



**ΕΛΛΗΝΙΚΗ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ
ΕΤΑΙΡΕΙΑ**

**ΠΡΑΚΤΙΚΑ
5ου
ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ
ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΟΥ
ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ**

ΑΘΗΝΑ

11, 12, 13 ΝΟΕΜΒΡΙΟΥ 1999

**ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΕΩΝ.
ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΟΥΣ ΣΕΙΣΜΟΥΣ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ ΚΑΙ ΤΟΥ ΚΟΜΠΕ**

Ε. Λέκκας¹, Ε. Βασιλάκης²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι ρευστοποιήσεις εδαφών αποτελούν ένα καταστροφικό φαινόμενο που εκδηλώνεται κατά τη διάρκεια σεισμικών κινήσεων. Ο εντοπισμός περιοχών στις οποίες υφίσταται η πιθανότητα να προκληθούν φαινόμενα ρευστοποιήσεων είναι μια σύνθετη έρευνα με μεγάλο κόστος. Στην επίλυση του προβλήματος μπορεί να συμβάλλει η ανάλυση δορυφορικών εικόνων σε ορισμένες φασματικές περιοχές και ειδικότερα στην περιοχή μεταξύ 2.08-2.35 μικρόμετρα, που αντιστοιχούν στο κανάλι 7 του μέσου υπέρυθρου του δορυφορικού συστήματος LANDSAT-TM. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε στην περιοχή Nankai με την επεξεργασία εικόνων που ελήφθησαν πριν από τον καταστροφικό σεισμό του Kobe (M=7.2R). Από την ανάλυση διαπιστώνεται ότι οι περιοχές στις οποίες εμφανίστηκαν ρευστοποιήσεις συνέπιπταν με τις λευκές περιοχές της δυαδικής εικόνας που δημιουργήθηκε με τιμή threshold 27. Πρόσθετα, από την ανάλυση των εικόνων της περιοχής της Ηλείας που ελήφθησαν πριν από το σεισμό στον Πύργο (M=5.5R) διαπιστώνεται ότι οι περιοχές στις οποίες παρατηρήθηκαν ρευστοποιήσεις αντιστοιχούν στις λευκές περιοχές της δυαδικής εικόνας που δημιουργήθηκε με τιμή threshold 35. Η διαφορά αποδίδεται κυρίως στο γεγονός ότι στη μεν περίπτωση του Kobe η περιοχή ήταν αστικοποιημένη ενώ στη περίπτωση του Πύργου επρόκειτο για περιοχή ως επί το πλείστον χέρσο. Τέλος, διαπιστώνεται ότι η ανάλυση δορυφορικών εικόνων είναι δυνατό να συμβάλλει στον εντοπισμό περιοχών που πρόκειται να αντιμετωπίσουν προβλήματα ρευστοποιήσεων μετά από κάποιο σεισμό, γρήγορα και με χαμηλό κόστος, ενώ αναμένεται θεαματική πρόοδος στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου με την αύξηση της χωρικής διακριτικής ικανότητας των εικόνων.

ABSTRACT

The soil liquefaction constitutes a disastrous phenomenon, which appears during seismic movements. Tracing areas, in which there is high possibility of liquefaction phenomena to be brought about, is a complex study with great expenses. The interpretation of satellite images of certain spectral wavelength and especially the band 7 of the middle infrared of LANDSAT-TM, could be a solution to the problem. This technique was applied at Nankai area by interpreting images received before the catastrophic earthquake at Kobe, Japan (M=7.2R). After the satellite image processing, it was clear that the liquefied areas coincided with the white areas of the binary image created with threshold 27. In addition, after the processing of images received before the Pyrgos earthquake (M=5.5R), it was derived that the liquefied areas corresponded to the white areas of the binary image created with threshold 35. The difference between the two threshold values appears, due to the fact that in Kobe case the area was urbanized; though in Pyrgos case the area was mostly cultivated. In conclusion, it is derived that remote sensing can contribute to tracing areas that face liquefaction problems fast, with low cost, while at the same time, great progress is expected in the effectiveness of the method due to the increase of the spatial resolution of the satellite images.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είναι γνωστό, οι ρευστοποιήσεις εδαφών αποτελούν ένα καταστροφικό φαινόμενο που εκδηλώνεται κυρίως σε εδαφικούς σχηματισμούς κατά τη διάρκεια σεισμικών κινήσεων. Κατά τη ρευστοποίηση τα εδαφικά υλικά χάνουν τη διατμητική τους αντοχή και αποκτούν συμπεριφορά βαρέως υγρού, γεγονός το οποίο έχει ως συνέπεια την πρόκληση σημαντικότερων βλαβών στα κάθε είδους υπερκείμενα τεχνικά έργα. Συνήθεις εκδηλώσεις ρευστοποιήσεων στην επιφάνεια του εδάφους είναι η έκχυση ρευστοποιημένων υλικών, η παρουσία κρατήρων έκχυσης, οι εδαφικές διαρρήξεις, οι καθιζήσεις, οι κατολισθήσεις και η δημιουργία ανώμαλων κυματισμών στην ελεύθερη επιφάνεια. Ο εντοπισμός περιοχών στις οποίες υφίσταται η πιθανότητα να προκληθούν φαινόμενα

^{1,2} Τομέας Δυν., Τεκτ. & Εφ. Γεωλογίας, Τμήμα Γεωλογίας, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Παν/πολη Ζωγράφου

ρευστοποιήσεων είναι συχνά μια εξαιρετικά σύνθετη έρευνα, η οποία περιλαμβάνει αξιολόγηση γεωμορφολογικών, γεωλογικών, γεωτεχνικών και υδρογεωλογικών δεδομένων ενώ απαιτεί μεγάλη δαπάνη εξαιτίας των πολλών υπαίθριων εργασιών και εξειδικευμένων εργαστηριακών αναλύσεων που πρέπει να εκτελεστούν.

Στην επίλυση του προβλήματος αυτού φαίνεται να μπορεί να συμβάλλει αποφασιστικά η ανάλυση δορυφορικών εικόνων δεδομένου ότι υπάρχει η δυνατότητα διερεύνησης της φύσης των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών σε ορισμένες φασματικές περιοχές και ειδικότερα στο κανάλι 7 του μέσου υπέρυθρου της LANDSAT-TM.

Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε σε δύο περιοχές οι οποίες επλήγησαν από μεγάλους σεισμούς, κατά τους οποίους εκδηλώθηκαν εντυπωσιακά φαινόμενα ρευστοποιήσεων. Συγκεκριμένα η τεχνική εφαρμόστηκε στην περιοχή Nankai (Κεντρική Ιαπωνία) η οποία επλήγη από τον καταστροφικό σεισμό μεγέθους 7.2R στις 17 Ιανουαρίου 1995 και στην περιοχή της Ηλείας (Δυτική Πελοπόννησος) η οποία επλήγη από σεισμό μεγέθους 5.4R στις 26 Μαρτίου 1993.

Στη συνέχεια αφού παρουσιαστούν ορισμένα στοιχεία για τη χρήση των δεδομένων τηλεπισκόπησης και την εκτίμηση αυτών, θα αναφερθούν τα βασικά στοιχεία που προέκυψαν από την επεξεργασία και ανάλυση των ψηφιακών δορυφορικών εικόνων και τη σύγκρισή τους με τα στοιχεία από την υπαίθρια έρευνα στις δύο προαναφερθείσες περιοχές.

ΧΡΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Τα δεδομένα της τηλεπισκόπησης που χρησιμοποιήθηκαν για την συγκεκριμένη εργασία είναι οι ψηφιακές δορυφορικές εικόνες LANDSAT-5 TM που απεικονίζουν τις περιοχές που μελετήθηκαν. Η χωρική διακριτική ικανότητα του θεματικού χαρτογράφου είναι 30μ., έχει δηλαδή αρκετά μεγάλη ακρίβεια για χρήση σε τεχνικές εφαρμογές και έργα, αν και σε κάθε περίπτωση η τεχνική που περιγράφεται στη συνέχεια είναι ανεξάρτητη από την χωρική ανάλυση του αισθητήρα. Συνεπώς, η χρήση αυτών των δεδομένων στην γεωλογία και στα τεχνικά έργα, μπορεί να αποδειχθεί πολύ αξιόλογη και αξιόπιστη (Research Committee on Using Remote Sensing to Soil Engineering 1993).

Από τα 7 κανάλια διαφορετικού μήκους κύματος, που κυμαίνονται από το ορατό μέχρι το θερμικό υπέρυθρο φάσμα, προτιμήθηκε το κανάλι 7 του οποίου το μήκος κύματος είναι μεταξύ 2.08 και 2.35 μικρόμετρα. Το κανάλι 7 θεωρείται σημαντικό για την διάκριση των επιφανειακών γεωλογικών σχηματισμών, ενώ έχει αποδειχθεί ότι είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό στην αναγνώριση ζωνών που έχουν προκύψει από υδροθερμική εξαλλοίωση πετρωμάτων (Jensen 1996). Επίσης, υψηλή ανάκλαση στην φασματική περιοχή που καλύπτει το κανάλι 7 δείχνουν περιοχές με χαλαρά λεπτομερή ιζήματα όπως ιλύς και άμμοι (Vincent 1997). Το φαινόμενο της ρευστοποίησης είναι άμεσα σχετιζόμενο με το είδος του επιφανειακού σχηματισμού αλλά και την περιεκτικότητά του σε νερό (αφού η παρουσία του μειώνει τη διατμητική αντοχή του σχηματισμού), είτε λόγω ύπαρξης φρεάτιου υδροφόρου ορίζοντα ή λόγω ύπαρξης θαλασσινού νερού σε παράκτιο υδροπερατό επιφανειακό σχηματισμό. Οι σχηματισμοί στρώς οποίους συνήθως εκδηλώνονται ρευστοποιήσεις μετά από σεισμικές διεγέρσεις είναι τα χαλαρά λεπτομερή ιζήματα όπως ιλύς και άμμοι. Έτσι η πληροφόρηση για την επιφάνεια της γης που λαμβάνεται στην συγκεκριμένη φασματική περιοχή του καναλιού 7 περιλαμβάνει τα στοιχεία εκείνα που συνεκτιμούνται για τον χαρακτηρισμό μιας περιοχής επικίνδυνης για ρευστοποίηση.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΓΙΑ ΔΙΑΠΙΣΤΩΣΗ ΤΑΣΗΣ ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Μέχρι τώρα η έρευνα για την διερεύνηση της πιθανότητας ρευστοποιήσεων σε περιοχές, βασιζόταν κυρίως στην χρησιμοποίηση ιστορικών στοιχείων, γεωλογικών δεδομένων, γεωτεχνικών δοκιμών υπαίθρου και εργαστηρίου, γεωμορφολογικών στοιχείων, κ.λ.π. Όμως στις πιο πολλές περιπτώσεις τέτοια πληροφόρηση είναι ανεπαρκής και συχνά ανακριβής, ενώ απαιτείται σε κάθε περίπτωση η διάθεση σημαντικού κόστους. Με τη χρήση της τηλεπισκόπησης, προσφέρεται η δυνατότητα να απεικονισθούν τα επιφανειακά δεδομένα και μάλιστα σε σχετικά μεγάλη έκταση. Παραδείγματα μιας τέτοιας χρήσης, είναι η ανάλυση δεδομένων τηλεπισκόπησης σε περιοχές ρευστοποίησης στην Ιαπωνία και κυρίως μετά τον σεισμό του Nihonkai - Syubu το 1983 (Shima 1985, Goto et al 1986).

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην ανάλυση των δορυφορικών εικόνων στις περιοχές όπου παρατηρήθηκαν ρευστοποιήσεις. Η ανάλυση άρχισε με την επιλογή της

εικόνας που περιέχει την προς μελέτη περιοχή. Οι εικόνες πρέπει να πληρούν κατά το δυνατόν τις εξής προϋποθέσεις:

- Να υπάρχει όσο το δυνατόν λιγότερη νέφωση
- Να υπάρχουν διαθέσιμες εικόνες πριν και εάν είναι δυνατό μετά τον σεισμό (για συγκρίσεις)
- Η λήψη να έχει γίνει σε εποχή με αραιή βλάστηση και ελάχιστο επιφανειακό νερό από βροχοπτώσεις

Η ανάλυση των εικόνων γίνεται καταρχήν σε εικόνες του καναλιού 7, στο μέσο υπέρυθρο. Μία αρχική τιμή μεταξύ 0 και 256 καθορίζεται (threshold) για την δημιουργία μιας δυαδικής εικόνας, η οποία αποτελεί και την πρώτη επεξεργασμένη εικόνα. Γίνεται, δηλαδή, μια επέμβαση στο ιστόγραμμα τιμών της ψηφιακής εικόνας όπου παράγεται μια ασπρόμαυρη εικόνα, αφού τα pixels που έχουν 256 αποχρώσεις του γκρι χωρίζονται και παίρνουν τις τιμές 0 (μαύρο) και 255 (άσπρο). Έτσι οι περιοχές με την υψηλότερη ανάκλαση γίνονται άσπρες και οι περιοχές με ενδιάμεση ανάκλαση και μεγάλη απορρόφηση γίνονται μαύρες. Στη συνέχεια αλλάζουμε την αρχική τιμή μέχρι που η εικόνα που παράγεται να ταυτίζεται πολύ με τον χάρτη κατανομής των ρευστοποιήσεων που παρατηρήθηκαν κατά την διάρκεια ενός σεισμού σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Γίνεται έτσι κατανοητό ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο, διαπιστώνεται εκ των υστέρων ότι υπάρχει η ταύτιση των λευκών περιοχών με τις ρευστοποιημένες περιοχές.

