



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)

Βέλτιστα μοντέλα ταχυτήτων

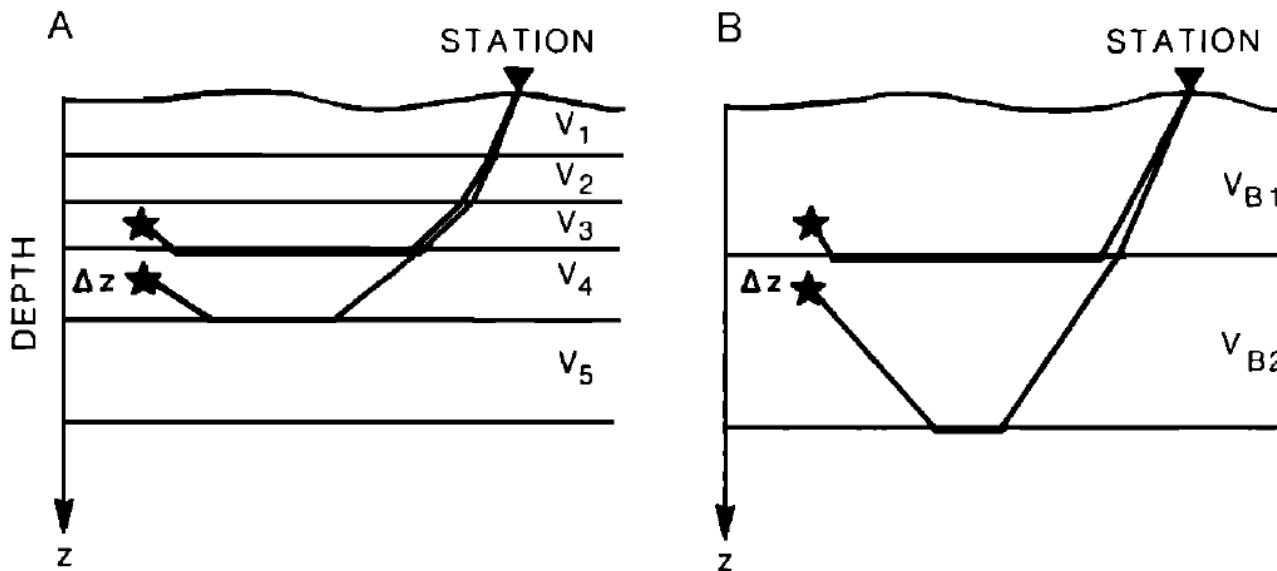
Περιεχόμενα του μαθήματος

- Το συζευγμένο πρόβλημα υποκέντρου/μοντέλου ταχυτήτων
- Συνδυαστική αντιστροφή
- Πλευρικές ετερογένειες – διορθώσεις σταθμών
- Από κοινού εντοπισμός υποκέντρων (JHD)
- Λογισμικό VELEST
- Βήματα εύρεσης του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων
- Δοκιμές ευστάθειας
- Παραδείγματα

Αναζήτηση σε κάνναβο - προβλήματα

- Ένα «βέλτιστο» 1Δ μοντέλο ταχυτήτων μπορεί, εν γένει, να κατασκευαστεί με αναζήτηση σε κάνναβο.
 - Μπορεί για κάθε παράμετρο του μοντέλου (πάχος/ταχύτητα στρώματος) να βρεθεί μια βέλτιστη τιμή που ελαχιστοποιεί τα RMS χρονικά υπόλοιπα.
- Ωστόσο, κάθε αλλαγή στις παραμέτρους ενός στρώματος, επιφέρει αλλαγές στους χρόνους διαδρομής ακτινών που διέρχονται και από άλλα στρώματα.
 - Με κάθε αλλαγή σε μια παράμετρο, γενικά αλλάζει η διαδρομή ελαχίστου χρόνου που ακολουθεί η κάθε σεισμική ακτίνα.
- Αυτό σημαίνει ότι για να βρούμε τις βέλτιστες παραμέτρους για ένα στρώμα, «χαλάμε» τις παραμέτρους σε άλλα στρώματα (πρέπει να τις αναζητήσουμε εκ νέου).

Επίδραση μοντέλου ταχυτήτων στο εστιακό βάθος

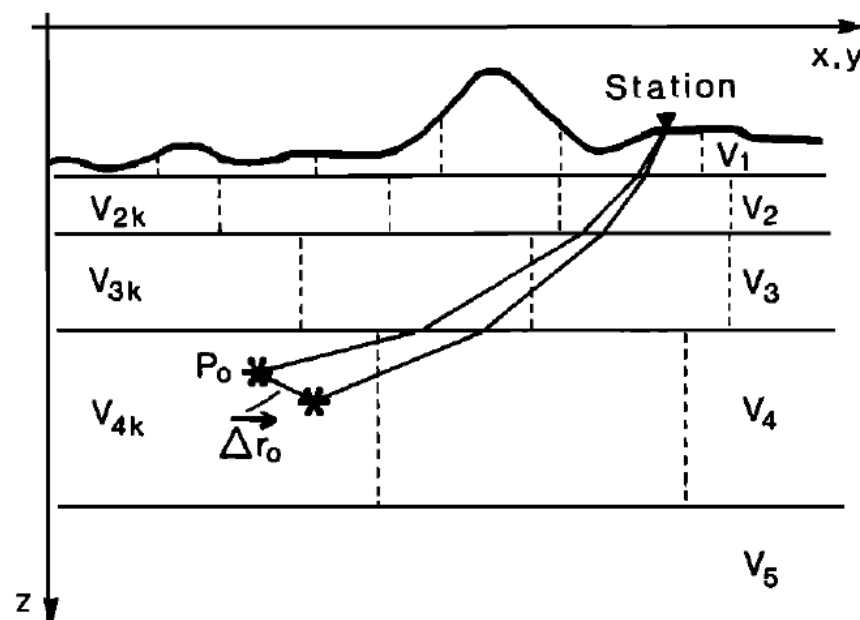
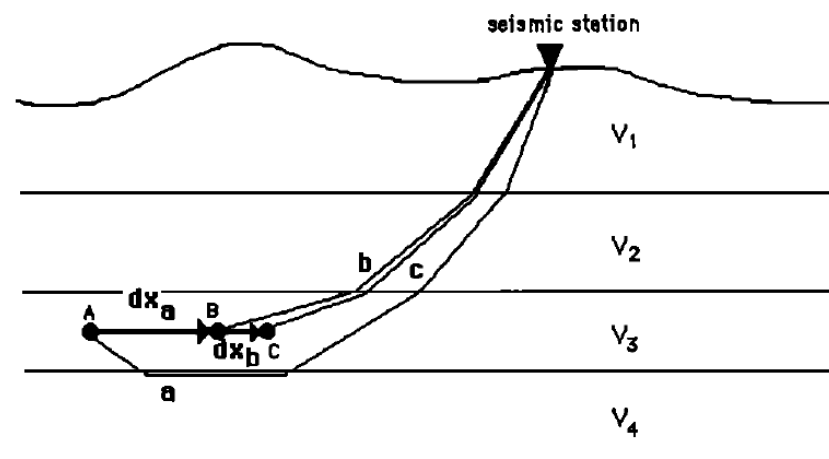


Kissling (1988)

- Μια αλλαγή στο εστιακό βάθος θα προκαλέσει μεγαλύτερη μεταβολή στο χρόνο διαδρομής για ένα 1Δ μοντέλο με λιγότερα στρώματα (μοντέλο B).
- Λαμβάνοντας υπόψη την πιθανότητα ύπαρξης βαθμίδων ταχύτητας, ένα 1Δ μοντέλο με πολλά στρώματα (μοντέλο A) επιτρέπει στη σεισμική ακτίνα να ακολουθήσει μια πιο ρεαλιστική διαδρομή.
- Η εξάρτηση του εστιακού βάθους από το μοντέλο ταχύτητας είναι μικρότερη για το μοντέλο A, και άρα προτιμάται η χρήση του για τον εντοπισμό υποκέντρων.

Το συζευγμένο πρόβλημα

- Όταν τροποποιείται το μοντέλο ταχυτήτων, διαφοροποιούνται και οι λύσεις για το υπόκεντρο/χρόνο γένεσης του κάθε σεισμού.
- Αν κρατήσουμε σταθερά τα υπόκεντρα στις εστιακές παραμέτρους που επιλύθηκαν με ένα αρχικό μοντέλο ταχυτήτων, αυτά τα υπόκεντρα δεν αντιπροσωπεύουν πλέον τις «σωστές» θέσεις που θα παίρναμε με ένα τελικό/βέλτιστο μοντέλο ταχυτήτων.
 - Αυτό οδηγεί σε μεροληψία (bias) των παραμέτρων του μοντέλου ταχυτήτων, εξ αιτίας της χρήσης συστηματικά λανθασμένων εστιακών παραμέτρων.
- Λέμε ότι το πρόβλημα του προσδιορισμού βέλτιστων εστιακών παραμέτρων είναι **συζευγμένο** (*coupled*) με το πρόβλημα προσδιορισμού του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων: το ένα επηρεάζει το άλλο, συνεπώς πρέπει και τα δύο να επιλυθούν (σχεδόν) ταυτόχρονα.



Το συζευγμένο πρόβλημα

- Το **ευθύ** πρόβλημα προσδιορισμού των χρόνων διαδρομής μπορεί να γραφτεί υπό τη γενική μορφή:

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}\mathbf{d} + \mathbf{e}$$

- Όπου $\mathbf{t}$ οι **θεωρητικά υπολογιζόμενοι** χρόνοι διαδρομής ($\mathbf{d}$ σε προηγούμενα παραδείγματα), $\mathbf{A}$ ο Ιακωβιανός **πίνακας μερικών** παραγώγων (συμβολιζόμενος με $\mathbf{G}$ σε προηγούμενα παραδείγματα), $\mathbf{d}$ ο πίνακας **παραμέτρων** του μοντέλου ($\mathbf{m}$ σε προηγούμενα παραδείγματα), ο οποίος αναλύεται στα παρακάτω στοιχεία:

$$\mathbf{d} = (\underbrace{\Delta h_{1,j}, \Delta h_{2,j}, \dots, \Delta h_{nev,j}}_{\text{Εστιακές παράμετροι (x,y,z,t)}} , \underbrace{\Delta m_1, \Delta m_2, \dots, \Delta m_n}_{\text{Παράμετροι του μοντέλου ταχυτήτων (π.χ., ταχύτητες στρωμάτων)}})$$

Εστιακές παράμετροι (x,y,z,t)
(j=1...4) για **όλους** τους
συνολικά “nev” σεισμούς

Παράμετροι του μοντέλου
ταχυτήτων (π.χ., ταχύτητες
στρωμάτων)

- Οπότε, ο πίνακας $\mathbf{A}$ θα περιέχει μερικές παραγώγους των χρονικών υπολοίπων $\mathbf{t}$ ως προς τις εστιακές παραμέτρους του κάθε σεισμού, αλλά και ως προς την κάθε παράμετρο m_i του μοντέλου ταχυτήτων.
- Το $\mathbf{e}$ είναι ένα **διάνυσμα σφάλματος** (*error vector*) στο οποίο «συσσωρεύονται» όλοι οι παράγοντες που δημιουργούν τα χρονικά υπόλοιπα ανάμεσα σε πραγματικούς και θεωρητικούς χρόνους διαδρομής και δεν μπορούν να ερμηνευτούν από τις υπολογιζόμενες μεταβολές στις παραμέτρους του μοντέλου.

