

## Η συμβολή των δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων στη Γεωμορφολογία, από τη δεκαετία του '70 (δορυφόροι LANDSAT) μέχρι σήμερα (δορυφόροι IKONOS, QuickBird). Παραδείγματα από την Ελλάδα.

Θ. ΑΣΤΑΡΑΣ<sup>1</sup>, Δ. ΟΙΚΟΝΟΜΙΔΗΣ<sup>1</sup> ΚΑΙ Α. ΜΟΥΡΑΤΙΔΗΣ<sup>1</sup>.

### ABSTRACT

This paper describes initially the availability of multispectral satellite images, from the launch of the first Earth Resources Satellites (Landsat series), with medium resolution capabilities (80m), to the launch of the contemporary satellites (QuickBird, 2001), with very high resolution capabilities (60cm). It reviews researches, concerning the visual and digital image analyses of the LANDSAT series, SPOT, IRS, TERRA and QuickBird satellite images that have been carried out during the last 20 years in the Department of Physical and Environmental Geography, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki. These researches are of geomorphological-geological interest and involve applications in various areas of Greece. In particular, practical examples are provided, concerning the detection and delineation of landslides in Macedonia and Epirus Provinces, the detection and classification of geomorphological units (land systems) in Peloponnesos, Thrace, Macedonia and Santorini areas and the analysis of drainage network in Central Macedonia Province with emphasis in the delineation of severe erosional phenomena. Reason for this review paper, is the contemporary use of Digital Elevation Models (DEMs) with 10-30 m accuracy, from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM / 2000) and their contribution, along with the high resolution satellite images, (from TERRA, QuickBird, etc), in the 3-D visualization of the Earths' relief. In particular, the use of 3-D satellite images will assist geoscientists and especially geomorphologists, to study the Earths' relief and its' evolution, more quickly, with better accuracy and at lower cost, compared with aerial photographs and 2-D satellite images, which have been used during the last 20 years.

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αρχικά, στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται η "διαθεσιμότητα" (availability) των δορυφορικών πολυφασματικών εικόνων, από την εποχή της εκτόξευσης των πρώτων δορυφόρων ανίχνευσης των φυσικών διαθεσίμων (Earth Resources Satellites), δηλαδή των δορυφόρων της σειράς LANDSAT (μέσης χωρικής διακριτικής ικανότητας 80m), μέχρι την εκτόξευση του δορυφόρου QuickBird (2001), με πολύ υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (60cm). Στη συνέχεια, αναφέρονται παραδείγματα οπτικής και ψηφιακής ανάλυσης δορυφορικών εικόνων της σειράς LANDSAT, SPOT, IRS, TERRA και QuickBird, από εργασίες που εκπονήθηκαν την τελευταία 20ετία στον Τομέα Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας του Τμήματος Γεωλογίας του Α.Π.Θ. Οι παραπάνω αναλύσεις των πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων αναφέρονται μόνον στις εργασίες γεωμορφολογικού-γεωλογικού περιεχομένου σε διάφορες περιοχές του Ελληνικού Χώρου. Συγκεκριμένα, αναφέρονται εργασίες με αντικείμενο τον εντοπισμό και χαρτογράφηση

**THE CONTRIBUTION OF SATELLITE MULTISPECTRAL IMAGES IN GEOMORPHOLOGY, FROM THE 70'S (LANDSAT SATELLITES) TO THE PRESENT DAY (IKONOS, QUICKBIRD SATELLITES). EXAMPLES FROM GREECE.**

<sup>1</sup> Εργαστήριο Εφαρμογών Τηλεπισκόπησης και Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών  
Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.  
E-mails: astaras@geo.auth.gr, oikonomi@geo.auth.gr, amourati@geo.auth.gr.