Υπάρχουν και κάποιες διαφορές σε κάποιες περιοχές που πρέπει να μελετηθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και κυρίως με απευθείας παρατηρήσεις στην ύπαιθρο καθώς επίσης και με εξειδικευμένες έρευνες. Σε ορισμένες περιπτώσεις εάν το κανάλι 6, το οποίο δείχνει τις επιφανειακές διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, ενσωματωθεί στην επεξεργασία, το παραγόμενο αποτέλεσμα είναι καλύτερο από ότι αν χρησιμοποιείτο μόνο το κανάλι 7.

Η χρήση των δεδομένων τηλεπισκόπησης για επιφανειακή πληροφόρηση στις αστικές περιοχές περιορίζεται και κυρίως αφορά τις επί μέρους θέσεις όπου εμφανίζεται το έδαφος. Δεδομένου ότι και οι κατοικημένες περιοχές έχουν αρκετά ακάλυπτα τμήματα, μπορεί να ληφθεί σημαντική πληροφόρηση. Επίσης, η κατάσταση του εδάφους μπορεί να αναγνωρισθεί έμμεσα ακόμα και όταν ένα μικρού πάχους πεζοδρόμιο καλύπτει το έδαφος αφού λόγω του μεγάλου μήκους κύματος του καναλιού 7 υπάρχει κάποια διεισδυτικότητα. Η εδαφική πληροφόρηση που λαμβάνεται δεν αφορά το βάθος της ρευστοποίησης. Η αξιοπιστία αυτής της μεθόδου επαληθεύθηκε από υπαίθριες έρευνες και συλλογή στοιχείων στις περιοχές που εμφανίσθηκαν φαινόμενα ρευστοποιήσεων.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΚΟΒΕ-CITY

Καταστροφές από ρευστοποιήσεις προκλήθηκαν σε μεγάλη έκταση στο Kobe μετά το σεισμό του 1995 (M=7.2R, 17 Ιανουαρίου). Η ανάλυση της εικόνας LANDSAT-5 TM, έγινε, δίνοντας μεγάλη σημασία στην περιοχή του μέσου υπέρυθρου φάσματος. Η εικόνα που καλύπτει την περιοχή του Kobe, πάρθηκε στις 24 Ιανουαρίου, πριν τον σεισμό και δείχνει τη φασματική απορρόφηση και ανάκλαση στη περιοχή του καναλιού 7 (εικ.1). Η αστική περιοχή έχει ανοιχτές αποχρώσεις, τα βουνά και οι δρόμοι μέσες, ενώ το ποτάμι και η θάλασσα φαίνονται μαύρα. Η εικόνα αυτή μετατράπηκε σε δυαδική με τιμή threshold 27 και έτσι φαίνονται οι περιοχές με υψηλή τιμή ανάκλασης (εικ.2). Οι περιοχές αυτές που αντιστοιχούν στις λευκές περιοχές, είναι οι Port-Island, Rokko-Island και τμήματα της παράκτιας ζώνης. Αυτές οι περιοχές σχετίζονται άμεσα με τις περιοχές που ρευστοποιήθηκαν και απεικονίσθηκαν σε χάρτη ρευστοποιήσεων που κατασκευάστηκε από αεροφωτογραφίες και από υπαίθριες παρατηρήσεις (εικ.3 & 4), (Lekkas et al 1996a, Lekkas et al 1996b).

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΟΥ ΠΥΡΓΟΥ

Ρευστοποιήσεις εδάφους παρατηρήθηκαν και στις παραλιακές περιοχές της Ηλείας μετά τον σεισμό 5.5R του Μαρτίου του 1993. Στην εικόνα 5 φαίνεται το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας της περιοχής. Εφαρμόζοντας την προηγούμενη μέθοδο, δηλαδή μετατρέποντας το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT που πάρθηκε πριν τον σεισμό, σε δυαδική μορφή και δίνοντας τιμή threshold 35, παρήχθη η εικόνα 6 η οποία με αύξηση της αντίθεσης γίνεται πιο ευδιάκριτη. Οι περιοχές που έχουν υψηλό βαθμό κινδύνου για ρευστοποίηση μετά από κάποιο σεισμό φαίνονται με άσπρο σε αντίθεση με την υπόλοιπη περιοχή που φαίνεται μαύρη.

Οι περιοχές που ρευστοποιήθηκαν μετά τον σεισμό του Μαρτίου το 1993 στον Πύργο ανήκουν στις

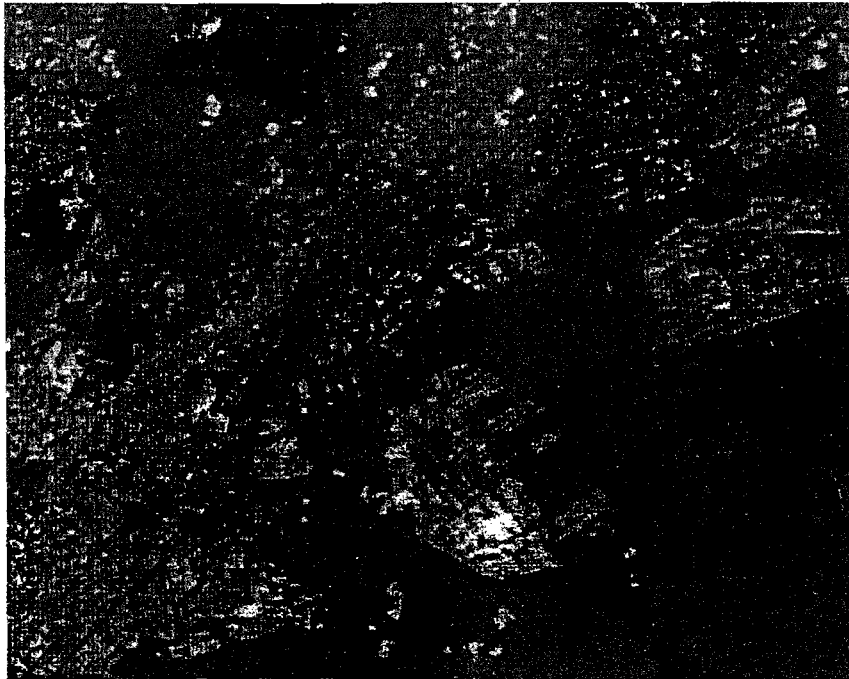
περιοχές που αναδείχθηκαν με την τεχνική που αναλύθηκε πιο πάνω, αφού παρατηρήθηκαν ρευστοποιήσεις (εικ.7) στις περιοχές Σπιάντζα και Μπούκα (παράκτια περιοχή Πύργου – Κατακόλων) οι οποίες είχαν χαρτογραφηθεί με μεγάλη λεπτομέρεια (Lekkas, 1994). Στις περιοχές αυτές που είναι χέρσες και καλλιεργούνται, εμφανίζονται παράκτιες αποθέσεις, ποτάμιοι σχηματισμοί και αλλοίβια (Λέκκας κ.ά., 1992). Μάλιστα αν η ένταση του σεισμού ήταν μεγαλύτερη τότε οι περιοχές με ρευστοποιήσεις θα είχαν μεγαλύτερη έκταση και θα κάλυπταν μεγαλύτερο κομμάτι των αναδεικνυόμενων, με την παραπάνω τεχνική, ζωνών.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

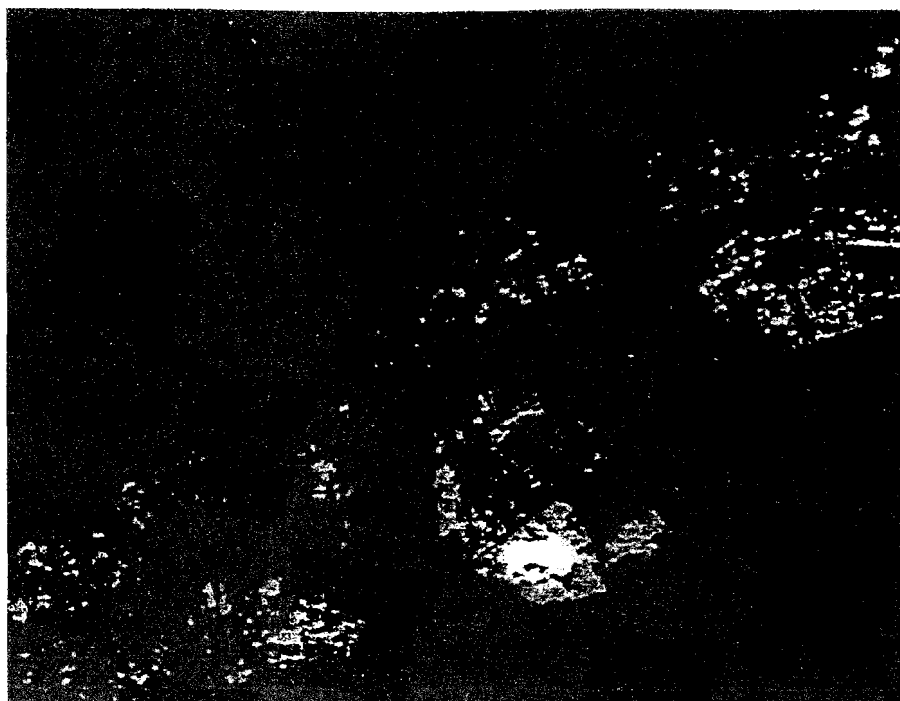
Τα δορυφορικά δεδομένα τηλεπισκόπησης μπορούν να επεξεργαστούν κατάλληλα για την παραγωγή μιας μεγάλης ποικιλίας εικόνων οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ένα σημαντικό αριθμό χρήσεων. Όπως διαπιστώθηκε εάν χρησιμοποιηθεί το κανάλι 7, του Θεματικού Χαρτογράφου (TM) του δορυφορικού συστήματος LANDSAT 5, που αντιστοιχεί στο μέσο υπέρυθρο, είναι δυνατό να αντληθούν πληροφορίες για την τάση των εδαφών να ρευστοποιηθούν κατά την διάρκεια σεισμών.

Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε στην περιοχή Nankai (Κεντρική Ιαπωνία) με την επεξεργασία εικόνων που ελήφθησαν πριν από τον καταστροφικό σεισμό $M=7.2R$ του Κόμπε (17 Ιανουαρίου 1995). Από την ανάλυση διαπιστώνεται ότι οι περιοχές που ρευστοποιήθηκαν συνέπιπταν με τις λευκές περιοχές της δυαδικής εικόνας που δημιουργήθηκε με τιμή threshold 27. Πρόσθετα από την ανάλυση δορυφορικών εικόνων της περιοχής της Ηλείας (Δυτική Πελοπόννησος, Ελλάδα) που ελήφθησαν πριν από το σεισμό $M=5.4R$ της 26 Μαρτίου 1993 στον Πύργο διαπιστώθηκε ότι οι περιοχές που ρευστοποιήθηκαν αντιστοιχούν στις λευκές περιοχές της δυαδικής εικόνας που δημιουργήθηκε με τιμή threshold 35.

Οι διαφορές που εντοπίζονται στις δύο περιπτώσεις σε ότι αφορά στις φασματικές αποκλίσεις αποδίδονται κυρίως στο γεγονός ότι στη μεν περίπτωση του σεισμού του Κόμπε η περιοχή ήταν αστικοποιημένη και καλυπτόταν κατά θέσεις από κτίρια, χώρους αναψυχής και εν γένει εξωραϊστικά έργα στη δε περίπτωση του σεισμού του Πύργου επρόκειτο για περιοχή επί το πλείστον χέρσο με μικρή κάλυψη από γεωργικές καλλιέργειες. Πρόσθετα οι διαφορές μπορούν να αποδοθούν και στο διαφορετικό μέγεθος της σεισμικής κίνησης στις δύο περιπτώσεις αλλά και στις ιδιαίτερες συνθήκες που είναι δυνατόν να επικρατούν στις δύο τελείως διαφορετικές περιοχές μελέτης.



Εικ. 1. Το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT-5 TM, από την περιοχή του Kobe.