Διαχωρισμός του συζευγμένου προβλήματος

- Ο **συνολικός** πίνακας μερικών παραγώγων A μπορεί να διαχωριστεί σε δύο μέρη:

$$A = H + M$$

- Όπου, H το μέρος του πίνακα που αφορά στο πρόβλημα προσδιορισμού των **εστιακών παραμέτρων**, και M το μέρος του πίνακα που αφορά στο πρόβλημα προσδιορισμού των παραμέτρων του **μοντέλου ταχυτήτων**.
- Και έτσι, για διευκόλυνση στην αντιστροφή, το **συζευγμένο** πρόβλημα μπορεί να διαχωριστεί σε **δύο επιμέρους** προβλήματα:

$$Ad = Hh + Mm$$

- Όπου d ο πίνακας διορθώσεων **όλων** των παραμέτρων, h ο πίνακας διορθώσεων των **εστιακών παραμέτρων** και m ο πίνακας διορθώσεων των παραμέτρων του **μοντέλου ταχυτήτων**.
- Η διαφορά με την απλή γενικευμένη αντιστροφή για τις εστιακές παραμέτρους ενός (1) σεισμού (*single event location*), είναι ότι σε αυτό το πρόβλημα πρέπει να χρησιμοποιηθούν συγχρόνως **όλες οι παρατηρήσεις** (δεδομένα χρόνων άφιξης) **όλων των σεισμών** σε **όλους τους σταθμούς**, τόσο για την επίλυση του h όσο και του m .

Αντιστροφή για το μοντέλο ταχυτήτων

- Το μέρος του ευθέος προβλήματος που αφορά στις διορθώσεις των παραμέτρων $\mathbf{m}$ του μοντέλου ταχυτήτων γράφεται:

$$(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M} + \mathbf{L}) \cdot \mathbf{m} = \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{t}$$

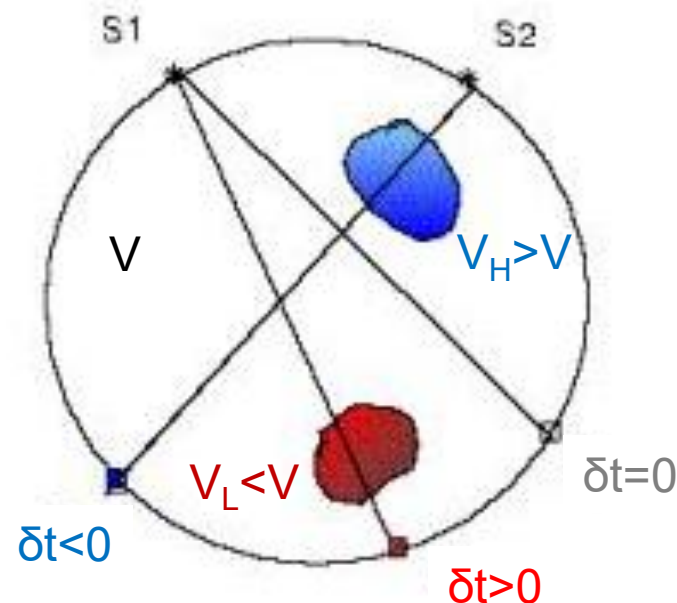
- Όπου $\mathbf{L}$ ένας πίνακας παραμέτρων **απόσβεσης**.
- Το **αντίστροφο** πρόβλημα, για το k -βήμα (επανάληψη) της αντιστροφής, γράφεται:

$$\Delta \mathbf{m}_k = (\mathbf{M}_k^T \cdot \mathbf{M}_k + \mathbf{L})^{-1} \cdot \mathbf{M}_k^T \cdot \Delta \mathbf{t}_k$$

- Εφόσον δοθούν επαρκώς μεγάλες τιμές στο $\mathbf{L}$, είναι «εγγυημένη» η ύπαρξη του αντιστρόφου $(\mathbf{M}_k^T \cdot \mathbf{M}_k + \mathbf{L})^{-1}$
- Η παραπάνω προσέγγιση της γενικευμένης αντιστροφής είναι εφικτή όταν τα ιδιοδιανύσματα με ιδιοτιμές μικρότερες από τα αντίστοιχα στοιχεία του $\mathbf{L}$ καταστέλλονται.

Πλευρικές ετερογένειες στη δομή

- Ένα επιπλέον πρόβλημα είναι ότι τα 1Δ μοντέλα ταχυτήτων είναι προσεγγίσεις που δεν λαμβάνουν υπόψη πλευρικές ετερογένειες στη δομή.
- Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να παρουσιάζονται **συστηματικά σφάλματα** στους χρόνους διαδρομής των P και S, χωριστά σε κάθε σταθμό.
- Αυτά τα συστηματικά σφάλματα αποδίδονται σε μια μέση χρονική **καθυστέρηση** ή **προπόρευση** των σεισμικών κυμάτων καθώς οι ακτίνες τους διέρχονται από περιοχές **χαμηλότερων** ή **υψηλότερων** ταχυτήτων αντίστοιχα.
- Αν βρεθούν αυτές οι **συστηματικές αποκλίσεις** σε κάθε σταθμό και ληφθούν υπόψη ως μια **σταθερή διόρθωση στους χρόνους διαδρομής**, ο υπολογισμός των υποκέντρων θα γίνει με μεγαλύτερη ακρίβεια (μικρότερα χρονικά υπόλοιπα) απ'ότι με χρήση μόνο του 1Δ μοντέλου ταχυτήτων χωρίς διορθώσεις σταθμών.



Από κοινού εντοπισμός υποκέντρων (Joint Hypocenter Determination, JHD)

- Μια μέθοδος επαναπροσδιορισμού εστιακών παραμέτρων με συνεκτίμηση των **διορθώσεων σταθμών** (station corrections) είναι ο «από κοινού εντοπισμός υποκέντρων» (Joint Hypocenter Determination, JHD).
- Το ευθύ πρόβλημα υπολογισμού χρονικών υπολοίπων r_{ij} παίρνει τη μορφή:

$$w_{ij} r_{ij} = w_{ij} \left(dT_j + \frac{\partial t}{\partial x_j} dx_j + \frac{\partial t}{\partial y_j} dy_j + \frac{\partial t}{\partial z_j} dz_j + ds_i \right); \quad r_{ij} = t_{ij}^0 - (T_j + \tau_{ij} + s_i)$$

$i=1,N; \quad j=1,M$

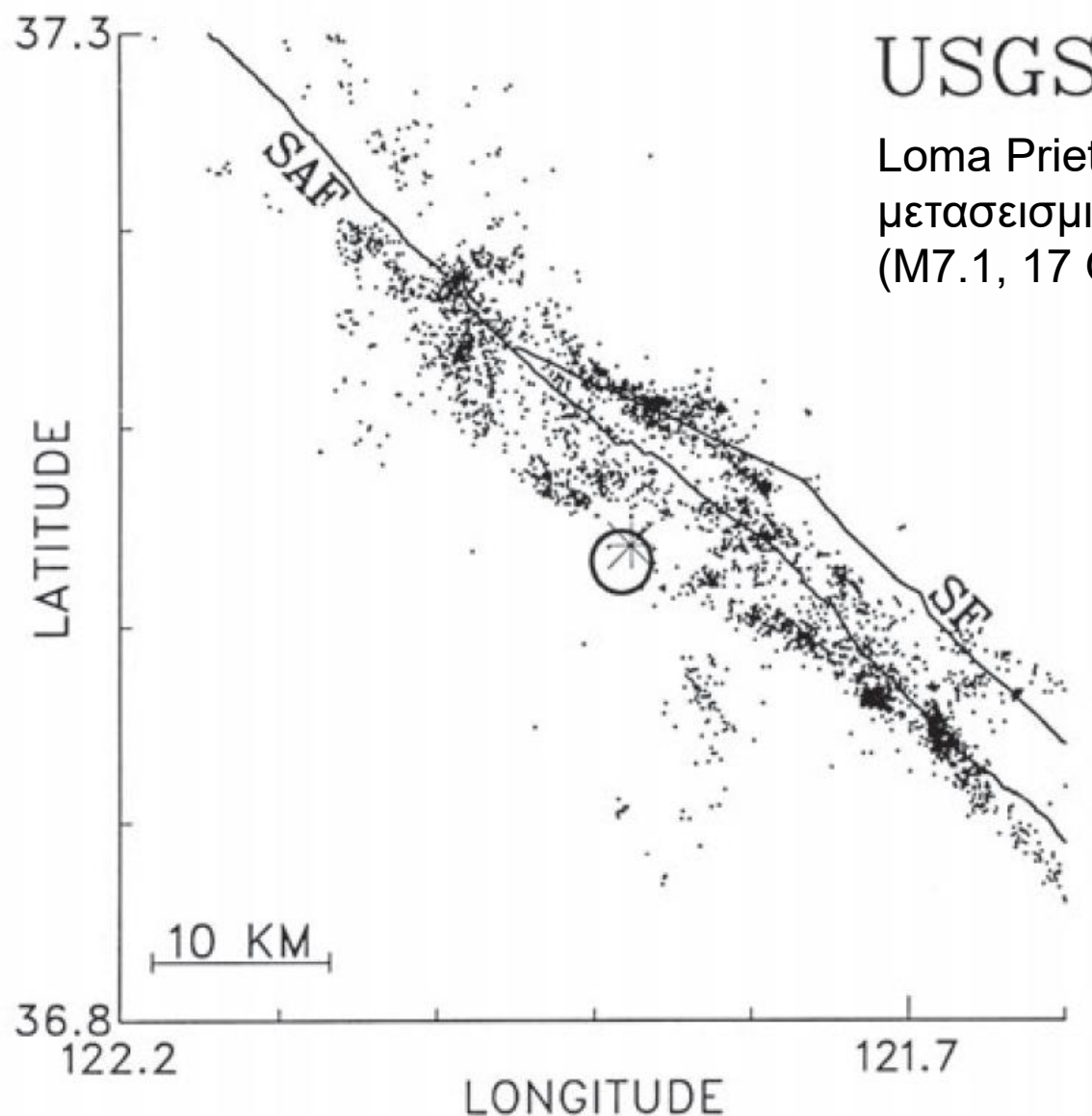
- Όπου ο δείκτης j αντιστοιχεί στον κάθε σεισμό (συνολικά M σεισμοί), και ο δείκτης i στον κάθε σταθμό (συνολικά N σταθμοί), w_{ij} το βάρος της κάθε μέτρησης.
- Εμφανίζεται ο επιπλέον όρος ds_i (και s_i) που αφορά στη διόρθωση χρόνου διαδρομής στον σταθμό i (π.χ., για τους χρόνους διαδρομής των P).
- Το αντίστροφο πρόβλημα μπορεί να λυθεί με μια επαναληπτική διαδικασία, με διαχωρισμό των όρων που αφορούν στις διορθώσεις σταθμών για κάθε σταθμό και φάση από τους όρους των εστιακών παραμέτρων.
- Αφού βρεθούν οι διορθώσεις σταθμών, οι εστιακές παράμετροι μπορούν να επαναυπολογιστούν με αντιστροφή για κάθε σεισμό χωριστά (single-event location), λαμβάνοντας υπόψη τις διορθώσεις σταθμών.

