

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ - ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ & ΓΕΩΘΕΡΜΙΑΣ



ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΤΟΥ
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥ ΑΝΤΙΣΕΙΣΜΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑΣ (Ο.Α.Σ.Π.)

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΒΑΘΕΙΑΣ ΔΟΜΗΣ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΟΔΥΤΙΚΗΣ
ΑΤΤΙΚΗΣ
ΜΕ ΤΗ ΣΥΝΔΡΟΜΗ ΓΕΩΦΥΣΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΔΙΑΣΚΟΠΗΣΗΣ

ΤΕΥΧΟΣ Α
ΤΕΛΙΚΗ ΕΚΘΕΣΗ

Επιστημονικός Υπεύθυνος του Έργου: Δρ. Ταξιάρχης Παπαδόπουλος
Αναπλ. Καθηγητής, Εφαρμ. Γεωφυσικής

ΑΘΗΝΑ
ΙΟΥΝΙΟΣ 2003

Περιεχόμενα

1. Γενικά.....	4
2. Γεωλογική-τεκτονική επισκόπηση	6
2.1 Αλπική δομή	6
2.2 Μεταλπική δομή	6
2.3 Νεοτεκτονική δομή και παραμόρφωση	7
3. Βαρυτικές Μετρήσεις	10
3.1 Βαρυτικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής.....	11
3.2 Συλλογή βαρυτικών δεδομένων - Μετρήσεις.....	12
3.2.α Βαρυτικές Παρατηρήσεις	13
3.2.β Βαρυτικές Ανωμαλίες	14
3.2.γ Χωρικές συντεταγμένες των Βαρυτικών Σταθμών.....	14
3.2.δ Συστήματα Προβολής	15
3.2.ε Υπολογισμός Συντελεστή Τοπογραφικής Διόρθωσης (T).....	16
3.3 Εργαστηριακός Προσδιορισμός Πυκνοτήτων (ρ).....	19
3.4 Διαγράμματα Τομών Βαρυτικών Ανωμαλιών	28
3.5 Διαχωρισμός Τοπικών και Ευρείας Κλίμακας Ανωμαλιών.....	32
3.6 Ερμηνεία Βαρυτικών Ανωμαλιών	33
3.6.α Μεθοδολογία.....	33
3.6.β Ερμηνεία Υπολειμματικής Βαρυτικής Ανωμαλίας	34
3.6.γ Συνθετικός Σχολιασμός Βαρυτικών Τομών.....	51
3.7 Βαρυτικός Χάρτης της περιοχής μελέτης	53
3.7.α Υφιστάμενη κατάσταση.....	53
3.7.β Έλεγχος Βαρυτικών Σταθμών - Απόρριψη Σταθμών	58
3.7.γ Κατασκευή Τελικού Χάρτη	58
4. Μετρήσεις GPS.....	61
5. Σεισμικές διασκοπήσεις	62
5.1 Σεισμική Τομή 1	62
5.2 Σεισμική Τομή 2	63
5.3 Σεισμική Τομή 3	63
5.4 Επεξεργασία και ερμηνεία σεισμικών καταγραφών.....	64
5.4.1 Εφαρμογή του αλγόριθμου «ελαχίστων διαδρομών».....	64
5.4.2 Επεξεργασία των δεδομένων με την τεχνική της «προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς» (Ray-tracing modeling).....	74

6. Γεωλογική – τεκτονική ερμηνεία των βαρυτικών και των σεισμικών τομών	81
6.1 Θριάσιο Πεδίο.....	81
6.2 Λεκανοπέδιο Αθηνών	82
7. Συμπεράσματα	84
8. Παραδοτέα προϊόντα - Αποτίμηση του ερευνητικού έργου	85
9. Προτάσεις	87
Βιβλιογραφικές Αναφορές.....	88

1. Γενικά

Το παρόν ερευνητικό πρόγραμμα ανατέθηκε από τον ΟΑΣΠ (με την υπ' αριθμ. 100/11-10-2000 απόφαση) στο Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ), με επιστημονικό υπεύθυνο τον κ. Ταξιάρχη Παπαδόπουλο, Αναπλ. Καθηγητή Εφαρμ. Γεωφυσικής. Στα πλαίσια παράδοσης του έργου αυτού, υποβάλλεται η παρούσα Τελική Έκθεση σύμφωνα με τους όρους της Σύμβασης. Οι ερευνητικές εργασίες υπαίθρου διεξήχθησαν σύμφωνα με το υποβληθέν στη Σύμβαση χρονοδιάγραμμα, αλλά για την επεξεργασία και τη σύνταξη της μελέτης απαιτήθηκε εξάμηνη παράταση του έργου, που ενέκρινε ο ΟΑΣΠ κατόπιν σχετικής αίτησης του επιστημονικού υπεύθυνου.

Το πείραμα της διερεύνησης της δομής της κεντρο-δυτικής Αττικής παρουσίασε αρκετά προβλήματα ως προς την υλοποίηση του. Τα περισσότερα προβλήματα ξεπεράσθηκαν, ιδιαίτερα εκείνα που αφορούσαν το σχεδιασμό και την πληρότητα των στοιχείων για μια πιο αξιόπιστη ερμηνεία (π.χ. οι βαρυτικές μετρήσεις). Υπήρξαν όμως και προβλήματα που ανέκυψαν από ενδογενείς αδυναμίες των μεθόδων που χρησιμοποιήθηκαν. Η σεισμική μέθοδος π.χ., παρόλο που σχεδιάσθηκε με προσοχή για να αποδώσει τα «μέγιστα» για την απόκτηση γεω-πληροφοριών που θα μπορούσε κανείς να πάρει, δεν απέδωσε τα αναμενόμενα, διότι η υπόγεια δομή έδρασε ως ισχυρό φίλτρο και μικρό ποσό ενέργειας διείσδυσε βαθύτερα, με αποτέλεσμα να μη ληφθούν εκείνες οι καταγραφές (φάσεις) που θα μας οδηγούσαν στη διερεύνηση της βαθύτερης δομής.

Πέραν των δυσκολιών που προέκυψαν και τη συγκρατημένη αισιοδοξία ως προς την «ποσότητα» των πληροφοριών που αποκτήθηκαν, πιστεύουμε ότι το πείραμα αυτό έχει αποδώσει καρπούς και θα ρίξει φως στη σεισμο-τεκτονική δομή της περιοχής που ερευνήθηκε.

Στις βαρυτικές μετρήσεις υπαίθρου κατά την πρώτη φάση των εργασιών, που διήρκεσαν από 2-5-2001 έως 24-5-2001, έλαβαν μέρος οι: Ταξιάρχης Παπαδόπουλος, υπεύθυνος του έργου, Ευάγγελος Λάγιος, Καθηγητής γεωφυσικής, κύριος ερευνητής, Νεονέλλης Τζανέτος, γεωλόγος, μεταπ/κός φοιτητής, Γεώργιος Γκούμας, φοιτητής Γεωλογίας, Yvonne Fraser, μεταπ/κή φοιτήτρια του Παν/μίου Durham Αγγλίας και Lesley Dunlop, μεταπ/κή φοιτήτρια του Παν/μίου Durham Αγγλίας. Κατά τη δεύτερη και συμπληρωματική φάση των βαρυτικών μετρήσεων υπαίθρου, που διήρκεσε από 2-4-2002 έως 25-04-2002, έλαβαν μέρος οι: Ταξιάρχης Παπαδόπουλος, υπεύθυνος του έργου, Στυλιανός Χάϊλας, γεωλόγος, υποψ. Διδάκτορας και Γεώργιος Γκούμας, φοιτητής Γεωλογίας.

Η εκτέλεση των τριών σεισμικών τομών διεξήχθη κατά το χρονικό διάστημα 26 Νοεμβρίου 2001 έως 14 Δεκεμβρίου 2001. Στις εργασίες υπαίθρου συμμετείχαν οι: Ταξιάρχης Παπαδόπουλος, υπεύθυνος του έργου, Neil Goulty, Καθηγητής γεωφυσικής του Παν/μίου Durham της Αγγλίας, Δρ. Νικόλαος Βούλγαρης, Επίκ. Καθηγητής Σεισμολογίας, Δρ. Ιωάννης Αλεξόπουλος, γεωλόγος-γεωφυσικός, Δρ. Βασίλειος Καραστάθης, Ερευνητής ΕΑΑ, Δρ. Ιωάννης Κασσάρας, σεισμολόγος,

Δημήτριος Διαγουρτάς, υποψ. Διδάκτορας, έξη μεταπτυχιακοί φοιτητές και τρεις ηλεκτρονικοί (Γ. Μιχαλέτος, Θ. Βουράκης και Β. Νικολής).

Στην επεξεργασία και ερμηνεία των βαρυτικών μετρήσεων έλαβαν μέρος οι: Ταξιάρχης Παπαδόπουλος, υπεύθυνος του έργου, Ευάγγελος Λάγιος, Καθηγητής γεωφυσικής, κύριος ερευνητής, Neil Goulty, Καθηγητής γεωφυσικός του Παν/μίου Durham της Αγγλίας, Στυλιανός Χάϊλας, γεωλόγος, υποψ. Διδάκτορας, Δρ. Ιωάννης Αλεξόπουλος, γεωλόγος-γεωφυσικός και Γεώργιος Γκούμας, φοιτητής Γεωλογίας.

Στην επεξεργασία και ερμηνεία των σεισμικών διασκοπήσεων συμμετείχαν οι: Ταξιάρχης Παπαδόπουλος, υπεύθυνος του έργου, Δρ. Νικόλαος Βούλγαρης, Επίκ. Καθηγητής Σεισμολογίας, Πέτρος Καμπούρης, MSc γεωλόγος-γεωφυσικός, υποψ. Διδάκτορας Δρ. Βασίλειος Καραστάθης, Ερευνητής ΕΑΑ, Δρ. Ιωάννης Αλεξόπουλος, γεωλόγος-γεωφυσικός, Δρ. Ιωάννης Κασσάρας, σεισμολόγος και Μυρτώ Πυρλή, MSc σεισμολόγος, υποψ. Διδάκτορας.

Στην συνθετική αξιολόγηση όλων των στοιχείων, (βαρυτικών, σεισμικών, γεωτρητικών και γεωλογικών) συμμετείχαν οι: Ταξιάρχης Παπαδόπουλος, υπεύθυνος του έργου, Neil Goulty, Καθηγητής γεωφυσικός του Παν/μίου Durham της Αγγλίας, Δρ. Ιωάννης Φουντούλης, Επικ. Καθηγητής Γεωλογίας, Δρ. Νικόλαος Βούλγαρης, Επίκ. Καθηγητής Σεισμολογίας, Δρ. Ιωάννης Αλεξόπουλος, γεωλόγος-γεωφυσικός και Στυλιανός Χάϊλας, γεωλόγος, υποψ. Διδάκτορας.

2. Γεωλογική-τεκτονική επισκόπηση

2.1 Αλπική δομή

Η περιοχή έρευνας στο σύνολό της παρουσιάζει μία σύνθετη αλπική γεωλογική δομή. Απαντούν δύο βασικές κατηγορίες πετρωμάτων. Η μεταμορφωμένη ενότητα της Αττικής, η οποία δομεί κυρίως την Πεντέλη τον Υμηττό και γενικά τον ευρύτερο χώρο της Ανατολικής Αττικής και η μη μεταμορφωμένη ενότητα της Δυτικής Αττικής που απαντά κυρίως στην Πάρνηθα και το Αιγάλεω. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σεισμόπληκτη περιοχή βρίσκεται στα όρια των δύο ενοτήτων και προς την πλευρά της Πάρνηθας, παραμένει όμως αδιευκρίνιστη η τεκτονική σχέση τους στην περιοχή αυτή της Αττικής, δεδομένου ότι μέχρι σήμερα δεν έχει γίνει λεπτομερής χαρτογράφηση. Επιπλέον, η επαφή αυτή είναι καλυμμένη από το αλλόχθονο σύστημα το αποκαλούμενο και «Αθηναϊκοί σχιστόλιθοι» καθώς και από νεογενείς και τεταρτογενείς αποθέσεις. Το μόνο σίγουρο είναι ότι το αλλόχθονο σύστημα έχει τοποθετηθεί τεκτονικά πάνω στις δύο προαναφερθείσες βασικές ενότητες. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι υπάρχουν κάποιες ενδείξεις σύμφωνα με τις οποίες η μεταμορφωμένη ενότητα φαίνεται να υπέρκειται της μη μεταμορφωμένης (Γεωτρήσεις ΙΓΜΕ στον Κάλαμο). Η τεκτονική επαφή μεταξύ των μεταμορφωμένων και των μη μεταμορφωμένων ενοτήτων πρέπει να έχει διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ και πρέπει η θέση της να συμπίπτει με την κοίτη του Κηφισού ποταμού.

2.2 Μεταλπική δομή

Το δυτικό τμήμα του λεκανοπεδίου των Αθηνών αποτελεί ένα σύνθετο νεοτεκτονικό βύθισμα διεύθυνσης ΒΑ-ΝΔ που έχει σχηματισθεί μεταξύ των ορέων της Πάρνηθας και του Αιγάλεω στα δυτικά και της Πεντέλης και του Υμηττού στα ανατολικά, το οποίο έχει πληρωθεί κυρίως με λιμναίες και ποταμοχερσαίες αποθέσεις από το Ανώτερο Μειόκαινο μέχρι σήμερα. Οι παλαιότερες μεταλπικές αποθέσεις είναι ανωμειοκαινικής ηλικίας, λιμναίας φάσης, αποτελούμενες κυρίως από μάργες, και αργίλους με παρουσία λιγνιτών των οποίων γινόταν εκμετάλλευση στο Περιστερί και το Ν. Ηράκλειο. Το πάχος αυτών των αποθέσεων είναι μεγάλο και σύμφωνα με τον B.V. FREYBERG (1951) είναι μεγαλύτερο των 400m.

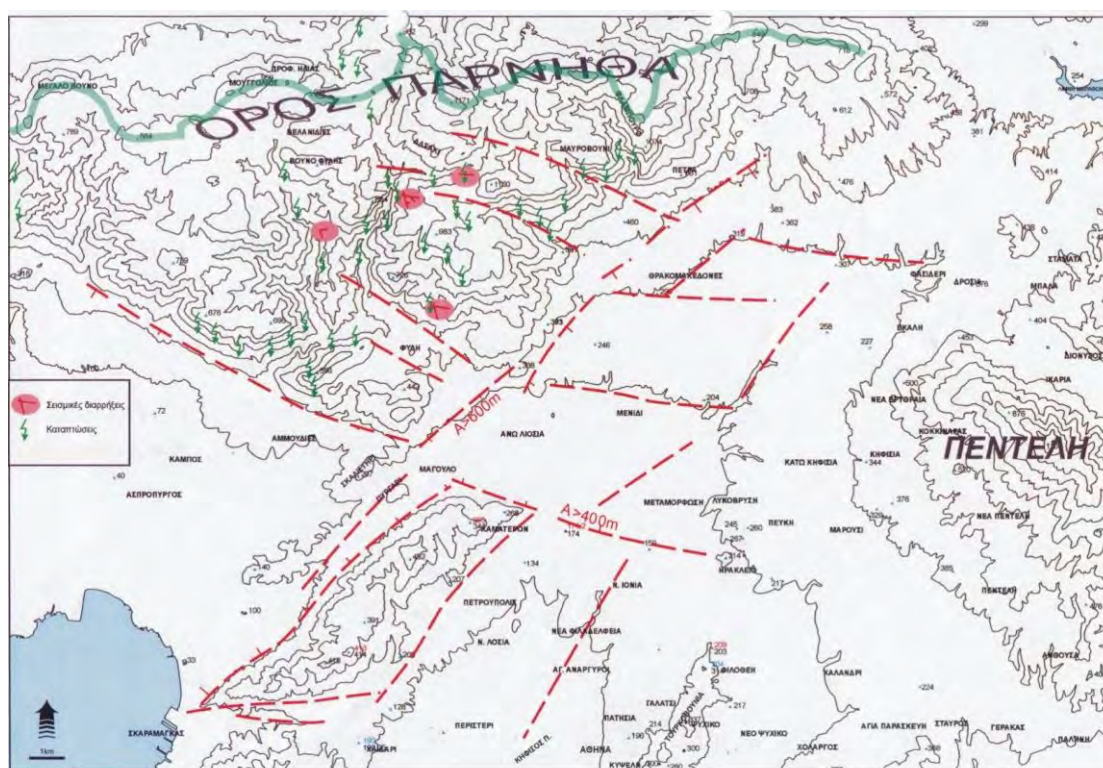
Κατά το Πλειόκαινο το υλικό που αποτίθεται είναι σαφώς πιο αδρομερές σε σχέση με εκείνο του Ανωτέρου Μειοκαίνου. Στη βάση απαντούν άμμοι και ψαμμίτες, οι οποίοι εξελίσσονται σε κροκαλοπαγή, ενώ η ιζηματογένεση κλίνει με λεπτομερές υλικό πάλι, ήτοι με λευκούς ασβεστόλιθους και αργίλους που πολύ πιθανά να περνάνε και στο Πλειστόκαινο (FREYBERG, 1951). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η προέλευση των κροκαλών των κροκαλοπαγών είναι αποκλειστικά από τα μεταμορφωμένα πετρώματα. Τα κροκαλοπαγή δεν απαντούν στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης δηλαδή στην περιοχή του Δαφνίου και του Περιστερίου, ενώ όσο προχωράμε από τα νοτιοδυτικά (Δαφνί, Περιστερί) προς τα βορειοανατολικά το πάχος τόσο των κροκαλοπαγών όσο και γενικά των πλειοκαινικών αποθέσεων αυξάνει. Για παράδειγμα το πάχος των πλειοκαινικών αποθέσεων στο Μενίδι υπερβαίνει τα 400m (FREYBERG, 1951).

Τέλος, οι νεογενείς αποθέσεις καλύπτονται από χερσαίες τεταρτογενείς ως επί το πλείστον αδρομερείς αποθέσεις, συνιστάμενες κυρίως από ποτάμιες αποθέσεις και κώνους κορημάτων. Η προέλευση του κλαστικού υλικού είναι αποκλειστικά από τα

αμεταμόρφωτα πετρώματα της Πάρνηθας σχηματίζοντας ένα πολύ χαρακτηριστικό κώνο στην περιοχή των Θρακομακεδόνων.

2.3 Νεοτεκτονική δομή και παραμόρφωση

Ο ευρύτερος χώρος της Αττικής παρουσιάζει μία σύνθετη μεταλλική μορφοτεκτονική δομή, η οποία αποτελείται από τα εξής μεγάλα ρηξιτεμάχη 1ης τάξης: τα τεκτονικά κέρατα της Πάρνηθας, του Αιγιάλεω, του Υμηττού και της Πεντέλης και τα τεκτονικά βυθίσματα του Θριάσιου πεδίου και του λεκανοπέδιου των Αθηνών (εικόνα 1). Μέσα σ' αυτές τις 1ης τάξης δομές απαντώνται 2ης, 3ης κλπ. μικρότερης τάξης βυθίσματα και κέρατα. Ολόκληρη η περιοχή επομένως είναι κατακερματισμένη σε πολλά ρηξιτεμάχη. Η γεωμετρία αυτών ρηξιτεμαχών είναι σύνθετη με επικρατούσες διευθύνσεις Α-Δ και ΒΑ-ΝΔ (εικ. 1).



Εικόνα 1: Σχηματικός χάρτης στον οποίο απεικονίζονται οι κύριες ρηξιγενείς ζώνες και η κατανομή των διαρρήξεων και των καταπτώσεων κατά το σεισμό της 7/9/2002 (από Mariolakos et al., 2000 και Mariolakos & Fountoulis, 2002).

Οι MARIOLAKOS & FOUNTOULIS (2002) αναφέρουν ότι:

- Η σεισμόπληκτη περιοχή του σεισμού της Πάρνηθας της 7ης Σεπτεμβρίου 1999, αποτελεί μωσαϊκό ρηξιτεμαχών, που οριοθετούνται από ρήγματα δύο κυρίως διευθύνσεων, ήτοι ΒΑ-ΝΔ και ΔΒΔ-ΑΝΑ.

- Σε αρκετές περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί γραμμές προστριβής σε επιφάνειες ρηγμάτων τόσο στα περιθώρια του λεκανοπεδίου όσο και στους μεταλλικούς σχηματισμούς με σημαντική οριζόντια συνιστώσα.
- Οι λιγνιτικοί ορίζοντες των ανωμειοκαινικών αποθέσεων είναι πτυχωμένοι τόσο στο ανατολικό περιθώριο–περιοχή Ν. Ηρακλείου – (FREYBERG, 1951), όσο και στο δυτικό – περιοχή Περιστερίου με άξονες ίδιας διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ (De PIAN, 1950). Επίσης παρατηρούνται πτυχές στις νεογενείς αποθέσεις και μάλιστα με ανεστραμμένο το ένα σκέλος με αξονικά επίπεδα που κλίνουν προς τα ΒΑ, άρα τοπικά θα υπάρχει συμπίεση από τα ΒΑ προς τα ΝΔ.
- Όλα τα ρηξιτεμάχη παρουσιάζουν περιστροφική κίνηση γύρω από άξονες διεύθυνσης περίπου Α-Δ, ενώ ο κύριος όγκος της Πάρνηθας με τα επιμέρους ρηξιτεμάχη της, περιστρέφεται στο σύνολό της περί άξονα ΒΑ-ΝΔ προς τα δυτικά. Με βάση λοιπόν μορφοτεκτονικά στοιχεία, η Πάρνηθα βυθίζεται στο βορειοδυτικό της άκρο σχετικά με τις νοτιοανατολικές της απολήξεις, όπου και παρουσιάζει την μεγαλύτερη ανύψωση. Αυτός είναι και ο λόγος ότι στην περιοχή αυτή παρουσιάζονται και τα μεγαλύτερα υψόμετρα του ορεινού όγκου με όλα τα επακόλουθα, όπως η έντονη κατά βάθος διάβρωση, μεγάλη ενέργεια αναγλύφου, μεγάλες μορφολογικές κλίσεις.
- Εξαιτίας της περιστροφής αυτής της Πάρνηθας το μεγάλο περιθωριακό ρήγμα, που οριοθετεί το τεκτονικό βύθισμα του Θριασίου πεδίου προς το πολυτεμαχικό κέρασ της Πάρνηθας, παρουσιάζει διαφορετικό άλμα που μειώνεται από τα νοτιοανατολικά προς βορειοδυτικά.
- Το συγκεκριμένο ρήγμα αποτελεί συνέχεια αυτού που αναπτύσσεται στο ανατολικό μέρος (ρηξιγενής ζώνη Καματερού) και αποτελεί τον γνωστό ψαλιδωτό τύπο.
- Τα άλματα των ρηγμάτων που οριοθετούν τα επιμέρους ρηξιτεμάχη ποικίλλουν. Έτσι, μεταξύ των ρηξιτεμαχών της Πετρούπολης και του Μενιδίου το άλμα από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα είναι μεγαλύτερο από 400m, ενώ το άλμα μεταξύ των ρηξιτεμαχών Μενιδίου και Φυλής από το Πλειόκαινο μέχρι σήμερα είναι μεγαλύτερο από 600m.
- Η περιοχή Άνω Λιοσίων – Μενιδίου, ανήκει σε ένα ρηξιτέμαχος (τεκτονικό βύθισμα), το οποίο παρουσιάζει διαχρονικά μεγαλύτερη βύθιση τα τελευταία 5 Ma περίπου, μέσα σε μία περιοχή που περιστρέφεται γύρω από οριζόντιο άξονα, διεύθυνσης ΒΔ-ΝΑ προς τα ΒΑ, περιορίζοντας προοδευτικά την έκταση της τότε λίμνης προς τα ΒΑ, τμήμα της οποίας αποτελεί υπόλειμμα αφού παραμένει μέχρι και σήμερα περιοδικά λίμνη (βλέπε στάση Λίμνη στα Άνω Λιόσια).
- Το υπόβαθρο πολλών ρηξιτεμαχών βρίσκεται σήμερα πολύ χαμηλότερα από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας, γεγονός υποδηλωτικό της συνεχούς βύθισης παρότι στο σύνολό της η περιοχή ανέρχεται.
- Το μεγαλύτερο υψόμετρο εμφάνισης των λιμναίων αποθέσεων (περίπου 400μ) βρίσκεται στην περιοχή των Θρακομακεδόνων δηλαδή στο περιθώριο της Πάρνηθας, όπου παρουσιάζονται και τα μεγαλύτερα απόλυτα υψόμετρα (περίπου 1.100μ) του ορεινού όγκου. Σ' αυτή την περιοχή οι κλίσεις των λιμναίων είναι 35° προς τα ΒΑ. Τούτο σημαίνει ότι οι ανοδικές κινήσεις της Πάρνηθας θα πρέπει να έχουν γίνει μετά την απόθεση πλειοκαινικών λιμναίων

αποθέσεων κατά το Πλειστόκαινο, κάτι που είχε σαν επακόλουθο την δημιουργία του μεγάλου κώνου κορημάτων στην περιοχή, ο οποίος είχε αποκλειστική τροφοδοσία από την Πάρνηθα.

3. Βαρυτικές Μετρήσεις

Οι βαρυτομετρικές παρατηρήσεις έγιναν με το βαρυτόμετρο LaCoste & Romberg τύπου G-496. Όλες οι μετρήσεις βαρύτητας αναφέρονται στον IGSN' 71 σταθμό του Πανεπιστημίου Αθηνών με απόλυτη τιμή βαρύτητας 9.800.099,65 gu (HIPKIN, R.G., et al., 1988).

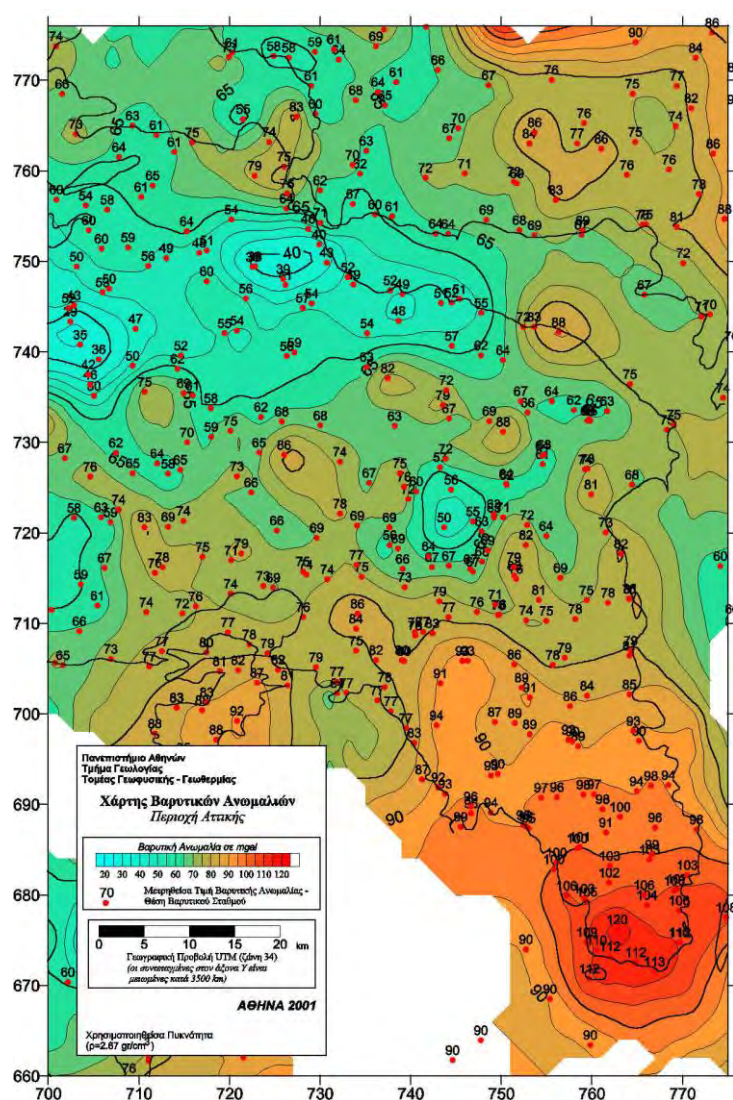
Στο Παράρτημα Ι έχουν καταχωρηθεί οι βαρυτικές μετρήσεις υπαίθρου που έχουν ληφθεί σε δύο φάσεις, στα πλαίσια του παρόντος ερευνητικού προγράμματος. Συνολικά, έχουν διεξαχθεί 338 βαρυτικές μετρήσεις κατά μήκος οκτώ (8) βαρυτικών τομών (βλ. συνημμένο Χάρτη Γενικής Πληροφόρησης). Οι βαρυτικές τομές διεξήχθησαν κατά μήκος αξόνων που επιλέχθηκαν για να διερευνήσουν τη βαθύτερη δομή σε περιοχές που παρουσιάζουν ιδιαίτερο τεκτονικο-γεωλογικό ενδιαφέρον. Συγκεκριμένα, οι βαρυτικές τομές 1 και 2, οι οποίες είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και απέχουν ένα χιλιόμετρο περίπου, διεξήχθησαν στην περιοχή Πετρούπολης, Άνω Λιοσίων, Μενιδίου και Θρακομακεδόνων, για τη διερεύνηση κυρίως των ρηξιγενών ζωνών Καματερού και Μενιδίου. Η βαρυτική τομή 7 διεξήχθη για τη διερεύνηση της ρηξιγενούς ζώνης του Κηφισού. Οι βαρυτικές τομές 3 και 4, οι οποίες είναι σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους και απέχουν ένα περίπου χιλιόμετρο, διεξήχθησαν στην περιοχή Ασπροπύργου και Φυλής, για τη διερεύνηση της ρηξιγενούς ζώνης του Θριασίου. Οι βαρυτικές τομές 5 και 6, οι οποίες είναι οι πιο επιμήκεις τομές, έχουν διεξαχθεί για τη διερεύνηση της βαθιάς δομής στις περιοχές μεταξύ Μάνδρας, Μαγούλας, Ασπροπύργου και Φυλής (βαρυτική τομή 5) και μεταξύ Πάρνηθας, Κρυονερίου, Δροσιάς και Διονύσου (βαρυτική τομή 6). Η βαρυτική τομή 8 διεξήχθη παράλληλα προς τις βαρυτικές τομές 3 και 4 και κατά μήκος της σεισμικής τομής 1. Οι βαρυτικές τομές 1, 2, 3, 4, 6, 7 και 8 έχουν χαραχθεί σε διεύθυνση περίπου κάθετα προς τις ρηξιγενείς ζώνες που στοχεύουν να διερευνήσουν. Η βαρυτική τομή 5 έχει διεξαχθεί υπό γωνία σε σχέση με τη διεύθυνση της κύριας ρηξιγενούς ζώνης του Θριασίου. Επιλέχθηκε η διεύθυνση αυτή για να ικανοποιηθεί αφενός το μεγάλο μήκος που απαιτείται για τη διερεύνηση της βαθιάς δομής και να αποφευχθεί το έντονο ανάγλυφο του ορεινού όγκου της Πάρνηθας, αφετέρου.

Οι βαρυτικές μετρήσεις που διεξήχθησαν κατά την πρώτη φάση των εργασιών υπαίθρου έδειξαν, ότι δεν είχε καλυφθεί με μετρήσεις το αλπικό υπόβαθρο, με συνέπεια να μην είναι εφικτή ή αξιόπιστη η αφαίρεση της μεγάλης κλίμακας ανωμαλία (γραμμική τάση). Έτσι, η διαμόρφωση της βαρυτικής ανωμαλίας δεν θα ήταν επίσης εφικτή και αξιόπιστη. Για το σκοπό αυτό κρίθηκε απαραίτητο οι βαρυτικές τομές 1 και 2, που βρίσκονται στην περιοχή Πετρούπολης-Θρακομακεδόνων, να επεκταθούν τόσο προς νότο όσο και προς βορρά. Επίσης, οι βαρυτικές τομές 3 και 4, που βρίσκονται στο Θριάσιο πεδίο, επεκτάθηκαν προς βορρά. Στη βαρυτική τομή 6, που βρίσκεται μεταξύ Πάρνηθας-Πεντέλης, έγινε πύκνωση των σημείων μέτρησης μεταξύ των σταθμών 608 και 609 προκειμένου να ληφθούν μετρήσεις πάνω στο αλπικό υπόβαθρο. Κρίθηκε επίσης απαραίτητο να εκτελεσθεί μια βαρυτική τομή (βαρυτική τομή 8) παράλληλα προς τη σεισμική τομή 1 (Ασπροπύργος-Φυλή).

3.1 Βαρυτικά δεδομένα της ευρύτερης περιοχής.

Ο Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών σε συνεργασία με το Πανεπιστήμιο του Εδιμβούργου έχει σχεδιάσει και υλοποιήσει τράπεζα βαρυτικών δεδομένων και τοπογραφικών δεδομένων του ελληνικού χώρου (LAGIOS et al., 1994, 1995). Οι περιλαμβανόμενες στην τράπεζα δεδομένων βαρυτικές μετρήσεις, έχουν χρησιμοποιηθεί ήδη για τη μελέτη της βαθιάς λιθοσφαιρικής δομής του ελληνικού χώρου (CHAILAS et al., 1993, 1998, LAGIOS et al., 1994).

Στο χάρτη της εικόνας 2 απεικονίζεται ο βαρυτικός χάρτης ανωμαλιών Bouguer, λαμβάνοντας υπόψη και τις τοπογραφικές διορθώσεις, για την ευρύτερη περιοχή έρευνας (LAGIOS et al., 1994). Η χωρική πυκνότητα του αριθμού των βαρυτικών μετρήσεων για την περιοχή της Αττικής είναι κατά μέσο όρο της τάξης των 5-7 σταθμών ανά 100 km^2 . Τα αντίστοιχα τοπογραφικά δεδομένα έχουν ληφθεί με πυκνότητα 25 τιμές ανά 100 km^2 και κάθε τιμή τοπογραφίας αντιπροσωπεύει το μέσο υψόμετρο ανά 4 km^2 .



Εικόνα 2: Ο βαρυτικός χάρτης ανωμαλιών Bouguer για την ευρύτερη περιοχή έρευνας, λαμβάνοντας υπόψη και τις τοπογραφικές διορθώσεις, (LAGIOS et al., 1994).

3.2 Συλλογή βαρυτικών δεδομένων - Μετρήσεις

Οι εργασίες υπαίθρου διεξήχθησαν από μια ομάδα 2-3 ατόμων, τα οποία έκαναν χρήση ενός μικρού αυτοκινήτου για τη μεταφορά από και προς την περιοχή έρευνας καθώς και μεταξύ των σταθμών παρατήρησης.

Σε κάθε σταθμό βαρυτικής μέτρησης γινόταν παράλληλα εγκατάσταση εξοπλισμού GPS προκειμένου να υπολογιστούν οι γεωδαιτικές συντεταγμένες του. Για να επιτευχθεί λήψη ικανοποιητικού πλήθους δεδομένων GPS, απαιτούνταν 10 με 20 λεπτά, ανάλογα με τη διάταξη των δορυφόρων και την απόσταση του βαρυτικού σταθμού από το γεωδαιτικό σημείο αναφοράς. Συγχρόνως, το βαρυτόμετρο τοποθετούνταν κάτω από το κέντρο της κεραίας του GPS. Στην φωτογραφία της εικόνας 3 δίνεται η διάταξη των οργάνων (βαρυτομέτρου και δέκτη GPS σε σταθμό μέτρησης).



Εικόνα 3: Διάταξη των οργάνων σε σταθμό μέτρησης. Στη φωτογραφία διακρίνονται: Η βάση τοποθέτησης (πιάτο) του βαρυτομέτρου και το βαρυτόμετρο (1), και το σύστημα GPS αποτελούμενο από τον τρίποδα (2) στον οποίο είναι τοποθετημένος ο δέκτης (3), ενώ στη φωτογραφία διακρίνεται και η μονάδα ελέγχου του GPS (4).

Οι κατά τόπους θέσεις των σταθμών επιλέχθηκαν έτσι ώστε να υπάρχει επαρκής δορυφορική κάλυψη, μακριά από κτίρια και προκειμένου να αποφευχθούν δυσάρεστες επιδράσεις (επίδραση ηλεκτρομαγνητικού θορύβου στην κεραία λόγω μεγάλης ισχύος), όσο το δυνατόν γίνεται μακριά από ηλεκτρικές γραμμές μεταφοράς. Αυτό, σε ορισμένες περιπτώσεις ήταν δύσκολο, κυρίως σε πυκνοκατοικημένες αστικές περιοχές, παρά τις ανοχές που επέτρεπε το μεγάλο μήκος των βαρυτικών τομών για αποκλίσεις από την απόλυτη ευθυγράμμιση των σταθμών.

3.2.a Βαρυτικές Παρατηρήσεις

Οι βαρυτικές μετρήσεις στην περιοχή έρευνας έγιναν με την χρήση του βαρυτομέτρου Lacoste & Romberg τύπου G-496 ιδιοκτησίας του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας. Το βαρυτόμετρο είναι όργανο μέτρησης της σχετικής τιμής της βαρύτητας, γεγονός που οδηγεί στη χρήση βαρυτομετρικών βάσεων (στις οποίες είναι γνωστή η απόλυτη τιμή της βαρύτητας) προκειμένου το εκάστοτε μετρούμενο δίκτυο να υπολογίζεται και να "εξαρτάται" από αυτές.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε αρχικά ως βάση εξάρτησης των μετρήσεων η βαρυτική βάση, η οποία είναι εγκατεστημένη στο Πανεπιστήμιο Αθηνών σε ειδικό χώρο του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας (HIPKIN et al., 1988). Αρχικά ιδρύθηκε μια τοπική βάση κοντά στην περιοχή ενδιαφέροντος (στο κτήριο της τεχνικής υπηρεσίας του Δήμου Άνω Λιοσίων), η οποία εξαρτήθηκε από την προαναφερθείσα βάση του Πανεπιστημίου.

Η θέση της τοπικής βάσης κρίθηκε ικανοποιητική αφού απείχε 25 λεπτά της ώρας από την περιοχή μετρήσεων και συγχρόνως ικανοποιούσε τα κριτήρια προκειμένου να χρησιμοποιηθεί και ως γεωδαιτική βάση GPS για τον υπολογισμό των χωρικών συντεταγμένων των σταθμών.

Κατά την δεύτερη περίοδο μετρήσεων (Μάρτιος 2002), λόγω των ειδικών συνθηκών που επικρατούσαν στο πεδίο (οι μετρήσεις της περιόδου αυτής απαιτούσαν μεγάλους χρόνους μετάβασης από σταθμό σε σταθμό) ιδρύθηκε νέα τοπική βάση στην περιοχή Νέα Φούσα, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος επιστροφής στη βάση από την περιοχή του Ασπροπύργου.

Η τιμή του σταθμού βάσης του Πανεπιστημίου Αθηνών (LAGIOS & HIPKIN, 1986) αναφέρεται στο σύστημα αναφοράς (datum) του IGSN'71 (INTERNATIONAL GRAVITY STANDARDIZATION NET 1971, MORELLI et al., 1974). Συνεπώς οι βαρυτικές μετρήσεις της παρούσας μελέτης και κατ' επέκταση οι βαρυτικές ανωμαλίες που προέκυψαν αναφέρονται σε αυτό το επίπεδο αναφοράς.

Κατά τον υπολογισμό της τιμής της παρατηρούμενης βαρυτικής τιμής για κάθε σταθμό υπολογίστηκε η απόκλιση (drift) του οργάνου και η παλιρροϊκή διόρθωση, με τη χρήση του λογισμικού προγράμματος REDUCER, το οποίο έχει αναπτυχθεί στον Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας. Ο υπολογισμός της παλιρροϊκής διόρθωσης βασίζεται στον αλγόριθμο των CARTWRIGHT & TAYLER (1971) λαμβάνοντας υπόψη και την τροποποίηση που έχει υποστεί από τους CARTWRIGHT & EDDEN (1973).