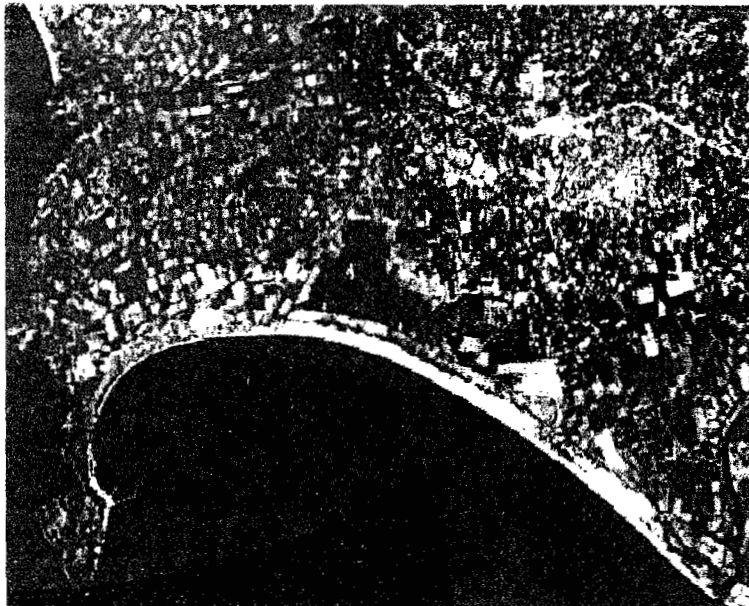
Εικ. 2 Επεξεργασμένη δυαδική εικόνα της περιοχής του Kobe με τιμή threshold 27.



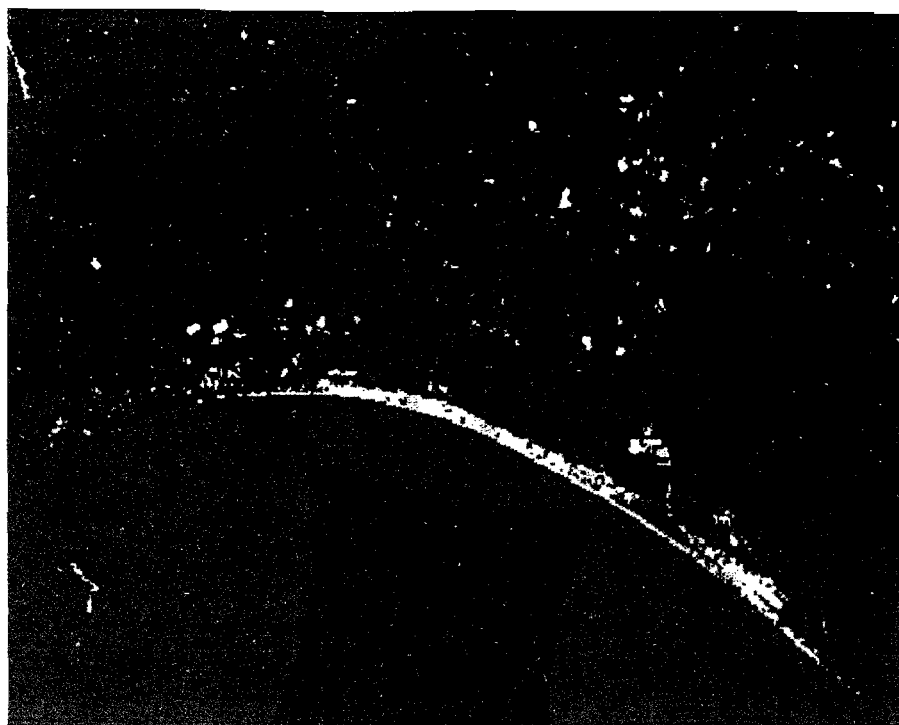
Εικ. 3. Εκτεταμένες ρευστοποιήσεις σε ακάλυπτους χώρους στην πόλη του Kobe. Διακρίνονται εδαφικές διαρρήξεις και τα ρευστοποιημένα υλικά που έχουν εκχυθεί στην επιφάνεια.



Εικ. 4 Άποψη τμήματος των λιμενικών εγκαταστάσεων του Κοβέ που έχει καλυφθεί από ρευστοποιημένα υλικά (ανοικτό χρώμα)



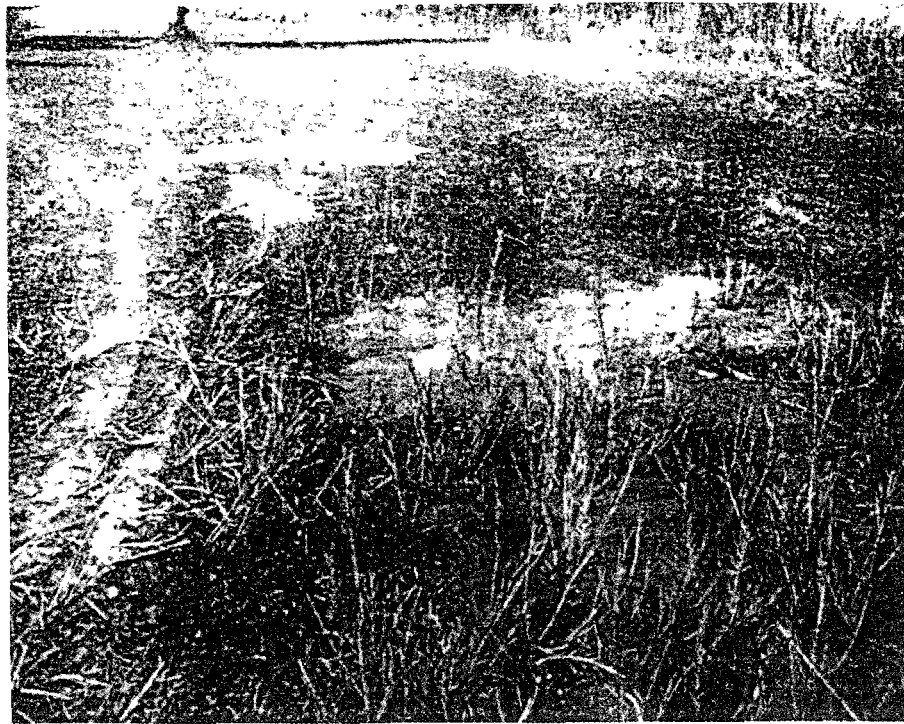
Εικ. 5 Το κανάλι 7 της δορυφορικής εικόνας LANDSAT-5 TM, της περιοχής του Πύργου-Κατάκωλου.



Εικ. 6 Επεξεργασμένη δυαδική εικόνα της περιοχής Πύργου – Κατάκωλου, με τιμή threshold 35.

Οι διαφορές που εντοπίζονται στις δύο περιπτώσεις σε ότι αφορά στις φασματικές αποκλίσεις αποδίδονται κυρίως στο γεγονός ότι στη μεν περίπτωση του σεισμού του Κόμπε περιοχή ήταν αστικοποιημένη και καλυπτόταν κατά θέσεις από κτίρια, χώρους αναψυχής και εν γένει εξωραϊστικά έργα στη δε περίπτωση του σεισμού του Πύργου επρόκειτο για περιοχή επί το πλείστον χέρσο με μικρή κάλυψη από γεωργικές καλλιέργειες. Πρόσθετα οι διαφορές μπορούν να αποδοθούν και στο διαφορετικό μέγεθος της σεισμικής κίνησης στις δύο περιπτώσεις αλλά και στις ιδιαίτερες συνθήκες που είναι δυνατόν να επικρατούν στις δύο τελείως διαφορετικές περιοχές μελέτης.

Συμπερασματικά διαπιστώνεται ότι η ανάλυση δορυφορικών εικόνων μπορεί να συμβάλλει στον εντοπισμό περιοχών που αντιμετωπίζουν προβλήματα ρευστοποιήσεων γρήγορα και με χαμηλό κόστος, ενώ επισημαίνεται ότι η έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο θα πρέπει να ενταθεί κυρίως σε περιπτώσεις εκδήλωσης φαινομένων στα αμέσως επόμενα χρόνια οπότε και η ραγδαία τεχνολογική εξέλιξη, κυρίως με την αύξηση της διακριτικής ικανότητας, θα επιτρέψει τη λήψη και αξιοποίηση ενός πολύ μεγαλύτερου αριθμού πληροφοριών μέσω δορυφορικών συστημάτων. Η μέθοδος που περιγράφηκε θα εφαρμοστεί και σε ανάλογες μελλοντικές περιπτώσεις ώστε από διαπίστωση και «εκ των υστέρων» πρόβλεψη να μετατραπεί σε αντικειμενικό στοιχείο καθορισμού μιας περιοχής επικίνδυνης για ρευστοποίηση.



Εικ. 7. Άποψη εδαφικών σχηματισμών που ρευστοποιήθηκαν κατά τον σεισμό της 26 Μαρτίου 1993 στην θέση Σπιάντζα της παράκτιας περιοχής Πύργου – Κατακόλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- GOTO, K., SAKAMOTO, M., SAWAZONO, Y. & TOHNO, I. (1986). Characteristic of Landsat data of liquefied ground, Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.21, No.2-1, 831-832.
- JENSEN, J. (1996). Introductory digital image processing: a remote sensing perspective – 2nd ed., Prentice-Hall, 318 p.
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε., ΠΑΠΑΝΙΚΟΛΑΟΥ, Δ. & ΦΟΥΝΤΟΥΛΗΣ, Ι. (1992). Εκπόνηση Νεοτεκτονικού χάρτη της Ελλάδας, Φύλλα "ΠΥΡΓΟΣ - ΤΡΟΠΑΙΑ" (κλίμακα 1:100.000). 123σ., Αθήνα.
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε. (1994). Liquefaction, risk zonation and urban development at Western Peloponnesus. Proceedings 7th International Congress International Association of Engineering Geology, publ. A.A. Balkema, 2095-2102, Lisboa.
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε., ΚΡΑΝΙΣ, Η., ΛΕΟΥΝΑΚΙΣ, Μ. & ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ, Π. (1996a). - Liquefaction phenomena caused by the Kobe earthquake (Japan). 6th Spanish Congress and International Conference on Environmental Geology and Land-use Planning. Natural Hazards, Land-Use Planning and Environment. Eds. J. Chacon & C. Irigaray, p. 463-470, Granada.
- ΛΕΚΚΑΣ, Ε., ΚΡΑΝΙΣ, Η., ΛΕΟΥΝΑΚΙΣ, Μ. & ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ, Π. (1996b). - The seismotectonic setting of Kobe area (Japan) - The concomitant geodynamic phenomena of the Hanshin earthquake (January 17, 1995). Advances in Earthquake Engineering, The Kobe Earthquake: Geodynamic Aspects, p.1-16, Computational Mechanics Publications, Southampton.
- RESEARCH COMMITTEE ON USING REMOTE SENSING TO SOIL ENGINEERING (1993). Symposium on Using remote sensing data in ground engineering, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, pp. 226.
- SHIMA, H., (1985). Application of remote sensing technology to ground investigation, Photographic Survey and Remote Sensing, Vol.24, No.2, 15-25.
- VINCENT, R., (1997). Fundamentals of geological and environmental remote sensing. Prentice-Hall, 366 p.

Geology and tectonics of Western Attica in relation to the 7-9-99 earthquake

By: Professor D.I. Papanikolaou

in collaboration with: Dr. E. Lekkas, Dr. Ch. Sideris, Dr. I. Fountoulis, Dr. G. Danamos,
Dr. Ch. Kranis, Dr. L. Lozios and at the contribution of: I. Antoniou, E. Vassilakis, S. Vasilopoulou,
P. Nomikou, I. Papanikolaou, E. Skourtsos and K. Soukis*Department of Dynamic, Tectonic and Applied Geology, University of Athens***1. Introduction**

Immediately after the 5,9 magnitude earthquake of Sept.7 1999 which stroke the NW area of the Athenian basin, a coordinated investigation on the geology and tectonics of the area was set up. The research was focused to a preliminary assessment of the geologic-tectonic-geomorphologic conditions of the area in correlation with the specific characteristics of this earthquake and its effect on the structures. This study was accomplished in collaboration with Professor P. Marinos and co-workers of the Technical University of Athens, according to the instructions of the Minister of Environment, Planning and Public Works.

Past of this work was based on studies and research previously undertaken by members of the scientific team, mainly during the elaboration of the Neotectonic Map of Eastern Attica since 1993.

Since the very beginning of the earthquake event, the scientific team checked several areas of the northwestern part of the Athenian basin from the Aegaleo Mt. up to the southern slopes of Parnitha Mt., through systematic field surveying. The field work was complemented by laboratory data including areal photographs and satellite images at various scales. The presentation of the preliminary conclusions of this research was made on maps at scale 1/25.000, which are given at reduced scale in this report.

2. Geology and Tectonics of Attica

The geological structure of Attica comprises two groups of alpine basement rocks and post-alpine sediments (Fig.1):

- a) The upper group is made mainly of Mesozoic carbonate rocks (limestones and dolomites of Triassic and Jurassic age) overlying a clastic formation of shales and sandstones including olistholites of Permian limestones. Some ophiolitic rocks are locally preserved over the carbonate platform which were tectonically emplaced during the palaeoalpine orogeny of Late Jurassic-Early Cretaceous. Upper Cretaceous shallow water carbonates and early Tertiary flysch cover the previous formations, which belong to the geotectonic unit of Eastern Greece (composed of the Sub-Pelagonian palaeotectonised Unit, the ophiolite nappe of the Axios-Vardar oceanic basin and the Upper Cretaceous transgressive platform). This upper unit extends only to the northwestern part of Attica, forming the major mountain range of Parnitha and other minor mountains like Aegaleo in the western side of the Athenian basin.
- b) The lower group is made mainly of metamorphic rocks, including marbles, micaschists e.t.c cropping out in the area of Penteli mountain to the east and Imittos mountain to the south of the Athenian basin.

