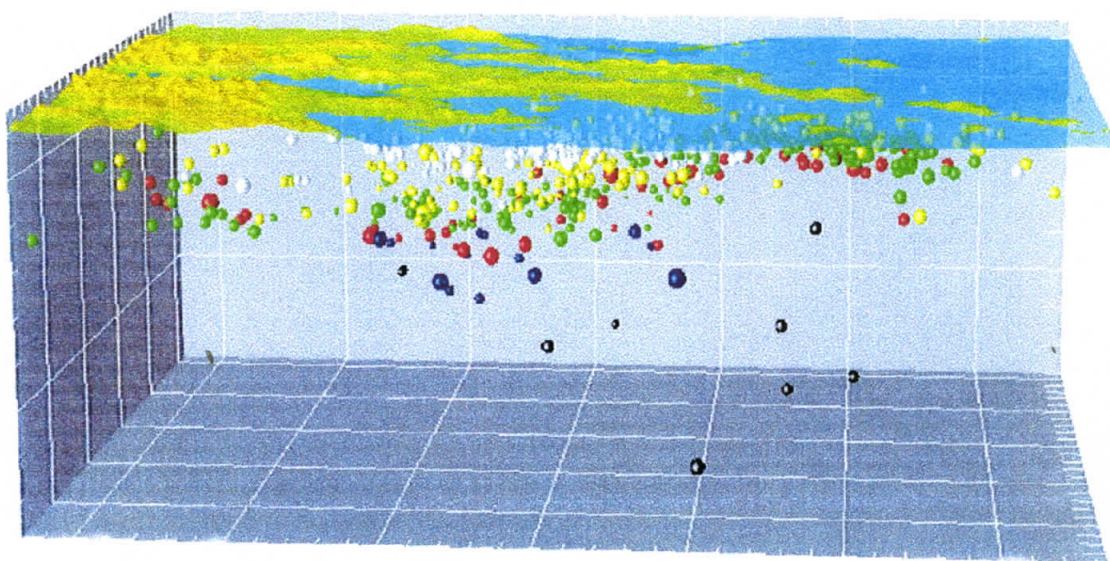


ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ – ΜΕΛΕΤΗ  
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ

## ΜΙΚΡΟΣΕΙΣΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΣΑΡΩΝΙΚΟΥ ΚΟΛΠΟΥ

ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ  
(ΠΕΡΙΛΗΨΗ)

ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ: Δρ. ΔΡΑΚΑΤΟΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ



ΑΝΑΔΟΧΟΣ ΦΟΡΕΑΣ : ΓΕΩΔΥΝΑΜΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ  
ΕΘΝΙΚΟΥ ΑΣΤΕΡΟΣΚΟΠΕΙΟΥ ΑΘΗΝΩΝ

ΑΘΗΝΑ 2002

## ***1. Πρόλογος***

Η παρούσα μελέτη αποτελεί την Τελική Έκθεση του έργου 'Μικροσεισμική Μελέτη και Δομή του Σαρωνικού Κόλπου', η οποία ανατέθηκε από τον Οργανισμό Αντισεισμικού Σχεδιασμού και Προστασίας στο Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών (Επ. Υπεύθυνος: Δρ. Δρακάτος Γεώργιος), σύμφωνα με τη Σύμβαση 24-11-2000 (100/11-10-2000 απόφαση του ΔΣ του ΟΑΣΠ).

Το έργο πραγματοποιήθηκε, όπως άλλωστε προεβλέπετο από την προαναφερθείσα Σύμβαση, με τη συμμετοχή τόσο του τμήματος Γεωφυσικής του Πανεπιστημίου του Αμβούργου (Επιστημονικός Υπεύθυνος ο Καθηγητής Γιάννης Μακρής) όσο και του Εθνικού Κέντρου Θαλασσιών Ερευνών (Επιστημονικός Υπεύθυνος η Δρ. Παπούλια Ιωάννα).

Όλους όσους συνέβαλλαν, επιστήμονες, τεχνικούς διοικητικούς, στην επιτυχή ολοκλήρωση του έργου, θερμά ευχαριστούμε.

## ***2. Σκοπιμότητα του Έργου***

Η τεκτονική δομή του Σαρωνικού Κόλπου δεν έχει προσδιοριστεί επαρκώς. Η πιθανή επέκταση των ενεργών ρηξιγενών ζωνών του Κορινθιακού Κόλπου προς ανατολάς και ειδικότερα προς την περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου επιβάλλει τη λεπτομερή χαρτογράφηση της δομής της περιοχής αυτής.

Ο προσδιορισμός των ρηγμάτων θα μας βοηθήσει να εκτιμήσουμε τα αναμενόμενα μεγέθη σεισμών και κύρια τη δυναμική τους κατάσταση.

Η εμπειρία του σεισμού της Αθήνας, μας δίδαξε ότι άγνωστες ρηξιγενείς ζώνες μπορεί να αποτελέσουν μελλοντική εστία ισχυρού σεισμού με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Εξάλλου, η σεισμική δράση στο Σαρωνικό Κόλπο δεν είναι αμελητέα, ιδιαίτερα σε ενδιάμεσα εστιακά βάθη. Λόγω της μικρής, σχετικά, απόστασης από την περιοχή της Αττικής, επιβάλλεται η λεπτομερής γνώση όσον αφορά τη δομή της συγκεκριμένης περιοχής και της πιθανότητας ενεργοποίησής της.

