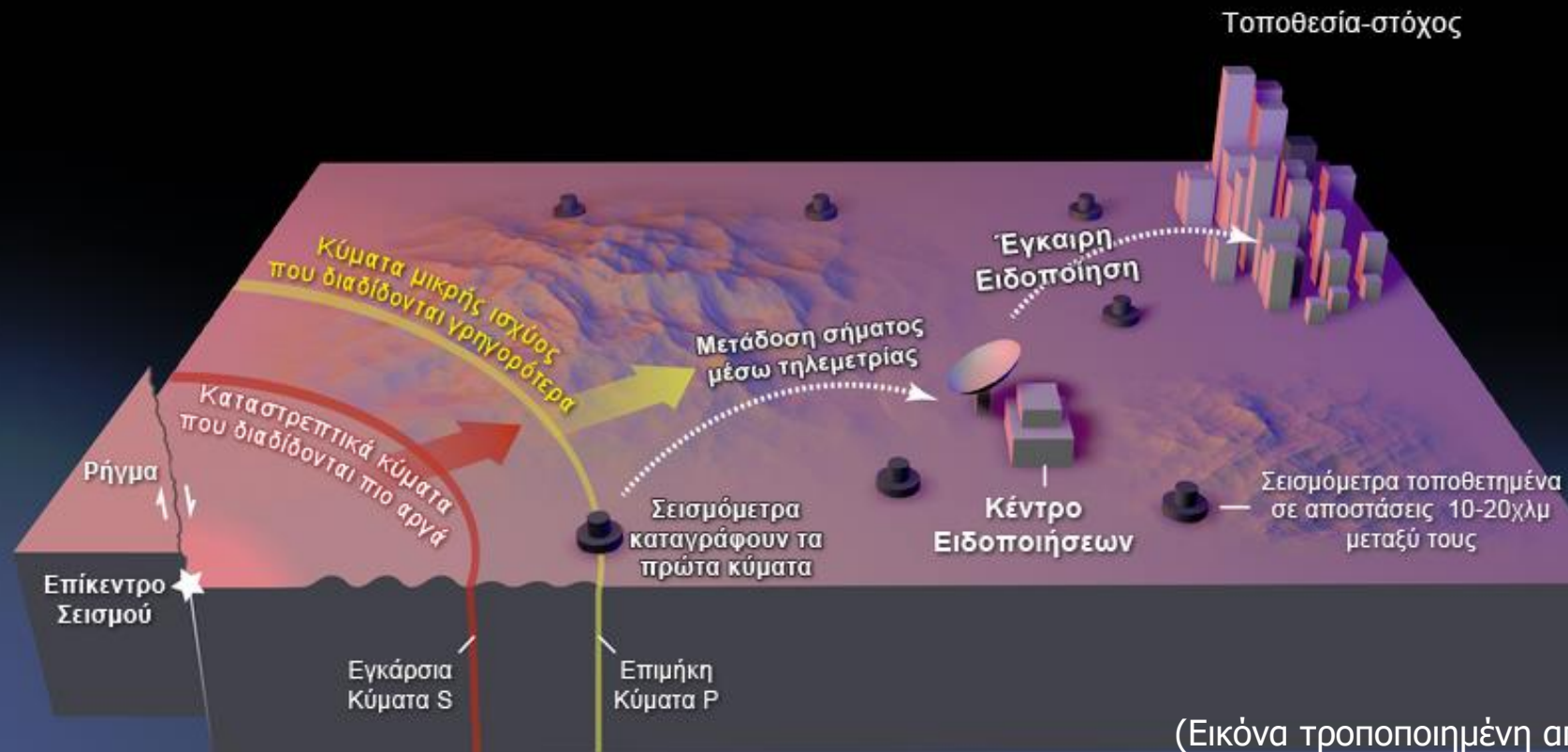
- Τα ΣΕΠΣ βασίζονται στην ταχεία εξαγωγή πληροφορίας, που αξιοποιείται για τον καθορισμό των σεισμικών παραμέτρων (επίκεντρο, εστιακό βάθος, χρόνος γένεσης, μέγεθος) από τους πρώτους παλμούς των **ταχύτερων**, αλλά **ασθενέστερων**, επιμηκών σεισμικών κυμάτων **P** σε σταθμούς καταγραφής που βρίσκονται κοντά στο επίκεντρο.
- Τα περισσότερο **επιβλαβή** εγκάρσια σεισμικά κύματα **S** έχουν **μικρότερη** ταχύτητα διάδοσης, οπότε καταφθάνουν αργότερα, και αυτό αφήνει ένα περιθώριο για έγκαιρη προειδοποίηση.



(Εικόνα τροποποιημένη από USGS)

Τι είναι η Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών

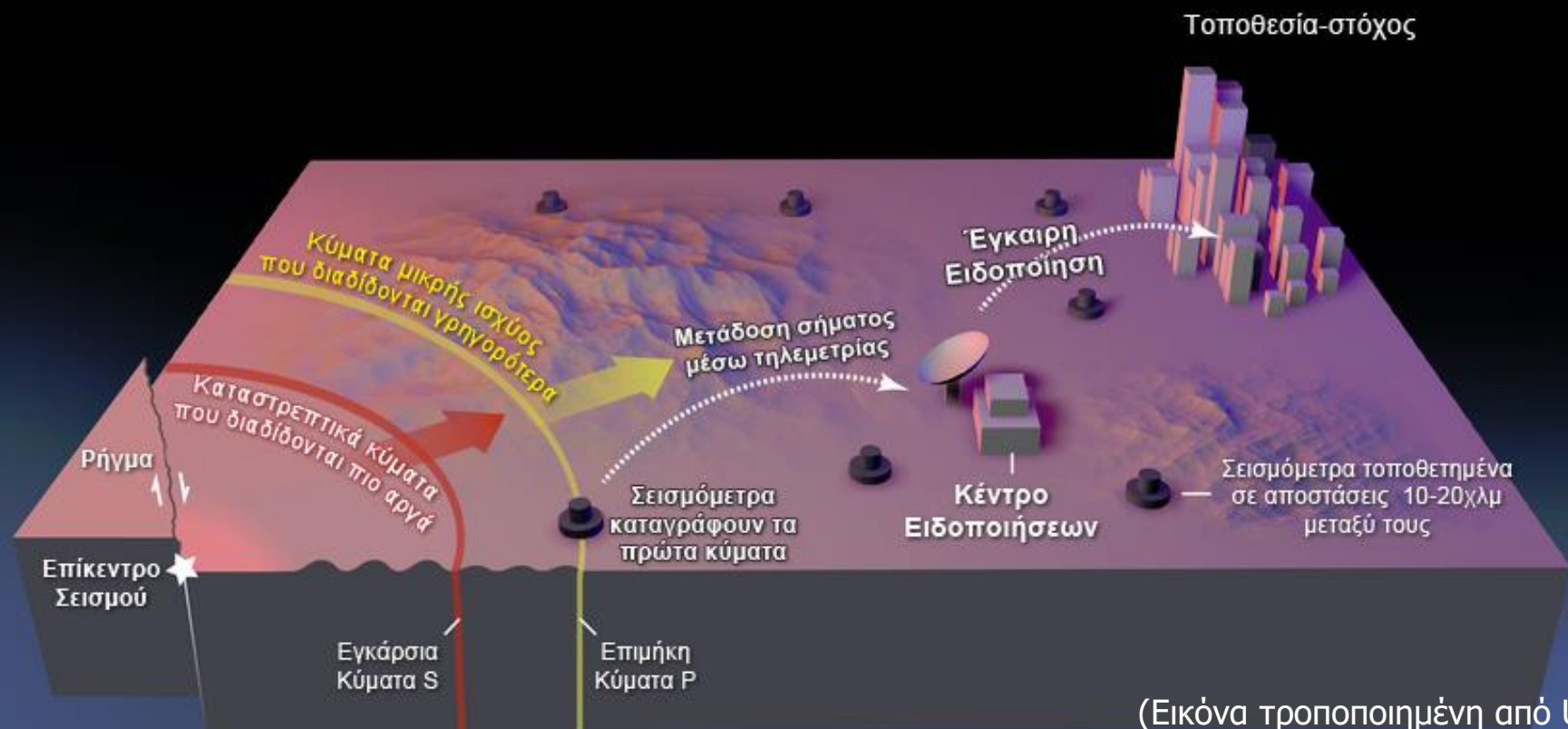
- Τα δεδομένα σεισμικών κυματομορφών μεταφέρονται από τους σεισμολογικούς σταθμούς καταγραφής στο κέντρο ειδοποιήσεων, είτε ασύρματα είτε μέσω καλωδιακών δικτύων, με μικρή χρονική καθυστέρηση (ιδανικά $<1\text{sec}$ από τον χρόνο καταγραφής τους).
- Τα δεδομένα υπόκεινται σε αυτόματη επεξεργασία σε πραγματικό χρόνο για τον εντοπισμό σεισμών και την αποστολή ειδοποιήσεων από τη στιγμή που έχει παραχθεί μια πρώτη αξιόπιστη λύση για τις σεισμικές παραμέτρους ή τα μέτρα έντασης.



(Εικόνα τροποποιημένη από USGS)

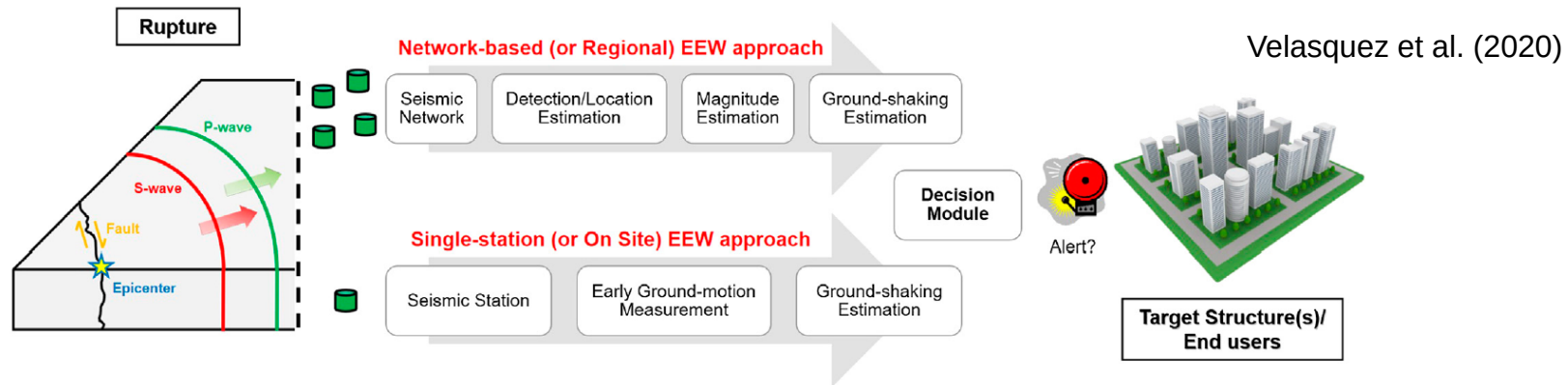
Τι **δεν** είναι η Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών (ΕΠΣ)

- Η Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών **δεν** είναι πρόγνωση σεισμών.
- Η διάρρηξη έχει **ήδη** εκδηλωθεί στην εστία και σεισμικά κύματα έχουν **ήδη** καταγραφεί από ορισμένους τοπικούς σεισμολογικούς σταθμούς.
- Πρόκειται για αυτόματα συστήματα εντοπισμού σεισμών που λειτουργούν με διαφορετικές προδιαγραφές από τα κλασικά.
- Στόχος τους είναι η ταχύτερη δυνατή εκτίμηση των εστιακών παραμέτρων ή μέτρων έντασης σε πραγματικό χρόνο, με όσο το δυνατόν λιγότερα δεδομένα.



(Εικόνα τροποποιημένη από USGS)

Κατηγορίες μεθόδων ΣΕΠΣ



- Τα ΣΕΠΣ χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες μεθόδων, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους:

Δικτυακές μέθοδοι (network methods), ή περιφερειακά (regional) ΣΕΠΣ:

- Αυτά τα ΣΕΠΣ χρησιμοποιούν «πυκνά» **δίκτυα σεισμολογικών σταθμών** που βρίσκονται εγκατεστημένα στην επικεντρική περιοχή ή ανάμεσα στην επικεντρική περιοχή και σε ευάλωτες τοποθεσίες-στόχους για τις οποίες έχουν σχεδιαστεί τα ΣΕΠΣ.
- Οι μέθοδοι αυτές στοχεύουν στην εξαγωγή μιας πλήρους λύσης των βασικών εστιακών παραμέτρων, από τις οποίες στη συνέχεια εξάγονται συμπεράσματα για τον χρόνο ειδοποίησης και τα μέτρα έντασης που αναμένεται να προκαλέσει ο σεισμός.

Επιτόπιες μέθοδοι (on-site methods):

- Αυτά τα ΣΕΠΣ λειτουργούν με **έναν (1) σταθμό καταγραφής**, αντί σεισμολογικού δικτύου.
- Στόχος των επιτόπιων μεθόδων είναι να αναγνωρίσουν την άφιξη σεισμικών κυμάτων P, διακρίνοντάς τα από άλλα παροδικά σήματα (θορύβους) και να εκτιμήσουν το μέγεθος του σεισμού και τα αναμενόμενα μέτρα έντασης στην ίδια θέση ή και κοντά σε αυτήν.

Λογισμικά ΣΕΠΣ

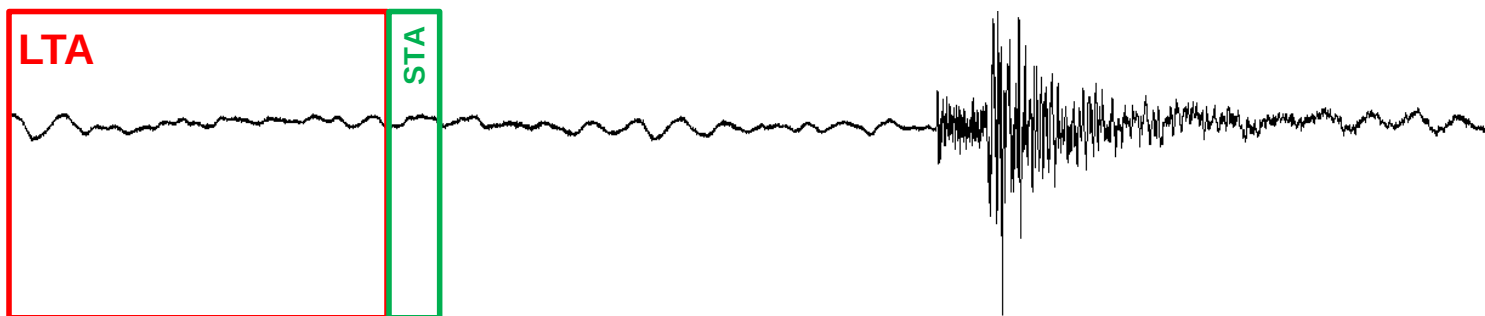
- Παραδείγματα λογισμικών που εφαρμόζουν δικτυακές μεθόδους ΣΕΠΣ:
 - **PRESTo** (Satriano et al., 2011)
 - **ElarmS** (Allen et al., 2009· Given et al., 2018)
 - **Virtual Seismologist**, ή **VS** (Cua and Heaton, 2007)
 - **FinDer** (Böse et al., 2012)
 - **MyShake** (Kong et al., 2016b)
- Παραδείγματα λογισμικών που εφαρμόζουν επιτόπιες μεθόδους ΣΕΠΣ:
 - **UrEDAS** (Nakamura, 1988)
 - **$\tau_c - P_d$ Onsite** (Wu & Kanamori, 2005a· Kanamori, 2005)
- Τα λογισμικά πρέπει να είναι προσαρμοσμένα ώστε:
 - Να αναλύουν τα σεισμικά σήματα σε πραγματικό χρόνο.
 - Να υλοποιούν βελτιστοποιημένους αλγορίθμους που δεν απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ (ταχεία επεξεργασία δεδομένων).

Μέθοδος STA/LTA

- Είναι ο πιο εύκολα υλοποιήσιμος αλγόριθμος αυτόματου προσδιορισμού χρόνων άφιξης σεισμικών φάσεων (κυρίως P).

STA (Short Time Average): μέση τιμή πλάτους σε χρονικό παράθυρο **μικρού** μήκους

LTA (Long Time Average): μέση τιμή πλάτους σε χρονικό παράθυρο **μεγάλου** μήκους

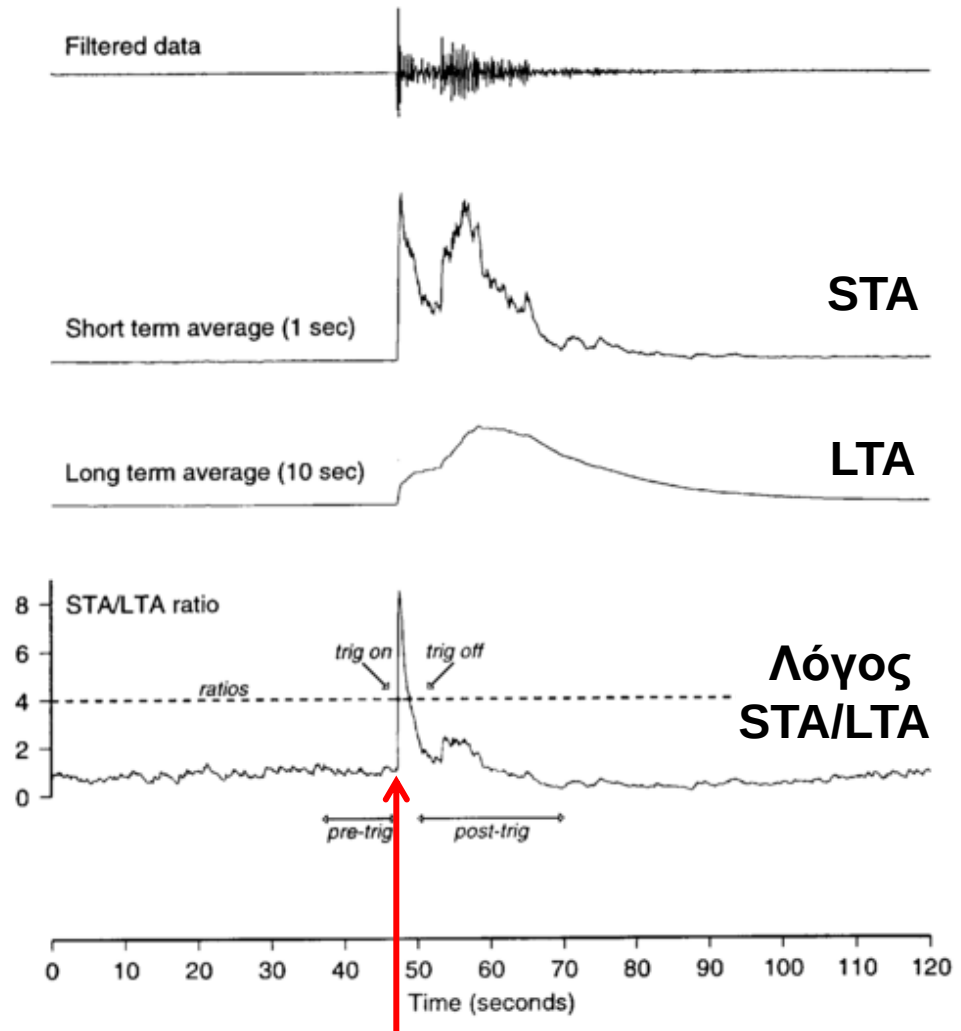


Λόγος STA/LTA: μας δίνει μια εκτίμηση του λόγου σήματος-προς-θόρυβο (Signal-To-Noise Ratio ή **SNR**)

- Η μέτρηση του λόγου STA/LTA γίνεται σε **κυλιόμενα χρονικά παράθυρα** πάνω σε μια χαρακτηριστική συνάρτηση (characteristic function, CF) των πλατών της κυματομορφής.
- Το παράθυρο **LTA**, επειδή είναι μεγάλου μήκους, ανταποκρίνεται **αργά** όταν σε αυτό μπει ένα σεισμικό σήμα (αφού περιλαμβάνει κυρίως θόρυβο μικρού πλάτους).
- Αντιθέτως, το παράθυρο **STA**, που τοποθετείται στο δεξί άκρο του παραθύρου LTA, καθώς είναι μικρότερου μήκους, επηρεάζεται **άμεσα** και έντονα όταν σε αυτό εισέλθει το σεισμικό σήμα.

Μέθοδος STA/LTA

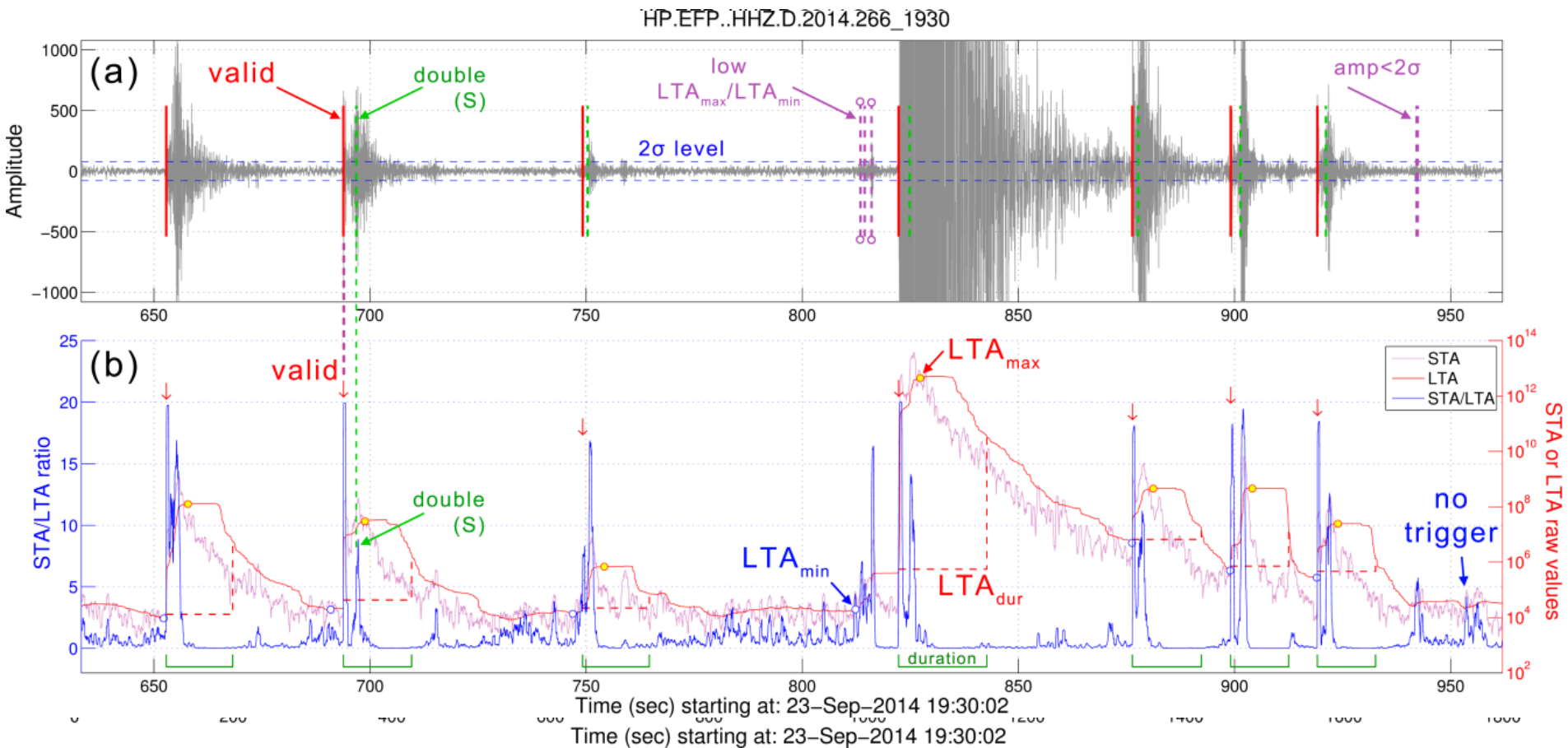
- Όσο τα παράθυρα STA και LTA περιέχουν και τα δύο θόρυβο, ο **λόγος STA/LTA** θα είναι κοντά στο **1**.
- Όταν στο παράθυρο STA μπει ένα ισχυρό σεισμικό σήμα, ο λόγος STA/LTA θα αυξηθεί απότομα, με τη μέγιστη τιμή να αντιπροσωπεύει το **SNR** του σήματος (πόσο ισχυρότερο είναι από το επίπεδο θορύβου).
- Η χρονική στιγμή κατά την οποία ο λόγος STA/LTA ξεπερνάει μια ορισμένη τιμή κατωφλίου (π.χ., 4) θεωρείται ως ο χρόνος άφιξης του σεισμικού κύματος (**P**).
- Στα κύματα S ο λόγος STA/LTA έχει συνήθως μικρότερη τιμή, λόγω της εισόδου του P κύματος στο παράθυρο LTA.



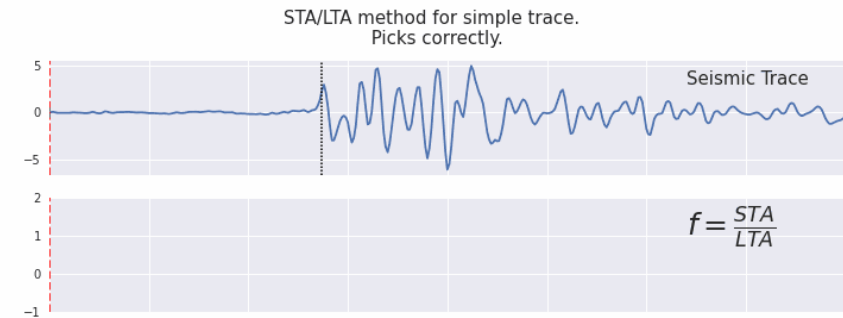
Εντοπισμός σήματος όταν ο λόγος STA/LTA ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή κατωφλίου (trigger on)

Μέθοδος STA/LTA

- Αναγνώριση σεισμικών σημάτων με STA/LTA



Μέθοδος STA/LTA



Προτερήματα μεθόδου STA/LTA:

- Εύκολη στον προγραμματισμό.
- Ταχεία στην εφαρμογή / ενδείκνυται για ΣΕΠΣ
- Χρήσιμη για γρήγορη αναγνώριση σημάτων και για σύγκριση με άλλες αυτόματες μεθόδους.

Χαρακτηριστικές συναρτήσεις (CF):

- Ως χρονοσειρά εισόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί:
 - Η απόλυτη τιμή του πλάτους
 - Το τετράγωνο του πλάτους
 - Η χρονική παράγωγος του τετραγώνου του πλάτους (μεγαλύτερη ευαισθησία σε μεταβολές του υψίσυχνου μέρους του σήματος)

Κατώφλι:

- Το κατώφλι ενεργοποίησης (trigger) μπορεί να είναι είτε σταθερό ή δυναμικό (π.χ., αλγόριθμος BK87, Baer & Kradolfer, 1987).

Βελτιώσεις:

- Σε κάποιες μεθόδους χρησιμοποιείται αρχικά η μέθοδος STA/LTA για την ανίχνευση ενός σεισμικού κύματος και σε δεύτερο βήμα κάποια άλλη μέθοδος (π.χ., αυτοπαλινδρόμησης, AR) για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του χρόνου άφιξης.

FilterPicker

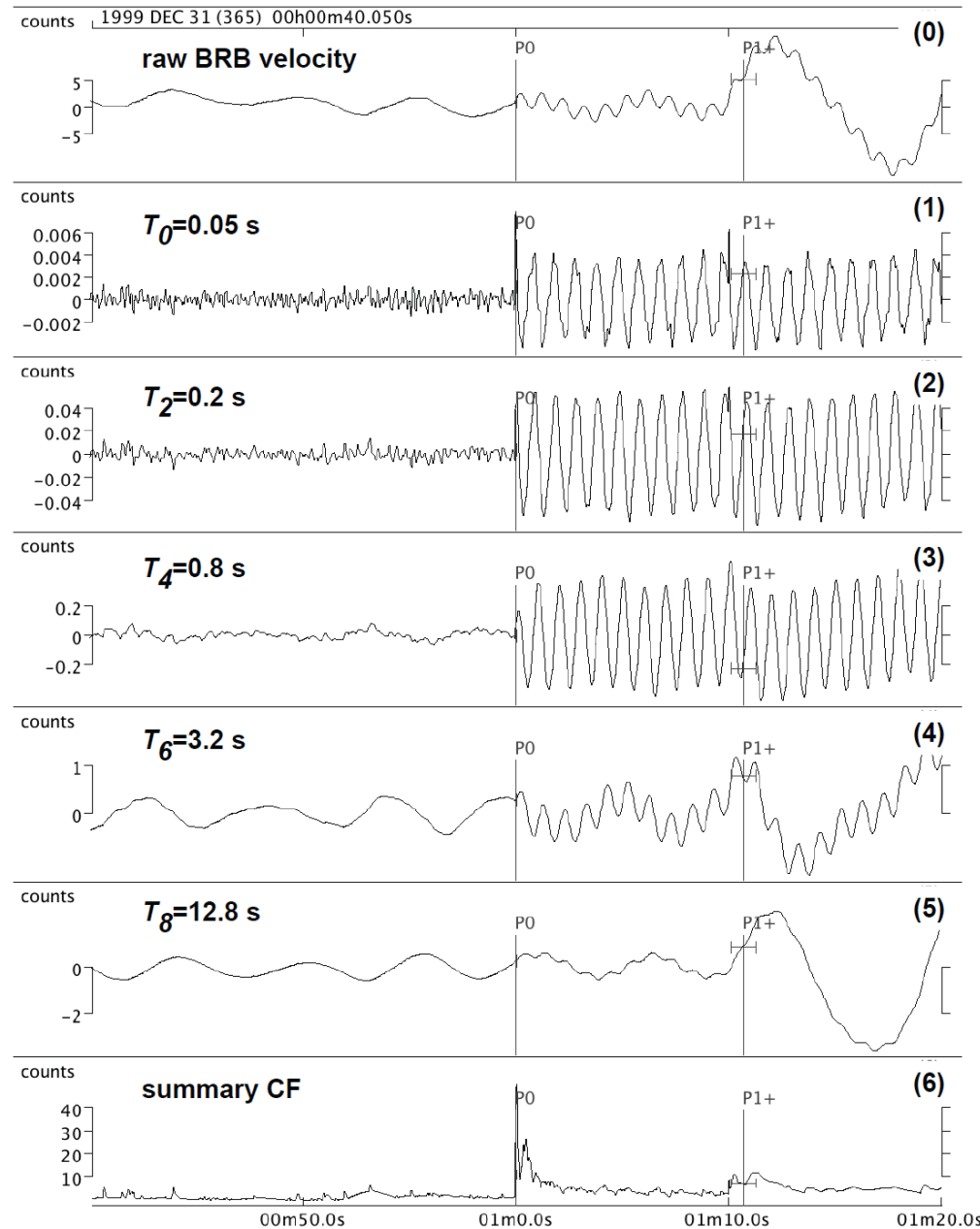
- Ο αλγόριθμος FilterPicker (FP) (Lomax et al., 2012) εφαρμόζει μια εκδοχή των κλασικών μεθόδων STA/LTA των BK87 και Allen (1978, 1982).
- Λειτουργεί σε ροές δεδομένων ευρέος φάσματος σε πραγματικό χρόνο και παρέχει μετρήσεις χρόνων άφιξης κυμάτων P μαζί με ρεαλιστικές τιμές αβεβαιότητας.
- Για ταχύτερους υπολογισμούς, χρησιμοποιεί ελάχιστη προ-επεξεργασία, βασίζεται κυρίως σε λογικές και αριθμητικές πράξεις (π.χ. τετραγωνική ρίζα), αποφεύγοντας υπολογιστικά «βαριές» συναρτήσεις όπως εκθετικές, λογαρίθμους ή μετασχηματισμούς (π.χ., FFT).
- Υπολογίζει χρονικά εξομαλυμένα στατιστικά του σήματος ανεξάρτητα από τον χρόνο που έχει περάσει από την έναρξη του σήματος.
- Λαμβάνει υπόψη τα διαφορικά πλάτη εν είδει χρονικής παραγωγού: $y'(i) = y(i) - y(i-1)$.
- Με παρόμοιες τεχνικές υπολογίζονται προσεγγιστικά χρονοσειρές με χαρακτηριστικά υψιπερατού και χαμηλοπερατού φίλτρου, ώστε να εξεταστεί το σήμα σε διάφορα συχνοτικά εύρη, γύρω από ορισμένες κεντρικές περιόδους.
- Ο αλγόριθμος FilterPicker χρησιμοποιείται από το λογισμικό PRESTo.

FilterPicker

- Παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου FP στην άφιξη ενός συνθετικού κύματος P.
- Επάνω: αρχικό, ακατέργαστο (raw) συνθετικό κύμα (δύο ημιτονοειδείς που ξεκινούν σε χρόνους P0 και P1 + Γκαουσιανός θόρυβος)
- T_0 - T_8 : σήματα φιλτραρισμένα γύρω από τις αντίστοιχες κεντρικές περιόδους.
- Κάτω: συνοπτική χαρακτηριστική συνάρτηση (Summary CF).
- Υπολογίζονται η περιβάλλουσα (*envelope*) και η χαρακτηριστική συνάρτηση με τις μέσες τιμές έως το δείγμα (i-1):

$$E_n(i) = Y_n^2(i),$$

$$F_n^C(i) = \frac{E_n(i) - \langle E_n \rangle(i-1)}{\langle \sigma(E_n) \rangle(i-1)},$$



Σύνδεση φάσεων με σεισμικά γεγονότα (*phase binding / event association*)

- Η ανίχνευση των χρόνων άφιξης (*picking*) γίνεται ανά σταθμό πάνω στις συνεχείς καταγραφές.
- Προκειμένου να επιλυθούν οι εστιακές παράμετροι, χρειάζεται να βρεθούν οι αφίξεις που σχετίζονται με ένα ορισμένο σεισμικό γεγονός και να ομαδοποιηθούν (*event association*).
- Ένας γρήγορος τρόπος είναι να επιλεχθούν οι αφίξεις κυμάτων P που έχουν γίνει εντός ενός ορισμένου χρονικού εύρους (το οποίο εξαρτάται από τις ενδο-αποστάσεις των σταθμών και την ταχύτητα διάδοσης των κυμάτων).
- Πιο σύνθετες μέθοδοι (π.χ., DBSCAN) χρησιμοποιούν συσταδοποίηση (*clustering*) των αφίξεων με βάση την κατανομή των παρατηρήσεων στον χρόνο αλλά και στον χώρο (συντεταγμένες σταθμών).
- Μια επιθυμητή ομαδοποίηση αφίξεων πρέπει να φροντίζει να μπορούν να προσαρμοστούν πάνω σε αυτές οι δρομοχρονικές καμπύλες για ορισμένες εστιακές παραμέτρους.
- Εφόσον συνδεθούν (*bind*) μεταξύ τους οι αφίξεις φάσεων, ορίζεται ένα «γεγονός» με ορισμένο χαρακτηριστικό κωδικό ή αριθμό (*event ID*).
- Καθώς συνεχίζουν να καταγράφονται νέες αφίξεις σεισμικών κυμάτων, αυτές θα πρέπει είτε να ομαδοποιηθούν σε ένα νέο γεγονός ή να εξεταστεί αν πρέπει να ενταχθούν σε ένα ήδη υπάρχον γεγονός, ώστε στη συνέχεια να βελτιωθεί η επίλυση των εστιακών του παραμέτρων.