Από κοινού εντοπισμός υποκέντρων (Joint Hypocenter Determination, JHD)

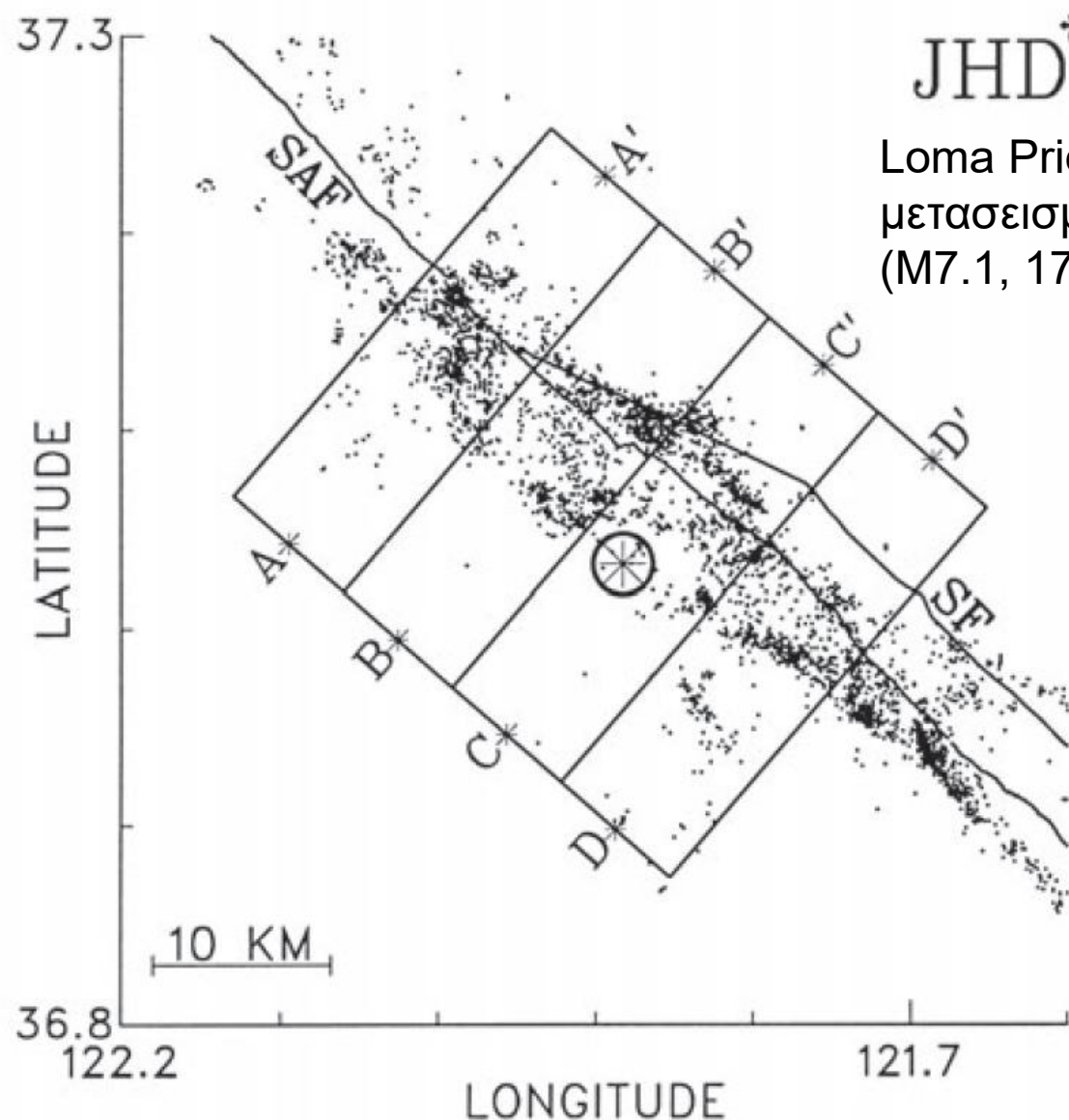
- Προσεγγιστική μέθοδος:

- 1) Υπολογίζουμε τις εστιακές παραμέτρους για το σύνολο των σεισμών (π.χ., με HypoInverse), χωριστά για κάθε σεισμό, αρχικά χωρίς διορθώσεις σταθμών.
- 2) Από τις παραπάνω λύσεις, υπολογίζουμε σε κάθε σταθμό τη μέση τιμή των χρονικών υπολοίπων (residuals), χωριστά για τα P και τα S.
- 3) Επαναπροσδιορίζουμε τις εστιακές παραμέτρους, λαμβάνοντας υπόψη τις διορθώσεις σταθμών του βήματος 2.
- 4) Προαιρετικά, επαναλαμβάνουμε το βήμα 2, ανανεώνοντας τις διορθώσεις σταθμών, και στη συνέχεια το βήμα 3, έως ότου δεν χρειάζονται άλλες μεταβολές στις διορθώσεις σταθμών.

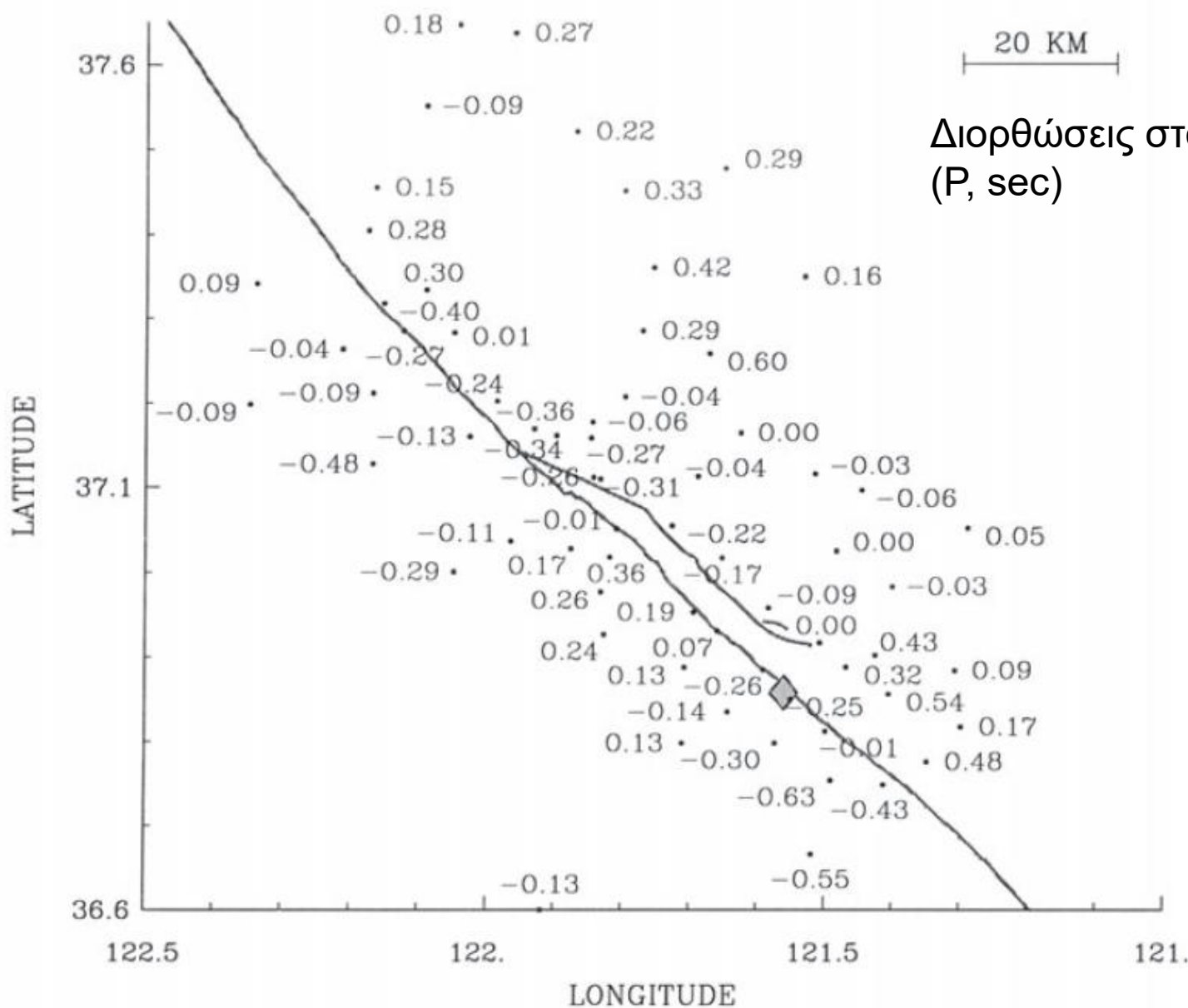
Joint Hypocenter Determination (JHD)



Joint Hypocenter Determination (JHD)