### **3. Μεθοδολογία**

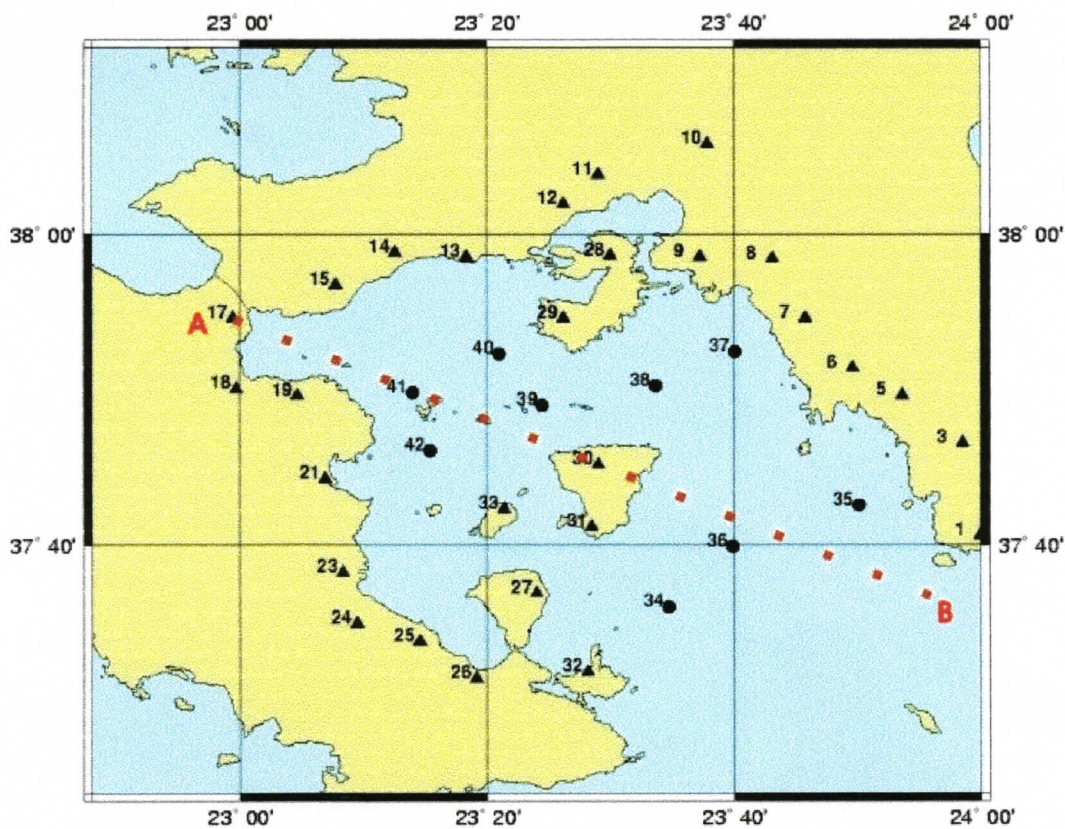
Για την επίτευξη των στόχων του έργου πραγματοποιήθηκαν τα ακόλουθα:

- αρχικά έγινε εγκατάσταση σεισμολογικού δικτύου στην περιοχή ενδιαφέροντος. Μέχρι σήμερα, δεν είχε εγκατασταθεί μικροσεισμικό δίκτυο στην περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου για την καταγραφή της σεισμικής δραστηριότητας με τη χρήση σειсмоγράφων θαλάσσιου πυθμένα. Η μικροσεισμική δραστηριότητα, όπως παρακολουθείται με τους σεισμολογικούς σταθμούς ξηράς, δεν μπορεί να θεωρηθεί πλήρης και ικανή να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή χαρτογράφηση των ρηγμάτων στο Σαρωνικό Κόλπο.
- πραγματοποιήθηκε προσδιορισμός δισδιάστατου μοντέλου ταχύτητας με τη Μέθοδο Σεισμικής Ανάκλασης Ευρείας Γωνίας (Wide Angle Refraction Reflection Profile, WARRP) και μοντελοποίηση της δομής του φλοιού.
- εφαρμόστηκε η Μέθοδος της Σεισμικής Τομογραφίας για τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης κατανομής της ταχύτητας.

Τα παραπάνω περιγράφονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια.

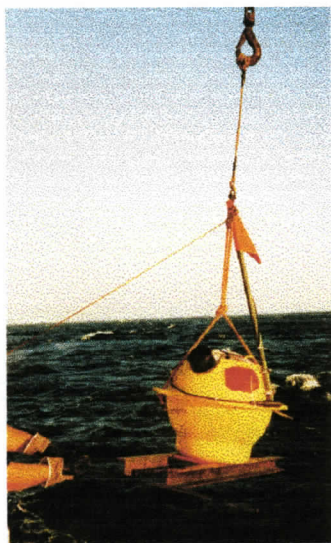
### **4. Καταγραφή της μικροσεισμικότητας**

Με στόχο την δημιουργία ενός πυκνού δικτύου σειсмоγράφων, ώστε να είναι εφικτός ο προσδιορισμός με μεγάλη ακρίβεια των υποκέντρων των μικροσεισμών, πραγματοποιήθηκε ταυτόχρονη εγκατάσταση είκοσι ενέα (29) χερσαίων και δέκα (10) σειсмоγράφων θαλάσσιου πυθμένα (OBS) γύρω και στο εσωτερικό του Σαρωνικού Κόλπου. Οι ακριβείς θέσεις των σειсмоγράφων φαίνονται στο χάρτη του Σχήματος 1.