Ταχύς εντοπισμός υποκέντρου

- Μετά τη σύνδεση των φάσεων με ένα σεισμικό γεγονός, στις δικτυακές μεθόδους ΣΕΠΣ γίνεται επίλυση των εστιακών παραμέτρων (x, y, z, t).
- Σε αντίθεση με τους κλασικούς αλγόριθμους προσδιορισμού εστιακών παραμέτρων (π.χ., HypoInverse), τα ΣΕΠΣ έχουν την ιδιαιτερότητα ότι:
 - Τίθεται σε μεγάλη προτεραιότητα η όσο το δυνατόν ταχύτερη επίλυση, με συνέπεια τη μειωμένη ακρίβεια των πρώιμων αποτελεσμάτων.
 - Η επίλυση πρέπει να μπορεί να γίνει με τα ελάχιστα δυνατά δεδομένα.
 - Η λύση είναι δυναμική και πρέπει να μπορεί να ανανεωθεί/βελτιωθεί όσο περνάει ο χρόνος και όσο διατίθενται νέα δεδομένα (από μακρινότερους σταθμούς).
- Τα διάφορα λογισμικά ΣΕΠΣ εφαρμόζουν διαφορετικές τεχνικές για τον ταχύ εντοπισμό του υποκέντρου.

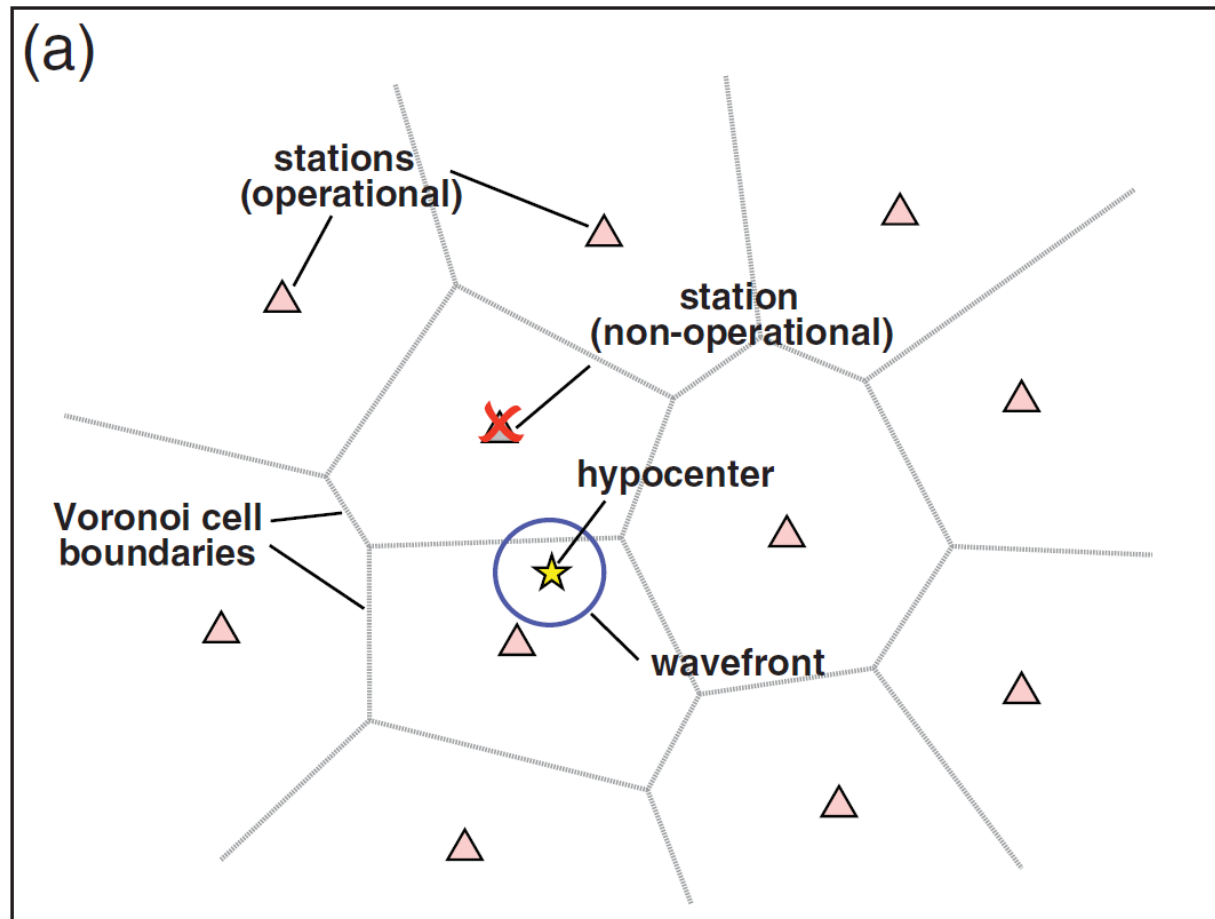
RTLOC

- Ο αλγόριθμος RTLOC (Satriano et al., 2008) χρησιμοποιείται από το λογισμικό PRESTo.
- Το RTLOC ξεκινάει τον εντοπισμό υποκέντρου ακόμα και με μία (1) άφιξη P κύματος (σε έναν σταθμό μόνο).
- Χρησιμοποιείται ως πληροφορία τόσο η θέση του σταθμού που έχει “ενεργοποιηθεί” (trigger) όσο και οι θέσεις των σταθμών που δεν έχουν ακόμα ενεργοποιηθεί (not-yet-triggered).
- Ο υπολογισμός εστιακών παραμέτρων γίνεται **πιθανολογικά** (ως συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, *pdf*).
- Γίνεται αναζήτηση σε κάνναβο για όλες τις πιθανές λύσεις, με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στις περιοχές των πιθανότερων λύσεων.
- Το RTLOC χρησιμοποιεί τη μέθοδο των ίσων διαφορικών χρόνων (Equal Differential Time, EDT): για δεδομένο σεισμό, η διαφορά στους χρόνους άφιξης σεισμικών κυμάτων σε δύο σταθμούς ισούται με τη διαφορά των χρόνων διαδρομής:

$$(tt_m - tt_n)_{i,j,k} = t_m - t_n; \quad m \neq n.$$

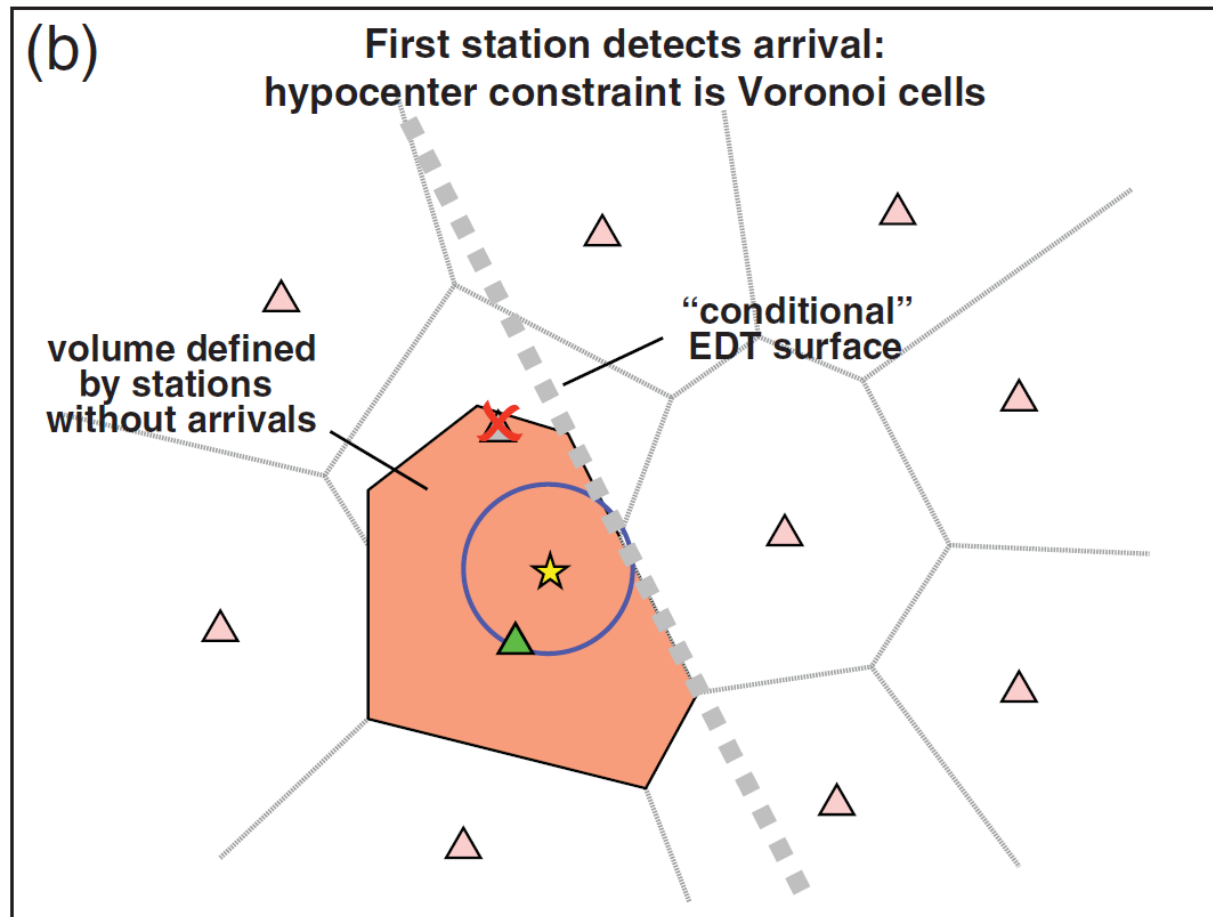
RTLOC

Satriano et al. (2008)



- Ο χάρτης διαχωρίζεται σε κελιά Voronoi με βάση τον πλησιέστερο λειτουργικό σταθμό.
- Όταν εκδηλωθεί ένας σεισμός, τα σεισμικά κύματα P εξαπλώνονται από το υπόκεντρο και τελικά φτάνουν στην επιφάνεια, όπου το μέτωπο εξαπλώνεται υπό τη μορφή ενός κύκλου γύρω από το επίκεντρο (για σταθερή ταχύτητα διάδοσης).

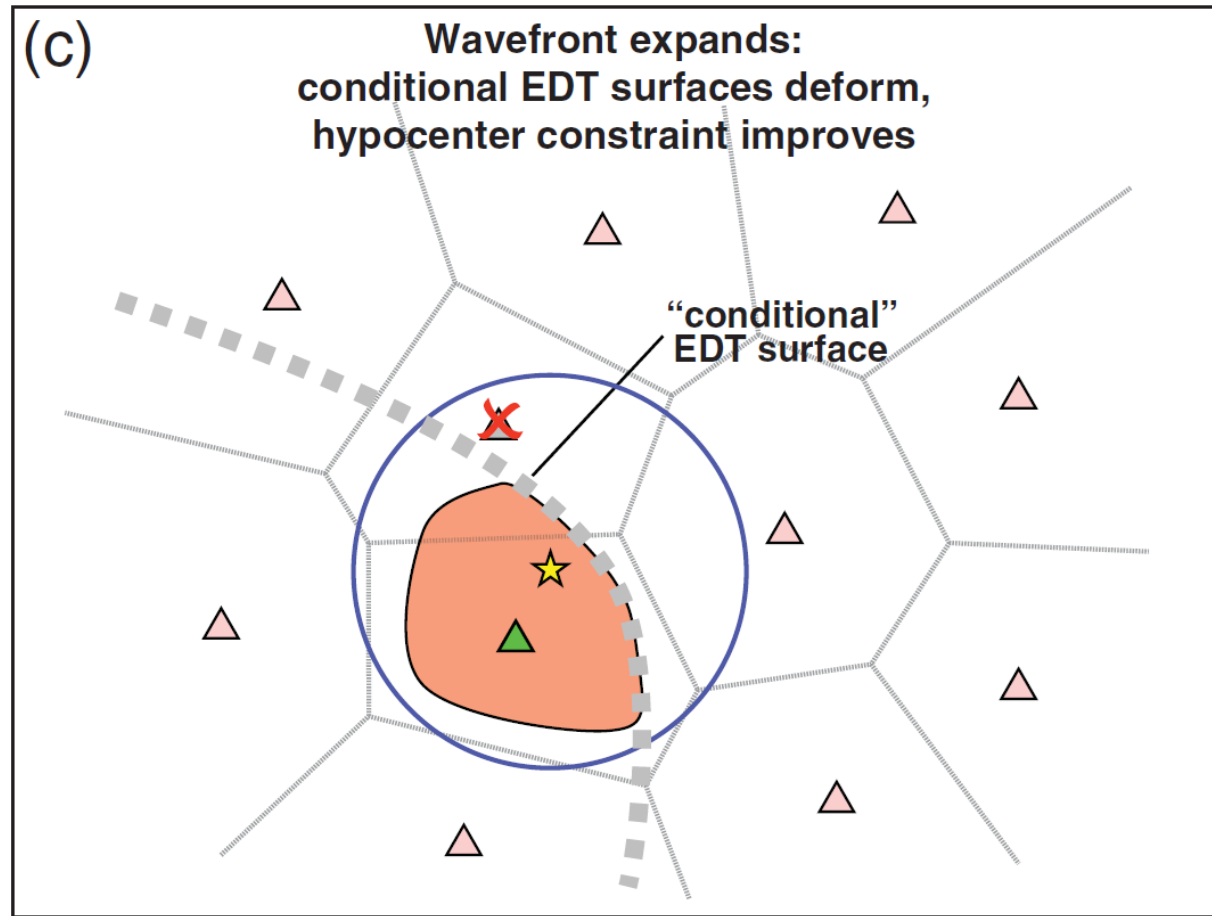
RTLOC



- Τη στιγμή που τα κύματα P φτάσουν στον *πρώτο* πλησιέστερο λειτουργικό σταθμό, γνωρίζουμε ότι το επίκεντρο πιθανότατα βρίσκεται εντός του κελιού Voronoi του σταθμού αυτού.
- Οι μη ενεργοποιημένοι σταθμοί (μακρινότεροι) παρέχουν την χρήσιμη πληροφορία ότι το μέτωπο των P δεν έχει φτάσει **ακόμα** σε αυτούς (θα φτάσει σε χρόνο $t > t_{\text{now}}$).

RTLOC

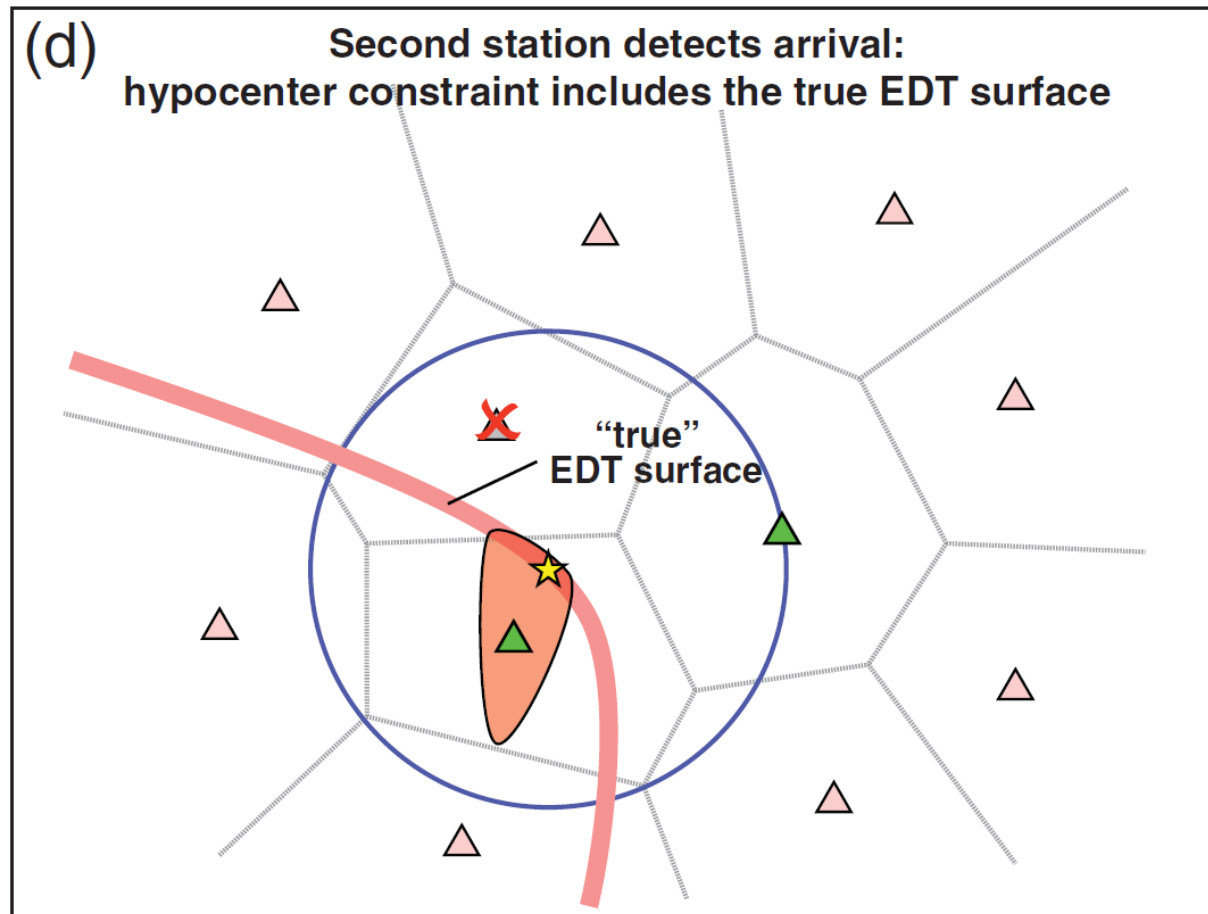
Satriano et al. (2008)



- Όσο περνάει ο χρόνος και τα κύματα δεν έχουν καταγραφεί ακόμα σε δεύτερο σταθμό, γνωρίζουμε ότι λόγω εξάπλωσης του μετώπου, η περιοχή όπου πιθανόν βρίσκεται το επίκεντρο περιορίζεται από δυναμικά μεταβαλλόμενες υπερβολοειδείς επιφάνειες (για σταθερή ταχύτητα διάδοσης).
- Με αυτές πρακτικά αποκλείονται περιοχές όπου δεν θα μπορούσε να βρίσκεται το επίκεντρο, διότι διαφορετικά θα είχαν ήδη φτάσει τα κύματα P και σε δεύτερο σταθμό.

RTLOC

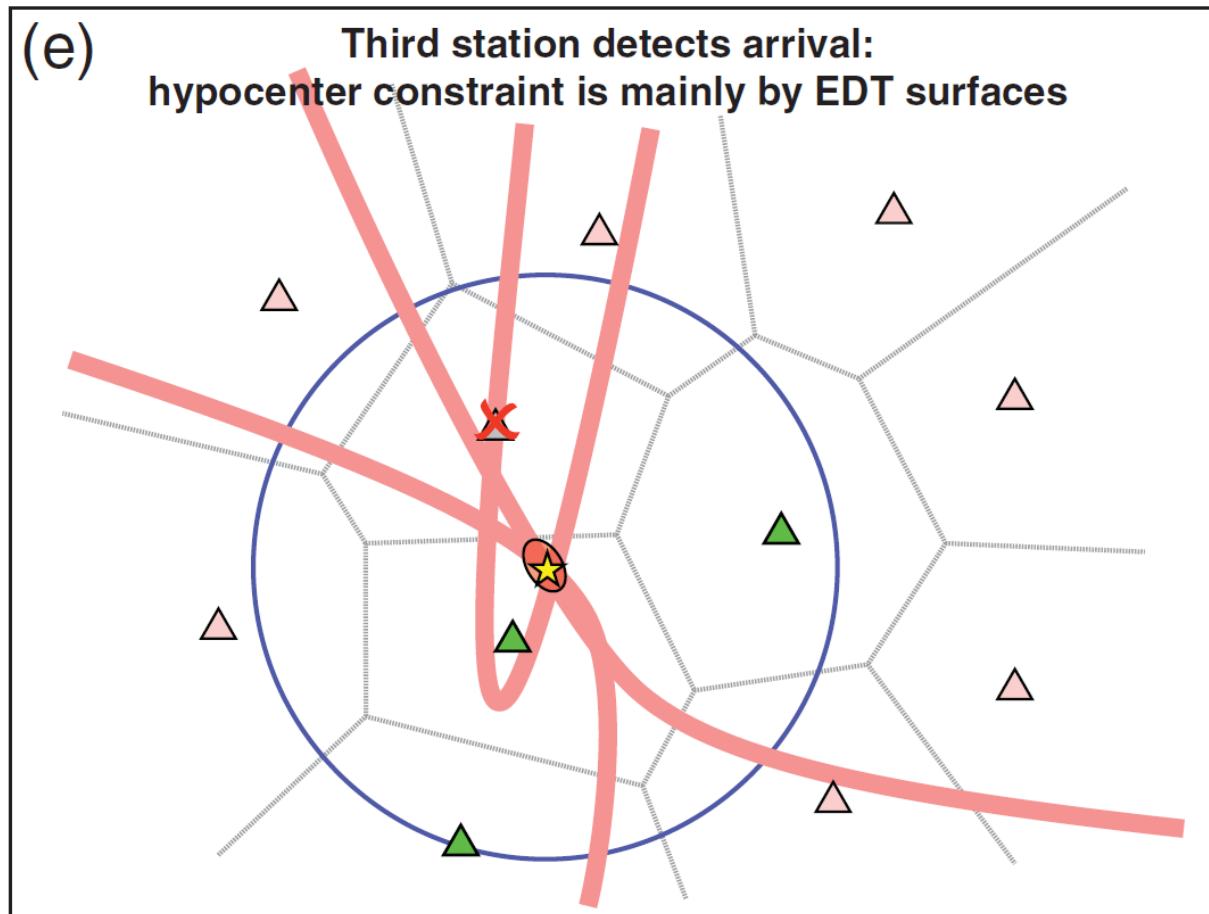
Satriano et al. (2008)



- Με την άφιξη των P και σε δεύτερο σταθμό, πλέον σχηματίζεται και μια πραγματική υπερβολοειδής ίσων διαφορικών χρόνων άφιξης (EDT).
- Εξακολουθεί να λαμβάνεται υπόψη η πληροφορία ότι το μέτωπο δεν έχει φτάσει σε άλλους λειτουργικούς σταθμούς.

RTLOC

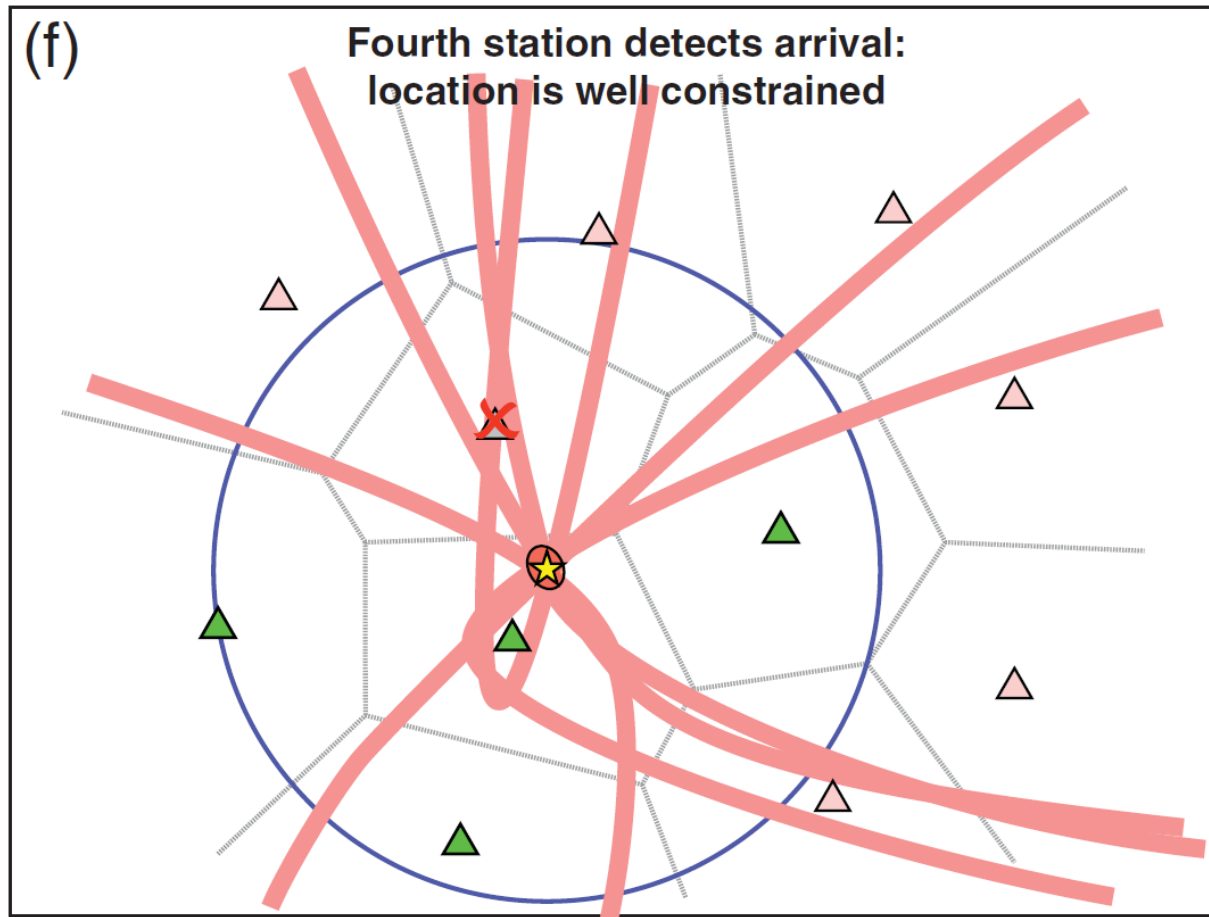
Satriano et al. (2008)



- Με την άφιξη των P και σε *τρίτο* σταθμό, πλέον η λύση περιορίζεται από τις τρεις πραγματικές υπερβολοειδείς ίσου διαφορικού χρόνου άφιξης (EDT).

RTLOC

Satriano et al. (2008)



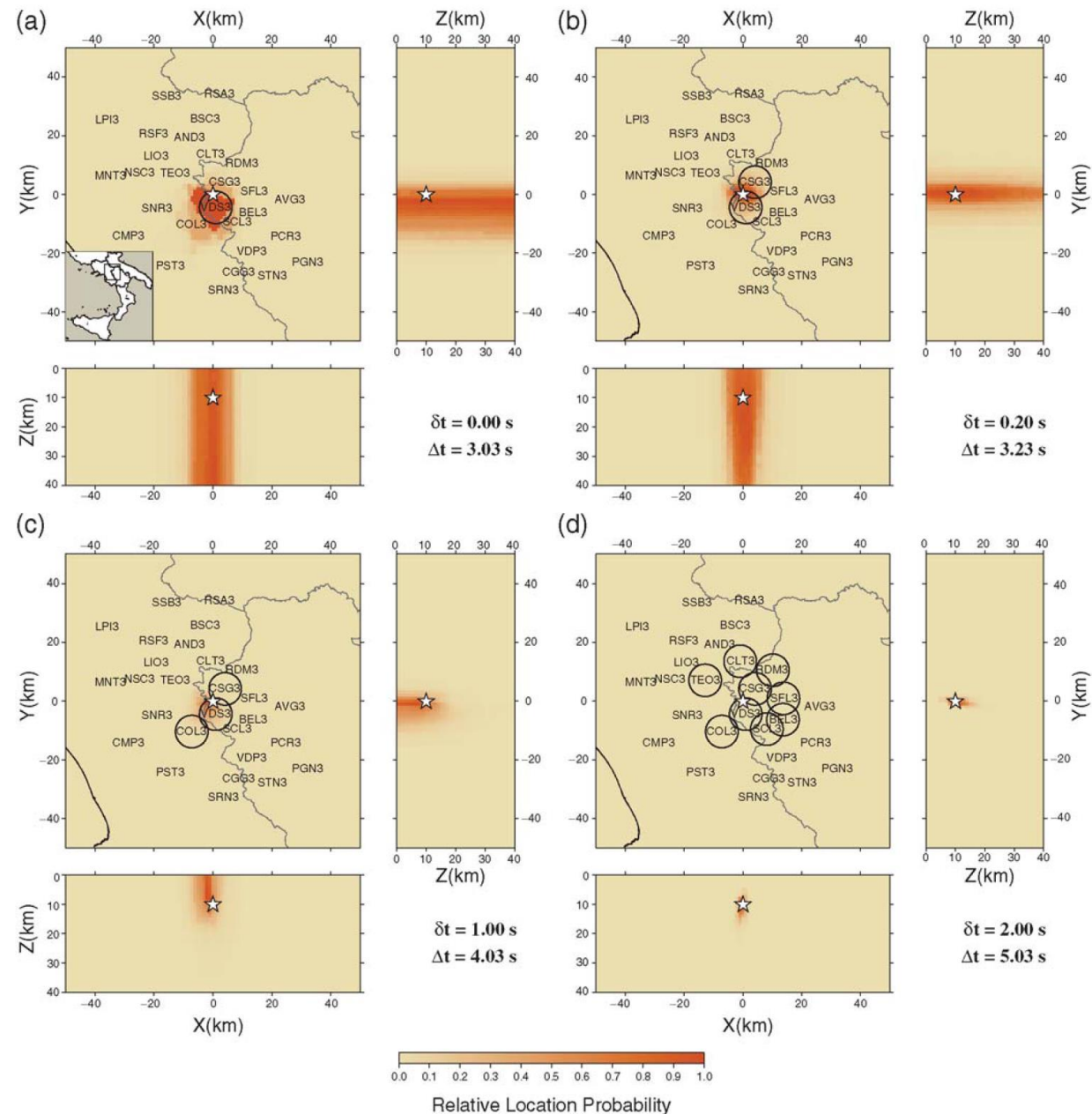
- Με την άφιξη των P και σε *τέταρτο* σταθμό επιτυγχάνεται πλέον αρκετά καλός περιορισμός της λύσης.

RTLOC

- Προτερήματα μεθόδου EDT:
 - Μπορεί να βρεθεί λύση εστιακών παραμέτρων με ελάχιστες μετρήσεις, ακόμα και με «αραιό» δίκτυο σταθμών.
 - Η επίλυση είναι αρκετά «στιβαρή» (robust) και δεν επηρεάζεται από ακραία αποκλίνουσες μετρήσεις (outliers).
 - Η επίλυση βελτιώνεται με την πάροδο του χρόνου, ακόμα και χωρίς αφίξεις σε άλλους σταθμούς, λόγω του περιορισμού της υπό συνθήκη επιφάνειας EDT.
- Προβλήματα μεθόδου EDT:
 - Τυχόν καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων από εν λειτουργία σταθμούς μπορεί να δημιουργήσουν εσφαλμένες συνθήκες προγενέστερης (*prior*) πληροφορίας.
- Οι υπερβολοειδείς ορίζονται με αναζήτηση σε κάνναβο για συντεταγμένες υποκέντρου i, j, k :
$$q_{n,m}(i, j, k) = \exp \left\{ - \frac{[(tt_n - tt_m)_{i,j,k} - (t_n - t_m)]^2}{2\sigma^2} \right\};$$
$$n \neq m.$$
- Το «πάχος» των υπερβολοειδών εξαρτάται από την αβεβαιότητα σ στη μέτρηση των χρόνων άφιξης (σφάλμα ανάγνωσης).

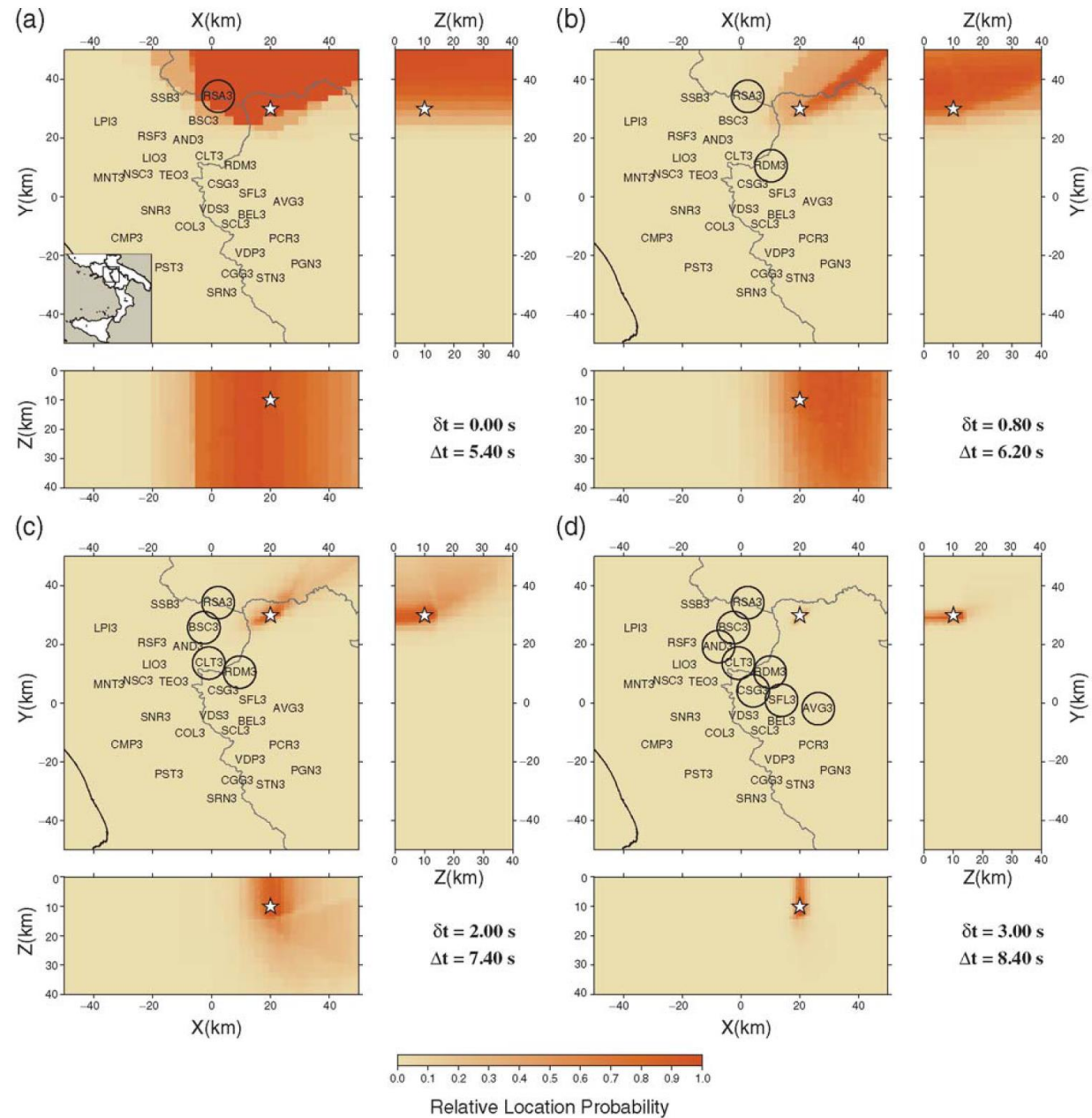
RTLOC

- Συνθετικό παράδειγμα επίλυσης εστιακών παραμέτρων με RTLOC.
- Επίκεντρο «**εντός** δικτύου» ISnet (Irpinia).
- Σε κάθε ανανέωση της λύσης (είτε όποτε ενεργοποιηθεί ένας νέος σταθμός, είτε ανά 1 sec) οι πιθανές θέσεις του υποκέντρου περιορίζονται.
- Το RTLOC δίνει την υποκεντρική θέση (x,y,z) της μέγιστης πιθανοφάνειας καθώς και ένα εύρος τιμών $\delta x, \delta y, \delta z$ για ορισμένο διάστημα εμπιστοσύνης, μέσω του (επίσης πιθανολογικά προσδιορισμένου) πίνακα συνδιακύμανσης.