The tectonic contact between the two groups of the alpine basement strikes in the NE-SW direction and dips towards the NW. Although this tectonic contact is usually covered by post-alpine sediments its position is marked approximately by Kifisos River which is outfloating in the area of Piraeus.

The post alpine sediments comprise mainly neogene lacustrine lignite bearing deposits and continental quaternary formations.

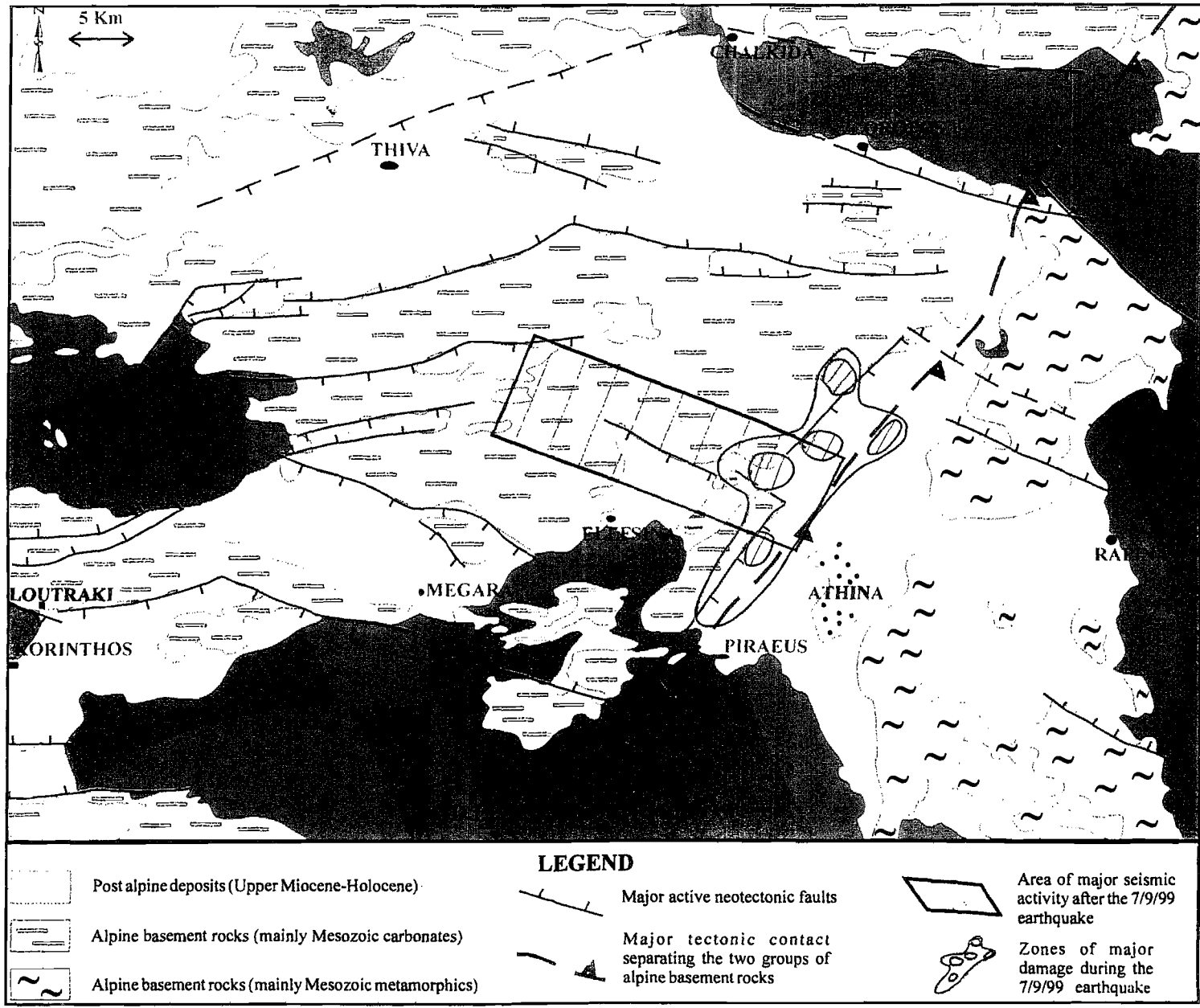


Figure 1

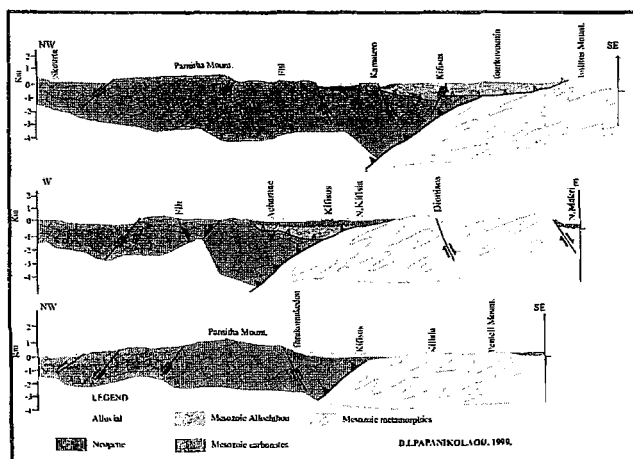


Figure 2

The neotectonic structure of Attica comprises a number of major faults striking in the E-W and NW-SE direction. The simplified map of Fig.1 includes only the most active neotectonic faults whose length is exceeding 7-8 Km with a seismic potential of magnitude >5. The ENE-WSW to E-W neotectonic trend in western Attica between Korinthiakos and Saronikos gulfs is related to large earthquakes of magnitude 6,5 to 7, like those of 1981. On the contrary, the NW-SE neotectonic trend in eastern Attica, extending also along the western coast of the Southern Evoikos gulf is related to smaller earthquakes of M = 6.0 about 6, like the Oropos earthquake in 1938.

The tectonic profiles of Fig.2 show the above alpine and neotectonic structure on both sides of the Athenian basin.

3.The Earthquake of September 7, 1999.

The systematic survey of the area after the earthquake of September 7, 1999 and especially along the neotectonic faults together with the available seismological data from the Geodynamic Institute of the National Observatory lead to several conclusions which can be summarized as following:

1. The seismic rupture of the main shock had a WNW-ESE direction with a dip of about 40 degrees towards SSW. The movement of the fault was normal, with subsidence of the SW block, which is located beneath the Saronikos Bay area. The above general fault geometry of the main shock was confirmed also by the distribution of the epicentres of the aftershocks, which delineate a rectangular frame shown on Fig.1 and Fig.4, below western Parnitha Mt.
2. The seismic fault was generated at a depth of about 15-20 Km, without surface rupture. The only minor seismic rupture was observed in the SW area of Parnitha Mt. to the NW of Phyli within the alpine basement, along several hundreds metres with occurrence of linear significant rock falls in the adjacent areas. It is remarkable that this seismic rupture has a WNW-ESE orientation, similar to that of the seismic fault at depth but an opposite dip towards NNE. All the rest ruptures that have been observed in the wide region did not correspond to seismic ruptures but to local fissures due to unstable soil slopes or cracks opened along previous rock discontinuities.
3. The large neotectonic faults of the wide area were not activated even though precisely in the area of the epicentral zone a neotectonic fault of the same geometry as the seismic fault occurs. This fault runs parallel to the eastern boundary of Thrasio basin and is almost parallel to the seismic fault at depth with approximately 15 Km difference in elevation (Fig.3 and 4).

4.The damage distribution in relation to the geology and tectonics

The damage distribution shows a general NE-SW trend, which is almost perpendicular to the direction of the WNW-ESE seismic zone of the 7.9.99 earthquake (Fig. 1,4 and also map of Marinou and co-workers). This particular trend follows the tectonic boundary between the metamorphic and non metamorphic rocks of the alpine basement of Attica, which runs along and beneath Kifisos River. This tectonic boundary together with the sub-parallel marginal faults of the Athenian basin running along the eastern slopes of Aegaleo and Parnitha Mts. have shaped the zones of major damage.

The neogene marginal faults of the Athenian basin controlled the linear distribution of damage even in areas where they are covered by Quaternary slope breccias as in the area of Thrakomakedones, where young well constructed structures were severely affected by the earthquakes.

In general, the damage zones were mainly shaped passively by the NE-SW tectonic structures cutting through the Athenian basin from the area of Pireas up to the pass between Penteli and Parnitha Mts. and only secondarily by the energetic action of the WNW-ESE seismic fault that was activated at depth. It is remarkable that the seismic zone appears to end towards the ESE along the Kifisos River (Fig.1,4). Thus, it seems that the seismic energy was reflected from the seismic zone along the NE-SW major alpine tectonic contact up to the surface in the area of Lioussia, Menidi and Thrakomakedones.

The role of the geological basement as foundation soil is important but not determinative, since in soils of similar quality we observe extreme differentiations of the degree of damage over constructions of similar quality. Nevertheless, it seems that only slight damage is observed in constructions built on alpine basement rocks. Significant differentiation of damage is observed also in areas with important changes in morphological slope.

The general conclusion is that the damage distribution is a combination of several factors, besides the foundation soil, including the older tectonic structures and the geomorphological discontinuities.

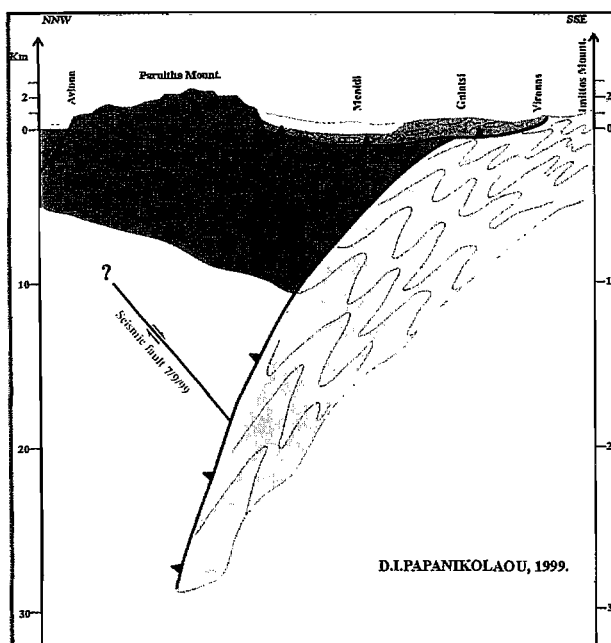


Figure 3

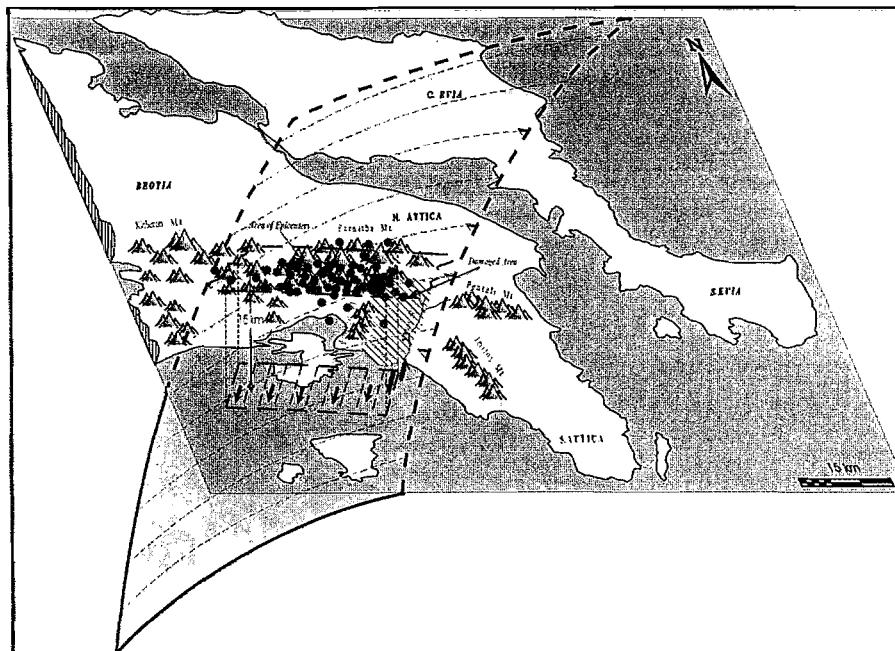


Figure 4

References

Lepsius, R. 1893. Geologie von Attica. Berlin.
 Papanikolaou D. 1986. Geology of Greece (in Greek). 240p.
 Papanikolaou, D., Mariolagos, 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.
 Papanikolaou, D. & Lozios, S. 1990. Comparative neotectonic structure of high (Korinthia-Beotia) and low rate (Attica-Cyclades) activity. Bull. Geol. Soc. Greece, XXVI, 47-65.