**Σχήμα 1** Κατανομή χερσαίων (▲) και υποθαλάσσιων (●) σειсмоγράφων.  
 Κατά μήκος της ευθείας AB εφαρμόσθηκε η μέθοδος WARRP

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι από τα πλέον σύγχρονα και χρησιμοποιούνται σε σεισμολογικές και γεωφυσικές έρευνες σε όλο τον κόσμο. Τα όργανα είναι ψηφιακά, τριών συνιστωσών και ενοικιάσθηκαν για τις ανάγκες του έργου από τη Γερμανική εταιρεία GeoPro GMBH (Αμβούργο). Τόσο οι θαλάσσιοι σειсмоγράφοι (OBS) όσο και οι χερσαίοι (Σχήματα 2, 3, 4 και 5) χρησιμοποιούν το σεισμικό καταγραφικό SEDIS III, το οποίο έχει ανπτυχθεί από την παραπάνω εταιρεία



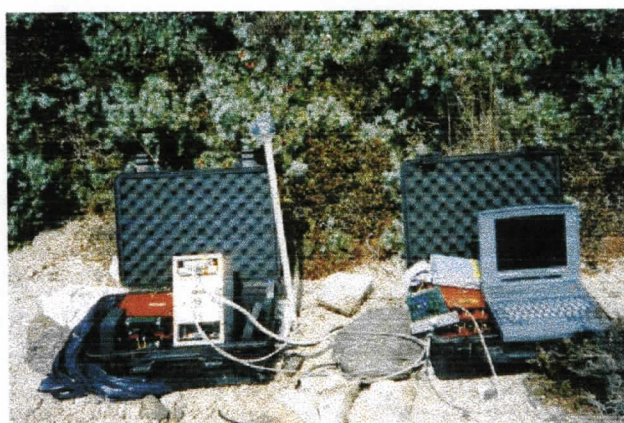
**Σχήμα 2** Πόντιση σειсмоγράφου  
θαλάσσιου πυθμένα



**Σχήμα 3** Σεισμογράφος  
θαλάσσιου πυθμένα



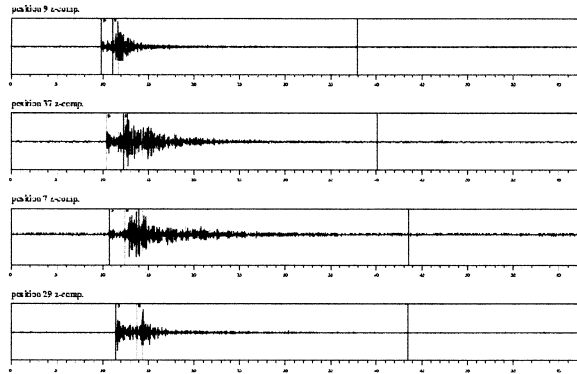
**Σχήμα 4** Ανάσυρση OBS



**Σχήμα 5** Χερσαίος σεισμογράφος

Το δίκτυο λειτούργησε για χρονικό διάστημα δύο περίπου μηνών. Συνολικά καταγράφησαν περισσότεροι από χίλιοι πεντακόσιοι (1500) σεισμοί διαφόρων μεγεθών, οι οποίοι προέρχονταν από διάφορες περιοχές. Ο αριθμός καταγραφής ανά ημέρα δεν ήταν σταθερός. Ο προσδιορισμός των επικέντρων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του αλγορίθμου HYPOINVERSE. Στο Σχήμα 6 παρουσιάζεται ένα δείγμα κυματομορφής των καταγεγραμμένων σεισμών.