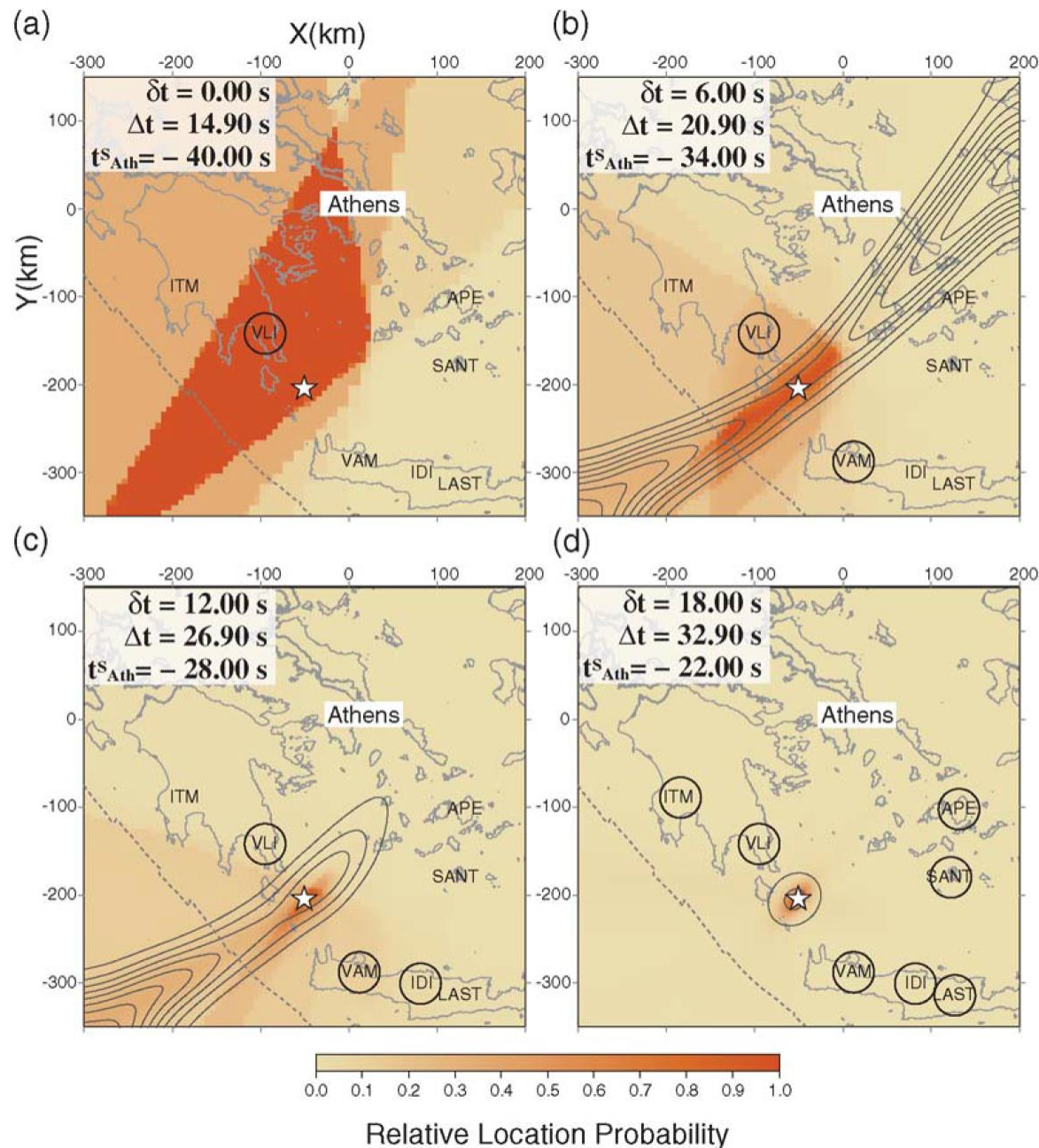
RTLOC

- Συνθετικό παράδειγμα επίλυσης εστιακών παραμέτρων με RTLOC.
- Επίκεντρο «εκτός δικτύου» ISnet (Irpinia).



RTLOC

- Παράδειγμα επίλυσης εστιακών παραμέτρων με RTLOC για τον σεισμό των Κυθήρων ($M_w=6.7$) της 8ης Ιανουαρίου 2006 (ενδιάμεσου βάθους).



Πίνακες χρόνων διαδρομής

- Για τον υπολογισμό της πιθανότητας του υποκέντρου σε κάθε θέση της περιοχής μελέτης χρειάζεται να μπορούν να προσδιοριστούν γρήγορα οι αναμενόμενοι χρόνοι διαδρομής των P (και S) σε κάθε σταθμό.
- Στο λογισμικό PRESTo, αυτό γίνεται με χρήση πινάκων με **προϋπολογισμένους** χρόνους διαδρομής για ένα πλέγμα υποκεντρικών θέσεων, και για την θέση του κάθε σταθμού ή τοποθεσίας-στόχου.
- Αυτοί οι πίνακες χρόνων διαδρομής (Travel-Time Tables, ή TTT) υπολογίζονται είτε από μονοδιάστατα είτε από 3D μοντέλα ταχυτήτων, με τη βοήθεια των δομοστοιχείων (*modules*) Vel2Grid και Grid2Time του λογισμικού NonLinLoc.

Vel2Grid: φτιάχνει ένα 3D πλέγμα ταχυτήτων από ένα δεδομένο 1D μοντέλο.

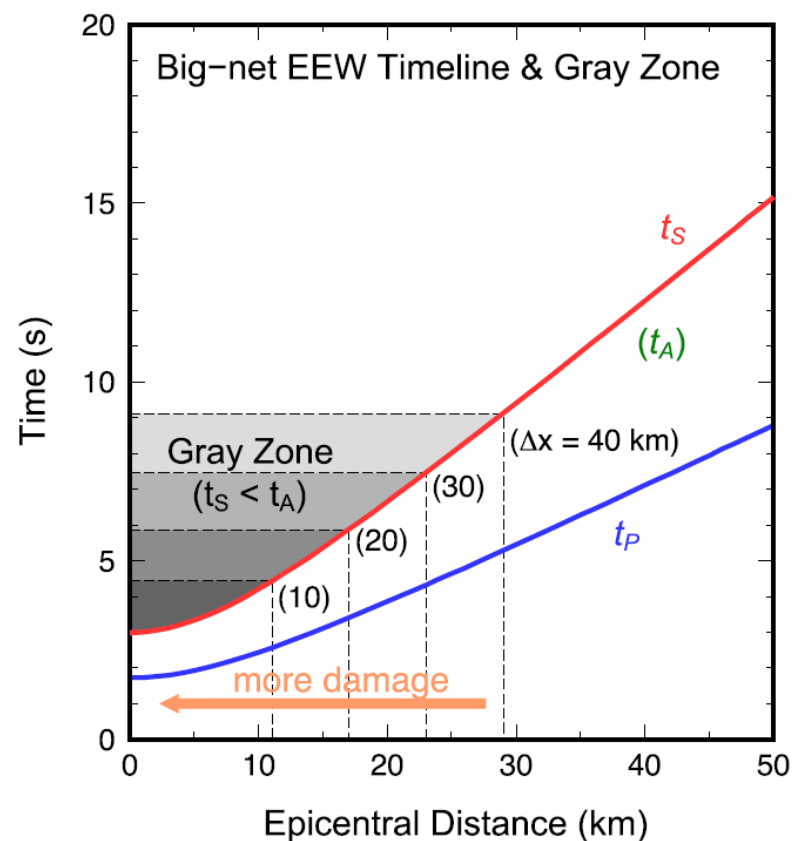
<http://alomax.free.fr/nlloc/soft7.00/Vel2Grid.html>

Grid2Time: χρησιμοποιεί το 3D πλέγμα ταχυτήτων του Vel2Grid για να υπολογίσει χρόνους διαδρομής των P ή S προς κάθε σταθμό και τοποθεσία-στόχο, για υποθετικά υπόκεντρα σε κάθε πλεγματικό σημείο.

<http://alomax.free.fr/nlloc/soft7.00/Grid2Time.html>

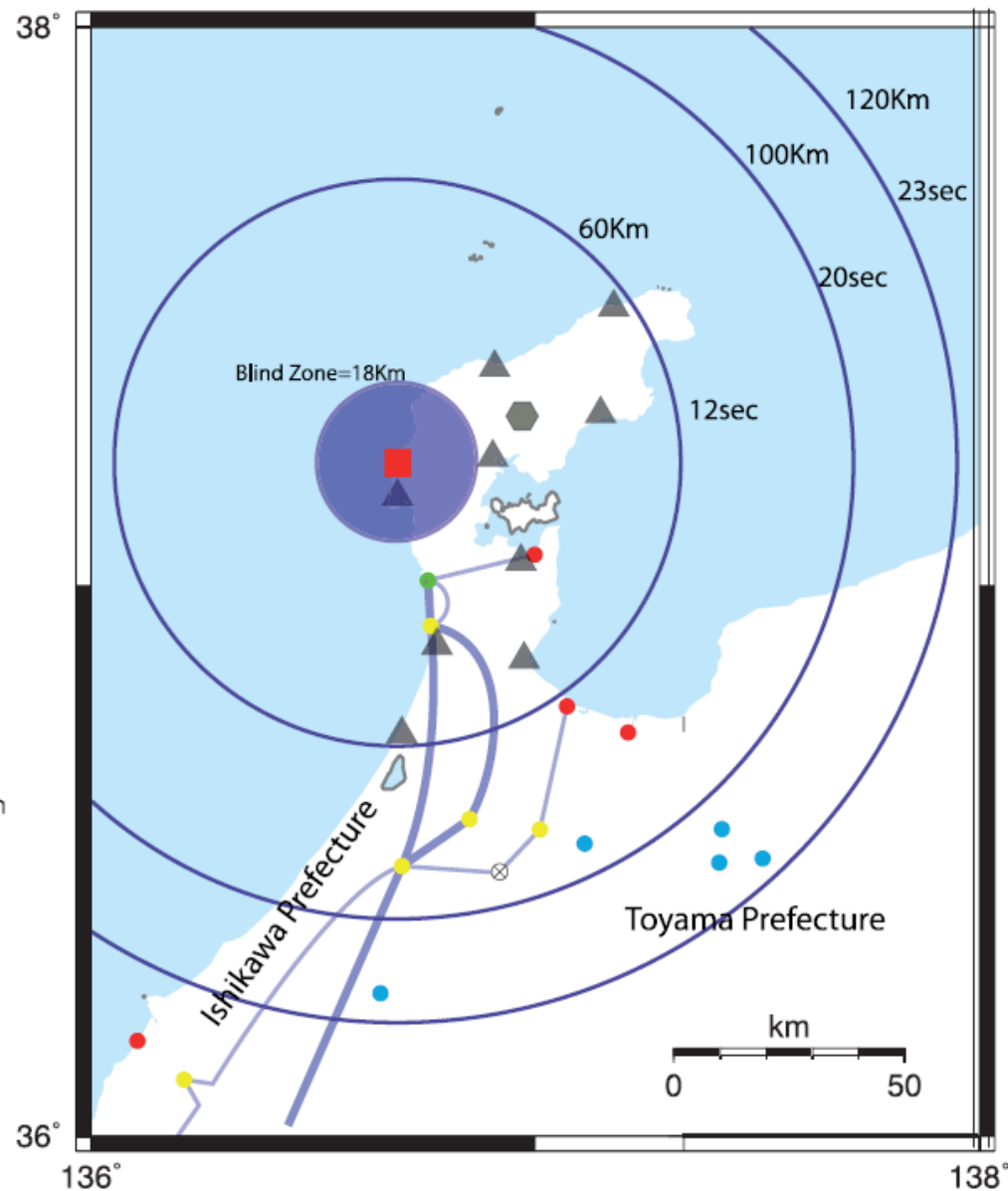
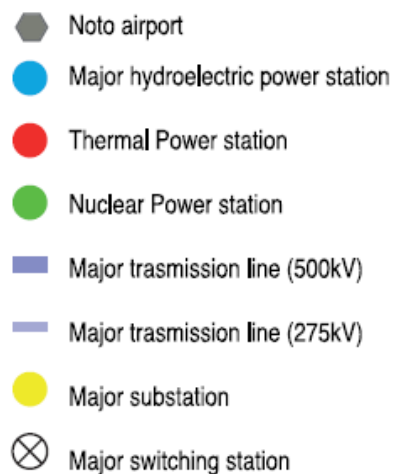
Χρόνος ειδοποίησης

- Από τη στιγμή που εντοπιστεί το υπόκεντρο με βάση τα P κύματα, μπορούν να υπολογιστούν οι αναμενόμενοι χρόνοι διαδρομής (και άφιξης) των κυμάτων S σε κάθε σταθμό, αλλά και σε κάθε τοποθεσία ενδιαφέροντος (περιοχές-στόχοι ή “target sites”), με τη βοήθεια των πινάκων χρόνων διαδρομής.
- Η **διαφορά** ανάμεσα στον **αναμενόμενο χρόνο άφιξης των S** σε μια τοποθεσία και στον **χρόνο έκδοσης της πρώτης ειδοποίησης** (1st alert time) από ένα ΣΕΠΣ ονομάζεται «χρόνος προειδοποίησης» ή «υπολειπόμενος χρόνος» (*remaining time*) ή «χρονικό προβάδισμα» (**lead time**).
- Για τοποθεσίες στις οποίες έχουν ήδη φτάσει τα κύματα S κατά την έκδοση της 1^{ης} ειδοποίησης, το χρονικό «προβάδισμα» είναι **αρνητικό**.
- Τα θετικά χρονικά προβαδίσματα είναι μεγαλύτερα για τοποθεσίες σε μεγαλύτερες επικεντρικές αποστάσεις.
- Η ισόχρονη καμπύλη **μηδενικού** χρονικού προβαδίσματος ορίζει την «**τυφλή ζώνη**» (blind zone) γύρω από το επίκεντρο ενός σεισμού.



Χρόνος ειδοποίησης

- Για τοποθεσίες εντός της τυφλής ζώνης δεν είναι εφικτή η έγκαιρη προειδοποίηση για έναν δεδομένο σεισμό με τις υπάρχουσες συνθήκες (γεωμετρία δικτύου, καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων, κτλ).
- Η τυφλή ζώνη μπορεί να περιοριστεί, και το χρονικό προβάδισμα να αυξηθεί: με πύκνωση του σεισμολογικού δικτύου, βελτιώσεις στην τηλεμετρία και βελτιώσεις στους αλγόριθμους επεξεργασίας των δεδομένων.



Προσδιορισμός τοπικού μεγέθους

- Από τη σεισμολογία, γνωρίζουμε ότι το τοπικό μέγεθος, M_L , μπορεί να υπολογιστεί αν γνωρίζουμε το μέγιστο πλάτος εδαφικής μετατόπισης a σε μm , την υποκεντρική απόσταση R (km) ενός σταθμού, και μια διόρθωση τοπικών εδαφικών συνθηκών C_s , π.χ. για τον Ελλαδικό χώρο:

$$M_L = \log a + 2.32 \log R - 1.07 + C_s$$

- Ωστόσο, αυτή η μέθοδος προϋποθέτει την καταγραφή των κυμάτων S , στα οποία αναμένεται η μέγιστη εδαφική μετατόπιση για τοπικούς σεισμούς, και άρα δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για Έγκαιρη Προειδοποίηση Σεισμών.
- Στα λογισμικά ΕΠΣ γίνεται προσπάθεια να εξαχθούν συμπεράσματα για το μέγεθος ενός σεισμού από τα χαρακτηριστικά των πρώτων παλμών των κυμάτων P .

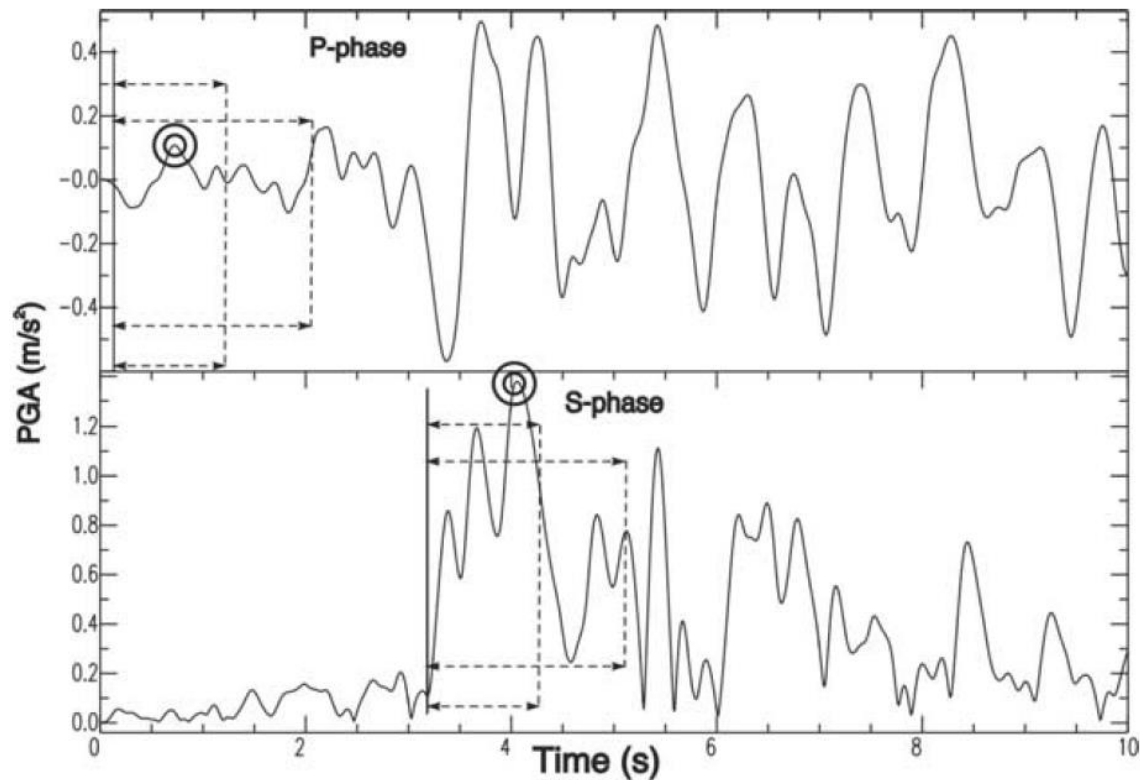
Ταχύς προσδιορισμός μεγέθους

- Έχει βρεθεί ότι υπάρχει μια σύνδεση μεταξύ της χαμηλής συχνότητας μέγιστης εδαφικής μετατόπισης (peak displacement, P_d) κατά τα πρώτα 2-4 sec των κυμάτων P ή/και των S (1-2 sec), και του (τελικού) μεγέθους ενός σεισμού, M , για δεδομένη υποκεντρική απόσταση.
- Οι εμπειρικές σχέσεις που συνδέουν το P_d , ή PGD_t , με το M , μπορούν να εφαρμοστούν για ένα σημαντικό εύρος μεγεθών (έως περίπου $M=6.5$).

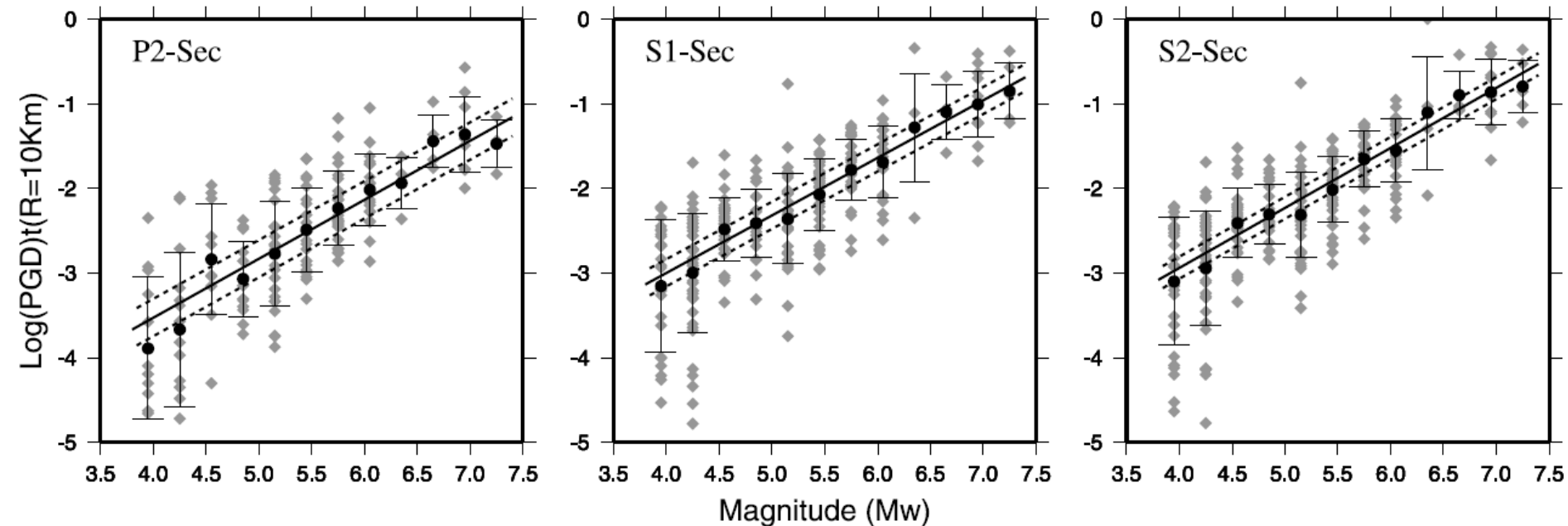
Παράδειγμα μέτρησης μέγιστης εδαφικής κίνησης (PGA) για τον σεισμό $M=6.9$ του 1980 στην Irpinia (Ιταλία), σε σήματα με χαμηλοπερατό φίλτρο 3Hz.

Επάνω: μέτρηση μέγιστου πλάτους των P σε παράθυρα 1 και 2 sec μετά την άφιξη.

Κάτω: μέτρηση μέγιστου πλάτους S από το μέτρο (*modulus*) των δύο οριζόντιων συνιστωσών, σε παράθυρα 1 και 2 sec μετά την άφιξη.



Ταχύς προσδιορισμός μεγέθους



- Προκειμένου να βρεθεί ένας εμπειρικός τύπος που συνδέει τη μέγιστη εδαφική μετατόπιση (P_d ή PGD_t) με το μέγεθος και την υποκεντρική απόσταση, χρησιμοποιείται η γενική σχέση:

$$\log(\text{PGD}_t) = f(M, R) = C + B \cdot M + A \log(R)$$

- Όπου οι σταθερές A, B, C υπολογίζονται μέσω παλινδρόμησης.
- Στη συνέχεια υπολογίζεται το M ως προς το PGD με κανονικοποίηση σε μια απόσταση αναφοράς 10 km.

RTMAG

- Στο λογισμικό PRESTo, χρησιμοποιείται πιθανολογικός προσδιορισμός του μεγέθους με Μπεϋζιανή (*Bayesian*) εκτίμηση σε πραγματικό χρόνο.

$$f(m|\underline{d}_t) = \frac{f(\underline{d}_t|m)f_t(m)}{\int_{M_{\min}}^{M_{\max}} f(\underline{d}_t|m)f_t(m)dm}$$

- Όπου $f(m|\underline{d}_t)$ η υπό συνθήκη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF) του M δεδομένου του διανύσματος δεδομένων $\underline{d}_t$ στον χρόνο t (τα δεδομένα είναι τα κανονικοποιημένα P_d για P ή/και S στα αντίστοιχα παράθυρα 1, 2 ή 4 sec).
- $f(\underline{d}_t|m)$ η υπό συνθήκη PDF των δεδομένων P ή/και S για δεδομένο μέγεθος M .
- $f_t(m)$ η προγενέστερη (*prior*) PDF του μεγέθους M , βάσει της γνώσης πριν τη χρονική στιγμή t .
- Ως προγενέστερη γνώση για το μέγεθος M μπορεί να θεωρηθεί ο νόμος Gutenberg-Richter για χρόνους πριν από την πρώτη άφιξη των P , ενώ στη συνέχεια αυτή η προγενέστερη PDF πρέπει να ανανεώνεται βάσει της νέας πληροφορίας για το μέγεθος από την τρέχουσα καταγραφή.

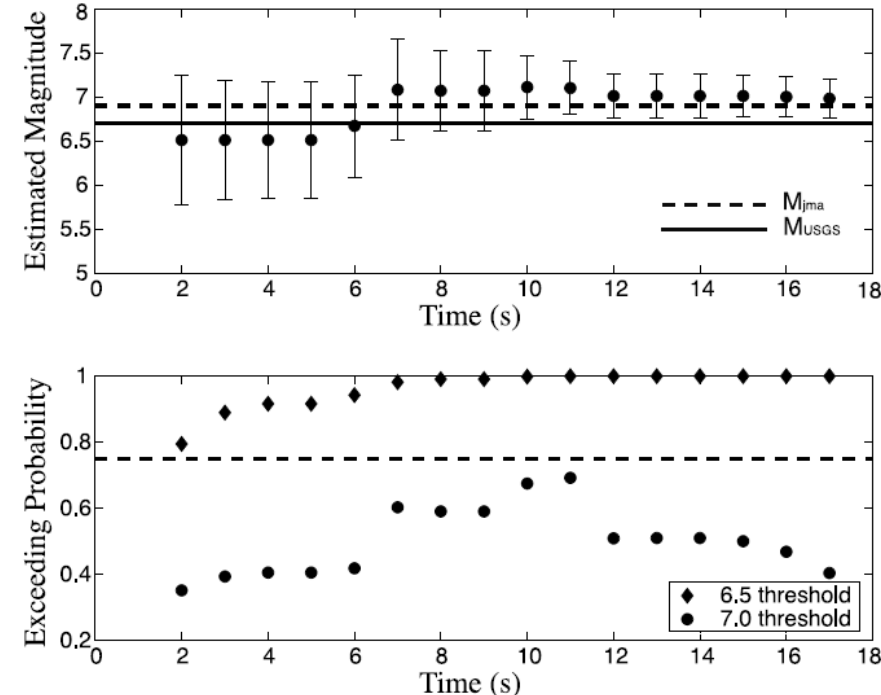
RTMAG

- Σε κάθε στιγμή t , με βάση τα έως τότε δεδομένα, μπορεί να γίνει εκτίμηση για το ελάχιστο ($M_{\min}$) και το μέγιστο ($M_{\max}$) προβλεπόμενο τελικό μέγεθος από τη σωρευτική PDF, $F_{t,M}(m)$:

$$M_{\min} : F_{t,M_{\min}}(m) = \int_{-\infty}^{M_{\min}} P_t(m|\underline{d}_t) dm = \alpha$$

$$M_{\max} : F_{t,M_{\max}}(m) = \int_{-\infty}^{M_{\max}} P_t(m|\underline{d}_t) dm = 1 - \alpha$$

- Όπου, για $\alpha=5\%$ το $M_{\min}$ ορίζεται στο 0.05 και το $M_{\max}$ στο 0.95 της $F_t(m)$, αντίστοιχα, ενώ μπορεί να εκτιμηθεί για κάθε στιγμή t η πιθανότητα το τελικό μέγεθος να ξεπεράσει μια τιμή κατωφλίου (π.χ. 6.5 ή 7.0).
- Τα παραπάνω έχουν υλοποιηθεί στον αλγόριθμο RTMAG, ο οποίος χρησιμοποιείται στο λογισμικό PRESTo.
- Παράδειγμα εφαρμογής στον σεισμό του Noto Hanto (25 Μαρτίου 2007) στην Ιαπωνία ($M_{jma}=6.9$).
- Επάνω: εκτίμηση μεγέθους ανά 1 sec.
- Κάτω: εκτίμηση πιθανότητας υπέρβασης μεγεθών 6.5 και 7.0 ανά 1 sec.



Virtual Seismologist (VS)

- Το λογισμικό Virtual Seismologist (VS) χρησιμοποιεί Μπεϋζιανές πιθανολογικές μεθόδους για να επιλύσει το πρόβλημα του προσδιορισμού υποκέντρου και μεγέθους.
- Καθώς, κατά τα πρώτα δευτερόλεπτα της εκδήλωσης ενός σεισμού, τα διαθέσιμα δεδομένα χρόνων άφιξης και πλάτους είναι ελάχιστα, η μέθοδος αυτή αξιοποιεί προγενέστερη γνώση προκειμένου να βρει τις πιθανότερες λύσεις για έναν σεισμό που βρίσκεται σε εξέλιξη.
- Η προγενέστερη πληροφορία (prior information) περιλαμβάνει:
 - Την τρέχουσα κατάσταση λειτουργίας του σεισμολογικού δικτύου (state of health)
 - Προηγούμενη σεισμικότητα στην περιοχή μελέτης
 - Τοποθεσίες γνωστών ενεργών ρηγμάτων
 - Τη σχέση Gutenberg-Richter (συχνότητας-μεγέθους) για το υπόβαθρο της περιοχής
- Η πληροφορία αυτή μπορεί να ωφελήσει κυρίως σε περιοχές όπου η πυκνότητα του δικτύου είναι αραιή (σχετικά μεγάλες ενδο-αποστάσεις σταθμών).

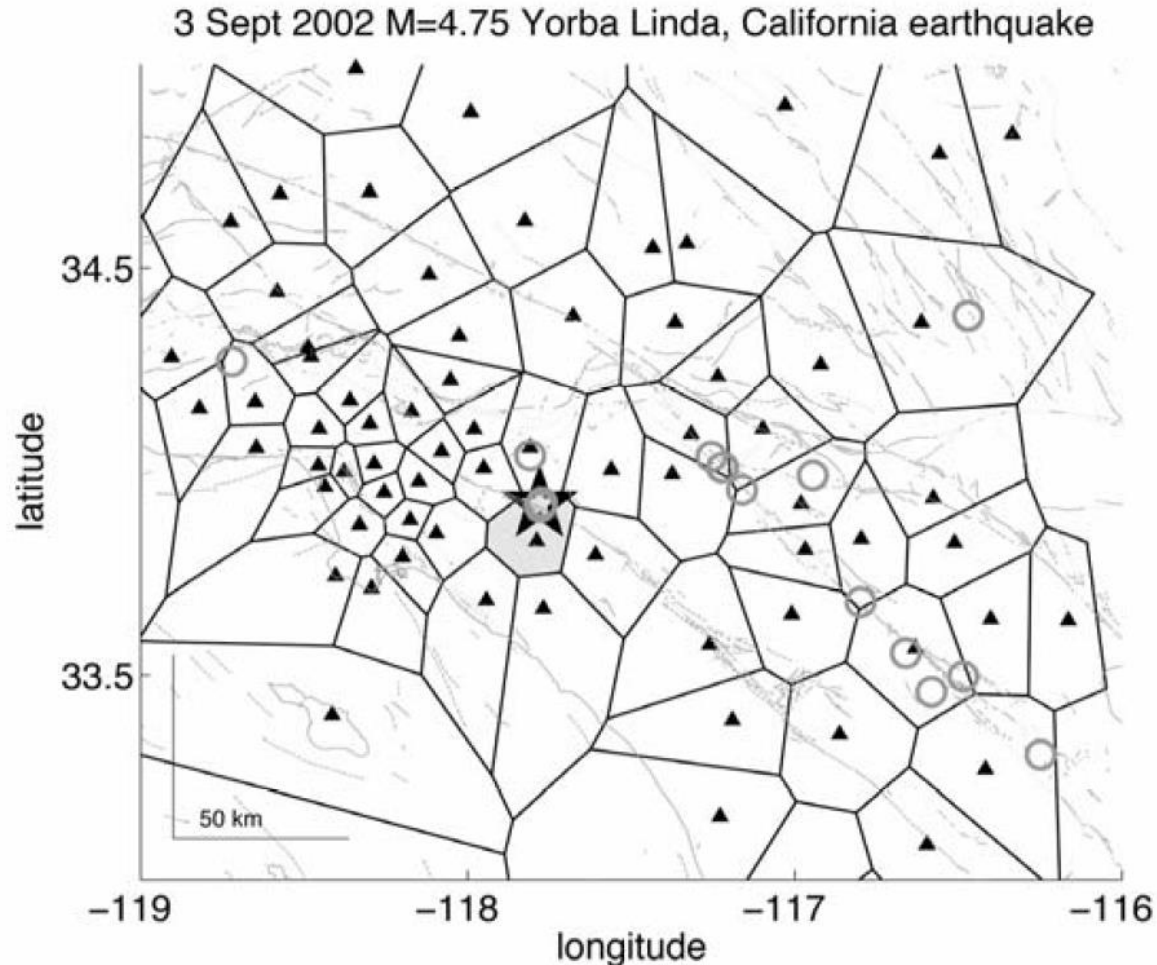
Virtual Seismologist (VS)

- Εφόσον υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για την προηγούμενη σεισμικότητα και τα ενεργά ρήγματα, θεωρείται πιθανότερο:
 - Οι μεγάλοι σεισμοί να συμβούν κοντά σε μεγάλα ενεργά ρήγματα που έχουν ξαναδώσει σεισμούς στο παρελθόν (στοιχεία από μελέτες σεισμικής επικινδυνότητας)
 - Η κατανομή μεγεθών να ακολουθεί τη σχέση Gutenberg-Richter: πιο πιθανόν να συμβούν σεισμοί μικρού μεγέθους παρά μεγάλου
 - Οι σεισμοί να κατανέμονται σε συστάδες στον χώρο και τον χρόνο: εκεί όπου εκδηλώθηκε πρόσφατα ένας σεισμός είναι πιθανόν να εκδηλωθεί και άλλος (πολλοί μεγάλοι σεισμοί εκδηλώνονται ύστερα από προσεισμούς)
 - Νόμος Omori: σε μια μετασεισμική ακολουθία είναι αναμενόμενο ο αριθμός σεισμών να μειώνεται με την πάροδο του χρόνου
- Σε περίπτωση που δεν υπάρχει αυτή η πληροφορία (είτε συνολικά είτε κατά περιοχή), θεωρείται ομοιόμορφη πιθανότητα για όλα τα μεγέθη και όλες τις υποκεντρικές θέσεις.
- Η κατάσταση λειτουργίας του δικτύου (λειτουργικοί σταθμοί, σωστός χρονισμός, γνωστές χρονικές καθυστερήσεις) χρησιμοποιείται με παρόμοιο τρόπο όπως και από τη μέθοδο RTLOC.