κατολισθήσεων σε περιοχές της Μακεδονίας και της Ηπείρου, τον εντοπισμό και ταξινόμηση γεωμορφολογικών ενότητων στην Πελοπόννησο, τη Θράκη, τη Σαντορίνη και τη Μακεδονία, καθώς και την ανάλυση υδρογραφικών δικτύων στην Κεντρική Μακεδονία, με έμφαση στον εντοπισμό περιοχών όπου απαντούν φαινόμενα έντονης διάβρωσης. Αφορμή για την παρουσίαση αυτής της εργασίας επισκόπησης (review paper), είναι η σημερινή χρήση των Ψηφιακών Μοντέλων Αναγλύφου (DEM) ακριβείας 10-30m, προερχομένων από τη διαστημική αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission/2000) και η συμβολή τους, μαζί με τις προαναφερθείσες δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας (από τους δορυφόρους TERRA, QuickBird κ.α.), στην τρισδιάστατη απεικόνιση του αναγλύφου. Συγκεκριμένα, η δημιουργία τρισδιάστατων δορυφορικών εικόνων θα βοηθήσει τους γεωεπιστήμονες και ιδιαίτερα τους γεωμορφολόγους, ώστε να μελετήσουν σήμερα το ανάγλυφο της Γης και τις διαχρονικές μεταβολές του, πιο γρήγορα, με μεγαλύτερη ακρίβεια και με μικρότερο κόστος απ' ό,τι γινόταν την τελευταία εικοσαετία με τις αεροφωτογραφίες και τις δισδιάστατες δορυφορικές εικόνες.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνολογία της Τηλεπισκόπησης για την παρατήρηση, ανίχνευση και μέτρηση των «φυσικών διαθεσίμων της Γης» (earth resources), άρχισε συστηματικά στις αρχές της δεκαετίας του 70, με την εκτόξευση δορυφόρων, γνωστών ως "δορυφόρων ανίχνευσης των φυσικών διαθεσίμων της Γης" (Earth Resources Satellites).

Την περίοδο αυτή, οι ΗΠΑ (NASA) έθεσαν σε τροχιά μια σειρά από μη επανδρωμένους δορυφόρους, που είναι γνωστή ως πρόγραμμα LANDSAT, το οποίο συνεχίζεται μέχρι σήμερα με τους δορυφόρους LANDSAT-5 και LANDSAT-7.

Για πρώτη φορά οι δορυφόροι αυτοί διέθεταν διαχρονικά πολλαπλές πληροφορίες στους γεωεπιστήμονες από το διάστημα.

Η επιτυχία αυτή του προγράμματος LANDSAT οδήγησε στην εκτόξευση και άλλων δορυφόρων ανίχνευσης των φυσικών διαθεσίμων της Γης, τόσο από άλλες χώρες καθώς και από ιδιωτικές εταιρίες. Σήμερα, περισσότερα από 25 τέτοια δορυφορικά συστήματα περιοδικής ανίχνευσης της Γης δίδουν συνεχείς πληροφορίες σε διάφορους τομείς έρευνας, όπως τοπογραφία, γεωμορφολογία, γεωλογία, χρήση και κάλυψη της Γης, περιβαλλοντικές αλλαγές του χερσαίου και υδάτινου περιβάλλοντος, κ.α.

Κατά την τριακονταετία 1970-2000, χρησιμοποιήθηκαν διάφοροι τύποι δορυφόρων, τροχιών και καταγραφών/αισθητήρων (sensors), με σκοπό να ανιχνεύουν διαχρονικά τη Γη, κατακόρυφα, πλάγια ή στερεοσκοπικά.

Το τρισδιάστατο ανάγλυφο της Γης μελετήθηκε αρχικά από στερεοζεύγη δορυφορικών

εικόνων MOMS (Modular Optoelectronic Multispectral Scanner) (1983) και SPOT (1986) (Gupta, 2003). Στη συνέχεια, μετά την εκτόξευση των δορυφόρων ERS (1991), RADARSAT (1995) και ENVISAT (2001), καθώς και της διαστημικής αποστολής SRTM (2000), η σύγχρονη τεχνολογία της πληροφορικής έδωσε τη δυνατότητα στους γεωεπιστήμονες να μελετήσουν το ανάγλυφο της Γης με τη βοήθεια των ψηφιακών μοντέλων αναγλύφου (DEM/Digital Elevation Models), τα οποία προκύπτουν απευθείας από τη συμβολομετρία (interferometry) διαστημικών εικόνων ραντάρ (SAR / Satellite Synthetic Aperture Radars). Συγκεκριμένα σήμερα, η διαστημική αποστολή SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) προσφέρει στους γεωεπιστήμονες τρισδιάστατα τοπογραφικά στοιχεία (σε οποιαδήποτε περιοχή της Γης, που περιλαμβάνεται μεταξύ των γεωγραφικών παραλλήλων 60° Β και 60° Ν), χωρικής διακριτικής ικανότητας 30m x 30m και 10m x 10m στις μικροκυματικές ζώνες C και X αντίστοιχα. Σε κατακόρυφο επίπεδο η ακρίβεια είναι καλύτερη από 10m και 6m στις μικροκυματικές ζώνες C και X αντίστοιχα (Gupta, 2003).

Τα DEM, συνδυαζόμενα με τις προαναφερόμενες δορυφορικές εικόνες της σειράς LANDSAT, TERRA και QuickBird δίδουν τρισδιάστατες δορυφορικές εικόνες σε οποιαδήποτε περιοχή της Γης, που περιλαμβάνεται μεταξύ των γεωγραφικών παραλλήλων 60° Β και 60° Ν. Οι παραπάνω εικόνες αναμένεται να βοηθήσουν πάρα πολύ τις γεωμορφολογικές-γεωλογικές εργασίες, μειώνοντας το συνολικό κόστος και το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεσή τους.