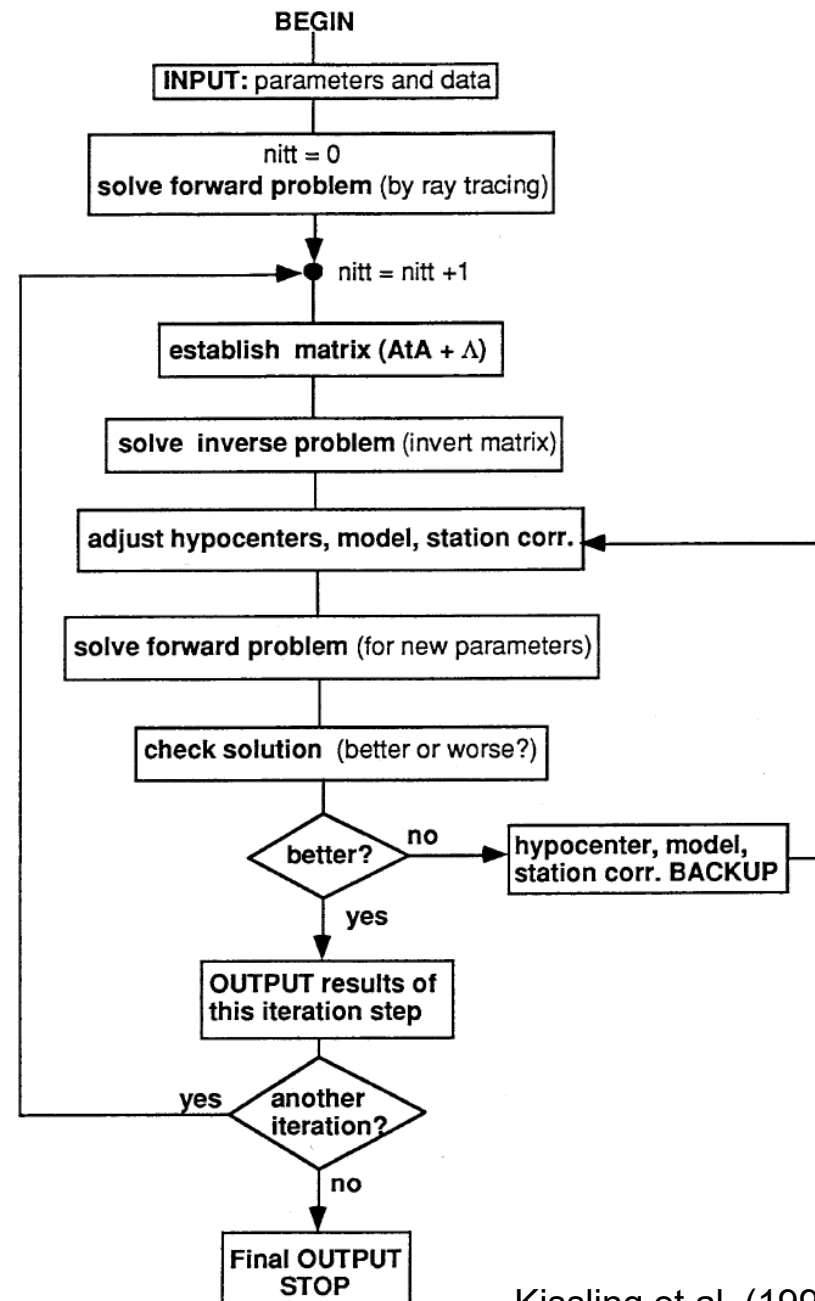


Joint Hypocenter Determination (JHD)

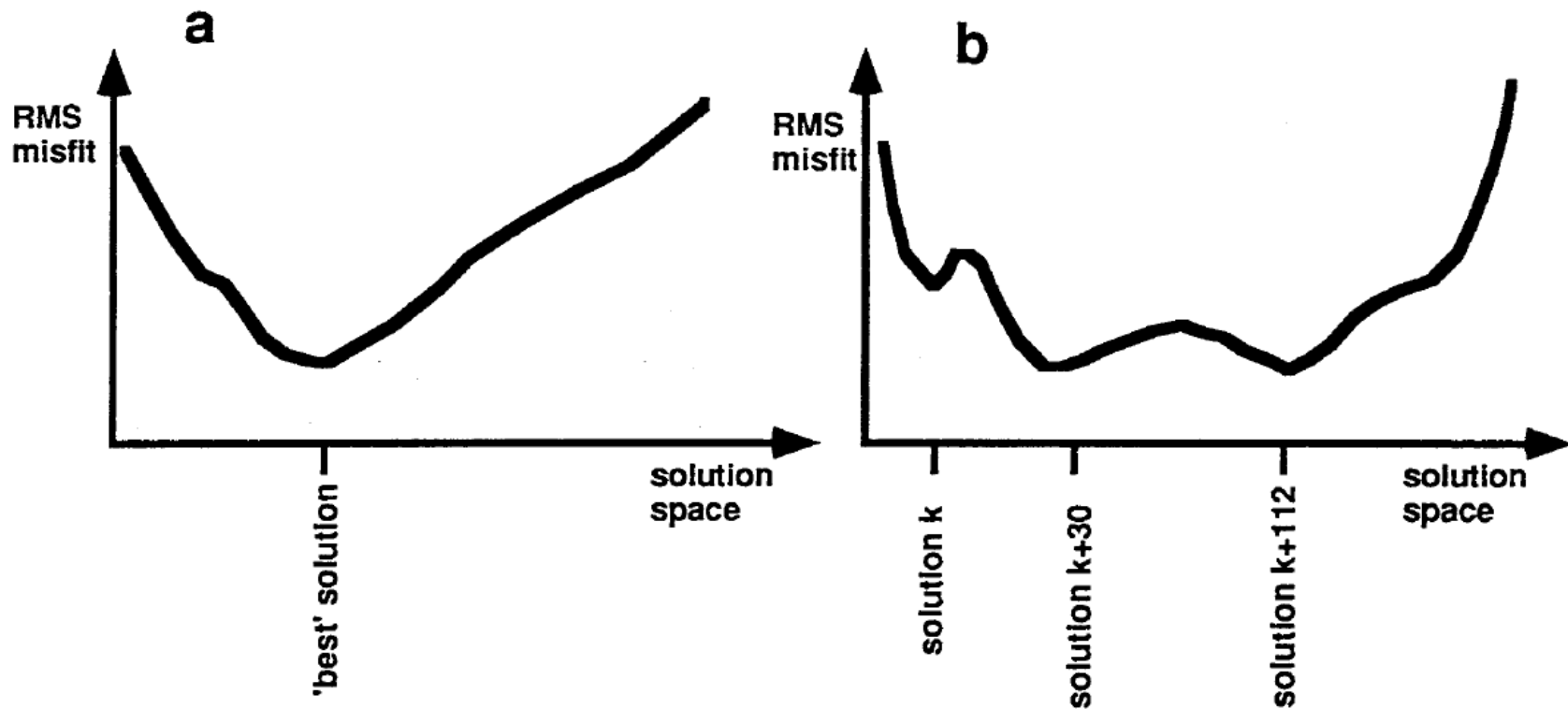


Αλγόριθμος VELEST

- Το λογισμικό **VELEST** εφαρμόζει γενικευμένη αντιστροφή με σκοπό να λύσει το συζευγμένο πρόβλημα της εύρεσης ενός βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων, διορθώσεων σταθμών και εστιακών παραμέτρων.
- Ο βασικός σκοπός του λογισμικού είναι να προσδιορίζει **βέλτιστα μοντέλα ταχυτήτων** (*minimum 1D velocity models*) τα οποία μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν ως **αρχικά μοντέλα αναφοράς** για τομογραφική αντιστροφή.
- Υπολογίζει **και** μοντέλα V_s με μεταβαλλόμενο λόγο V_p/V_s .
- **Δεν** βρίσκει αριθμό/πάχη στρωμάτων.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για επίλυση εστιακών παραμέτρων για κάθε σεισμό χωριστά (single-event mode), ή και με τη μέθοδο Joint Hypocenter Determination (simultaneous mode).



Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων



- Παρότι μια απλή εκτέλεση του VELEST θα δώσει -κάποιο- αποτέλεσμα, αυτό είναι μόνο **ένα** από τα πιθανά «βέλτιστα» μοντέλα.
- Καθώς ο χώρος λύσεων είναι πολυδιάστατος (και οι ίδιες οι διαστάσεις του μεταβαλλόμενες), χρειάζονται πολλαπλές δοκιμές με διαφορετικές παραμέτρους και αρχικά μοντέλα προκειμένου να αποκτηθεί μια «εικόνα» για το **πώς** διαμορφώνεται ο χώρος λύσεων και να βρεθεί το βέλτιστο μοντέλο ταχυτήτων.

Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

Βήμα 1: Κατάρτιση ενός αρχικού, *a priori* 1Δ μοντέλου, από προϋπάρχουσα γνώση

- Χρειάζεται αρχικά να έχουμε μια «χονδρική» εικόνα για τη δομή της περιοχής μελέτης, π.χ. το βάθος της ασυνέχειας Moho, και κάποιες μέσες ταχύτητες για τα επιφανειακά στρώματα στον ανώτερο φλοιό (π.χ. στο εύρος 2.0-6.5 km/s για τα P) και τον κατώτερο φλοιό (π.χ., 6.0-7.8 km/s).
- Τα παραπάνω στοιχεία μπορούν να ληφθούν είτε από υπάρχοντα μοντέλα ταχυτήτων για την ίδια περιοχή μελέτης ή για την ευρύτερη περιοχή, καθώς και από τοπικές γεωφυσικές μελέτες (π.χ., σεισμικά ανάκλασης), ή από ένα γενικό μοντέλο φλοιού.
- Κατασκευάζουμε ένα αρχικό μοντέλο με βάση τις *a priori* πληροφορίες:
 - Μικρά πάχη επιφανειακών στρωμάτων, ~2km
 - Πάχη στρωμάτων 4-5km στον κατώτερο φλοιό

Σημείωση: είναι προτιμότερη η αρχική εύρεση ενός βέλτιστου 1Δ μοντέλου μόνο για τα P κύματα, χωρίς χρήση χρόνων άφιξης των κυμάτων S. Μόνο εάν το επιτρέπουν τα δεδομένα, προχωράμε στη συνέχεια για προσδιορισμό 1Δ μοντέλου και για τα S κύματα.

Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

Βήμα 1: Κατάρτιση ενός αρχικού, *a priori* 1D μοντέλου, από προϋπάρχουσα γνώση

- Ειδικά εάν δεν υπάρχουν *a priori* πληροφορίες, χρειάζονται δοκιμές με τουλάχιστον τρία διαφορετικά αρχικά μοντέλα για κάθε γεωμετρία μοντέλου (πάχη στρωμάτων):
 - 1) Ένα με πολύ χαμηλές ταχύτητες στον φλοιό
 - 2) Ένα με πολύ υψηλές ταχύτητες στον φλοιό
 - 3) Ένα με ενδιάμεσες ταχύτητες στον φλοιό
- Τα μοντέλα πρέπει να έχουν ταχύτητες οι οποίες αυξάνονται με το βάθος.
- Για τις διορθώσεις σταθμών, επιλέγουμε έναν σταθμό αναφοράς:
 - Πρέπει να είναι «**αξιόπιστος**» (να μην έχει πρόβλημα στις συνιστώσες ή στον χρονισμό, να έχει επαρκή διαθεσιμότητα δεδομένων στους επιλεγμένους σεισμούς)
 - Να βρίσκεται κοντά στο **κέντρο** του δικτύου
 - Να **μην** βρίσκεται σε ακραίες τοπικές εδαφικές συνθήκες

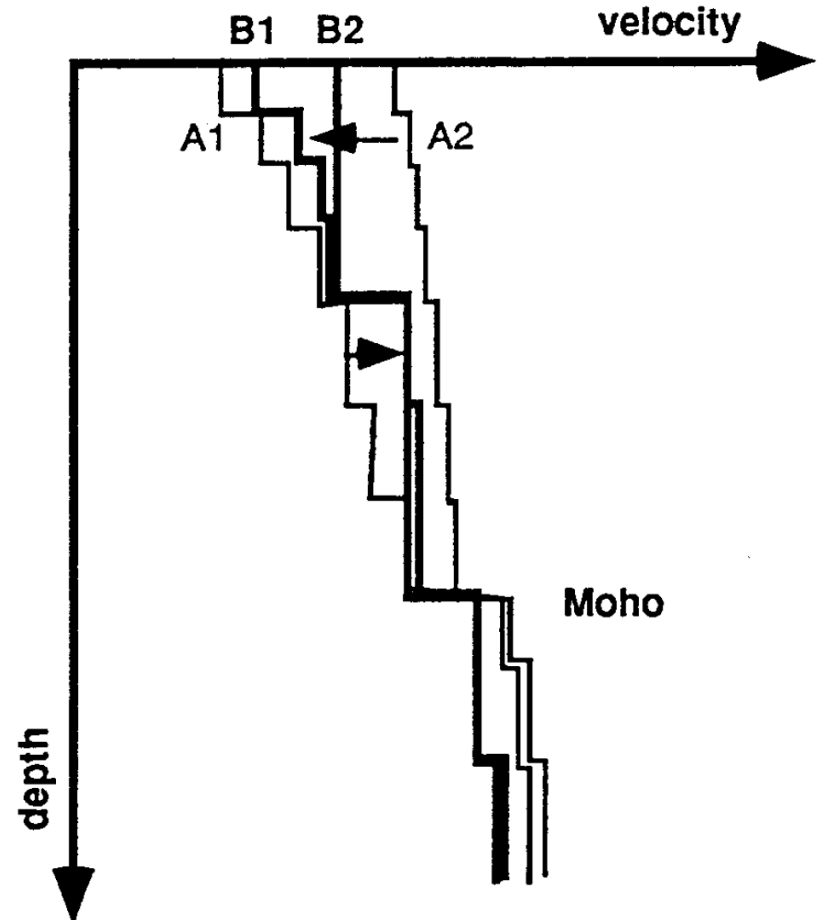
Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

Βήμα 2: Κατάρτιση γεωμετρίας και εύρους ταχυτήτων υποψήφιων τελικών 1D μοντέλων

- Από το σύνολο διαθέσιμων σεισμών, επιλέγουμε ένα υποσύνολο (~500) των καλύτερα προσδιορισμένων, με τις «ποιοτικότερες» μετρήσεις χρόνων άφιξης.
- Εκτελούμε VELEST για ταυτόχρονη αντιστροφή εστιακών παραμέτρων, διορθώσεων σταθμών και μοντέλου ταχυτήτων:
 - Χρησιμοποιούμε παραμέτρους απόσβεσης 0.01 για τα υπόκεντρα και τις διορθώσεις σταθμών, και 0.1 για τις ταχύτητες.
 - Κατά την αντιστροφή, εκτελούνται διορθώσεις εστιακών παραμέτρων σε κάθε επανάληψη, ενώ οι αλλαγές στη διόρθωση σταθμών και τις ταχύτητες γίνεται ανά 2 επαναλήψεις.
 - Η πρώτη εκτέλεση γίνεται ξεκινώντας με μηδενικές διορθώσεις σταθμών.
- Η διαδικασία επαναλαμβάνεται, λαμβάνοντας το τελικό μοντέλο της προηγούμενης αντιστροφής ως αρχικό μοντέλο της επόμενης, με ή χωρίς αρχικές διορθώσεις σταθμών.
- Για τον λόγο αυτό, είναι προτιμότερη η χρήση μικρού αριθμού επαναλήψεων σε κάθε εκτέλεση του VELEST.
- Γίνονται δοκιμές με διαφορετικά πάχη στρωμάτων, ενοποιώντας γειτονικά στρώματα που έχουν καταλήξει να έχουν παρόμοιες ταχύτητες.

Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

- Αφού βρεθεί ένα μοντέλο που προσεγγίζει τις ολικά ελάχιστες τιμές RMS σφάλματος, μπορούν να γίνουν περισσότερες δοκιμές «γύρω» από αυτό το μοντέλο για μικρορυθμίσεις (*fine-tuning*) που θα βελτιώσουν ακόμα περισσότερο το σφάλμα.
- Μπορούν να σταθεροποιηθούν κάποια στρώματα (π.χ., αυτό που αντιστοιχεί στη Moho), αυξάνοντας την αντίστοιχη παράμετρο απόσβεσης του επόμενου στρώματος (π.χ., κάτω από τη Moho).
- Γενικά αποφεύγουμε την εισαγωγή ζωνών χαμηλής ταχύτητας (*low velocity layer*), καθώς μπορεί να δημιουργήσουν προβλήματα αστάθειας στην αντιστροφή.



Δύο τελικά μοντέλα (B1, B2) από δύο διαφορετικά αρχικά μοντέλα (A1, A2)

- Συνιστάται να μην χρησιμοποιείται ισχυρή απόσβεση στα επιφανειακά στρώματα και τις διορθώσεις σταθμών προτού φτάσουμε κοντά στο βέλτιστο μοντέλο.

Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

Βήμα 2: Κατάρτιση γεωμετρίας και εύρους ταχυτήτων υποψήφιων 1Δ μοντέλων

- Μπορούμε να προχωρήσουμε στο επόμενο βήμα όταν:
 1. Τα υπόκεντρα, οι διορθώσεις σταθμών και οι τιμές ταχύτητας δεν αλλάζουν σημαντικά σε διαδοχικές επαναλήψεις.
 2. Η συνολική τιμή RMS σφαλμάτων για όλα τα γεγονότα παρουσιάζει σημαντική μείωση σε σχέση με τις αρχικές θέσεις τους.
 3. Το προκύπτον 1Δ μοντέλο και οι διορθώσεις σταθμών συνάδουν με τη γεωλογία της περιοχής (π.χ., σταθμοί με αρνητικά χρονικά υπόλοιπα βρίσκονται σε τοπικές περιοχές υψηλότερης ταχύτητας σε σχέση με τον σταθμό αναφοράς) και δεν έρχονται σε αντίθεση με την *a priori* πληροφορία.
- Μετά από τα παραπάνω, μπορούμε να ονομάσουμε το αποτέλεσμα ως μια «ενημερωμένη εκδοχή ενός *a priori* 1Δ μοντέλου σε συνδυασμό με τις αντίστοιχες διορθώσεις σταθμών».
- Σημαντικό είναι να καταλήξουμε σε μια γεωμετρία (αριθμό/πάχη στρωμάτων) την οποία θα κρατάμε σταθερή στα επόμενα βήματα.

Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

Βήμα 3: Επαναπροσδιορισμός εστιακών παραμέτρων και επιλογή σεισμών

- Επαναπροσδιορίζουμε τα σεισμικά υπόκεντρα με το ενημερωμένο 1D μοντέλο ταχυτήτων και τις διορθώσεις σταθμών (π.χ. με HypoInverse, ή με το VELEST σε λειτουργία single-event mode).
- Επιλέγουμε τα καλύτερα προσδιορισμένα γεγονότα με βάση ποιοτικά κριτήρια:
 1. Επαρκή αριθμό διαθέσιμων χρόνων άφιξης (π.χ., πάνω από 10 χρόνους άφιξης P).
 2. Μικρό αζιμουθιακό κενό ($\text{gap} < 180^\circ$).
 3. Ομοιόμορφη κατανομή σεισμών στην υπό μελέτη περιοχή και σε διάφορα εστιακά βάθη.
 4. Αφαιρούμε σεισμούς που εμφανίζουν σφάλμα RMS μεγαλύτερο από 2 φορές το μέσο σφάλμα RMS του καταλόγου.
 5. Ενδεχόμενα, αφαιρούμε σταθμούς που έχουν πολύ λίγες παρατηρήσεις.