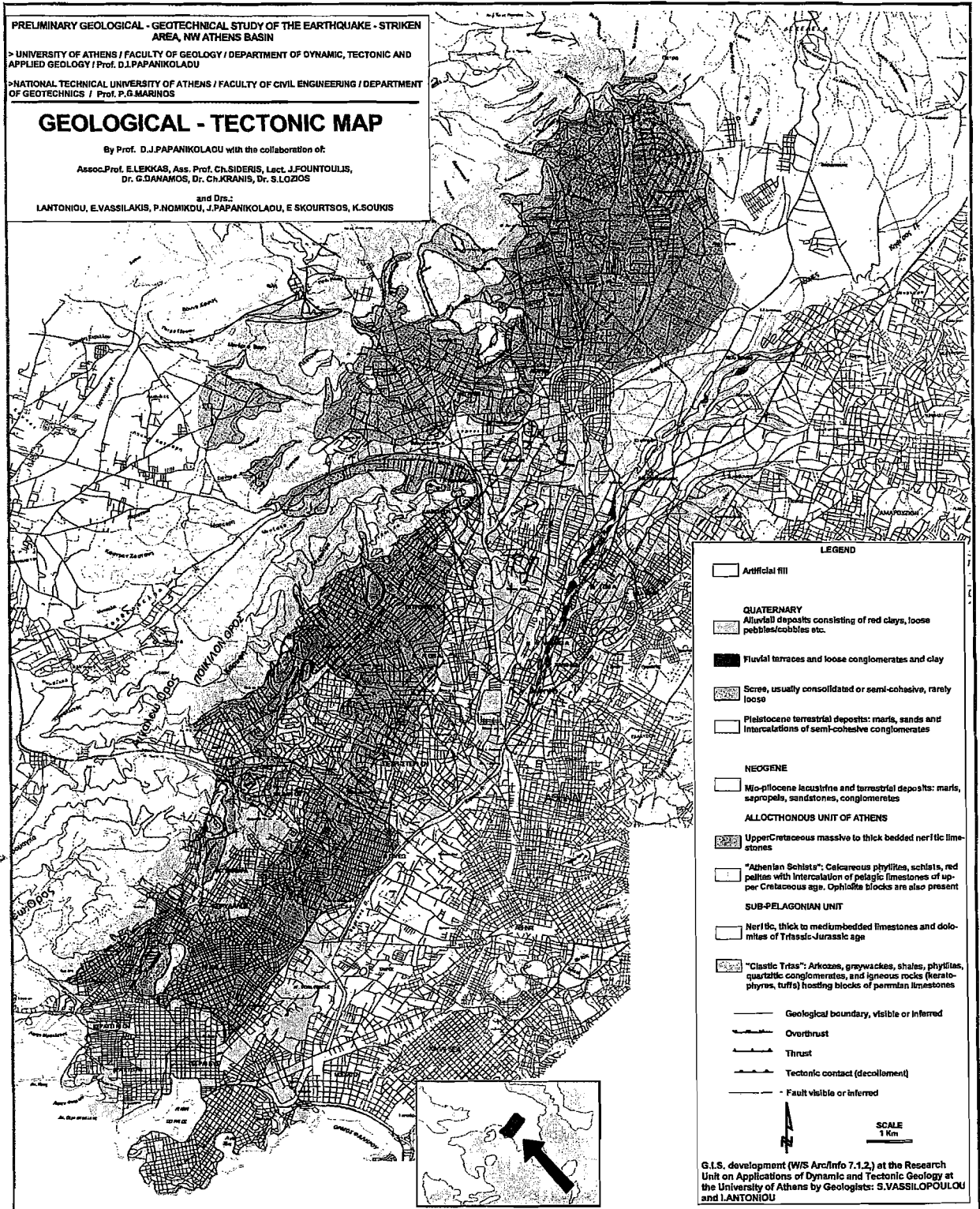


Figure 5

“ΧΡΗΣΗ ΤΕΧΝΙΚΩΝ GIS ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΕΝΤΟΠΙΣΜΟ ΡΗΞΙΓΕΝΩΝ ΔΟΜΩΝ: ΕΝΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΙΑ ΤΟ ΔΥΤΙΚΟ ΠΕΡΙΘΩΡΙΟ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ ΤΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ ΚΡΗΤΗΣ”

ΚΑΡΦΑΚΗΣ, Ι.^{*}, ΒΑΣΙΛΑΚΗΣ, Ε.^{**} & ΧΑΝΤΖΙΟΣ, Β.^{***}

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούνται τεχνικές Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ/GIS) και Τηλεπισκόπησης με σκοπό τον εντοπισμό των ρηξιγενών δομών που οριοθετούν το δυτικό περιθώριο της ευρύτερης λεκάνης του Ηρακλείου Κρήτης. Ο εντοπισμός των ρηξιγενών δομών και η αποσαφήνιση της κινηματικής τους παίζει βασικό ρόλο στην κατανόηση του νεοτεκτονικού καθεστώτος που επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή.

Η ερμηνεία των αεροφωτογραφιών κλίμακας 1:30.000 που απεικονίζουν την περιοχή, βοήθησε στην κατασκευή φωτογεωλογικού – τεκτονικού χάρτη, ενώ η επεξεργασία ψηφιακών δορυφορικών εικόνων LANDSAT-TM πρόσφερε σημαντική, πρόσθετη πληροφορία για αναγνώριση και λεπτομερή χαρτογράφηση των μεγάλων ρηξιγενών δομών.

Η χρησιμοποίηση των ΣΓΠ και η εκμετάλλευση των δυνατοτήτων τους όσον αφορά στον συνδυασμό διαφόρων επιπέδων πληροφοριών, που προήλθαν από την επεξεργασία δεδομένων πολλών τύπων, σε περιβάλλον ARC/INFO, βοήθησε στην παραγωγή σύνθετων εικόνων/χαρτών. Η αλλαγή ορισμένων παραμέτρων κατά την διάρκεια της παραγωγής των εικόνων, είχε ως αποτέλεσμα την ανάδειξη μορφολογικών χαρακτηριστικών που είναι δύσκολο να παρατηρηθούν με κλασσικές μεθόδους.

Κατά την διάρκεια του υπαίθριου ελέγχου έγινε πιστοποίηση του μεγαλύτερου ποσοστού των ρηξιγενών δομών που είχαν εντοπιστεί με μεθόδους Τηλεπισκόπησης, ενώ έγιναν συστηματικές τεκτονικές μετρήσεις και παρατηρήσεις στην περιοχή μελέτης. Μετά από συνδυασμό όλων των παραπάνω δεδομένων, εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα για τις σχέσεις μεταξύ των ρηξιγενών δομών καθώς και για τον κινηματικό τους χαρακτήρα. Για την συγκεκριμένη περιοχή επισημαίνεται ο χαρακτήρας της οριζόντιας δεξιόστροφης ολίσθησης στα ρήγματα με γενική διεύθυνση Β-Ν και ο κανονικός χαρακτήρας των ρηγμάτων με διεύθυνση Α-Δ.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρησιμοποίηση αεροφωτογραφιών και δορυφορικών εικόνων για την εξαγωγή γεωλογικών συμπερασμάτων έχει γίνει πλέον απαραίτητο κομμάτι στις γεωλογικές μελέτες, ιδιαίτερα όταν αυτές έχουν να κάνουν με μέση κλίμακα παρατήρησης. Γεωλόγοι όλων των ειδικοτήτων που ασχολούνται με χαρτογράφηση υπαίθρου, υιοθετούν ολοένα τα τεχνολογικά επιτεύγματα της διαστημικής παρατήρησης ως συμπληρωματικό εργαλείο στις παρατηρήσεις υπαίθρου. Ιδιαίτερα στις περιπτώσεις όπου χρειάζεται χαρτογράφηση μεγάλης κλίμακας, οι παρατηρήσεις που είναι δυνατό να προκύψουν από την μελέτη των αναλογικών ή πολύ περισσότερο των ψηφιακών δορυφορικών εικόνων, μπορεί να αποδειχθούν πολύ σημαντικές. Ερμηνεύοντας δε τις ψηφιακές δορυφορικές εικόνες μετά από κατάλληλη επεξεργασία εικόνας, ο γεωεπιστήμονας έχει την δυνατότητα να δει την περιοχή που μελετάει από μια διαφορετική οπτική γωνία, που είναι σίγουρα ενδιαφέρουσα και συχνά του δίνει την ευκαιρία να απαντήσει σε ερωτήματα που δεν έχουν απαντηθεί ή να δημιουργήσει νέα.

Πέρα από την ερμηνεία των εικόνων σε δύο διαστάσεις, η χρησιμοποίηση των ΣΓΠ δίνει την δυνατότητα εισαγωγής της τρίτης διάστασης, η οποία κάνει την διαδικασία της ερμηνείας πιο προσιτή στον μη ειδικευμένο, σε παρόμοιες τεχνικές, γεωεπιστήμονα. Στην παρούσα εργασία γίνεται προσπάθεια συνδυασμού των δύο τεχνικών επεξεργασίας, με στόχο τον εντοπισμό

^{*} Δρ Γεωλόγος, Προϊστάμενος Υπηρεσίας Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης, ΙΓΜΕ, Μεσογείων 70, 11527 Αθήνα, yetigme@otenet.gr

^{**} MSc Δυναμική, Τεκτονική & Εφ. Γεωλογία, Παν/μιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Παν/πολη Ζωγράφου, 15784 Αθήνα, vassilakis@geol.uoa.gr

^{***} Μεταλλειολόγος Μηχανικός, Συνεργάτης Υπηρεσίας Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης, ΙΓΜΕ

ρηξιγενών δομών στο δυτικό περιθώριο της λεκάνης του Ηρακλείου, αλλά και την αποσαφήνιση του κινηματικού τους χαρακτήρα πριν την τελική επιβεβαίωση στην ύπαιθρο.

ΓΕΩΛΟΓΙΑ - ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

Η περιοχή που μελετήθηκε αποτελεί το δυτικό κράσπεδο της λεκάνης του Ηρακλείου. Οι αλπικοί σχηματισμοί που την συνθέτουν ανήκουν στις ενότητες Γαβρόβου, Μάνης, Άρνας και Άρβης, με την μορφή που αυτές εμφανίζονται στην Κρήτη και αποτελούν το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης.

Η ενότητα Γαβρόβου εμφανίζεται με μέρος της ανθρακικής της σειράς με ηλικία Ιουρασικό – Κρητιδικό (Paranikolaou D., 1988). Η έντονη καρστικοποίηση και οι κύριες διευθύνσεις διαρρήξεων (B-N & A-Δ) που παρουσιάζουν οι ασβεστόλιθοι αυτοί είναι και οι σημαντικότεροι λόγοι διαφυγής των υπογείων υδάτων, κυρίως προς τις ακτές του Κρητικού Πελάγους (Αλμυρός, Μπαλί κλπ.). Η ενότητα της Μάνης έχει μικρή εμφάνιση στα δυτικά της περιοχής με λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθους και κερατολιθικές ενδιαστρώσεις. Ακόμα εμφανίζονται οι οφιόλιθοι της ενότητας της Άρβης με την μορφή απομονωμένων ρακών.

Το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής που μελετήθηκε αποτελείται από Νεογενείς σχηματισμούς που εμφανίζονται μάλιστα σε αρκετά μεγάλα υψόμετρα (800μ. στον Κρουσώνα) και καλύπτουν, πιθανότατα, τα ανθρακικά ιζήματα της ενότητας της Τρίπολης τα οποία επανεμφανίζονται στο όρος Γιούχτα στα ανατολικά (Paranikolaou D., 1988).