3.2.β Βαρυτικές Ανωμαλίες

Οι βαρυτικές ανωμαλίες (Δg_B) που προέκυψαν για τους βαρυτικούς σταθμούς που μετρήθηκαν, υπολογίστηκαν με τη χρήση του ακόλουθου τύπου:

$$\Delta g_B = g_{obs} + 0.3086 \cdot h - 0.0419 \cdot \rho \cdot h + T \cdot \rho - g_n \text{ (σε mGal) (1-1),}$$

όπου g_{obs} είναι η παρατηρηθείσα τιμή της βαρύτητας, h είναι το υψόμετρο του σταθμού σε μέτρα, 0.3086 και 0.0419 είναι βαθμίδες της βαρύτητας ελευθέρου αέρα και Bouguer αντίστοιχα, T είναι ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης ανά μονάδα πυκνότητας ($\text{mGal}/\text{gr}/\text{cm}^3$), ρ είναι η πυκνότητα Bouguer (σε gr/cm^3), g_n είναι η κανονική τιμή της βαρύτητας (mGal) υπολογισμένη με βάση τη Γεωδαιτικού Τύπου Αναφοράς (GRF) του 1967:

$$g_n = 978031.8495(1 + 0.0052788944 \sin^4 \phi + 0.0000234631 \sin^2 \phi) \text{ (1-2)}$$

όπου ϕ είναι το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού.

Οι χωρικές συντεταγμένες των σταθμών υπολογίστηκαν με την χρήση συστήματος GPS, το οποίο διαθέτει ο Τ.Γ.Γ.

Για τον υπολογισμό των βαρυτικών διορθώσεων, το πρόγραμμα REDUCER επιτρέπει σε κάθε σταθμό την χρήση και δεύτερης τιμής πυκνότητας (πέραν της τυπικής τιμής $[2,67 \text{ gr}/\text{cm}^3]$, η οποία χρησιμοποιείται συνήθως) και κατά συνέπεια την εξαγωγή δύο αντίστοιχων τιμών βαρυτικής ανωμαλίας. Στα αποτελέσματα που παρατίθενται στο Παράρτημα II αναφέρονται ως Τυπική Ανωμαλία Bouguer (Standard Bouguer Anomaly) και Γεωλογική Ανωμαλία Bouguer (Geologic), αφού με τη δεύτερη μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι δυνατό να αντιπροσωπευθούν οι τοπικές επιφανειακές γεωλογικές διαφοροποιήσεις.

3.2.γ Χωρικές συντεταγμένες των Βαρυτικών Σταθμών

Το σύστημα GPS εντοπίζει τη θέση κάθε σταθμού, προκειμένου οι συντεταγμένες να χρησιμοποιηθούν αφ' ενός για την τοποθέτηση του σταθμού σε χάρτες και αφ' ετέρου για τον υπολογισμό των βαρυτικών διορθώσεων.

Το σύστημα GPS που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από δύο γεωδαιτικούς δέκτες τύπου Wild (SR299). Το σύστημα αυτό είναι δύο συχνοτήτων (L1 και L2) και έχει τη δυνατότητα να συλλέγει δεδομένα από 9 δορυφόρους συγχρόνως. Ο υπολογισμός των χωρικών συντεταγμένων πραγματοποιήθηκε με την χρήση του λογισμικού SKI-PRO (Static Kinematic Post Processing Software).

Ο εξοπλισμός αποτελείται από αισθητήρα αποτελούμενο από κεραία με δέκτη, και καταγραφικό το οποίο λειτουργεί και ως μονάδα ελέγχου (controller) του συστήματος. Κατά την συνήθη εγκατάσταση του συστήματος η κεραία τοποθετείται επάνω σε τρίποδα και οριζοντιώνεται και κεντρώνεται επάνω από το σημείο μέτρησης με τη βοήθεια τρικόχλιου. Το σύστημα τροφοδοτείται από εξωτερικές μπαταρίες.

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε ήταν του διαφορικού εντοπισμού. Αυτό σημαίνει ότι για τις ανάγκες των εργασιών υπαίθρου απαιτούνται δύο δέκτες. Ο ένας τοποθετείται σε θέση με γνωστές χωρικές συντεταγμένες, τον προσωρινό σταθμό βάσης, καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και ο άλλος συνοδεύει το βαρυτόμετρο σε κάθε βαρυτικό σταθμό. Οι συντεταγμένες του βαρυτικού σταθμού προσδιορίζονται σε σχέση με τον σταθμό βάσης.

Ο προσδιορισμός της θέσης με την εφαρμογή της τεχνικής των διαφορικών γεωδαιτικών μετρήσεων GPS είναι δυνατόν να επιτύχει ακρίβεια εντοπισμού μερικών χιλιοστών του μέτρου, τόσο στις οριζόντιες συντεταγμένες (για τις οποίες ο στόχος αυτός υπερτερεί των απαιτήσεων της βαρυτικής μεθόδου κατά τουλάχιστον μια τάξη μεγέθους), όσο και στην κατακόρυφη.

Ως σταθμός αναφοράς στην πρώτη περίοδο συλλογής δεδομένων (μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια το 2001) και για μερικούς σταθμούς της δεύτερης περιόδου, χρησιμοποιήθηκε ένα σημείο το οποίο ήταν τοποθετημένο στην στέγη κτηρίου των Τεχνικών Υπηρεσιών του Δήμου Άνω Λιοσίων.

Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι η επιλογή της βάσης έγινε με βάση τα εξής κριτήρια:

1. Απόσταση από την περιοχή μετρήσεων.
2. Ορατότητα στον ορίζοντα,
3. Βαθμός εξασφάλισης του οργάνου και φύλαξη (για καθαρά πρακτικούς λόγους).

Κατά την δεύτερη περίοδο των μετρήσεων (Μάρτιος 2002), παράλληλα με την υπάρχουσα τοπική βαρυτική βάση, ιδρύθηκε και νέα τοπική γεωδαιτική βάση στην περιοχή Νέα Φούσα, προκειμένου να γίνεται συχνότερα έλεγχος της εύρυθμης λειτουργίας του οργάνου GPS και του drift του οργάνου. Η ελάττωση της απόστασης μεταξύ της περιοχής των μετρήσεων και της γεωδαιτικής βάσης, παρείχε και την αύξηση της βεβαιότητας επίλυσης της γεωδαιτικής γραμμής, για τον ίδιο χρόνο συλλογής δεδομένων ακόμη και στις περιόδους μη ικανοποιητικής διάταξης των δορυφόρων.

Ο τελικός υπολογισμός των συντεταγμένων έγινε στον Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας με την χρήση λογισμικού για επανεπεξεργασία (post processing) των δεδομένων. Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SKI Pro της Leica (1999).

3.2.δ Συστήματα Προβολής

Για την τοποθέτηση των σταθμών στους τοπογραφικούς χάρτες, προκειμένου αρχικά να γίνει ένας πρόχειρος επιβεβαιωτικός έλεγχος της ορθής επίλυσης των γεωδαιτικών συντεταγμένων και σε επόμενο στάδιο να υπολογιστεί ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης, απαιτήθηκε μια περαιτέρω εργασία. Η μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων (ο αρχικός υπολογισμός των συντεταγμένων γίνεται στο σύστημα WGS'84) σε χαρτογραφικές συντεταγμένες των εκάστοτε χαρτών στους οποίους επιχειρείτο η τοποθέτηση. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε ειδικό λογισμικό το οποίο είτε ανήκε στο πρόγραμμα SKI, είτε κατασκευάστηκε από το Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας (όπου οι ανάγκες ξεπερνούσαν τις προσφερόμενες από το SKI δυνατότητες).

Η χαρτογραφική πληροφορία που χρησιμοποιήθηκε (τοπογραφικοί ή ψηφιοποιημένοι χάρτες) μπορεί να χωριστεί σε δυο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία περιέχονται τα χαρτογραφικά δεδομένα για τα οποία έχει χρησιμοποιηθεί η χαρτογραφική προβολή Hatt. Στην δεύτερη έχει χρησιμοποιηθεί η χαρτογραφική προβολή ΕΓΣΑ'87. Η μετατροπή των γεωδαιτικών συντεταγμένων σε συντεταγμένες της δεύτερης προβολής είναι δυνατή και έγινε μέσω του SKI μετά την εισαγωγή σε αυτό των κατάλληλων συντελεστών. Η μετατροπή σε συντεταγμένες Hatt πραγματοποιήθηκε με αφετηρία τις συντεταγμένες σε ΕΓΣΑ'87 και με τη χρήση λογισμικού, το οποίο έχει κατασκευαστεί από τον Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας.

3.2.ε Υπολογισμός Συντελεστή Τοπογραφικής Διόρθωσης (T)

Ο υπολογισμός του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης έγινε σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση υπολογίστηκε ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης για την εγγύτερη προς τον αντίστοιχο σταθμό περιοχή, ενώ στη δεύτερη σε πιο απομακρυσμένες ζώνες. Κρίθηκε ότι δεν ήταν αναγκαίος ο υπολογισμός της τοπογραφικής διόρθωσης για ακτίνα μεγαλύτερη των 21 km γύρω από τους βαρυτικούς σταθμούς.

Για την εγγύτερη προς τους βαρυτικούς σταθμούς περιοχή (μέγιστη ακτίνα 1,5 km) έγινε χρήση των δικτύων Hammer (HAMMER, 1939) από όλους τους εμπλεκόμενους φορείς (ΕΚΠΑ και Πανεπιστήμιο του Leeds). Παράλληλα και προκειμένου να υπάρχει δυνατότητα απρόσκοπτης και άμεσης μελλοντικής χρήσης της πληροφορίας των χαρτών, αποφασίστηκε η ψηφιοποίηση τους και η χρήση της ψηφιοποιημένης μορφής για τον υπολογισμό της τοπογραφικής διόρθωσης (τουλάχιστον για τους σταθμούς των βαρυτικών τομών 5, 6 και 8, την εκτέλεση των οποίων είχε αναλάβει αποκλειστικά ο Τομέας Γεωφυσικής-Γεωθερμίας).

Για λόγους ομοιογένειας, αποφασίστηκε (ακόμη και στους ψηφιοποιημένους χάρτες) να γίνει αριθμητικός υπολογισμός του μέσου ανά τομέα υψομέτρου για τις ζώνες D, E, F, G, και ο περαιτέρω υπολογισμός του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης με την χρήση του τύπου (HAMMER, 1939):

$$\Delta g = T \cdot \rho = G \cdot \rho \cdot \theta \cdot \left[(r_o - r_i) + \sqrt{r_i^2 + \Delta z^2} - \sqrt{r_o^2 + \Delta z^2} \right]$$

Το αποτέλεσμα που προέκυψε ήταν η αντίστοιχη βαρυτική έλξη της μάζας του κάθε τοπογραφικού τμήματος σε mGal. Το άθροισμα των βαρυτικών συνεισφορών όλων των τομέων διαιρεμένο με τη μέση πυκνότητα 2,67, που αντιπροσωπεύει τη μέση πυκνότητα του στερεού φλοιού της Γης, αντιστοιχεί στον συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης (terrain coefficient) για κάθε σταθμό εκφρασμένο σε mGal ανά μονάδα πυκνότητας.

Η τακτική της χρήσης των ψηφιοποιημένων χαρτών κλίμακας 1:5.000 ακολουθήθηκε και για τους σταθμούς των προς Βορρά προεκτάσεων των βαρυτικών τομών 1-4 που μετρήθηκαν κατά την δεύτερη περίοδο μετρήσεων (Μάρτιος 2002) καθώς και για όσους σταθμούς των τομών 1-4 βρισκόταν εντός των ψηφιοποιημένων χαρτών κλίμακας 1:5.000 στους οποίους θα γίνει αναφορά παρακάτω. Ο επανυπολογισμός των τελευταίων κατέδειξε ότι τα αποτελέσματα δεν παρουσίαζαν σημαντική διαφορά από εκείνα που προέκυψαν με την κλασική μέθοδο της εκτίμησης του μέσου υψομέτρου από τον παρατηρητή. Επιπροσθέτως, το σχετικά επίπεδο ανάγλυφο στα νότια άκρα των εν λόγω τομών και οι ως εκ τούτου μικρές τιμές της τοπογραφικής διόρθωσης κρίθηκε ότι δεν επέβαλλαν την ψηφιοποίηση χαρτών κλίμακας 1:5.000 για τους σταθμούς των περιοχών αυτών, αφού ακόμη και κάποιο πιθανό σφάλμα στην εκτίμηση θα είχε σχεδόν αμελητέα επίδραση στην τελική τιμή της βαρυτικής ανωμαλίας.

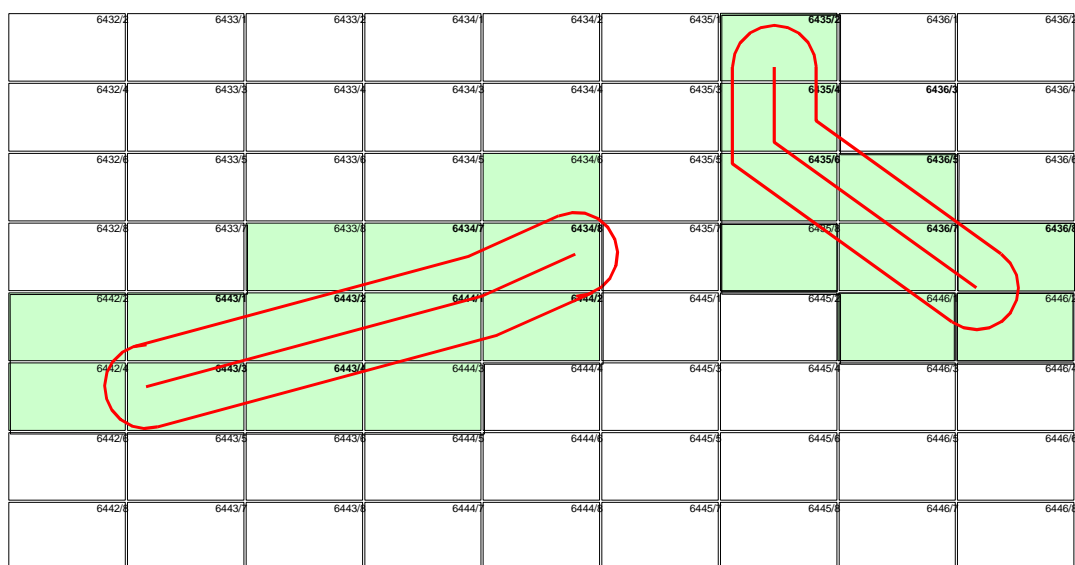
Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η ψηφιοποίηση των χαρτών προηγήθηκε η ηλεκτρονική οπτική σάρωση τους με τη χρήση σαρωτή (scanner). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 21 τοπογραφικοί χάρτες 1:5.000 των οποίων η διάταξη και ο αριθμός φύλλου φαίνονται στην εικόνα 4.

Με τη χρήση H/Y πραγματοποιήθηκε στην αρχική φάση η ψηφιοποίηση των εικονοσυντεταγμένων 12 τοπογραφικών χαρτών (ΓΚΟΥΜΑΣ, 2003) που κάλυπταν

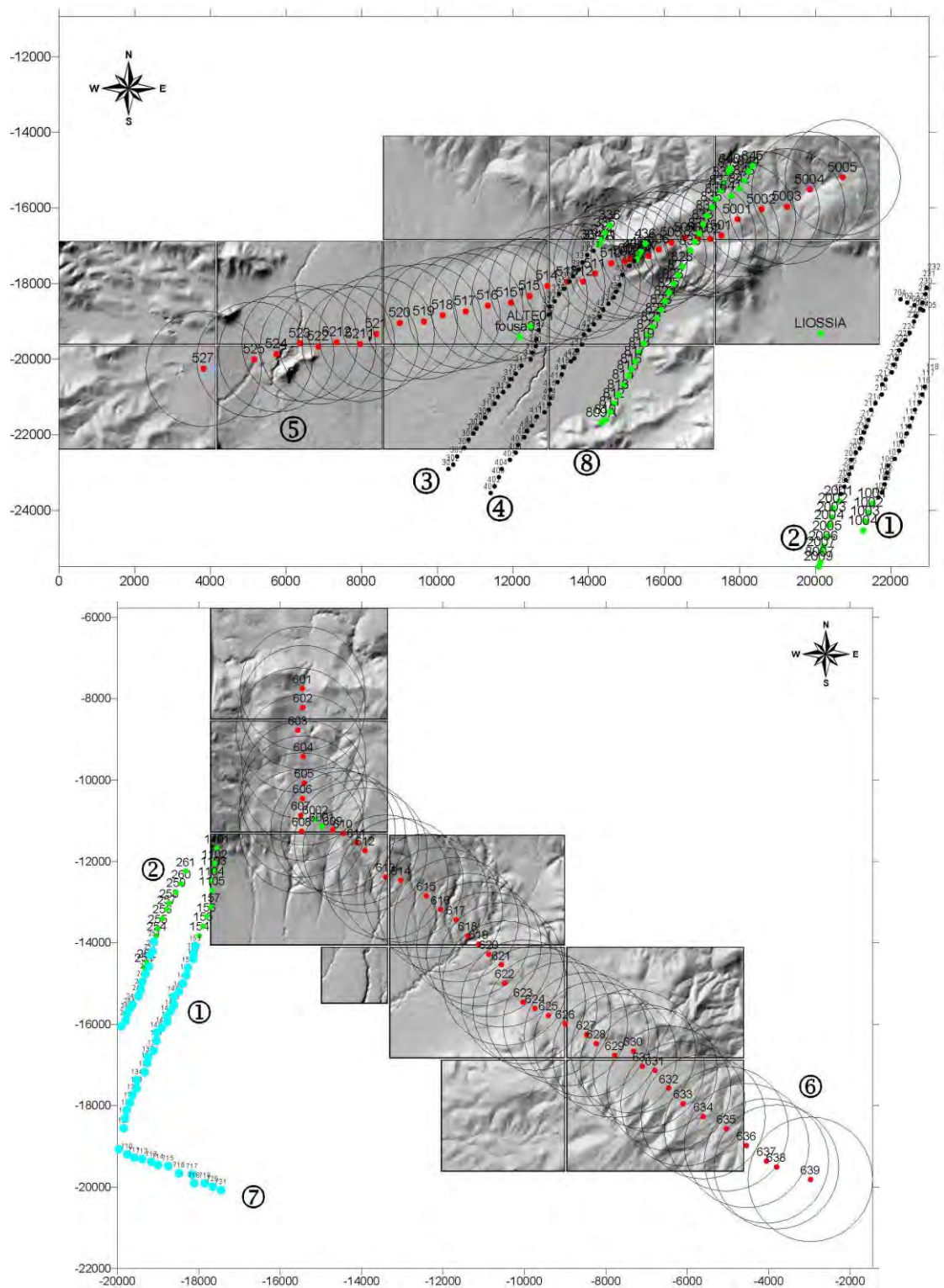
την βαρυτική τομή 5 και αντίστοιχα άλλων 9 για την τομή 6 με απώτερο σκοπό την κατασκευή καννάβου (Grid) που θα αντιπροσωπεύει το τοπογραφικό ανάγλυφο της περιοχής (βλ. Εικ. 5). Εν συνεχεία οι εικονοσυντεταγμένες μετατράπηκαν σε συντεταγμένες χάρτη (γεωγραφική προβολή Hatt). Ακολούθως, κατασκευάστηκε ο τελικός κάνναβος (Grid), ισοδιάστασης 25 m για κάθε τοπογραφικό φύλλο 1:5.000.

Ο υπολογισμός του μέσου ανά τομέα υψομέτρου πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του προγράμματος GRD2HAMMER το οποίο έχει κατασκευαστεί από τον Τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης υπολογίστηκε με τη χρήση του υπολογιστικού προγράμματος HAMMER του Τομέα Γεωφυσικής και Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.

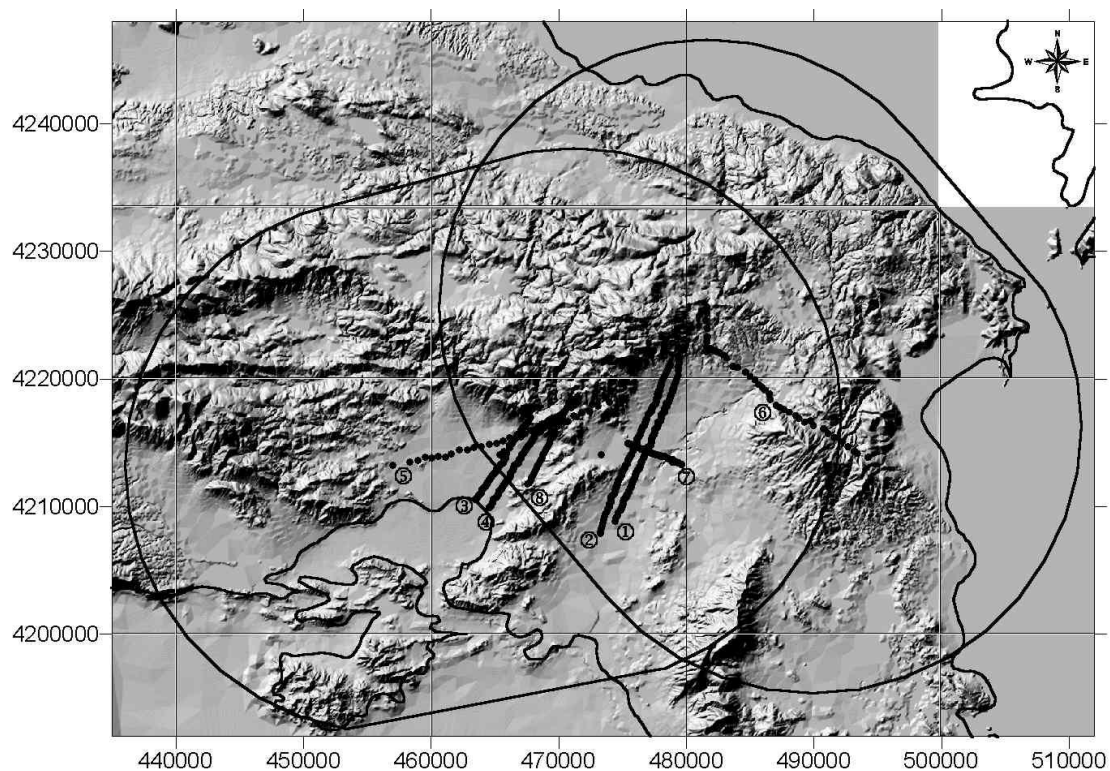
Στην δεύτερη φάση η οποία θεωρήθηκε επιβεβλημένη λόγω της ύπαρξης του ορεινού όγκου της Πάρνηθας και της βαρυτικής επίδρασης που αυτός ασκεί, κρίθηκε απαραίτητος ο υπολογισμός του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης για ακτίνα πέραν των 1,5 και συγκεκριμένα έως 21 km. Ο υπολογισμός αυτός διεξήχθη με τη χρήση του προγράμματος TERCOR του Τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών, το οποίο υπολογίζει την βαρυτική επίδραση με την χρήση κατακόρυφων πρισμάτων. Για την διεξαγωγή του υπολογισμού των χρησιμοποιήθηκε κάνναβος ισοδιάστασης 50 m (εικόνα 6), προερχόμενος από την ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών 1:50.000 (TOMAPA, 2002).



Εικόνα 4: Διάταξη των τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:5.000 της ευρύτερης περιοχής μελέτης. Οι αριθμοί αντιστοιχούν στην κωδικοποίηση της ΓΥΣ. Με πράσινη διαγράμμιση επισημαίνονται οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Γύρω από τις τομές επισημαίνεται η ζώνη πλάτους 3 km (2X1.500) για την οποία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Hammer.



Εικόνα 5: Απεικόνιση του τοπογραφικού αναγλύφου στην εγγύς περιοχή των βαρυτικών τομών, όπως αυτό προκύπτει από τους ψηφιοποιημένους χάρτες κλίμακας 1:5.000. Ενδεικτικά σημειώνονται στους σταθμούς των τομών 5 και 6 οι περιφέρειες ακτίνας 1,5 km (εξωτερική ακτίνα ζώνης G). Στις θέσεις LIOSSIA, ALTEC, και FOUSA σημειώνονται οι βάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί στην διάρκεια της παρούσας μελέτης.



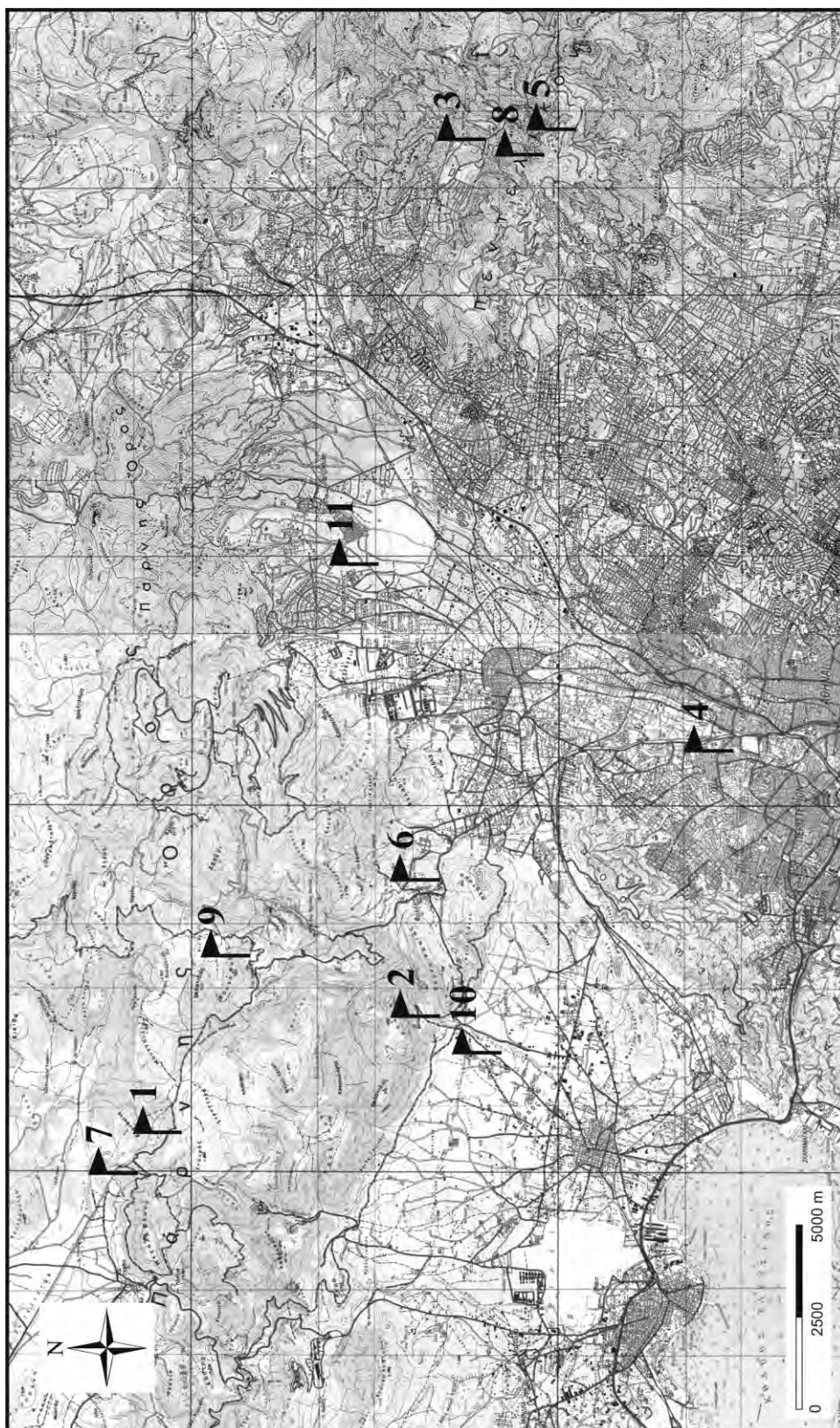
Εικόνα 6: Απεικόνιση του τοπογραφικού αναγλύφου στην ευρύτερη γειτονία της περιοχής μελέτης, όπως αυτό προκύπτει από τους ψηφιοποιημένους χάρτες κλίμακας 1:50.000. Ενδεικτικά σημειώνονται στις τομές 5 και 6 οι ζώνες πλάτους 42 km (μέγιστη ακτίνα που υπολογίστηκαν συντελεστές τοπογραφικής διόρθωσης).

3.3 Εργαστηριακός Προσδιορισμός Πυκνοτήτων (ρ)

Οι τοπογραφικές και οι διορθώσεις Bouguer που εφαρμόζονται στις παρατηρούμενες τιμές της επιτάχυνσης της βαρύτητας, απαιτούν τη γνώση της μέσης πυκνότητας των πετρωμάτων που βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους. Επί πλέον, οι βαρυτικές ανωμαλίες που προκύπτουν, οφείλονται στην ανομοιόμορφη πλευρική κατανομή της πυκνότητας των υπεδαφικών σχηματισμών. Η γνώση των πυκνοτήτων των σχηματισμών που εμφανίζονται στην ευρύτερη περιοχή έρευνας είναι απαραίτητη για τη καλύτερη εξαγωγή συμπερασμάτων, διότι περιορίζει τον αριθμό των πιθανών λύσεων που προκύπτουν από την ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών.

Για την εύρεση της κατάλληλης πυκνότητας, που ανταποκρίνεται στην επιφανειακή τιμή των πετρωμάτων στην υπό μελέτη περιοχή, πραγματοποιήθηκε εργαστηριακός προσδιορισμός αυτής.

Οι θέσεις που λήφθηκαν τα δείγματα για τον προσδιορισμό της πυκνότητας των πετρωμάτων δίνονται στον χάρτη θέσεων δειγματοληψίας της εικόνας 7. Τα δείγματα αυτά αντιπροσωπεύουν τους κυριότερους γεωλογικούς σχηματισμούς που απαντώνται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Από κάθε θέση λήφθηκε υγιές και συμπαγές δείγμα πετρώματος μετά από επιλογή και μακροσκοπική εξέταση της ποιότητας του δείγματος.



Εικόνα 7: Τοπογραφικός χάρτης όπου απεικονίζονται οι θέσεις δειγματοληψίας. 1: Ανωκρητιδικός ασβεστόλιθος, 2: Τριαδικός ασβεστόλιθος, 3: Σχιστόλιθος Διονύσου, 4: Σχιστόλιθος Αθηνών, 5: Γνεύσιος Πεντέλης. 6: Νεογενής Μάρμα, 7: Ηφαιστειακά, 8: Μάρμαρο Πεντέλης, 9: Περιοτριάδικά κλαστικά, 10: Κροκαλοπαγές Γιαννούλα, 11: Κροκαλοπαγές Θρακομακεδόνων.

Οι λιθολογικοί τύποι, τα δείγματα των οποίων λήφθηκαν και μετρήθηκαν αναφέρονται αναλυτικά παρακάτω:

Τριαδικός Ασβεστόλιθος (βλ. Εικ. 8): Πρόκειται για συμπαγές νηριτικό ανθρακικό σχηματισμό κυρίως ανοικτότεφρο και μερικές φορές σκοτεινότεφρο, μέσο έως παχυστρωματώδης και κατά θέσεις άστρωτος. Εμφανίζεται πολύ συχνά κερματισμένος, μικροκρυσταλλικός έως και πολύ κρυσταλλικός. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι ο πρώτος που προσδιόρισε τον σχηματισμό αυτό ήταν ο RENZ (1915) ενώ στη συνέχεια υπάρχουν αναφορές από τους ΤΡΙΚΚΑΛΙΝΟ (1948), ΣΠΗΛΙΑΔΗ (1963), CLEMENT (1968), ΔΟΥΝΑ (1971), κ.α.



Εικόνα 8: Τριαδικός Ασβεστόλιθος

Κρητιδικός Ασβεστόλιθος (βλ. Εικ. 9): Ανθρακικός σχηματισμός λεπτοπλακώδης, στιφρός, ανοικτόφαιος - κιτρινόλευκος, εναλλασσόμενος με φυλλώδεις μάργες. Μπορεί να είναι σύμφωνος με σιδηρονικελιούχες εμφανίσεις ή αντίθετα να επικάθεται ασύμφωνα πάνω στην Τριαδικό-Ιουρασική πλατφόρμα με χαρακτηριστική γωνιώδη ασυμφωνία. ,



Εικόνα 9: Κρητιδικός Ασβεστόλιθος

Νεογενείς Μάργες (βλ. Εικ. 10): Πρόκειται για λευκοκίτρινες ασβεστιτικές μάργες που στα ανώτερα στρώματα εξελίσσονται σε πιο αδροκοκκώδεις ασβεστοψαμμίτες.



Εικόνα 10: Νεογενείς Μάργες

Σχιστόλιθος Αθηνών (βλ. Εικ. 11): Φλυσχοειδές πέτρωμα που αποτελείται από τεφρούς, γαλανότεφρους ή υποπράσινους αργιλικούς, ψαμμιτικούς σχιστόλιθους, ασβεστιτικούς ψαμμίτες και γραουβάκες, με ενστρώσεις ασβεστολίθων και σχιστωδών μαργών και με μικρά σώματα εκρηξιγενών πετρωμάτων, κυρίως σπιλιτών.



Εικόνα 11: Σχιστόλιθος Αθηνών

Περμοτριάδικά κλαστικά (βλ. Εικ. 12): Πρόκειται για αρκόζες, γραουβάκες και αργιλικούς σχιστόλιθους σε εναλλαγές με φυλλίτες και χαλαζιακά κροκαλοπαγή κατά θέσεις. Μέσα σε αυτούς απαντούν φακοειδείς ενστρώσεις απολιθωματοφόρων ασβεστολίθων κυρίως τεφρού μέχρι μελανότεφρου χρώματος.



Εικόνα 12: Περμοτριάδικά κλαστικά

Κροκαλοπαγές από τη θέση Γιαννούλας (βλ. Εικ. 13): Συνίσταται από λατυποκροκάλες ποικίλου μεγέθους, κυρίως ασβεστολιθικές συνδεδεμένες με ψαμμιτομαργαϊκό συνδετικό υλικό.



Εικόνα 13: Κροκαλοπαγές από τη θέση Γιαννούλας

Ηφαιστειακά (βλ. Εικ. 14): Πρόκειται κερατοφύρες που συνοδεύονται από τοφφίτες.



Εικόνα 14: Ηφαιστειακά

Κροκαλοπαγές από Θρακομακεδόνες (βλ. Εικ. 15): Επικρατούν τα αδρομερή υλικά όπως Θραύσματα μαρμάρων, σκληρών σχιστόλιθων, στιφρών ασβεστολίθων με ερυθρή συνδετική ύλη και εμφανίζονται ισχυρά μέχρι αρκετά συγκολλημένα.



Εικόνα 15: Κροκαλοπαγές από Θρακομακεδόνες

Μάρμαρο Πεντέλης (βλ. Εικ. 16): Πρόκειται για το λευκό, υποκυανότεφρο ανώτερο μάρμαρο της Πεντέλης.



Εικόνα 16: Μάρμαρο Πεντέλης

Γνεύσιος Πεντέλης (βλ. Εικ. 17):



Εικόνα 17: Γνεύσιος Πεντέλης

Σχιστόλιθοι Διονύσου (βλ. Εικ. 18) Πρόκειται για μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους.



Εικόνα 18: Σχιστόλιθοι Διονύσου

Κάθε δείγμα τεμαχίστηκε σε μικρότερα τεμάχια και προσδιορίστηκαν (βλ. Παράρτημα ΙΙΙ): (i) η ξηρή, ρ_{ξ} , (ii) η διαβρωμένη, ρ_{δ} και (iii) η κοκκώδης, ρ_{κ} πυκνότητα, σε πέντε τουλάχιστον τεμάχια για κάθε τύπο πετρώματος, από τα οποία λαμβάνονταν η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση.

Ο εργαστηριακός προσδιορισμός των πυκνοτήτων των πετρωμάτων έγινε με τη χρήση υδροστατικού ζυγού ακρίβειας (η διαδικασία της μέτρηση περιγράφεται από τον Lagios, 1979). Τα τρία είδη πυκνοτήτων τα οποία προσδιορίστηκαν για κάθε πέτρωμα (i) η ξηρή ρ_{ξ} , (ii) η διαβρωμένη ή κορεσμένη ρ_{δ} και (iii) η κοκκώδης ρ_{κ} πυκνότητα ορίζονται με βάση τις παρακάτω σχέσεις (LAGIOS, 1979):

$$\rho_{\xi} = \frac{B_1}{B_2 - B_3} * \rho_{\text{υγ}}$$

$$\rho_{\kappa} = \frac{B_2}{B_2 - B_3} * \rho_{\text{υγ}}$$

και

$$\rho_{\xi} = \frac{B_1}{B_1 - B_3} * \rho_{\text{υγ}}$$

όπου

B_1 : Βάρος ξηρού δείγματος μετρημένο στον αέρα

B_2 : Βάρος κορεσμένου (στερεού) δείγματος μετρημένο στον αέρα

B_3 : Βάρος κορεσμένου (στερεού) δείγματος μετρημένο στο νερό

$\rho_{\text{υγ}}$: Η πυκνότητα του υγρού που συνήθως είναι νερό

Πριν τη ζύγιση των δειγμάτων τοποθετούνται σε δοχείο με νερό για 48 ώρες για να κορεστούν και στη συνέχεια αφού γίνει η ζύγισή τους στον αέρα (Βάρος B_2) και μέσα στο νερό (Βάρος B_3), τοποθετούνται σε κλίβανο θερμοκρασίας $\sim 100^\circ - 110^\circ\text{C}$ για 24 ώρες. Έτσι, η πρώτη μέτρηση του βάρους του δείγματος μετά την έξοδο του από τον κλίβανο, αντιστοιχεί στο βάρος B_1 .

Στον πίνακα 1 φαίνονται οι πυκνότητες ρ_s των πετρωμάτων που υπολογίστηκαν με την παραπάνω μέθοδο.

Πίνακας 1: Μετρηθείσες πυκνότητες των πετρωμάτων της υπό μελέτη περιοχής

α/α	Είδος Πετρώματος	ρ (gr/cm ³)	Τυπική Απόκλιση (gr/cm ³)
1	Ασβεστόλιθος Αν. Κρητιδικός	2,68	$\pm 0,01$
2	Ασβεστόλιθο Τριαδικός	2,72	$\pm 0,01$
3	Σχιστόλιθος Διονύσου	2,81	$\pm 0,05$
4	Σχιστόλιθος Αθηνών	2,65	$\pm 0,02$
5	Γνεύσιος Πεντέλης	2,62	$\pm 0,02$
6	Νεογενής Μάργα	2,01	
7	Ηφαιστειακά	2,59	$\pm 0,01$
8	Μάρμαρο Πεντέλης	2,69	$\pm 0,01$
9	Περμοτριάδικά κλαστικά	2,57	$\pm 0,03$
10	Κροκαλοπαγές Γιαννούλα	2,48	$\pm 0,02$
11	Κροκαλοπαγές Θρακομακεδόνων	2,42	

Εκτίμηση Σφάλματος Βαρυτικών Ανωμαλιών

Η τυπική απόκλιση του σφάλματος υπολογισμού των βαρυτικών ανωμαλιών, s_{BA} , σύμφωνα με το νόμο διάδοσης του σφάλματος υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο (YOUNG, 1962):

$$s_{BA}^2 = s_{obs}^2 + s_{g_n}^2 + (0.3086 + 0.041923 \cdot 2.67)^2 s_h^2 + 2.67^2 s_t^2 \quad (1-3)$$

όπου:

s_{obs} είναι το σφάλμα του g_{obs}

s_{gn} είναι το σφάλμα της κανονικής βαρύτητας

s_h είναι το σφάλμα του υψομέτρου

s_t είναι το σφάλμα του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης.

Το σφάλμα που περιέχεται στη παρατηρηθείσα τιμή, g_{obs} , της βαρύτητας οφείλεται, κυρίως, στις ακόλουθες αιτίες:

1. Το σφάλμα ανάγνωσης που είναι συνήθως πολύ μικρό, με μέγιστη τιμή $\pm 0,005$ mGal.
2. Το σφάλμα υπολογισμού του datum της απόλυτης τιμής της βαρύτητας, το οποίο συνδέεται και αναφέρεται στο δίκτυο (βάση του IGSN'71, LAGIOS & HIPKIN, 1986). Αυτό το σφάλμα αναμένεται να είναι της τάξης του $\pm 0,03$ mGal (μέση τιμή).
3. Το σφάλμα λόγω των γήινων παλιρροιών. Οι ελαστικές παλίρροιες υπολογίζονται με σφάλμα $\pm 0,0005$ mGal (CARTWRIGHT & TAYLER, 1971), που είναι πράγματι πολύ μικρό. Όμως σε περιοχές πλησίον της θάλασσας η παλιρροϊκή επίδραση είναι δυνατό να είναι ίση με 0,3 mGal. Αυτή είναι δυνατό να αφαιρεθεί ως γραμμική απόκλιση της απόκλισης του οργάνου, με τη λήψη επαναληπτικών μετρήσεων σε βάσεις, κάθε 3-4 ώρες.
4. Το σφάλμα λόγω του συντελεστή κλίμακας του οργάνου. Αυτό εκτιμάται ότι είναι της τάξης μερικών μόλις βαθμών ανά 1.000 mGal. Υποθέτοντας ότι η μέγιστη μετρήσιμη διαφορά βαρύτητας από το σταθμό αναφοράς του δικτύου (π.χ. σταθμός ΓΥΣ ή σταθμός IGSN'71 στο Αεροδρόμιο του Ελληνικού, HIPKIN, et al., 1988), είναι τουλάχιστον 200 mGal, το σφάλμα λόγω του συντελεστή κλίμακας είναι τουλάχιστον $\pm 0,05$ mGal.