08.11.2001 08:50:41



**Σχήμα 6** Κυματομορφή μικροσεισμού μικρής επικεντρικής απόστασης

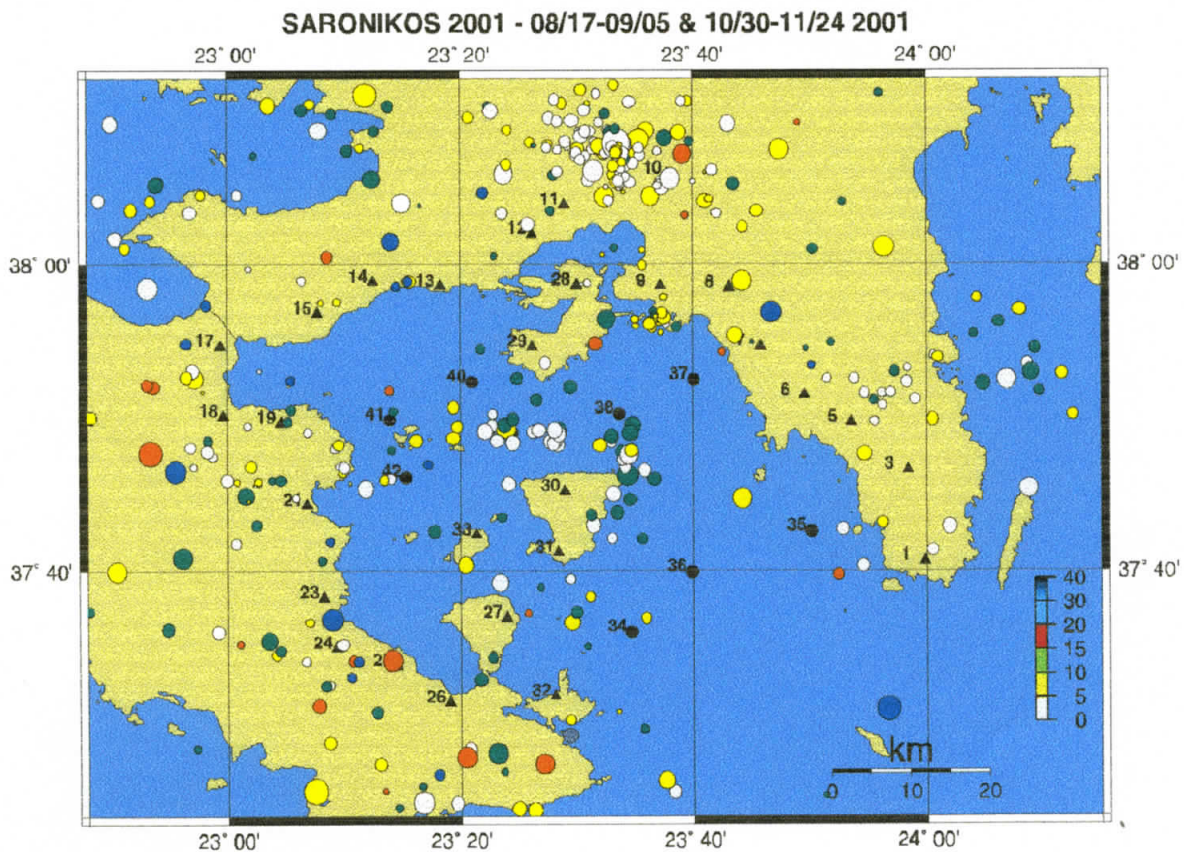
Το μοντέλο ταχυτήτων που χρησιμοποιήθηκε δίνεται στον παρακάτω ΠΙΝΑΚΑ (προσδιορίσθηκε με τη μέθοδο WARRP).

### Π Ι Ν Α Κ Α Σ

**Μοντέλο Ταχυτήτων για την περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου**

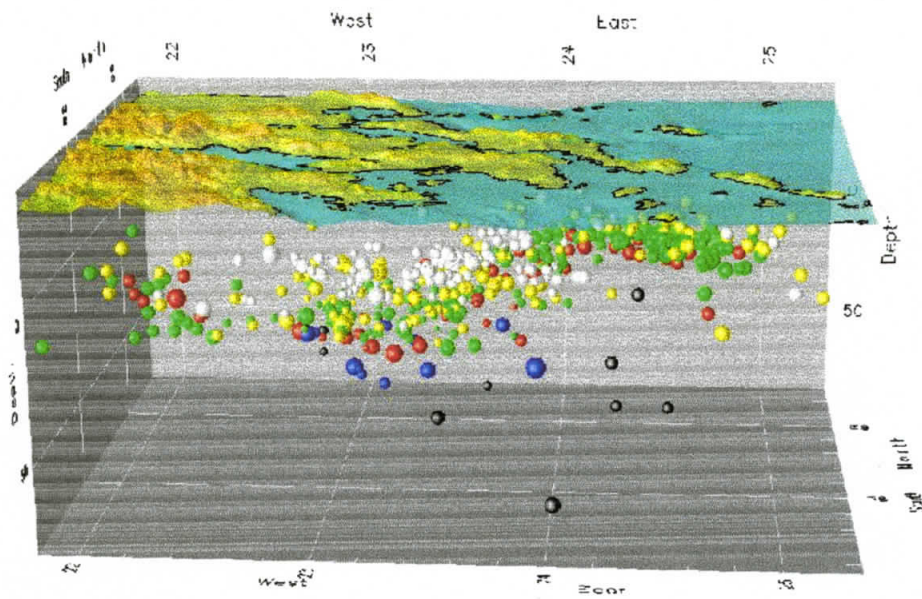
<i>Ταχύτητα (km/s)</i>	<i>Βάθος (km)</i>
4.70	0.0
5.70	3.0
6.80	7.0
8.10	17.0

Στην ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος (37.4 B – 38.2 B, 22.8 A – 24.2 A) προσδιορίστηκαν τετρακόσιοι σαράντα πέντε σεισμοί (445) με μέγεθος  $0.3 < M_L < 3.8$ . Η κατανομή των επικέντρων τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.



**Σχήμα 7** Κατανομή επικέντρων στην περιοχή μελέτης

Τέλος, στο Σχήμα 8 δίνεται η τρισδιάστατη κατανομή των επικέντρων των σεισμών. Το μεγαλύτερο ποσοστό των υποκέντρων ευρίσκεται σε μικρά βάθη (στον φλοιό). Από το βάθος όμως των 40 km και κάτω και σε διεύθυνση Δ - Α, παρατηρείται μια αύξηση των εστιακών βαθών στην περιοχή του Σαρωνικού, η οποία πιθανά συνδέεται με την καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας.