## 2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΩΝ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Αν συγκρίνουμε τα δορυφορικά δεδομένα (εικόνες) με τις υπαίθριες παρατηρήσεις του αναγλύφου και τις συμβατικές αεροφωτογραφίες, βλέπουμε, ότι αυτά παρουσιάζουν κάποια πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, οι δορυφορικές εικόνες παρέχουν «συνοπτική κάλυψη» (synoptic view) που φτάνει μέχρι τα 185km x 185km και «επαναληψιμότητα» (repetition rate) μερικών ημερών. Επιπρόσθετα, η επαναλαμβανόμενη συγκέντρωση συγκεκριμένων δεδομένων του γήινου περιβάλλοντος με τη βοήθεια των δορυφορικών καταγραφών, κοστίζει λιγότερο, απ' ό,τι οι παραδοσιακές μέθοδοι συγκέντρωσης δεδομένων, όπως είναι η εργασία υπαίθρου και οι α/φίες.

Οι πληροφορίες που παίρνουμε από τα δορυφορικά δεδομένα περιορίζονται από τα χαρακτηριστικά τους, όπως είναι:

- α) η φασματική (spectral) ανάλυση (διακριτική ικανότητα)
- β) η διαχρονική (temporal) ανάλυση και
- γ) η χωρική (spatial) ανάλυση

Η «**φασματική ανάλυση**» των εικόνων έχει σχέση με τα δεδομένα (πληροφορίες) που καταγράφονται από τους αισθητήρες (απεικονιστές) ταυτόχρονα και σε διάφορα τμήματα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, που καθορίζονται από τα «ατμοσφαιρικά παράθυρα» (atmospheric windows).

Η «**διαχρονική ανάλυση**» συνδέεται με την «επαναληψιμότητα». Αυτή αναφέρεται σε δεδομένα, της ίδιας περιοχής, που λαμβάνονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, συνήθως ημερών, τα οποία τοποθετούνται σε μία βάση δεδομένων για την ανίχνευση και τη μέτρηση περιβαλλοντικών αλλαγών.

Η «**χωρική ανάλυση**» ή «διακριτική ικανότητα» αναφέρεται στη μικρότερη ενότητα που μπορεί να εντοπισθεί σε μία εικόνα. Αυτή περιγράφεται με το εικονοστοιχείο (Pixel/Picture Element) και μπορεί να κυμαίνεται μεταξύ εκατοστών του μέτρου (πολύ υψηλή χωρική ανάλυση) μέχρι 1 km ανά εικονοστοιχείο (πολύ χαμηλή χωρική ανάλυση). Έτσι, για παράδειγμα οι μετεωρολογικοί δορυφόροι, οι οποίοι πα-

ρουσιάζουν επαναληψιμότητα μερικών ωρών, χαρακτηρίζονται από πάρα πολύ χαμηλή χωρική ανάλυση, ενώ οι δορυφόροι IKONOS και QuickBird που παρουσιάζουν επαναληψιμότητα λίγων ημερών (1-3), χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή χωρική ανάλυση (0,60-1m.)

Το πρόγραμμα LANDSAT άρχισε με τους δορυφόρους της σειράς LANDSAT 1-3 (δεκαετία 1970), προσφέροντας πολυφασματικά δεδομένα MSS 80m (μέσης χωρικής ανάλυσης). Το πρόγραμμα αυτό συνεχίστηκε με το πολυφασματικό σύστημα TM (Thematic Mapper/Θεματικό Χαρτογράφο) της σειράς LANDSAT 4-5 (δεκαετία 1980), που προσέφερε δεδομένα με 30m (υψηλής χωρικής ανάλυσης) (Αστάρas, 1986).

Το 1999 εκτοξεύτηκε ο δορυφόρος LANDSAT-7, που φέρει τον «ενισχυμένο πολυφασματικό σαρωτή» (σύστημα) ETM+ (Enhanced Thematic Mapper/Ενισχυμένος Θεματικός Χαρτογράφος), με 7 φασματικές ζώνες, με χωρική ανάλυση 30m (εξαιρουμένης της θερμικής ζώνης, με χωρική ανάλυση 60m) και την παγχρωματική φασματική ζώνη (PAN), με χωρική ανάλυση 15m (Kramer, 2002).

Επίσης, το 1999 εκτοξεύτηκε από τις ΗΠΑ (NASA) ο δορυφόρος TERRA, ο οποίος φέρει διάφορους πολυφασματικούς σαρωτές. Οι σαρωτές αυτοί προσφέρουν δεδομένα με χωρική ανάλυση 15m, 30m και 90m (δηλαδή μέσης μέχρι υψηλής χωρικής ανάλυσης), στο ορατό (VIS), στο μέσο υπέρυθρο (SWIR) και θερμικό υπέρυθρο (TIR) φάσμα αντίστοιχα.