Τα σφάλματα των παραπάνω κατηγοριών, 1 έως 5, δίνουν ένα μέσο αριθμητικό σφάλμα ± 0.135 mGal του g_{obs} με μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMS) $\pm 0,035$ mGal.

Λαμβάνοντας υπ' όψει ότι ένα σφάλμα ± 10 m στον καθορισμό των οριζόντιων συντεταγμένων (x, y) των σταθμών είναι ικανοποιητικό προκειμένου να "επιτευχθεί" σφάλμα περίπου $\pm 0,01$ mGal στον υπολογισμό της κανονικής βαρύτητας g_n , θεωρείται δεδομένο ότι η επιτευχθείσα ακρίβεια των μερικών χιλιοστών της παρούσας μελέτης, είχε ως αποτέλεσμα αμελητέο σφάλμα στον υπολογισμό της κανονικής βαρύτητας.

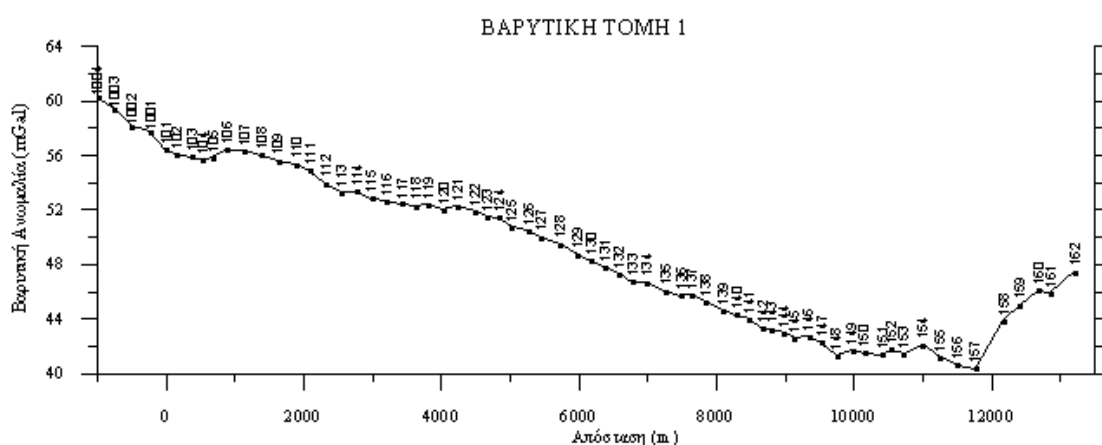
Το σφάλμα των τοπογραφικών διορθώσεων θεωρείται ότι είναι περίπου 10% των ίδιων των τιμών που έχουν εκτιμηθεί (LAGIOS, 1979). Υποθέτοντας ότι η μέση τιμή του συντελεστή τοπογραφικής διόρθωσης των βαρυτικών σταθμών στη περιοχή της Ελλάδος είναι 3 mGal ανά μονάδα πυκνότητας, τότε το σφάλμα στην τοπογραφική διόρθωση είναι περίπου $\pm 0,3$ mGal. Η τιμή αυτή μπορούμε ασφάλεια να θεωρήσουμε ότι λειτουργεί ως άνω όριο για την παρούσα μελέτη αφού για την πλειονότητα των σταθμών που μετρήθηκαν ο συντελεστής τοπογραφικών διορθώσεων είναι μικρότερος της προαναφερόμενης τιμής.

Σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί παραπάνω, το σφάλμα των βαρυτικών ανωμαλιών στην περιοχή της Ελλάδος υπολογίστηκε με τη βοήθεια του μαθηματικού τύπου 1-3. Εκτιμάται ότι είναι περίπου $\pm 0,3$ mGal. Οι παράμετροι της εξίσωσης αναφέρονται στην ιδέα της τυπικής απόκλισης. Επειδή δεν χρησιμοποιήθηκε η τυπική απόκλιση κατά την εφαρμογή της εξίσωσης 1-3 αλλά παρόμοιες εκτιμήσεις, πιστεύεται ότι το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να έχει ελαφρώς υπερεκτιμηθεί.

3.4 Διαγράμματα Τομών Βαρυτικών Ανωμαλιών

Βαρυτική Τομή 1

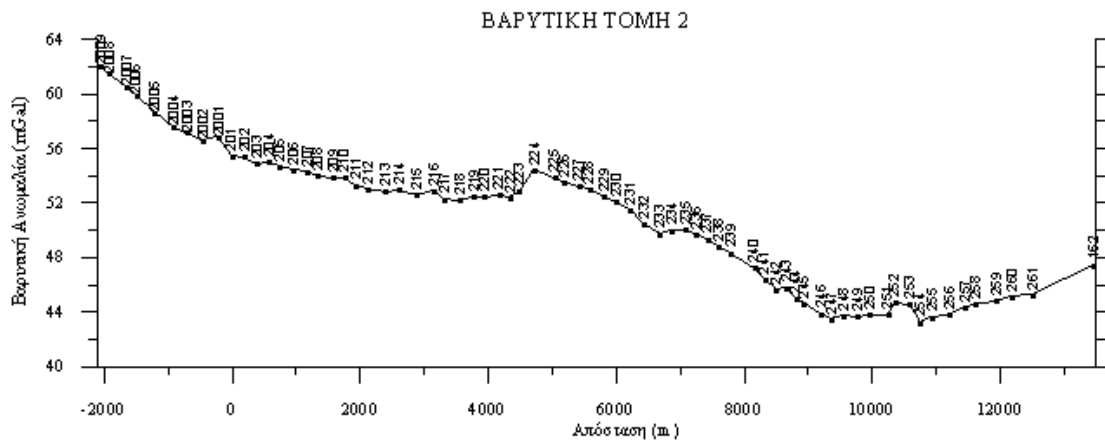
Όπως φαίνεται στην εικόνα 19, η Βαρυτική Ανωμαλία κατά μήκος της τομής 1 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 40 και 60 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 11.773 m (σταθμός 157). Μετά την θέση αυτή η Βαρυτική ανωμαλία αυξάνεται με σχετικά μεγάλο ρυθμό (σχεδόν 5 mGal ανά χιλιόμετρο) για 1,5 χιλιόμετρα μέχρι το τέλος της τομής. Τοπικές ανωμαλίες πολύ μικρότερου πλάτους (μικρότερο από 5 mGal) φαίνεται να υπάρχουν στο νοτιότερο τμήμα της τομής (έως το πέμπτο χιλιόμετρο).



Εικόνα 19: Διάγραμμα Βαρυτικής Ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 1.

Βαρυτική Τομή 2

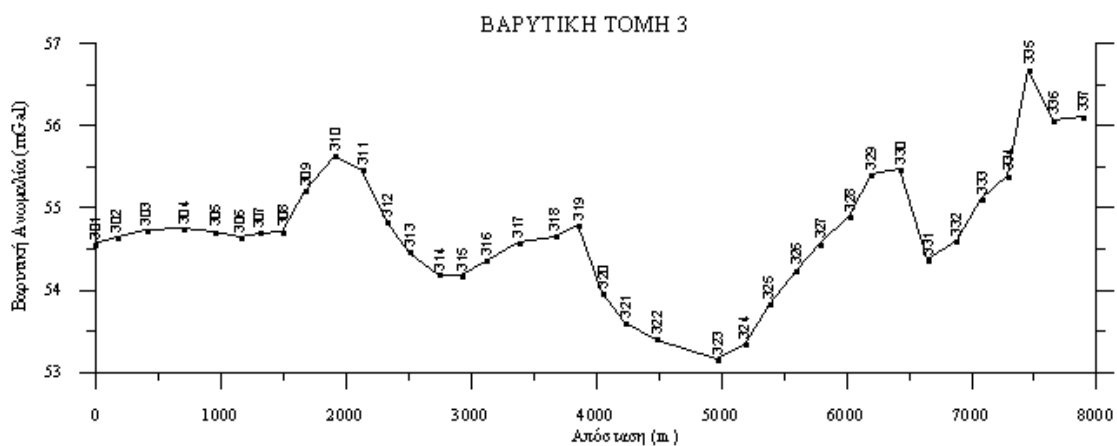
Όπως φαίνεται στην εικόνα 20, η βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 2 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 43 και 61 mGal. Η γενική της μορφή προσομοιάζει με εκείνη της βαρυτικής τομής 1 με σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 10.761 m (σταθμός 254). Μετά την θέση αυτή η βαρυτική ανωμαλία αυξάνεται, αλλά με ρυθμό παρόμοιο εκείνου της μείωσης των τιμών από Νότο προς Βορά. μέχρι το τέλος της τομής. Δυο τοπικά ελάχιστα μεγάλου οριζόντιου εύρους φαίνεται να χωρίζουν την τομή σε δύο σχεδόν διακριτά τμήματα.



Εικόνα 20: Διάγραμμα βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 2.

Βαρυτική Τομή 3

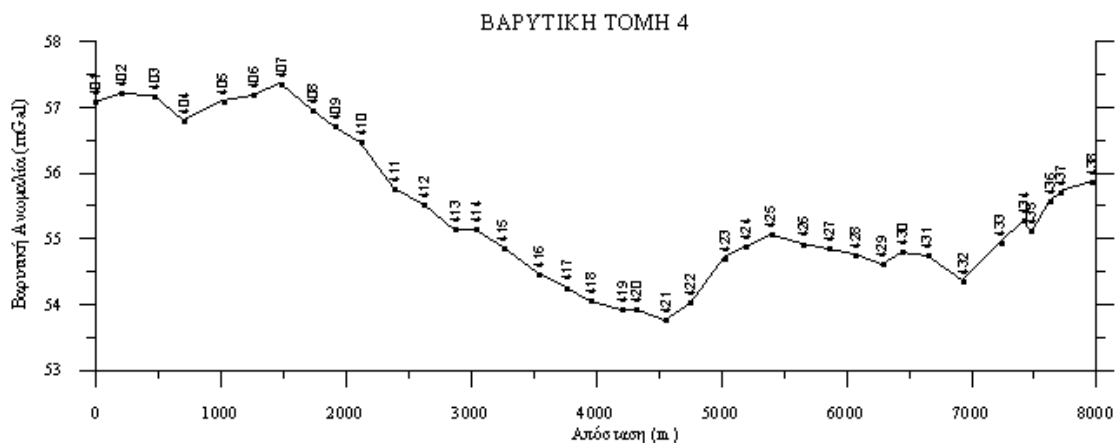
Όπως φαίνεται στην εικόνα 21, η βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 3 παρουσιάζει μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 53 και 56 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση με πολύ μικρό ρυθμό της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 4.975 m (σταθμός 323). Μετά την θέση αυτή η βαρυτική ανωμαλία αυξάνεται μέχρι το τέλος της τομής. Τοπικές ανωμαλίες παρουσιάζονται σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της τομής.



Εικόνα 21: Διάγραμμα βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 3.

Βαρυτική Τομή 4

Όπως φαίνεται στην εικόνα 22, η βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 4 παρουσιάζει μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 53,5 και 57,5 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 4.555 m (σταθμός 421). Μετά την θέση αυτή η βαρυτική ανωμαλία αυξάνεται κλιμακωτά μέχρι το τέλος της τομής εμφανίζοντας ένα τοπικό ελάχιστο στο σταθμό 432. Τοπικές ανωμαλίες παρουσιάζονται σε διάφορες θέσεις κατά μήκος της τομής.



Εικόνα 22: Διάγραμμα βαρυντικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυντικής τομής 4.

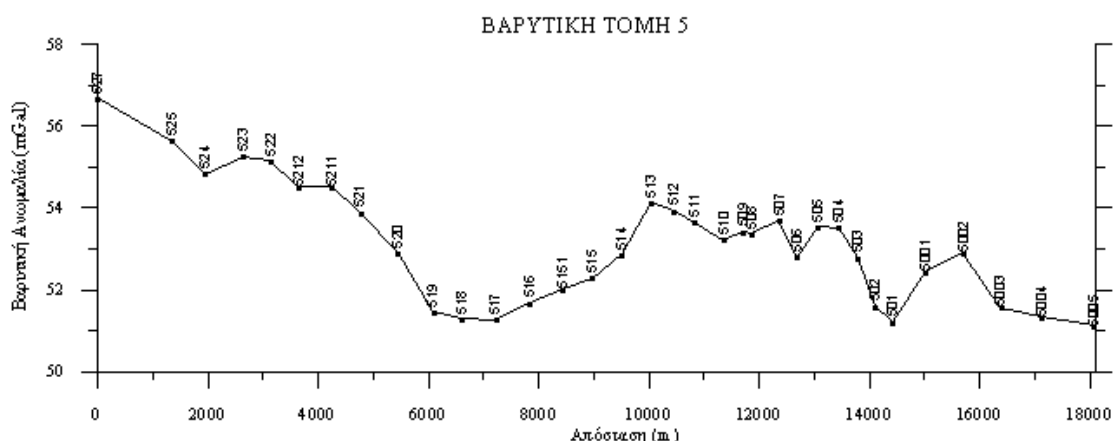
Βαρυντική Τομή 5

Η βαρυντική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 5 (βλ. Εικ. 23) παρουσιάζει μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 51 και 57 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυντικής ανωμαλίας από Ανατολή προς Δύση. Συναντά το ελάχιστο στο Δυτικό άκρο της τομής. Στην περιοχή μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 3.000 και 10.000 m (σταθμοί 522 -513).

Παρατηρούνται τρία τοπικά χαμηλά. Αναλυτικότερα, το πρώτο παρατηρείται από τα 4 km έως τα 10 km (αρχή της τομής είναι ο σταθμός 527), έχει δηλαδή εύρος 6 km και παρουσιάζει πλάτος της τάξεως των 3,2 mGal.

Το δεύτερο τοπικό χαμηλό είναι εύρους 2,5 km και παρουσιάζει πλάτος της τάξεως των 0,9 mGal.

Ακολουθεί το τρίτο χαμηλό από τα 12,5 km έως τα 15,7 km, δηλαδή έχει εύρος 3,2 km και πλάτος 2,3 mGal.

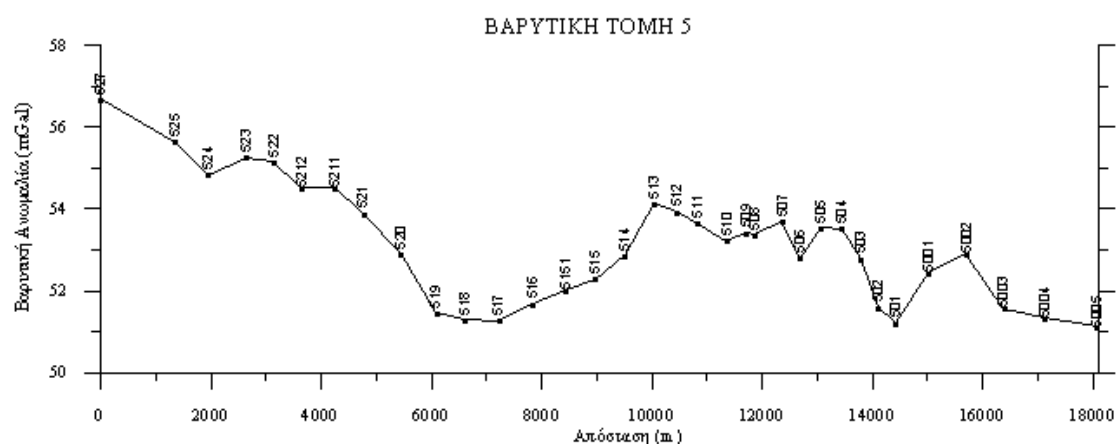


Εικόνα 23: Διάγραμμα βαρυντικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυντικής τομής 5.

Βαρυτική Τομή 6

Όπως φαίνεται στην εικόνα 24, η βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 6 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 42 και 50 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο κοντά στην χιλιομετρική θέση 7.000 m (σταθμός 615).

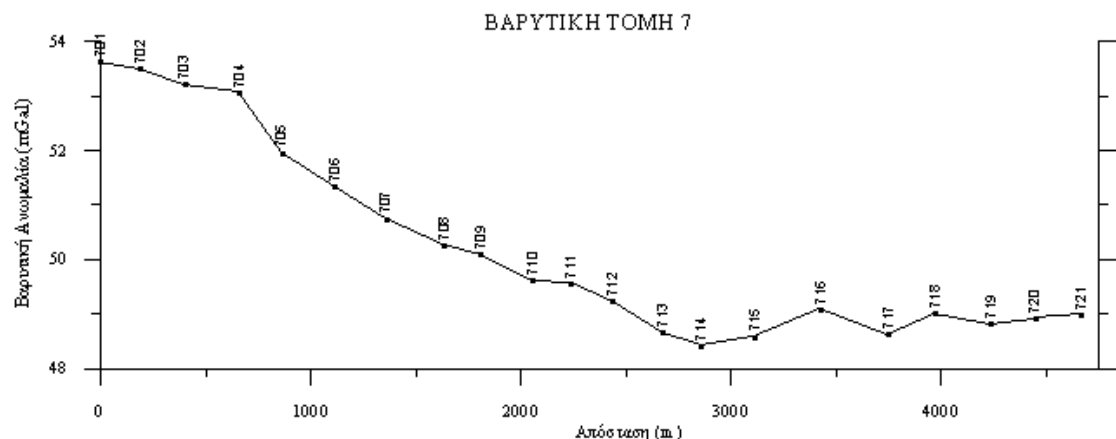
Η τομή 6 (βλ. Εικ. 24) παρουσιάζει δύο τοπικά χαμηλά. Το πρώτο τοπικό χαμηλό οριζοντίου εύρους 3,7 km εμφανίζεται στο βόρειο άκρο της τομής. Ακολουθεί το δεύτερο χαμηλό από τα 4 km μέχρι τα 10,5 km, δηλαδή εύρους 6,5 km με μέγιστο πλάτος 8 mGal. Από το σημείο αυτό και μέχρι το τέλος της τομής, οι τιμές της βαρυτικής ανωμαλίας δεν παρουσιάζουν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις.



Εικόνα 24: Διάγραμμα βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 6.

Βαρυτική Τομή 7

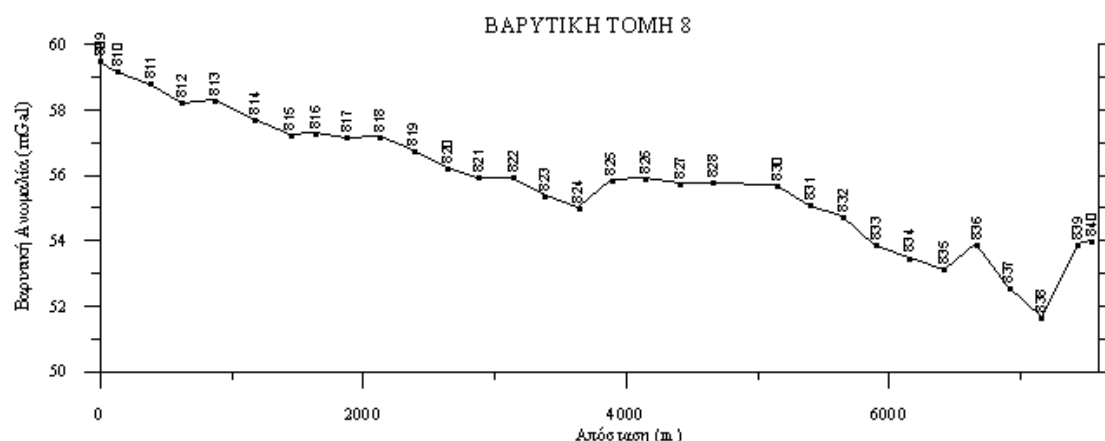
Όπως φαίνεται στην εικόνα 25, η βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 7 παρουσιάζει μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 53,5 και 57,0 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 2.900 m (σταθμός 714). Μετά την θέση αυτή η βαρυτική ανωμαλία παραμένει σχεδόν σταθερή μέχρι το τέλος της τομής.



Εικόνα 25: Διάγραμμα βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 7.

Βαρυτική Τομή 8

Όπως φαίνεται στην εικόνα 26, η βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 8 παρουσιάζει μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 51.5 και 59.5 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 7100 m (σταθμός 838) το σημείο αυτό είναι το πυθμαίο μια τοπικής αρνητικής ανωμαλίας. Κατά μήκος της τομής εμφανίζονται κάποιες τοπικού χαρακτήρα ανωμαλίες.



Εικόνα 26: Διάγραμμα βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 8.

3.5 Διαχωρισμός Τοπικών και Ευρείας Κλίμακας Ανωμαλιών

Οι βαρυτικές ανωμαλίες οφείλονται στην ανομοιογένεια της κατανομής της μάζας κάτω από τα σημεία παρατήρησης. Για την αξιολόγηση και την ερμηνεία τους κρίνεται απαραίτητος ο διαχωρισμός των τοπικών ή υπολειμματικών από τις ευρείας κλίμακας ανωμαλίες. Εάν οι ευρείας κλίμακας ανωμαλίες Bouguer, οι οποίες κατά μείζονα λόγο προέρχονται από βαθύτερες δομές είναι έντονες, τότε είναι δυνατό να επισκιάσουν τις τοπικές ανωμαλίες.

Ο υπολογισμός των ανωμαλιών ευρείας κλίμακας έγινε λαμβάνοντας υπόψη τα σημεία (βαρυτικούς σταθμούς) που βρίσκονται πάνω στο Αλπικό υπόβαθρο, και μάλιστα στις τομές που συνάντησαν το Αλπικό υπόβαθρο περισσότερες από μια φορές. Από την μορφή των καμπύλων της βαρυτικής ανωμαλίας των τομών 1-8 (βλ. εικόνες 19 έως 26) και υπό το πρίσμα της προηγούμενης παρατήρησης, η ευρείας κλίμακας βαρυτική ανωμαλία αντιπροσωπεύεται από μια γραμμική τάση των καμπύλων.

Για τον προσδιορισμό των τοπικών ή υπολειμματικών ανωμαλιών αφαιρέθηκε από τις αρχικές τιμές των ανωμαλιών Bouguer η ευρείας κλίμακας ανωμαλία για κάθε βαρυτική τομή και το αποτέλεσμα της πράξης παρουσιάζεται στις εικόνες 27 έως 34 μαζί με την ερμηνεία της κάθε τομής. Εδώ πρέπει να τονιστεί ότι για την βαρυτική τομή 3 η οποία τέμνει το Αλπικό υπόβαθρο της περιοχής στο ένα άκρο της μόνο, χρησιμοποιήθηκε η γραμμική τάση της γειτονικής της τομής 4, η οποία επιπροσθέτως έχει παράλληλη διεύθυνση.

3.6 Ερμηνεία Βαρυτικών Ανωμαλιών

3.6.α Μεθοδολογία

Η λύση του βαρυτικού προβλήματος (από την λύση της εξίσωσης Laplace) δεν είναι μοναδική, συνεπώς περιορισμοί που μπορούν να τεθούν από τη γνώση ορισμένων στοιχείων, όπως είναι οι πυκνότητες των πετρωμάτων και η γεωλογική δομή της εξεταζόμενης περιοχής, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη προκειμένου τα βαρυτικά μοντέλα που προκύπτουν από την ερμηνεία των βαρυτικών ανωμαλιών να αντιπροσωπεύουν και την γεωλογία. Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε ποιοτική περιγραφή των βαρυτικών ανωμαλιών με στόχο την σκιαγράφηση των ιδιαίτερων τεκτονικών χαρακτηριστικών της μελετώμενης περιοχής, όπου ήταν δυνατό. Για την ποσοτική εκτίμηση και απεικόνιση της δομής του υπεδάφους, κατασκευάστηκαν βαρυτικά μοντέλα κατά μήκος των τομών, χρησιμοποιώντας την υπολειμματική ανωμαλία.

Τα τελικά μοντέλα κατασκευάστηκαν μέσω διαδικασίας «δοκιμής και πλάνης» και βελτιώσεων έως ότου οι υπολογιζόμενες βαρυτικές τιμές να προσαρμοσθούν στις παρατηρούμενες, λαμβάνοντας υπ' όψη μας τους παραπάνω περιορισμούς. Πάντως τα μοντέλα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν μοναδικά και αντιπροσωπεύουν μια μόνον πιθανή ερμηνεία. Η πυκνότητα στα βαρυτικά μοντέλα δεν αντιπροσωπεύεται από την πυκνότητα του κάθε σχηματισμού αλλά από την διαφορά πυκνότητας, Δρ, του ερμηνευμένου σχηματισμού από το περιβάλλον του.

Η ποσοτική ερμηνεία βασίστηκε σε ήδη γνωστά στοιχεία από την γεωλογική χαρτογράφηση, στις πυκνότητες δειγμάτων που μετρήθηκαν και στον υπολογισμό των βαρυτικών ανωμαλιών. Ο καθορισμός του τελικού σχήματος και του βάθους των δομών έγινε με τη χρήση του αλγόριθμου υπολογισμού της βαρυτικής ανωμαλίας διδιάστατου μοντέλου των TALWANI et al. (1959).

Η περιφέρεια οποιουδήποτε διδιάστατου σώματος προσεγγίζεται με ένα πολύγωνο του οποίου οι πλευρές είναι επαρκώς μεγάλες. Η αναμενόμενη ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται μόνον από το κατά πόσο το πολύγωνο ταιριάζει στο δεδομένο σώμα, και αυξάνεται με την αύξηση του αριθμού των πλευρών του πολυγώνου. Συνεπώς τα γεωλογικά μοντέλα κατασκευάζονται με τη χρήση πολυγώνων τα οποία ποικίλουν όσον αφορά στη γεωμετρία τους και την πυκνότητα.

Για την κατασκευή των βαρυτικών μοντέλων, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται στην υπό μελέτη περιοχή ομαδοποιήθηκαν σε πέντε κύριες ενότητες, αφού ορισμένοι από αυτούς έχουν παραπλήσιες τιμές πυκνότητας και πρακτικά πρέπει να αντιμετωπιστούν ενιαία.

Διακρίνουμε:

- Τα μη-μεταμορφωμένα μεσοζωικά ιζήματα για τα οποία μετρήθηκε μέση πυκνότητα $2,70 \text{ gr/cm}^3$ και περιλαμβάνουν τον άνω κρητιδικό ασβεστόλιθο, τον Τριαδικό ασβεστόλιθο και τα περμο-τριαδικά κλαστικά (αρκόζες, γραουβάκες και αργιλικόι σχιστόλιθοι).
- Τα μεταμορφωμένα μεσοζωικά ιζήματα, περιλαμβάνουν τους Αθηναϊκούς σχιστόλιθους, τα μάρμαρα της Πεντέλης, τους γνεύσιους της Πεντέλης και τους σχιστόλιθους του Διονύσου. Αν και για τα περισσότερα μετρήθηκε πυκνότητα παρόμοια με αυτή των μη-μεταμορφωμένων, η παρουσία αυξημένου ποσοστού των Αθηναϊκών σχιστολίθων (μετρημένη πυκνότητα

2,80 gr/cm³) στο νότιο άκρο της βαρυτικής τομής 6, οδήγησε στην διαφοροποίηση της πυκνότητας του σχηματισμού για τις ανάγκες της βαρυτικής ερμηνείας με αποδιδόμενη πυκνότητα 2,75 gr/cm³.

Τα νεογενή ιζήματα αποτελούμενα αποκλειστικά από μάργες, τα οποία παρουσιάζουν μέση πυκνότητα ίση με 2,00 gr/cm³.

- Τα τεταρτογενή ριπίδια χειμάρρων, πλευρικά κορήματα κώνους κορημάτων και προσχωσιγενή υλικά (κροκαλοπαγή Γιαννούλα) στα οποία μετρήθηκε μέση πυκνότητα ίση με 2,48 gr/cm³. Τέλος, υπολογίστηκε ότι η μέση πυκνότητα των πλειστοκαινικών κροκαλοπαγών Θρακομακεδόνων είναι ίση με 2,42 gr/cm³.

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι υπάρχει μια διαφορά πυκνότητας μεταξύ των μεσοζωικών ασβεστολίθων και των νεογενών ιζημάτων της τάξεως των 0,70 gr/cm³, ενώ αντίστοιχα η διαφορά πυκνότητας μεταξύ των μεσοζωικών ασβεστολίθων και των τεταρτογενών ιζημάτων είναι της τάξεως των 0,22 gr/cm³ και μεταξύ των μεσοζωικών σχηματισμών και των πλειστοκαινικών κροκαλοπαγών Θρακομακεδόνων είναι αντίστοιχα της τάξεως των 0,28 gr/cm³. Οι διαφορές πυκνότητας χρησιμοποιήθηκαν ως διαφορές πυκνότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι λόγω της ευδιαλυτότητας της νεογενούς μάργας δεν κατέστη δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της διαβρωμένης ή κορεσμένης πυκνότητας της. Ως εκ τούτου και λόγω της υψηλής διαφοράς πυκνότητας μεταξύ των νεογενών αποθέσεων και του υποβάθρου, κατασκευάστηκαν δύο διδιάστατα μοντέλα με διαφορά πυκνότητας 0,70 και 0,50 gr/cm³, αντίστοιχα.

Επιπλέον, θα πρέπει να τονιστεί ότι λόγω της υφιστάμενης απόστασης μεταξύ των βαρυτικών σταθμών (απόσταση της τάξεως των 300-400 m), δομές με μικρότερο μήκος κύματος (μικρότερο των 200 m) ήταν αδύνατο να διακριθούν.

3.6.β Ερμηνεία Υπολειμματικής Βαρυτικής Ανωμαλίας

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα της υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας και γίνεται συζήτηση για την ποσοτική ερμηνεία η οποία προέκυψε. Σε όλες τις βαρυτικές τομές (πλην της τομής 6) η επιφανειακή γεωλογία μας επιτρέπει την χρήση σχετικά απλών δομών όσον αφορά τις χρησιμοποιούμενες διαφορές πυκνότητας, Δρ. Οι υπολογισμοί αναφέρονται στο Αλπικό υπόβαθρο το οποίο θεωρείται για τους υπολογισμούς ότι έχει Δρ ίση με 0 gr/cm³. Σε όλες τις προαναφερόμενες τομές φαίνεται να συνεχίζεται κάτω από τα χαλαρά ιζήματα πλήρωσης τόσο της λεκάνης του Κηφισού (τομές 1, 2 και 7), όσο και κάτω από την λεκάνη του Ασπρόπυργου καθώς και κάτω από την μικρών διαστάσεων λεκάνη η οποία αναπτύσσεται στην περιοχή της Φυλής (τομές 3, 4, 5 και 8). Για τα ιζήματα αυτά, οι διαφορές της πυκνότητας τους προέκυψαν με βάση τις εργαστηριακές μετρήσεις δειγμάτων και εκείνων των αλπικών σχηματισμών του υποβάθρου. Στην βαρυτική τομή 6 η δομή φαίνεται ότι είναι πιο πολύπλοκη. Στα ιζήματα πλήρωσης της λεκάνης υφίσταται εσωτερική διαφοροποίηση, στην εγγύς του ποταμού Κηφισού περιοχή, ενώ μια μικρή διαφοροποίηση μεταξύ μεταμορφωμένων και αμεταμόρφωτων του υποβάθρου της λεκάνης δεν μπορεί να αποκλειστεί από τα βαρυτικά δεδομένα.

Στις περιγραφές που ακολουθούν, και ειδικότερα στις ερμηνείες, δίδεται ιδιαίτερο βάρος στις περιοχές όπου το υπόβαθρο παρουσιάζει μεταπτώσεις εντονότερου χαρακτήρα. Στις εικόνες τονίζονται οι πλευρικές μεταπτώσεις με τη σχεδίαση κεκλιμένων γραμμών, οι οποίες αποδίδουν την φορά κλίσης τους και επιχειρείται μια

εκτίμηση του άλματος της μετάπτωσης. Η παρουσία των γραμμών αυτών δεν πρέπει να εκλαμβάνεται εκ προοιμίου ότι αντιπροσωπεύουν μεταπτώσεις τεκτονικού χαρακτήρα. Για τον λόγο αυτό δεν τους αποδίδεται ο χαρακτηρισμός του ρήγματος ή του πιθανού ρήγματος, παρά μόνον εκεί όπου από την γεωλογική μελέτη είτε έχει πιστοποιηθεί η παρουσία ρηγματικής ζώνης, είτε αναμένεται η ύπαρξη πιθανού ρήγματος. Στις περιπτώσεις αυτές και μόνο, οι αντίστοιχες μεταπτώσεις που προέκυψαν από την ερμηνεία των βαρυτικών τομών μπορούν να θεωρηθούν ως πρόταση για την υπεδαφική συνέχεια όσων η επιφανειακή παρατήρηση προτείνει.

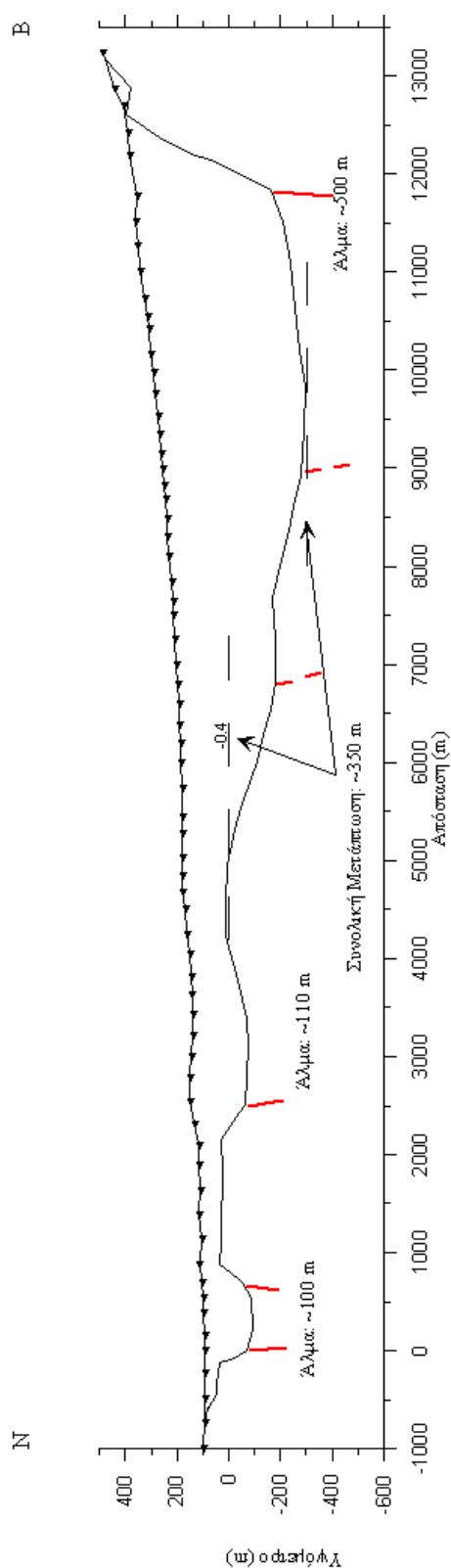
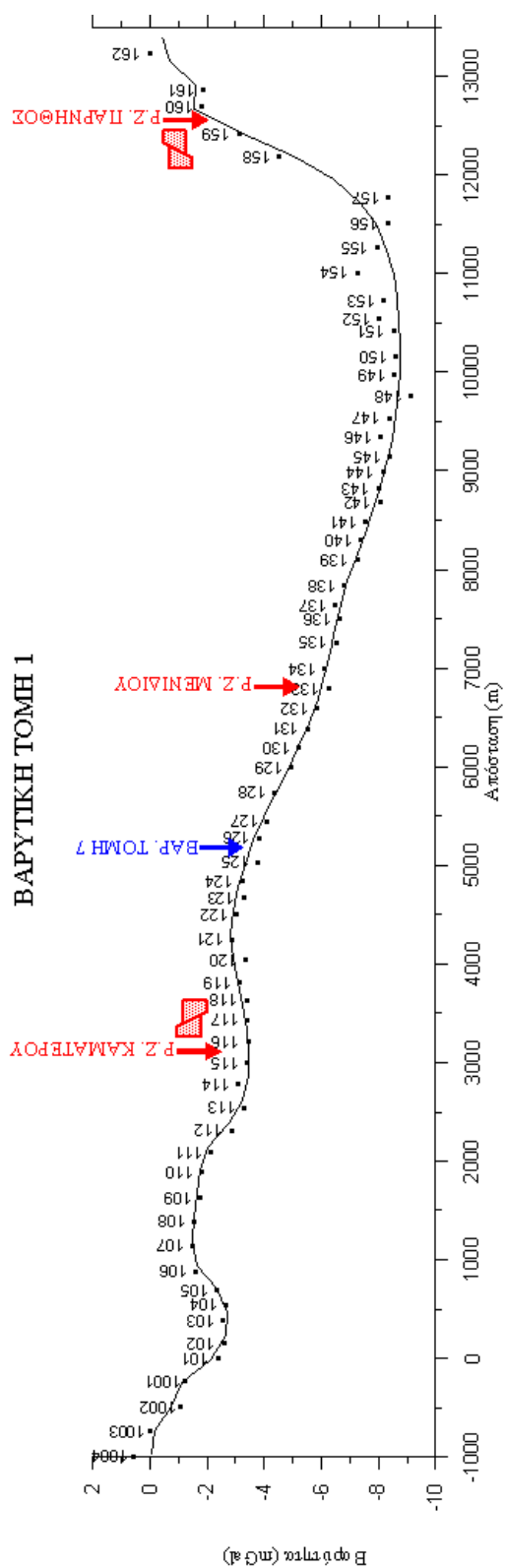
Κατά τον σχολιασμό των τομών ο οποίος ακολουθεί, αυτές παρουσιάζονται ομαδοποιημένες σύμφωνα με την γειτνίασή τους. Στην αρχή θα σχολιαστούν αυτές που έχουν εκτελεστεί εντός της λεκάνης του Κηφισού (οι γειτονικές τομές 1, 2, και 7, ακολούθως η 6 και έπειτα εκείνες που εκτελέστηκαν εντός του Θριάσιου πεδίου (οι γειτνιάζουσες 3, 4, 5 και 8).

Βαρυτική Τομή 1

Όπως φαίνεται στην εικόνα 27, η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 1 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 0 και -9 mGal. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Νότο προς Βορρά. Συναντά το ελάχιστο στην περιοχή μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 10.000 και 12.000m (σταθμοί 147 - 157). Μετά την θέση αυτή η βαρυτική ανωμαλία αυξάνεται με σχετικά μεγάλο ρυθμό (σχεδόν 5 mGal ανά χιλιόμετρο) για 1,5 χιλιόμετρα μέχρι το τέλος της τομής. Βαρυτικές ανωμαλίες τοπικότερου χαρακτήρα και μικρότερου πλάτους (της τάξεως των 2 mGal) φαίνεται να υπάρχουν στο νοτιότερο τμήμα της τομής (έως το πέμπτο χιλιόμετρο). Στην περιοχή του ελάχιστου της τομής (σταθμοί 147 - 157) εμφανίζεται μια τοπική ανωμαλία πλάτους 1,5 mGal.