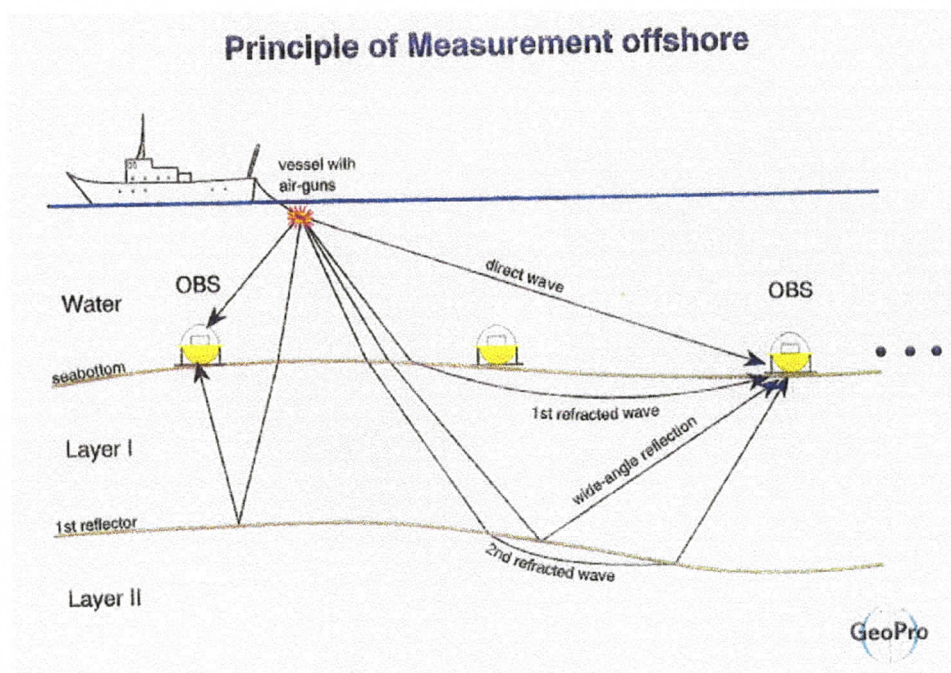
**Σχήμα 8** Τρισδιάστατη κατανομή επικέντρων στην περιοχή του Κορινθιακού Κόλπου



## 5. Μέθοδος Σεισμικής Ανάκλασης Ευρείας Γωνίας

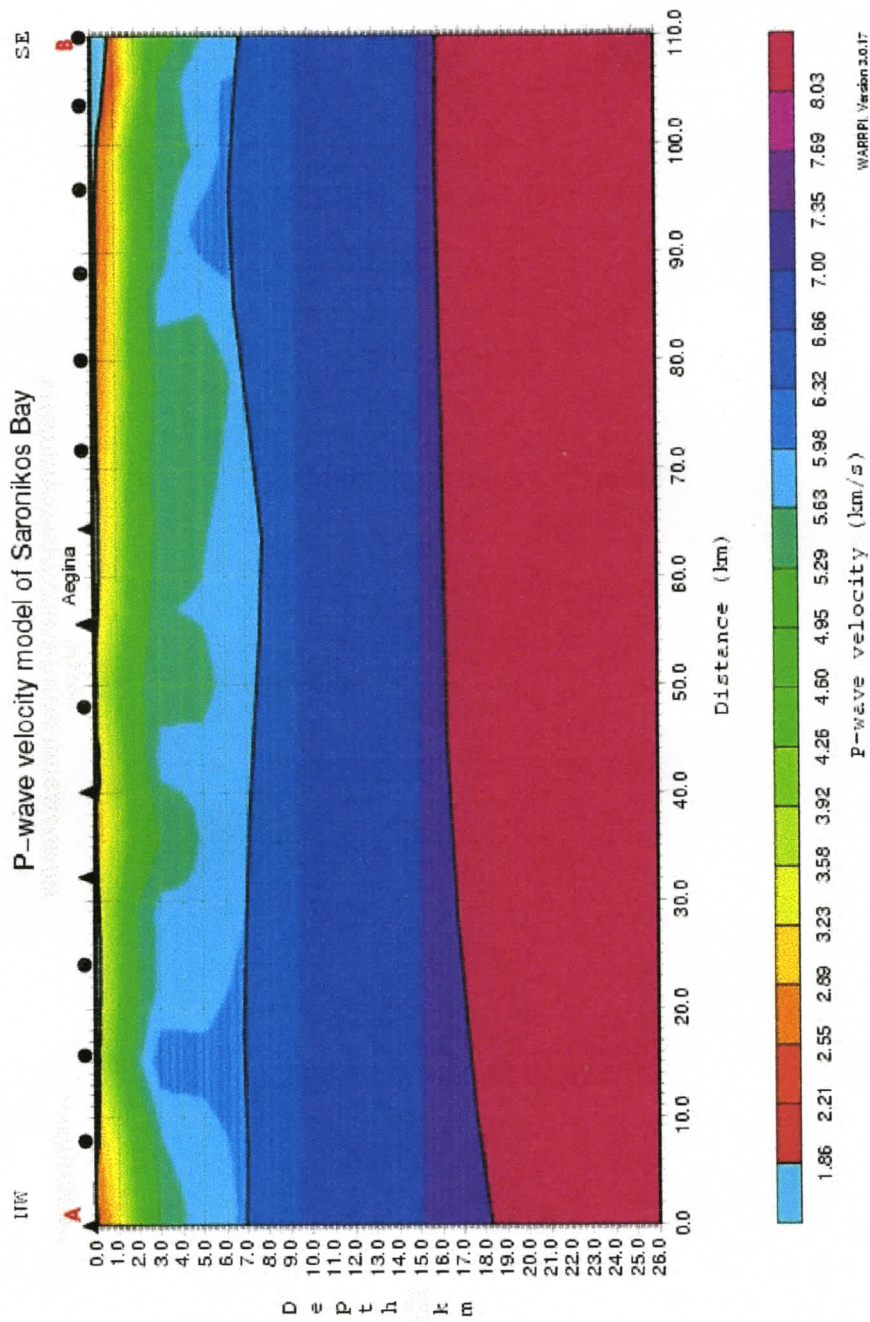
Η μέθοδος γεωφυσικής διασκόπησης με σεισμική ανάκλαση ευρείας γωνίας είναι μια σχετικά καινούργια μέθοδος με μεγάλο πεδίο εφαρμογής, σχεδόν σε όλες τις περιβαλλοντικές συνθήκες και δυνατότητα βαθειάς διεξόδου.