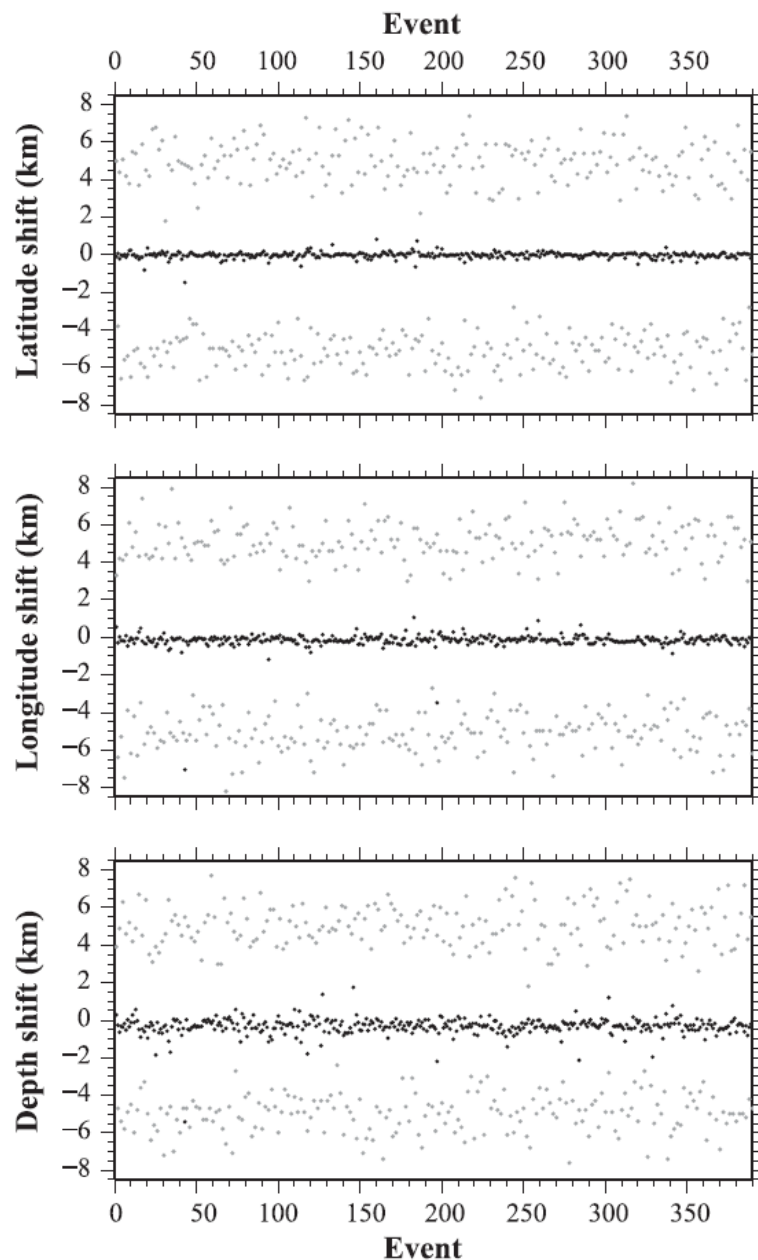
Εύρεση του βέλτιστου μοντέλου ταχυτήτων

Βήμα 4: Επαναπροσδιορισμός εστιακών παραμέτρων και επιλογή σεισμών

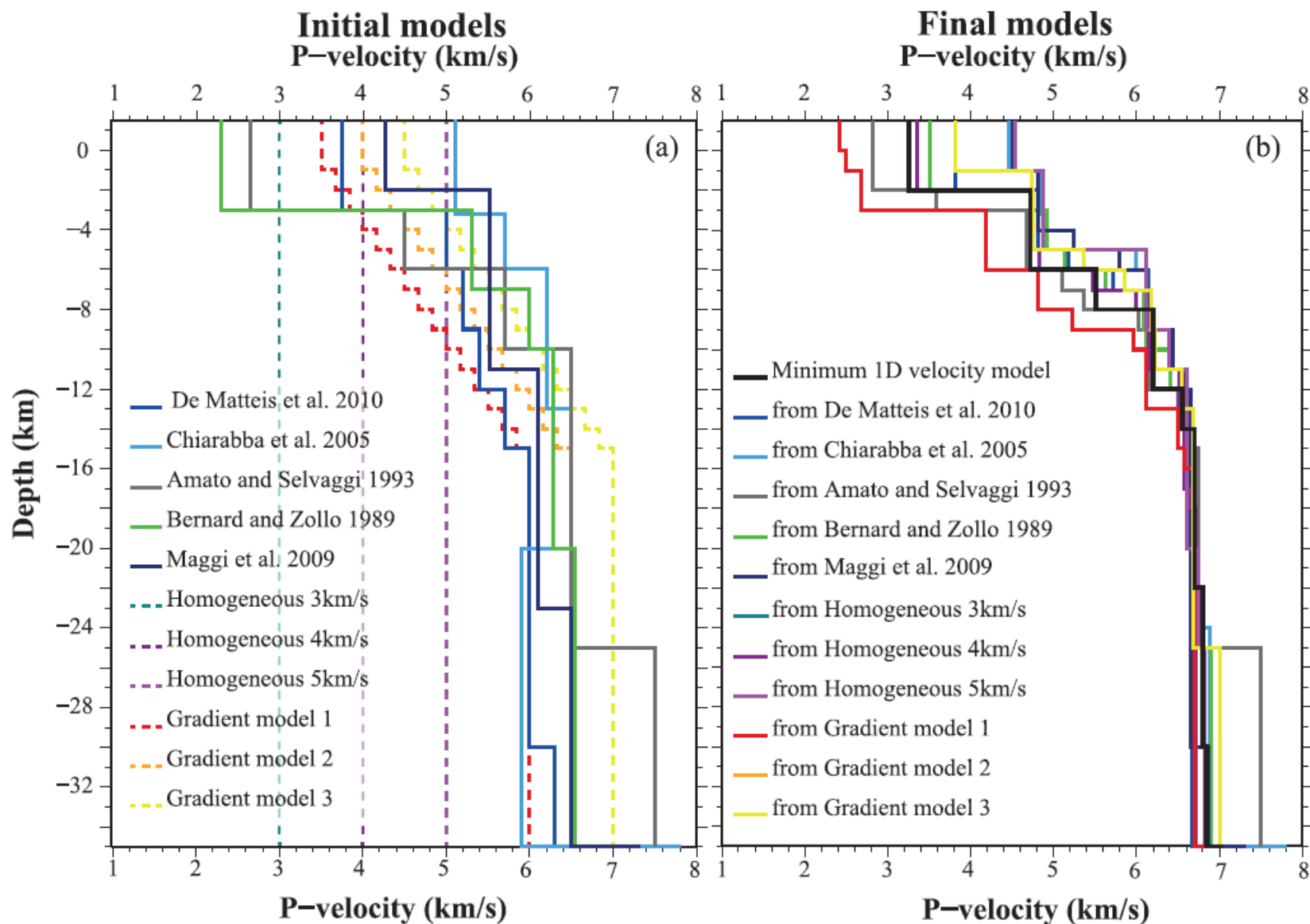
- Επαναλαμβάνουμε το Βήμα 2 με το ανανεωμένο μοντέλο ως αρχικό.
- Χρησιμοποιούμε παράμετρο απόσβεσης 0.01 για τα υπόκεντρα, 0.1 για τις διορθώσεις σταθμών και 1.0 για τις ταχύτητες.
- Στόχος είναι να βρεθεί το μοντέλο (1D και διορθώσεις σταθμών) που ελαχιστοποιεί τα χωρικά σφάλματα για σταθερή γεωμετρία μοντέλου.
- Δοκιμάζουμε αντιστροφές με λόγο επαναλήψεων για υπόκεντρα προς ταχύτητες 2:1 (2N επαναλήψεις), αλλά και με λόγο 1:1 (N επαναλήψεις) και συγκρίνουμε τα τελικά μέσα RMS σφάλματα.
- Ελέγχουμε την ομαλότητα της σύγκλισης.
- Ελέγχουμε το μοντέλο με **δοκιμές ευστάθειας** (stability tests), ή δοκιμάζοντας χαμηλή απόσβεση στις ταχύτητες.
- Όταν καταλήξουμε σε ένα καλό σετ ταχυτήτων, θέτουμε ισχυρή απόσβεση στις ταχύτητες και προσπαθούμε να καταλήξουμε στις τελικές διορθώσεις σταθμών.
- Το τελικό μοντέλο που προκύπτει (μαζί με τις τελικές διορθώσεις σταθμών) μπορούμε να το ονομάσουμε «βέλτιστο 1D μοντέλο» (minimum 1D model).

Δοκιμές ευστάθειας

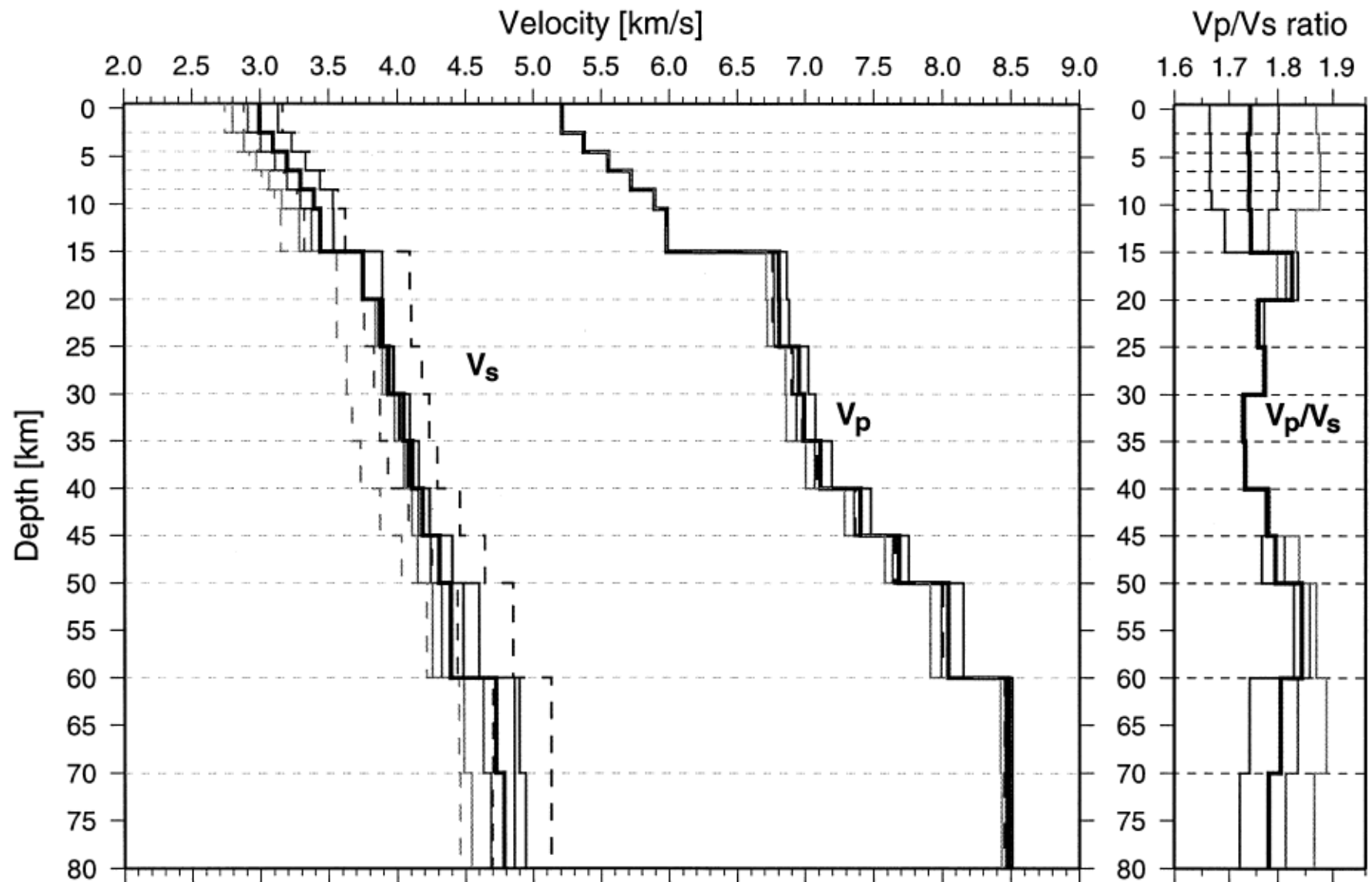
- Εξετάζουμε αν διαταράσσοντας αρχικές θέσεις των υποκέντρων, αυτά καταλήγουν, ύστερα από αντιστροφή, περίπου στις ίδιες «σταθερές» θέσεις με εκείνες των λύσεων από τα αρχικά «αδιατάρακτα» υπόκεντρα.
- Αυτό γίνεται μετακινώντας τα υπόκεντρα με τυχαίο τρόπο, π.χ. κατά 5 km ή 10 km από τις θέσεις που αυτά έχουν με τη χρήση του βέλτιστου 1D μοντέλου, και εκτελώντας τη συνδυαστική αντιστροφή (με προσοχή στην αποφυγή «αεροσεισμών» με αρνητικά εστιακά βάρη).
- Αν το 1D μοντέλο είναι πραγματικά στιβαρό, θα πρέπει τα υπόκεντρα να καταλήξουν περίπου στις αρχικές θέσεις.
- Το νέο μοντέλο/διορθώσεις σταθμών με τα διαταραγμένα υπόκεντρα πρέπει να είναι επίσης κοντά σε εκείνο από τα αδιατάρακτα, διαφορετικά μπορεί να μην έχουμε βρει το πραγματικό ολικό ελάχιστο των σφαλμάτων.