Με βάση το μοντέλο της ερμηνείας της υπολειμματικής ανωμαλίας (κάτω τμήμα της εικόνας 27) η δομή που πιθανόν ερμηνεύει την παρατηρούμενη ανωμαλία είναι εκείνη μιας ασύμμετρης λεκάνης. Ο πυθμένας της βυθίζεται σταδιακά προς βορρά μέχρι την χιλιομετρική θέση 11.750 m, όπου διακόπτεται από το βόρειο περιθώριό της, του οποίου η μεγάλη κλίση και το άλμα (της τάξεως των 500 m) δείχνουν την ύπαρξη ρήγματος. Οι τοπικού χαρακτήρα ανωμαλίες της περιοχής 0 - 5 km αποδίδονται στο μοντέλο με ταπείνωση του πυθμένα της λεκάνης (η ταπείνωση της τάξεως των 100 m) με την παρουσία ενός κεντρικού υβώματος (ύψους 100 m). Η κλιμακωτή μορφή των μεταπτώσεων που εμφανίζει ο πυθμένας από το πέμπτο χιλιόμετρο έως το βαθύτερο τμήμα της λεκάνης (συνολική μετάπτωση 350 m), θα μπορούσε ίσως να αποδοθεί στην ύπαρξη ρηγμάτων (διακεκομμένες γραμμές) οι οποίες επηρεάζουν την μορφή του παλαιοαναγλύφου.

Η τοπικού χαρακτήρα ανωμαλία στην περιοχή των σταθμών 147 έως 157 δεν μπορεί να αποδοθεί σε ανωμαλία του πυθμένα της λεκάνης (κάτι τέτοιο θα είχε ως αποτέλεσμα βαρυτική ανωμαλία μεγαλύτερου μήκους κύματος από την παρατηρούμενη). Το γεγονός ότι παρόμοια ανωμαλία (η συνέχειά της προς την εγκάρσια της τομής διεύθυνση) εμφανίζεται και στην τομή 2, όπως θα δειχθεί παρακάτω η οποία απέχει απόσταση μικρότερη του ενός χιλιομέτρου επιβάλλει τον σχολιασμό της. Στην περιοχή αυτή παρατηρείται γεωλογικά η ανάπτυξη κώνου κορημάτων. Πιθανόν η ανωμαλία να οφείλει την ύπαρξή της σε τοπική διαφοροποίηση της πυκνότητας, σε πολύ μικρό βάθος.



Εικόνα 27: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 1. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με τρίγωνα.

Βαρυτική Τομή 2

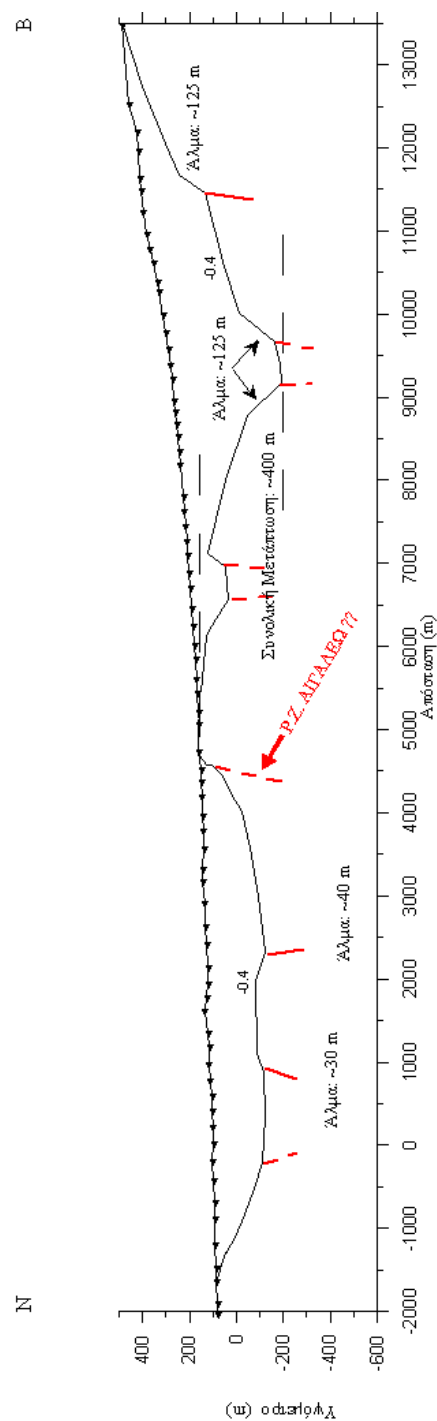
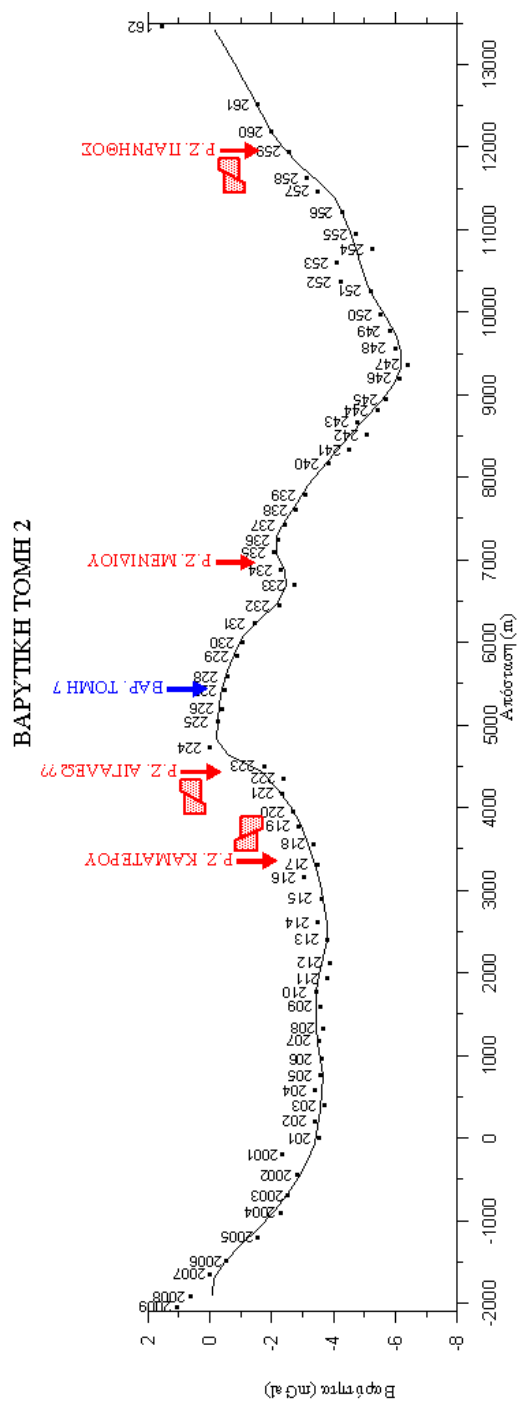
Όπως φαίνεται στην εικόνα 28, η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 2 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 1 και -6 mGal. Η γειτνίασή

της προς το Αιγάλεω όρος έχει ως αποτέλεσμα, στο κέντρο περίπου της τομής ο σταθμός 224 να εδράζεται επί του αλπικού υποβάθρου.

Παρουσιάζει κάποιες ομοιότητες με την γειτονική της τομή 1, αν και κάποιες δομές εδώ εμφανίζουν διαφορετική ανάπτυξη. Συναντά το ελάχιστο στην περιοχή μεταξύ των χιλιομετρικών θέσεων 9.000 και 10.000m (σταθμοί 245 - 250). Μετά την θέση αυτή η βαρυτική ανωμαλία αυξάνεται με ρυθμό της τάξεως των 2.5 mGal ανά χιλιόμετρο μέχρι το τέλος της τομής. Ο ρυθμός αυτός είναι σαφώς μικρότερος (ο μισός) από εκείνον του αντίστοιχου τμήματος της τομής 1. Στο νότιο τμήμα της τομής οι βαρυτικές ανωμαλίες τοπικότερου χαρακτήρα που εμφανίζονται στην τομή 1, εδώ χάνουν την σαφήνεια που παρουσίαζαν στην τομή 1 (πλάτος μικρότερο του 0,5 mGal), ενώ στην περιοχή κυριαρχεί μια τοπική αρνητική ανωμαλία με πλάτος της τάξεως των 4 mGal και εύρος όλο το νότιο τμήμα με πεπλατυσμένο το πυθμαίο της. Στην περιοχή του ελάχιστου της τομής (σταθμοί 245 - 250) εμφανίζεται η συνέχεια της αντίστοιχης τοπικής ανωμαλίας που εμφανίζεται στο ελάχιστο της τομής 1 και η οποία σχολιάστηκε παραπάνω.

Με βάση το μοντέλο της ερμηνείας της υπολειμματικής ανωμαλίας (κάτω τμήμα της εικόνας 28) η δομή που ερμηνεύει την παρατηρούμενη ανωμαλία της τομής 2 σχετίζεται όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο με εκείνη της τομής 1. Η ενιαία ασύμμετρη λεκάνη, εδώ φαίνεται να έχει διαχωριστεί σε δύο υπολεκάνες. Η βόρεια υπολεκάνη, ρηχότερη από το αντίστοιχο τμήμα της τομής 1, παρουσιάζει συμμετρική γεωμετρία. Το βόρειο περιθώριο της λεκάνης έχει αποκτήσει πλέον κλιμακωτή γεωμετρία ενώ δύο τοπικά βυθίσματα έχουν αναπτυχθεί στο νότιο περιθώριο της υπολεκάνης και στην κεντρική της περιοχή (χιλιομετρικές θέσεις 7.000 m και 9.500 m), στην προς δυσμάς συνέχεια των πιθανών ρηγμάτων που διαμορφώνουν την κλιμακωτή μορφή του παλαιοαναγλύφου στην κεντρική περιοχή της τομής 1.

Η δομή του νότιου τμήματος (περιοχή -2 έως 5 km) αποδίδεται στο μοντέλο με περαιτέρω ταπείνωση του πυθμένα της λεκάνης (η ταπείνωση της τάξεως των 250 m) και την σχετική ταπείνωση του κεντρικού υβώματος (ύψος 30-40 m). Η έντονη κλίση που απαιτείται για το βόρειο περιθώριο της λεκάνης θα μπορούσε να αποδοθεί σε πιθανό ρήγμα



Εικόνα 28: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 2. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

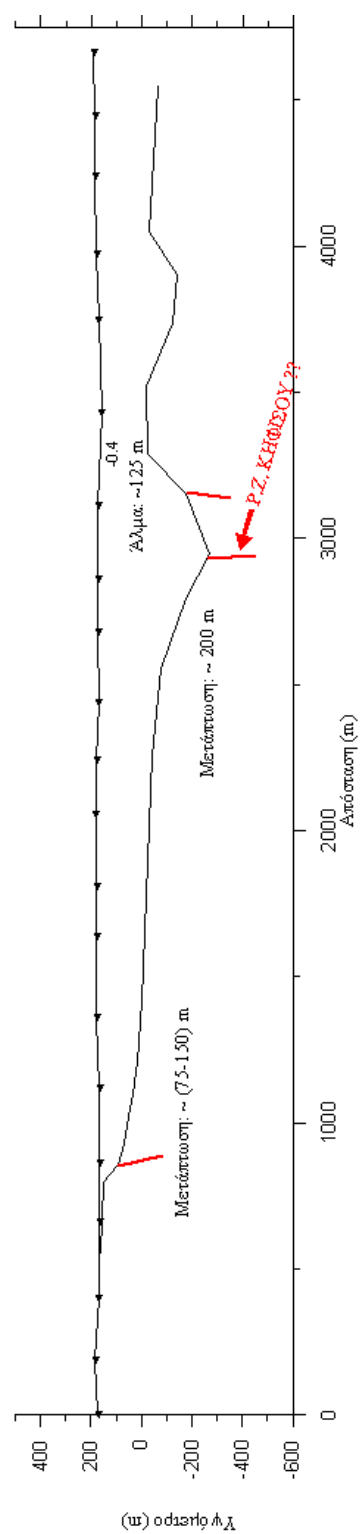
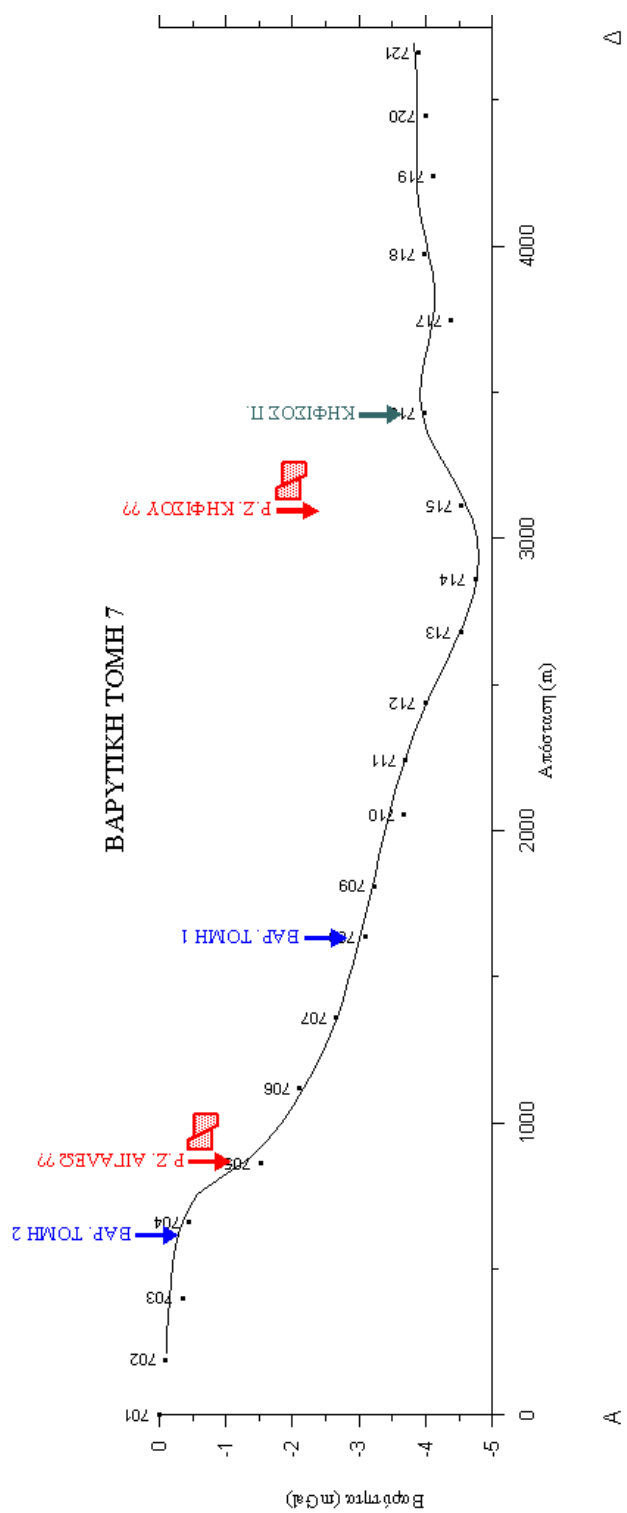
Βαρυτική Τομή 7

Όπως φαίνεται στην εικόνα 29, η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 7 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 0 και -5 mGal. Έχει διεύθυνση κάθετη προς τις τομές 1 και 2, διασταυρώνεται μάλιστα με αυτές στους σταθμούς 704 και 708. Παρουσιάζει σε γενικές γραμμές σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας από Ανατολή προς Δύση. Συναντά το ελάχιστο στην χιλιομετρική θέση 3.900 m (σταθμός 714). Ενδιαφέρον παρουσιάζουν τρία σημεία της τομής. Μεταξύ των σταθμών 704 και 706 η καμπύλη εμφανίζει ένα σημείο καμψής. Στην περιοχή του σταθμού 714 εμφανίζεται μια τοπική αρνητική ανωμαλία μικρού εύρους (<1.000 m) και πλάτους (της τάξεως των 2 mGal). Μια ακόμη μικρότερων διαστάσεων ανωμαλία εμφανίζεται στην περιοχή του σταθμού 717.

Στην ερμηνεία της τομής το σημείο καμψής αποδίδεται σε μετάπτωση της τάξεως των 75 έως 150 m (η θέση της και το άλμα της επιτρέπουν να συσχετιστεί με την αντίστοιχη μετάπτωση της τομής 2).

Η αρνητική τοπική ανωμαλία στην περιοχή του σταθμού αποδόθηκε στην ερμηνεία σε τοπικό βύθισμα με μετάπτωση των περιθωρίων του της τάξης των 200 και 125 m αντίστοιχα. Η θέση και η φορά κλίσης καθώς και το άλμα του ανατολικού περιθωρίου μπορεί να συνδέεται με ρηξιγενή ζώνη.

Η ανωμαλία της περιοχής του σταθμού 717 έχει αποδοθεί κατά την ερμηνεία σε τοπικό βύθισμα μικρότερων διαστάσεων.

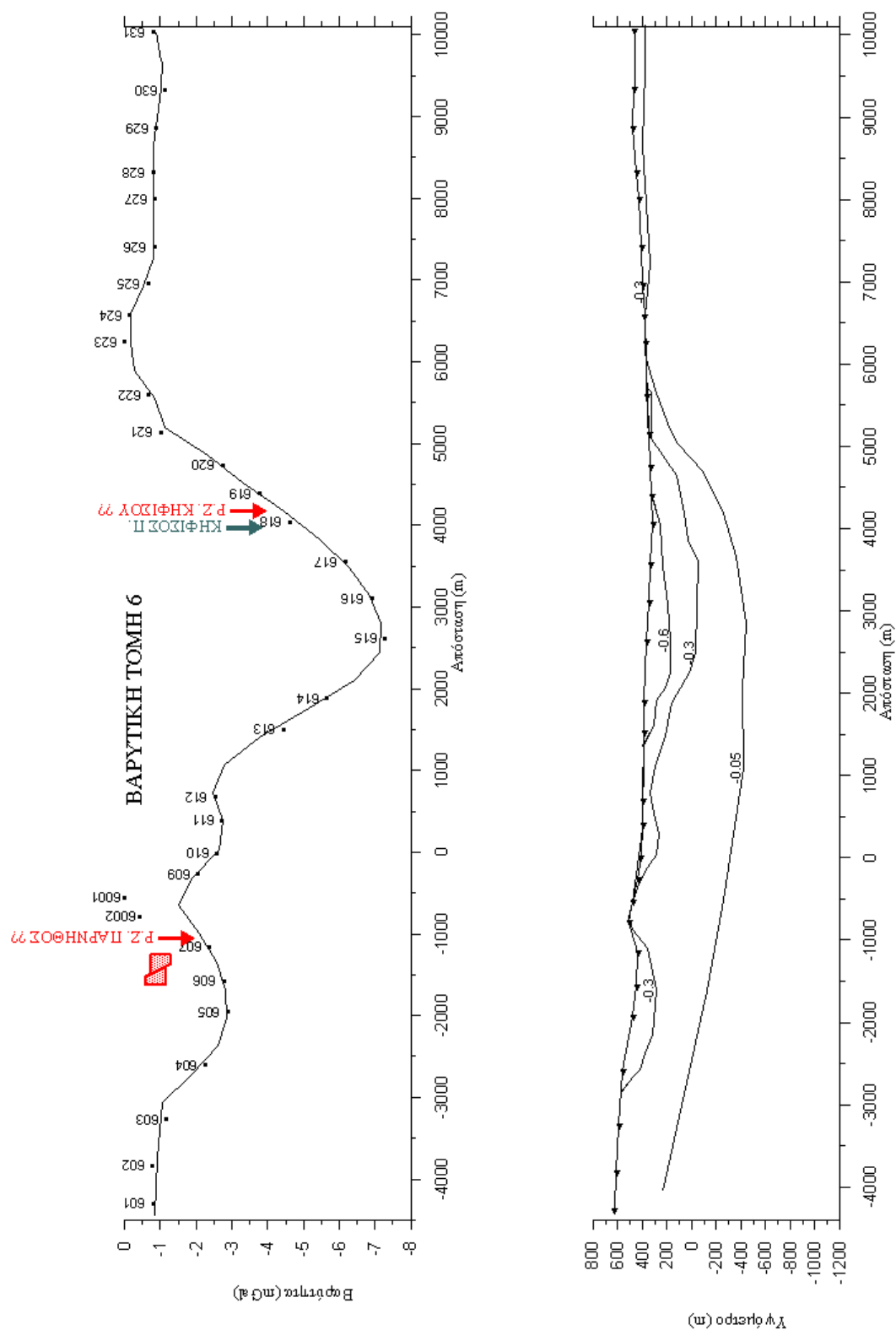


Εικόνα 29: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 7. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

Βαρυτική Τομή 6

Όπως φαίνεται στην εικόνα 30, η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 6 παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 0 και -7 mGal. Κυριαρχείται από μια τοπική αρνητική ανωμαλία οριζόντιου εύρους 6 km και με πλάτος περί τα 8 mGal το πυθμαίο της οποίας βρίσκεται στην χιλιομετρική θέση 2,5 km (σταθμός 615). Δύο σαφώς μικρότερων διαστάσεων και πλάτους τοπικές αρνητικές ανωμαλίες εμφανίζονται βορειότερα με πυθμαία στις χιλιομετρικές θέσεις 0 και -2 km.

Όπως διακρίνεται και στην ερμηνεία τα κροκαλοπαγή ($\Delta\rho = -0,3 \text{ gr/cm}^3$) έχουν μια σχεδόν συμμετρική λεκάνη. Το μεταμορφωμένο αλπικό υπόβαθρο της περιοχής παρουσιάζει μια μέση διαφορά πυκνότητας της τάξεως των 0.05 gr/cm^3 από το αλπικό μη μεταμορφωμένο υπόβαθρο. Η δομή που παρουσιάζεται στην εικόνα επιβεβαιώνει την αντίστοιχη σεισμική τομή. Η κλίση των καθώς και το άλμα των επαφών στην χιλιομετρική θέση 5 km θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην διερεύνηση της πιθανότητας παρουσίας κάποιου ρήγματος στην θέση αυτή.



Εικόνα 30: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 6. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

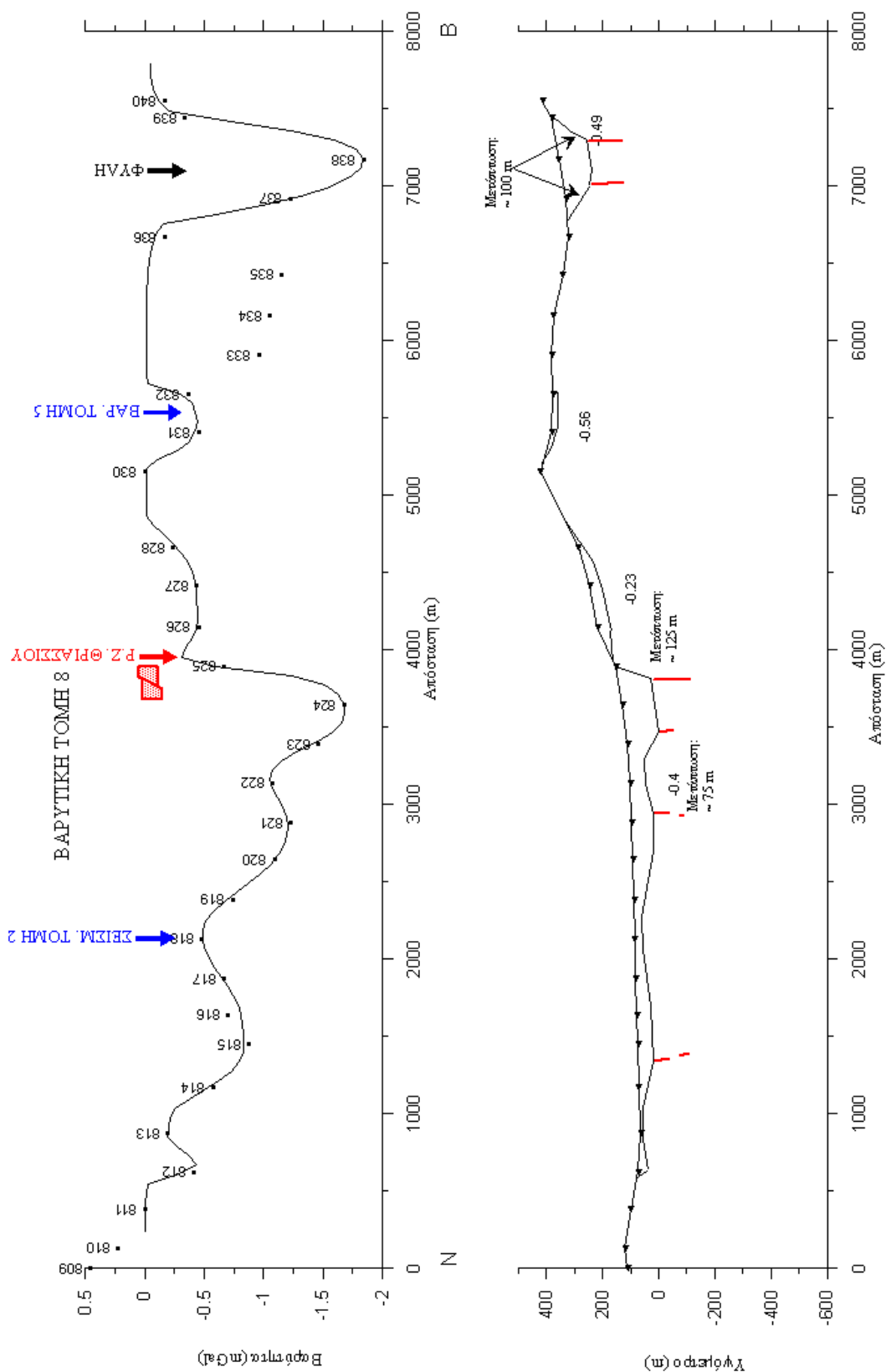
Βαρυτική Τομή 8

Οι τιμές της υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της τομής 8 (βλ. εικ. 31) κυμαίνονται μεταξύ 0,5 και -2 mGal. Παρουσιάζουν σταδιακή ελάττωση της τιμής της βαρυτικής ανωμαλίας με τοπικές διακυμάνσεις από Νότο προς Βορρά μέχρι την χιλιομετρική θέση 3,7 km (σταθμός 824) όπου συναντάται το ελάχιστο του νότιου μισού τμήματος του διαγράμματος. Έπειτα παρατηρείται αύξηση των τιμών με μεγάλο ρυθμό μεταβολής έως τον σταθμό 825 οποίος εδράζεται στο αλπικό υπόβαθρο. Έπειτα, με διακυμάνσεις το διάγραμμα συνεχίζει ως το ελάχιστο της τομής στον σταθμό 838 (στην χιλιομετρική θέση 7,1 km, περίπου στο κέντρο της λεκάνης της Φυλής). Από εκεί μέχρι το τέλος της τομής (σταθμός 840) η τιμή της ανωμαλίας αυξάνεται με μεγάλο ρυθμό μεταβολής.

Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα, η λεκάνη στο νότιο ήμισυ της τομής παρουσιάζει ασύμμετρη γεωμετρία, με την βαθύτερη περιοχή της κοντά στην βόρεια πλευρά της, στην περιοχή του βαρυτικού σταθμού 824. Η ταπείνωση του πυθμένα της λεκάνης φαίνεται να είναι σχετικά ομαλή. Η μικρή έξαρση του πυθμένα η οποία διακρίνεται στο πρώτο χιλιόμετρο της τομής αποτελεί την προς ανατολάς απόληξη μιας έξαρσης, η οποία όπως θα σχολιαστεί παρακάτω παρουσιάζεται και στις τομές 3 και 4. Η θέση, η κλίση και το άλμα που εμφανίζει το βόρειο περιθώριο της λεκάνης όπως αυτό προκύπτει από την ερμηνεία επιτρέπει την συσχέτισή του με τεκτονισμό. Στον πόδα του βορείου περιθωρίου αναπτύσσεται ένα τοπικού χαρακτήρα βύθισμα το οποίο ακολουθείται αμέσως νοτιότερα από ύψωμα ύψους 75 m. Βορειότερα του σταθμού 825 παρατηρούνται δύο τοπικά χαμηλά στις περιοχές των σταθμών 826-828 και 830 – 832, τα οποία οφείλονται στην ύπαρξη χαλαρών ιζημάτων μικρού σχετικά πάχους.

Το βορειότερο τμήμα της τομής διασχίζει την λεκάνη της Φυλής, η οποία σύμφωνα με την ερμηνεία έχει βάθος περί τα 100 m, οριζόμενη από Βορρά και Νότο από περιθώρια με γεωμετρικά χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την συσχέτισή τους με την πιθανή παρουσία ρηγμάτων.

Η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία στην περιοχή των σταθμών 833-835 δεν βρίσκει την προφανή αιτιολόγησή της στην επιφανειακή γεωλογία. Πιθανόν να οφείλεται σε ελάττωση της πυκνότητας των ασβεστολίθων οφειλόμενη σε κατακερματισμό. Επιβεβαιωτική προς αυτήν την κατεύθυνση είναι η ερμηνεία της σεισμικής τομής 1 η οποία στην ίδια περιοχή εντοπίζει μια ζώνη σχετικά χαμηλής ταχύτητας.



Εικόνα 31: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 8. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

Βαρυτική Τομή 4

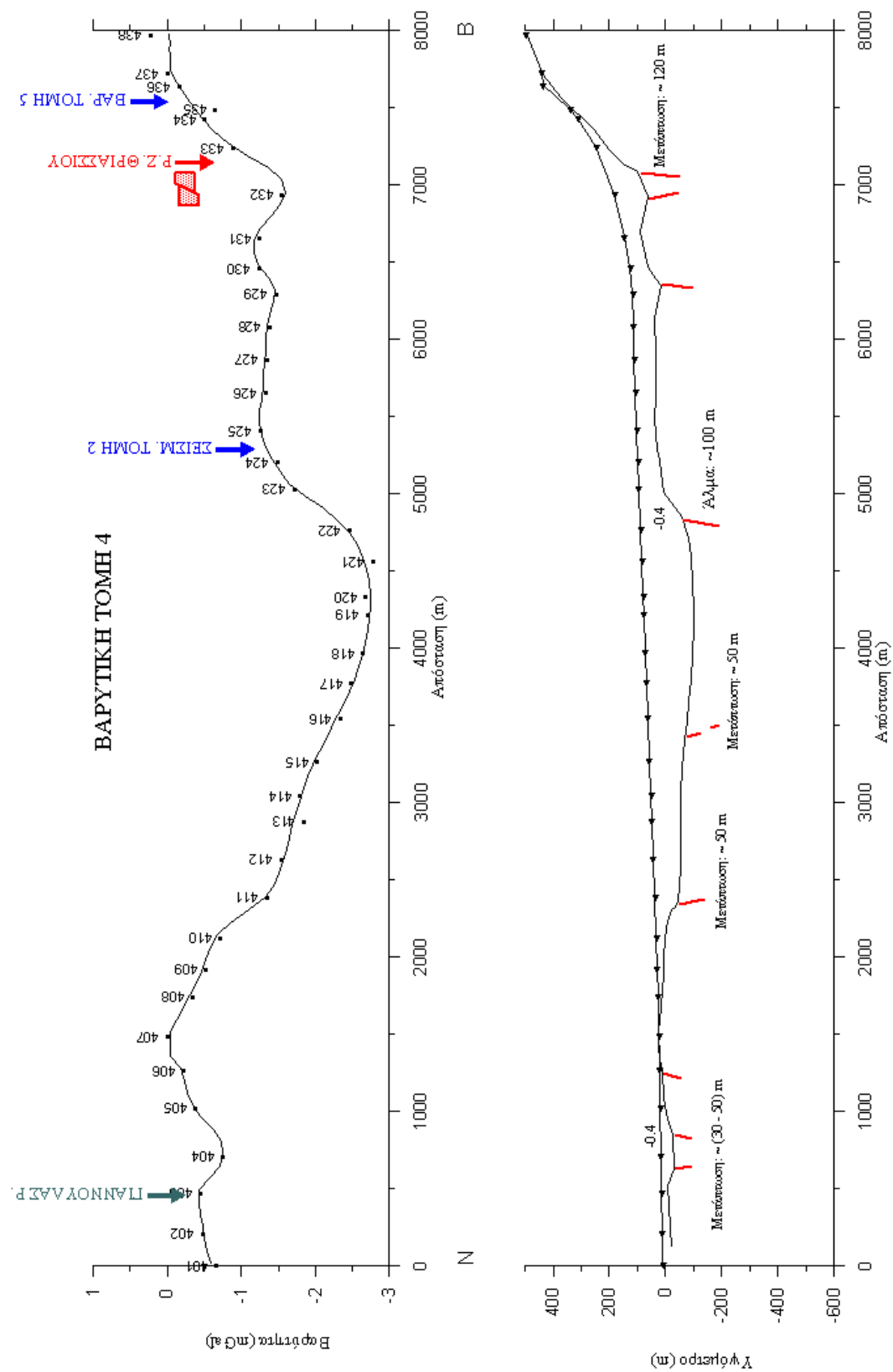
Η τομή 4 με διεύθυνση παράλληλη προς τη τομή 8, είναι τοποθετημένη 2 km δυτικά της δεύτερης. Η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία παρουσιάζει μικρό εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 0 και $-2,5$ mGal (βλ. εικ. 32). Στο νότιο τμήμα της η τομή διασταυρώνεται με το ρέμα του Γιαννούλα και στην περιοχή αυτή παρουσιάζει ένα τοπικό χαμηλό οριζόντιου εύρους ενός χιλιομέτρου και πλάτους μικρότερου του 1 mGal. Από τον σταθμό 407 (χιλιομετρική θέση 1,5 km) η ανωμαλία παρουσιάζει κλιμακωτά ελάττωση της τιμής της και συναντά το ελάχιστο στον σταθμό 420. Βορειότερα οι τιμές της υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας αυξάνονται κλιμακωτά μέχρι το τέλος της τομής.

Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της ερμηνείας, στη περιοχή της διασταύρωσης αναπτύσσεται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια ένα τοπικό βύθισμα. Η μετάπτωση υπολογίζεται της τάξεως των 30 – 50 m. Το ρέμα του Γιαννούλα περνάει επάνω από το νότιο περιθώριο του βυθίσματος. Το γεγονός ότι το ρέμα σε μικρή απόσταση δυτικά της τομής στρίβει απότομα προς ανατολάς και σε απόσταση μικρότερη από ένα χιλιόμετρο ανατολικότερα επανέρχεται με επίσης απότομη στροφή στην πρότερη διεύθυνση μας οδηγεί στην υπόθεση ότι το βύθισμα ενδέχεται να είναι τεκτονικής προέλευσης, το δε ρέμα να ακολουθεί την παράταξη του ρήγματος.

Η μεγάλου εύρους αρνητική ανωμαλία που εκτείνεται καθ' όλο το υπόλοιπο μήκος της τομής ερμηνεύεται ως το αποτέλεσμα των διακυμάνσεων του πυθμένα της λεκάνης του Θριάσιου πεδίου. Το μέγιστο βάθος της λεκάνης (πάχος ιζημάτων της τάξης των 400 μέτρων) συναντάται στο μέσον της τομής. Η ταπείνωση του πυθμένα από το νότιο περιθώριο προς το βόρειο παρουσιάζει κλιμακωτή γεωμετρία, γεγονός που οδηγεί στην υπόθεση ότι η διαμόρφωση του παλαιοαναγλύφου έχει δεχτεί την επίδραση ρηγμάτων με φορά κλίσης όπως φαίνεται στο σχήμα.

Στο βόρειο ήμισυ της λεκάνης το υπόβαθρο ανυψώνεται κλιμακωτά με ένα άλμα περίπου 100 m κατ' αρχάς στο πέμπτο χιλιόμετρο και ένα μικρό ύψωμα στην περιοχή 6,5 - 7 km, το οποίο ακολουθείται από ένα τοπικού χαρακτήρα βύθισμα. Αμέσως βορειότερα το υπόβαθρο ανυψώνεται με πολύ μεγάλο ρυθμό (κλίση της επιφάνειας $\geq 40\%$).

Η δομή του πυθμένα της λεκάνης κατά μήκος της τομής 4 στο βόρειο ήμισυ μπορεί να εκληφθεί, ως η προς δυσμάς συνέχιση της δομής που παρατηρείται στο νότιο ήμισυ της τομής 8.



Εικόνα 32: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 4. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

Βαρυτική Τομή 3

Η τομή 3 είναι τοποθετημένη περί τα δύο χιλιόμετρα δυτικότερα της τομής 4 (βλ. εικ. 33). Έχει και αυτή την ίδια διεύθυνση με τις τομές που αμέσως πιο πριν σχολιάστηκαν. Το εύρος τιμών που παρουσιάζει η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία κυμαίνεται μεταξύ 0 και -4 mGal.

Κατά μήκος των πρώτων πέντε από τα οκτώ συνολικά χιλιόμετρα της παρούσας τομής (νότιο τμήμα) η βαρυτική ανωμαλία κυμαίνεται περί τα -4 mGal εκτός από δύο τοπικές θετικές ανωμαλίες πλάτους περίπου 1-1,5 mGal, με οριζόντιο εύρος περί το ένα χιλιόμετρο. Βορειότερα του πέμπτου χιλιομέτρου οι τιμές του διαγράμματος αυξάνονται σταδιακά για 1,5 περίπου χιλιόμετρο με ρυθμό 2 mGal /km και ακολουθεί ένα τοπικό χαμηλό πλάτους περίπου 1-1,5 mGal και εύρος ενός χιλιομέτρου.

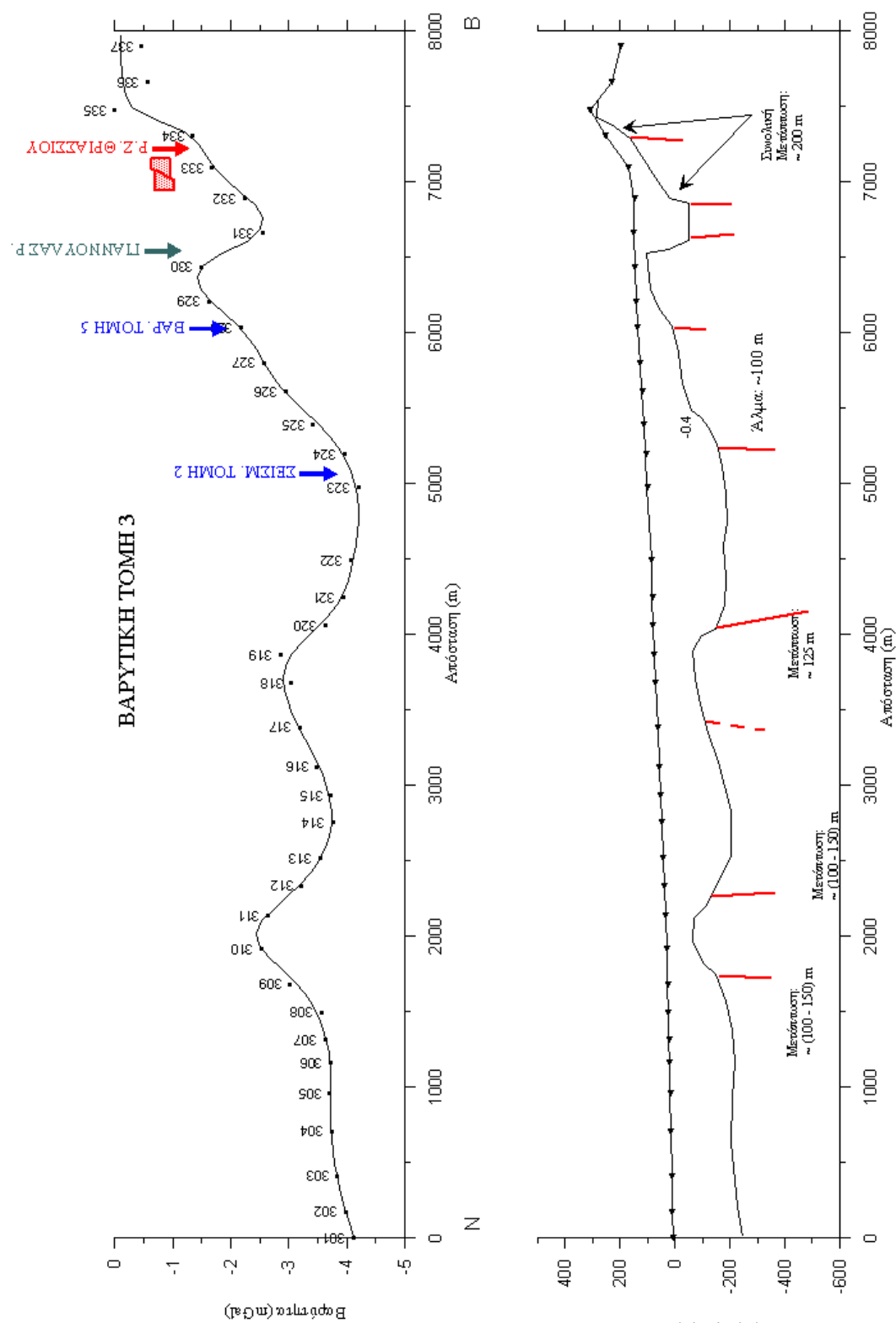
Οι διακυμάνσεις της βαρυτικής ανωμαλίας, όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της ερμηνείας, αποδίδονται σε διακυμάνσεις του πυθμένα της λεκάνης. Στην περιοχή της τομής 3 τα ιζήματα της λεκάνης έχουν πάχη της τάξης των 250 - 300 m.