Η αρχή της μεθόδου σεισμικής ανάκλασης ευρείας γωνίας για γεωφυσική διασκόπηση με χρήση υποθαλασσιών σειсмоγράφων, φαίνεται στο Σχήμα 9.



**Σχήμα 9** Αρχή μετρήσεων σύμφωνα με τη μέθοδο WARRP

Η σεισμική διασκόπηση πραγματοποιήθηκε κύρια από το ΕΚΘΕ, τη Γερμανική ερευνητική ομάδα και το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του ΕΑΑ. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το ερευνητικό σκάφος Ω/Κ ΑΙΓΑΙΟ. Για την καταγραφή της σεισμικής τομής έγινε πόντιση δέκα (10) OBS και χρησιμοποιήθηκαν πέντε (5) σταθμοί ξηράς. Η ανάπτυξη των οργάνων έγινε κατά μήκος του ευθυγράμμου τμήματος ΑΒ (Σχήμα 1). Ως τεχνητή πηγή ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ένα ηχοβολιστικό σύστημα (Airgun) τύπου BOLT, συνολικού όγκου 48 λίτρων. Η προσδιορισθείσα δομή του φλοιού παρουσιάζεται στο Σχήμα 10.



**Σχήμα 10** Δομή του φλοιού του Σαρωνικού Κόλπου κατά μήκος της τομής AB, ( με τη μορφή διαδιάστατης κατανομής της ταχύτητας)

## 5. Μέθοδος Σεισμικής Τομογραφίας

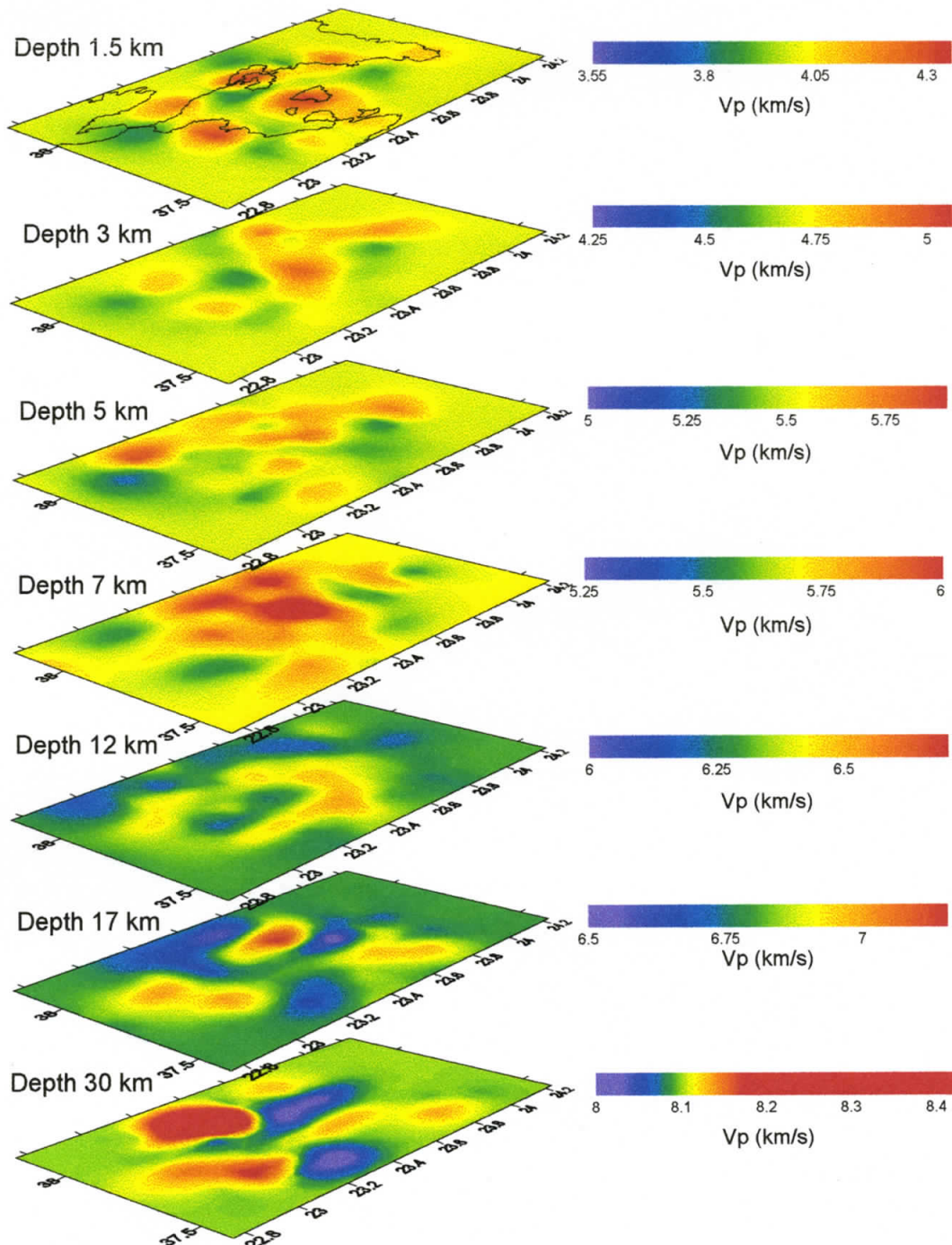
Τα πρώτα μοντέλα δομής του εσωτερικού της γης ελάμβαναν υπόψη μόνο την κατακόρυφη μεταβολή της ταχύτητας των σεισμικών ακτίνων. Σύμφωνα με αυτά, η γήινη σφαίρα εδαιρείτο σε στρώματα παράλληλα, εντός των οποίων η ταχύτητα των ακτίνων παρέμενε σταθερή.