Virtual Seismologist (VS)

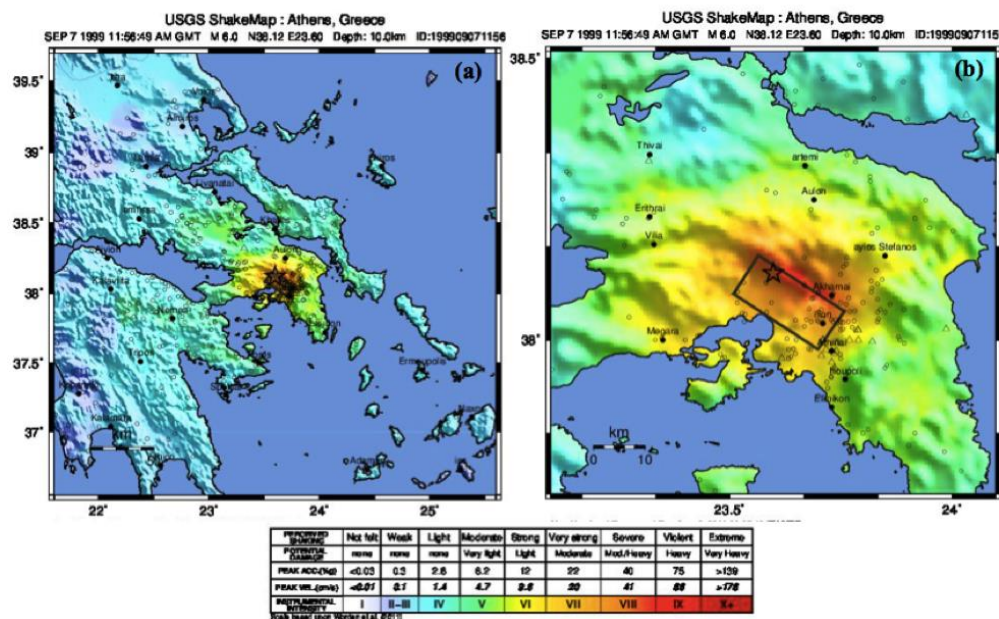
- Παράδειγμα εφαρμογής του VS στον σεισμό $M=4.75$ στο Yorba Linda, California.

- Γκρι κύκλοι: σεισμοί των προηγούμενων 24 ωρών σε επικεντρική απόσταση έως 200 km από τον κύριο σεισμό (αστέρι).
- Γκρι κελί Voronoi: κελί που αντιστοιχεί στον πλησιέστερο σταθμό με την πρώτη άφιξη κυμάτων P.
- Εντός του γκρι κελιού Voronoi είχαν σημειωθεί δύο προσεισμοί στην ίδια θέση με τον κύριο σεισμό.



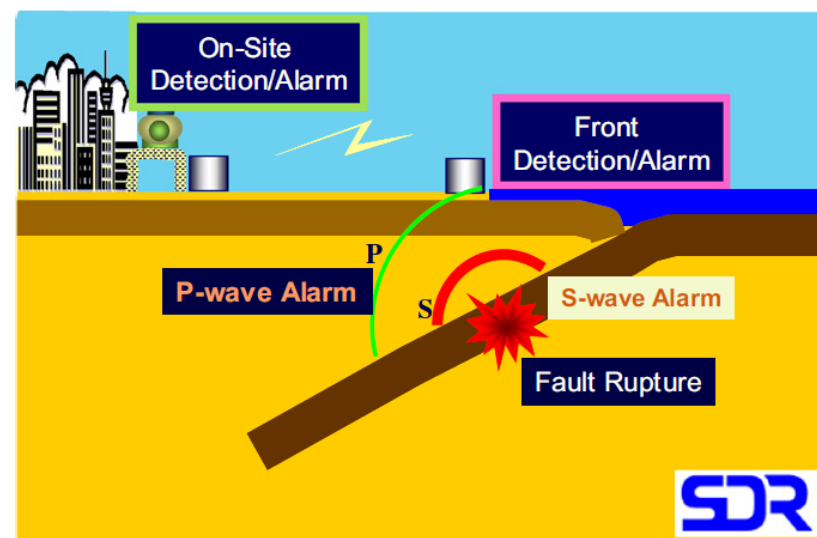
Χάρτες μέτρων έντασης (ShakeMaps)

- Συγχρόνως με την έγκαιρη ειδοποίηση για έναν σεισμό, είναι απαραίτητο να γίνει και εκτίμηση για τις αναμενόμενες τιμές PGA, PGV και PGD σε διάφορες τοποθεσίες, ή τους αναμενόμενους βαθμούς βλάβης, με εκτίμηση της “ενόργανης έντασης” (*instrumental intensity*) ανά τοποθεσία.
- Αυτά τα μέτρα έντασης μπορούν να εκτιμηθούν:
 - από εμπειρικούς τύπους/σχέσεις απόσβεσης (Ground Motion Prediction Equations, GMPE / Intensity Prediction Equations, IPE), δεδομένου μεγέθους και επικεντρικής απόστασης,
 - από εκτιμήσεις των μέτρων έντασης σε τοποθεσίες με εγκατεστημένα όργανα, με την πληροφορία των πρώτων κυμάτων P (σε επιτόπιες μεθόδους ΣΕΠΣ).
- Οι τιμές των αναμενόμενων μέτρων έντασης μπορούν να απεικονιστούν σε χάρτη (ShakeMap) ή να αναφερθεί η εκτίμησή τους για συγκεκριμένη τοποθεσία-στόχο.



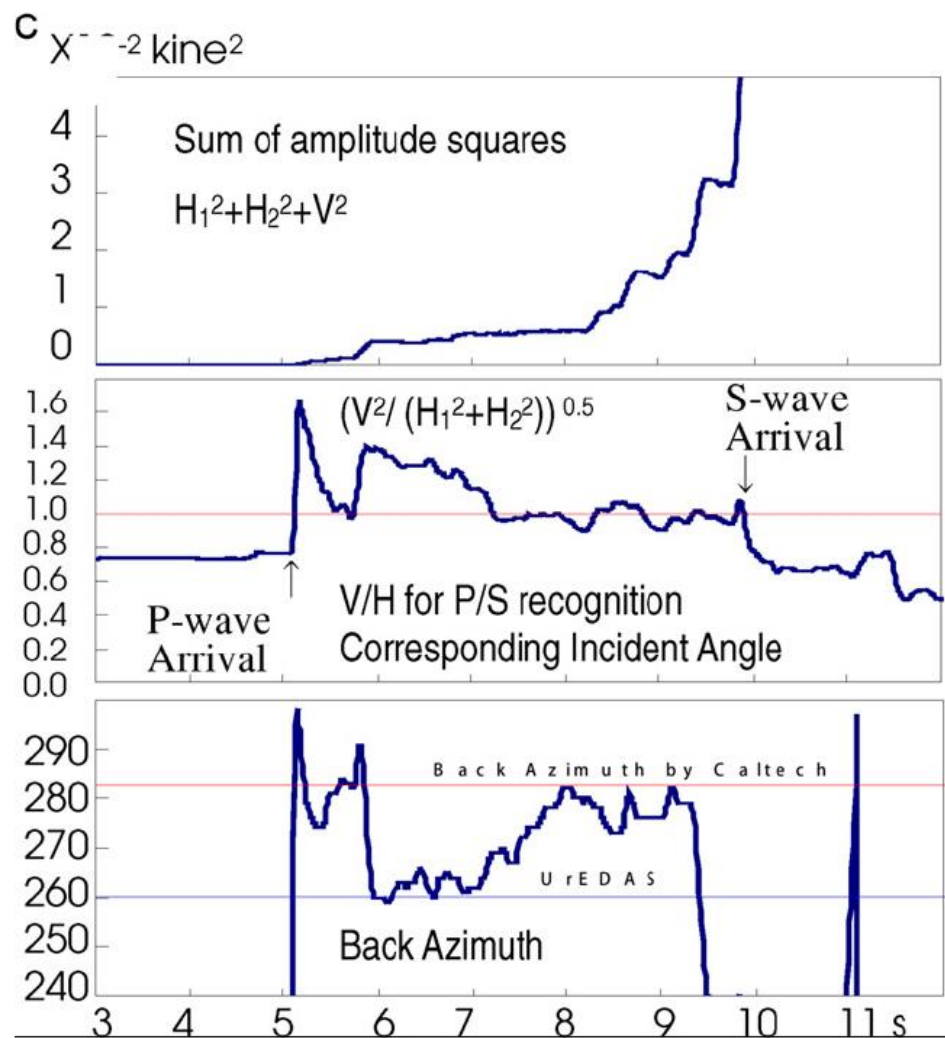
Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ

- Οι δικτυακές μέθοδοι ΣΕΠΣ εφαρμόζουν ταχεία εκτίμηση των εστιακών παραμέτρων, και στη συνέχεια εκτίμηση των αναμενόμενων μέτρων έντασης σε διάφορες τοποθεσίες.
- Ωστόσο, για ασφαλή αποτελέσματα, αυτό απαιτεί καταγραφή των κυμάτων P σε έναν ελάχιστο αριθμό σταθμών (π.χ., 3 ή 4) και συνήθως καταγραφή των S σε τουλάχιστον έναν σταθμό.
- Αυτό σημαίνει ότι κατά την έκδοση της πρώτης ειδοποίησης, η τυφλή ζώνη θα είναι ήδη αρκετά εκτεταμένη, και περιοχές κοντά στο επίκεντρο δεν θα έχουν έγκαιρη ειδοποίηση.
- Ένας τρόπος να «προστατευτεί» μια ορισμένη τοποθεσία-στόχος είναι να τοποθετηθεί σε αυτή σεισμολογικός σταθμός (συνήθως επιταχυνσιογράφος) και με βάση τα δεδομένα του να εφαρμοστεί μια **επιτόπια μέθοδος** ΣΕΠΣ, συμπληρωματικά με τη χρήση δικτυακών μεθόδων ΣΕΠΣ.
- Οι επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ εστιάζουν στην ταχεία ανίχνευση της διέλευσης σεισμικών κυμάτων, με ταυτόχρονη εκτίμηση του αναμενόμενου τελικού μεγέθους και των μέτρων έντασης στη θέση αυτή, χωρίς να είναι γνωστό το υπόκεντρο, και άρα η επικεντρική απόσταση και το εστιακό βάθος.
- Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να μειωθεί σημαντικά η τυφλή ζώνη γύρω από τη θέση, και να αυξηθεί το χρονικό προβάδισμα, επιτρέποντας τη λήψη μέτρων περιορισμού του σεισμικού κινδύνου.



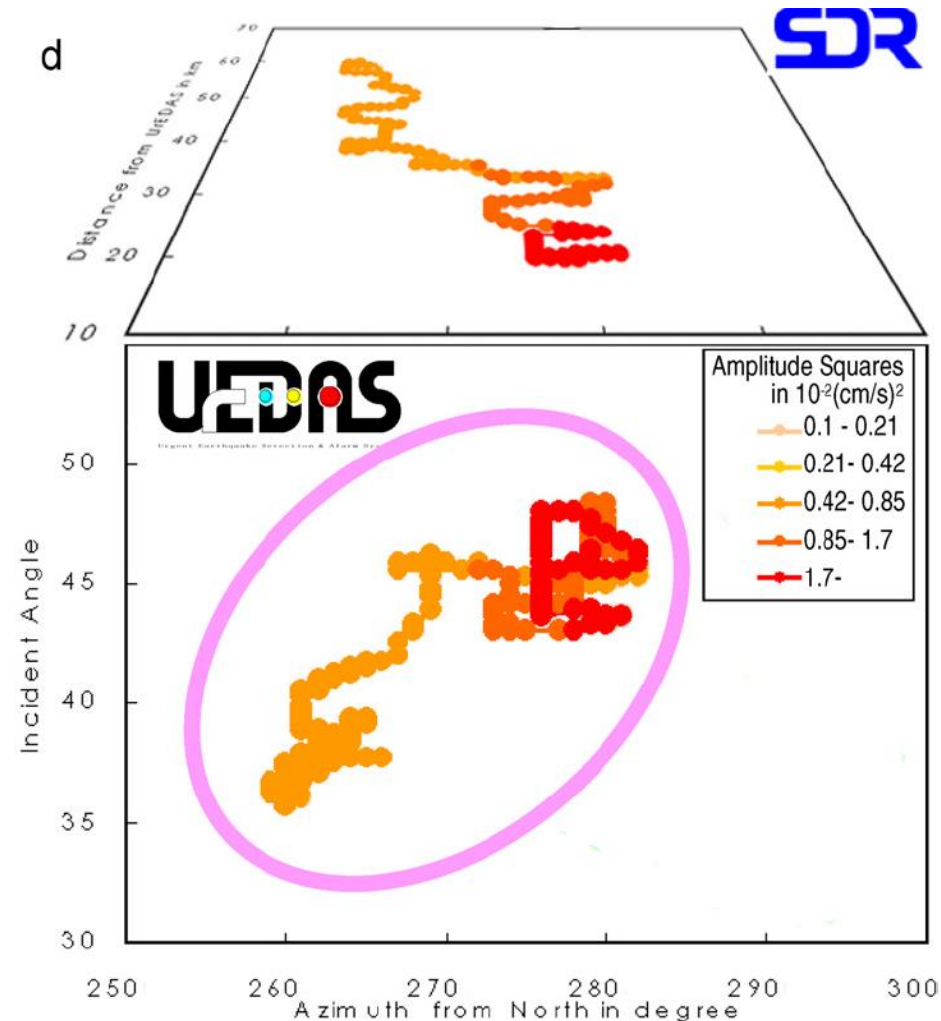
Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ: UrEDAS

- Ιστορικά, το πρώτο ΣΕΠΣ που εφαρμόστηκε στην πράξη σε επιχειρησιακό επίπεδο, ήταν το λεγόμενο UrEDAS (Urgent Earthquake Detection and Alarm System), για τις ανάγκες του Εθνικού Σιδηροδρομικού Δικτύου της Ιαπωνίας. [«Yuredasu» στα γιαπωνέζικα σημαίνει «ξεκινάει το κούνημα»].
- Πρόκειται για ένα επιτόπιο (on-site) ΣΕΠΣ, δηλαδή τα σεισμολογικά όργανα βρίσκονται εγκατεστημένα στην τοποθεσία για την οποία προορίζεται το σύστημα.
- Το UrEDAS επεξεργάζεται τα δεδομένα κυματομορφών 3 συνιστωσών σε πραγματικό χρόνο και υπολογίζει συνεχώς διάφορες παραμέτρους, όπως:
 - Οπισθοαζιμούθιο (Back Azimuth, BAZ)
 - Δεσπόζουσα συχνότητα (pre-dominant frequency), για εκτίμηση μεγέθους
 - Λόγο κατακόρυφου προς οριζόντιου πλάτους, για διάκριση ανάμεσα σε P και S
 - Γωνία πρόσπτωσης στην επιφάνεια.



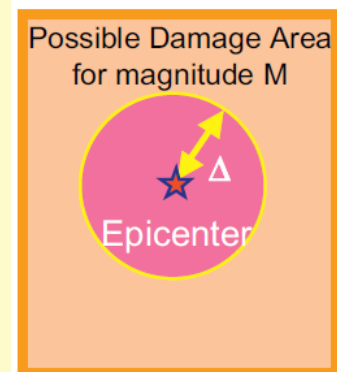
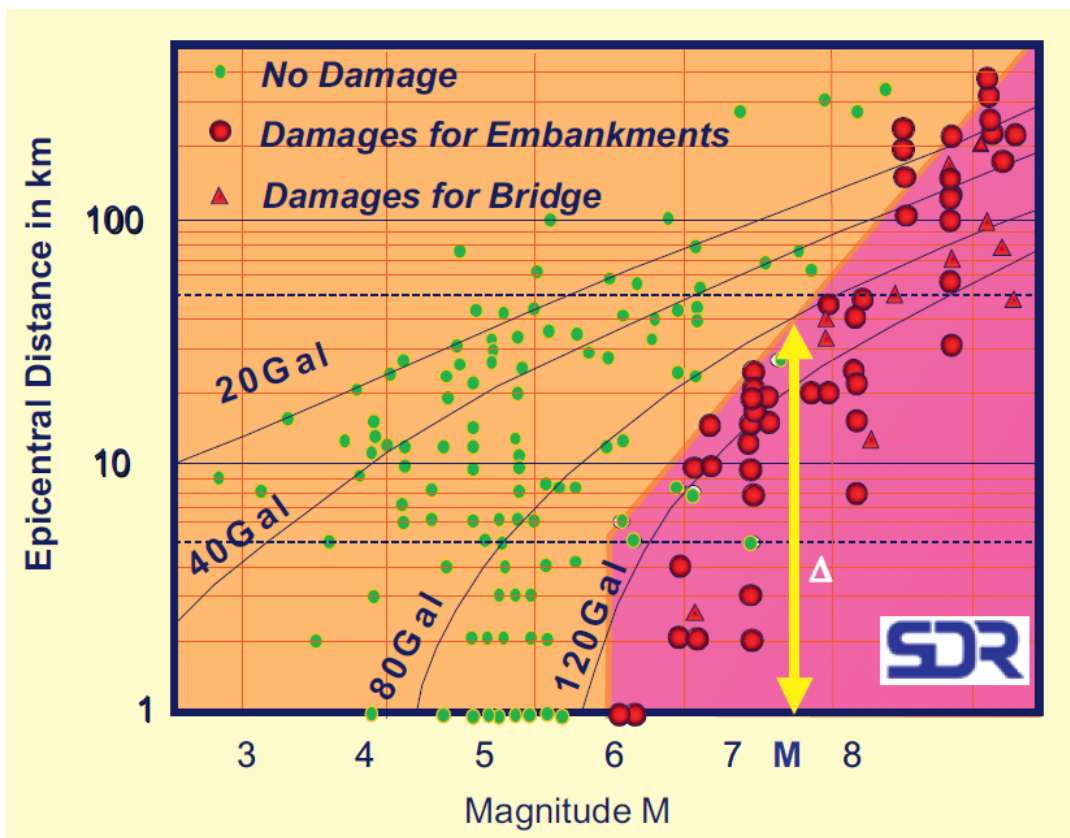
Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ: UrEDAS

- Από τις συνεχείς μετρήσεις των πολλαπλών παραμέτρων του UrEDAS, μπορεί να εκτιμηθεί σε κάθε χρονικό παράθυρο μια υποψήφια «σεισμική πηγή».
- Για μεγάλους σεισμούς, το σύστημα UrEDAS μπορεί να «παρακολουθήσει» την εξέλιξη της διάρρηξης, εκτιμώντας τη θέση της πηγής που παρήγαγε τα σεισμικά κύματα σε κάθε χρονική στιγμή (με σημείο αναφοράς τη θέση του σταθμού / επιτόπιου συστήματος UrEDAS).



Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ: UrEDAS

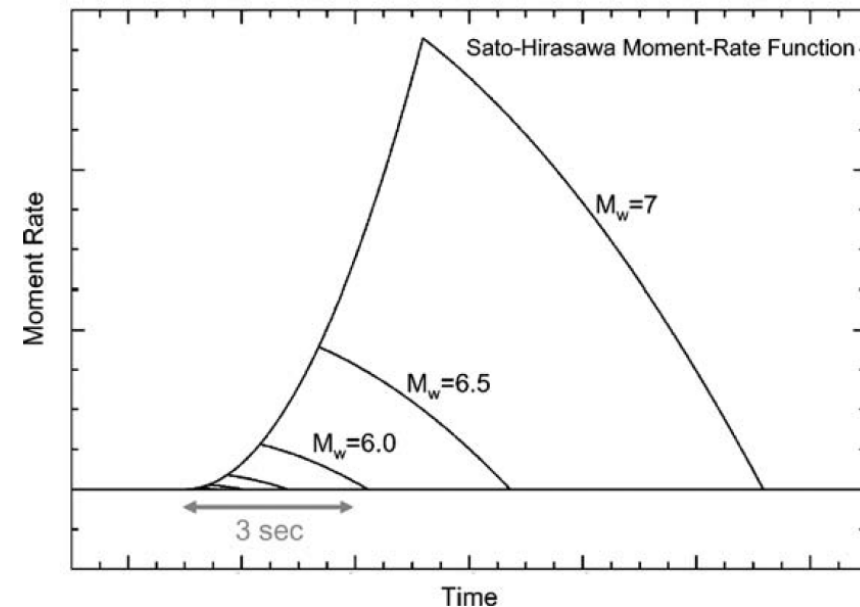
- Ειδικά για την προστασία των σιδηροδρομικών συγκοινωνιών, από πραγματικές παρατηρήσεις σεισμών έχουν φτιαχτεί εμπειρικές σχέσεις (M-Δ) που συνδέουν το μέγεθος του σεισμού M με την επικεντρική απόσταση και με τις παρατηρούμενες βλάβες.
- Συστήματα όπως το UrEDAS ενεργοποιούνται σε περίπτωση που κάποιο τμήμα σιδηροδρομικής γραμμής βρίσκεται στην «κόκκινη» περιοχή του διαγράμματος M-Δ, οπότε λαμβάνονται μέτρα περιορισμού του σεισμικού κινδύνου (π.χ., φρενάρισμα τραίνων για αποφυγή εκτροχιασμού).



Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ: χαρακτηριστική περίοδος τ_c

- Μια επιτόπια μέθοδος ΣΕΠΣ χρησιμοποιεί μετρήσεις **μέγιστου πλάτους** εδαφικής μετατόπισης (peak displacement) σε συνδυασμό με τη **δεσπόζουσα περίοδο** (predominant period) των κυμάτων για να εκτιμήσει το μέγεθος ενός επερχόμενου σεισμού.
- Η μέθοδος βασίζεται στο απλό κινηματικό μοντέλο κυκλικής διάρρηξης (*circular crack*) (Sato & Hirasawa, 1973), που βρίσκει ευρεία εφαρμογή σε σεισμούς $M_w < 6.5$.
- Όσο μεγαλώνει το μέγεθος, τόσο μεγαλώνει η διάρκεια της πηγής (χρονικής συνάρτησης του ρυθμού μεταβολής της σεισμικής ροπής).
- Το σχήμα της συνάρτησης είναι όμοιο με το σχήμα του πρώτου παλμού της μετάθεσης μακρινού πεδίου (*far-field displacement*).
- Η χαρακτηριστική περίοδος, τ_c , είναι η δεσπόζουσα περίοδος των πρώτων κυμάτων P, και συνδέεται με την εκλυόμενη ενέργεια.
- Διπλανό σχήμα: Ρυθμός μεταβολής σεισμικής ροπής για το κινηματικό μοντέλο πηγής των Sato & Hirasawa (1973), για διάφορα μεγέθη σεισμών.
- Η διάρκεια του παλμού των 3 sec αντιστοιχεί σε μέγεθος $M_w = 6.0$ (κατά προσέγγιση όριο κορεσμού της μεθόδου τ_c για παράθυρο 3 sec).

Numerical Test on Synthetic Source Time Function

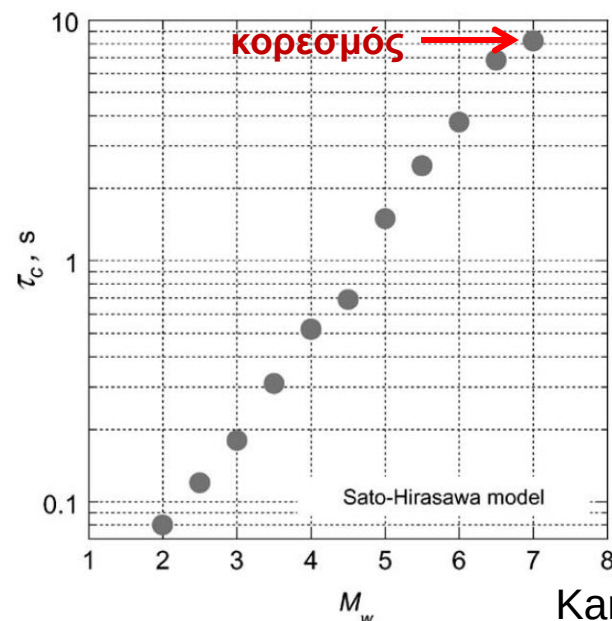
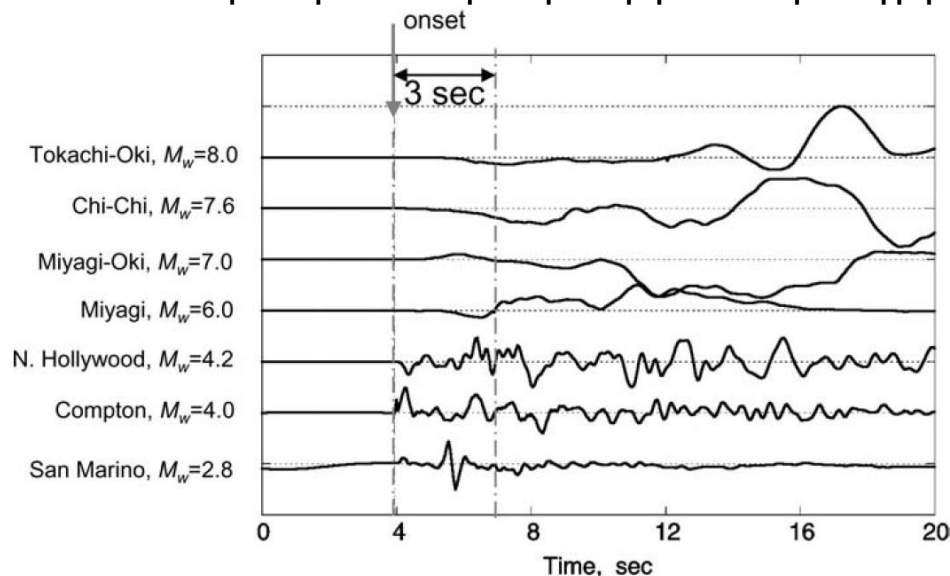


Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ: χαρακτηριστική περίοδος τ_c

- Ο Kanamori (2005) όρισε μια παράμετρο **χαρακτηριστικής περιόδου** τ_c , η οποία υπολογίζεται στα πρώτα $\tau_0=3$ sec των κυμάτων P, και που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση μεγέθους σεισμού με έναν (1) μόνο σταθμό.
- Κατά όμοιο τρόπο με τον Nakamura (1988), από τη σχέση ανάμεσα στις κυματομορφές μετατόπισης $u(t)$ και ταχύτητας υπολογίζεται ο λόγος r στο πεδίο του χρόνου, και στη συνέχεια στο πεδίο συχνοτήτων.

$$r = \frac{\int_0^{\tau_0} \dot{u}^2(t) dt}{\int_0^{\tau_0} u^2(t) dt} \quad r = \frac{4\pi^2 \int_0^\infty f^2 |\hat{u}(f)|^2 df}{\int_0^\infty |\hat{u}(f)|^2 df} = 4\pi^2 \langle f^2 \rangle \quad \tau_c = \frac{1}{\sqrt{\langle f^2 \rangle}} = \frac{2\pi}{\sqrt{r}}$$

- Η χαρακτηριστική περίοδος τ_c είναι η κυρίαρχη περίοδος των πρώτων κυμάτων P και συνδέεται με την εκλυόμενη ενέργεια στην πηγή.



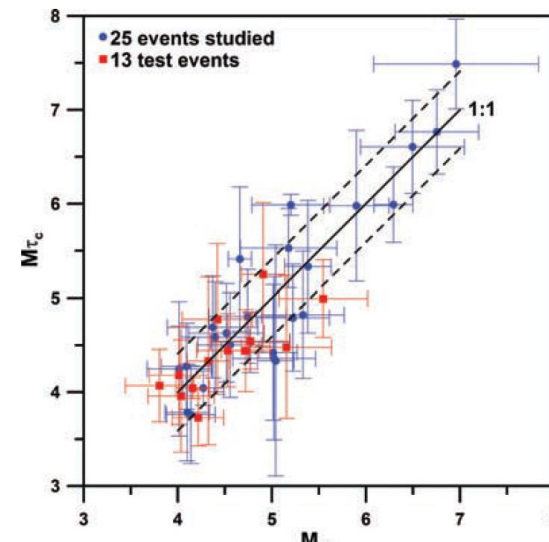
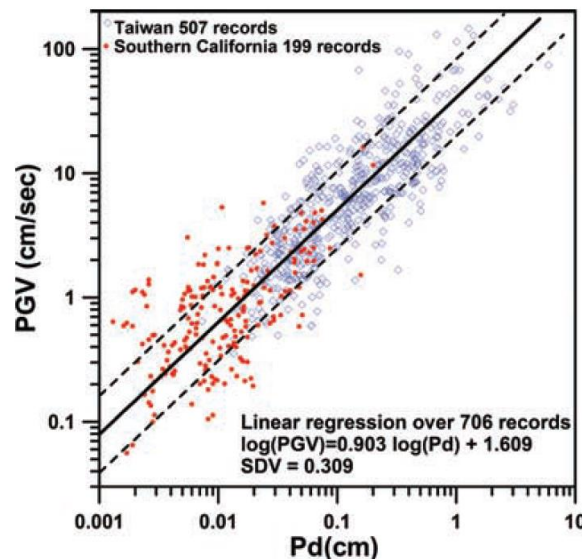
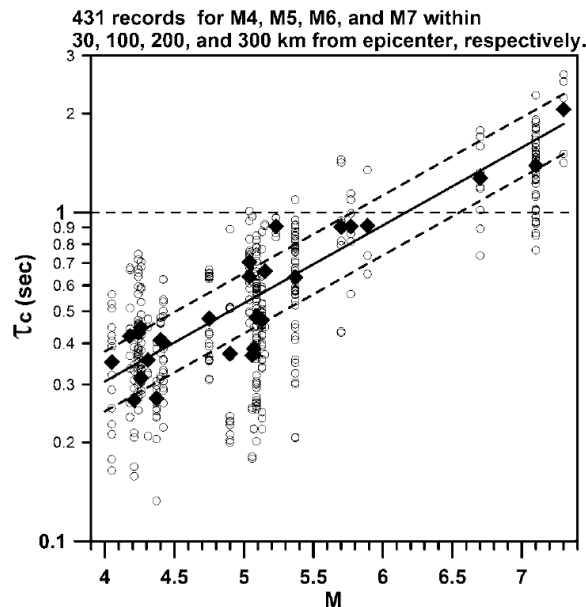
Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ: Συνδυασμός τ_c - P_d

- Οι μετρήσεις P_d (*peak displacement*) και τ_c (*characteristic period*) σε **έναν** (1) σταθμό μπορούν να συνδυαστούν ώστε να παράσχουν ταυτόχρονη εκτίμηση για:
 - Την αναμενόμενη μέγιστη εδαφική κίνηση (π.χ., PGV) στη θέση του σταθμού και στη γύρω περιοχή (μέσω του P_d).
 - Το εκτιμώμενο μέγεθος M του σεισμού (ή την εκτίμηση ότι πρόκειται για σεισμό $M_w > 6.5$), ο οποίος αναμένεται να πλήξει περιοχές είτε κοντά στον σταθμό (αν συνδυάζεται με υψηλό P_d), ή περιοχές μακριά από τον σταθμό (αν το P_d είναι χαμηλό).
- Δίνονται, για παράδειγμα, σχέσεις που έχουν υπολογιστεί για τη Ν. Καλιφόρνια (Wu et al., 2007) :

$$\log \tau_c = 0.237M - 1.462 \pm 0.091 \quad \text{and} \quad \log(PGV) = 0.903 \log(Pd) + 1.609 \pm 0.309$$

$$M = 4.218 \log \tau_c + 6.166 \pm 0.385.$$

(PGV in cm/sec and Pd in cm).