Στην χιλιομετρική θέση 2 km υπάρχει τοπικού χαρακτήρα ύβωμα εύρους 1 χιλιομέτρου. Η μετάπτωση εκατέρωθεν του υβώματος είναι 100-150 m. Η κλίση και το άλμα της μετάπτωσης επιτρέπει να αποδοθεί ο τεκτονικός χαρακτήρας της δομής. Το ίδιο ισχύει και για το ύβωμα στην θέση 4000 m, το οποίο παρουσιάζει ασύμμετρη γεωμετρία, και του οποίου η βόρεια κλιτύς εμφανίζει απότομη κλίση με άλμα της τάξης των 125 m .

Βορείως του πέμπτου χιλιομέτρου της τομής ο πυθμένας της λεκάνης εμφανίζει κλιμακωτή ανύψωση. Στην περιοχή 6.500 m – 7.000 m εμφανίζεται η παρουσία τοπικού βυθίσματος του οποίου τα περιθώρια παρουσιάζουν άλμα περί τα 200m.

Οι τοπικές δομές που παρουσιάζονται και στην τομή 3 φαίνεται να είναι η προς δυσμάς συνέχιση δομών που εμφανίζονται και στις τομές 4 και 8. Συγκρίνοντας την τομή 4 με τις 3 και 8 μπορεί σημειωθεί ότι στο νότιο ήμισυ της τομής 3 παρουσιάζεται απότομη ταπείνωση του πυθμένα της λεκάνης. Στη περιοχή 4.000 – 6.500 m η δομή, που στην τομή 4 στην αντίστοιχη περιοχή περιγραφόταν ως «τοπικού χαρακτήρα εξάρσεις του πυθμένα», εδώ έχει εξελιχθεί σε κλιμακωτή ταπείνωση του πυθμένα από Βορρά προς Νότο, με το πάχος των ιζημάτων προς Νότο να εμφανίζεται αυξημένο (από 150 m στην τομή 4, σε 300 m στην τομή 3).

Το ύβωμα που εμφανίζεται στη θέση 6.500 m και το βύθισμα που ακολουθεί αμέσως βορειότερα, μάλλον σχετίζεται με την εμφάνιση του αλπικού υποβάθρου, περί τα 500 m δυτικά της τομής 4 στην περιοχή των σταθμών 328-330.



Εικόνα 33: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 3. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Ορθώσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

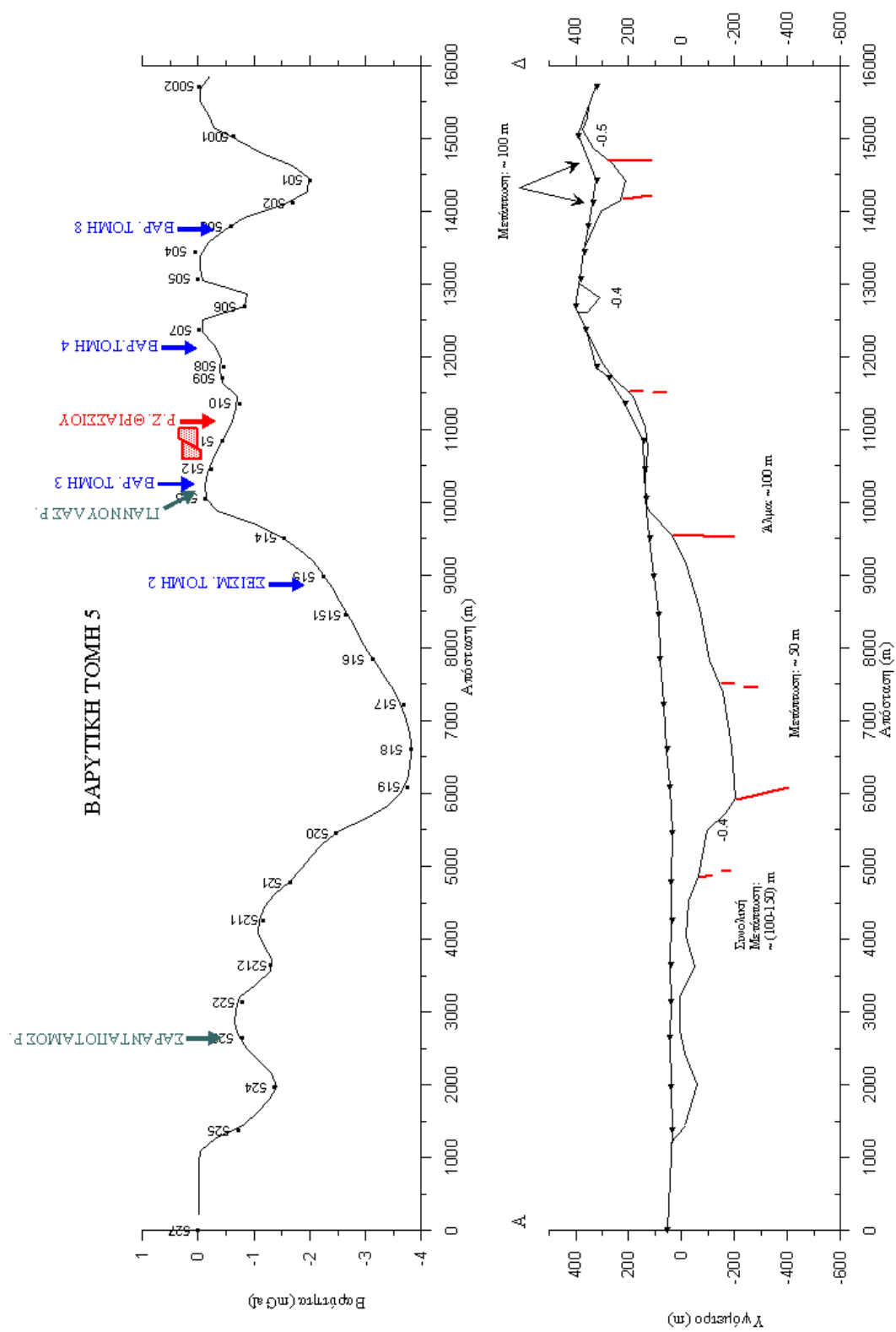
Βαρυτική Τομή 5

Η υπολειμματική βαρυτική ανωμαλία κατά μήκος της τομής 5 (βλ. εικ. 34) παρουσιάζει εύρος τιμών που κυμαίνεται μεταξύ 0 και -4 mGal. Το διάγραμμα της βαρυτικής ανωμαλίας κυριαρχείται από την παρουσία (περίπου στο κέντρο) μιας τοπικής αρνητικής ανωμαλίας που καταλαμβάνει όλη την έκταση της λεκάνης του Θριάσιου πεδίου. Δυτικότερα, η μόνη άξια μνείας τοπική ανωμαλία είναι το τοπικό ελάχιστο στην περιοχή που η τομή διασχίζει το νότιο τμήμα της λεκάνης της Φυλής.

Η κλιμακωτή ταπείνωση που εμφανίζει σύμφωνα με την ερμηνεία ο πυθμένας της λεκάνης στα πρώτα 6 km, θα μπορούσε να είναι και τεκτονικού χαρακτήρα. Δεν υπάρχουν δυστυχώς ικανά στοιχεία για να γίνει ασφαλής σχολιασμός της σχέσης της συγκεκριμένης δομής με κάποια από τις δομές που συζητήθηκαν παραπάνω. Η μόνη παρατήρηση που μπορεί να αναφερθεί είναι η απότομη αλλαγή της διεύθυνσης ροής ενός ρέματος με το οποίο η τομή διασταυρώνεται στην περιοχή του σταθμού 520. Ο κεντρικός κλάδος του ρέματος ενώ βόρεια της τομής 5 κατευθύνεται από ανατολάς με γενική κατεύθυνση προς δυσμάς, στην περιοχή των σταθμών αλλάζει απότομα κατεύθυνση, κατ' αρχήν προς ΝΔ και κατόπιν προς Νότο για να καταλήξει στην θάλασσα. Δυτικότερα του σταθμού 518 ο πυθμένας ανυψώνεται κλιμακωτά για να πλησιάσει σχεδόν την επιφάνεια στην περιοχή του σταθμού 513 (στην περιοχή του υβώματος που παρατηρήθηκε στο βόρειο τμήμα της τομών 4 και 3).

Το τοπικό χαμηλό εύρους 2,5 km με πλάτος της τάξεως των 0,9 mGal που ακολουθεί, συνδέεται με το την τοπική λεκάνη που σχολιάστηκε στο βόρειο άκρο των τομών 3 και 4.

Η παρουσία της λεκάνης της Φυλής είναι εμφανής στα δεδομένα της βαρυτικής τομής και από την ερμηνεία της προσδιορίζεται ένα βάθος 100 m περίπου.



Εικόνα 34: (επάνω) Διάγραμμα της Υπολειμματικής βαρυτικής ανωμαλίας κατά μήκος της βαρυτικής τομής 5. Οι παρατηρούμενες τιμές σημειώνονται με κλειστούς κύκλους, οι αριθμοί αντιστοιχούν στον αριθμό αναφοράς του βαρυτικού σταθμού. (κάτω) Το μοντέλο της ερμηνείας των υπολειμματικών βαρυτικών ανωμαλιών. Οι θέσεις των σταθμών συμβολίζονται με κλειστά τρίγωνα.

3.6.γ Συνθετικός Σχολιασμός Βαρυτικών Τομών

Ο σχολιασμός της συνθετικής εικόνας που παρέχεται από τις βαρυτικές μετρήσεις, θα ακολουθήσει κατ' ανάγκη τον γενικό τρόπο ομαδοποίησης που έγινε παραπάνω. Η περιοχή μελέτης μπορεί να χωριστεί σε δύο τμήματα, το ανατολικό και το δυτικό. Τα δύο τμήματα οριοθετούνται από το όρος Αιγάλεω.

Δυτικό Τμήμα (περιοχή Θριάσιου πεδίου)

Αφορά κυρίως την λεκάνη του Θριάσιου πεδίου και δευτερευόντως την λεκάνη της Φυλής. Στην περιοχή αυτή διενεργήθηκαν τέσσερις βαρυτικές τομές. Οι τρεις με διεύθυνση ΝΝΔ-ΒΒΑ που καλύπτουν το ανατολικό περιθώριο της λεκάνης. Αναπτύσσονται παράλληλα προς το ρέμα του Γιαννούλα, και η ανατολικότερη από αυτές εκτείνεται μέχρι και την λεκάνη της Φυλής. Η τέταρτη τομή με διεύθυνση ΔΝΔ-ΑΒΑ καλύπτει και διασχίζει την λεκάνη του Θριάσιου πεδίου, διασταυρούμενη με τις προαναφερθείσες τομές στο βόρειο τμήμα τους. Η τομή αυτή εκτείνεται και διασχίζει επίσης την λεκάνη της Φυλής.

Η εικόνα που προκύπτει από την ερμηνεία των βαρυτικών τομών έχει ως εξής:

Κατά μήκος του ανατολικού περιθωρίου της λεκάνης του Θριάσιου πεδίου αναπτύσσονται τοπικού χαρακτήρα υβώματα και βυθίσματα, με άξονα εγκάρσια προς την διεύθυνση των τομών. Τα αίτια της δημιουργίας των δομών αυτών είναι μάλλον τεκτονικής φύσης (τουλάχιστον δεν μπορεί να αποκλειστεί η περίπτωση αυτή). Μεταξύ των τομών 3 και 4 και καθ' όλο το μήκος τους, εκτός από το βορειότερο τμήμα τους, σημειώνεται έντονη μετάπτωση του πυθμένα της λεκάνης. Η διαμόρφωση της ροής του ρέματος του Γιαννούλα και οι μεταβολές της διεύθυνσης του μάλλον σχετίζονται με την θέση και την διεύθυνση των αξόνων τόσο των υβωμάτων όσο και της μετάπτωσης που παρατηρείται μεταξύ των δύο αυτών τομών.

Στο βόρειο τμήμα των τομών 3 και 4 καθώς και στο μέσο της τομής 8, κοντά στον πόδα του ορεινού όγκου της Πάρνηθας, παρατηρείται η ανάπτυξη ενός συστήματος λεκάνης - υβώματος με επιμήκη γεωμετρία και διεύθυνση άξονα εγκάρσια προς την διεύθυνση των τομών. Η θέση και η διεύθυνση του υβώματος φαίνεται να συσχετίζεται με την παρουσία εμφανίσεων των σχηματισμών του αλπικού υποβάθρου, αμέσως δυτικά της τομής 3, καθώς και ακόμη δυτικότερα σε απόσταση περίπου 5 χιλιομέτρων.

Η τομή 5, η οποία διασχίζει την λεκάνη απ' άκρου εις άκρο, συναντά και το βαθύτερο σημείο του πυθμένα αυτής. Αυτό βρίσκεται στο κέντρο περίπου της λεκάνης του Θριάσιου πεδίου. Η ύπαρξη μετάπτωσης πλησίον του σταθμού 520, τεκτονικού μάλλον χαρακτήρα, δεν κατέστη δυνατόν από τα υπάρχοντα στοιχεία να διερευνηθεί περαιτέρω.

Η λεκάνη της Φυλής διατρέχεται από δύο βαρυτικές τομές. Σύμφωνα με την ερμηνεία, το μέγιστο βάθος της λεκάνης είναι της τάξεως των 100 m. Τα περιθώριά της, βόρειο και νότιο, φαίνεται να διαμορφώνονται από απότομες μεταπτώσεις.

Ανατολικό Τμήμα (περιοχή Λεκανοπεδίου)

Το τμήμα αυτό περιέχει μέρος της λεκάνης του Κηφισού. Στην περιοχή αυτή διενεργήθηκαν τέσσερις τομές. Οι τρεις καλύπτουν το δυτικό περιθώριο της λεκάνης. Από αυτές οι δύο έχουν διεύθυνση ΝΝΔ-BBA και η τρίτη διεύθυνση εγκάρσια προς εκείνη των άλλων δύο, διασταυρώνεται δε μαζί τους περίπου στο μέσον αυτών. Η τέταρτη τομή με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, ξεκινά από τις παρυφές του ορεινού όγκου της Πάρνηθας διατρέχει εγκάρσια την λεκάνη του Κηφισού στην περιοχή του Κρουνερίου, και καταλήγει στον ορεινό όγκο της Πεντέλης.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις προαναφερθείσες τομές έχουν ως εξής:

Η λεκάνη του Κηφισού φαίνεται να έχει ασύμμετρη γεωμετρία, με το βαθύτερο τμήμα της να βρίσκεται πλησιέστερα προς τον ορεινό όγκο της Πάρνηθας.

Στα περιθώρια της λεκάνης φαίνεται να υφίστανται τοπικά βυθίσματα και υβώματα με άξονα εγκάρσια προς τον άξονα της λεκάνης.

Από την σύγκριση των τριών τομών προκύπτει ότι στο νότιο ήμισυ των τομών 1 και 2, ο πυθμένας της λεκάνης συνεχίζεται ομαλά από την τομή 1 προς τη τομή 2. Αντίθετα, στο βόρειο ήμισυ παρατηρείται μετάπτωση με μεγάλο άλμα μεταξύ της τομής 1 και 2, με την ταπείνωση του πυθμένα προς την τομή 1. Η παρουσία της απότομης μετάπτωσης επιβεβαιώνεται και από την τομή 7.

Από την τομή 6 προκύπτει ότι προς την πλευρά της Πάρνηθας αναπτύσσεται στον πόδα του ορεινού της όγκου ένα σύστημα λεκάνης- υβώματος, ανάλογο προς εκείνο που σχολιάστηκε στο Θριάσιο πεδίο. Η κοίτη του ποταμού φαίνεται να είναι μετατοπισμένη προς το ΝΑ περιθώριο της λεκάνης του Κηφισού (τουλάχιστον στην περιοχή της τομής 6). Από την ερμηνεία της σεισμικής τομής που διενεργήθηκε παράλληλα προς την βαρυτική τομή 6, προκύπτει μια μικρή εσωτερική διαφοροποίηση των σεισμικών ταχυτήτων του υποβάθρου της λεκάνης, μεταξύ του βορειοδυτικού και του νοτιοανατολικού τμήματος αυτής. Από την βαρυτική ερμηνεία δεν μπορεί να αποκλειστεί αυτή η εκδοχή, αφού μπορεί να αποδοθεί στην παρουσία και επικράτηση των σχιστολίθων εντός των σχηματισμών του μεταμορφωμένου υποβάθρου προς τη πλευρά της Πεντέλης. Η ιδιαιτερότητα αυτή μπορεί να δικαιολογήσει την απαιτούμενη διαφορά πυκνότητας, Δρ, προκειμένου να συνδυαστούν οι δύο ερμηνείες.

3.7 Βαρυτικός Χάρτης της περιοχής μελέτης

3.7.α Υφιστάμενη κατάσταση

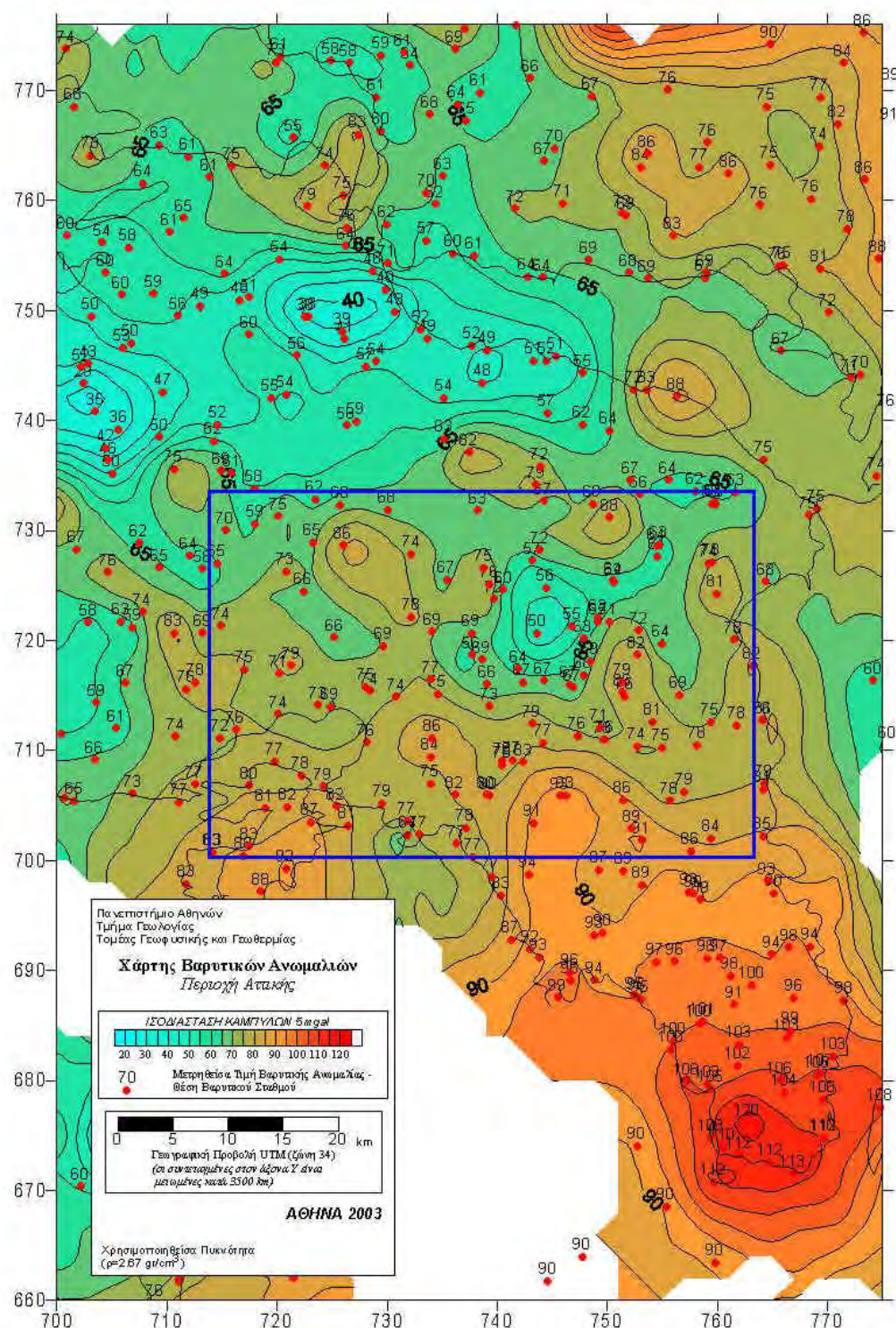
Τα στοιχεία που υπάρχουν στην διάθεσή μας προέρχονται από την τράπεζα βαρυτικών δεδομένων του Τομέα Γεωφυσικής - Γεωθερμίας (Lagios et al., 1996). Η διασπορά των σταθμών καθώς και ο χάρτης βαρυτικών ανωμαλιών που προέκυψε από αυτά για την ευρύτερη περιοχή της Αττικής φαίνεται στην εικόνα 35.

Τα δεδομένα αυτά (ΜΑΚΡΗΣ & ΣΤΑΥΡΟΥ, 1984) ελήφθησαν με την χρήση αλτιμέτρου για τον προσδιορισμό του υψομέτρου και αναφέρονται στο σύστημα IGSN'71 (MORELLI et al., 1976).

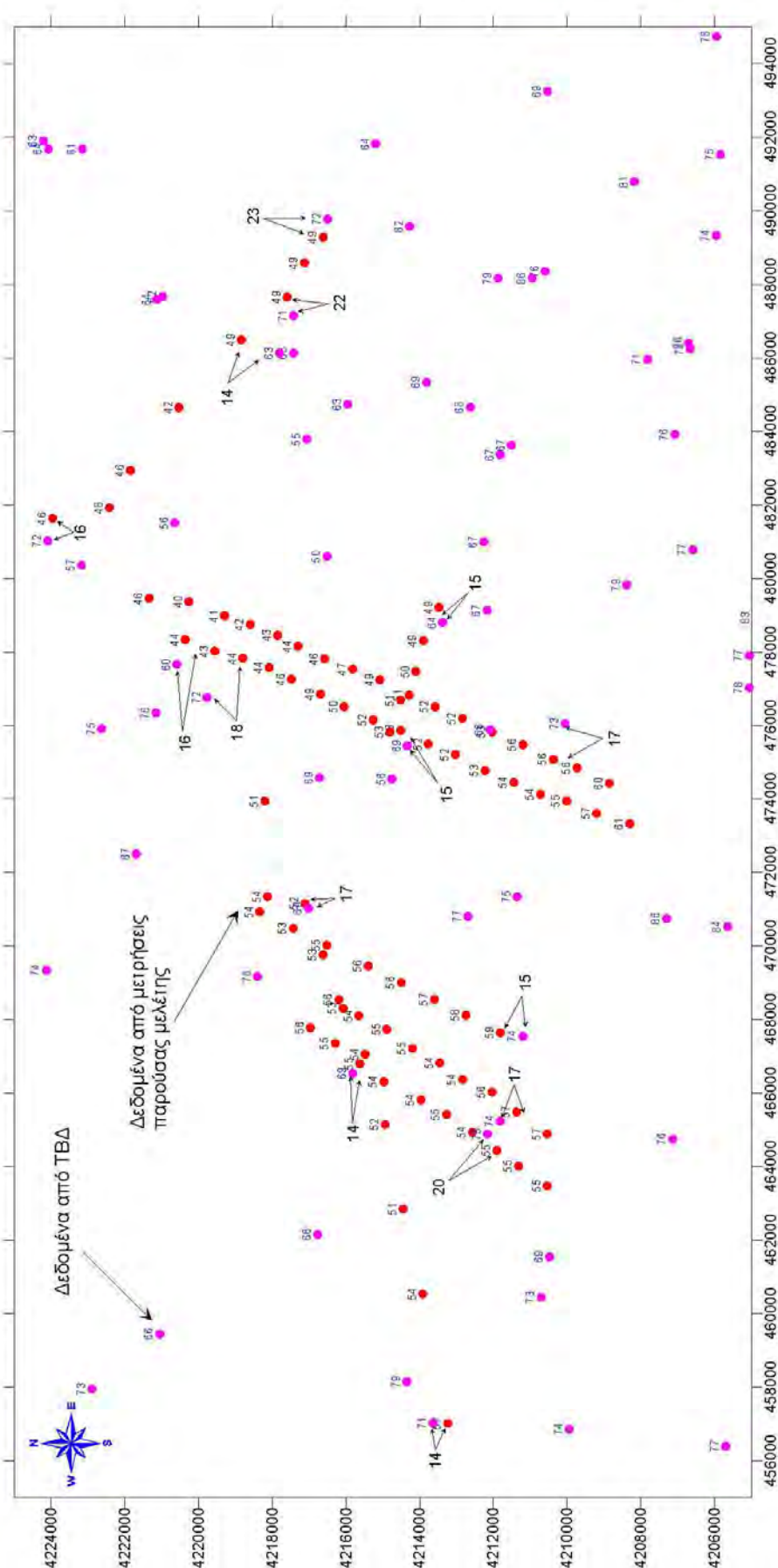
Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι κατά την διάρκεια της κατασκευής της Τράπεζας Βαρυτικών Δεδομένων (LAGIOS et al., 1996) τα αρχικά δεδομένα υπεβλήθησαν σε ένα αριθμό ελέγχων προκειμένου να διερευνηθεί η ύπαρξη εσφαλμένων μετρήσεων στα αρχικά δεδομένων κυρίως μέσω του επανυπολογισμού όσων διορθώσεων ήταν δυνατόν να επανυπολογιστούν, καθώς και μέσω της στατιστικού χαρακτήρα διερεύνησης της βαθμίδας μεταβολής του βαρυτικού πεδίου μεταξύ των βαρυτικών σταθμών. Είναι προφανές ότι ανάμεσα στους σταθμούς που επιβίωσαν από τους ελέγχους αυτούς υπήρχαν και σταθμοί, οι οποίοι, αν και δεν ήταν απόλυτα συνεπείς προς τους γειτονικούς τους, δεν ήταν δυνατόν να απορριφθούν, είτε γιατί δεν υπήρχε ικανός αριθμός δεδομένων στην εγγύς γειτονία τους προκειμένου να στοιχειοθετηθεί η απόρριψή τους, είτε γιατί δύο σταθμοί ήταν εξ ίσου πιθανόν να είναι σωστοί ή λανθασμένοι.

Πρέπει ακόμη να σημειωθεί ότι κατά τη διάρκεια των προαναφερόμενων εργασιών δεν ήταν δυνατόν βρεθεί τρόπος προκειμένου να επιβεβαιωθεί εάν πόσοι και ποιοι από τους αρχικά διαθέσιμους σταθμούς αναφερόταν στο IGSN'71 και κατά συνέπεια ο ισχυρισμός των ΜΑΚΡΗΣ & ΣΤΑΥΡΟΥ (1984) εκλήφθηκε ως ορθός.

Στο χάρτη της εικόνας 36 παρουσιάζεται η διασπορά των βαρυτικών σταθμών στην περιοχή ενδιαφέροντος και σε κάθε σταθμό δίνεται η τιμή της βαρυτικής ανωμαλίας. Από τους σταθμούς που μετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης δεν κρίθηκε αναγκαίο να παρουσιαστούν όλοι οι σταθμοί αφού αυτό θα οδηγούσε σε σύγχυση λόγω της πυκνότητας των μετρημένων σταθμών. Οι προβαλλόμενοι σταθμοί πρακτικά δεν στερούν την αναγκαία για τον έλεγχο πληροφορία.



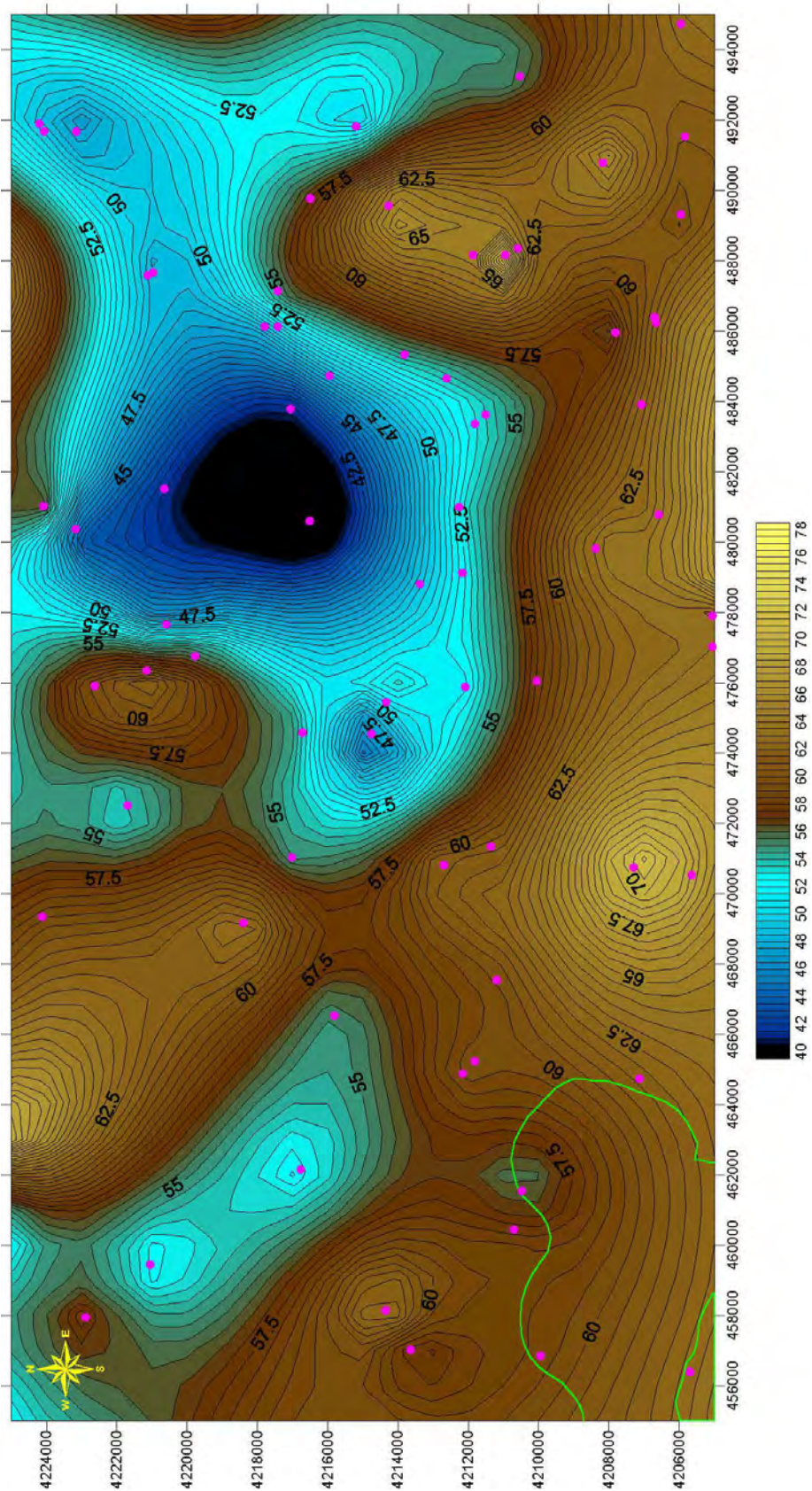
Εικόνα 35: Ο Χάρτης των βαρυτικών ανωμαλιών περιοχής Αττικής. Τα στοιχεία του χάρτη προέρχονται από την Τράπεζα Βαρυτικών Δεδομένων η οποία έχει κατασκευαστεί από τον Τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών. Στον χάρτη διακρίνεται το πλαίσιο της περιοχής ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης.



Εικόνα 36: Χάρτης κατανομής βαρυτικών σταθμών στην περιοχή ενδιαφέροντος. Από τους σταθμούς που μετρήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης εμφανίζεται δειγματοληπτικά ένα μέρος των σταθμών. Στην εικόνα δίνεται επίσης και η διαφορά των τιμών μεταξύ γεωονικών σταθμών των δύο ομάδων δεδομένων.

Από την σύγκριση των τιμών των άμεσα γειτονικών σταθμών των δύο ομάδων είναι προφανές ότι στην περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης υφίσταται διαφορά επιπέδου ανάμεσα στα δεδομένα που περιέχονται στην Τράπεζα Βαρυτικών Δεδομένων και στις παρατηρήσεις της παρούσας μελέτης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 14 και 23 mGal. Οι HIPKIN et al. (1988) υπολόγισαν ότι για τον Ελληνικό Χώρο η διαφορά μεταξύ των συστημάτων του Potsdam και του IGSN'71 είναι 14.5 mGal. Φαίνεται λοιπόν ότι για τους σταθμούς στην περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης τα προϋπάρχοντα στοιχεία δεν αναφέρονται στο σύστημα του IGSN'71 όπως ισχυρίζονται οι ΜΑΚΡΗΣ & ΣΤΑΥΡΟΥ (1984) αλλά σε εκείνο του Potsdam.

Προκειμένου να καταστεί δυνατό να συνδυάσουμε τα δεδομένα της Τράπεζας με τις παρατηρήσεις της παρούσας μελέτης ώστε να κατασκευαστεί ένας ενιαίος χάρτης βαρυτικών ανωμαλιών της περιοχής ενδιαφέροντος, αφαιρέθηκε από τους σταθμούς οι οποίοι περιέχονται στην Τράπεζα Βαρυτικών Δεδομένων η προαναφερόμενη ποσότητα, ώστε οι νέες τιμές να ανταποκρίνονται στο επίπεδο IGSN'71. Ο χάρτης της εικόνας 37 έχει κατασκευαστεί από τα δεδομένα αυτά.



Εικόνα 37: Χάρτης βαρυτικών ανωμαλιών (σε mGal) της περιοχής ενδιαφέροντος, βασισμένος στα προϋπάρχοντα δεδομένα μετά την αφαίρεση από αυτά της διαφοράς επιπέδου μεταξὺ του συστήματος του Potsdam και του IGSN'71.

3.7.β Έλεγχος Βαρυτικών Σταθμών - Απόρριψη Σταθμών

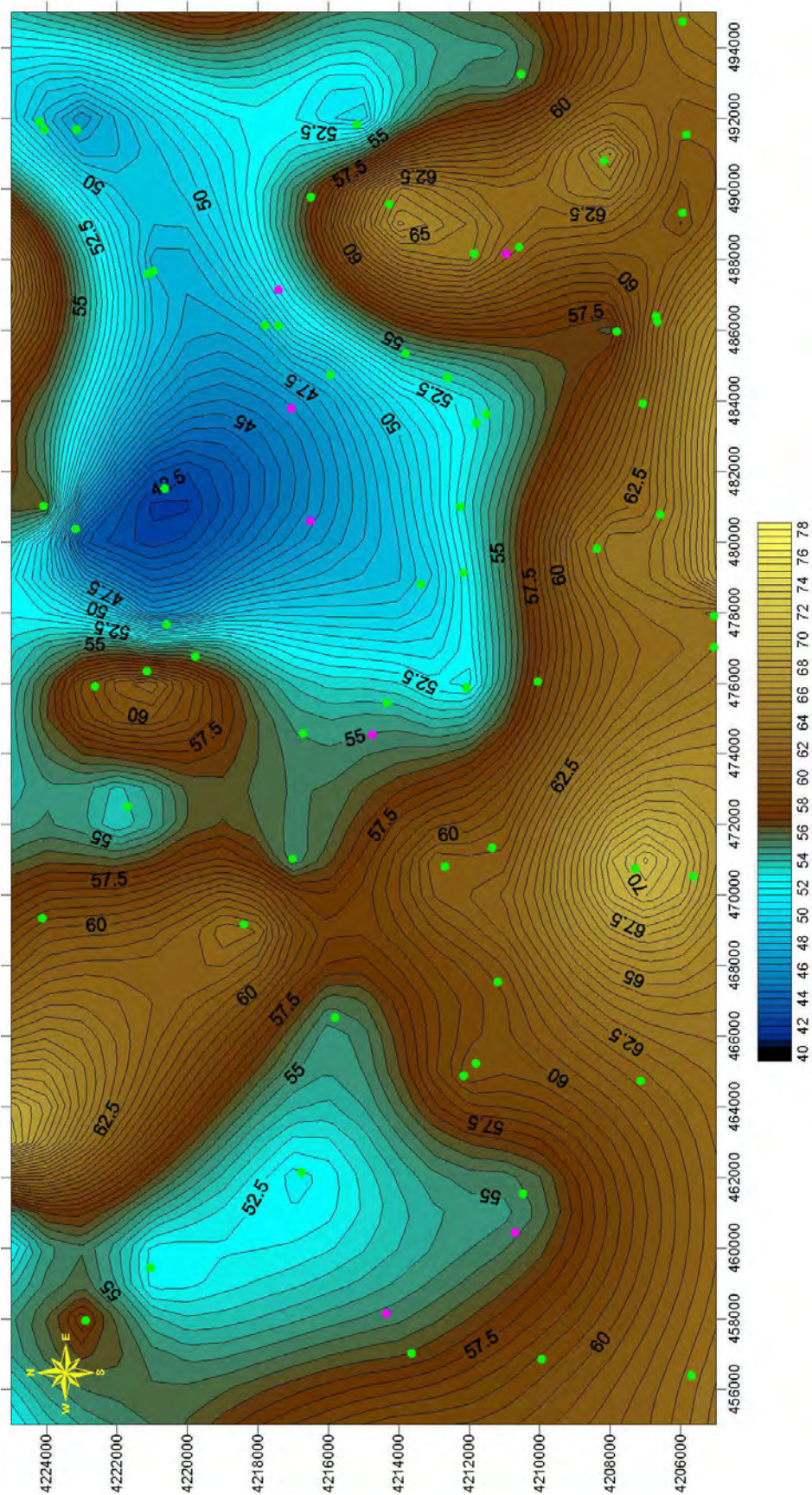
Η απόκλιση μεταξύ των δυο ομάδων σταθμών έδωσε την ευκαιρία για περαιτέρω έλεγχο της ακρίβειας των περιεχομένων στην Τράπεζα Βαρυτικών Δεδομένων σταθμών του Παν/μιου Αθηνών. Ελέγχοντας την βαθμίδα μεταβολής του βαρυτικού πεδίου όπως αυτή προκύπτει για γειτονικούς σταθμούς των δυο ομάδων δεδομένων έγινε δυνατό να απορριφθούν σταθμοί που δημιουργούσαν υπερβολικά μεγάλη βαθμίδα.

Ο χωρικός προσδιορισμός των σταθμών της παρούσας μελέτης έγινε με την χρήση διαφορικών μετρήσεων GPS (ακρίβεια μερικών εκατοστών), το οποίο όπως έχει αναφερθεί παραπάνω παρέχει μεγάλη ακρίβεια προσδιορισμού θέσης. Επιπλέον, ο υπολογισμός της τοπογραφικής διόρθωσης έγινε με την χρήση χαρτών κλίμακας 1:5.000 για τις κοντινές προς τους σταθμούς ζώνες και χάρτες κλίμακας 1:50.000 για τις μακρινές ζώνες. Το γεγονός αυτό προσφέρει πλεονέκτημα στους σταθμούς αυτούς κατά την σύγκρισή τους με τους προϋπάρχοντες στην Τράπεζα Βαρυτικών Δεδομένων. Για τους τελευταίους ισχύει ότι αφ ενός οι χωρικές τους συντεταγμένες δεν προσδιορίστηκαν με γεωδαιτική μέθοδο (ακόμη και το υψόμετρό τους προσδιορίστηκε με την χρήση αλτιμέτρου, ακρίβεια προσδιορισμού υψομέτρου $\pm 30-50$ cm), και αφ' εταίρου ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης υπολογίστηκε με την χρήση κανάβου ισοδιάστασης 500 m.