Η ταχύτερη εξέλιξη των Η/Υ κατά τις τελευταίες δεκαετίες επέτρεψε την ανάπτυξη και εφαρμογή σύνθετων μαθηματικών τεχνικών (όπως η μέθοδος της αντιστροφής) και ως εκ τούτου τον προσδιορισμό τρισδιάστατων μοντέλων ταχύτητας. Στα πλαίσια αυτά, τα τελευταία είκοσι χρόνια αναπτύχθηκε η μέθοδος της σεισμικής Τομογραφίας, η οποία χρησιμοποιώντας είτε σεισμολογικά είτε γεωφυσικά δεδομένα επιτρέπει τον προσδιορισμό και των πλευρικών μεταβολών της ταχύτητας.

Με στόχο τον προσδιορισμό της κατανομής της ταχύτητας στην περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου, έγινε αντιστροφή των χρονικών υπολοίπων (time residuals) των χρόνων άφιξης των Ρ-κυμάτων μέθοδος χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Thurber. Η μέθοδος αυτή έχει εφαρμοσθεί με μεγάλη επιτυχία σε περιοχές μικρής έκτασης τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό. Ένα από τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το γεγονός της χρησιμοποίησης καμπύλων ακτίνων αντί ευθυγράμμων παρά τη μικρή έκταση της εξεταζόμενης περιοχής.

Από το αρχικό σύνολο των μικροσεισμών, στην ανάλυση συμπεριελήφθησαν όσοι είναι αναγεγραμμένοι σε τουλάχιστον έξι (6) σταθμούς. Ο συνολικός αριθμός των σεισμών αυτών στην αρχή της τομογραφίας (input) ήταν τριακόσιοι εβδομήντα τέσσαρες (374). Στην περιοχή μελέτης θεωρήθηκε κάρναβος με δώδεκα (12) και εννέα (9) κόμβους κατά τις διευθύνσεις Α – Δ και Β – Ν, αντίστοιχα. Η απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων κατά τη διεύθυνση Α – Δ και Β – Ν κυμαίνεται από 10 έως 15 km. Στην κατακόρυφη διεύθυνση θεωρήθηκαν επτά οριζόντια στρώματα, σε βάθη 1.5, 3, 5, 7, 12, 17 και 30 km. Οι τιμές ταχύτητας που αρχικά σημειώθηκαν σε κάθε οριζόντιο στρώμα είναι 4, 4.7, 5.5, 5.7, 6.3, 6.8 και 8.1 km/s, αντίστοιχα. Συνολικά, χρησιμοποιήθηκαν στην αντιστροφή 3487 χρόνοι άφιξης Ρ-κυμάτων, ενώ για τον επαναπροσδιορισμό των εστιακών παραμέτρων ελήφθησαν υπόψη και οι χρόνοι άφιξης των S-κυμάτων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 11.