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

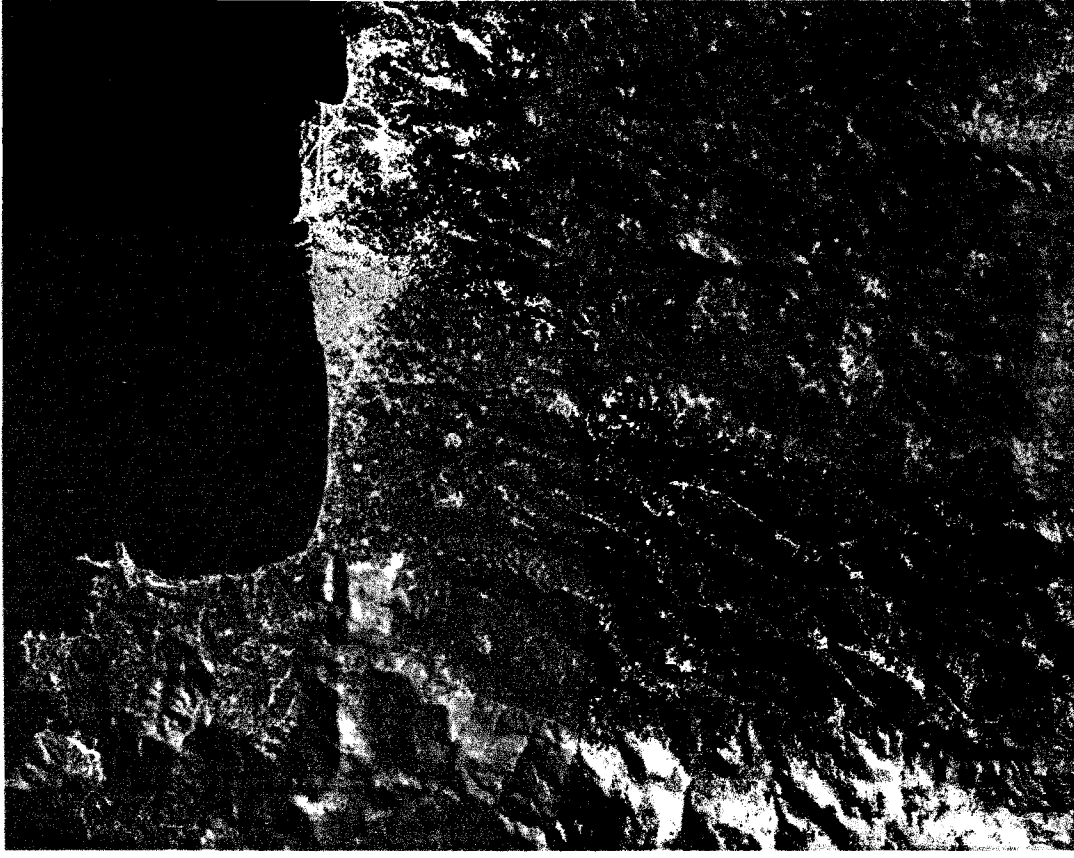
Η μελέτη της περιοχής έγινε σε πρώτη φάση από δορυφορικές εικόνες SPOT-XS με διακριτική ικανότητα 20 μέτρα και LANDSAT-TM με διακριτική ικανότητα 30 μέτρα καθώς και από αεροφωτογραφίες κλίμακας 1:33.000.

Η εικόνα SPOT (εικόνα 1α) χρησιμοποιήθηκε για την μεγαλύτερη διακριτικότητα που έχει ενώ η LANDSAT-TM για την πολυφασματική της πληροφόρηση. Η παράλληλη παρατήρηση των δύο δορυφορικών συστημάτων απαλείφει μέχρι ένα βαθμό τα μειονεκτήματα του ενός με τα πλεονεκτήματα του άλλου συστήματος (Astaras Th., 1989, Astaras Th., 1991). Έτσι η μικρότερη διακριτικότητα του συστήματος LANDSAT-TM ενισχύεται από την εικόνα SPOT, ενώ τα επτά κανάλια της εικόνας LANDSAT-TM δίνουν περισσότερες επιλογές στην ψευδέγχρωμη παρουσίαση των δεδομένων και εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων για τις επιφανειακές εμφανίσεις των γεωλογικών σχηματισμών και τον ρηξιγενή ιστό της αποτυπούμενης περιοχής. Η δυνατότητα που δίνουν οι πολλοί συνδυασμοί καναλιών και φυσικά η ψηφιακή επεξεργασία (Mather P., 1989) των εικόνων για την βελτίωση του οπτικού αποτελέσματος (χρησιμοποιώντας το λογισμικό ERDAS – Imagine), διευκολύνει την περαιτέρω ερμηνεία των δορυφορικών εικόνων.

Στην ψευδέγχρωμη εικόνα LANDSAT-TM με συνδυασμό καναλιών 6,3,2 (R,G,B) (εικόνα 1β) οι γυμνοί ανθρακικοί σχηματισμοί έχουν πάρεϊ γαλάζιο χρώμα και είναι εμφανής η αντίθεση που παρουσιάζουν με τους φυτοκαλυμμένους μεταλπικούς σχηματισμούς οι οποίοι έχουν πάρεϊ κοκκινωπό χρώμα. Οι οφιόλιθοι έχουν μικρή εμφάνιση και δεν αναδεικνύονται καλά στην εικόνα αυτή είτε λόγω της χαμηλής διακριτικότητας είτε λόγω του συγκεκριμένου συνδυασμού καναλιών. Αντίθετα, με τον συγκεκριμένο συνδυασμό είναι εμφανής η παράκτια εκφόρτιση στην περιοχή του Αλμυρού καθώς χρησιμοποιώντας το κανάλι 6 (κόκκινο) γίνονται εμφανείς οι διαφορές θερμοκρασίας, ιδιαίτερα στις υδάτινες μάζες (Barret & Curtis, 1992). Έτσι το νερό που εκφορτίζεται από τη καρστική πηγή του Αλμυρού και έχοντας ως γνωστόν μεγαλύτερη θερμοκρασία από την θάλασσα, δημιουργεί αυτή την αντίθεση (σημειώνεται με το βέλος).



Εικ.1. (α) Δορυφορική εικόνα Spot, με συνδυασμό καναλιών (3:2:1, R:G:B), που απεικονίζει το δυτικό κράσπεδο της λεκάνης του Ηρακλείου και **(β)** Δορυφορική εικόνα Landsat-TM, γεωμετρικά διορθωμένη, με συνδυασμό καναλιών (6:3:2, R:G:B), όπου απεικονίζεται η ευρύτερη περιοχή του Ηρακλείου. Το βέλος υποδεικνύει την παράκτια εκφόρτιση στην περιοχή του Αλιμυρού.



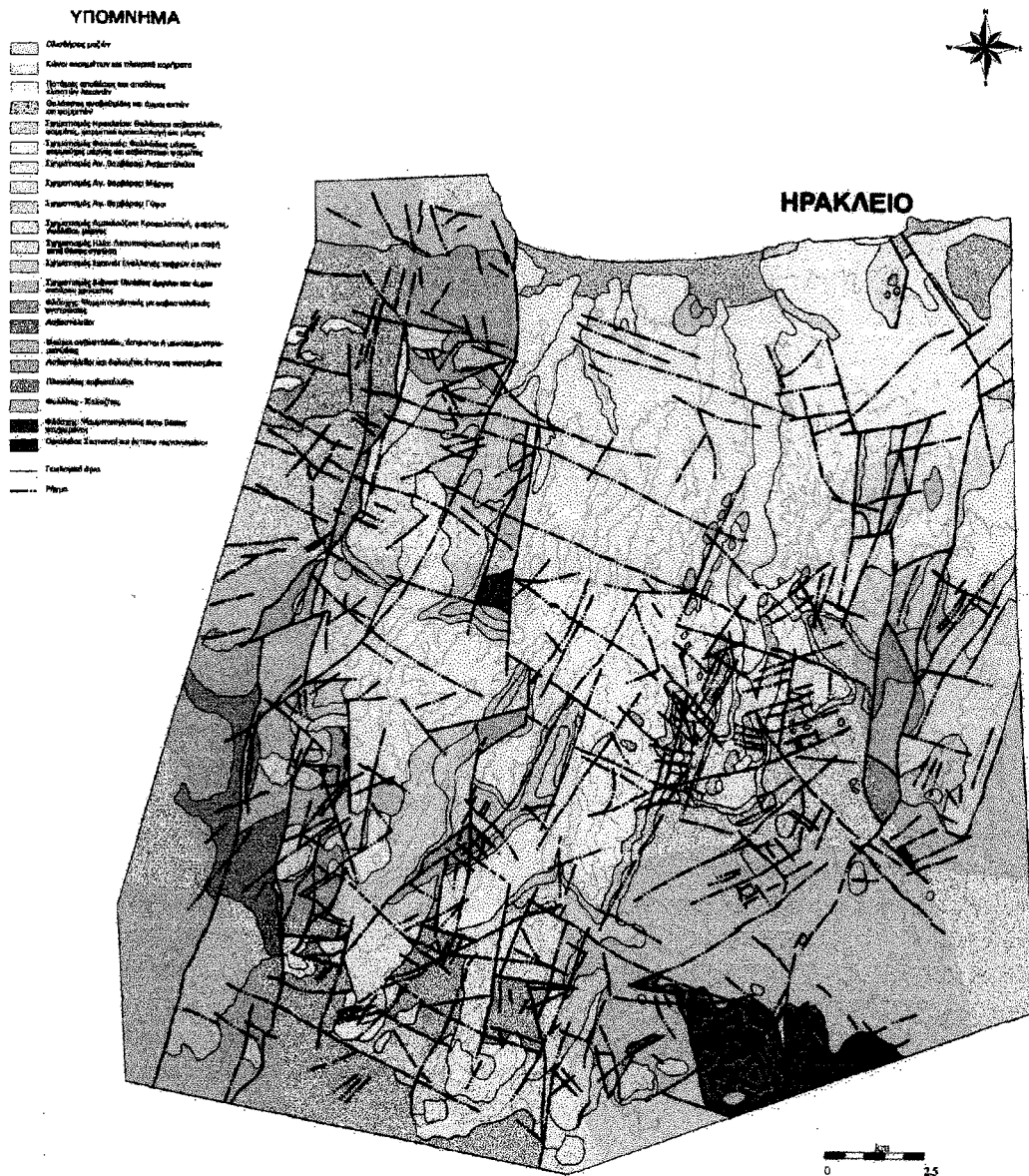
Scale

Landsat-7M Band 6 3 2

2 0 2 4 6
Kilomet

Στη δορυφορική εικόνα SPOT-XS χρησιμοποιήθηκε ο συνδυασμός 3,2,1 (R,G,B) που απεικονίζει το πραγματικό χρώμα που έχει η περιοχή κοιτώντας τη από ψηλά. Σκοπός της χρησιμοποίησης της παραπάνω ψηφιακής εικόνας ήταν η καλύτερη διακριτικότητα που προσφέρεται από το συγκεκριμένο δορυφορικό σύστημα με αποτέλεσμα να υπάρξει μεγαλύτερη ακρίβεια στον διαχωρισμό των λιθολογικών σχηματισμών και να εντοπιστούν ακριβέστερα τα σημεία γεωλογικού προβληματισμού για περαιτέρω μελέτη και υπαίθρια επίσκεψη.

Χρησιμοποιώντας τα συμπεράσματα από την παρατήρηση των παραπάνω δορυφορικών εικόνων, ενισχυμένα από την στερεοσκοπική παρατήρηση των αεροφωτογραφιών, συντάχθηκε φωτογεωλογικός χάρτης (εικόνα 2). Ιδιαίτερα χαρακτηριστικές είναι οι γραμμώσεις που παρατηρήθηκαν και σημειώθηκαν στον παραπάνω χάρτη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα μεγάλης διακριτικής ικανότητας, οι ασυνέχειες που εντοπίστηκαν έχουν μεγάλη ακρίβεια όσον αφορά στον χώρο και αντιστοιχούν είτε σε ρήγματα, είτε σε εδαφικές διαρρήξεις, ή σε διάφορα άλλα φαινόμενα και δομές γραμμικού χαρακτήρα. Οι επιφανειακές αυτές γραμμώσεις ελέγχθηκαν με εργασίες υπαίθρου και αφού διαχωρίστηκαν από αυτές που αντιστοιχούσαν σε μη τεκτονικές (Φωκάς Ερ., 1990), ενσωματώθηκαν στον φωτογεωλογικό χάρτη.



Εικ.2. Φωτογεωλογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής Λεκάνης Ηρακλείου.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΜΕ GIS

Σε δεύτερη φάση κρίθηκε αναγκαίο να ψηφιοποιηθούν τα τοπογραφικά δεδομένα και δημιουργηθούν ανυσματικοί χάρτες, για να γίνει πιο λεπτομερής η μελέτη της περιοχής και για να συνδυαστούν, μπαίνοντας σε κοινή βάση δεδομένων όλα τα στοιχεία που έχουν συλλεχθεί. Οι χάρτες που χρησιμοποιήθηκαν σαν πηγή πληροφοριών είναι οι τοπογραφικοί χάρτες 1:50.000 της ΓΥΣ και πιο συγκεκριμένα τα φύλλα χάρτη Ηρακλείου, Ανωγείων, Τυμπακίου και Επάνω Αρχάνων. Η ισοδιάσταση που χρησιμοποιήθηκε ήταν 40m, η οποία θεωρήθηκε ικανοποιητική για την κλίμακα που βασίστηκε η εργασία και τις ιδιαίτερα μεγάλες διακυμάνσεις στο ανάγλυφο της περιοχής. Τα παραπάνω φύλλα καλύπτουν το δυτικό κράσπεδο της λεκάνης του Ηρακλείου.

Η αναλογική πληροφορία αυτών των χαρτών (ισοϋψείς καμπύλες, οδικό και υδρογραφικό δίκτυο) μετατράπηκε σε ψηφιακή. Η μετατροπή αυτή έγινε με τη χρήση σαρωτή (scanner) και με τη χρήση ψηφιοποιητή (digitizer). Τα ψηφιακά δεδομένα που παράγονται με τη σάρωση είναι σε πινακοποιημένη δομή (raster) χωρίς γεωγραφική πληροφορία παρά μόνο πληροφορία για την τιμή του κάθε pixel (συνήθως 0 ή 1). Με τη χρήση του λογισμικού πακέτου CADCORE μετατράπηκαν σε ανυσματική μορφή (vector) και προστέθηκε η γεωγραφική πληροφορία (στη περίπτωση των ισοϋψών, οι οριζόντιες συντεταγμένες τους και το υψόμετρο).