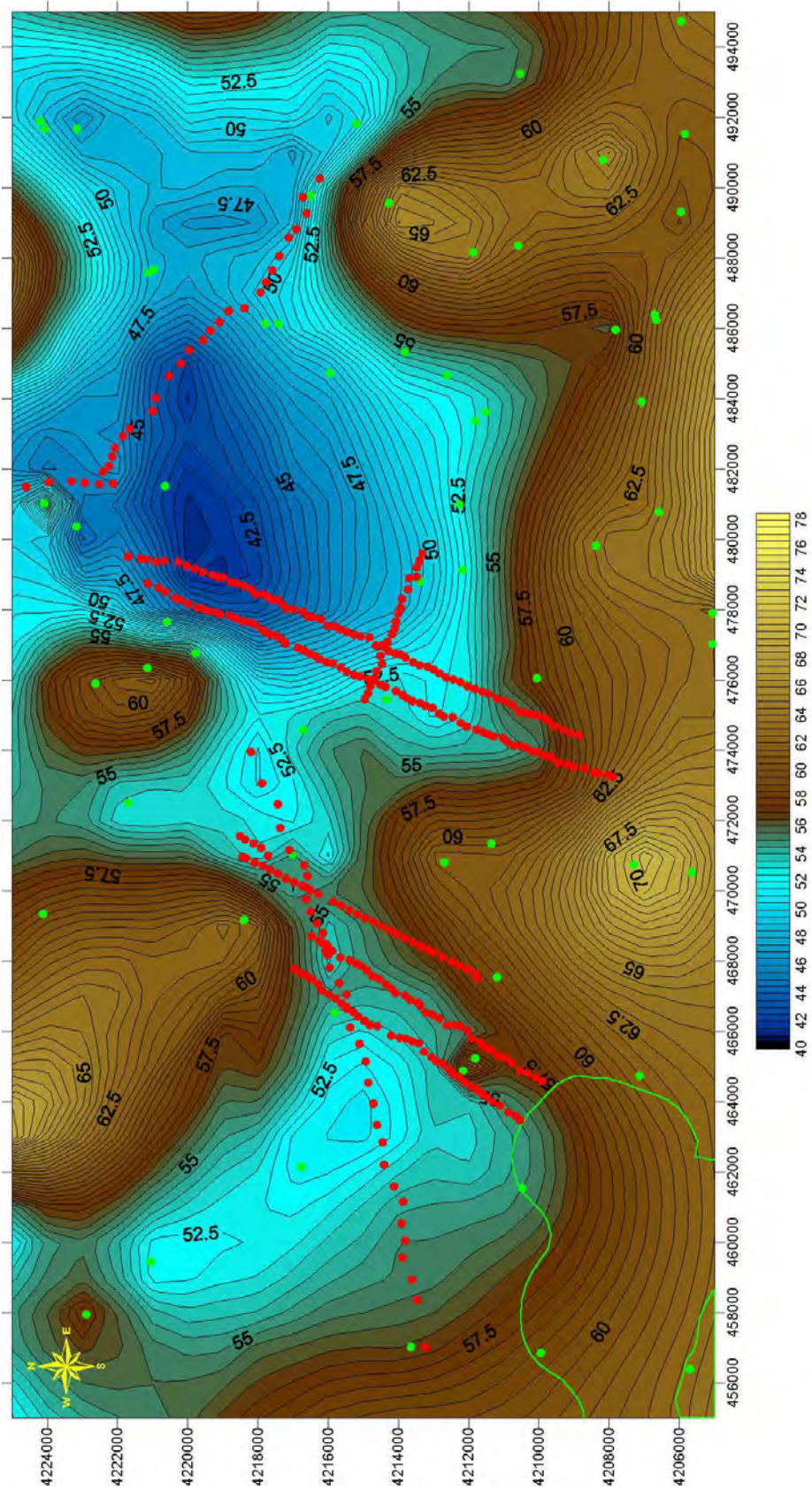
Η σύγκριση οδήγησε στην απόρριψη ενός αριθμού σταθμών της προϋπάρχουσας Τράπεζας Βαρυτικών Δεδομένων. Στην εικόνα 38 δίνεται ο χάρτης της βαρυτικής ανωμαλίας για την περιοχή ενδιαφέροντος της παρούσας μελέτης ο οποίος βασίζεται στα δεδομένα της Τράπεζας Βαρυτικών Δεδομένων, όπως αυτά προέκυψαν μετά τον προαναφερόμενο έλεγχο.

3.7.γ Κατασκευή Τελικού Χάρτη

Με την χρήση των σταθμών που τελικά επελέγησαν από τον έλεγχο που διενεργήθηκε και των παρατηρήσεων οι οποίες έγιναν στα πλαίσια της παρούσας μελέτης κατασκευάστηκε ο τελικός χάρτης βαρυτικών ανωμαλιών ο οποίος παρουσιάζεται στην εικόνα 39.



Εικόνα 38: Χάρτης βαρυτικών ανωμαλιών (σε mGal) βασισμένος στα προϋπάρχοντα δεδομένα. Από τα δεδομένα (πράσινοι κύκλοι) έχουν αφαιρεθεί όσοι σταθμοί απορρίφθηκαν (ροζ κύκλοι) βάσει των παρατηρήσεων της παρούσας μελέτης. Οι τιμές των σταθμών αναφέρονται στο σύστημα του IGSN'71.



Εικόνα 39: Χάρτης βαρυτικών ανωμαλιών (σε mGal) βασισμένος στο συνδυασμό των δεδομένων τα οποία προϋπήρχαν στην Τράπεζα Βαρυτικών Δεδομένων και των παρατηρήσεων της παρούσας μελέτης.

4. Μετρήσεις GPS

Ο προσδιορισμός της θέσης (των συντεταγμένων) των σημείων μέτρησης του πεδίου βαρύτητας καθώς και το υψόμετρο αυτών, έγινε με γεωδαιτικούς δέκτες GPS της Leica τύπου SR299, εφαρμόζοντας την τεχνική των διαφορικών μετρήσεων GPS, με την οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί ακρίβεια μερικών χιλιοστών του μέτρου.

Όλα τα υψόμετρα των βαρυτικών σταθμών εκτιμήθηκαν με GPS δέκτη (SR299), ο οποίος λειτουργούσε ταυτόχρονα με έτερον αντίστοιχο δέκτη, εγκατεστημένο στο σταθμό αναφοράς στη στέγη του κτηρίου τεχνικών υπηρεσιών του δήμου Άνω Λιοσίων. Ο σταθμός αυτός είχε «δεθεί» με τριγωνομετρικό σημείο της ΓΥΣ και αναφέρεται στο ελληνικό γεωδαιτικό δίκτυο ΕΓΣΑ. Στη συνέχεια ο προσδιορισμός των συντεταγμένων των βαρυτικών σταθμών έγινε με βάση το λογισμικό SKI Pro της Leica.

Η υλοποίηση τοποθέτησης των σειсмоγράφων των σεισμικών τομών επετεύχθη με την χρησιμοποίηση συσκευής GPS χειρός. Η ακριβής όμως θέση κάθε σειсмоγράφου επετεύχθη με τη χρήση του συστήματος GPS που υπάρχει σε κάθε σειсмоγράφο.

Στο Παράρτημα Ι έχουν καταχωρηθεί ο αύξων αριθμός των σημείων μέτρησης κάθε βαρυτικής τομής, ο χρόνος λήψης της μέτρησης (ημερομηνία, ώρα, λεπτό) οι συντεταγμένες σε μοίρες, το υψόμετρο κάθε σημείου μέτρησης, η διαφορά από τον χρόνο Greenwich, η τιμή ανάγνωσης του οργάνου και ο συντελεστής τοπογραφικής διόρθωσης.

Στο Παράρτημα V έχουν καταχωρηθεί ο αύξων αριθμός των σειсмоγράφων και των σημείων των σεισμικών πηγών (εκρήξεων) κάθε σεισμικής τομής, οι συντεταγμένες σε μοίρες και χιλιόμετρα καθώς και το υψόμετρο κάθε θέσης.

5. Σεισμικές διασκοπήσεις

Εκτελέσθηκαν συνολικά τρεις σεισμικές τομές (βλ. συνημμένο Χάρτη Γενικής Πληροφόρησης), ενώ ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε δύο. Η επί πλέον σεισμική τομή 2 κρίθηκε απαραίτητη για τη διερεύνηση της δομής του Θριάσιου πεδίου αφενός και για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων της σεισμικής τομής 1, αφετέρου. Στη διάθεση της ερευνητικής ομάδας υπήρχαν οι παρακάτω σειсмоγράφοι και σεισμόμετρα:

- 16 σειсмоγράφοι τύπου Reftek με σεισμόμετρα μιας συνιστώσας (κατακόρυφης) 2 Hz. Οι σειсмоγράφοι αυτοί προέρχονται από το κέντρο NERC της Αγγλίας, κατόπιν αίτησης του κ. Neil Goulty Καθηγητού Γεωφυσικής στο Πανεπιστήμιο Durham της Αγγλίας.
- 11 σειсмоγράφοι τύπου PDAS με τα αντίστοιχα σεισμόμετρα μιας συνιστώσας (κατακόρυφης) και 2Hz. Οι σειсмоγράφοι αυτοί προήλθαν από το Πανεπιστήμιο Leicester της Αγγλίας κατόπιν αίτησης του Καθηγητού κ. Neil Goulty.
- 10 σειсмоγράφοι τύπου Reftek και 10 σεισμόμετρα ευρέως φάσματος, του Εργαστηρίου Σεισμολογίας του Τομέα Γεωφυσικής-Γεωθερμίας του Πανεπιστημίου Αθηνών.
- 4 σειсмоγράφοι τύπου Reftek και τα αντίστοιχα σεισμόμετρα μιας συνιστώσας (κατακόρυφης) 2Hz, του Γεωδυναμικού Ινστιτούτου του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών.

Οι εργασίες υπαίθρου διεξήχθησαν κατά το χρονικό διάστημα 26 Νοεμβρίου έως 14 Δεκεμβρίου 2001.

Ειδικότερα, τα στοιχεία των τριών αυτών σεισμικών τομών είναι τα ακόλουθα:

5.1 Σεισμική Τομή 1

Το μήκος της σεισμικής τομής είναι περίπου 10 χλμ. (βλ. συνημμένο Χάρτη Γενικής Πληροφόρησης). Εκτελέσθηκαν 5 εκρήξεις σε προκαθορισμένες θέσεις, μια στη μέση της τομής (μεσαία έκρηξη), ανά μια στα άκρα αυτής (κανονική έκρηξη στο νότιο άκρο της και αντίστροφη έκρηξη στο βόρειο άκρο της), μια μακρινή στην επέκταση και νότια της κανονικής έκρηξης (έκρηξη εκτός γραμμής 1) και μία μακρινή στην επέκταση και βόρεια της αντίστροφης έκρηξης (έκρηξη εκτός γραμμής 2). Όλες οι εκρήξεις έγιναν σε γεωτρήσεις βάθους 45 μέτρων. Ως εκρηκτική ύλη χρησιμοποιήθηκε ζελατινοδυναμίτιδα 30% και η ποσότητα καθορίσθηκε από τη θέση της έκρηξης σχετικά με το ανάπτυγμα της σεισμικής τομής (κυμάνθηκε μεταξύ 75-175 κιλών). Μετά τη τοποθέτηση της εκρηκτικής ύλης εντός εκάστης της γεώτρησης, επακολοιούσε το «τάπωμα» αυτής. Για το τάπωμα της γεώτρησης χρησιμοποιήθηκε άμμος και νερό μέχρι το στόμιο της γεώτρησης. Η διάμετρος κάθε γεώτρησης ήταν 8 ½ ίντσες.

Οι σεισμικές καταγραφές παρουσίασαν γενικά αρκετό θόρυβο και η ανάγνωση αργοπορημένων αφίξεων (π.χ. ανακλάσεων από βαθύτερες ασυνέχειες) δεν ήταν εφικτή. Ιδιαίτερα, η έκρηξη εκτός γραμμής 1 απέτυχε να δώσει κάποια πληροφορία ακόμα και για την ανάγνωση των πρώτων κυματικών αφίξεων. Γενικά, έχουν ληφθεί μέτριας ποιότητας πρώτες αφίξεις, οι οποίες έδωσαν πληροφορίες για τα επιφανειακά

κυρίως στρώματα. Εκτιμάται ότι το βάθος έρευνας δεν υπερέβη τα 2 χιλιόμετρα και αυτό προέκυψε για τρεις λόγους, α) η παρουσία του ασβεστολίθου σε μικρό σχετικά βάθος έδρασε ως ισχυρός διαθλαστήρας/ανακλαστήρας και μικρό ποσοστό ενέργειας διείσδυσε σε μεγαλύτερα βάθη, β) στη μικρή σχετικά ποσότητα εκρηκτικής ύλης που χρησιμοποιήθηκε και γ) στη διενέργεια των εκρήξεων μέσα σε ασβεστολιθικό υλικό, όπου η προϋπάρχουσα καρστική δομή του απορρόφησε ενέργεια, με αποτέλεσμα η κοιλότητα που δημιουργήθηκε να δράσει ανελαστικά και ένα σχετικά μικρό τμήμα της εκλυθείσας ενέργειας να διαδοθεί ως παραμόρφωση ελαστική. Στο Παράρτημα IV παρουσιάζονται οι σεισμικές καταγραφές και στο Παράρτημα V οι χρόνοι διαδρομής για κάθε έκρηξη της σεισμικής τομής.

5.2 Σεισμική Τομή 2

Το μήκος της σεισμικής αυτής τομής είναι περίπου 10 χλμ. (βλ. συνημμένο Χάρτη Γενικής Πληροφόρησης). Εκτελέστηκαν 4 εκρήξεις σε προκαθορισμένες θέσεις, μια στη μέση της τομής (μεσαία έκρηξη), ανά μια στα άκρα αυτής (κανονική έκρηξη στο δυτικό άκρο της και αντίστροφη έκρηξη στο ανατολικό άκρο της), μια μακρινή στην επέκταση και δυτικά της κανονικής έκρηξης (εκτός γραμμής έκρηξη). Όλες οι εκρήξεις έγιναν σε γεωτρήσεις βάθους 45 μέτρων. Ως εκρηκτική ύλη χρησιμοποιήθηκε ζελατινοδυναμίτιδα 30% και η ποσότητα καθορίστηκε από τη θέση της έκρηξης σχετικά με το ανάπτυγμα των σεισμομέτρων (κυμάνθηκε μεταξύ 50-175 κιλών). Μετά τη τοποθέτηση της εκρηκτικής ύλης εντός εκάστης της γεώτρησης, επακολουθούσε το «τάπωμα» αυτής. Για το τάπωμα της γεώτρησης χρησιμοποιήθηκε άμμος και νερό μέχρι το στόμιο της γεώτρησης. Η διάμετρος κάθε γεώτρησης ήταν 8 ½ ίντσες.

Οι σεισμικές καταγραφές παρουσίασαν επίσης θόρυβο και η ανάλυση θα προχωρήσει λαμβάνοντας υπόψη κυρίως τις πρώτες αφίξεις των σεισμικών κυμάτων. Στο Παράρτημα IV παρουσιάζονται οι σεισμικές καταγραφές και στο Παράρτημα V οι χρόνοι διαδρομής για κάθε έκρηξη της σεισμικής τομής.

5.3 Σεισμική Τομή 3

Το μήκος της σεισμικής αυτής τομής είναι περίπου 10 χλμ. (βλ. συνημμένο Χάρτη Γενικής Πληροφόρησης). Εκτελέστηκαν 3 εκρήξεις σε προκαθορισμένες θέσεις, μια στη μέση της τομής (μεσαία έκρηξη) και ανά μια στα άκρα αυτής (κανονική έκρηξη στο βορειοδυτικό άκρο της και αντίστροφη έκρηξη στο νοτιοανατολικό άκρο της). Όλες οι εκρήξεις έγιναν σε γεωτρήσεις βάθους 45 μέτρων. Ως εκρηκτική ύλη χρησιμοποιήθηκε ζελατινοδυναμίτιδα 30% και η ποσότητα καθορίστηκε από τη θέση της έκρηξης σχετικά με το ανάπτυγμα των σεισμομέτρων (κυμάνθηκε μεταξύ 60-140 κιλών). Μετά τη τοποθέτηση της εκρηκτικής ύλης εντός εκάστης της γεώτρησης, επακολουθούσε το «τάπωμα» αυτής. Για το τάπωμα της γεώτρησης χρησιμοποιήθηκε άμμος και νερό μέχρι το στόμιο της γεώτρησης. Η διάμετρος κάθε γεώτρησης ήταν 8 ½ ίντσες.

Οι σεισμικές καταγραφές είναι σχετικά καθαρές με λίγο θόρυβο, αλλά δεν εντοπίστηκαν αργοπορημένες αφίξεις (π.χ. ανακλάσεις) για τη διερεύνηση της βαθύτερης δομής. Παρόλο που δεν παρατηρήθηκαν τα ίδια φαινόμενα με εκείνα στους ασβεστολίθους, εν τούτοις η καταγραφή σεισμικών φάσεων από βαθύτερους ορίζοντες δεν ήταν εφικτή. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μικρή ποσότητα της εκρηκτικής ύλης και στη μεγάλη απορρόφηση ενέργειας των επιφανειακών

γεωλογικών σχηματισμών. Στο Παράρτημα IV παρουσιάζονται οι σεισμικές καταγραφές και στο Παράρτημα V οι χρόνοι διαδρομής για κάθε έκρηξη της σεισμικής τομής.

5.4 Επεξεργασία και ερμηνεία σεισμικών καταγραφών

Για την επεξεργασία των σεισμικών καταγραφών και την εν συνεχεία ερμηνεία αυτών, χρησιμοποιήθηκαν δύο κυρίως μοντέρνες τεχνικές (αλγόριθμοι), πέραν των συμβατικών μεθόδων ανάλυσης σεισμικών καταγραφών. Οι αλγόριθμοι αυτοί α) των «ελαχίστων διαδρομών» (SPR, Shortest Path Ray-tracing) των J.ZHANG και N.TOKSOZ (1998) και β) της τεχνικής της «προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς» (Ray-tracing modeling) (ZELT & SMITH, 1992), αναφέρονται λεπτομερέστερα παρακάτω και δίδουν τις δυνατότητες και περιορισμούς ανάλυσης σεισμικών καταγραφών, σύμφωνα με την ποιότητα καταγραφής και την χωρική κάλυψη των εκρήξεων. Οι δύο αυτοί αλγόριθμοι δίδουν παραπλήσια αποτελέσματα.

5.4.1 Εφαρμογή του αλγόριθμου «ελαχίστων διαδρομών»

Για τη διεξαγωγή μιας έρευνας σεισμικής τομογραφίας απαιτείται η χρήση μιας μεθόδου χάραξης σεισμικών ακτίνων και υπολογισμού των αντίστοιχων χρόνων διαδρομής. Ειδικά για την περίπτωση της σεισμικής διάθλασης ο υπολογισμός των χρόνων άφιξης είναι εξαιρετικά δύσκολος εξαιτίας της ύπαρξης πολλών πιθανών τροχιών των διαθλώμενων ακτίνων και επομένως η παραγωγή πολλαπλών λύσεων. Μεγάλη πρόοδος στη λύση του «ευθέως» προβλήματος της σεισμικής τομογραφίας πραγματοποιήθηκε με την ανάπτυξη αλγορίθμων κατασκευής των κυματικών μετώπων σε κανονικό κάρναβο. Η μέθοδος αυτή είναι γενικά «ελκυστική» επειδή μπορεί να προσομοιώσει τις περιθλώμενες καθώς και τις διαθλώμενες ακτίνες. Στη συγκεκριμένη έρευνα, για την κατασκευή κυματικών μετώπων σε κανονικό κάρναβο, χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος της κατηγορίας «ελαχίστων διαδρομών» (SPR, Shortest Path Ray-tracing) των ZHANG & TOKSOZ (1998). Ο εν λόγω αλγόριθμος βασίζεται στο νόμο του Snell και θεωρείται από τους ακριβέστερους και ταυτόχρονα λιγότερο απαιτητικούς σε υπολογιστική ισχύ.

Η σύγκριση των υπολογισθέντων, από τη λύση του ευθέως προβλήματος, χρόνων διαδρομής με αυτούς που προκύπτουν από τη διαδικασία επιλογής των πρώτων αφίξεων και η ελαχιστοποίηση των μεταξύ τους διαφορών πραγματοποιήθηκε με τη χρήση της ακόλουθης αναλυτικής σχέσης:

$$\Phi(m) = (1-\omega) |C_l(d - G(m))|^2 + \omega |D_x(d - G(m))|^2 + \tau |Rm|^2$$

όπου:

d οι πραγματικοί χρόνοι άφιξης

G(m) οι υπολογισθέντες χρόνοι άφιξης

m το μοντέλο

C_l ο συντελεστής που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης σεισμικής ταχύτητας

l η απόσταση μεταξύ πηγής και δέκτη

D_x ο διαφορικός τελεστής

- R ο συντελεστής κανονικοποίησης
 τ ο παράγοντας ομαλοποίησης
 ω ο συντελεστής μεταξύ μέσης και φαινόμενης ταχύτητας.

Το βασικό πλεονέκτημα της παραπάνω εξίσωσης είναι ότι παρουσιάζει φυσική σημασία. Συγκεκριμένα, η αντιστροφή επιτυγχάνεται όχι μόνο μέσω της ελαχιστοποίησης των διαφορών μεταξύ των αριθμητικών τιμών των επιλεχθέντων και υπολογισθέντων χρόνων άφιξης, αλλά και μέσω της ταυτόχρονης ελαχιστοποίησης των διαφορών μεταξύ:

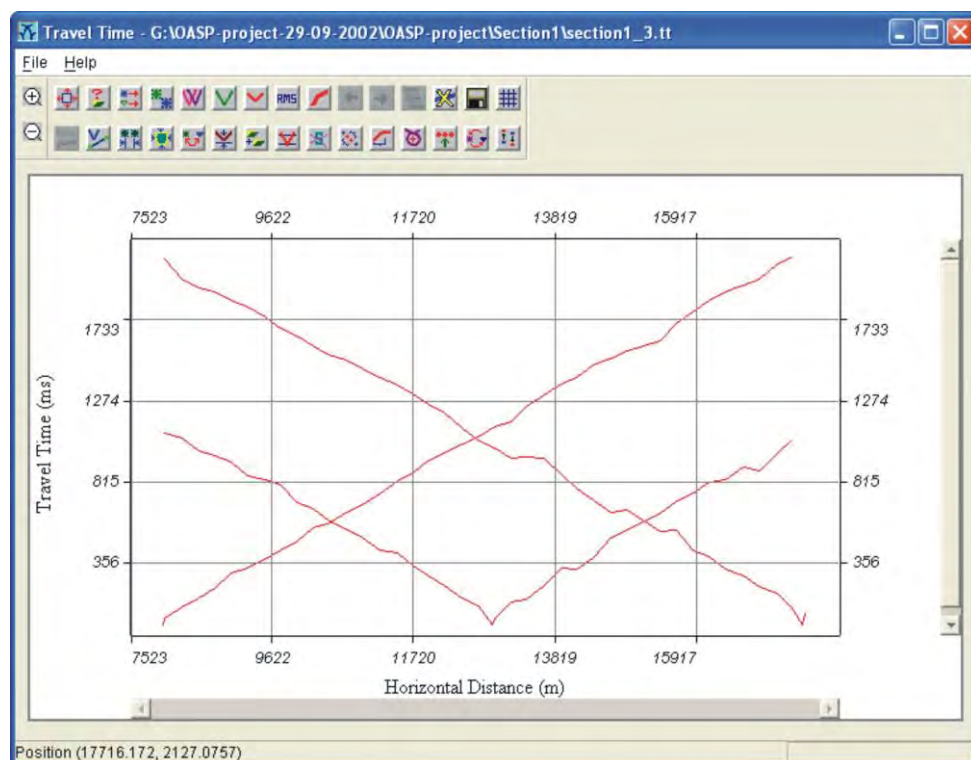
- των «μέσων των αντιστρόφων ταχυτήτων» (average slowness) και,
- των «φαινόμενων των αντιστρόφων ταχυτήτων» (apparent slowness).

Ταυτόχρονα με τη χρήση του αλγορίθμου «κανονικοποίησης» (regularization) των ΤΙΚΗΟΝΟΒ & ΑΡΣΕΝΙΝ (1977) πραγματοποιείται η μετατροπή ενός μη «επαρκώς προσδιορισμένου» προβλήματος, όπως συνήθως είναι το πρόβλημα της αντιστροφής στη σεισμική τομογραφία, σε «επαρκώς προσδιορισμένο», με αποτέλεσμα:

- την μεγαλύτερη πιθανότητα προσδιορισμού μοναδικής λύσης
- τη μείωση των διαστάσεων του φατνίου του καννάβου ώστε να επιτυγχάνεται υψηλότερη ευκρίνεια

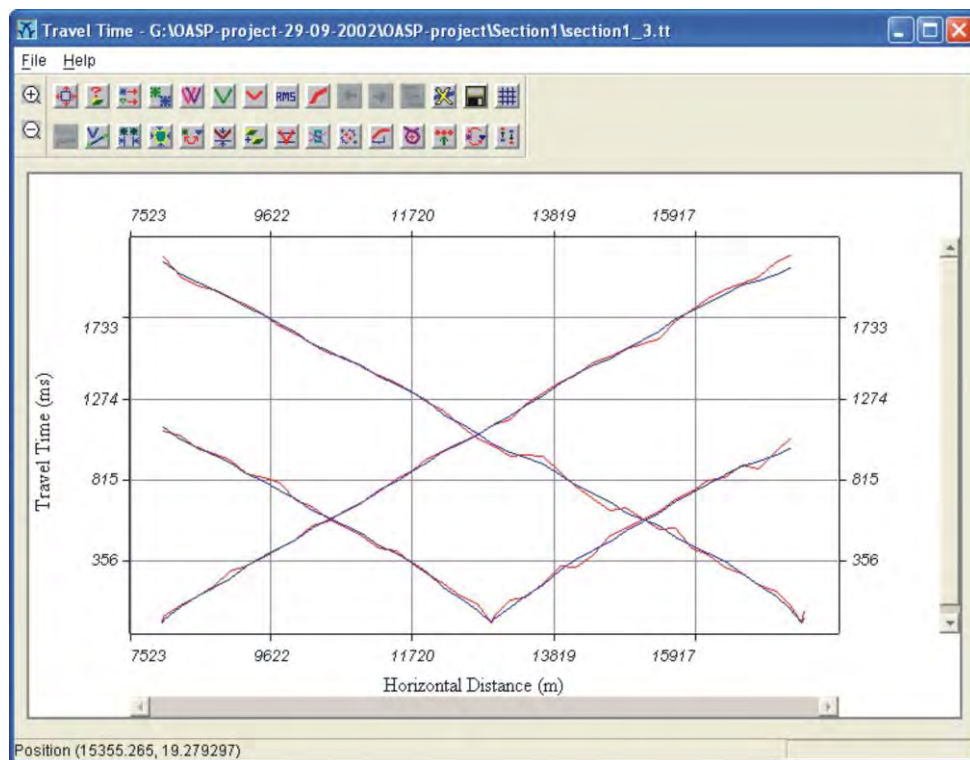
Σεισμική Τομή 1

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χρόνοι άφιξης από τρεις εκρήξεις, όπως διακρίνεται και από τις αντίστοιχες δρομοχρονικές καμπύλες (εικόνα 40).



Εικόνα 40. Απεικόνιση των χρόνων άφιξης από τρεις εκρήξεις της σεισμικής τομής 1.

Το RMS σφάλμα μεταξύ των επιλεχθέντων και υπολογισθέντων, από τη διαδικασία της αντιστροφής, χρόνων κυμαίνεται μεταξύ 21-23 ms (εικόνα 41). Οι συγκεκριμένες RMS διαφορές θεωρούνται απόλυτα ικανοποιητικές, λόγω του σχετικά χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο και της μικρής πυκνότητας σεισμικών γραμμών ανά κελί.



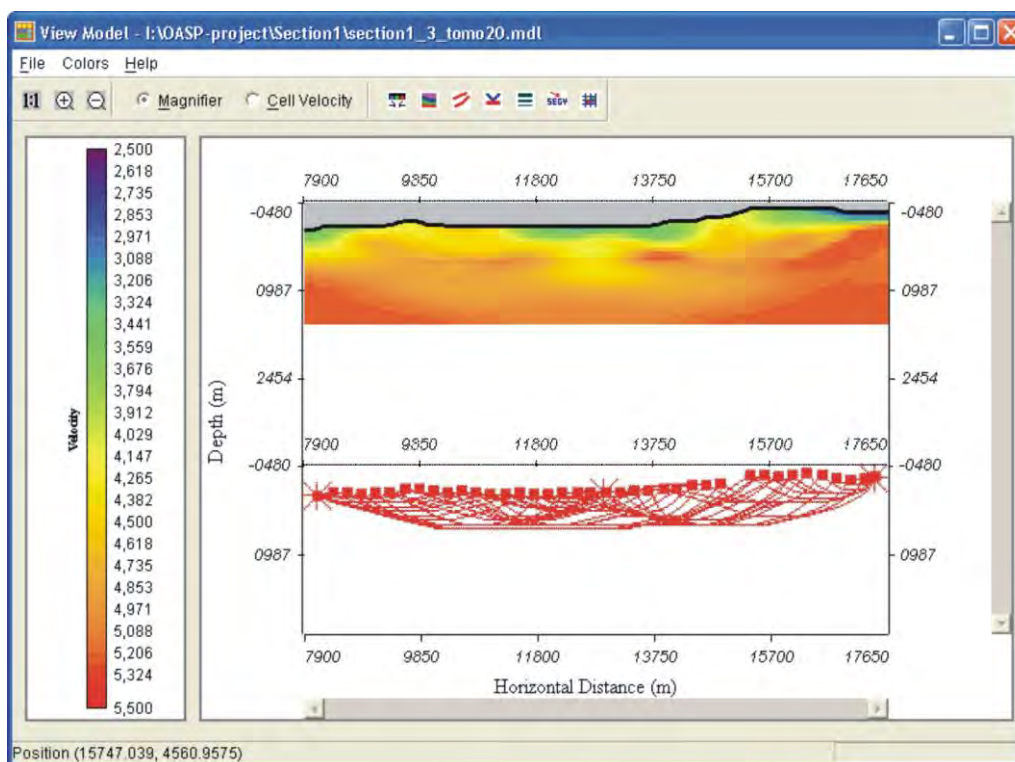
Εικόνα 41. Απεικόνιση των παρατηρηθέντων δρομο-χρονικών καμπύλων (κόκκινο χρώμα) και σύγκριση αυτών με εκείνων που υπολογίστηκαν (μπλε χρώμα) απ την εφαρμογή του αλγόριθμου «ελαχίστων διαδρομών» της σεισμικής τομής 1.

Στην εικόνα 42 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας, καθώς και η κατανομή των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, για τη σεισμική τομή 1, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της σεισμικής τομογραφίας διακρίνουμε την ύπαρξη τριών διαφορετικών σχηματισμών με ταχύτητες:

1. < 2.800 m/s (μπλε χρώμα)
2. $3.600-4.000$ m/s (πράσινο χρώμα)
3. > 4.500 m/s (κίτρινο-κόκκινο χρώμα)

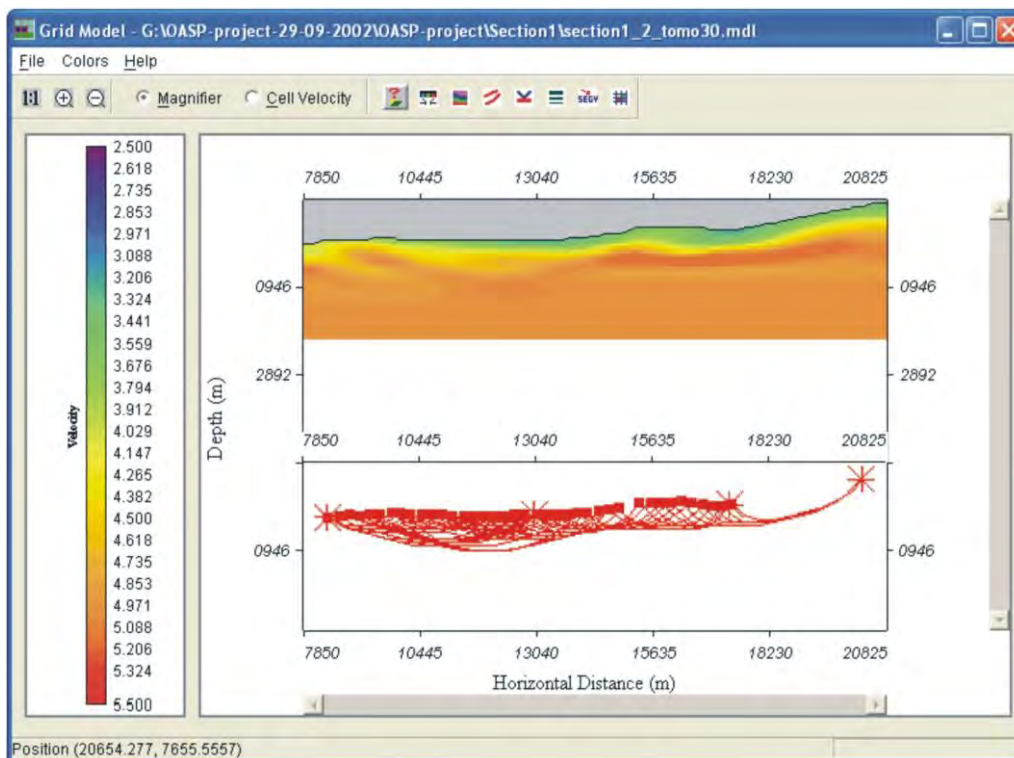
Τόσο από την κατανομή των ταχυτήτων, όσο και από την αντίστοιχη των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, γίνεται φανερό ότι ο σχηματισμός (3) βρίσκεται στην επιφάνεια (σεισμικοί δέκτες 5-14) και σε βάθος 320 m, από την επιφάνεια, στην περιοχή που οριοθετείται από τους σειсмоγράφους 24-27. Η παρουσία του ανώτερου σχηματισμού με τη χαμηλότερη σεισμική ταχύτητα (1) είναι φανερή στις περιοχές όπου

εμφανίζονται τοπογραφικά βυθίσματα (σεισμικοί δέκτες 17-20 και 37-40), ενώ το πάχος του, και για τις δύο περιπτώσεις, δεν ξεπερνά τα 100 m. Ο σχηματισμός με την ενδιάμεση σεισμική ταχύτητα (2) εμφανίζεται στην επιφάνεια μεταξύ των περιοχών που οριοθετούνται από τα ζεύγη των σεισμικών δεκτών 1-3, 22-27 και στην τοπογραφική έξαρση μεταξύ των 32-35. Το μέγιστο πάχος του δεν ξεπερνά τα 300 m.



Εικόνα 42. Απεικόνιση της κατανομής της σεισμικής ταχύτητας καθώς και η κατανομή των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, για τη σεισμική τομή 1, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας.

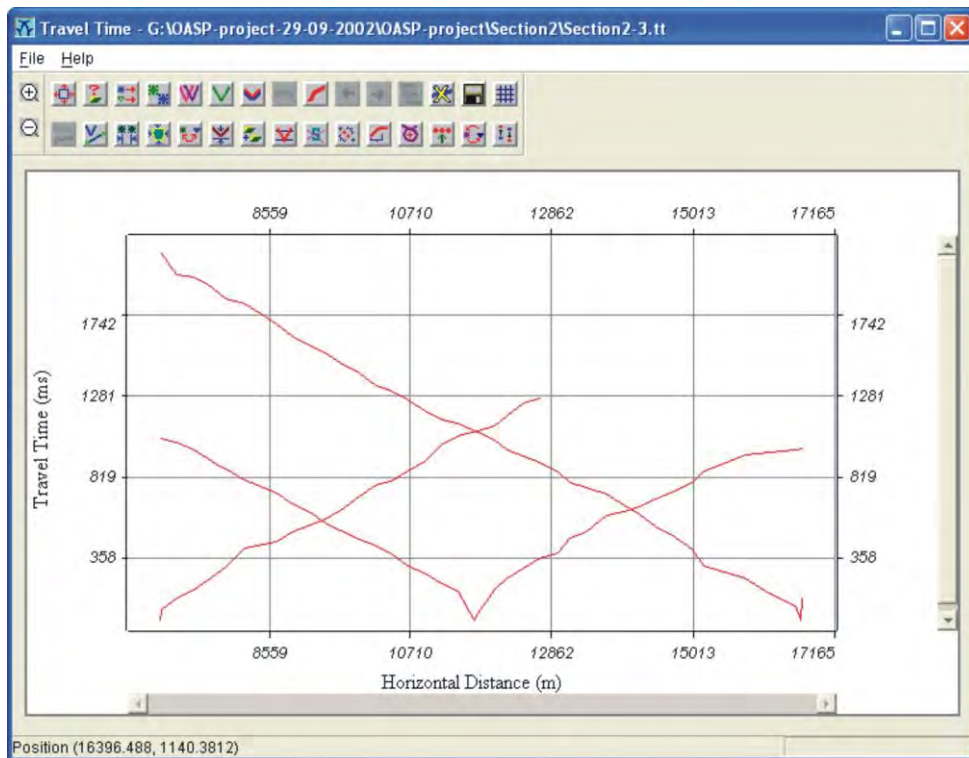
Αντίστοιχα, στην εικόνα 43 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας όπως προέκυψε από την επεξεργασία των χρόνων άφιξης από τέσσερις συνολικά εκρήξεις, συμπεριλαμβανομένης και μιας μακρινής. Η παρουσία της μακρινής έκρηξης γίνεται αντιληπτή από το μεγαλύτερο μήκος της σεισμικής τομής καθώς και από το διάγραμμα της κατανομής των σεισμικών ακτίνων, οι οποίες διακρίνονται να διατρέχουν κατά μήκος το όριο μεταξύ των ανώτερων σχηματισμών και του υποβάθρου. Και στις δύο εικόνες χρησιμοποιήθηκε η ίδια κλίμακα σεισμικών ταχυτήτων έτσι ώστε να επιτραπούν οι συγκρίσεις. Έτσι, γίνεται φανερό ότι ενώ η σεισμική τομή μεγαλύτερου μήκους χαρακτηρίζεται από ομαλά στρωματοποιημένη δομή, σε σχέση με την αντίστοιχη του μικρότερου μήκους, υπολείπεται σε ευκρίνεια. Επιπλέον, λόγω του μικρού βάθους εμφάνισης του υποβάθρου δεν υπερτερεί της δεύτερης σε βάθος έρευνας.



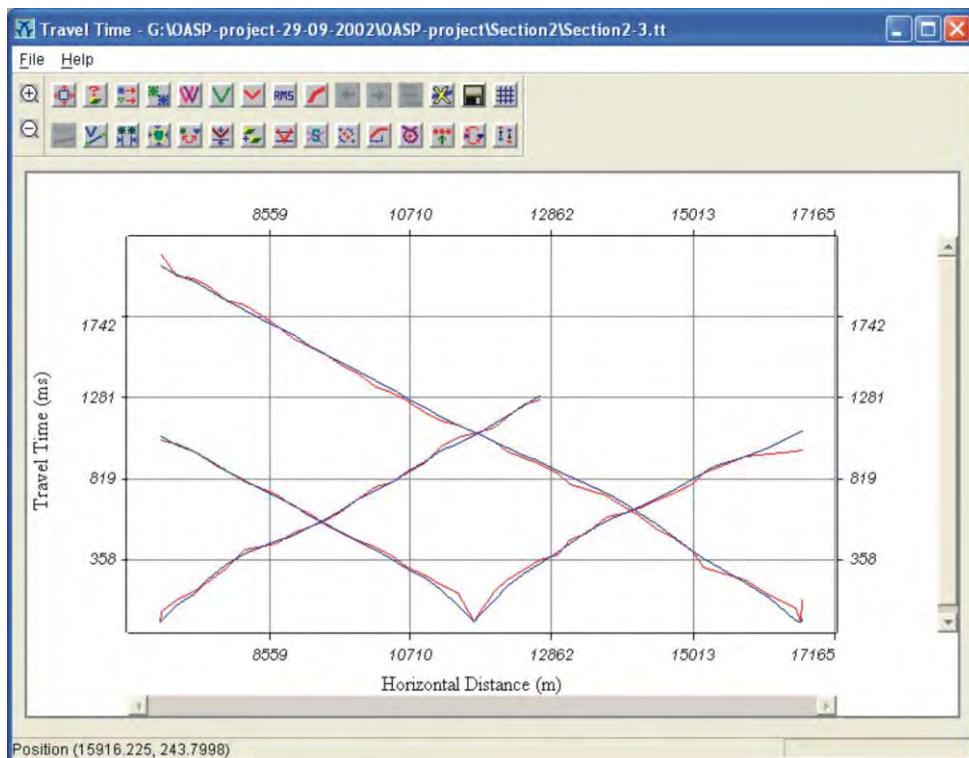
Εικόνα 43. Απεικόνιση της κατανομής της σεισμικής ταχύτητας της σεισμικής τομής 1, όπως προέκυψε από την επεξεργασία των χρόνων άφιξης από τέσσερις συνολικά εκρήξεις, συμπεριλαμβανομένης και μιας μακρινής.