## 3D P-wave velocity model of Saronikos Gulf



Σχήμα 11 Τρισδιάστατη κατανομή ταχυτήτων στην περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου

## 6. Συμπεράσματα

### Δομή του Σαρωνικού Κόλπου

- Τόσο η αρχικά προσδιορισθείσα μικροσεισμικότητα όσο και η κατανομή των επαναπροσδιορισθέντων από την αντιστροφή επικέντρων περιγράφουν τη μορφολογία του Σαρωνικού Κόλπου. Συγκεκριμένα, η σεισμικότητα, από δυτικά προς ανατολικά, περιορίζεται κατά μήκος μιας ζώνης διεύθυνσης BBA – NNA (Πόρος - Αίγινα – Σαλαμίνα), η οποία διαιρεί το Σαρωνικό Κόλπο σε δυτικό και ανατολικό τμήμα. Πρόκειται για σεισμικότητα μικρού βάθους, κατά μήκος μιας αβαθούς πλατφόρμας διεύθυνσης B – N, τμήματα της οποίας αναδύονται και αποτελούν τη χερσόνησο των Μεθάνων και τα νησιά Πόρο, Αίγινα, Αγκίστρι και Σαλαμίνα. Η δομή αυτή φαίνεται να συνεχίζεται μέχρι το βάθος των 12 km περίπου, υποδηλώνοντας την ύπαρξη ρηξιγενούς ζώνης στην περιοχή.
- Ο δυτικός Σαρωνικός χωρίζεται σε βόρειο και νότιο τμήμα από μία σαφώς προσδιορισμένη ζώνη σεισμικότητας διεύθυνσης A – Δ, η οποία παρατηρείται μεταξύ της περιοχής Σοφικού και Αιγίνης. Πρόκειται για τις λεκάνες των Μεγάρων και της Επιδάουρου, στις οποίες εμφανίζονται διαφορετικές τιμές ταχύτητας.
- Το μικρό σχετικά πάχος του φλοιού πρέπει να είναι αποτέλεσμα αφενός του εφελκυστικού πεδίου τάσεων στην περιοχή, αφετέρου της ανόδου του υλικού του μανδύα εξαιτίας της ύπαρξης του ηφαιστειακού τόξου.

### Σεισμικότητα του Σαρωνικού Κόλπου

- Η σεισμικότητα του κεντρικού τμήματος του Σαρωνικού είναι εμφανώς μεγαλύτερη εκείνης τόσο του δυτικού όσο και του ανατολικού τμήματος.
- ανατολικά της νήσου Αίγινας, παρατηρείται μια ευθυγράμμιση των επικέντρων με διεύθυνση BBA – NNA, η οποία συμπίπτει με το ρήγμα που σημειώνεται στην ίδια περιοχή, γεγονός που υποδηλώνει ότι το ρήγμα αυτό είναι ενεργό.
- Από την περιοχή Σοφικού Κορινθίας αρχίζει μια άλλη συγκέντρωση επικέντρων διεύθυνσης Δ – Α, η οποία καταλήγει βόρεια της νήσου Αίγινας και συμπίπτει με την

ρηξιγενή ζώνη ίδιας διεύθυνσης που σημειώνεται στο χάρτη. Πρόκειται επίσης για ενεργό ρήγμα, μήκους περίπου 30 km, το οποίο μέχρι σήμερα δεν έχει προκαλέσει ισχυρό σεισμό.

- Παρατηρείται χαμηλή δραστηριότητα των μικρών ρηγμάτων του ανατολικού τμήματος της βορειοανατολικής Πελοποννήσου.
- Δραστηριότητα εμφανίζεται στην περιοχή των Αλκυονιδών και Περαχώρας
- Ένα χρόνο μετά το σεισμό της Πάρνηθας, η μετασεισμική ακολουθία συνεχίζεται με πολύ μικρά σεισμικά μεγέθη, παρουσιάζοντας αξιοσημείωτη συγκέντρωση των μετασεισμών κοντά στην επικεντρική περιοχή.
- Ασθενής μικροσεισμική δραστηριότητα παρατηρείται στην περιοχή των Μεσογείων και συγκεκριμένα στο νότιο περιθώριο της λεκάνης της Μεσογαίας
- Μικρή δραστηριότητα τέλος, με μικρά σεισμικά μεγέθη, παρατηρείται στην περιοχή των νοτίων προαστίων της Αθήνας, δείχνοντας να οφείλεται σε τοπικούς παράγοντες
- Αξίζει κατά τη γνώμη μας να σημειωθεί η σχεδόν πλήρης έλλειψη μικροσεισμικότητας στη μεγάλη ρηξιγενή ζώνη της Κακιάς Σκάλας.

Γενικά δεν παρατηρείται, τουλάχιστον για το χρονικό διάστημα που διήρκεσε το πείραμα, έντονη και αξιοσημείωτη σεισμικότητα στην περιοχή. Είναι πιθανό η περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου να επηρεάζεται πολύ λιγότερο, σε σχέση με τον παρακείμενο Κορινθιακό Κόλπο, από το εφελκυστικό πεδίο τάσεων που προκαλεί τις μεγάλες ρηξιγενείς ζώνες γενικής διεύθυνσης Α – Δ. Από τα προαναφερθέντα γίνεται φανερό ότι η περιοχή του Σαρωνικού Κόλπου, παρά τη γειτνιάσή της (κυρίως δυτικά και βόρεια) με περιοχές υψηλής σεισμικότητας, δεν παρουσιάζει έντονη σεισμική δραστηριότητα.