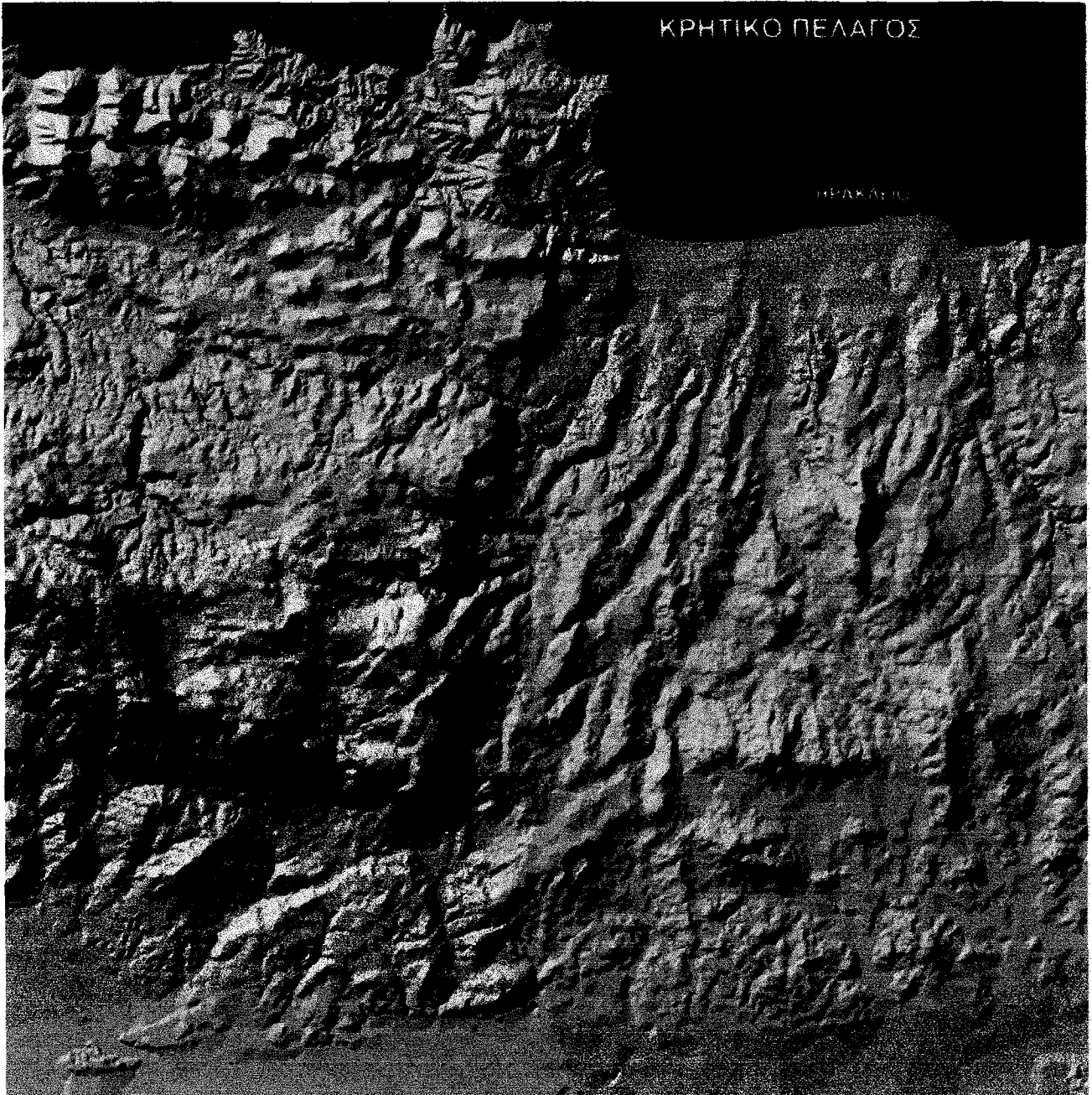
Η διαδικασία ήταν αρκετά χρονοβόρα λόγω της χρησιμοποίησης διαφορετικών λογισμικών που αντιμετώπιζαν προβλήματα συμβατότητας αλλά και του έντονου μορφολογικού ανάγλυφου που έχει η περιοχή μελέτης. Το αρχείο των ισοϋψών εισάγεται για επεξεργασία στο λογισμικό ARC/INFO.

Στην συνέχεια με βάση αυτό το αρχείο δημιουργείται, με τη χρήση του module GRID, ένα Ψηφιακό Μοντέλο Αναγλύφου (ΨΜΑ ή DEM). Με το DEM καλύπτεται ολόκληρη η περιοχή του χάρτη από ένα διδιάστατο κανάβο (grid), στις κορυφές του οποίου καταγράφεται η τιμή του υψόμετρου. Το DEM είναι δηλαδή μια ασπρόμαυρη διδιάστατη εικόνα με όλες τις ενδιάμεσες διαβαθμίσεις του γκρι, ανάλογα με το υψόμετρο του σημείου που απεικονίζεται. Η παραγόμενη πληροφορία είναι σημαντική για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν το μορφοτεκτονικό καθεστώς της περιοχής ενώ φαίνονται καθαρά πολύ σημαντικά γεωμορφολογικά στοιχεία (υδρογραφικό δίκτυο, λεκάνες απορροής, ανάγλυφο, κλπ.). Τα pixels με μικρές ψηφιακές τιμές (βαθύτεροι τόνοι του γκρι) απεικονίζουν περιοχές χαμηλού υψόμετρου, ενώ αντίθετα αυτά με μεγάλες ψηφιακές τιμές απεικονίζουν περιοχές με μεγαλύτερα, σχετικά, υψόμετρα.

Μετά από επεξεργασία του DEM δημιουργήθηκε ο χάρτης σκιασμένου αναγλύφου (εικόνα 3). Ο πανοραμικός χάρτης σκιασμένου αναγλύφου είναι ουσιαστικά η απεικόνιση της τρίτης διάστασης με την χρησιμοποίηση μιας ψεύτικης φωτεινής πηγής που υποκαθιστά τον ήλιο. Το μέγεθος της κυψέλης (cell) του κανάβου είναι 20 μέτρα. Η θέση της φωτεινής πηγής είναι: οριζόντια γωνία 315° , κατακόρυφη γωνία 35° . Ο συντελεστής μεγέθυνσης ως προς την κατακόρυφο είναι 2 και αυτό χρησιμεύει στην καλύτερη ανάδειξη του αναγλύφου.

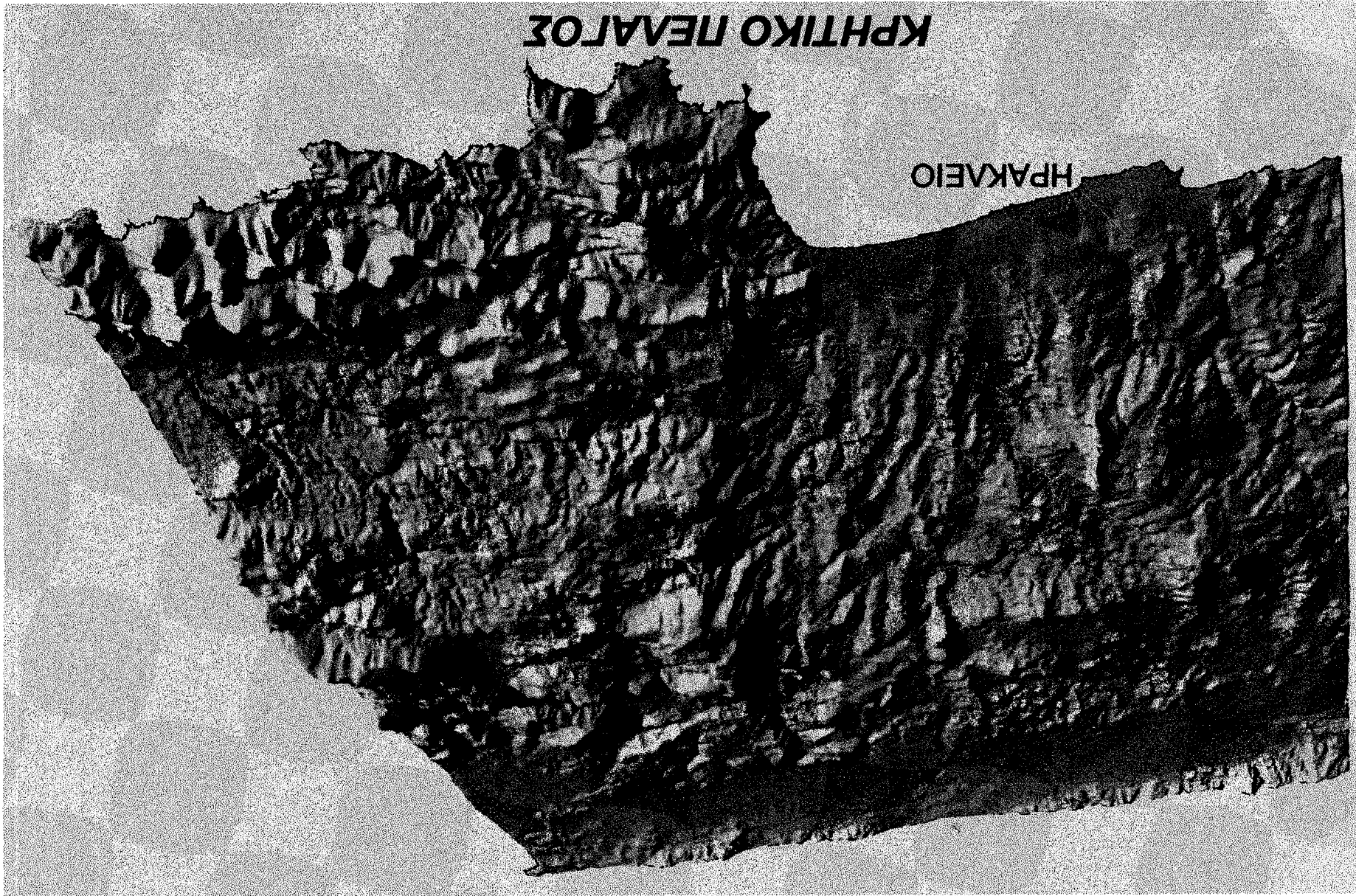
Σε επόμενο στάδιο παράχθηκε ένας προοπτικός χάρτης σκιασμένου αναγλύφου (εικόνα 4) ο οποίος προκύπτει με τη χρήση των modules ARCPLOT και GRID. Το DEM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία του προοπτικού και στη συνέχεια γίνεται επικάλυψη με το χάρτη σκιασμένου αναγλύφου και με τα ρήγματα που έχουν χαρτογραφηθεί με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Είναι πολύ εμφανής η ρηξιγενής ζώνη οριζόντιας ολίσθησης διεύθυνσης Β-Ν, στο βόρειο άκρο της οποίας είδαμε στην εικόνα LANDSAT την θερμική ανωμαλία και που αντιστοιχεί στα νερά της καρστικής πηγής του Αλμυρού.