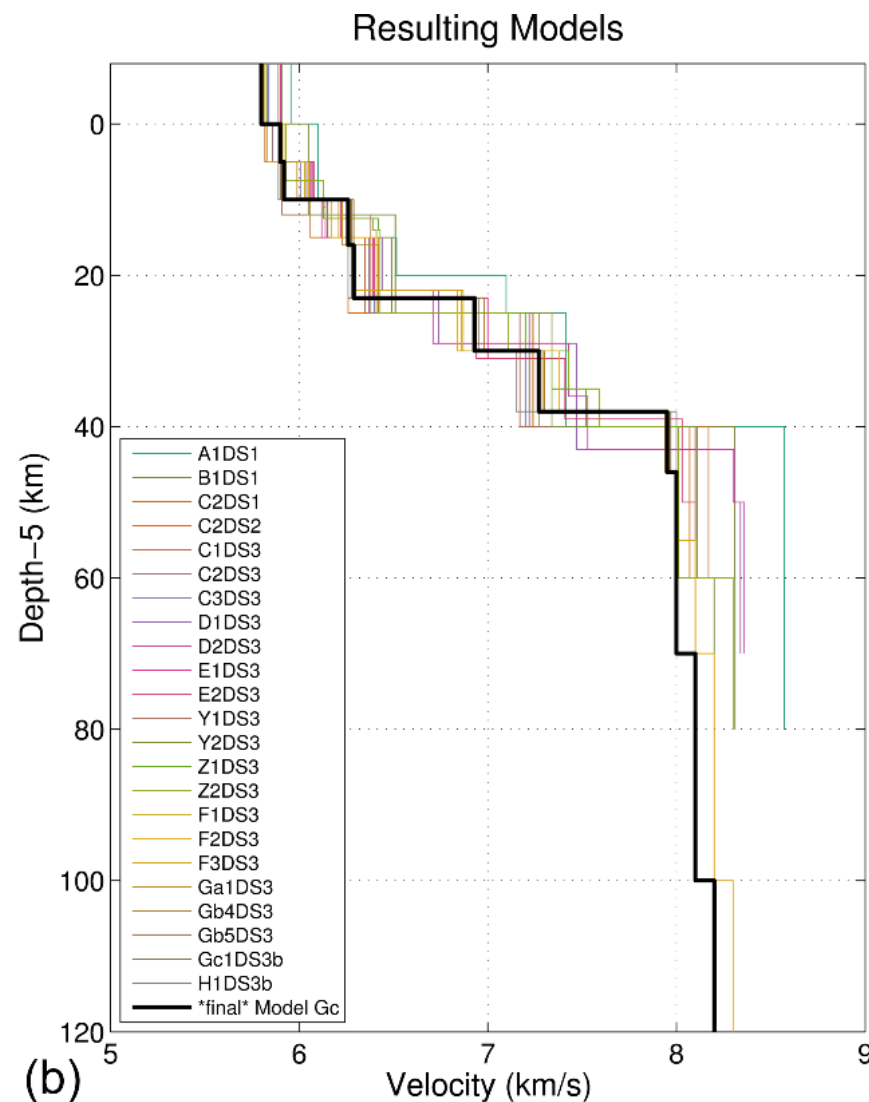
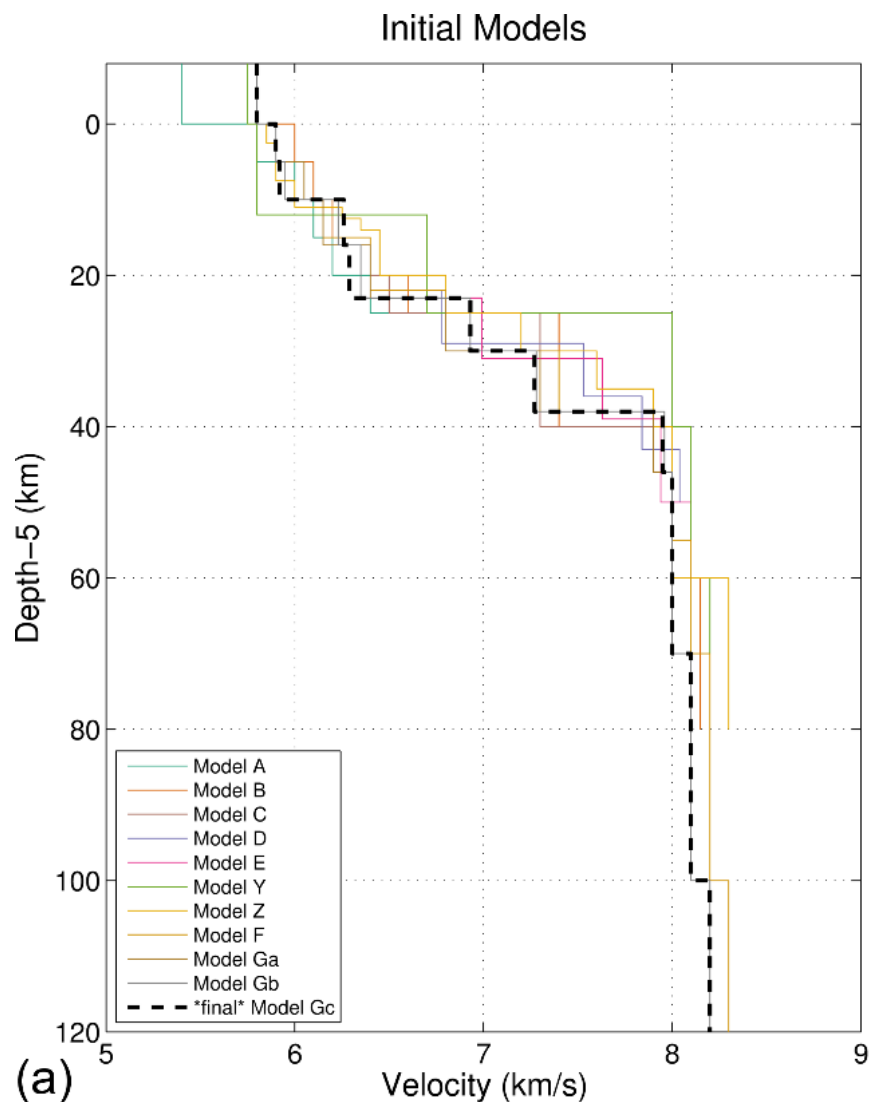
Αρχικά / Τελικά μοντέλα



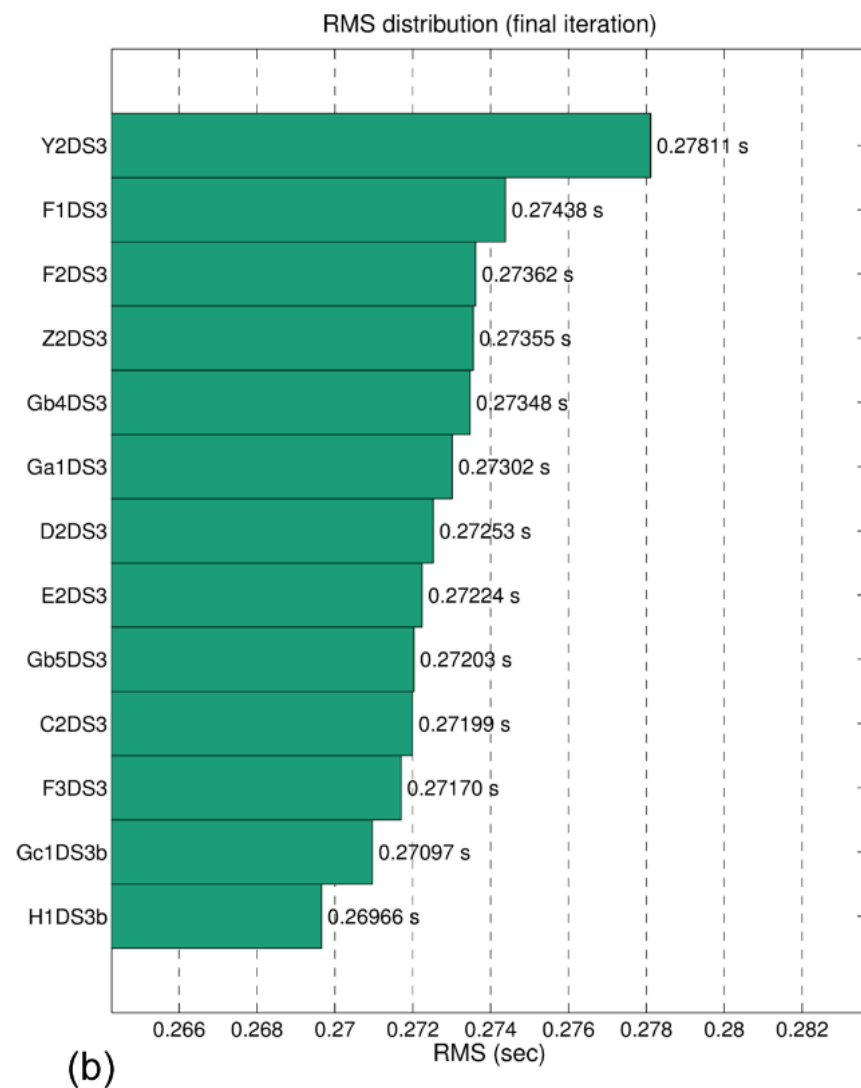
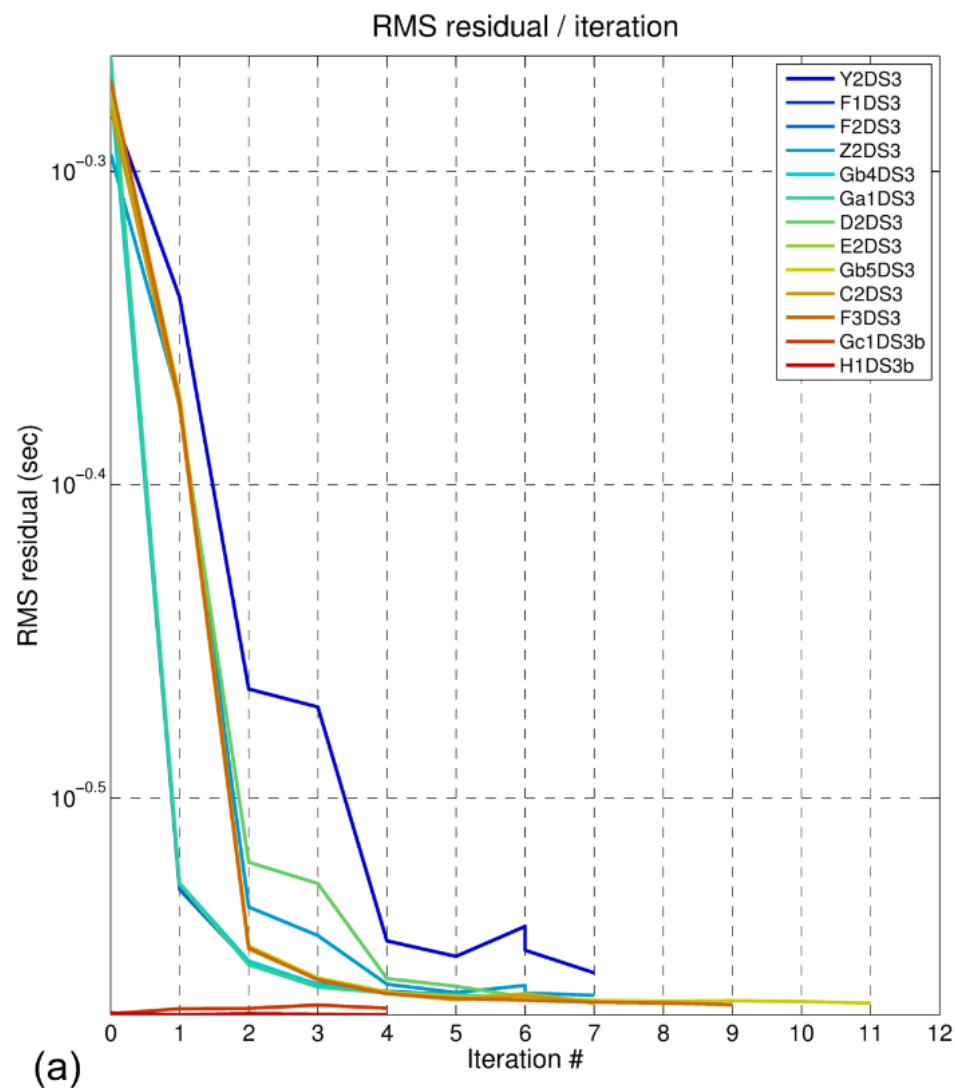
Αρχικά / Τελικά μοντέλα