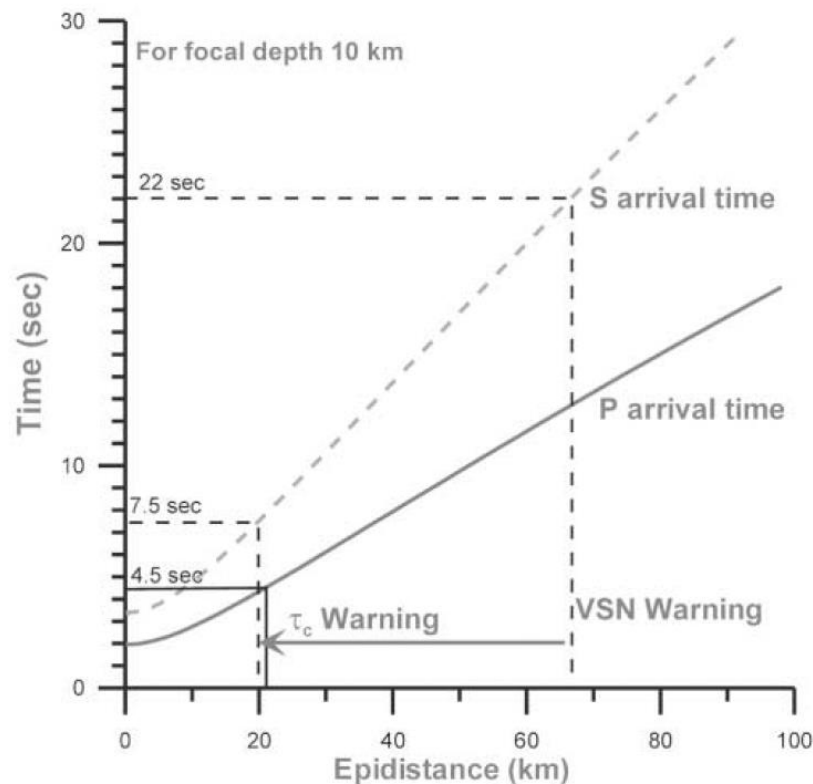


Wu et al. (2007)

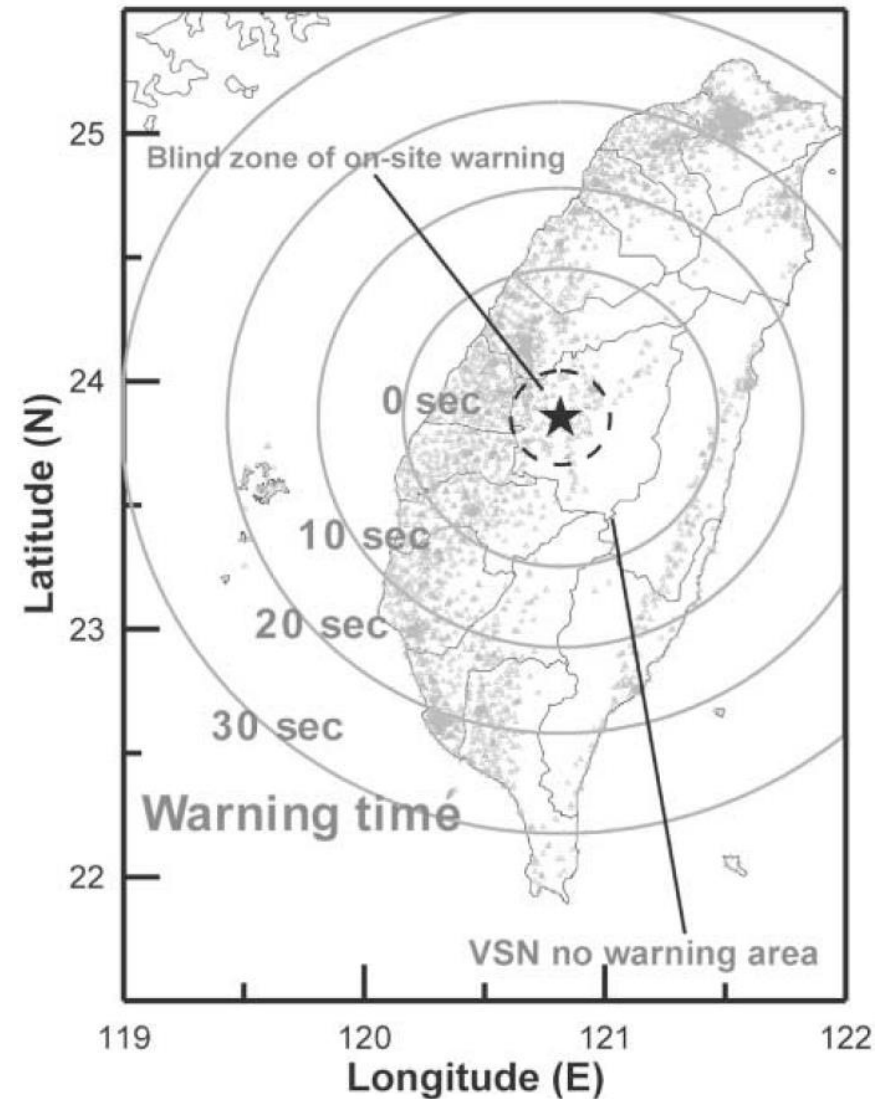
Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ

Παράδειγμα εφαρμογής επιτόπιων μεθόδων ΣΕΠΣ, παράλληλα με δικτυακές μεθόδους ΣΕΠΣ στην Ταϊβάν:

- Με **δικτυακά** ΣΕΠΣ (VSN) και για επιφανειακούς σεισμούς, κατά μέσον όρο η πρώτη ειδοποίηση εκδίδεται **~22 sec** μετά τον χρόνο γένεσης (**Alert-OT**).
- Αυτό αντιστοιχεί σε **τυφλή ζώνη ~70 km**.
- Με χρήση **επιτόπιων** μεθόδων ΣΕΠΣ, η τυφλή ζώνη μειώνεται στα **~20 km**.

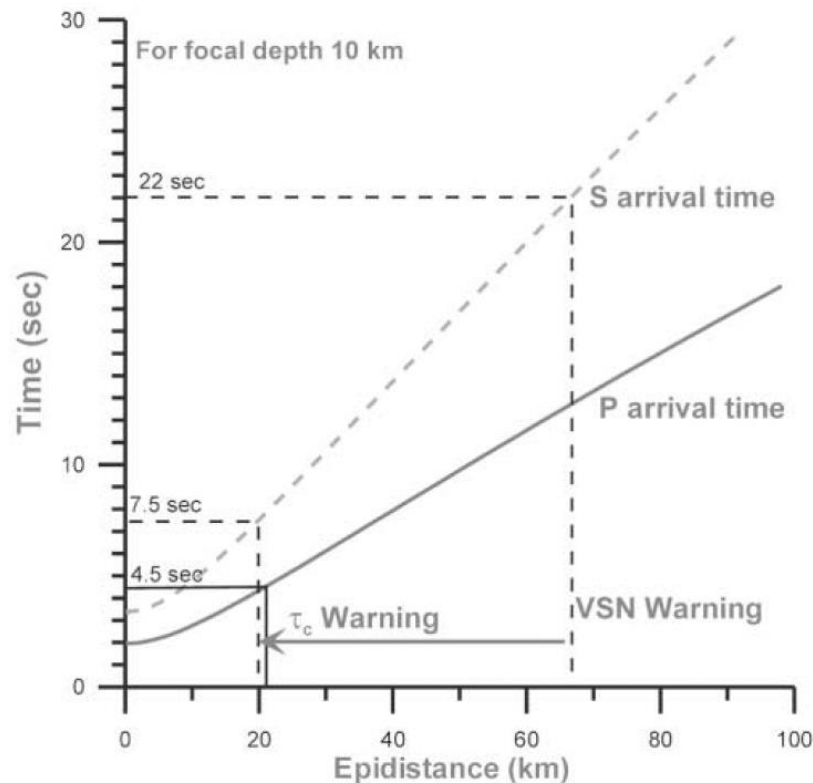


(b) Early Warning Time of the Earthquake of Sep. 20, 1999 (Mw7.6)

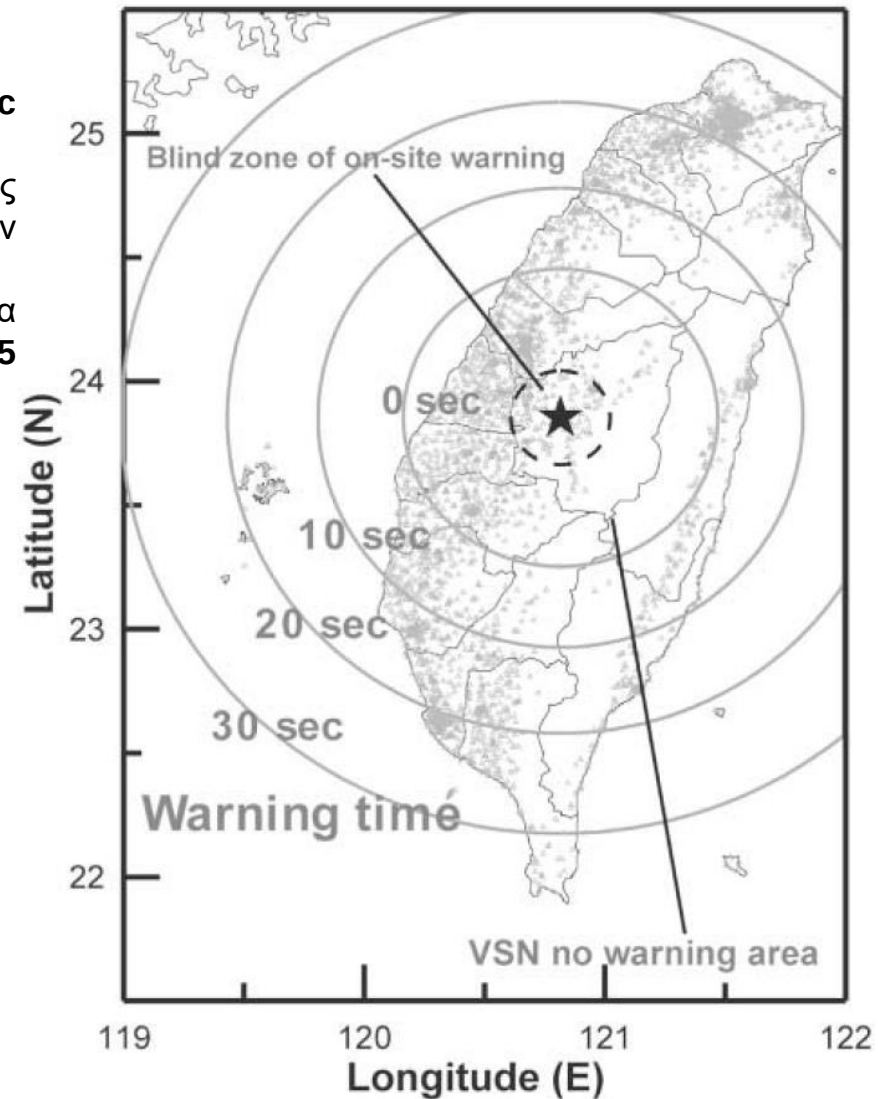


Επιτόπιες μέθοδοι ΣΕΠΣ

- Τα κύματα **P** χρειάζονται **~4.5sec** για να φτάσουν σε επικεντρική απόσταση **21 km** (καταγραφή από επιταχυνσιογράφους).
- Η επιτόπια μέθοδος ΣΕΠΣ χρειάζεται **επιπλέον 3 sec** κυματομορφής.
- Σε **7.5sec** μετά τον χρόνο γένεσης (χρόνος πρώτης ειδοποίησης της επιτόπιας μεθόδου), τα κύματα S θα έχουν φτάσει σε επικεντρική απόσταση **20km** (τυφλή ζώνη).
- Με χρήση επιτόπιων ΣΕΠΣ, το χρονικό προβάδισμα για επικεντρική απόσταση **70 km**, αυξάνεται από 0 sec σε **14.5 sec**.



(b) Early Warning Time of the Earthquake of Sep. 20, 1999 (Mw7.6)



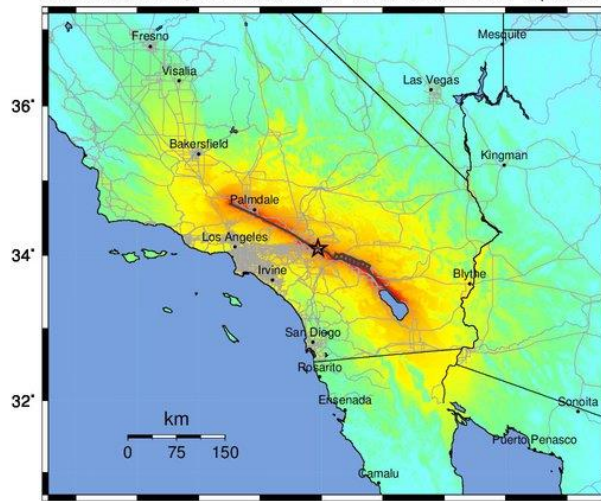
Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Οι συνήθεις δικτυακές μέθοδοι ΣΕΠΣ θεωρούν σημειακή σεισμική πηγή (*point source*).
- Ωστόσο, σε μεγάλους σεισμούς ($M > 6$) που η διάρρηξη έχει μεγάλες, πεπερασμένες (*finite*) διαστάσεις (μήκος διάρρηξης από μερικές δεκάδες έως εκατοντάδες km), αυτή η προσέγγιση δεν μπορεί να εξηγήσει την κατανομή των παρατηρούμενων μέτρων έντασης.
- Η τιμές PGA, PGV κτλ γενικά εξαρτώνται από την οριζόντια απόσταση της κάθε τοποθεσίας από την προβολή του επιπέδου διάρρηξης στην επιφάνεια (απόσταση Joyner-Boore, R_{jb}).
- Για τον λόγο αυτόν, έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι ΣΕΠΣ οι οποίες προσεγγίζουν ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διάρρηξης κατά τη διάρκεια εξέλιξης του σεισμού.

-- Earthquake Planning Scenario --

ShakeMap for S. San Andreas: SM+NSB+SSB+BG+CO - Median ground motions Scenario

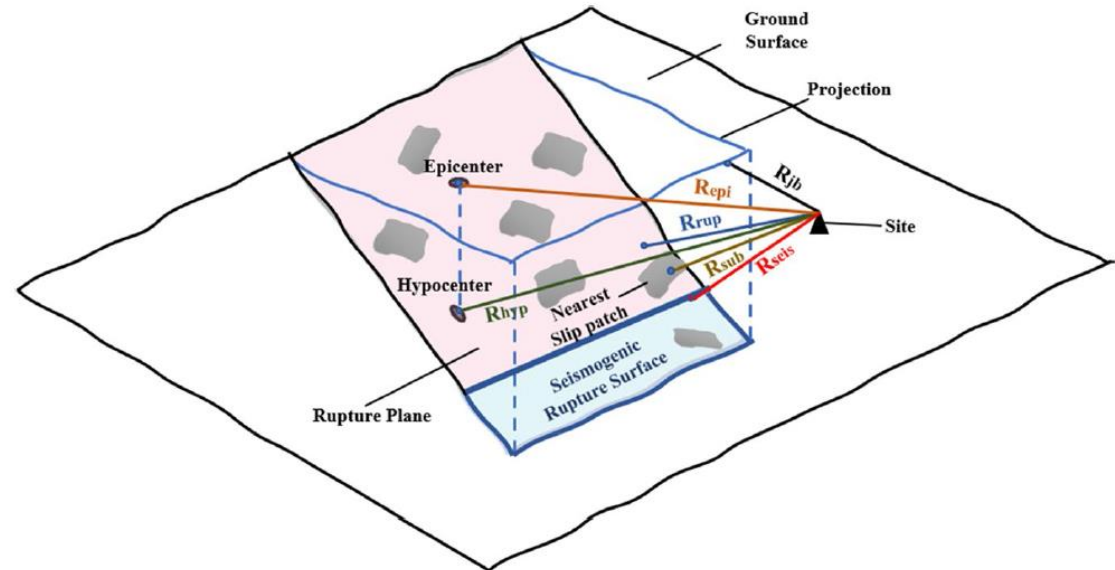
Scenario Date: Jun 30, 2017 10:03:33 AM MDT M 7.8 N34.09 W117.06 Depth: 8.2km



PLANNING SCENARIO ONLY -- Map Version 14 Processed 2017-07-03 02:31:00 PM MDT

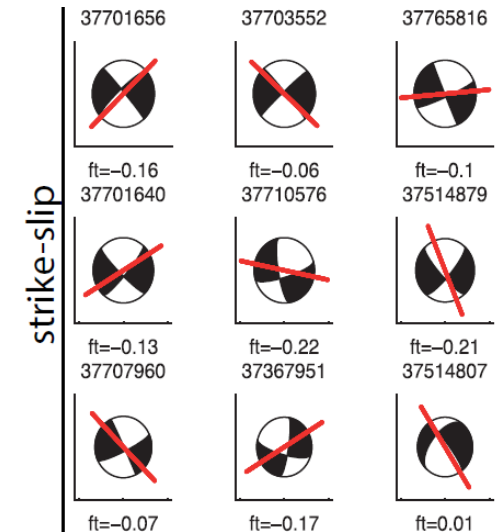
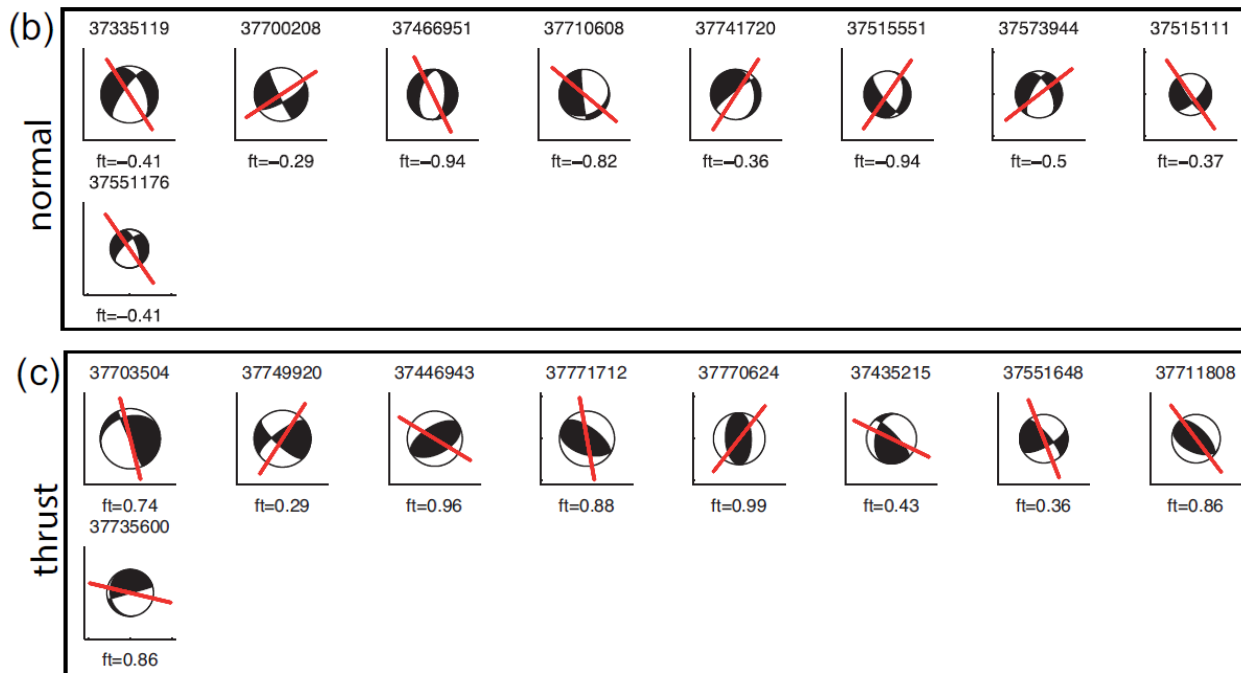
PERCEIVED SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
POTENTIAL DAMAGE	none	none	none	Very light	Light	Moderate	Mod./Heavy	Heavy	Very Heavy
PEAK ACC.(%)	<0.05	0.3	2.8	6.2	12	22	40	75	>139
PEAK VEL.(cm/s)	<0.02	0.1	1.4	4.7	9.6	20	41	86	>178
INSTRUMENTAL INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X+

Scale based upon Worden et al. (2012)



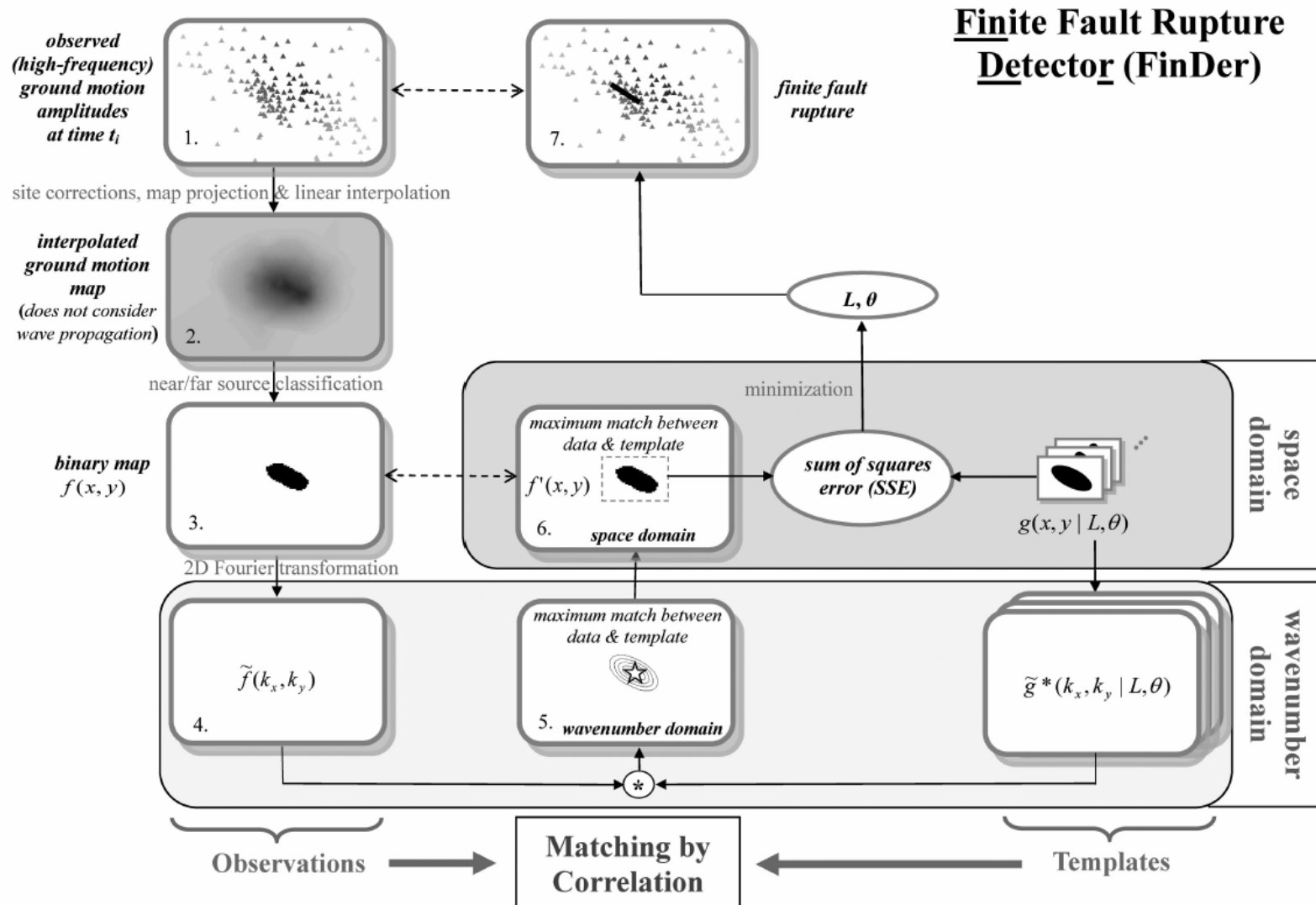
Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Μία από τις μεθόδους ΣΕΠΣ που προσεγγίζουν ορισμένα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της πεπερασμένης διάρρηξης είναι ο αλγόριθμος FinDer (Finite-Fault Rupture Detector).
- Κατά τη διάρκεια του σεισμού, ο αλγόριθμος αυτός λαμβάνει υπόψη του τη χωρική κατανομή των μέγιστων πλατών στους σταθμούς που βρίσκονται κοντά στην προβολή της διάρρηξης στην επιφάνεια.
- Ο FinDer συγκρίνει την εικόνα του χωρικού μοτίβου (*spatial pattern*) των πλατών με εικόνες από προϋπολογισμένα πρότυπα (templates) που έχουν κατασκευαστεί για διάφορους τύπους μηχανισμών γένεσης, εστιακά βάθη, διευθύνσεις και διαστάσεις (μήκη) διάρρηξης.
- Από την ετεροσυσχέτιση (cross-correlation) μεταξύ των εικόνων των παρατηρούμενων μοτίβων και των προϋπολογισμένων προτύπων, ο FinDer κάνει εκτίμηση για:
 - Τη διεύθυνση της διάρρηξης
 - Το μήκος της διάρρηξης (και το μέγεθος)



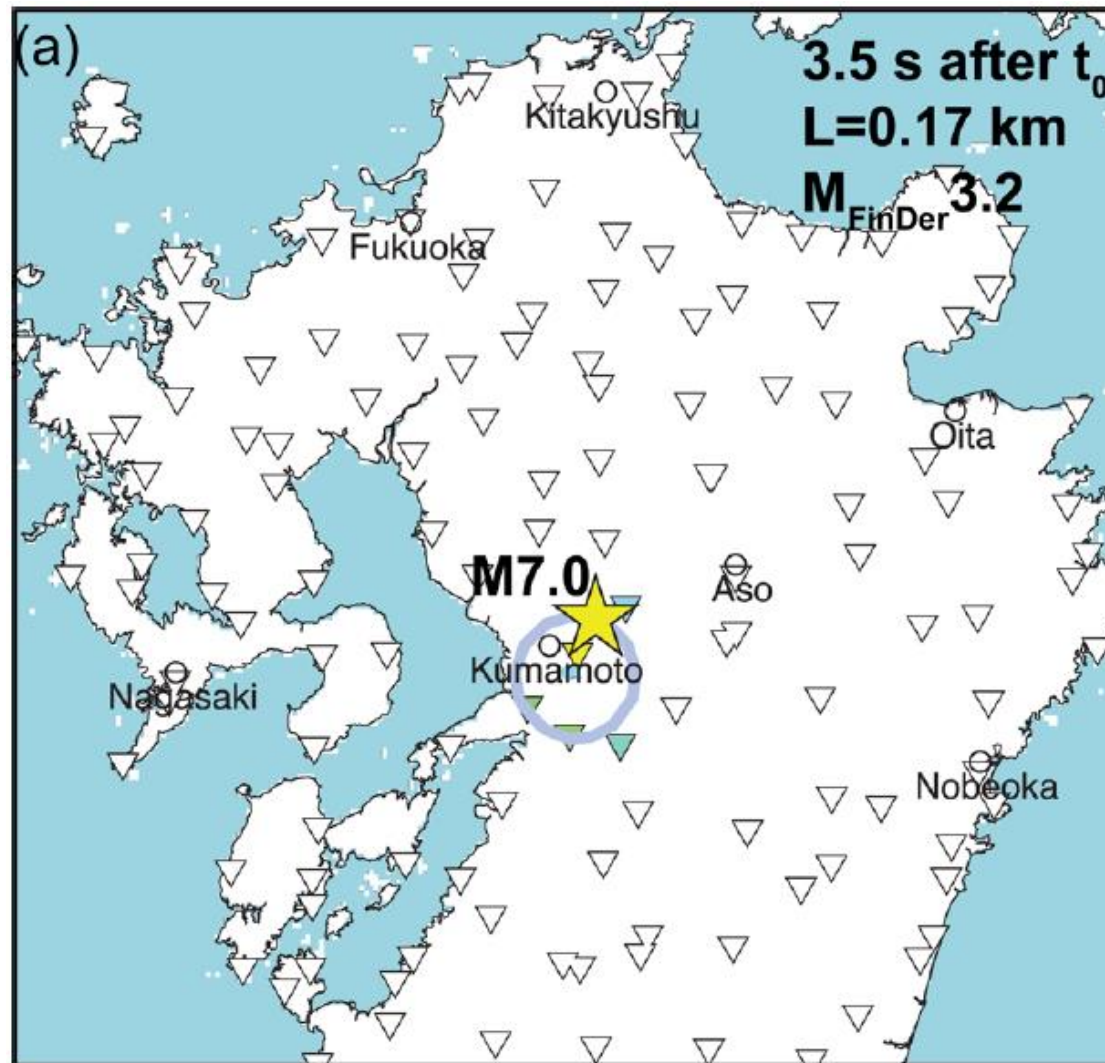
Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Ο αλγόριθμος FinDer δεν υπολογίζει επίκεντρο, αλλά μπορεί να λειτουργεί παράλληλα με το Virtual Seismologist ή άλλα λογισμικά δικτυακών μεθόδων ΣΕΠΣ.



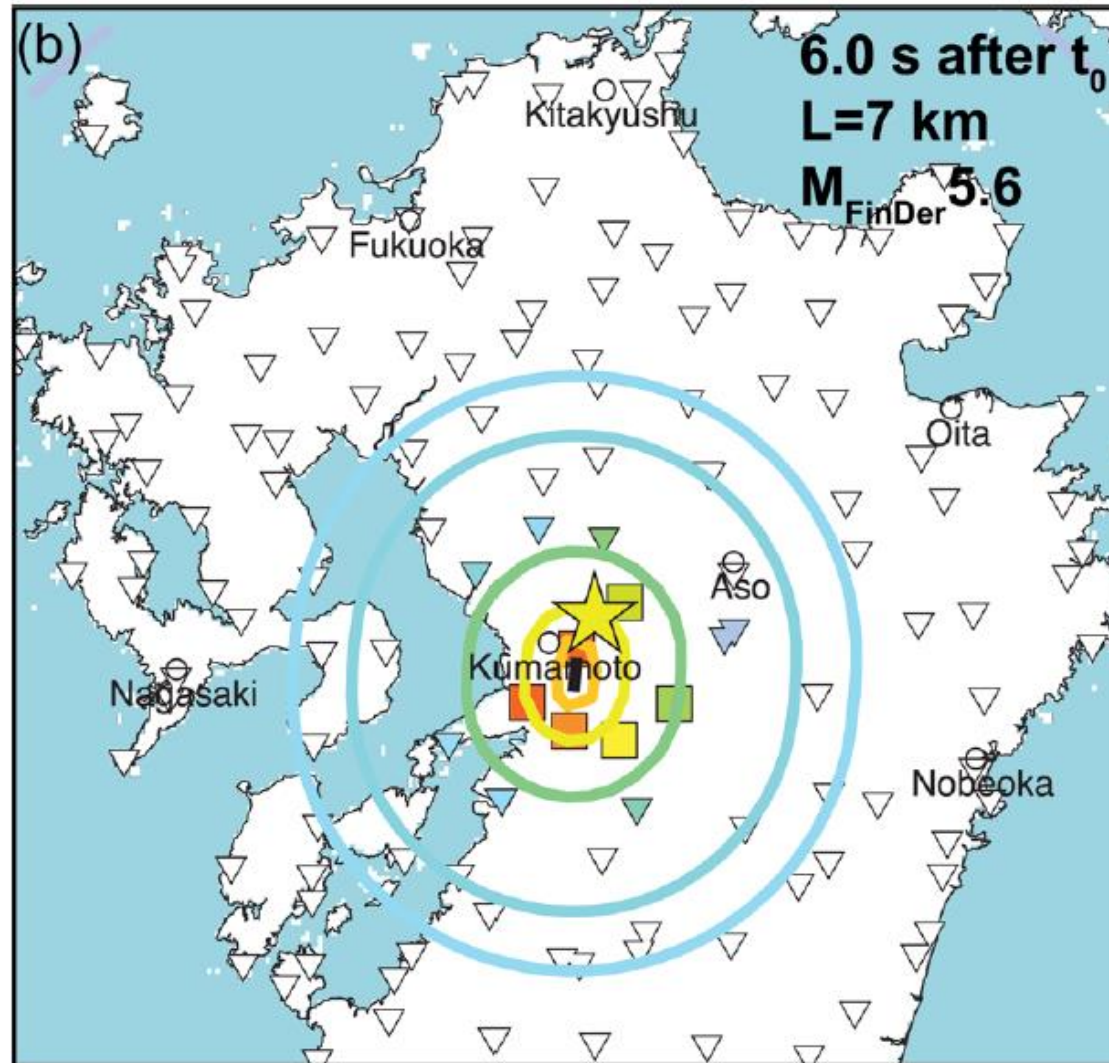
Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Παράδειγμα εφαρμογής FinDer σε αναπαραγωγή (playback) του σεισμού M7.0 στο Kumamoto το 2016.



Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Παράδειγμα εφαρμογής FinDer σε αναπαραγωγή (playback) του σεισμού M7.0 στο Kumamoto το 2016.



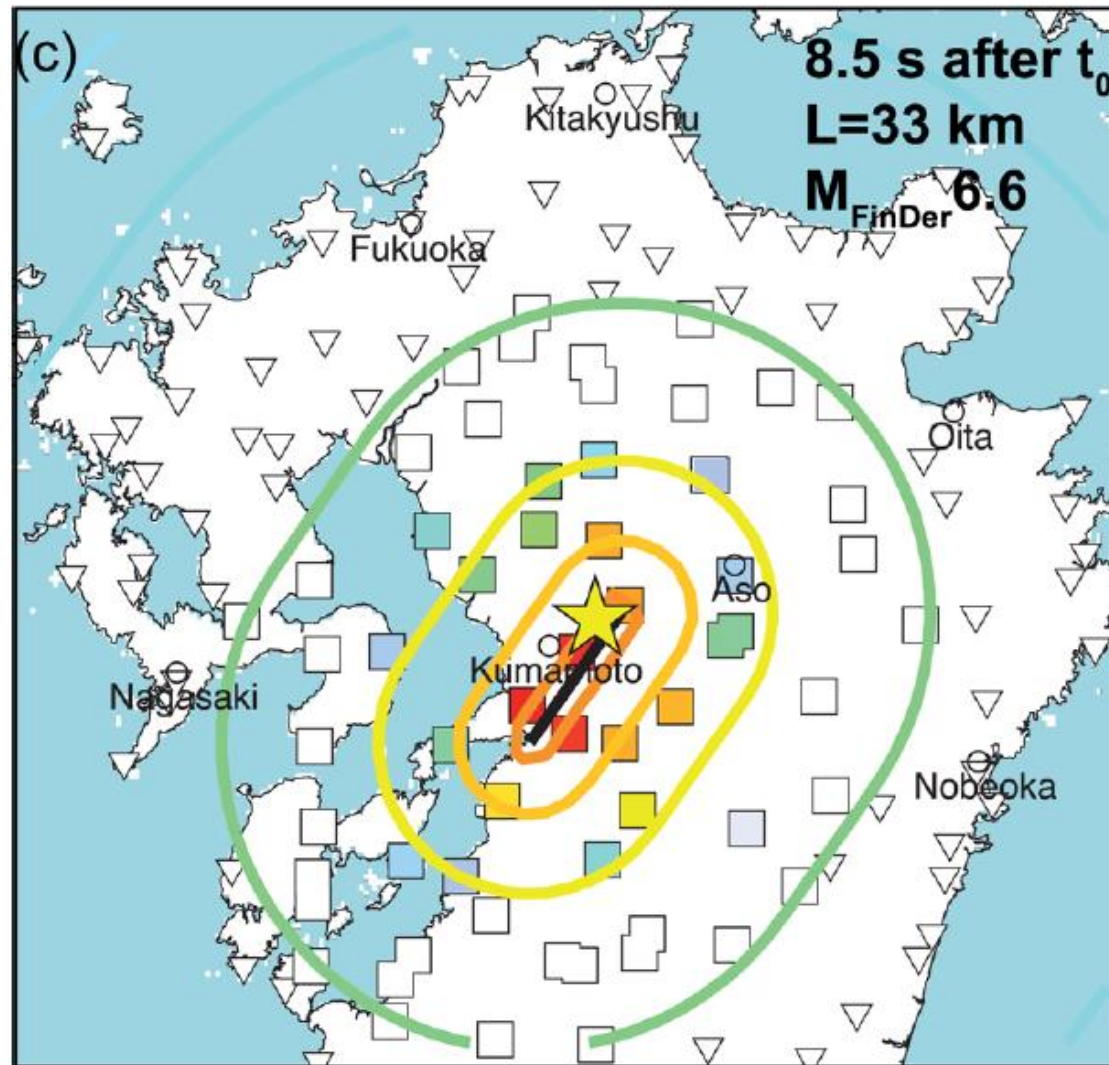
Τετράγωνα:
σταθμοί που
έχουν λάβει
ειδοποίηση για
προβλεπόμενο
 $\text{PGA} > 37 \text{ cm/s}^2$
($\text{MMI} \geq 5$) σε
οποιαδήποτε
προηγούμενη
ανανέωση της
λύσης.

Καμπύλες:
προβλεπόμενες
τιμές PGA για το
βέλτιστο γραμμικό
μοντέλο
διάρρηξης.

Μέγεθος: στο
FinDer
υπολογίζεται από
εμπειρικές σχέσεις
βάσει του μήκους
διάρρηξης.

Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Παράδειγμα εφαρμογής FinDer σε αναπαραγωγή (playback) του σεισμού M7.0 στο Kumamoto το 2016.