Σεισμική Τομή 2

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χρόνοι άφιξης από τρεις εκρήξεις, όπως διακρίνεται και από τις αντίστοιχες δρομοχρονικές καμπύλες (εικόνα 44). Το RMS σφάλμα μεταξύ των επιλεγθέντων και υπολογισθέντων, από τη διαδικασία της αντιστροφής, χρόνων κυμαίνεται μεταξύ 20-32 ms (εικόνα 45). Δεδομένου του πολύ χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο οι συγκεκριμένες RMS διαφορές θεωρούνται ικανοποιητικές.



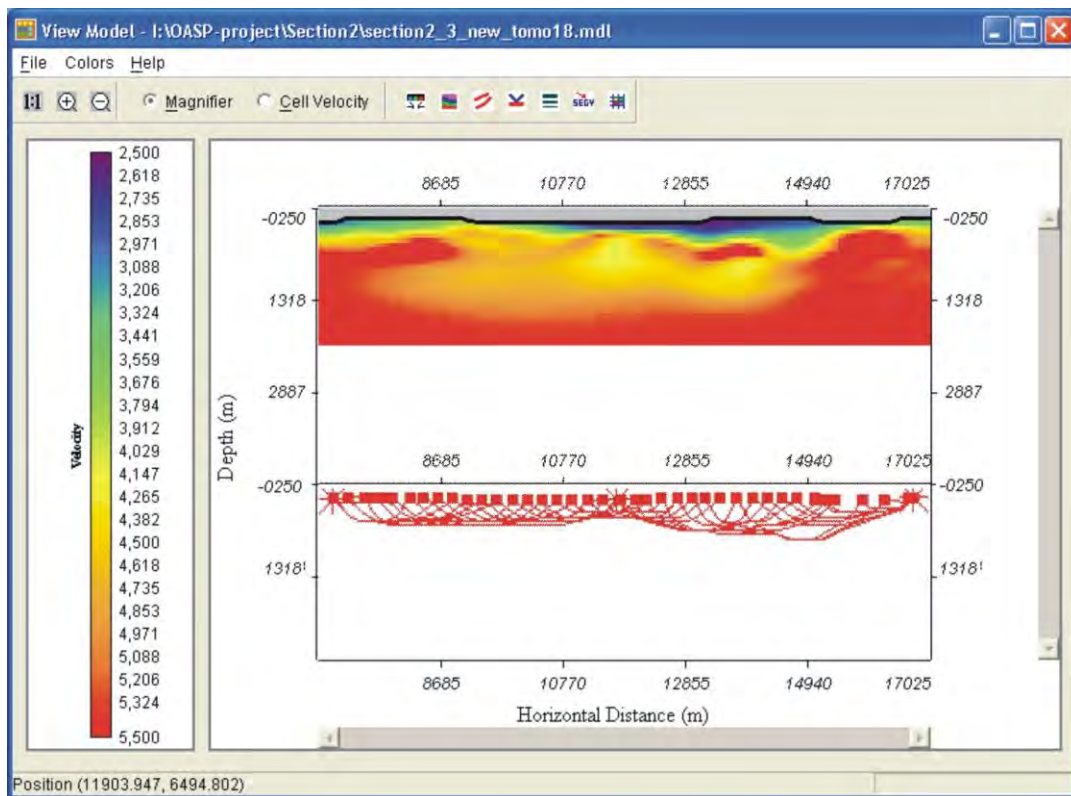
Εικόνα 44. Απεικόνιση των χρόνων άφιξης από τρεις εκρήξεις της σεισμικής τομής 2.



Εικόνα 45. Απεικόνιση των παρατηρηθέντων δρομο-χρονικών καμπύλων (κόκκινο χρώμα) και σύγκριση αυτών με εκείνες που υπολογίστηκαν (μπλε χρώμα) από την εφαρμογή του αλγορίθμου «ελαχίστων διαδρομών» της σεισμικής τομής 2.

Στην εικόνα 46 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας καθώς και η κατανομή των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, για τη σεισμική τομή 2, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα των δρομοχρονικών καμπύλων, για την κανονική έκρηξη κατέστη αδύνατη η επιλογή χρόνων άφιξης πέραν της απόστασης των 12.700 m από το σημείο της έκρηξης, εξαιτίας του πολύ χαμηλού λόγου σήματος προς θόρυβο. Επιπλέον, η απουσία σεισμικών ακτίνων με αφετηρία το σημείο της κανονικής έκρηξης και τερματισμό σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 12.700 m, φαίνεται να προκαλεί την ψευδή παρουσία σεισμικών ταχυτήτων 4.000-4.500 m/s (κίτρινο-κόκκινο χρώμα) σε βάθη μεγαλύτερα των 600 m. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται στο κεντρικό τμήμα της σεισμικής τομής. Από τη μελέτη των αποτελεσμάτων της σεισμικής τομογραφίας διακρίνουμε την ύπαρξη τριών διαφορετικών σχηματισμών με ταχύτητες:

1. <2.800-2.900 m/s (μπλε χρώμα)
2. 3.200-4.000 m/s (πράσινο χρώμα)
3. >4.500 m/s (κίτρινο-κόκκινο χρώμα)



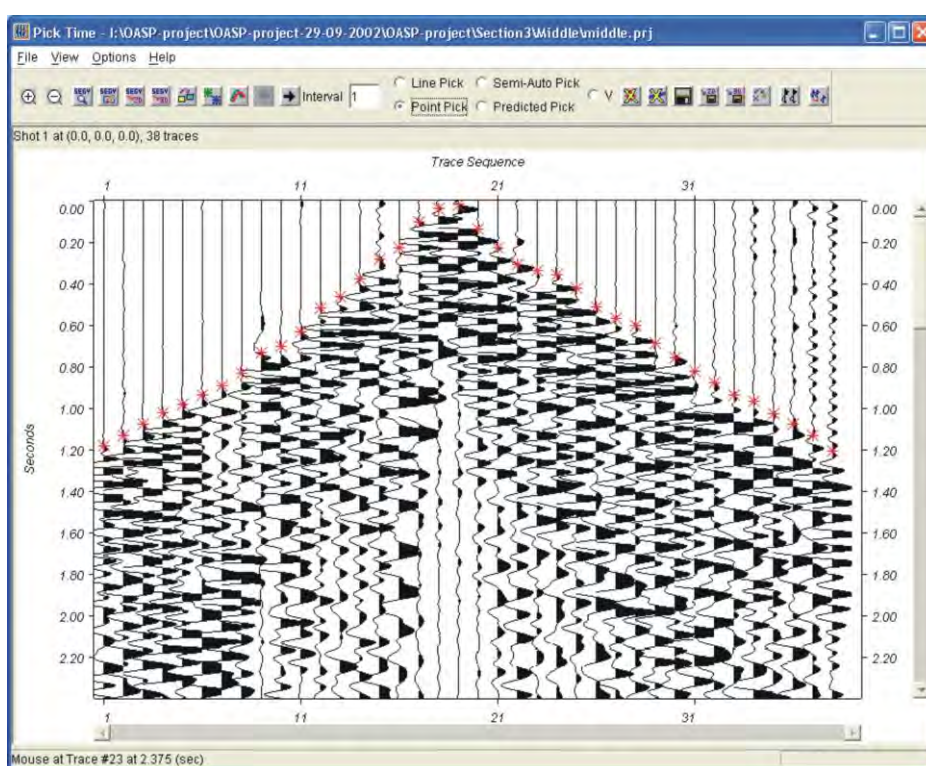
Εικόνα 46. Απεικόνιση της κατανομής της σεισμικής ταχύτητας καθώς και η κατανομή των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, για τη σεισμική τομή 2, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας.

Ο ανώτερος σχηματισμός (1) παρατηρείται επιφανειακά κυρίως μεταξύ των σεισμικών δεκτών 17-35 και το πάχος του δεν υπερβαίνει τα 250 m. Ο σχηματισμός

με την ενδιάμεση σεισμική ταχύτητα (2) εμφανίζεται στην επιφάνεια μεταξύ των περιοχών που οριοθετούνται από τα ζεύγη των σεισμικών δεκτών 8-16 και στην τοπογραφική έξαρση μεταξύ των 36-40. Το μέγιστο πάχος του δεν ξεπερνά τα 200 m.

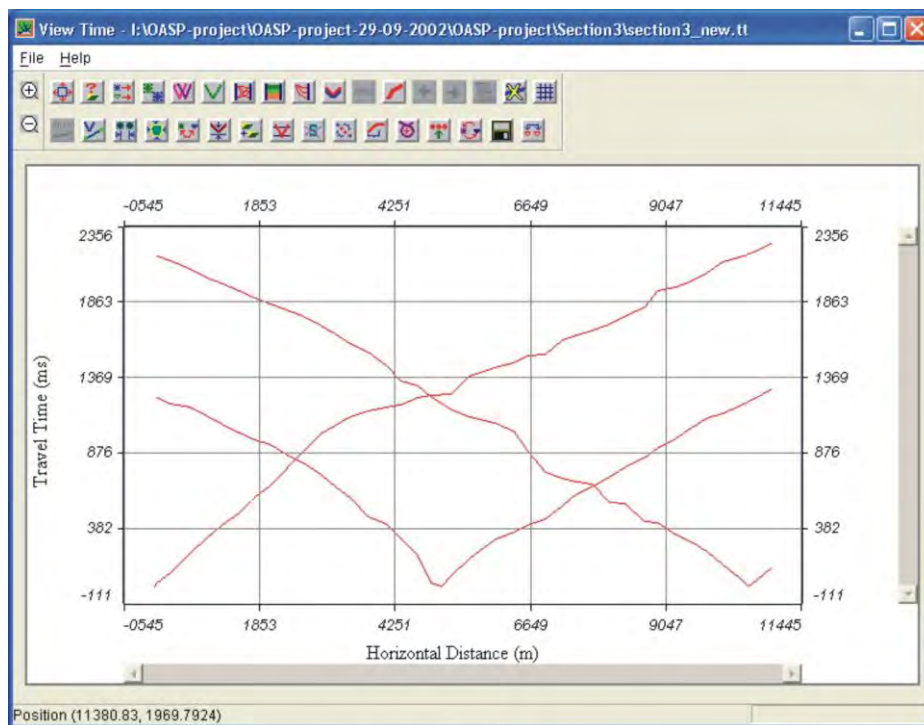
Σεισμική Τομή 3

Στην εικόνα 47 φαίνονται τα σεισμικά ίχνη που αντιστοιχούν στη μεσαία έκρηξη της τομής 3. Στην ίδια εικόνα διακρίνονται επίσης, σε κάθε σεισμικό ίχνος, τα σημεία στα οποία έγινε η επιλογή των πρώτων αφίξεων. Είναι χαρακτηριστικό ότι για τα περισσότερα ίχνη ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο είναι σχετικά υψηλός, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται με ακρίβεια η επιλογή των πρώτων αφίξεων. Στην εικόνα 48 παρουσιάζονται οι δρομοχρονικές καμπύλες, όπως αυτές κατασκευάστηκαν για το σύνολο το σεισμικών δεκτών και για τις τρεις εκρήξεις της σεισμικής τομής 3.

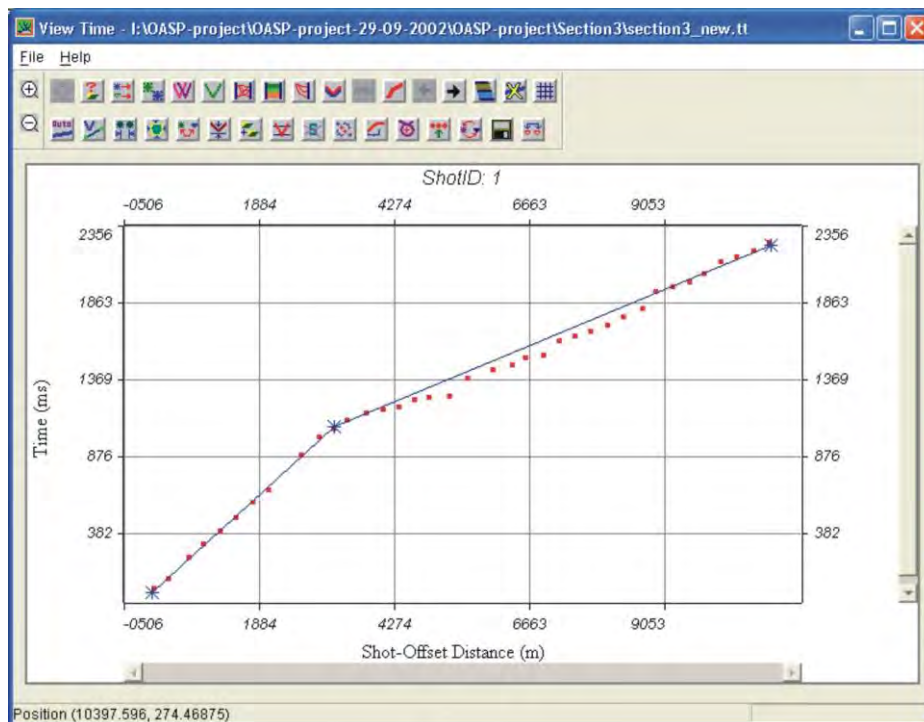


Εικόνα 47. Σεισμική καταγραφή της μεσαίας έκρηξης της σεισμικής τομής 3.

Αντίστοιχα, στην εικόνα 49 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα επιλογής των σημείων μεταβολής της φαινόμενης σεισμικής ταχύτητας για την κανονική έκρηξη της σεισμικής τομής 3. Η επιλογή των σημείων μεταβολής της φαινόμενης σεισμικής ταχύτητας δίνει τη δυνατότητα κατασκευής ενός αρχικού μοντέλου ταχυτήτων, το οποίο θα τροφοδοτήσει τη διαδικασία αντιστροφής. Παρά το γεγονός, ότι η χρήση της συγκεκριμένης μεθόδου μη γραμμικής τομογραφίας σεισμικής διάθλασης μπορεί να χρησιμοποιήσει ως αρχική προσέγγιση ένα μοντέλο τόσο απλό όσο κι ένας ομογενής ημιχώρος, η χρήση ενός περισσότερου ακριβούς μοντέλου που στηρίζεται στις αρχικά υπολογισμένες φαινόμενες ταχύτητες, περιορίζει τις απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ.

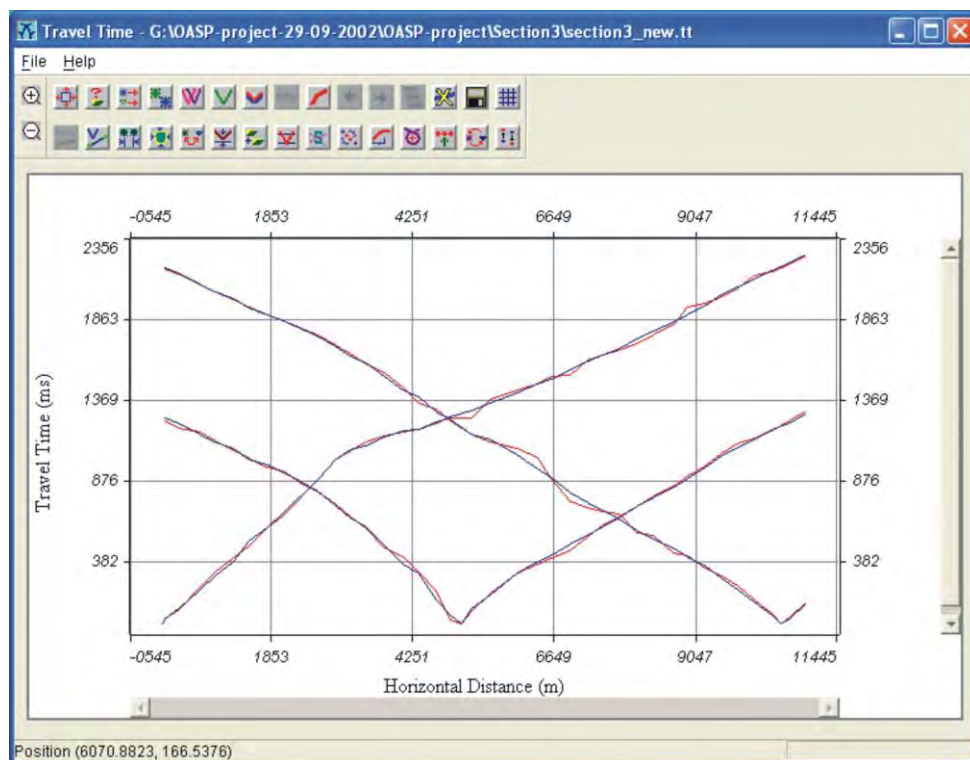


Εικόνα 48. Δρομοχρονικές καμπύλες της κανονικής, μεσαίας και αντίστροφης έκρηξης της σεισμικής τομής 3.



Εικόνα 49. Παρουσιάζεται ένα παράδειγμα επιλογής των σημείων μεταβολής της φαινόμενης σεισμικής ταχύτητας για την κανονική έκρηξη της σεισμικής τομής 3.

Το RMS σφάλμα μεταξύ των επιλεγθέντων και υπολογισθέντων, από τη διαδικασία της αντιστροφής, χρόνων κυμαίνεται μεταξύ 18-22 ms (βλ. Εικ. 50).



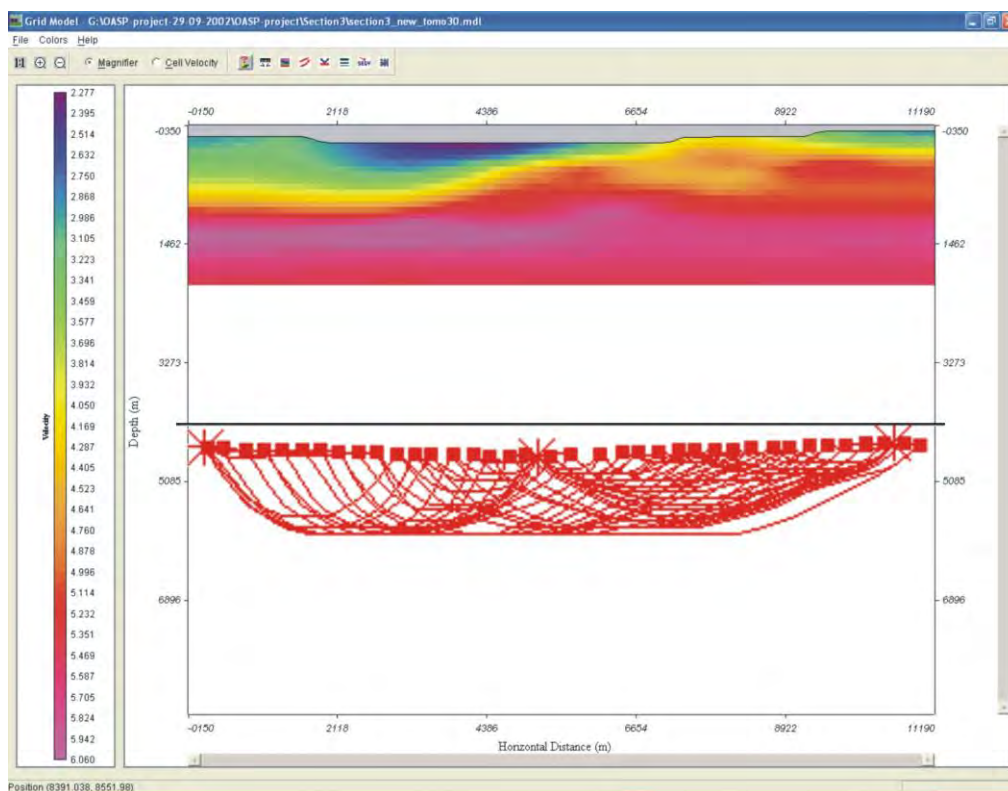
Εικόνα 50. Απεικόνιση των παρατηρηθέντων δρομο-χρονικών καμπύλων (κόκκινο χρώμα) και σύγκριση αυτών με εκείνες που υπολογίστηκαν (μπλε χρώμα) από την εφαρμογή του αλγόριθμου «ελαχίστων διαδρομών» της σεισμικής τομής 3.

Στην εικόνα 51 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας καθώς και η κατανομή των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, για τη σεισμική τομή 3, όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας. Οι συγκεκριμένες RMS διαφορές θεωρούνται άκρως ικανοποιητικές δεδομένου του λόγου σήματος προς θόρυβο και της σχετικά μικρής πυκνότητας σεισμικών ακτίνων ανά κελί. Από τη μελέτη της εικόνας 51 διακρίνουμε την ύπαρξη τριών διαφορετικών σχηματισμών με ταχύτητες:

1. 2.300-2.700 m/s (μπλε χρώμα)
2. 3.200-4.500 m/s (πράσινο-κίτρινο χρώμα)
3. >4.500 m/s (κόκκινο χρώμα)

Είναι φανερή επίσης η παρουσία του σχηματισμού με τη μικρότερη σεισμική ταχύτητα (1) μεταξύ των σειсмоγράφων 8 έως και 20 και σε ένα βάθος από την επιφάνεια έως και 350 m. Ο σχηματισμός αυτός υπέρκειται εκείνου με την ενδιάμεση σεισμική ταχύτητα (2), ο οποίος μεταξύ των σειсмоγράφων 1 έως και 7 εκτείνεται από την επιφάνεια έως και το βάθος των 1000 m, ενώ μεταξύ των σειсмоγράφων 33 έως και 39 από την επιφάνεια έως και το βάθος των 270 m. Παράλληλα, ο

σηματισμός που χαρακτηρίζεται από την υψηλότερη σεισμική ταχύτητα (3) εμφανίζεται άλλοτε σε βάθη μεγαλύτερα των 1000 m, όπως μεταξύ των σειсмоγράφων 1-7, ενώ άλλοτε κείται κοντά στην επιφάνεια, όπως μεταξύ των σειсмоγράφων 25-32. Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η μεγάλη κλίση του ορίου μεταξύ του μεσαίου στρώματος και του υποβάθρου, για την περιοχή από τον 13ο έως και τον 20ο σεισμικό δέκτη. Η αντίστοιχη υψομετρική μεταβολή εκτιμάται ότι είναι περίπου 850-900 m.



Εικόνα 51. Η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας καθώς και η κατανομή των σεισμικών ακτίνων με το βάθος, για τη σεισμική τομή 3, όπως προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθόδου της σεισμικής τομογραφίας.

5.4.2 Επεξεργασία των δεδομένων με την τεχνική της «προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς» (Ray-tracing modeling).

Για την επεξεργασία των σεισμικών δεδομένων με την τεχνική της «προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς», χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος του προγράμματος Rayinvr (Zelt and Smith, 1992). Ο αλγόριθμος αυτός χρησιμοποιεί τεχνικές προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς και αντίστροφης σεισμικής προσομοίωσης, ώστε να δημιουργηθεί μοντέλο σεισμικής ταχύτητας που να προσδιορίζει τις αφίξεις των σεισμικών κυμάτων ανάκλασης και διάθλασης. Για την ακρίβεια, με την αντιστροφή των χρόνων άφιξης των σεισμικών κυμάτων επιτυγχάνεται τελικά ένας ταυτόχρονος προσδιορισμός των συννοριακών επιφανειών μεταξύ των διαφόρων στρωμάτων, αλλά και της ταχύτητας των στρωμάτων. Ο αλγόριθμος έχει χρησιμοποιηθεί σε πολυάριθμες εφαρμογές (πχ. ZELT & ELLIS, 1989, O'LEARY et al., 1995, ZELT & WHITE, 1995, CLOWES et al., 1995).

Αναλυτικότερα το πρόγραμμα Rayinvr προϋποθέτει την ύπαρξη ενός ισοτροπικού δισδιάστατου χώρου 2-D (x, z). Το μοντέλο σεισμικής ταχύτητας συγκροτείται από μια ακολουθία στρωμάτων που διαχωρίζονται μεταξύ τους από συννοριακές γραμμές, οι οποίες με την σειρά τους αποτελούνται από μικρότερα ευθύγραμμα τμήματα με διάφορες κλίσεις. Οι συννοριακές γραμμές των στρωμάτων πρέπει να είναι συνεχείς σε όλο το μήκος τους από αριστερά προς τα δεξιά του μοντέλου. Όταν υπάρχει ανάγκη περιγραφής απομονωμένων σωμάτων ή αποσφηνώσεων τότε πρέπει το πάχος του στρώματος που ορίζεται από τις συννοριακές γραμμές να μηδενιστεί τοπικά. Το πεδίο τιμών σεισμικής ταχύτητας του κάθε στρώματος (μεταξύ των συννοριακών γραμμών) καθορίζεται από τιμές ταχύτητας που ορίζονται σε διάφορα σημεία αυθαίρετων (τυχαίων) συντεταγμένων πάνω στην οροφή αλλά και του κάτω μέρους του στρώματος. Οι συντεταγμένες στον άξονα X, όπου οι συννοριακές γραμμές οριοθετούνται (κόμβοι συνόρων), αλλά και όπου οι ταχύτητες ορίζονται (κόμβοι ταχυτήτων), μπορούν να είναι εντελώς γενικά και αυθαίρετα επιλεγμένες. Οι οριζόντιες μεταβολές στην ταχύτητα των στρωμάτων επιτρέπεται αλλά δεν απαιτούνται κατ' ανάγκη.

Για τις ανάγκες του αλγόριθμου, το μοντέλο αυτόματα χωρίζεται από τους κόμβους, σε ένα ασύμμετρο δίκτυο από τραπέζια σχήματα. Οι ταχύτητες στις τέσσερις γωνίες του κάθε τραπέζιου χρησιμοποιούνται ώστε να προκύψει με παρεμβολή το πεδίο τιμών εσωτερικά του τραπέζιου. Έτσι, μπορούμε εντός του κάθε τραπέζιου να έχουμε μια οριζόντια όσο και κατακόρυφη βαθμίδα μεταβολής της ταχύτητας. Μια προσομοίωση εξομαλυσμένων συννοριακών γραμμών είναι ακόμη δυνατή στην οποία οι γωνίες πρόσπτωσης και ανάδυσσης υπολογίζονται βάσει της κλίσης του εξομαλυσμένου συνόρου στο σημείο πρόσπτωσης.

Η σεισμική πηγή μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε μέσα στο μοντέλο και οι ακτίνες μπορούν να κατευθύνονται σε οποιαδήποτε γωνία. Οι δέκτες πρέπει όμως να τοποθετούνται στο πάνω μέρος του μοντέλου.

Ο αλγόριθμος μπορεί να χειρίζεται την διάδοση των διαμήκων κυμάτων, των εγκαρσίων αλλά και των «από μετατροπή» (mode converted) κυμάτων. Ένας μοναδικός λόγος Poisson μπορεί επίσης να θεωρηθεί για κάθε τραπέζιο.

Διαθλώμενα, ανακλώμενα και μετωπικά κύματα μπορούν να υπολογισθούν αλλά ακόμη και τα παράγωγά τους όπως οι πολλαπλές ανακλάσεις, ανακλάσεις στην επιφάνεια και διάφορες εκ μετατροπής φάσεις.

Οι γωνίες ανάδυσσης προσδιορίζονται αυτόματα από το πρόγραμμα για κάθε επιλεγμένο είδος κύματος με την χρήση της «επαναληπτικής αναζήτησης» τύπου «shooting/bisection». Η προσομοίωση της σεισμικής τροχιάς επιτυγχάνεται με την αριθμητική επίλυση ενός συστήματος διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης με την μέθοδο Runge Kutta.

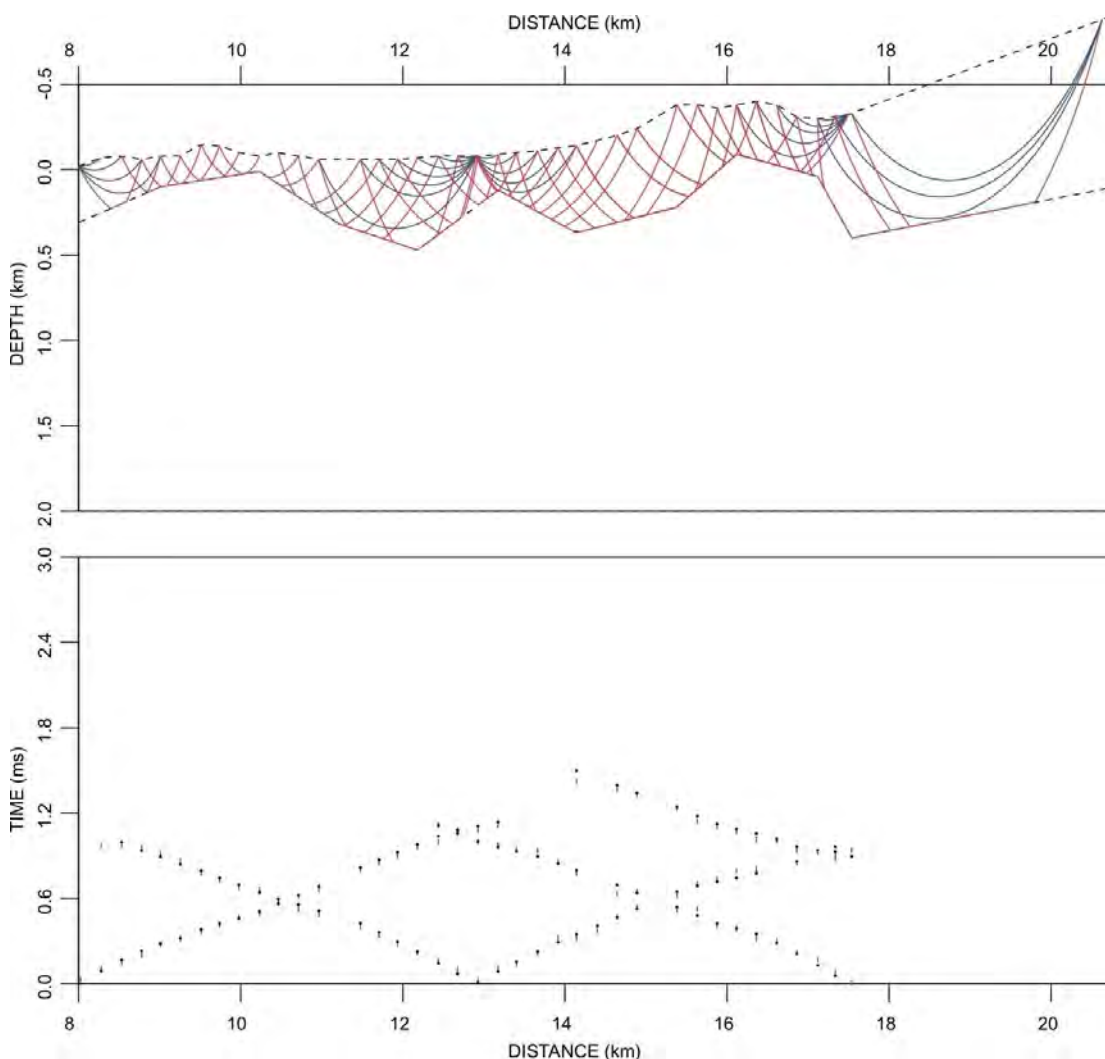
Οι μερικές παράγωγοι των χρόνων διαδρομής ως προς τις επιλεγμένες προς ρύθμιση παραμέτρους του μοντέλου (τιμές και θέσεις των κόμβων ταχύτητας) υπολογίζονται αναλυτικά κατά την διάρκεια της προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς. Οι αφίξεις που προσδιορίζονται δεν είναι μόνο οι πρώτες αλλά και οι ύστερες. Τα δρομοχρονικά υπόλοιπα υπολογίζονται μεταξύ των υπολογισμένων και των παρατηρηθέντων χρόνων.

Οι μερικές παράγωγοι και τα δρομοχρονικά υπόλοιπα εισάγονται ως δεδομένα σε αλγόριθμο αντιστροφής, ο οποίος διαμορφώνει τελικά το μοντέλο.

Η έκδοση του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε υποστηρίζει και την μοντελοποίηση ανακλαστήρων που δεν σχετίζονται με αλλαγές ταχύτητας (floating reflectors) και μπορούν να ενταχθούν εντός κάποιου στρώματος τοπικά. Η μοντελοποίηση αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε περιπτώσεις ρηγμάτων.

Σεισμική Τομή 1

Στην εικόνα 52 παρουσιάζονται οι δρομοχρονικές καμπύλες των υπολογισθέντων και παρατηρηθέντων δεδομένων καθώς και οι τροχιές των σεισμικών ακτίνων σύμφωνα με το μοντέλο που τελικά υιοθετήθηκε.

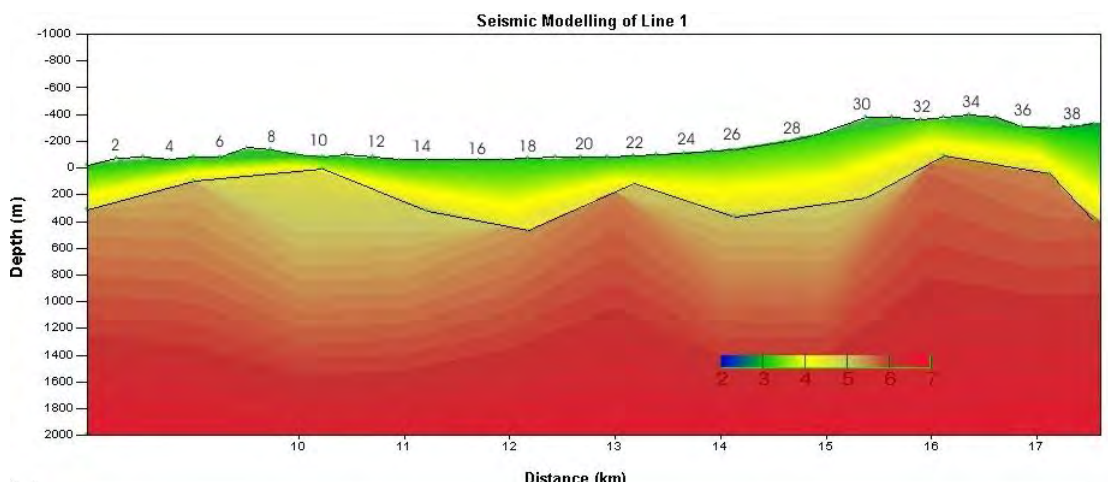


Εικόνα 52. Τα μετωπικά κύματα και στην τομή 1 είναι αυτά που έχουν καταγραφεί ως πρώτες αφίξεις. Η επίλυση δίνεται με 85 σημεία και μικτό σφάλμα RMS 0.026 s.

Στην εικόνα 53 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας μετά του βάθους, όπως προέκυψε ακολουθώντας την ίδια τεχνική ανάλυσης που εφαρμόστηκε για τις σεισμικές τομές 2 και 3.

Γενικά, παρατηρούνται μικρές σχετικά σεισμικές ταχύτητες που χαρακτηρίζουν τους ανθρακικούς σχηματισμούς της περιοχής έρευνας. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί

συνήθως εμφανίζονται στην επιφάνεια και δίδουν ένα μέτρο εκτίμησης της σεισμικής ταχύτητας τους.

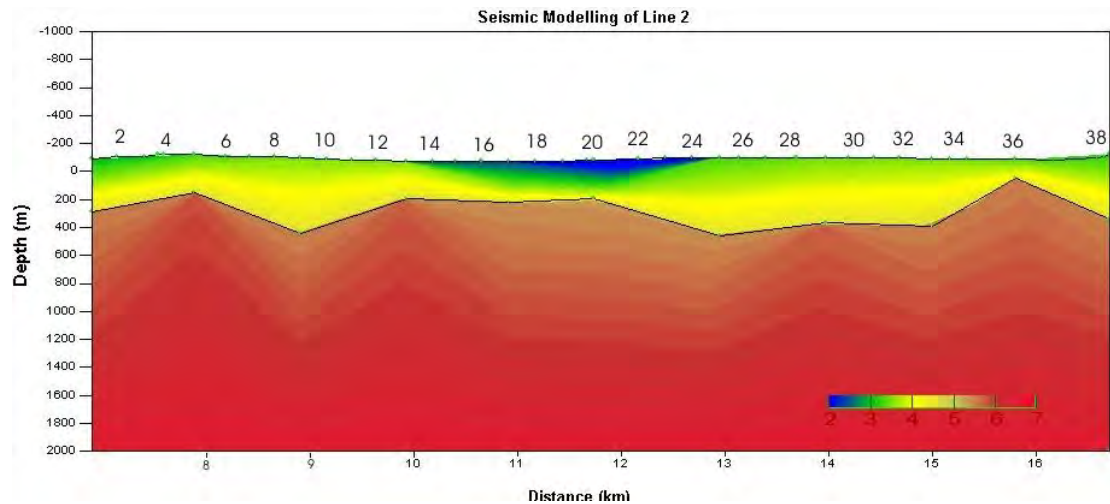


Εικόνα 53. Η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας κατά μήκος της τομής 1. Η μαύρη τεθλασμένη γραμμή πιθανόν να σκιαγραφεί την επαφή μεταξύ των υποκείμενων συμπαγών ανθρακικών σχηματισμών και των υπερκείμενων λιγότερο συμπαγών σχηματισμών.

Η μαύρη τεθλασμένη γραμμή πιθανόν να σκιαγραφεί την επαφή μεταξύ των υποκείμενων συμπαγών ανθρακικών σχηματισμών και των υπερκείμενων λιγότερο συμπαγών σχηματισμών (λόγω διάβρωσης, καρστικοποίησης, κ.α.). Το χαμηλής σεισμικής ταχύτητας επιφανειακό στρώμα στο μέσον της τομής και στη λεκάνη της Φυλής, δεν εμφανίζεται στη τομή αυτή. Η ανάλυση των δεδομένων με τη τεχνική της «προσομοίωσης της σεισμικής τροχιάς» δεν επιτρέπει τον προσδιορισμό του επιφανειακού αυτού στρώματος.

Σεισμική Τομή 2

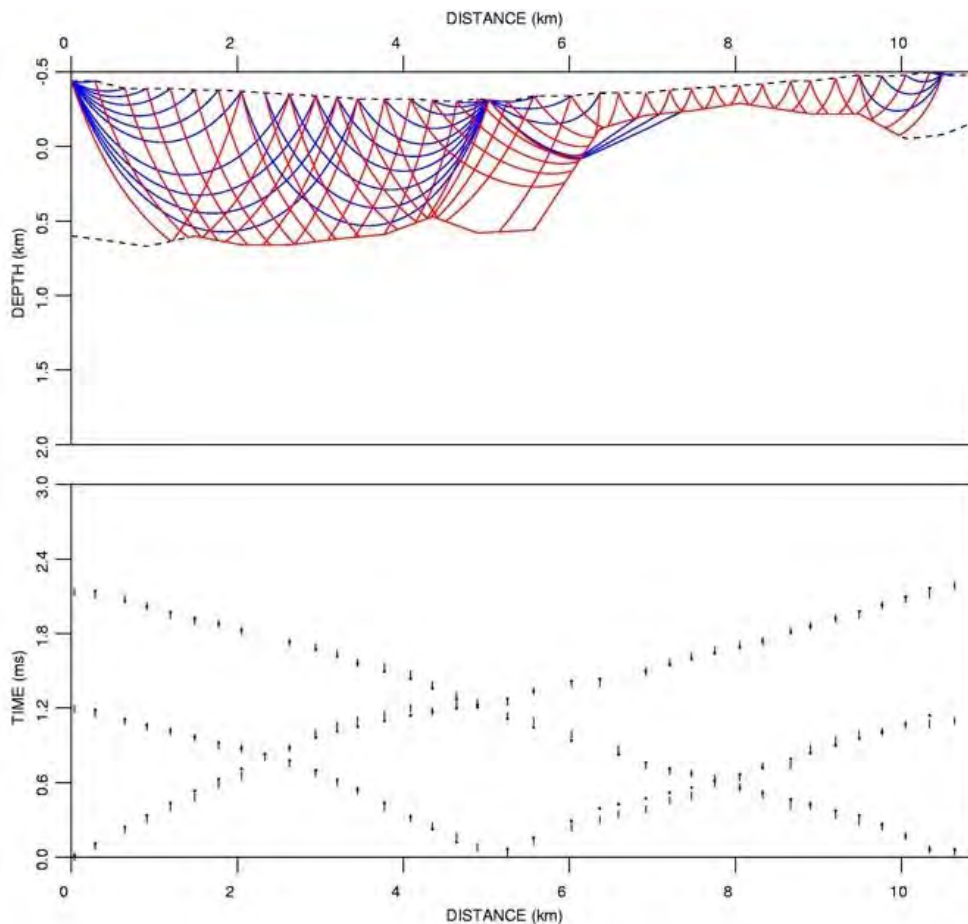
Στην εικόνα 51 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας μετά του βάθους, όπως προέκυψε ακολουθώντας την ίδια τεχνική ανάλυσης που εφαρμόστηκε για τη σεισμική τομή 1.