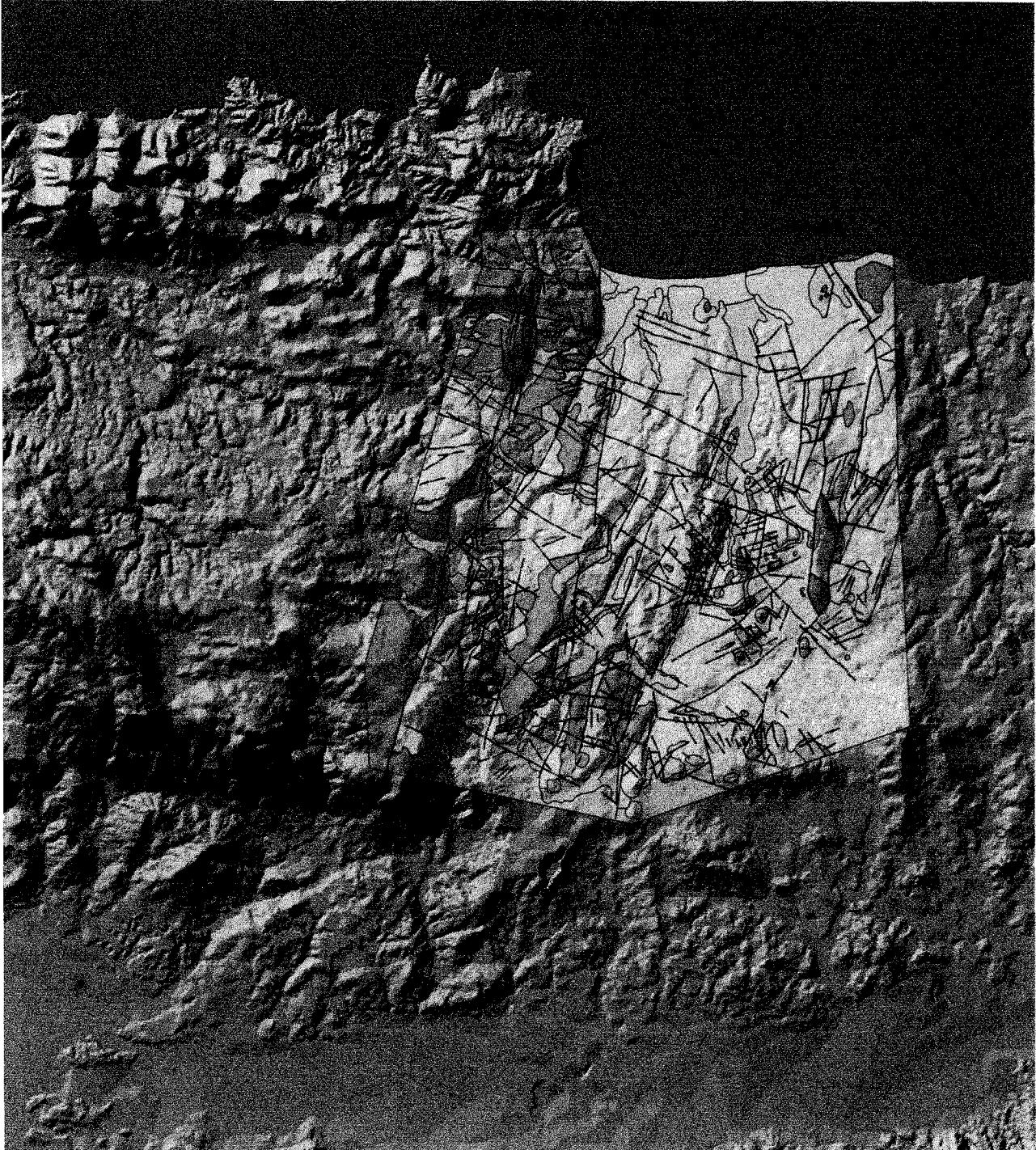
Τέλος αξιοποιώντας όλα τα δεδομένα που εισήχθησαν στο Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών παράχθηκε ένας έγχρωμος χάρτης σκιασμένου αναγλύφου (εικόνα 5). Ο έγχρωμος χάρτης σκιασμένου αναγλύφου είναι μία σύνθεση του φωτογεωλογικού χάρτη (εικόνα 2) και του σκιασμένου αναγλύφου της περιοχής (εικόνα 3) και πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του module GRID και του χρωματικού μοντέλου HSV (Hue, Saturation, Value). Οι τιμές του Hue και του Saturation προκύπτουν από το γεωλογικό χάρτη, και οι τιμές του Value από το σκιασμένο ανάγλυφο. Το μέγεθος της κυψέλης του κανάβου και σε αυτό το χάρτη είναι 20 μέτρα. Στη συνθετική αυτή εικόνα γίνεται συνδυασμός της γεωλογικής και της γεωμορφολογικής πληροφορίας που έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη κατανόηση του ρόλου των γεωλογικών σχηματισμών στην μορφογένεση και τις εναλλαγές του αναγλύφου.



Εικ.3. Χάρτης σκιασμένου ανάγλυφου που προέκυψε από το DEM της περιοχής μελέτης. Η φωτεινή πηγή βρίσκεται σε οριζόντια γωνία 315° , γωνία πρόσπτωσης των ακτίνων 35° , ενώ το ανάγλυφο είναι παραμορφωμένο 2 φορές ως προς την κατακόρυφο για να γίνει πιο έντονη η αντίθεση.

ΕΙΚ.4. Προοπτική εικόνα σκιασμένου αναγλύφου που επιδεικνύει φωτογραφημάτων που είχαν μετατραπεί σε πραγματικές συντεταγμένες.





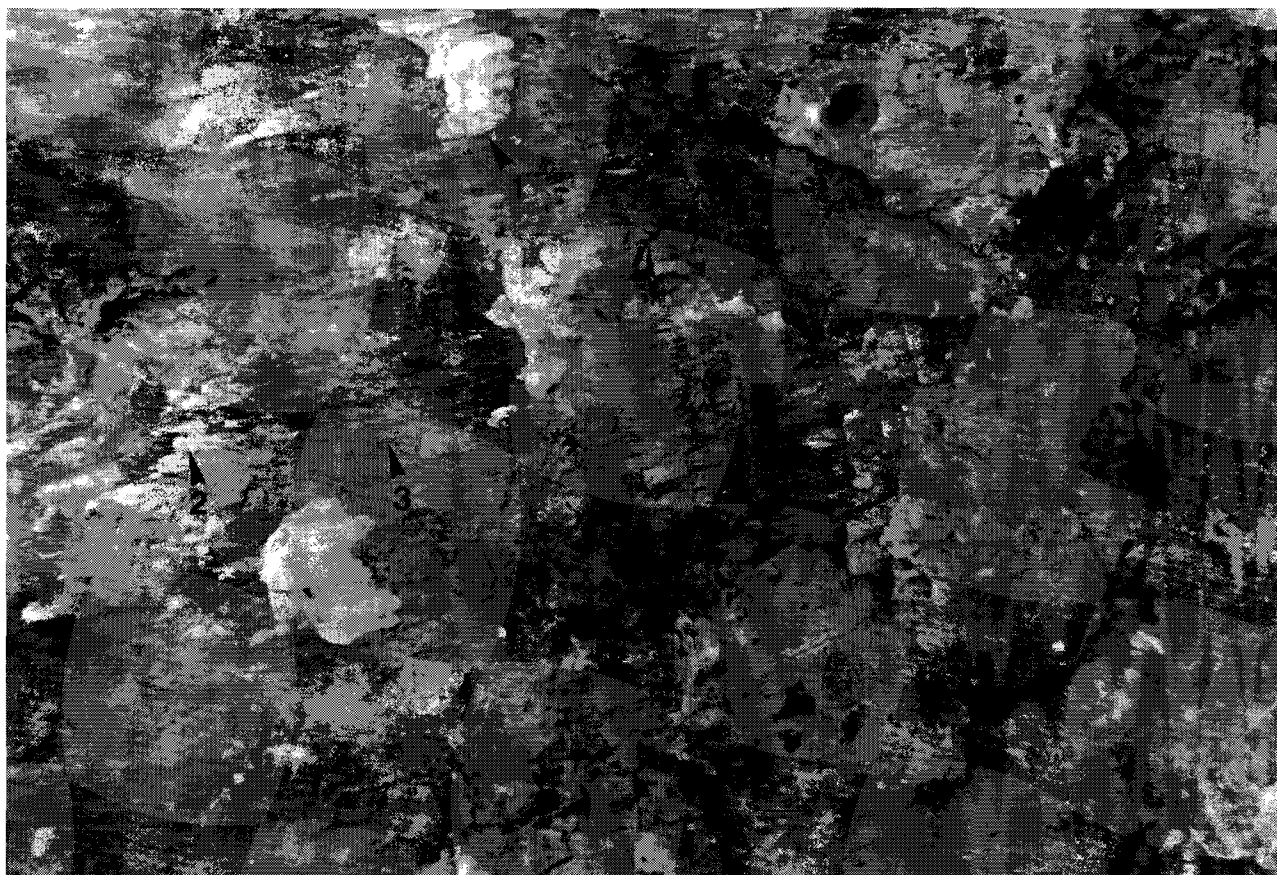
Εικ.5. Έγχρωμος χάρτης σκιασμένου αναγλύφου(βασικό επίπεδο πληροφορίας)σε σύνθεση με τον φωτογεωλογικό χάρτη ενός τμήματος της περιοχής (δεύτερο επίπεδο πληροφορίας)που πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του module GRID και του χρωματικού μοντέλου HSV (Hue, Saturation, Value).

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ – GIS – ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Μετά από την επεξεργασία των προϊόντων που προέκυψαν από τις παραπάνω διεργασίες και συνδυάζοντας τα νέα δεδομένα που προκύπτουν από τις τεχνικές αυτές με τις υπαίθριες, κλασσικές παρατηρήσεις έγινε η γεωλογική ερμηνεία της περιοχής.

Έτσι εντοπίστηκαν δύο κύριες διευθύνσεις ρηγμάτων μια Β-Ν με δεξιόστροφη οριζόντια ολίσθηση που ελέγχει το δυτικό κράσπεδο της λεκάνης και μια με διεύθυνση Α-Δ που την αποτελούν κανονικά ρήγματα που επηρεάζουν όχι μόνο το υπόβαθρο αλλά και τα νεότερα ιζήματα. Η επιβεβαίωση της δεξιόστροφης κίνησης της πρώτης ρηξιγενούς ζώνης, εκτός των σιγμοειδών μορφών που παίρνουν οι κύριοι κλάδοι των ρεμάτων που βρίσκονται κοντά στη ζώνη και είναι ιδιαίτερα εμφανείς στις δορυφορικές εικόνες των δύο συστημάτων, έγινε και με υπαίθρια παρατήρηση. Οι πρισματικοί κρύσταλλοι που βρέθηκαν, αναπτύσσονται είτε δημιουργώντας ένα τοπικό ασβεστίτικο επίχρισμα, είτε σχηματίζοντας ράβδωση παράλληλα με τις γραμμές ολίσθησης (εικόνα 6). Επίσης διακρίνεται η διάρρηξη των κρυστάλλων αυτών σχηματίζοντας ένα δόντι, το οποίο βλέπει προς την πλευρά που κινήθηκε το τέμαχος που λείπει (προς τα αριστερά).

Η σχετική κίνηση που περιγράφηκε παραπάνω, έδωσε πιθανότατα την τοξωτή μορφή που έχουν οι κύριοι κλάδοι των ποταμών που ρέουν κοντά στο δυτικό κράσπεδο της λεκάνης του Ηρακλείου. Έτσι αποκαλύπτεται και με αυτή τη μέθοδο η δεξιόστροφη κίνηση της ορεινής μάζας που βρίσκεται δυτικά και κινείται προς τα βόρεια σε σχέση με την ανατολική, πεδινή ως επί το πλείστον, περιοχή.



Εικ. 6. Φωτογραφία από την κατοπτρική επιφάνεια της ρηξιγενούς ζώνης που περιγράφεται στο κείμενο. Διακρίνεται η ανάπτυξη πρισματικών κρυστάλλων ασβεστίτη που δημιουργούν είτε μια τοπική κρούστα (1) είτε ράβδωση (2), παράλληλα με τις γραμμές ολίσθησης (3). Επίσης διακρίνεται η διάρρηξη των κρυστάλλων αυτών σχηματίζοντας ένα δόντι, το οποίο βλέπει προς την πλευρά που κινήθηκε το τέμαχος που λείπει (δηλαδή προς τα αριστερά).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα παραπάνω στοιχεία φάνηκε καθαρά ότι τα δεδομένα Τηλεπισκόπησης (Α/Φ, δορυφορικές εικόνες) σε συνδυασμό με τις δυνατότητες που προσφέρουν τα λογισμικά πακέτα GIS, μπορούν να συμβάλλουν στην επίλυση προβλημάτων που σχετίζονται με την γεωλογική έρευνα και την καλύτερη κατανόηση του τεκτονικού καθεστώτος μιας περιοχής, μελετώντας την σε πρώτη φάση, σε κλίμακα όπου είναι ορατές μεγάλες δομές.

Καταλήγοντας, η ορεινή μάζα που οριοθετεί το δυτικό κράσπεδο της λεκάνης του Ηρακλείου φαίνεται, από όσα είπαμε παραπάνω φαίνεται να κινείται, σχετικά, προς τα βόρεια με ταυτόχρονη ανύψωση σε σχέση με την λεκάνη του Ηρακλείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Astaras, Th. (1989): The contribution of Landsat Thematic Mapper (TM) imagery to reconnaissance geological and geomorphological mapping in mountain area of Kerkini - SW part of Rhodope and surrounding plains (Hellenic - Bulgarian borders). 2nd Hellenic - Bulgarian Symposium on the Geological and Physiographical problems of the Rhodope massif, Thessaloniki, Oct. Geogr. Rodopica, V2, p.104-114.

Astaras, Th. (1991): Geological lineaments interpretation of SIR-A and LANDSAT imageries of Cephalonia Island, Ionian Sea, Greece. Proceedings of the Workshop on Radar in Geology. EARSEL, Graz, AUSTRIA, 2nd July 1991, p.58-66.

Barret, E. and Curtis, L. (1992): Introduction to environmental remote sensing, Chapman & Hall, pp. 426.

Mather, P. (1989): Computer processing of remotely-sensed images, Wiley, pp. 352.

Papanikolaou, D. (1988): Introduction to the geology of Crete. IGCP project No276, first field meeting Crete-Greece, October 10-14, 1988. Guide Book on 'Paleozoic tectonic domains and their alpidic evolution in the Tethys', p.3-16.

Φωκάς, Ερ. (1990): Συσχέτιση των γραμμικών στοιχείων που παρατηρούνται στις δορυφορικές εικόνες Landsat της Δυτικής Ελλάδας με γεωλογικά δεδομένα. Διδακτορική διατριβή, Παν/μιο Αθηνών, Μάιος 1990, σ.137.