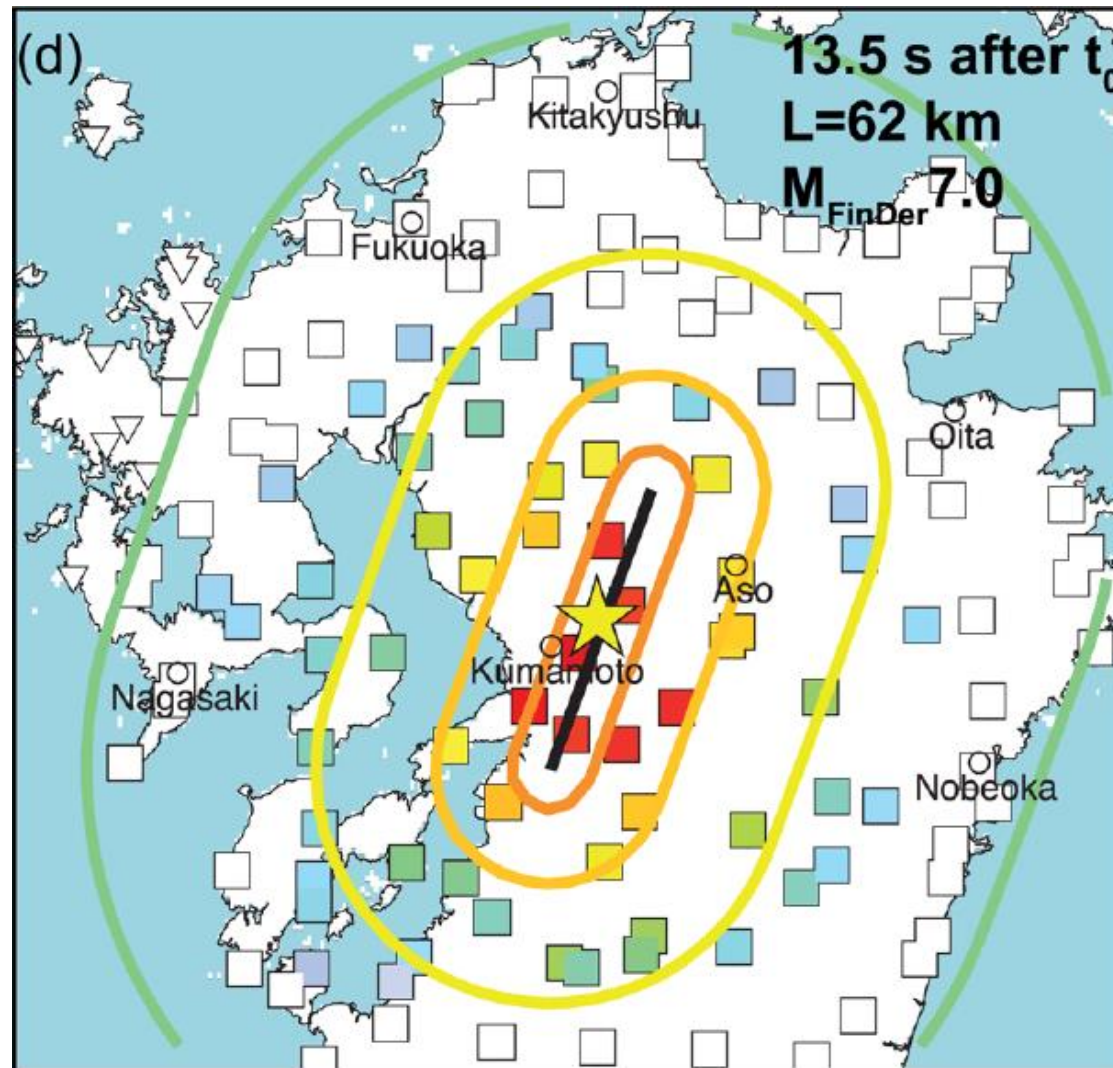
Τετράγωνα:
σταθμοί που
έχουν λάβει
ειδοποίηση για
προβλεπόμενο
 $PGA > 37 \text{ cm/s}^2$
($MMI \geq 5$) σε
οποιαδήποτε
προηγούμενη
ανανέωση της
λύσης.

Καμπύλες:
προβλεπόμενες
τιμές PGA για το
βέλτιστο γραμμικό
μοντέλο
διάρρηξης.

Μέγεθος: στο
FinDer
υπολογίζεται από
εμπειρικές σχέσεις
βάσει του μήκους
διάρρηξης.

Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Παράδειγμα εφαρμογής FinDer σε αναπαραγωγή (playback) του σεισμού M7.0 στο Kumamoto το 2016.



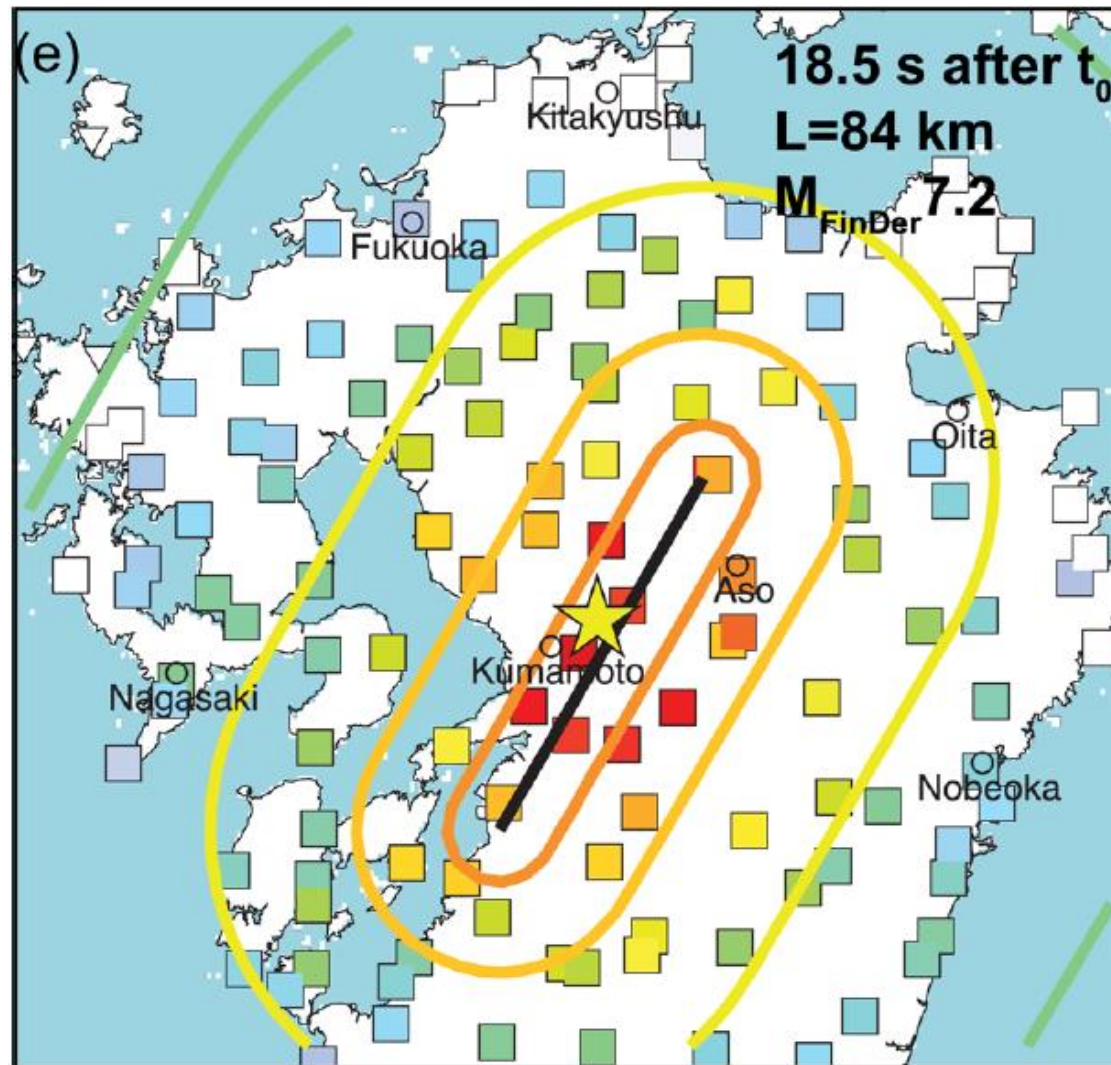
Τετράγωνα:
σταθμοί που
έχουν λάβει
ειδοποίηση για
προβλεπόμενο
 $PGA > 37 \text{ cm/s}^2$
($MMI \geq 5$) σε
οποιαδήποτε
προηγούμενη
ανανέωση της
λύσης.

Καμπύλες:
προβλεπόμενες
τιμές PGA για το
βέλτιστο γραμμικό
μοντέλο
διάρρηξης.

Μέγεθος: στο
FinDer
υπολογίζεται από
εμπειρικές σχέσεις
βάσει του μήκους
διάρρηξης.

Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Παράδειγμα εφαρμογής FinDer σε αναπαραγωγή (playback) του σεισμού M7.0 στο Kumamoto το 2016.



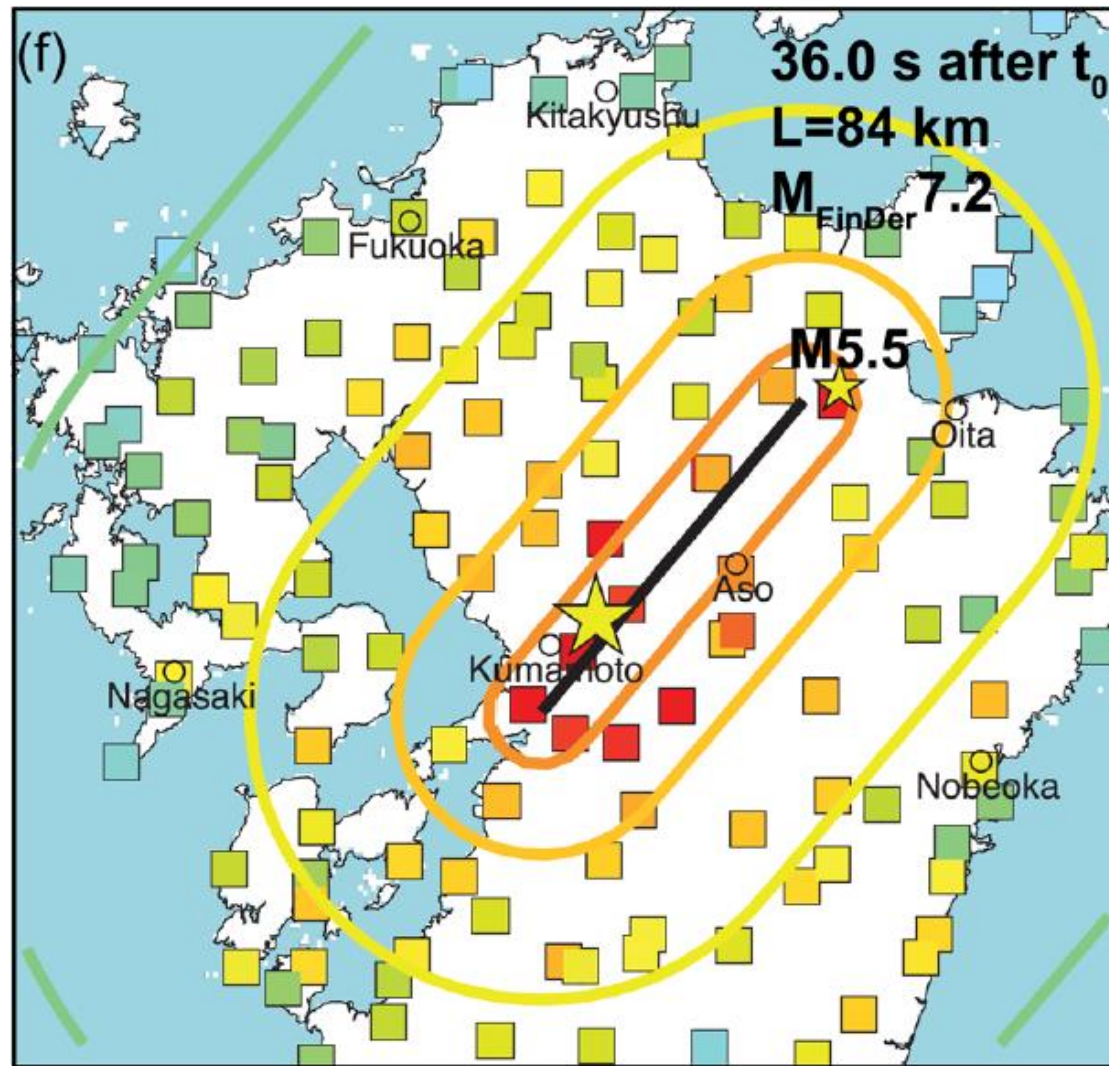
Τετράγωνα:
σταθμοί που
έχουν λάβει
ειδοποίηση για
προβλεπόμενο
 $PGA > 37 \text{ cm/s}^2$
($MMI \geq 5$) σε
οποιαδήποτε
προηγούμενη
ανανέωση της
λύσης.

Καμπύλες:
προβλεπόμενες
τιμές PGA για το
βέλτιστο γραμμικό
μοντέλο
διάρρηξης.

Μέγεθος: στο
FinDer
υπολογίζεται από
εμπειρικές σχέσεις
βάσει του μήκους
διάρρηξης.

Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Παράδειγμα εφαρμογής FinDer σε αναπαραγωγή (playback) του σεισμού M7.0 στο Kumamoto το 2016.



Τετράγωνα:
σταθμοί που
έχουν λάβει
ειδοποίηση για
προβλεπόμενο
 $\text{PGA} > 37 \text{ cm/s}^2$
($\text{MMI} \geq 5$) σε
οποιαδήποτε
προηγούμενη
ανανέωση της
λύσης.

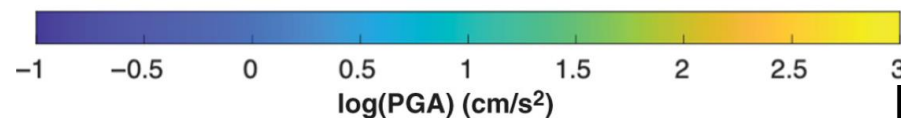
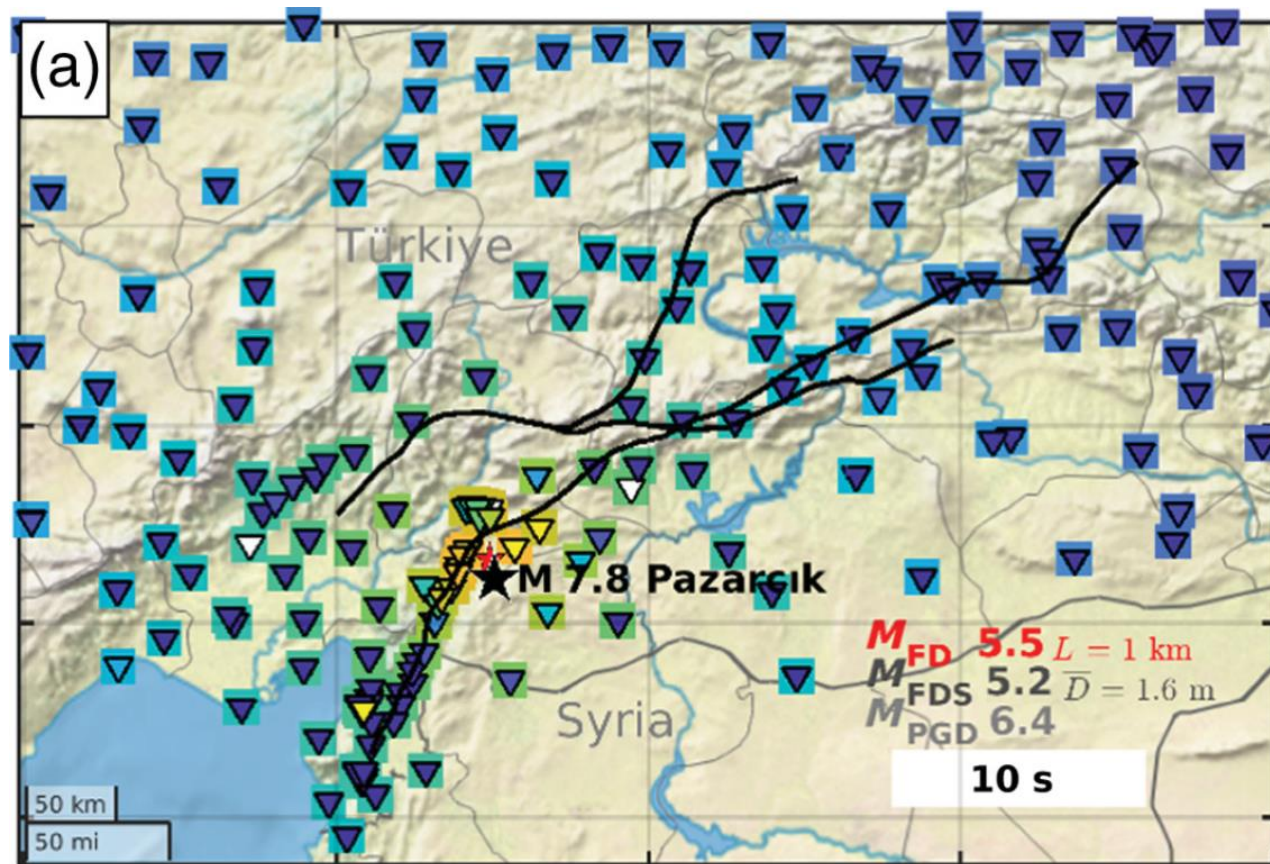
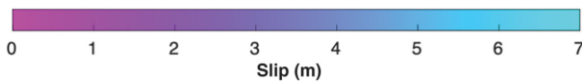
Καμπύλες:
προβλεπόμενες
τιμές PGA για το
βέλτιστο γραμμικό
μοντέλο
διάρρηξης.

Μέγεθος: στο
FinDer
υπολογίζεται από
εμπειρικές σχέσεις
βάσει του μήκους
διάρρηξης.

Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Η έκδοση v3 του FinDer, εκτός από απλά μοντέλα γραμμικών πηγών, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πρότυπα για ειδικά σενάρια με περίπλοκες γεωμετρίες ρηγμάτων (π.χ., αλλαγή διεύθυνσης ρήγματος, ζώνες υποβύθισης).

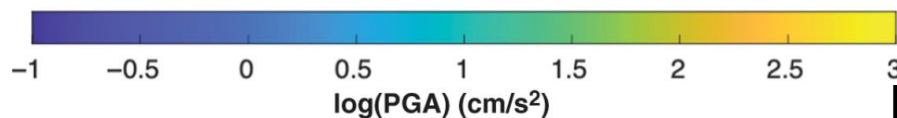
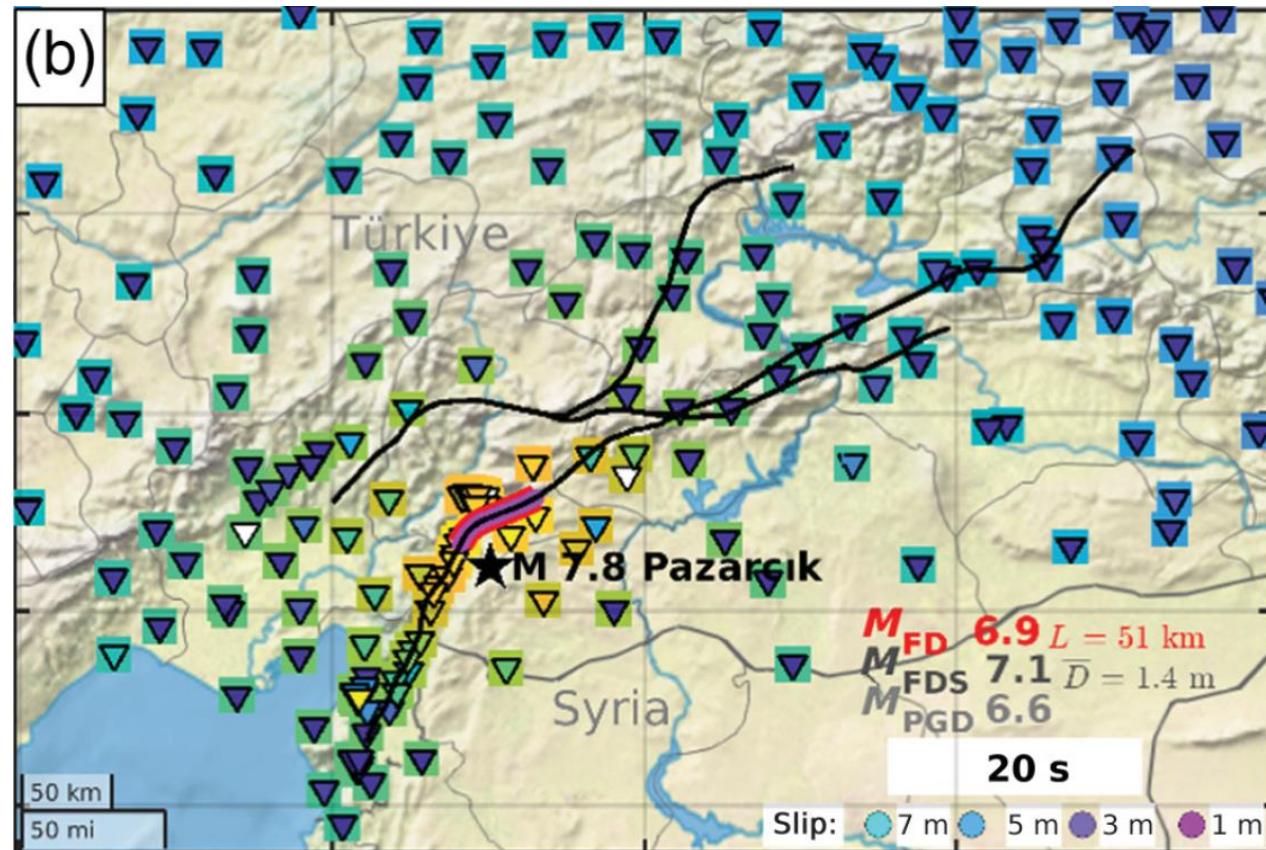
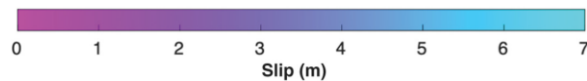
- Παράδειγμα εφαρμογής του FinDer v3 στον σεισμό Mw 7.8 του Kahramanmaraş (σύνορα Τουρκίας-Συρίας) στις 6 Φεβρουαρίου 2023 (μέσω αναπαραγωγής).
- Η επέκταση FinDerS μπορεί επιπλέον να υπολογίσει και χωρικά μεταβαλλόμενο μοντέλο ολίσθησης.



Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Η έκδοση v3 του FinDer, εκτός από απλά μοντέλα γραμμικών πηγών, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πρότυπα για ειδικά σενάρια με περίπλοκες γεωμετρίες ρηγμάτων (π.χ., αλλαγή διεύθυνσης ρήγματος, ζώνες υποβύθισης).

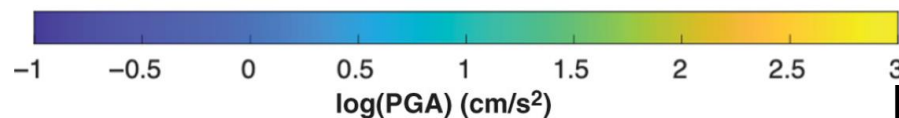
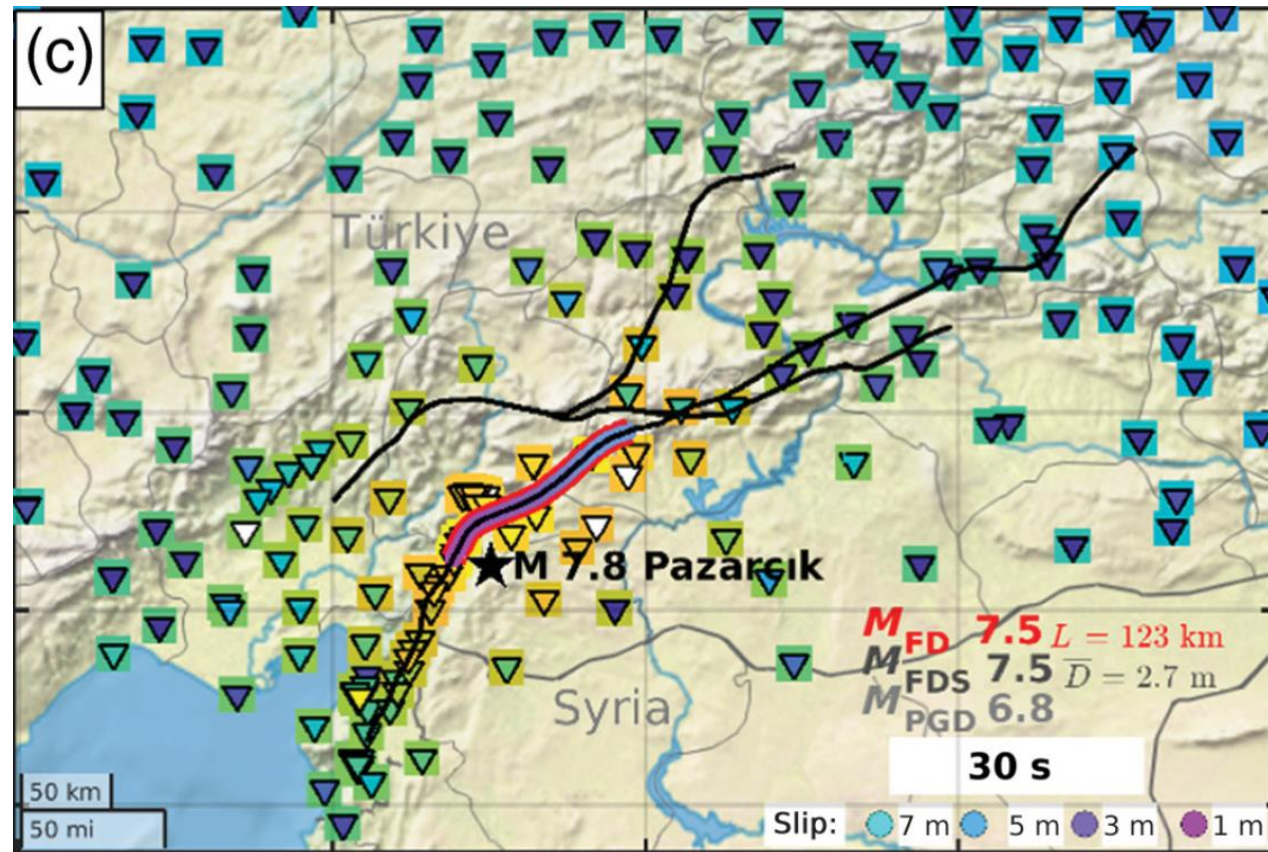
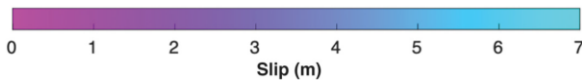
- Παράδειγμα εφαρμογής του FinDer v3 στον σεισμό Mw 7.8 του Kahramanmaraş (σύνορα Τουρκίας-Συρίας) στις 6 Φεβρουαρίου 2023 (μέσω αναπαραγωγής).
- Η επέκταση FinDerS μπορεί επιπλέον να υπολογίσει και χωρικά μεταβαλλόμενο μοντέλο ολίσθησης.



Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Η έκδοση v3 του FinDer, εκτός από απλά μοντέλα γραμμικών πηγών, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πρότυπα για ειδικά σενάρια με περίπλοκες γεωμετρίες ρηγμάτων (π.χ., αλλαγή διεύθυνσης ρήγματος, ζώνες υποβύθισης).

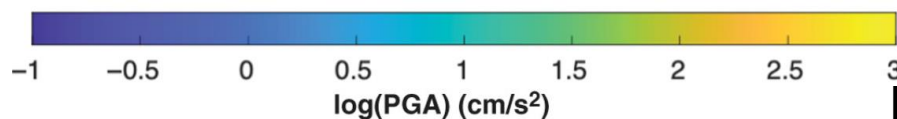
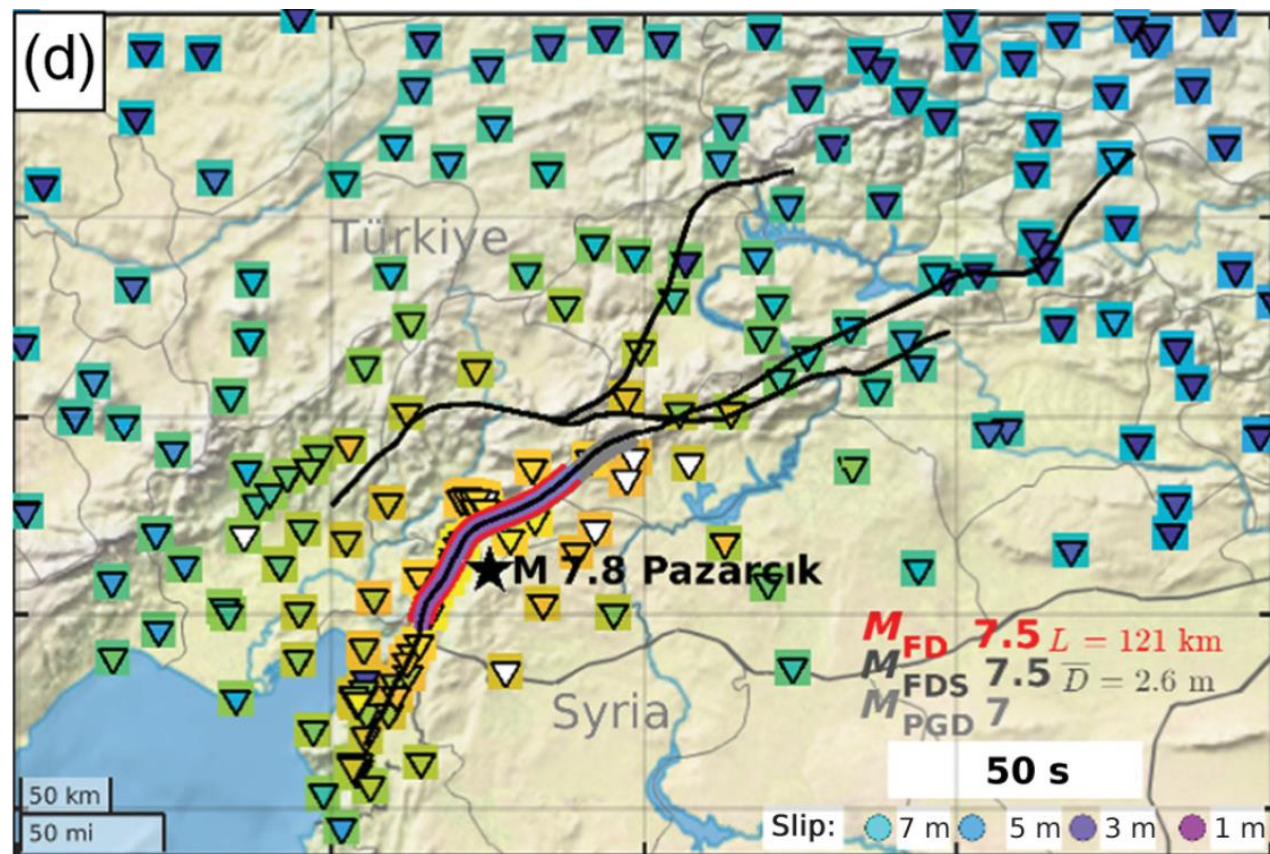
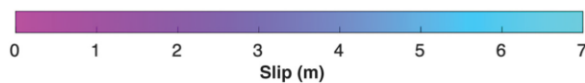
- Παράδειγμα εφαρμογής του FinDer v3 στον σεισμό Mw 7.8 του Kahramanmaras (σύνορα Τουρκίας-Συρίας) στις 6 Φεβρουαρίου 2023 (μέσω αναπαραγωγής).
- Η επέκταση FinDerS μπορεί επιπλέον να υπολογίσει και χωρικά μεταβαλλόμενο μοντέλο ολίσθησης.



Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Η έκδοση v3 του FinDer, εκτός από απλά μοντέλα γραμμικών πηγών, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πρότυπα για ειδικά σενάρια με περίπλοκες γεωμετρίες ρηγμάτων (π.χ., αλλαγή διεύθυνσης ρήγματος, ζώνες υποβύθισης).

- Παράδειγμα εφαρμογής του FinDer v3 στον σεισμό Mw 7.8 του Kahramanmaras (σύνορα Τουρκίας-Συρίας) στις 6 Φεβρουαρίου 2023 (μέσω αναπαραγωγής).
- Η επέκταση FinDerS μπορεί επιπλέον να υπολογίσει και χωρικά μεταβαλλόμενο μοντέλο ολίσθησης.