Εικόνα 54. Η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας κατά μήκος της τομής 2. Η μαύρη τεθλασμένη γραμμή πιθανόν να σκιαγραφεί την επαφή μεταξύ των υποκείμενων συμπαγών ανθρακικών σχηματισμών και των υπερκείμενων λιγότερο συμπαγών σχηματισμών.

Σεισμική Τομή 3

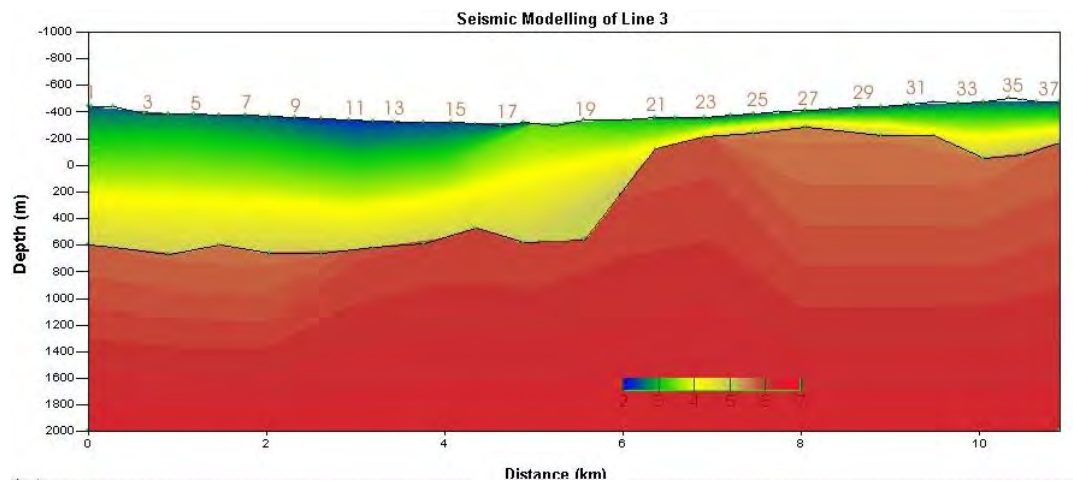
Στην εικόνα 55 παρουσιάζονται α) η πορεία των σεισμικών ακτίνων και το μοντέλο που τελικά υιοθετήθηκε, και β) η ταύτιση των υπολογισθέντων και παρατηρηθέντων δρομοχρονικών καμπύλων.



Εικόνα 55. Η ταύτιση των μετρήσεων με τους υπολογισμένους χρόνους είναι προφανής. Τα σεισμικά κύματα που δικαιολογούν κυρίως τις σεισμικές αφίξεις είναι τα μετωπικά. Τα σημεία που ταυτίστηκαν είναι 102 και το μέσο δρομοχρονικό υπόλοιπο 30 ms.

Στην εικόνα 56 παρουσιάζεται η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας μετά του βάθους, όπως προέκυψε από τον υπολογισμό των μερικών παραγώγων των χρόνων διαδρομής και των δρομοχρονικών υπολοίπων που εισάγονται ως δεδομένα σε αλγόριθμο αντιστροφής, ο οποίος διαμορφώνει τελικά το μοντέλο ταχύτητας.

Η διαχωριστική επιφάνεια που έχει χαραχθεί ως μια μαύρη τεθλασμένη γραμμή, είναι πολύ καλά καθορισμένη και αντιπροσωπεύει την επαφή είτε των μεταλλικών σχηματισμών/μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων, ή την επαφή μεταξύ των μεταλλικών σχηματισμών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων.



Εικόνα 56. Η κατανομή της σεισμικής ταχύτητας κατά μήκος της τομής 3. Η μαύρη τεθλασμένη γραμμή αντιπροσωπεύει την επαφή είτε των μεταλπικών σχηματισμών/μη μεταμορφωμένων πετρωμάτων, ή την επαφή μεταξύ των μεταλπικών σχηματισμών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων.

6. Γεωλογική – τεκτονική ερμηνεία των βαρυτικών και των σεισμικών τομών

Όπως προαναφέρθηκε και παρουσιάστηκε αναλυτικά, πραγματοποιήθηκαν συνολικά 8 βαρυτικές και 3 σεισμικές τομές στις λεκάνες των Αθηνών και του Θριάσιου.

Με βάση τα στοιχεία που προέκυψαν από τις προαναφερθείσες γεωφυσικές διασκοπήσεις που πραγματοποιήθηκαν, κατέστη δυνατόν να προσδιοριστεί το πάχος των μεταλλικών αποθέσεων στις λεκάνες των Αθηνών και του Θριάσιου πεδίου. Ορισμένα χαρακτηριστικά πάχη είναι σημειωμένα στον χάρτη Γενικής Πληροφόρησης.

Ακολούθως θα παρουσιαστούν οι γεωλογικές παρατηρήσεις και ερμηνείες για κάθε λεκάνη ξεχωριστά.

6.1 Θριάσιο Πεδίο

Από την παρατήρηση και μελέτη του χάρτη, είναι σαφές ότι τα μεγαλύτερα πάχη (>250 m) των μεταλλικών αποθέσεων απαντούν στην περιοχή Κάμπος που βρίσκεται βόρεια του Ασπροπύργου και μεταξύ των ρεμάτων Γιαννούλα και Ανώνυμου. Το ανάγλυφο σε αυτή την περιοχή είναι ομαλό και κυμαίνεται μεταξύ 80 και 40 μέτρων μειώνεται δε από τα ΒΑ προς τα ΝΑ. Τα μεγαλύτερα πάχη δε, εντοπίστηκαν κοντά στις κοίτες των δύο ρεμάτων και όχι στην ενδιάμεση περιοχή. Πιο συγκεκριμένα το μεγαλύτερο πάχος (285 m) εντοπίστηκε στο σημείο 325 της βαρυτικής τομής 3 πολύ κοντά στην εμφάνιση του αλπικού υπόβαθρου στην επιφάνεια και κοντά στο νότιο περιθώριο της Πάρνηθας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μετάβαση από μικρότερα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων σε μεγαλύτερα, συνήθως δεν είναι σταδιακή, αλλά απότομη. Αυτές οι απότομες μεταβολές στα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων οφείλονται στη μορφή του παλαιοαναγλύφου του αλπικού υποβάθρου πάνω στο οποίο έχουν αποτεθεί, αλλά και σε ρήγματα που διαμόρφωσαν τη λεκάνη. Επομένως, το πάχος αυτών των αποθέσεων μπορεί να μεταφραστεί σε απόλυτο υψόμετρο, στο οποίο βρίσκεται σήμερα το αλπικό υπόβαθρο, οι δε απότομες μεταβολές του υψομέτρου πρέπει να αντιστοιχούν σε ρήγματα που μεταθέτουν το αλπικό υπόβαθρο.

Πιο συγκεκριμένα, στις τρεις βαρυτικές τομές (3, 4 και 8) εντοπίζεται σαφώς το περιθωριακό ρήγμα της λεκάνης του Θριάσιου, η διεύθυνση του οποίου είναι ΒΔ-ΝΑ, το δε άλμα του φαίνεται ότι αυξάνει από τα ανατολικά (120 m) προς τα δυτικά (200 m) και κατεβαίνει το νότιο τέμαχος (πρέπει να σημειωθεί ότι στα πλαίσια αυτής της αυτής μελέτης όταν αναφερόμαστε σε άλμα ρήματος εννοούμε τη μετατόπιση της επιφάνειας του αλπικού υποβάθρου πάνω στο οποίο έχουν αποτεθεί οι μεταλλικές αποθέσεις). Η ίδια φορά μεταβολής του άλματος είχε σημειωθεί και από τους MARIOLAKOS & FOUNTOULIS (2000). Στις ίδιες βαρυτικές τομές φαίνεται η παρουσία ενός αντιθετικού ρήματος ως προς το προαναφερθέν. Δηλαδή, ο χώρος μεταξύ των δύο αυτών ρηγμάτων είναι ένα βύθισμα παράλληλο με τη ρηξιγενή ζώνη του Θριάσιου.

Από την κατανομή των παχών των μεταλλικών αποθέσεων εκατέρωθεν του ρέματος Γιαννούλα είναι σαφές ότι μεταξύ των βαρυτικών τομών 3 και 4 και περίπου παράλληλα με την κοίτη του ρέματος πρέπει να υπάρχει ρηξιγενής ζώνη που μεταθέτει το αλπικό υπόβαθρο σε χαμηλότερα υψόμετρα στα δυτικά σε σχέση με αυτά της περιοχής που βρίσκεται ανατολικά. Το άλμα δεν είναι σταθερό σε όλο το

μήκος αυτής της ρηξιγενούς ζώνης, αλλά μεταβάλλεται δεδομένου ότι δημιουργούνται μικρότερης τάξης βυθίσματα και κέρατα εγκάρσια στη ρηξιγενή ζώνη.

Κάτι ανάλογο και παράλληλο με αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως πρέπει να υπάρχει και στην περιοχή μεταξύ των βαρυτικών τομών 4 και 8 και μεταξύ των σταθμών 411 και 422 της βαρυτικής τομής 4.

Από τη μεταβολή του πάχους των αποθέσεων μεταξύ των σημείων 518 και 519 της βαρυτικής τομής 5 και της σεισμικής τομής 2 (σεισμικός δέκτης Νο 14) φαίνεται ότι διέρχεται ρήγμα διεύθυνσης BBA-NNΔ, παράλληλο με αυτό του Γιαννούλα που πρέπει να καθορίζει τη διεύθυνση της κοίτης του Ανώνυμου ρέματος.

6.2 Λεκανοπέδιο Αθηνών

Οι ερευνητικές εργασίες που πραγματοποιήθηκαν στη λεκάνη των Αθηνών επικεντρώθηκαν στην περιοχή όπου καταγράφηκαν και οι περισσότερες καταστροφές, δηλαδή στην περιοχή που βρίσκεται δυτικά της κοίτης του Κηφισού ποταμού. Ως προς την προς βορρά έκταση των ερευνητικών εργασιών έγιναν από το “ύψος” της Πετρούπολης μέχρι βόρεια βορειοδυτικά της Βαρυμπόμπης και του Τατοΐου όπου απαντά το αλπικό υπόβαθρο.

Από την παρατήρηση και μελέτη του χάρτη, είναι σαφές ότι τα μεγαλύτερα πάχη (>600 m) των μεταλλικών αποθέσεων απαντούν στην περιοχή μεταξύ Θρακομακεδόνων Τατοΐου και Κρυονερίου. Τα μεγαλύτερα πάχη εντοπίστηκαν κοντά στο δυτικό περιθώριο της λεκάνης στην περιοχή των Θρακομακεδόνων καθώς και στην περιοχή μεταξύ Κρυονερίου και της Δροσιάς κοντά στον Κηφισό ποταμό.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η μετάβαση από μικρότερα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων σε μεγαλύτερα, συνήθως δεν είναι σταδιακή, αλλά απότομη. Αυτές οι απότομες μεταβολές στα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων οφείλονται στη μορφή του παλαιοαναγλύφου του αλπικού υποβάθρου πάνω στο οποίο έχουν αποτεθεί, αλλά και σε ρήγματα που διαμόρφωσαν τη λεκάνη. Επομένως, το πάχος αυτών των αποθέσεων μπορεί να μεταφραστεί σε απόλυτο υψόμετρο, στο οποίο βρίσκεται σήμερα το αλπικό υπόβαθρο, οι δε απότομες μεταβολές του υψομέτρου πρέπει να αντιστοιχούν σε ρήγματα που μεταθέτουν το αλπικό υπόβαθρο.

Πιο συγκεκριμένα, μεταξύ των δύο βαρυτικών τομών (1 και 2) και στην περιοχή βόρεια των Άνω Λιοσίων – Αχαρνών, εντοπίζεται σαφώς η περιθωριακή ρηξιγενής ζώνη της λεκάνης του Λεκανοπεδίου Αθηνών με την Πάρνηθα, η διεύθυνση της οποίας είναι BA-NΔ, το δε άλμα του φαίνεται ότι αυξάνει από τα νοτιοδυτικά (150 m) προς τα βορειοανατολικά (600 m) και κατεβαίνει το ανατολικό τέμαχος. Η ίδια φορά μεταβολής του άλματος είχε σημειωθεί και από τους MARIOLAKOS & FOUNTOULIS (2000).

Στο νότιο τμήμα των ίδιων βαρυτικών τομών στην περιοχή Πετρούπολης-Ιλίου-Καματερού φαίνεται η παρουσία ενός ρήγματος με διεύθυνση BA-NΔ παράλληλο με το περιθωριακό ρήγμα του Αιγάλεω με κατερχόμενο όμως το δυτικό τέμαχος. Δηλαδή, ο χώρος μεταξύ των δύο αυτών ρηγμάτων είναι ένα βύθισμα παράλληλο με τη ρηξιγενή ζώνη του Αιγάλεω. Τα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων σε αυτή την περιοχή είναι σαφώς μικρότερα από την περιοχή των Θρακομακεδόνων και κυμαίνονται γύρω στα 200 με 250 μέτρα.

Μετατοπίσεις του αλπικού υποβάθρου από ΔΒΔ-ΑΝΑ διεύθυνσης ρήγματα που είναι εγκάρσια στις περιθωριακές ρηξιγενείς ζώνες του Αιγάλεω και της Πάρνηθας εντοπίζονται και στις δύο προαναφερθείσες τομές.

Στην βαρυτική τομή 7 και δυτικά της κοίτης του Κηφισού παρατηρείται απότομη αύξηση του πάχους των μεταλλικών αποθέσεων από 180 ανατολικά σε 400 μέτρα δυτικά και ακολούθως στην περιοχή Αχαρνών σε 250 μέτρα. Δηλαδή στο χώρο αυτό δημιουργείται ένα βύθισμα.

Από όλα όσα αναφέρθηκαν στην αξιολόγηση των βαρυτικών τομών 1, 2 και 7 αλλά και με βάση τις μορφολογικές παρατηρήσεις των MARIOLAKOS & FOUNTOULIS 2000, στα ανατολικά πρηνή της Πάρνηθας στην περιοχή μεταξύ Άνω Λιοσίων και Θρακομακεδόνων, θα πρέπει να υπάρχει ρηξιγενής ζώνη ΒΑ-ΝΔ διεύθυνσης παράλληλη προς αυτή που εντοπίστηκε μεταξύ των βαρυτικών τομών 1 και 2 στην περιοχή που καλύπτεται από μεταλλικές αποθέσεις και βρίσκεται μεταξύ του ορεινού όγκου της Πάρνηθας και της τομής 2.

Από την βαρυτική τομή 6 που έγινε μεταξύ Πεντέλης και Πάρνηθας με βάση τα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων, φαίνεται η παρουσία μιας σειράς βυθισμάτων και κεράτων με μέση διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ. η πιο χαρακτηριστική περιοχή είναι αυτή μεταξύ Κρυονερίου και Δροσιάς όπου το πάχος φαίνεται σαφώς να υπερβαίνει τα 500 m. Πιο συγκεκριμένα δυτικά της Δροσιάς φαίνεται μία απότομη αύξηση του πάχους των αποθέσεων σε 150 m, η οποία στην περιοχή της κοίτης του Κηφισού γίνεται 400 m και ακόμη δυτικότερα αυξάνει ακόμα. Αυτές οι απότομες μεταβολές των παχών θα πρέπει να αποδοθούν στην παρουσία ρηξιγενών ζωνών, η διεύθυνση των οποίων δεν εύκολο να προσδιοριστεί από μία τομή μόνο.

Εξάλλου από τη σεισμική τομή 3 στις ίδιες περιοχές εντοπίζονται σαφείς απότομες μετατοπίσεις του υποβάθρου όπου το πάχος των μεταλλικών αποθέσεων δυτικά της κοίτης του Κηφισού είναι της τάξης των 1.000 μέτρων.

7. Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας τα προηγούμενα θα μπορούσε κανείς να κάνει τις ακόλουθες παρατηρήσεις:

- i. Τα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων διαφέρουν σαφώς στις δύο λεκάνες. Στο μεν Θριάσιο δεν υπερβαίνουν τα 300 m (285 m) στο δε λεκανοπέδιο των Αθηνών φθάνουν και ίσως υπερβαίνουν τα 1.000 m.
- ii. Και στις δύο λεκάνες παρατηρούνται μικρότερης τάξης βυθίσματα και κέρατα μέσης διεύθυνσης ΔΒΔ-ΑΝΑ και ΒΑ-ΝΔ.
- iii. Οι ρηξιγενείς ζώνες και τα ρήγματα στο μεγαλύτερο βαθμό είναι καλυμμένα από ολοκαινικές και πλειστοκαινικές αποθέσεις κάτι που κάνει πολύ δύσκολη την αναγνώρισή τους στο ύπαιθρο.
- iv. Στις βαρυτικές τομές 6 και 7 και στη σεισμική τομή 3 φαίνεται καθαρά ότι η σημερινή κοίτη του Κηφισού αναπτύσσεται παράλληλα σε μία μεγάλη ρηξιγενή δομή.

8. Αποτίμηση του ερευνητικού έργου - Παραδοτέα προϊόντα

Το ερευνητικό πρόγραμμα στόχο είχε τη διερεύνηση της βαθιάς δομής στις λεκάνες του Θριάσιου πεδίου και του δυτικού και βόρειου τμήματος του λεκανοπεδίου των Αθηνών. Ο στόχος αυτός επετεύχθη αλλά με ορισμένες τροποποιήσεις του αρχικού σχεδιασμού, που προέκυψαν κατά την πορεία υλοποίησης του προγράμματος. Όλες οι τροποποιήσεις που προτάθηκαν κατά το πρώτο στάδιο από την ερευνητική ομάδα, έτυχαν της αποδοχής της επιτροπής παρακολούθησης του έργου. Οι κύριες τροποποιήσεις που κρίθηκαν απαραίτητες προκειμένου να υλοποιηθεί το πρόγραμμα απρόσκοπτα και να ληφθούν πλέον χρήσιμα και αξιοποιήσιμα στοιχεία, ήταν οι εξής:

- Το μήκος των σεισμικών γραμμών περιορίστηκε από 30-40 km σε 10 km και μειώθηκε το βάθος έρευνας. Η μείωση του μήκους των σεισμικών γραμμών υιοθετήθηκε, ως συνέπεια της λεπτομερούς γεωλογικής θεώρησης της περιοχής έρευνας και της διαπίστωσης ότι το πάχος των μεταλλικών σχηματισμών στην περιοχή ανατολικά της Πάρνηθας (Θρακομακεδόνες, Τατόι) είναι αφενός πολύ μεγάλο και οι φυσικές ιδιότητες των αλπικών (πυκνότητα, σεισμική ταχύτητα, κ.α.) δεν διαφέρουν κατά πολύ, ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση μεταπτώσεων σε βάθος, με τη εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων. Έτσι, το πρόβλημα ουσιαστικά μετατοπίστηκε στο να προσδιορισθεί το όριο του αλπικού υποβάθρου με τις μεταλλικές αποθέσεις.
- Εκτελέστηκαν τρεις (3) σεισμικές γραμμές, ενώ ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε δύο. Κρίθηκε απαραίτητη η εκτέλεση της σεισμικής γραμμής 2, η οποία έχει προσανατολισμό Α-Δ και τέμνει τη σεισμική γραμμή 1. Η εκτέλεση της σεισμικής γραμμής 2 προέκυψε από την αναγκαιότητα, α) ελέγχου ρηξιγενών ζωνών ή μεταπτώσεων διεύθυνσης Β-Ν στο Θριάσιο πεδίο και β) ελέγχου των αποτελεσμάτων των σεισμικών γραμμών 1 και 2 στο σημείο τομής τους.
- Οι βαρυτικές μετρήσεις αρχικά είχαν σχεδιασθεί να γίνουν παράλληλα προς τις σεισμικές γραμμές. Πράγματι, εκτελέστηκαν οι βαρυτικές τομές 5, 6, και 8 σύμφωνα με τον αρχικό σχεδιασμό και επί πλέον οι βαρυτικές τομές 1, 2, 3, 4 και 7 στις περιοχές του Θριάσιου και κατά μήκος του άξονα Πετρούπολης-Μενιδίου-Θρακομακεδόνων. Ο αρχικός σχεδιασμός προέβλεπε την πύκνωση των σταθμών για την βελτίωση του υπάρχοντος χάρτη βαρυτικών ανωμαλιών (LAGIOS et al., 1994). Κρίθηκε αναγκαία η εκτέλεση βαρυτικών μετρήσεων υπό μορφή τομών για τον καλύτερο προσδιορισμό των ρηξιγενών ζωνών ή μεταπτώσεων, ιδιαίτερα στην περιοχή Πετρούπολης – Θρακομακεδόνων για τον εντοπισμό των ρηξιγενών ζωνών Καματερού, Μενιδίου, Θρακομακεδόνων, κ.α.

Σύμφωνα με τα παραδοτέα προϊόντα που αναφέρονται στη Σύμβαση και λαμβάνοντας υπόψη τις απαραίτητες τροποποιήσεις που πραγματοποιήθηκαν, η παρούσα μελέτη περιλαμβάνει όλα τα προϊόντα που τελικά υλοποιήθηκαν και αναφέρονται παρακάτω:

- Αναλυτική περιγραφή των μεθοδολογιών που ακολουθήθηκαν.
- Λεπτομερές τροποποιημένος βαρυτικός χάρτης της περιοχής έρευνας.
- 1-Δ και 2-Δ δομές κατά μήκος των σεισμικών τομών.
- 2-Δ δομές κατά μήκος των βαρυτικών τομών.
- Συνδυασμένες γεωφυσικές και γεωλογικές τομές.

Συμπερασματικά, από την εξέταση όλων των στοιχείων (αποτελεσμάτων) που παρουσιάζονται στην παρούσα μελέτη, προκύπτει ότι η συμβολή του παρόντος ερευνητικού έργου στο τομέα της Γεωλογίας-Σεισμολογίας ήταν σημαντική και μπορεί να συνοψισθεί στα παρακάτω:

- Το μεγάλο πάχος των μεταλλικών σχηματισμών ΒΑ των Θρακομακεδόνων (περίπου 1.000 μέτρων), που εντοπίστηκε κατά μήκος της σεισμικής τομής 3 και της βαρυτικής τομής 6, είναι ένα σημαντικό στοιχείο για τη κατανόηση της γεωλογικής δομής της περιοχής και ιδιαίτερα της σημασίας της ρηξιγενούς ζώνης του Κηφισού.
- Η περιθωριακή ρηξιγενής ζώνη της λεκάνης του Λεκανοπεδίου Αθηνών με την Πάρνηθα, η διεύθυνση της οποίας είναι ΒΑ-ΝΔ, εντοπίστηκε με σαφήνεια και μάλιστα με μια αύξηση του άλματος από νοτιοδυτικά (150 m) προς τα βορειοανατολικά (600 m) με κατερχόμενο τμήμα το ανατολικό τέμαχος. Η ίδια φορά μεταβολής του άλματος είχε σημειωθεί και από τους MARIOLAKOS & FOUNTOULIS (2000).
- Στην περιοχή Πετρούπολης-Ιλίου-Καματερού φαίνεται η παρουσία ενός ρήγματος με διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ παράλληλο με το περιθωριακό ρήγμα του Αιγάλεω, με κατερχόμενο το δυτικό τέμαχος. Ο χώρος μεταξύ των δύο αυτών ρηγμάτων είναι ένα βύθισμα παράλληλο με τη ρηξιγενή ζώνη του Αιγάλεω. Τα πάχη των μεταλλικών αποθέσεων σε αυτή την περιοχή είναι γύρω στα 200 με 250 μέτρα.
- Στην περιοχή του Θριάσιου πεδίου τα πάχη των μεταλλικών σχηματισμών που εντοπίστηκαν δεν υπερέβησαν τα 300 m (285 m). Τα μεγαλύτερα πάχη απαντούν στην περιοχή Κάμπος που βρίσκεται βόρεια του Ασπροπύργου και μεταξύ των ρεμάτων Γιαννούλα και Ανώνυμου.
- Το περιθωριακό ρήγμα της λεκάνης του Θριάσιου, η διεύθυνση του οποίου είναι ΒΔ-ΝΑ, εντοπίστηκε στις τρεις βαρυτικές τομές (3, 4 και 8) και το άλμα του φαίνεται ότι αυξάνει από τα ανατολικά (120 m) προς τα δυτικά (200 m) και κατεβαίνει το νότιο τέμαχος. Η ίδια φορά μεταβολής του άλματος είχε σημειωθεί και από τους MARIOLAKOS & FOUNTOULIS (2000).
- Μεταξύ των βαρυτικών τομών 3 και 4 και περίπου παράλληλα προς τη κοίτη του ρέματος Γιαννούλα, πρέπει να υπάρχει ρηξιγενής ζώνη που μεταθέτει το αλπικό υπόβαθρο σε χαμηλότερα υψόμετρα στα δυτικά σε σχέση με αυτά της περιοχής που βρίσκεται ανατολικά.
- Εντοπίστηκαν και άλλες ρηξιγενείς ζώνες ή μεταπτώσεις στις περιοχές του Θριάσιου και στον άξονα Πετρούπολης-Θρακομακεδόνων, αλλά χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης προκειμένου να καθορισθούν επακριβώς.

9. Προτάσεις

Στα πλαίσια του συγκεκριμένου ερευνητικού προγράμματος έγινε προσπάθεια να προσδιοριστεί το πάχος των μεταλλικών αποθέσεων και από τη μεταβολή του πάχους να προσδιοριστούν τα καλυμμένα ρήγματα στις λεκάνες του Θριάσιου και των Αθηνών. Αυτό ως ένα βαθμό επιτεύχθηκε κυρίως κοντά στα περιθώρια των λεκανών και στις περιοχές που υπέστησαν τις μεγαλύτερες ζημιές κατά σεισμό της 7ης Σεπτεμβρίου 1999. Ταυτόχρονα όμως έγινε φανερό ότι θα πρέπει να γίνουν τόσο βαρυτικές τομές όσο και σεισμικές διασκοπήσεις προκειμένου να συμπληρωθεί η “εικόνα” και στις δύο λεκάνες που συγκεντρώνεται το σημαντικότερο κομμάτι της οικονομικής δραστηριότητας της χώρας.

Είναι πολύ σημαντικό να ολοκληρωθεί η χαρτογράφηση των καλυμμένων ρηγμάτων του Θριάσιου πεδίου, στο οποίο υπάρχουν δύο πολύ μεγάλα διωλιστήρια (ΕΛΠΕ και ΠΕΤΡΟΛΑ) και τρεις οικιστικές μονάδες (ΕΛΕΥΣΙΝΑ, ΑΣΠΡΟΠΥΡΓΟΣ, ΜΑΝΔΡΑ) με σημαντική συγκέντρωση πληθυσμού.

Όσον αφορά το λεκανοπέδιο είναι περιττό να αναφερθεί η πολύ μεγάλη συγκέντρωση πληθυσμού και οικονομικής δραστηριότητας, κάτι που κάνει επιτακτική την ανάγκη χαρτογράφησης των καλυμμένων ρηγμάτων.

Οι ερευνητικές εργασίες που θα μπορούσαν να γίνουν είναι βαρυτικές τομές σε συγκεκριμένες διευθύνσεις, ώστε να καταστεί δυνατή η αποτύπωση σε χάρτη:

- i. του αναγλύφου του αλπικού υποβάθρου που είναι καλυμμένο με μεταλλικές αποθέσεις,
- ii. των ρηξιγενών ζωνών και των ρηγμάτων που είναι καλυμμένα από τις μεταλλικές αποθέσεις.

Με την εφαρμογή της μεθόδου σεισμικών ανάκλασης θα καταστεί δυνατή η επιβεβαίωση και καλύτερος εντοπισμός των ενταφιασμένων δομών καθώς μπορεί να μας δώσει στοιχεία σε μεγαλύτερο βάθος από ότι τα βαρυτικά. Επιπλέον πιστεύουμε ότι θα δοθεί η δυνατότητα να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ των μεταμορφωμένων και των αμεταμόρφωτων στην περιοχή του λεκανοπέδιου Αθηνών.

Όλα αυτά είναι στοιχεία τα οποία δεν έχουν μόνο θεωρητικό ενδιαφέρον αλλά κυρίως πρακτικό δεδομένου ότι θα μπορέσουν να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για την καλύτερη αντισεισμική θωράκιση του οικιστικού ιστού των Αθηνών.

Πέραν των προαναφερθέντων, και μετά τον καθορισμό των ρηξιτεμαχών, θα πρέπει οργανωθεί γεωδαιτικό δίκτυο (GPS) παρακολούθησης των κινήσεων (οριζόντιων και κατακόρυφων) των ρηξιτεμαχών.

Ταυτόχρονα θα πρέπει να γίνει ο νεοτεκτονικός χάρτης όχι μόνο στις σεισμόπληκτες περιοχές αλλά σε όλη την Αττική και τη Βοιωτία σύμφωνα με τις προδιαγραφές του ΟΑΣΠ διότι στα περιθώρια της Πάρνηθας (βόρεια, νότια και ανατολικά) εκτός των μεγάλων οδικών αξόνων βρίσκονται και τα δίκτυα ύδρευσης και αερίου που τροφοδοτούν την Αττική.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- AMBRASEYS, N.N. & JACKSON, J.A. 1990. Seismicity and associated strain of central Greece between 1890 and 1988. *Geophys. J. Int.* 101, 663-708.
- CARTWRIGHT, D.E. AND EDDEN, A.C., 1973, Corrected tables of tidal harmonics, *Geoph. J.R. astr. Soc.*, 33, 253-264.
- CARTWRIGHT, D.E. AND TAYLER, R.J., 1971, New computations of the tide-generating potential. *Geoph. J.R. astr. Soc.*, 23, 45-74.
- CHAILAS, S., HIPKIN, R.D & LAGIOS, E. 1993. Isostatic studies in the Hellenides , *Proc. 2nd Int. Congress Hellenic Geophys. Un.*, Florina, Greece, May 5-7, 2, 492-504.
- CHAPMAN, C.H. & DRUMMOND, R. 1982. Body-wave seismograms in inhomogeneous media using Maslov asymptotic ray theory. *Bull. Seis. Soc. Am.* 72, 5277-5317.
- ΓΚΟΥΜΑΣ, Γ., 2003, Βαρυτομετρική διασκόπηση στην κεντροδυτική Αττική, Διπλ. Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Αθηνών, σ. 95.
- CLOWES, R.M., ZELT, C.A., AMOR, J.R., ELLIS, R.M., 1995, Lithospheric structure in the southern Canadian Cordillera from a network of seismic refraction lines. *Can. J. Earth Sci.* 32, 1485–1513.
- DAVIES, R., ENGLAND, P., PARSONS, B., BILLIRIS, H., PARADISSIS, D. & VEIS, G. 1997. Geodetic strain of Greece in the interval 1892-1992. *J. Geophys. Res.* 102, 24571-24588.
- DE PIAN, 1950. *Peristeri Έκθεση* 12 σ. Βιβλιοθήκη ΙΓΜΕ.
- FREYBERG, B. V., 1951, Das Neogen – Gebiet nordwestlich Athen. *Annal Geol. Pays Hellen.* III, s. 65-86.
- HAMMER, S., 1939, Terrain corrections for gravimeter stations, *Geophysics*, 4, 184-194.
- HEALY, J.H. & PEAKE, L.G. 1975. Seismic velocity structure along a section of the San Andreas Fault near Bear Valley, California, *Bulletin of Seismological Society of America*, v. 65, pp. 1177-1197.
- HIPKIN, R. G., LAGIOS, E., LYNESS, D. & JONES, P., 1988, Reference gravity stations on the IGSN'71 standard in Britain and Greece. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, 92, 143-148.
- IBRAHIM, A.K., LATHAM, G. & LADD, J. 1986. Seismic refraction and reflection measurements in the Middle America Trench offshore Guatemala, *Journal of Geophysical Research*, v. 84, pp. 5643-5649.
- JACKSON, J.A. & MCKENZIE, D.P. 1988. The relationship between plate motions and seismic tensors, and the rate of active deformation in the Mediterranean and the Middle East. *Geophys. J.* 93, 45-73.
- JACKSON, J.A., KING, G. & VITA-FINZI, C. 1982. The neotectonics of the Aegean: an alternative view. *Earth & Planet. Sci. Let.* 61, 303-318.
- ΚΑΤΣΙΚΑΤΣΟΣ, Γ., ΜΕΤΤΟΣ, Α., ΒΙΔΑΚΗΣ, Μ. & ΔΟΥΝΑΣ, Α. 1986. Γεωλογικός Χάρτης της Ελλάδας, κλίμακα 1/50.000, Φύλλο «Αθήναι – Ελευσίς». Έκδοση ΙΓΜΕ.

- KELLER, B., PROTHERO, W.A., TREHU, A.M. & STIERMAN, D.J. 1983. Ray trace model of the Santa Barbara Channel, California, land-sea seismic refraction experiment, *Geophysical Research Letters*, v.10, pp. 933-936.
- KUTRUBES D., ZHANG J. AND HAGER J., 1996, Conventional Processing Techniques and Nonlinear Refraction Traveltime Tomography for Imaging Bedrock at an Eastern Massachusetts Coastal Site, *Proc. SAGEEP 1996*, *Env. Eng. Geophys. Soc.*, 130-135.
- LAGIOS, E., 1979, Gravity and other geophysical studies relating to the crustal structure of S.E. Scotland. Ph.D. thesis, Edinburgh University, U.K.
- LAGIOS, E., CHAILAS, S., HIPKIN R.G., 1996, Newly Compiled Gravity and Topographic Data Banks of Greece. *Geoph. J. Intern.* 126, 287-290.
- LAGIOS, E., CHAILAS, S., HIPKIN, R. G. & DRAKOPOULOS, J., 1994, Gravity and Topographic Data Banks of Greece, University of Athens, Department of Geophysics & Geothermy, Publ. No 4/94, 50 p.
- LAGIOS, E., HIPKIN, R.G., ANGELOPOULOS, A. & NIKOLAOU, S. 1995. The gravity anomaly map of Greece-a recompilation, IGME, Athens, Greece, in press.
- LEPSIUS, R., 1893, *Geologie von Attica*. Berlin.
- MAKRIS, J. & STAVROU, A., 1984, *Compilation of Gravity Maps of Greece*. Internal Report Hamburg University, Institute of Geophysics, Hamburg, 12 p.
- ΜΑΡΙΟΛΑΚΟΣ, Η., ΛΟΥΗΣ, Ι. & ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Τ. 1987. Γεωμορφολογία του Αλπικού υποβάθρου της νεοτεκτονικής λεκάνης της Άνω Μεσσηνίας & η μορφοτεκτονική της ερμηνεία. Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου. τ. Β, 53-67.
- MARIOLAKOS, I. & FOUNTOULIS, I., 2000, The Athens earthquake September 7, 1999: The Neotectonic regime of the affected area. - *Ann. Geol. Pays Hellen.*, 38, fasc. B, pp.165-174.
- MARIOLAKOS, I. & FOUNTOULIS, I. 2000. The Athens earthquake September 7, 1999: the neotectonic regime of the affected area *Ann. Geol. D. Pays Hellen.* 38, fasc B, 165-174, ISSN: 1105-0004.
- MARIOLAKOS, I. & FOUNTOULIS, I. 2002, The Athens earthquake September 7th, 1999 Neotectonic regime and geodynamic phenomena. In *Kluwer Academic Publishers, NATO Science Series, Earth and Environment Sciences, Integration of Earth Sciences Research on the 1999 Turkish and Greek Earthquakes*, (Eds. Gorur et al.), IV/9, p.113-126.
- MARIOLAKOS, I. 1971. Tectonic analysis of the joints occurring at the North Imittos. *Ann. Geol. Pays Hellen.*, 23, 323-379.
- MARIOLAKOS, I., FOUNTOULIS, I., MARIOLAKOS, D., ANDREADAKIS, M. & GEORGAKOPOULOS, A., 2000, Geodynamic phenomena observed during the Athens earthquake (Ms=5.9) 7-9-99. *Ann. Geol. Pays Hellen.*, 38, fasc. B, pp.175-186.
- MATARESE, J. R., 1993, Nonlinear travelttime tomography, Ph.D. thesis, Mass.Inst.Tech.

- MOONEY, W.D. & COLBURN, R.H. 1985. A seismic refraction profile across the San Andreas, Sargent, and Calaveras faults, west-central California, Bulletin Seismological Society of America, v. 75, pp. 175-191.
- MORELLI, C., GANTAR, C., HONKASALO, T., MCCONNELL, R. K., TANNER, J. G., SZABO, B., VOTILA, U. & WHALEN, C. T., 1974, The International Gravity Standardization Net 1971 (IGSN'71), Spec. Publ. No4, International Association of Geodesy, Paris.
- O'LEARY, D.M., ELLIS, R.M., STEPHENSON, R.A., LANE, L.S., ZELT, C.A., 1995, Crustal structure of the northern Yukon and MacKenzie Delta. J. Geophys. Res. 100, 9905–9920.
- PAPADIMITRIOU, P. et al. 2000. The September 7, 1999 Athens earthquake sequence recorded by the Cornet Network. Submitted to Annales Geologiques des Pays Hellenes.
- ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΣ, Τ. 1985. Γεωφυσικές Έρευνες στην Περιοχή της Λεκάνης Μεγαλόπολης. Διδακτορική διατριβή, Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας σ. 205, Αθήνα.
- PAPANIKOLAOU, D., MARIOLAKOS, I., LEKKAS, E. & LOZIOS, S. 1988. Morphotectonic observations of the Asopos basin and the coastal zone of Oropos. Contribution to the neotectonics of Northern Attica. Bull. Geol. Soc. Greece, XX/1, 251-267 (in greek).
- SKI Pro, 1999, Static Kinematic Software, LEICA AG, CH-9435 Heerbrugg, Switzerland.
- TOMAPA, B., 2002, Επεξεργασία των δεδομένων της σεισμικής ακολουθίας της 7ης Σεπτεμβρίου 1999 στην Αθήνα με τη χρήση Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών, Διπλ. Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/μιο Αθηνών, σ. 135.
- TIKHONOV A.N. AND ARSENIN V.Y., 1997, Solutions of ill-posed problems, W.H. Winston and Sons.
- VOULGARIS, N. et al. 2000. Preliminary results of the Athens September 7, 1999 aftershock sequence. Submitted to Annales Geologiques des Pays Hellenes.
- ZELT, C.A. & SMITH, R.B. 1992. Seismic travel-time inversion for 2-D crustal velocity structure. Geophys. J. Int., 108, 16-34.
- ZELT, C.A., ELLIS, R.M., 1989, Seismic structure of the crust and upper mantle in the Peace River Arch region. Can. J. Geophys. Res. 94, 5729–5744.
- ZELT, C.A., WHITE, D.J., 1995, Crustal structure and tectonics of the southeastern Canadian Cordillera. J. Geophys. Res. 100, 24255–24273.
- ZHANG J., TOKSOZ M.N., 1998, Nonlinear refraction travelttime tomography, Geophysics, vol.63, No 5, p.1726-1737.