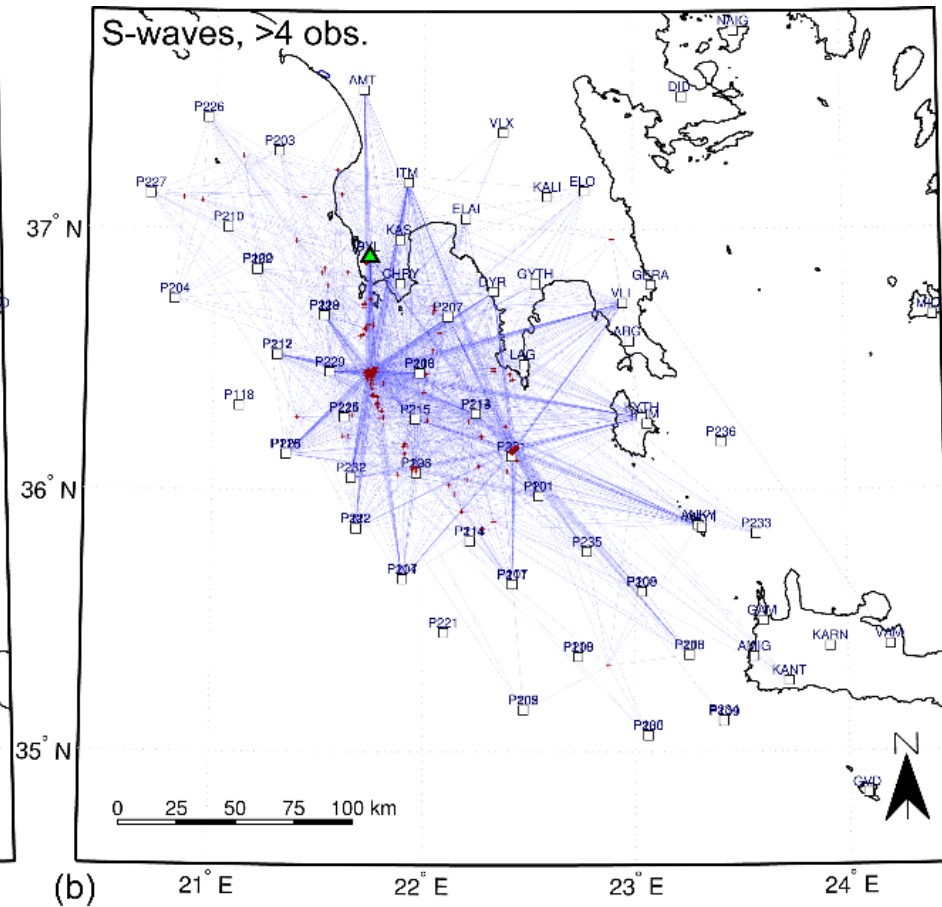
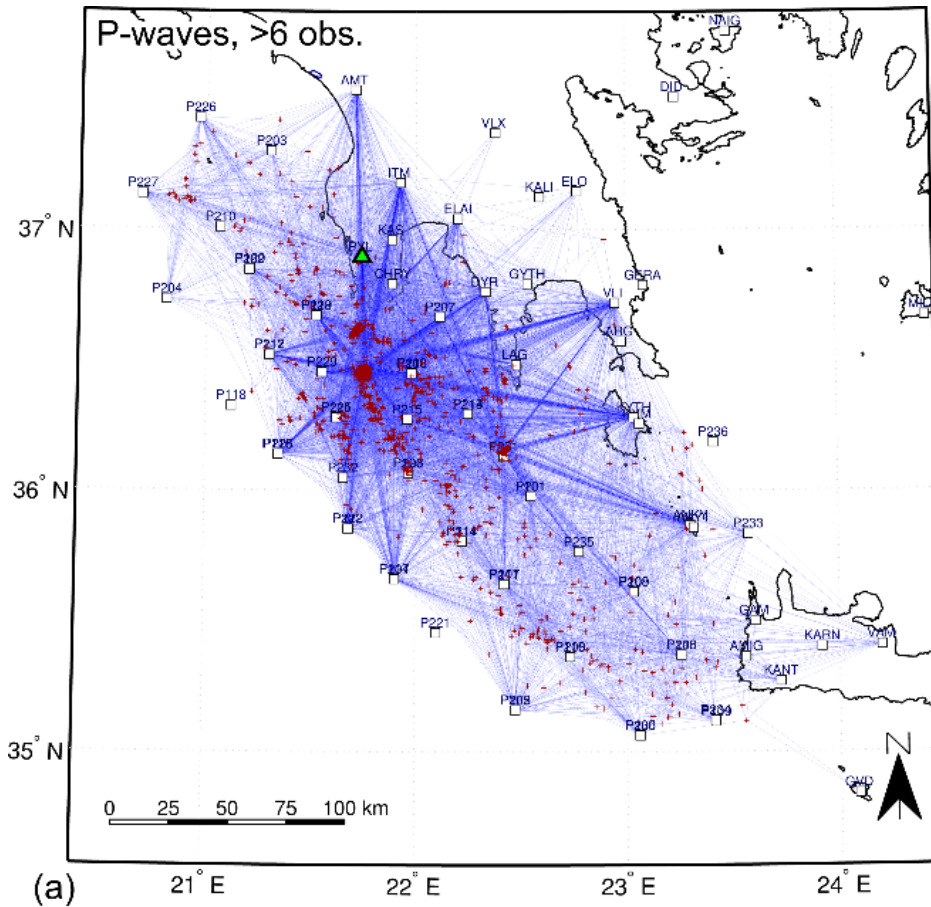
Αρχικά / Τελικά μοντέλα



Αρχικά / Τελικά μοντέλα



Κάλυψη σεισμικών ακτίνων



- Husen, S., , E., Flueh, E., Asch, G., 1999. Accurate hypocentre determination in the seismogenic zone of the subducting Nazca Plate in northern Chile using a combined on-/offshore network. *Geophys. J. Int.* 138, 687–701. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246x.1999.00893.x>
- Kissling, E., 1988. Geotomography with local earthquake data. *Rev. Geophys.* 26, 659–698. <https://doi.org/10.1029/RG026i004p00659>
- Kissling, E., Ellsworth, W.L., Eberhart-Phillips, D., Kradolfer, U., 1994. Initial reference models in local earthquake tomography. *J. Geophys. Res.* <https://doi.org/10.1029/93jb03138>
- Kissling, E., Kradolfer, U., & Maurer, H. (1995). VELEST user's guide: Short introduction. Inst. of Geophys. and Swiss Seismol. Serv., ETH. Zurich.
- Matrullo, E., De Matteis, R., Satriano, C., Amoroso, O., Zollo, A., 2013. An improved 1-D seismic velocity model for seismological studies in the Campania–Lucania region (Southern Italy). *Geophys. J. Int.* 195, 460–473. <https://doi.org/10.1093/gji/ggt224>
- Pujol, J. (2000). Joint Event Location — The JHD Technique and Applications to Data from Local Seismic Networks. In: Thurber, C.H., Rabinowitz, N. (eds) *Advances in Seismic Event Location. Modern Approaches in Geophysics*, vol 18. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9536-0_7
- Sachpazi, M., Kapetanidis, V., Charalampakis, M., Laigle, M., Kissling, E., Fokaefs, A., Daskalaki, E., Flueh, E., Hirn, A., 2020. Methoni Mw 6.8 rupture and aftershocks distribution from a dense array of OBS and land seismometers, offshore SW Hellenic subduction. *Tectonophysics* 796, 228643. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228643>