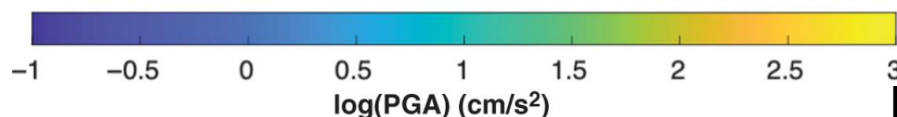
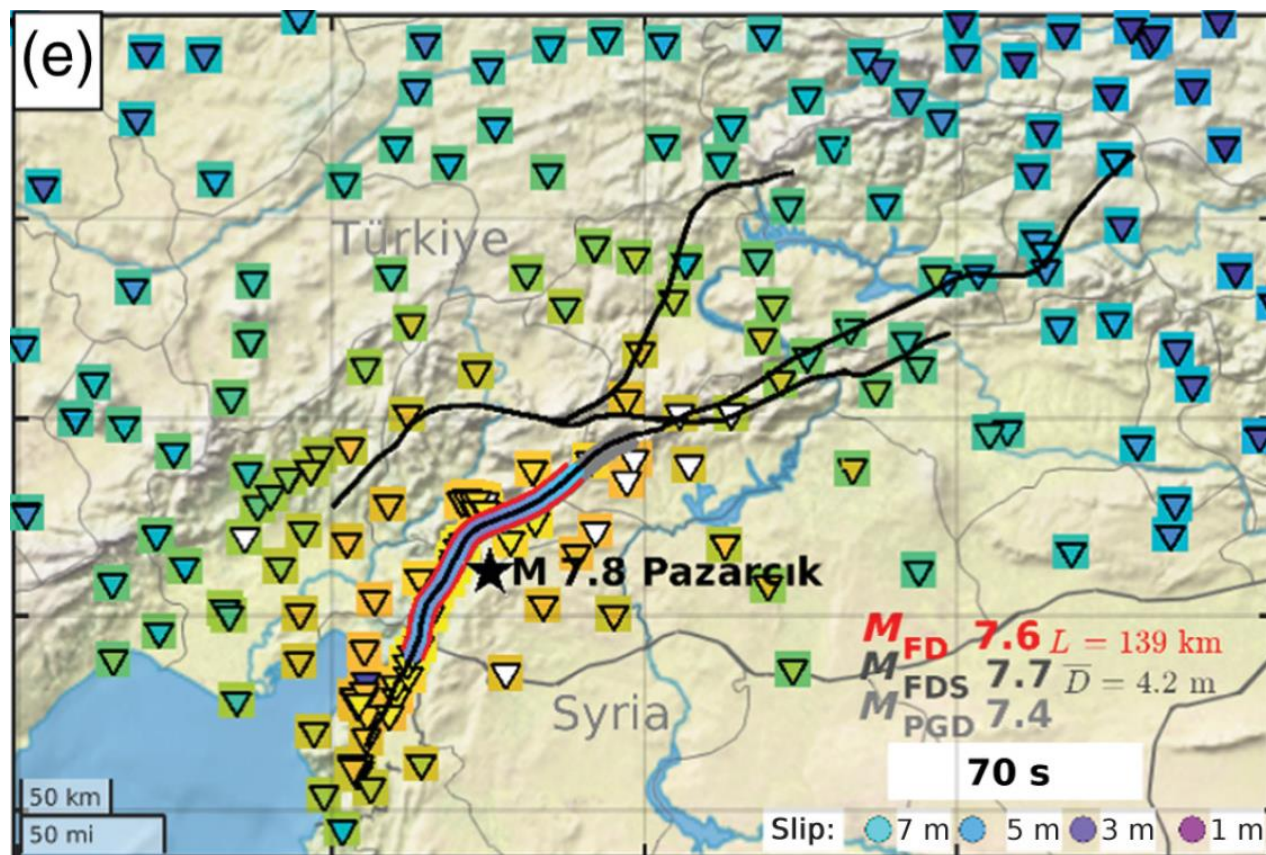
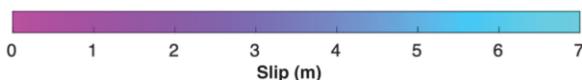


Bose et al. (2024)

Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

- Η έκδοση v3 του FinDer, εκτός από απλά μοντέλα γραμμικών πηγών, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πρότυπα για ειδικά σενάρια με περίπλοκες γεωμετρίες ρηγμάτων (π.χ., αλλαγή διεύθυνσης ρήγματος, ζώνες υποβύθισης).

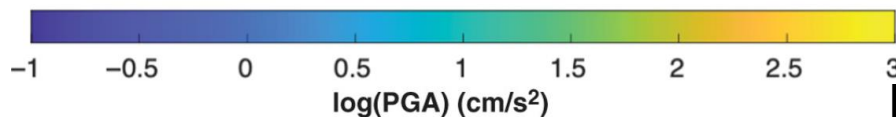
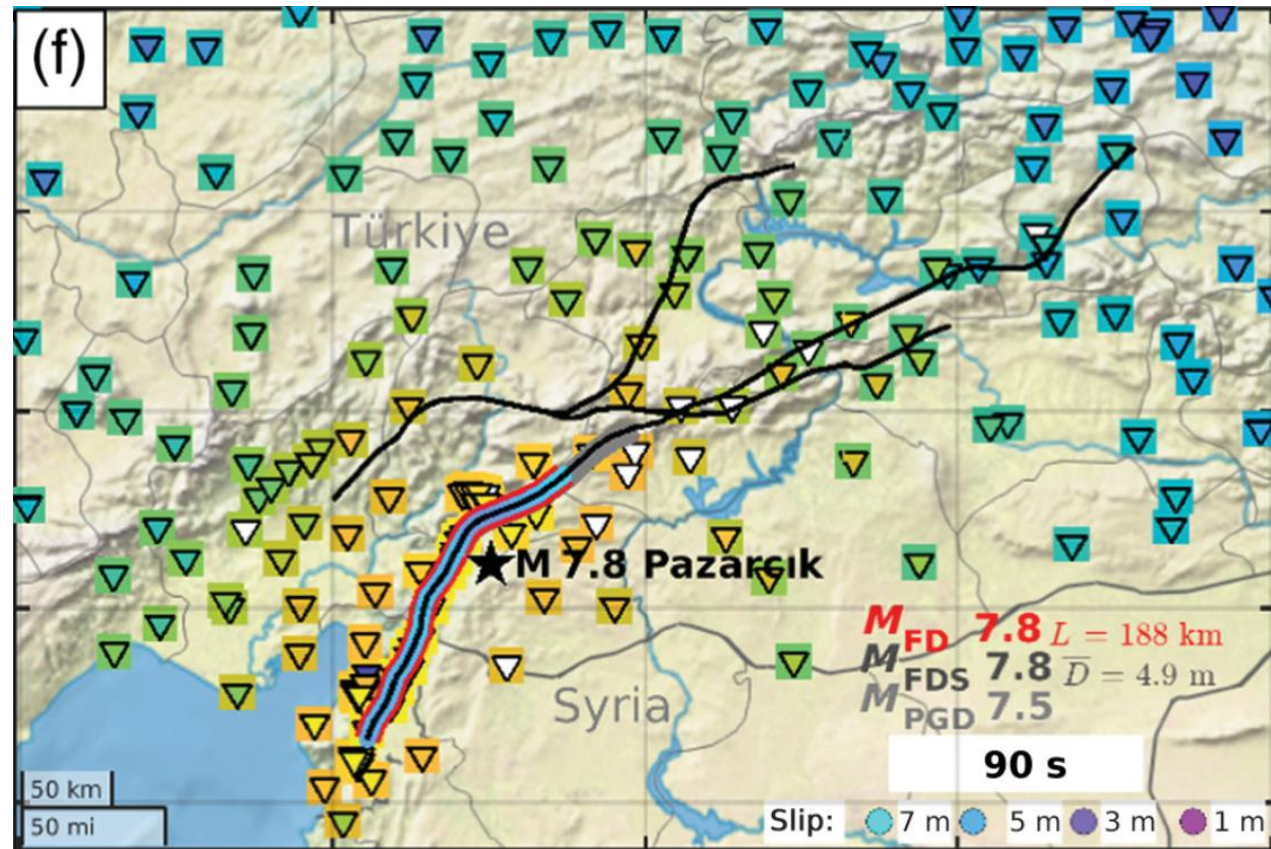
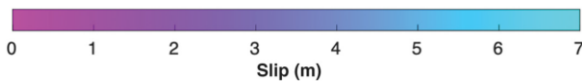
- Παράδειγμα εφαρμογής του FinDer v3 στον σεισμό Mw 7.8 του Kahramanmaras (σύνορα Τουρκίας-Συρίας) στις 6 Φεβρουαρίου 2023 (μέσω αναπαραγωγής).
- Η επέκταση FinDerS μπορεί επιπλέον να υπολογίσει και χωρικά μεταβαλλόμενο μοντέλο ολίσθησης.



Ταχύς προσδιορισμός μοντέλου πεπερασμένου ρήγματος

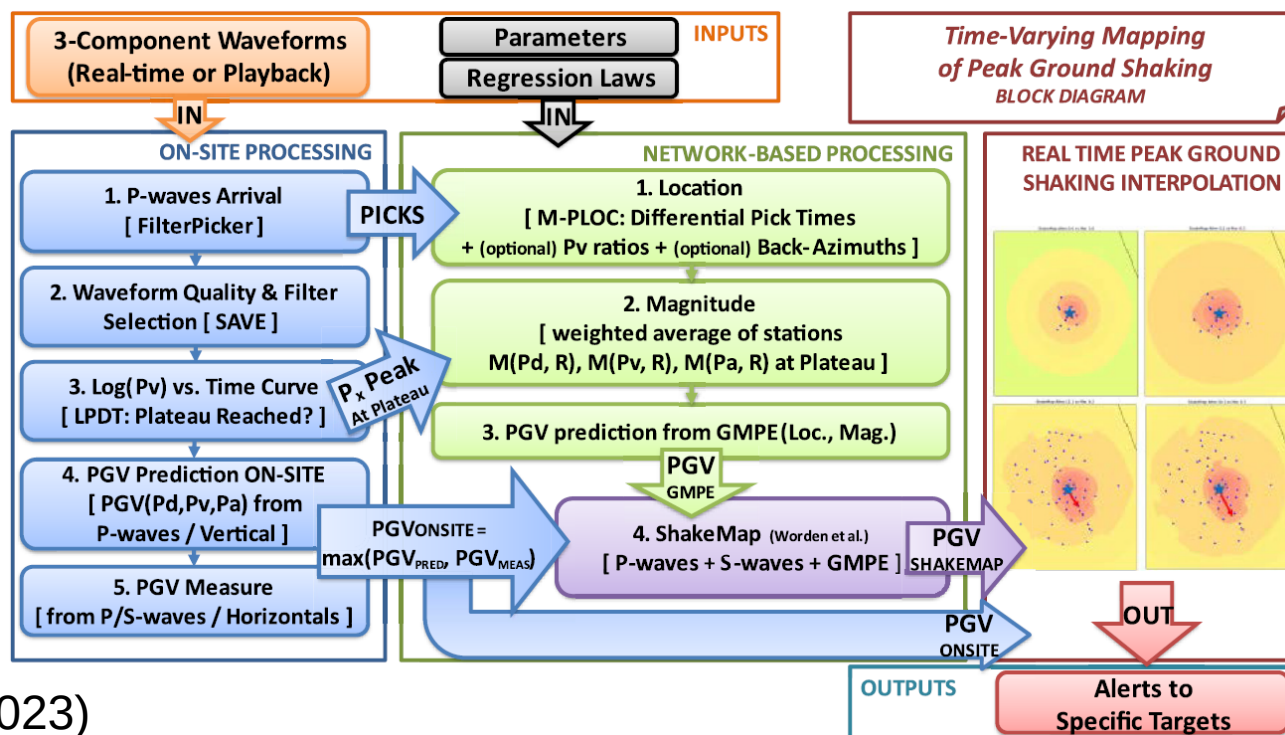
- Η έκδοση v3 του FinDer, εκτός από απλά μοντέλα γραμμικών πηγών, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει πρότυπα για ειδικά σενάρια με περίπλοκες γεωμετρίες ρηγμάτων (π.χ., αλλαγή διεύθυνσης ρήγματος, ζώνες υποβύθισης).

- Παράδειγμα εφαρμογής του FinDer v3 στον σεισμό Mw 7.8 του Kahramanmaraş (σύνορα Τουρκίας-Συρίας) στις 6 Φεβρουαρίου 2023 (μέσω αναπαραγωγής).
- Η επέκταση FinDerS μπορεί επιπλέον να υπολογίσει και χωρικά μεταβαλλόμενο μοντέλο ολίσθησης.



Υβριδικές μέθοδοι ΣΕΠΣ

- Υπάρχουν μέθοδοι ΣΕΠΣ οι οποίες συνδυάζουν τόσο επιτόπιες τεχνικές, για την ταχύτερη δυνατή εκτίμηση μεγέθους και μέγιστης εδαφικής κίνησης, όσο και δικτυακές τεχνικές, για τη βέλτιστη εκτίμηση των εστιακών παραμέτρων σε δεύτερο χρόνο.
- Ένα νέο λογισμικό που εφαρμόζει υβριδικές μεθόδους είναι το **QuakeUp**, το οποίο αποτελεί μετεξέλιξη του λογισμικού PRESTO.
- Το QuakeUp εστιάζει στην ταχεία δημιουργία χαρτών σεισμικής έντασης (ή ζωνών δυνητικής βλάβης / *potential damage zone*, PDZ), και μπορεί να εκτιμήσει τον αντίκτυπο (impact) μεγάλων σεισμών (διαρρήξεις πεπερασμένων διαστάσεων) κατά την εξέλιξή τους.
- Επιπλέον, το QuakeUp κάνει πολυπαραμετρικές μετρήσεις για πιθανολογική εκτίμηση σεισμικών παραμέτρων: διαφορικούς χρόνους άφιξης, λόγους πλατών, και οπισθοαζιμούθιο της πόλωσης των κυμάτων P.



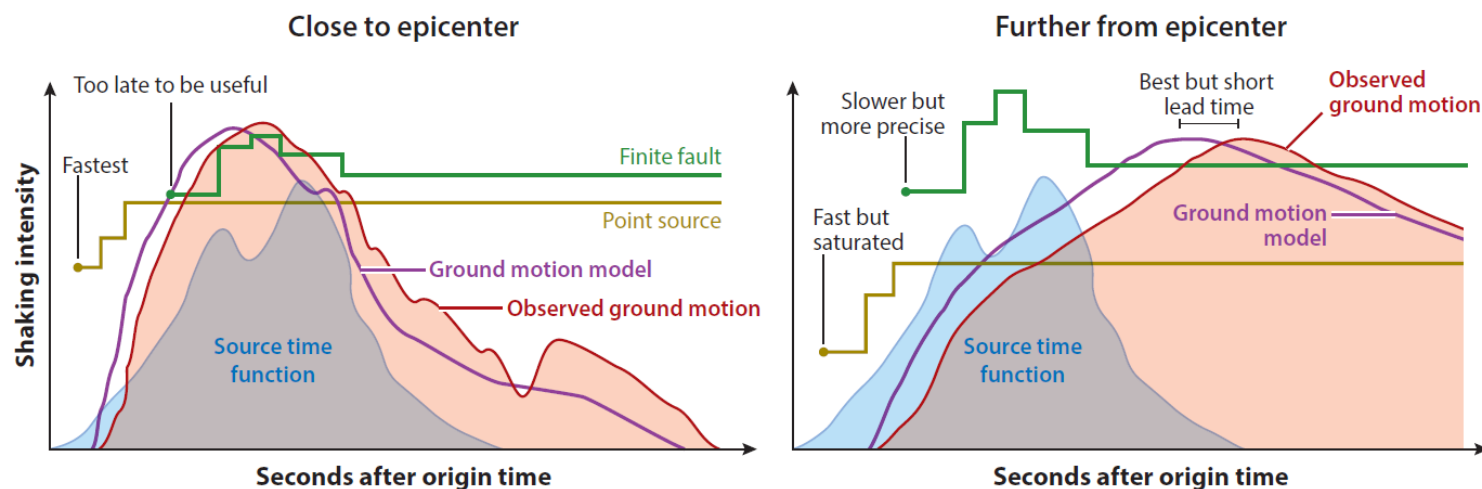
Συμβιβασμός ακρίβειας / ταχύτητας ΣΕΠΣ

Μικρές αποστάσεις από επίκεντρο/προβολή διάρρηξης στην επιφάνεια:

- Οι μεγαλύτερες βλάβες από σεισμούς συνδέονται με την εγγύτητα στο επίκεντρο / σεισμογόνο ρήγμα που υπέστη διάρρηξη. Συνεπώς ένα ΣΕΠΣ θα ήταν πολύ χρήσιμο.
- Ωστόσο, πολύ κοντά στο επίκεντρο, οι χρόνοι ειδοποίησης είναι από ελάχιστοι μέχρι μηδενικοί (εντός της «τυφλής ζώνης»).
- Προκειμένου να βελτιωθεί η έγκαιρη προειδοποίηση κοντά στο επίκεντρο πρέπει να χρησιμοποιηθούν τα ελάχιστα δυνατά δεδομένα (π.χ., σεισμικές αφίξεις σε 1 έως 3 πλησιέστερους σταθμούς). Ωστόσο, με αυτόν τον τρόπο χειροτερεύει η ποιότητα της λύσης ως προς το μέγεθος και το υπόκεντρο.

Μεγάλες αποστάσεις από επίκεντρο/προβολή διάρρηξης στην επιφάνεια:

- Όσο πιο μακριά βρίσκεται μια τοποθεσία-στόχος, τόσο μεγαλύτερο χρόνο έγκαιρης προειδοποίησης σεισμού μπορεί να έχει.
- Αντίστοιχα, υπάρχει περιθώριο για χρήση πολλών σταθμών ώστε να περιοριστεί καλύτερα η λύση.
- Ωστόσο, σε πολύ μακρινές αποστάσεις, οι αναμενόμενες βλάβες είναι χαμηλές έως μηδενικές. Συνεπώς, σε τέτοιες αποστάσεις ελαττώνεται η ανάγκη εφαρμογής ενός ΣΕΠΣ.



Συμβιβασμός ακρίβειας / ταχύτητας ΣΕΠΣ

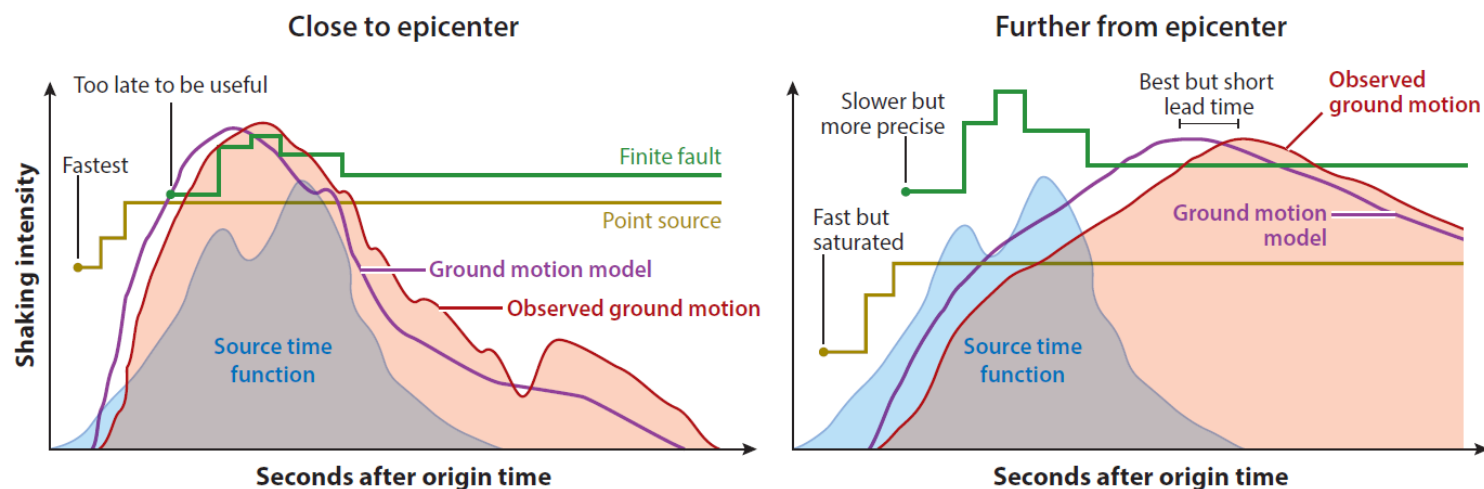
Εξαίρεση:

Για πολύ μεγάλους σεισμούς, έχει έννοια η έγκαιρη προειδοποίηση ακόμα και σε μεγάλες (περιφερειακές) αποστάσεις, καθώς οι εντάσεις μπορούν να φτάσουν και να ξεπεράσουν το $I=V$.

Table 1 Approximate estimates of relevant distances and times for earthquake early warning applications

Magnitude	Approximate fault length	Approximate distance from fault where $MMI \geq V$	Maximum epicentral distance where $MMI V$ is expected	S-wave arrival time at maximum distance where $MMI V$ is expected	Approximate end of peak shaking
M5	1 km	8 km	10 km	4 s	10 s
M6	6 km	30 km	40 km	10 s	20 s
M7	50 km	100 km	200 km	40 s	60 s
M8 (crustal)	400 km	300 km	700 km	200 s	300 s
M9 (subduction)	1,000 km	400 km	1,000 km	300 s	600 s

All numbers are one significant figure and are intended to give outer bounds to the time-space region where $MMI \geq V$ may occur. Abbreviation: MMI, Modified Mercalli Intensity.

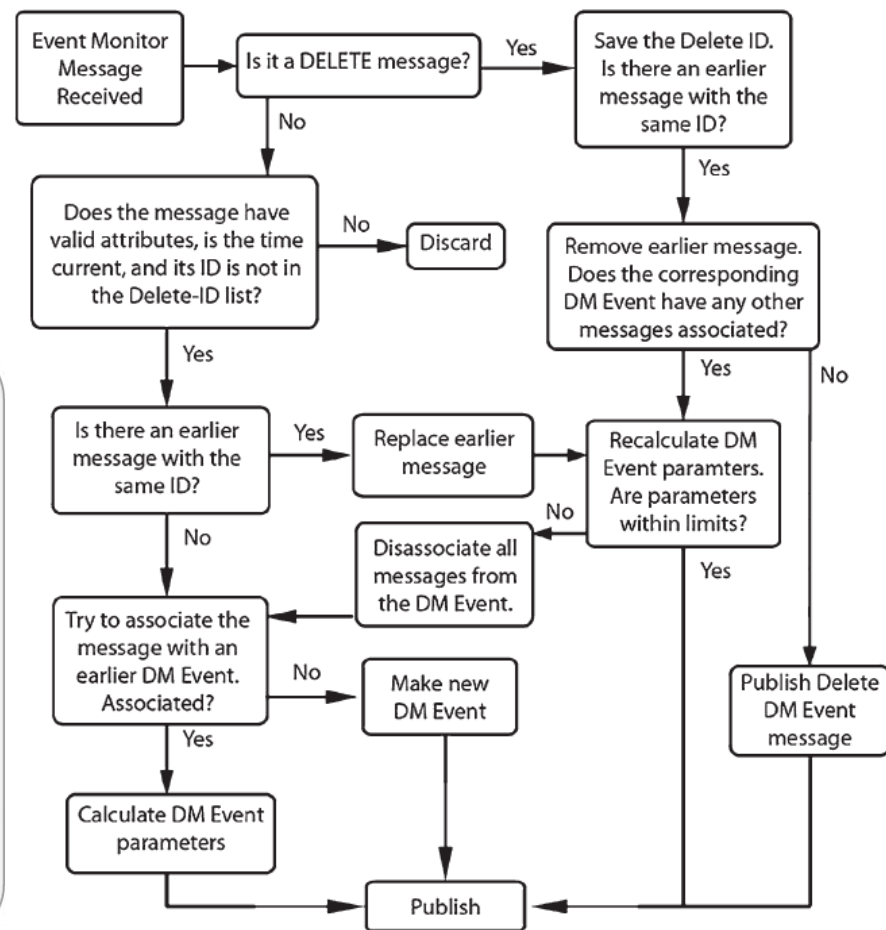
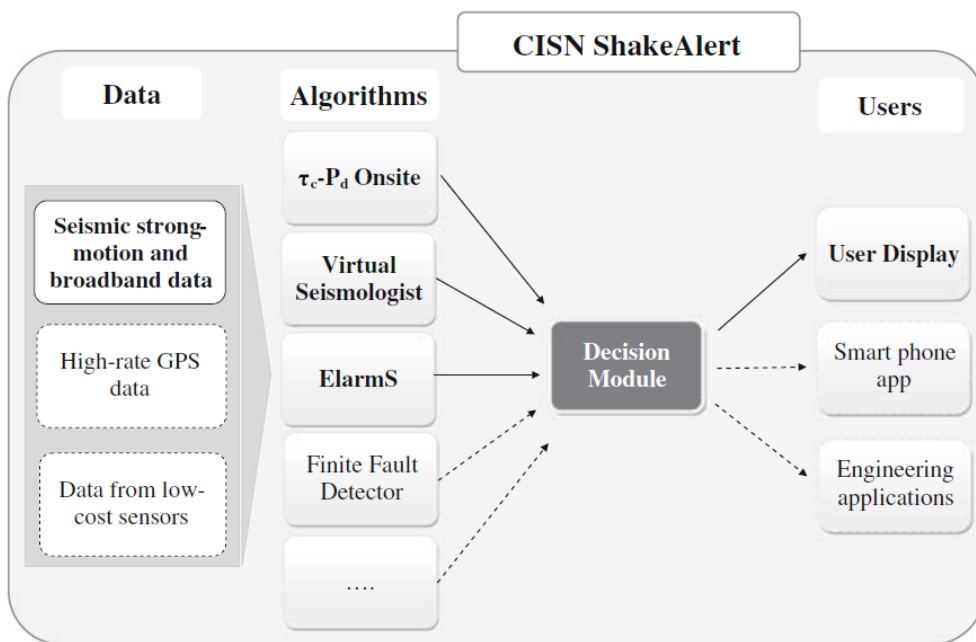


Δομοστοιχείο απόφασης (*decision module*)

- Προκειμένου να εφαρμοστεί επιχειρησιακά ένα ΣΕΠΣ, είναι απαραίτητο να εξασφαλιστούν ορισμένες προϋποθέσεις:
 - Αυξημένο ποσοστό επιτυχών ειδοποιήσεων / μείωση εσφαλμένων συναγερμών
 - Μειωμένο ποσοστό αποτυχίας ειδοποίησης
 - Λήψη «απόφασης» για τις δράσεις περιορισμού του σεισμικού κινδύνου, με βάση όλη τη διαθέσιμη πληροφορία, αν και εφόσον κρίνεται απαραίτητο.
- Είναι απαραίτητο να γίνει ένας συνδυασμός:
 - Της διαθέσιμης πληροφορίας από όλα τα ενεργά συστήματα έγκαιρης προειδοποίησης (δικτυακά, επιτόπια, διαφορετικοί αλγόριθμοι, κτλ).
 - Της πιθανότητας (ή πιθανοφάνειας, *likelihood*) που δίνει το κάθε λογισμικό να έχει συμβεί ένας ισχυρός σεισμός.
 - Της πιθανότητας ο σεισμός αυτός να προκαλέσει υψηλά μέτρα έντασης σε τοποθεσίες-στόχους ενδιαφέροντος.
 - Ανάλογα με τα παραπάνω να τεθεί ένα ορισμένο επίπεδο συναγερμού και να παρθούν μέτρα περιορισμού του σεισμικού κινδύνου.

Δομοστοιχείο απόφασης (decision module)

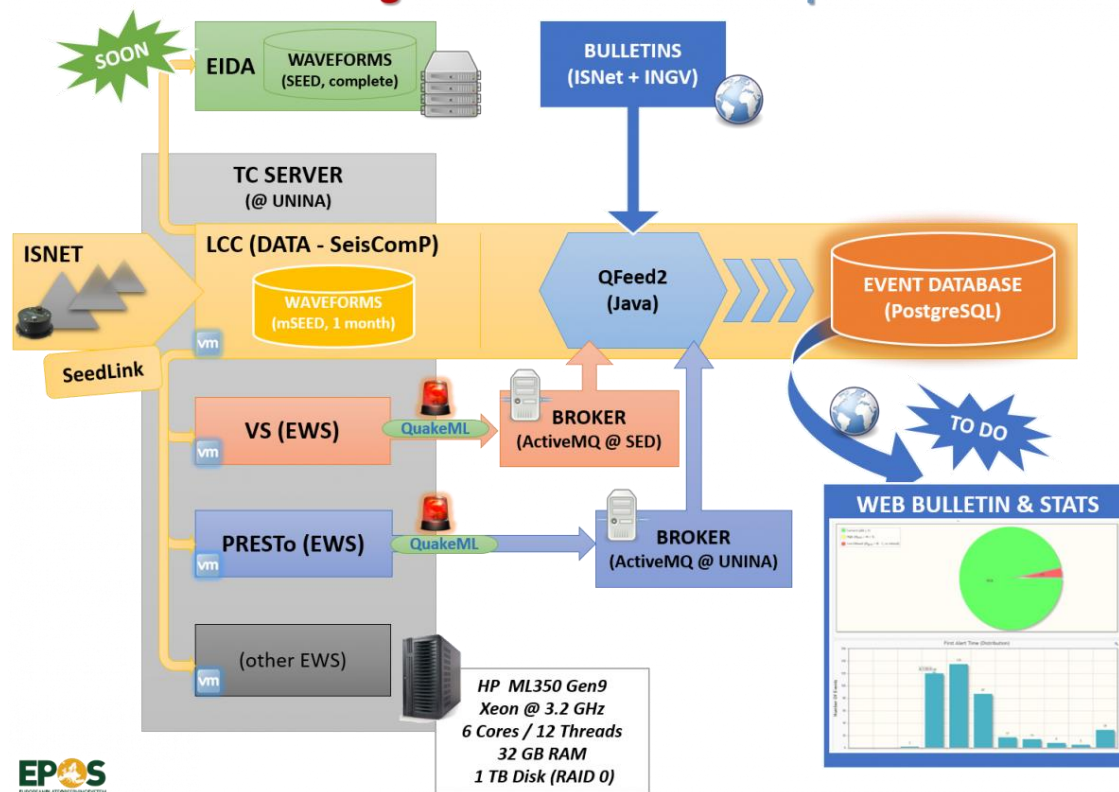
- Παράδειγμα ροής εργασιών του δομοστοιχείου απόφασης που χρησιμοποιείται στο ΣΕΠΣ ShakeAlert (California Integrated Seismic Network, CISEN)



CREW

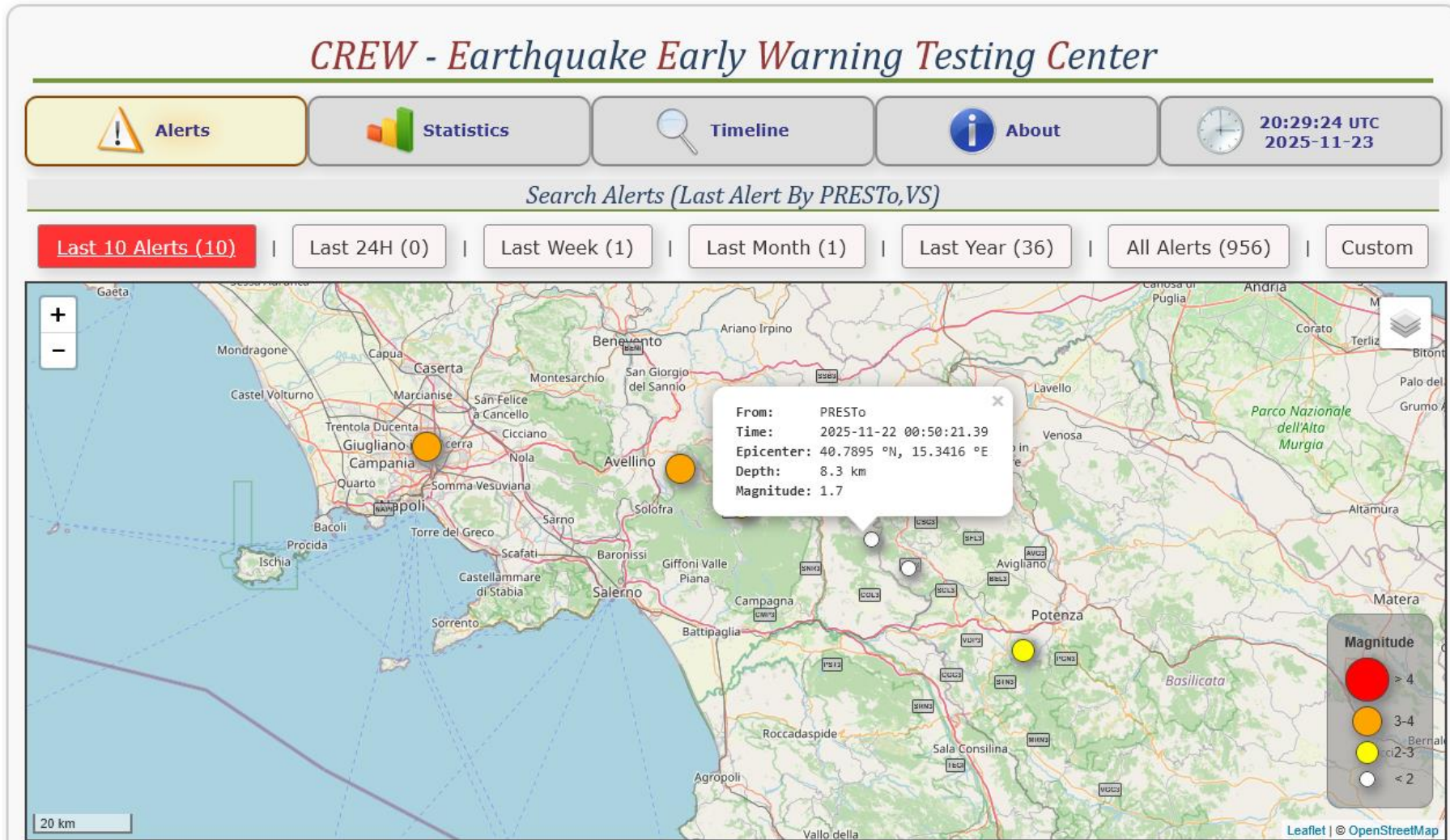
- Για τις δοκιμές με διαφορετικά ΣΕΠΣ, γίνεται σύγκριση των κοινών τους αποτελεσμάτων καθώς και σύγκριση με σεισμικούς καταλόγους από ινστιτούτα (και για περιπτώσεις αποτυχίας ανίχνευσης σεισμού).
- Μία από τις πλατφόρμες δοκιμής ΣΕΠΣ είναι το CREW (*EU Testing Center for Early Warning & Source Characterization*), που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο του EPOS, κατά βάση για τα παρατηρητήρια εγγύς-πεδίου ρηγμάτων (Near Fault Observatories, NFO).

EW Testing Center – Current Components



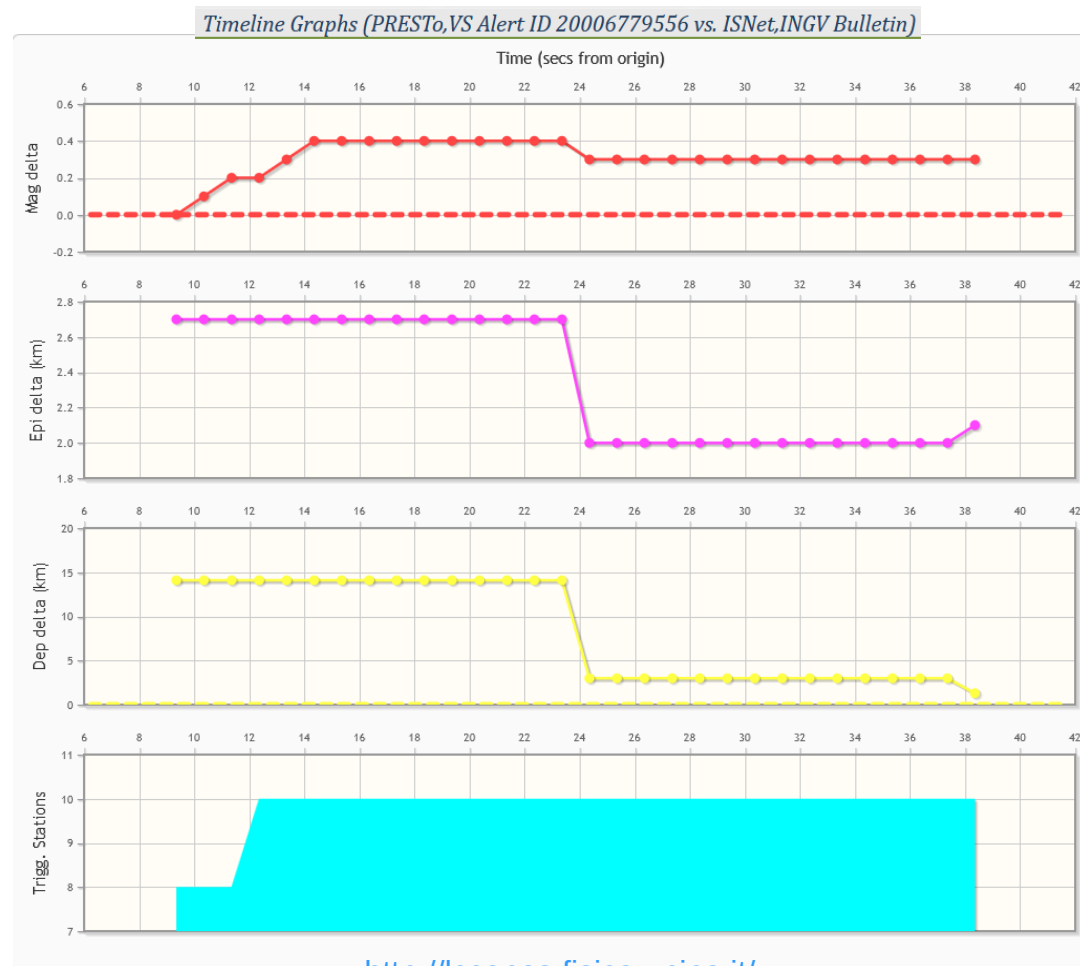
CREW – IRPINIA NFO

- Εφαρμογή της πλατφόρμας CREW στο Irpinia NFO (σύγκριση PRESTo / VS / καταλόγου ISNet ή INGV): <http://lccepos.fisica.unina.it/>



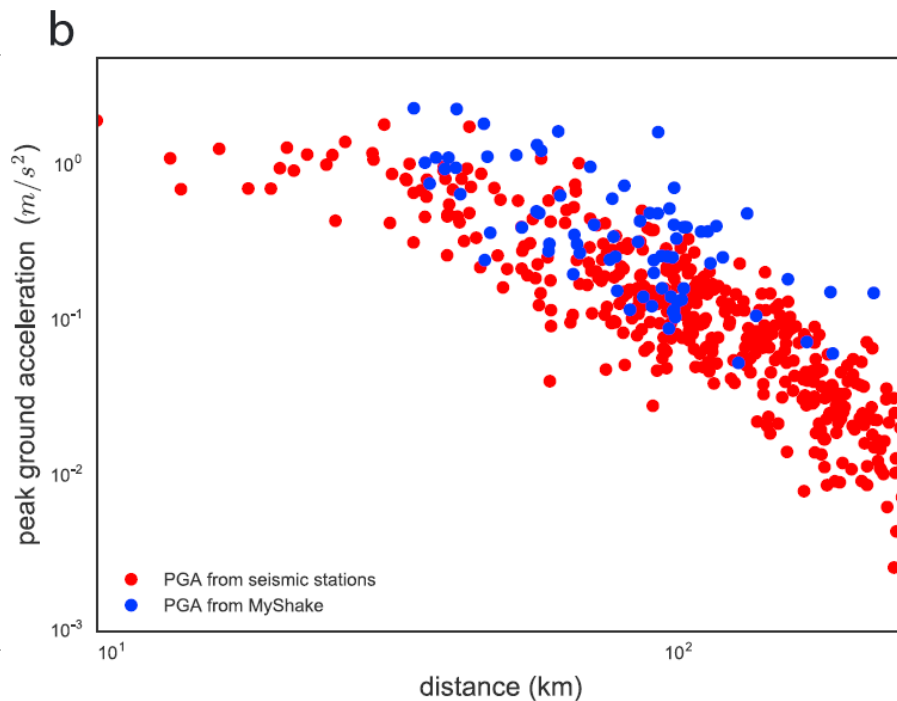
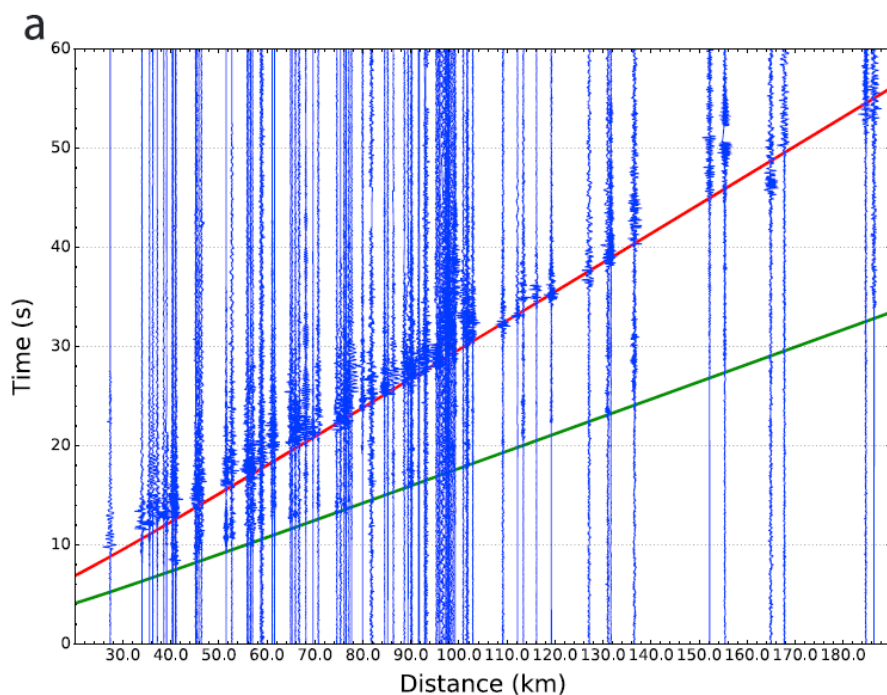
CREW – IRPINIA NFO

- Στην πλατφόρμα CREW γίνονται συγκρίσεις ανάμεσα στα αποτελέσματα των ΣΕΠΣ (λύσεις 1^{ης} ειδοποίησης και τελευταίας ενημέρωσης), και στις λύσεις από τον επίσημο (manual) σεισμικό κατάλογο, κυρίως ως προς τη διαφορά στο μέγεθος και στο επίκεντρο.
- Επίσης, αναφέρεται η χρονική καθυστέρηση από τον χρόνο γένεσης (βάσει επίσημου καταλόγου) μέχρι την 1^η ειδοποίηση.



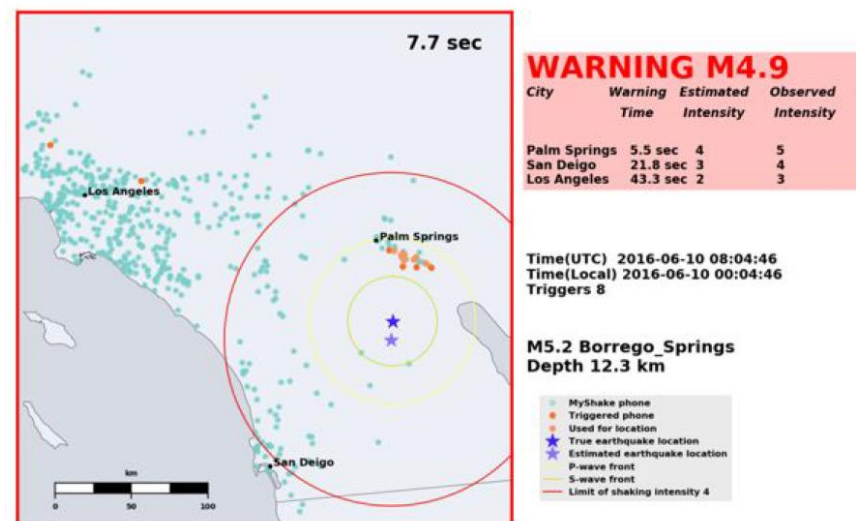
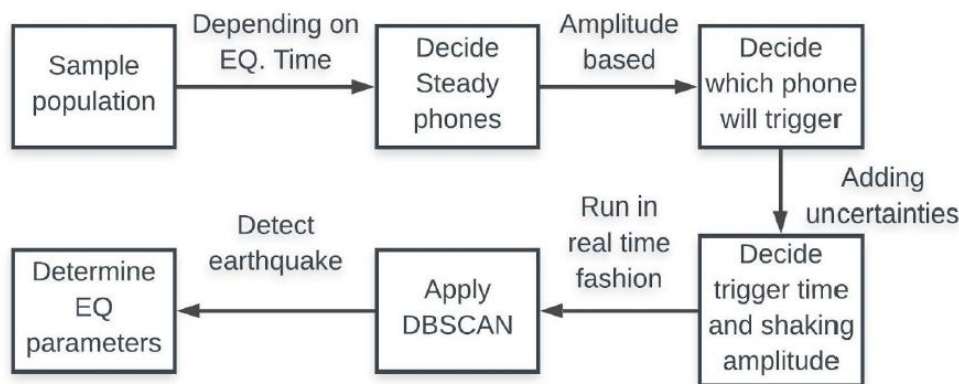
MyShake

- Με την εξάπλωση των smartphones, τα οποία διαθέτουν επιταχυνσιόμετρο MEMS και δέκτη GPS, κατασκευάστηκαν πληθοπαραγωγικά (*crowd-sourced*) ΣΕΠΣ, τα οποία χρησιμοποιούν τα smartphones ως αισθητήρες της εδαφικής κίνησης.
- Μια από αυτές τις εφαρμογές (*apps*) είναι η **MyShake**.
- Αυτά τα ΣΕΠΣ βασίζονται στη μεγάλη πυκνότητα smartphones, η οποία είναι τέτοια που υπερκαλύπτει προβλήματα αυξημένου θορύβου, μη ιδανικής σύζευξης του αισθητήρα με το έδαφος, και χαμηλής ποιότητας αισθητήρα.
- Αυτά τα συστήματα μπορούν να προσφέρουν έγκαιρη προειδοποίηση για σεισμούς σε περιοχές όπου δεν υπάρχει επαρκής κάλυψη από σεισμολογικούς σταθμούς.



MyShake

- Προκειμένου να βεβαιωθεί ότι τα αυξημένα πλάτη που καταγράφει το επιταχυνσιόμετρο δεν οφείλονται σε ανθρώπινο παράγοντα, η εφαρμογή ελέγχει αν η smart συσκευή έχει παραμείνει σταθερή για αρκετή ώρα (όπως όταν αφήνουμε το κινητό πάνω σε ένα τραπέζι) προτού αρχίσει να καταγράφει δονήσεις και να στέλνει σήμα για τυχόν αυξημένα πλάτη.
- Οι πληροφορίες κίνησης από τα smartphones συλλέγονται κεντρικά και σε περίπτωση ανίχνευσης σεισμού η ίδια η εφαρμογή λαμβάνει την έγκαιρη προειδοποίηση και ειδοποιεί τον χρήστη της συσκευής.



Επιχειρησιακές προκλήσεις

Automated Actions to Alert People



On Your
Mobile Device



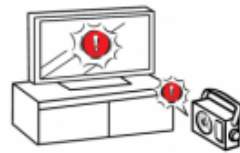
Electronic
Road Signage



Digital Billboard
on Buildings



Public
Announcements



Emergency Alerts
over TV and Radio

Automated "Machine-to-Machine" Actions



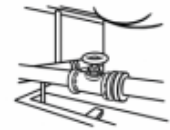
Slowing
Trains



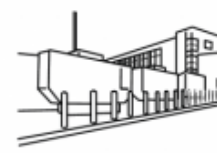
Recalling
Elevators



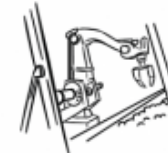
Opening
Firehouse
Doors



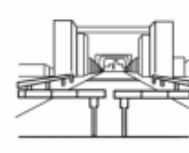
Shutting Off
Water and
Gas Valves



Activating
Generators



Parking Delicate
Machinery



Closing Bridge
Gates

- Από τη στιγμή που θα παραχθεί μια έγκαιρη προειδοποίηση σεισμού, μέσα στο διαθέσιμο χρονικό παράθυρο μέχρι την άφιξη της ισχυρής εδαφικής κίνησης σε μια τοποθεσία-στόχο, που είναι της τάξης λίγων δευτερολέπτων, μπορούν να γίνουν διάφορες δράσεις, όπως:
 - Άμεση ενημέρωση φορέων πολιτικής προστασίας για την εκδήλωση του σεισμού και για τις περιοχές όπου μπορεί να παρουσιάσουν σημαντικές βλάβες.
 - Αυτόματη εκκίνηση δράσεων περιορισμού του σεισμικού κινδύνου (*seismic risk*), όπως, π.χ.:
 - Η ειδοποίηση των πολιτών με σύστημα συναγερμού ή με ειδοποιήσεις σε κινητά τηλέφωνα,
 - Ο περιορισμός της ταχύτητας τρένων για αποφυγή εκτροχιασμού,
 - Η διακοπή ροής φυσικού αερίου για αποφυγή πυρκαγιάς,
 - Άλλες προληπτικές ενέργειες σε κρίσιμες υποδομές.

Επιχειρησιακές προκλήσεις: ειδοποιήσεις σε smart-phones

- Εφόσον ένα ΣΕΠΣ έχει δοκιμαστεί επαρκώς ως προς την εγκυρότητα και την ταχύτητά του, οι ειδοποιήσεις που εκδίδονται μπορούν να επεκταθούν στο ευρύ κοινό μέσω εφαρμογών (apps) σε κινητά και άλλες “smart” συσκευές.
- Τεχνολογίες cloud-messaging επιτρέπουν τη γρήγορη μετάδοση ειδοποιήσεων σε μεγάλο αριθμό χρηστών, όπως Firebase Cloud Messaging (FCM) για λειτουργικά Android (π.χ., Colombelli et al., 2020) ή Apple Push Notification service (APNs) για λειτουργικά iOS.



Εφαρμογή MyEEW (Καλιφόρνια)



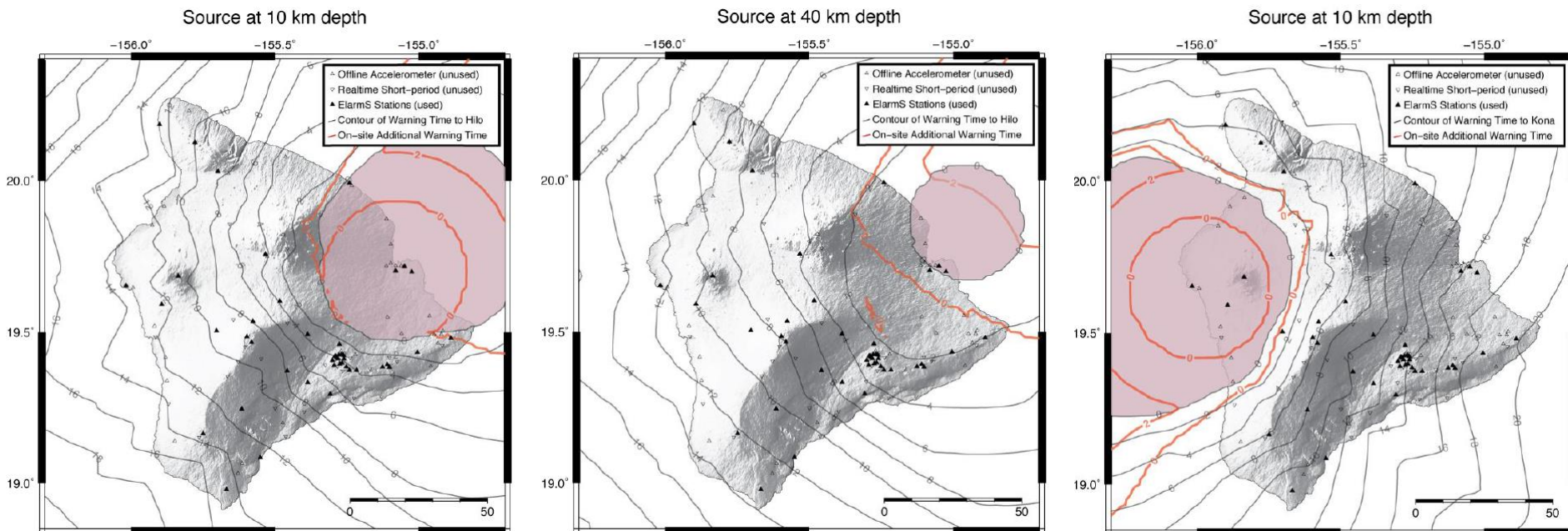
Εναλλακτικά σχεδιαστικά πρότυπα ειδοποίησης σε εφαρμογή ΣΕΠΣ

Μελέτες εφαρμοσιμότητας (feasibility studies)

- Ένα κρίσιμο ζήτημα για την επιχειρησιακή εφαρμογή ΣΕΠΣ είναι το κατά πόσο ένα ΣΕΠΣ μπορεί στην πράξη να επιφέρει μείωση του σεισμικού κινδύνου σε μια ορισμένη περιοχή.
- Οι **μελέτες εφαρμοσιμότητας** (*feasibility*) ενός ΣΕΠΣ εξετάζουν:
 - Τα τεκτονικά χαρακτηριστικά (ενεργά ρήγματα), τη σεισμικότητα και το ιστορικό μεγάλων σεισμών στην περιοχή.
 - Την πυκνότητα του διαθέσιμου σεισμολογικού δικτύου, την κατάσταση των οργάνων, τις καθυστερήσεις στη μετάδοση δεδομένων (χρονικό προβάδισμα / τυφλές ζώνες), πιθανές βελτιώσεις (πύκνωση δικτύου, ψηφιοποιητές με προδιαγραφές για ΣΕΠΣ).
 - Την κατανομή των κατοικημένων περιοχών και τις ευάλωτες υποδομές (τοποθεσίες-στόχοι).
 - Τις τεχνικές υποδομές για τη μετάδοση ειδοποιήσεων ΕΠΣ, είτε σε περιορισμένο αριθμό αποδεκτών (επιστήμονες/ερευνητές, πολιτική προστασία, ενδιαφερόμενα μέρη), και τις δυνατότητες επεκτασιμότητας (*scaling*) σε μεγαλύτερη κλίμακα (ευρύ κοινό).
 - Την αποδοχή ενός ΣΕΠΣ από το κοινό (απαντήσεις σε ερωτηματολόγια)
 - Ανάλυση κόστους – οφέλους ενός ΣΕΠΣ.

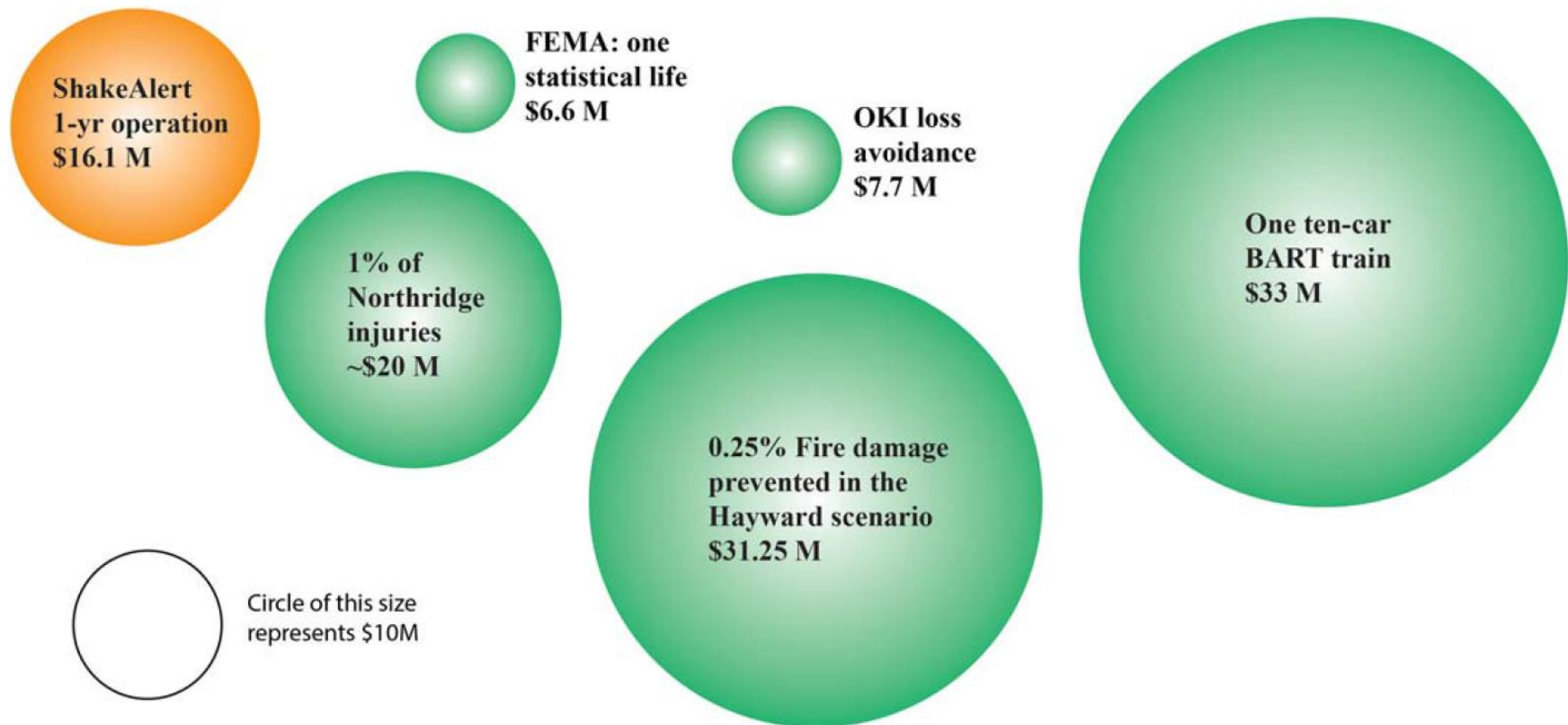
Μελέτες εφαρμοσιμότητας: χρονικό προβάδισμα / τυφλές ζώνες

- Το χρονικό προβάδισμα και οι τυφλές ζώνες μπορούν να εκτιμηθούν θεωρητικά: εκτέλεση του ευθέος προβλήματος για χρόνους διαδρομής, με δεδομένο μοντέλο ταχυτήτων, γεωμετρία σταθμών, κατανομή υποκέντρων, χρονικές καθυστερήσεις μετάδοσης δεδομένων, τοποθεσίες-στόχους.
- Τα παραπάνω μπορούν επίσης να εκτιμηθούν μέσω αναπαραγωγής (*playback*) καταγεγραμμένων σεισμών, εφόσον προσφέρεται αυτή η δυνατότητα από τα λογισμικά ΣΕΠΣ.
- Οι τυφλές ζώνες μπορούν να οριστούν είτε ως προς τον κάθε σεισμό (γύρω από το επίκεντρο), είτε γύρω από την κάθε τοποθεσία-στόχο (με αζιμουθιακή εξάρτηση).



Μελέτες εφαρμοσιμότητας: σχέσεις κόστους - οφέλους

- Σύγκριση κόστους λειτουργίας του ΣΕΠΣ ShakeAlert στη Δυτική Ακτή των ΗΠΑ σε σχέση με την πραγματική ή εκτιμώμενη ζημία (σενάρια) εξ αιτίας ισχυρών σεισμών στην περιοχή.



Εφαρμογές ΣΕΠΣ

- Τα ΣΕΠΣ έχουν βρει εφαρμογή σε διάφορες σεισμογενείς περιοχές:
 - Ιαπωνία (Nakamura, 1988; Kodera et al., 2021· Yamada et al., 2025)
 - Καλιφόρνια, Η.Π.Α. (ShakeAlert/ElarmS) (Kuyuk, Allen, et al., 2014)
 - Μεξικό (SASMEX) (Espinosa-Aranda et al., 2011)
 - Κίνα (Peng et al., 2022)
 - Ρουμανία (Ionescu et al., 2007)
 - Ιταλία (PRESTo, QuakeUp)
 - Νότια Κορέα (Sheen et al., 2017)
 - Ταϊβάν (Hsiao et al., 2009)
 - Τουρκία (Erdik et al., 2003)
 - Ελβετία (Massin et al., 2021)
- Στην Ελλάδα τα ΣΕΠΣ βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο. Έως τώρα, η πιο ολοκληρωμένη εφαρμογή με χρήση πυκνού σεισμολογικού δικτύου έχει γίνει στον Ανατολικό Κορινθιακό κόλπο (σύστημα ARIS), ενώ γίνονται μελέτες για την εφαρμογή ΣΕΠΣ και στον Δυτικό Κορινθιακό κόλπο (Έργο [TRANSFORM²](#)).

- Allen, R. V., 1978. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bull. Seismol. Soc. Am. 68, 1521–1532. <https://doi.org/10.1785/bssa0680051521>
- Allen, R., 1982. Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. Bull. Seismol. Soc. Am. 72, S225–S242. <https://doi.org/10.1785/bssa07206b0225>
- Allen, R.M., Gasparini, P., Kamigaichi, O., Bose, M., 2009. The Status of Earthquake Early Warning around the World: An Introductory Overview. Seismol. Res. Lett. 80, 682–693. <https://doi.org/10.1785/gssrl.80.5.682>
- Allen, R.M., Melgar, D., 2019. Earthquake early warning: Advances, scientific challenges, and societal needs. Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 47, 361–388. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060457>
- Baer, M., Kradolfer, U., 1987. An automatic phase picker for local and teleseismic events. Bull. Seismol. Soc. Am. 77, 1437–1445. <https://doi.org/10.1785/bssa0770041437>
- Böse, M., Allen, R., Brown, H., Gua, G., Fischer, M., Hauksson, E., Heaton, T., Hellweg, M., Liukis, M., Neuhauser, D., Maechling, P., Solanki, K., Vinci, M., Henson, I., Khainovski, O., Kuyuk, S., Carpio, M., Meier, M.-A., Jordan, T., 2014. CISN ShakeAlert: An Earthquake Early Warning Demonstration System for California. pp. 49–69. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12233-0_3
- Böse, M., Ceylan, S., Andrews, J., Massin, F., Clinton, J., Saunders, J.K., Tatar, O., Türkoğlu, M., 2024. Rapid Finite-Fault Models for the 2023 Mw 7.8 Kahramanmaraş, Türkiye, Earthquake Sequence. Seismol. Res. Lett. 95, 2761–2778. <https://doi.org/10.1785/0220230426>
- Böse, M., Heaton, T.H., Hauksson, E., 2012. Real-time Finite Fault Rupture Detector (FinDer) for large earthquakes. Geophys. J. Int. 191, 803–812. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2012.05657.x>
- Böse, M., Smith, D.E., Felizardo, C., Meier, M.-A., Heaton, T.H., Clinton, J.F., 2018. FinDer v.2: Improved real-time ground-motion predictions for M2–M9 with seismic finite-source characterization. Geophys. J. Int. 212, 725–742. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx430>
- Colombelli, S., Carotenuto, F., Elia, L., Zollo, A., 2020. Design and implementation of a mobile device app for network-based earthquake early warning systems (EEWSs): application to the PRESto EEWS in southern Italy. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 20, 921–931. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-921-2020>

- Cua, G., Heaton, T., 2007. The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning, in: *Earthquake Early Warning Systems*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 97–132.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-72241-0_7
- Dallo, I., Marti, M., Clinton, J., Böse, M., Massin, F., Zaugg, S., 2022. Earthquake early warning in countries where damaging earthquakes only occur every 50 to 150 years – The societal perspective. *Int. J. Disaster Risk Reduct.* 83, 103441. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103441>
- Erdik, M., Fahjan, Y., Ozel, O., Alcik, H., Mert, A., Gul, M., 2003. Istanbul Earthquake Rapid Response and the Early Warning System. *Bull. Earthq. Eng.* 1, 157–163. <https://doi.org/10.1023/A:1024813612271>
- Espinosa-Aranda, J.M., Cuéllar, A., Rodríguez, F.H., Frontana, B., Ibarrola, G., Islas, R., García, A., 2011. The seismic alert system of Mexico (SASMEX): Progress and its current applications. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 31, 154–162.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.09.011>
- Given, D.D., Allen, R.M., Baltay, A.S., Bodin, P., Cochran, E.S., Creager, K., Groot, R.M. de, Gee, L.S., Hauksson, E., Heaton, T.H., Hellweg, M., Murray, J.R., Thomas, V.I., Toomey, D., Yelin, T.S., 2018. Revised technical implementation plan for the ShakeAlert system—An earthquake early warning system for the West Coast of the United States, Open-File Report, Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr20181155>
- Hsiao, N., Wu, Y., Shin, T., Zhao, L., Teng, T., 2009. Development of earthquake early warning system in Taiwan. *Geophys. Res. Lett.* 36. <https://doi.org/10.1029/2008GL036596>
- Kanamori, H., 2005. Real-time seismology and earthquake damage mitigation. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 33, 195–214.
<https://doi.org/10.1146/annurev.earth.33.092203.122626>
- Kapetanidis, V., 2017. Spatiotemporal patterns of microseismicity for the identification of active fault structures using seismic waveform cross-correlation and double-difference relocation. PhD Thesis, University of Athens.
- Kodera, Y., Hayashimoto, N., Tamaribuchi, K., Noguchi, K., Moriwaki, K., Takahashi, R., Morimoto, M., Okamoto, K., Hoshiba, M., 2021. Developments of the Nationwide Earthquake Early Warning System in Japan After the 2011 Mw9.0 Tohoku-Oki Earthquake. *Front. Earth Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.726045>
- Kong, Q., Allen, R.M., Schreier, L., 2016a. MyShake: Initial observations from a global smartphone seismic network. *Geophys. Res. Lett.* 43, 9588–9594. <https://doi.org/10.1002/2016GL070955>

- Kong, Q., Allen, R.M., Schreier, L., Kwon, Y.-W., 2016b. MyShake: A smartphone seismic network for earthquake early warning and beyond. *Sci. Adv.* 2. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501055>
- Kong, Q., Martin-Short, R., Allen, R.M., 2020. Toward Global Earthquake Early Warning with the MyShake Smartphone Seismic Network, Part 1: Simulation Platform and Detection Algorithm. *Seismol. Res. Lett.* 91, 2206–2217. <https://doi.org/10.1785/0220190177>
- Lancieri, M., Zollo, A., 2008. A Bayesian approach to the real-time estimation of magnitude from the early P and S wave displacement peaks. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 113, B12302. <https://doi.org/10.1029/2007JB005386>
- Lomax, A., Satriano, C., Vassallo, M., 2012. Automatic Picker Developments and Optimization: FilterPicker--a Robust, Broadband Picker for Real-Time Seismic Monitoring and Earthquake Early Warning. *Seismol. Res. Lett.* 83, 531–540. <https://doi.org/10.1785/gssrl.83.3.531>
- Lomax, A., Virieux, J., Volant, P., Berge-Thierry, C., 2000. Probabilistic Earthquake Location in 3D and Layered Models. pp. 101–134. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9536-0_5
- Massin, F., Clinton, J., Böse, M., 2021. Status of Earthquake Early Warning in Switzerland. *Front. Earth Sci.* 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.707654>
- Nakamura, Y., 1988. On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS). in *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo and Kyoto, Japan, August 2–9, 1988, 7, 673–678.
- Nakamura, Y., Saita, J., Sato, T., 2011. On an earthquake early warning system (EEW) and its applications. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 31, 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.04.012>
- Peng, C., Jiang, P., Ma, Q., Su, J., Cai, Y., Zheng, Y., 2022. Chinese Nationwide Earthquake Early Warning System and Its Performance in the 2022 Lushan M6.1 Earthquake. *Remote Sens.* 14, 4269. <https://doi.org/10.3390/rs14174269>
- Sato, T., Hirasawa, T., 1973. Body wave spectra from propagating shear cracks. *J. Phys. Earth* 21, 415–431. <https://doi.org/10.4294/jpe1952.21.415>
- Satriano, C., Elia, L., Martino, C., Lancieri, M., Zollo, A., Iannaccone, G., 2011. PRESTo, the earthquake early warning system for Southern Italy: Concepts, capabilities and future perspectives. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 31, 137–153. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2010.06.008>
- Satriano, C., Lomax, A., Zollo, A., 2008. Real-Time Evolutionary Earthquake Location for Seismic Early Warning. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 98, 1482–1494. <https://doi.org/10.1785/0120060159>

- Serdar Kuyuk, H., Allen, R.M., Brown, H., Hellweg, M., Henson, I., Neuhauser, D., 2014. Designing a Network-Based Earthquake Early Warning Algorithm for California: ElarmS-2. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 104, 162–173. <https://doi.org/10.1785/0120130146>
- Sheen, D., Park, J., Chi, H., Hwang, E., Lim, I., Seong, Y.J., Pak, J., 2017. The First Stage of an Earthquake Early Warning System in South Korea. *Seismol. Res. Lett.* 88, 1491–1498. <https://doi.org/10.1785/0220170062>
- Strauss, J.A., Allen, R.M., 2016. Benefits and Costs of Earthquake Early Warning. *Seismol. Res. Lett.* 87, 765–772. <https://doi.org/10.1785/0220150149>
- Tajima, F., Hayashida, T., 2018. Earthquake early warning: what does “seconds before a strong hit” mean? *Prog. Earth Planet. Sci.* 5, 63. <https://doi.org/10.1186/s40645-018-0221-6>
- Thelen, W.A., Hotovec-Ellis, A.J., Bodin, P., 2016. Feasibility study of earthquake early warning (EEW) in Hawaii, Open-File Report. <https://doi.org/10.3133/ofr20161172>
- Vats, F., Basu, D., 2023. On the construction of Joyner-Boore distance (Rjb) for PESMOS and COSMOS databases. *J. Seismol.* 27, 173–202. <https://doi.org/10.1007/s10950-022-10129-1>
- Velazquez, O., Pescaroli, G., Cremen, G., Galasso, C., 2020. A Review of the Technical and Socio-Organizational Components of Earthquake Early Warning Systems. *Front. Earth Sci.* 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.533498>
- Wu, Y.M., Kanamori, H., 2005a. Rapid assessment of damage potential of earthquakes in Taiwan from the Beginning of P waves. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 1181–1185. <https://doi.org/10.1785/0120040193>
- Wu, Y.-M., Kanamori, H., 2005b. Experiment on an Onsite Early Warning Method for the Taiwan Early Warning System. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95, 347–353. <https://doi.org/10.1785/0120040097>
- Wu, Y.-M., Kanamori, H., Allen, R.M., Hauksson, E., 2007. Determination of earthquake early warning parameters, τ_c and P_d , for southern California. *Geophys. J. Int.* 170, 711–717. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2007.03430.x>
- Yamada, M., Xiao, Y., Hayashimoto, N., Noguchi, K., 2025. Performance of the earthquake early warning system for the 2024 Noto Peninsula earthquake. *Earth, Planets Sp.* 77, 46. <https://doi.org/10.1186/s40623-025-02172-2>
- Zollo, A., Colombelli, S., Caruso, A., Elia, L., 2023. An Evolutionary Shaking-Forecast-Based Earthquake Early Warning Method. *Earth Sp. Sci.* 10. <https://doi.org/10.1029/2022EA002657>
- Zollo, A., Lancieri, M., Nielsen, S., 2006. Earthquake magnitude estimation from peak amplitudes of very early seismic signals on strong motion records. *Geophys. Res. Lett.* 33. <https://doi.org/10.1029/2006GL027795>