Το πρόγραμμα SPOT (SPOT 1-3) άρχισε το 1986, διαθέτοντας πολυφασματικά δεδομένα (XS), με 20m χωρική ανάλυση και παγχρωματικά δεδομένα (Pan) με υψηλή χωρική ανάλυση των 10m. Το 1998 εκτοξεύτηκε ο δορυφόρος SPOT-4, ο οποίος προσέφερε δεδομένα στο μέσο υπέρυθρο (SWIR), με χωρική ανάλυση 20m. Το 2002 εκτοξεύτηκε ο δορυφόρος SPOT-5, που φέρει δύο πιο ενισχυμένους πολυφασματικούς σαρωτές και δύο παγχρωματικούς σαρωτές. Οι σαρωτές αυτοί διαθέτουν πολυφασματικά δεδομένα (XS/XI) 10m και 20m και παγχρωματικά δεδομένα (Pan), 5m. Με κατάλληλη επεξεργασία των εικόνων Pan, η χωρική-διακριτική τους ικανότητα μπορεί να φτάσει τα 2,5m.

Το Ινδικό Σύστημα Τηλεπισκόπησης (IRS) άρχισε το 1988 με τους δορυφόρους IRS-1A και IRS-1B, προσφέροντας δεδομένα με χωρική ανάλυση μέχρι 36,5m. Το 1995 εκτοξεύτηκε ο δορυφόρος IRS-1C, που διαθέτει δεδομένα με την υψηλότερη χωρική ανάλυση (5,8m), σε σχέση με δεδομένα άλλων δορυφόρων, που ήταν διαθέσιμα στους χρήστες. Αυτό συνεχίστηκε μέχρι το 1999, οπότε εκτοξεύτηκε από τις ΗΠΑ ο δορυφόρος IKONOS, οποίος διαθέτει δεδομένα με χωρική ανάλυση 1m.

Στην ανίχνευση/καταγραφή των φυσικών διαθεσίμων της Γης συμμετείχαν δραστήρια οι Ιάπωνες με τους δορυφόρους MOS (Marine Observation Satellite) και JERS (Japanese Earth Resources Satellite) και οι Ρώσοι, με αρκετά συστήματα καταγραφής (Kramer 2002, Gupta 2003).

Στις Ρωσικές διαστημικές πτήσεις τοποθετήθηκαν αρχικά φωτογραφικές μηχανές και αργότερα πολυφασματικοί σαρωτές.

Τα πιο γνωστά δορυφορικά Ρωσικά συστήματα, των οποίων τα δεδομένα είναι διαθέσιμα σε μη στρατιωτικούς χρήστες, είναι τα εξής:

α) Το δορυφορικό σύστημα RESURS-F (έφερε φωτογραφικές μηχανές)

β) Το δορυφορικό σύστημα RESURS-O, το πρώτο μη στρατιωτικό σύστημα που μετέφερε σύστημα σαρωτών

Οι καταγραφείς (sensors) των παραπάνω (και άλλων) συστημάτων (δορυφόρων), καθώς και η χωρική ανάλυση των προσφερόμενων δεδομένων φαίνονται στον πίνακα 1.

ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ	ΚΑΤΑΓΡΑΦΕΑΣ	ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ
Χαμηλή (<250m)	SPOT-Vegetation	<1:1.000.000
	NOAA (Meteorological satellite)	
Μέση (80m-180m)	LANDSAT MSS MSU-SK (RESURS-O) IRS-1C/D -WiFS ASTER	1:200.000-1:1.000.000
Υψηλή (5m-30m)	LANDSAT TM/ETM/PAN SPOT-XS/XI/Pan IRS-1C/D-LISS/PAN ERS ENVISAT RADARSAT MSU-E (RESURS-O) KFA-1000 (RESURS-F) MK-4 (RESURS-F) KATE 200 (RESURS-F) TK-350 (RESURS-F/SPIN) ASTER	1:50.000-1:200.000
Πολύ υψηλή (<4m)	IKONOS QUICKBIRD KFA-3000 KVR-1000 (RESURS-F/SPIN)	1:5.000-1:25.000

Πίνακας 1. Χωρική ανάλυση (διακριτική ικανότητα) και χαρτογραφική κλίμακα διαφόρων δορυφορικών δεδομένων (Τροποποιημένος, από τον Buchroithner 1999).

### 3. ΝΕΑΣ ΓΕΝΙΑΣ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΟΛΥ ΥΨΗΛΗΣ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

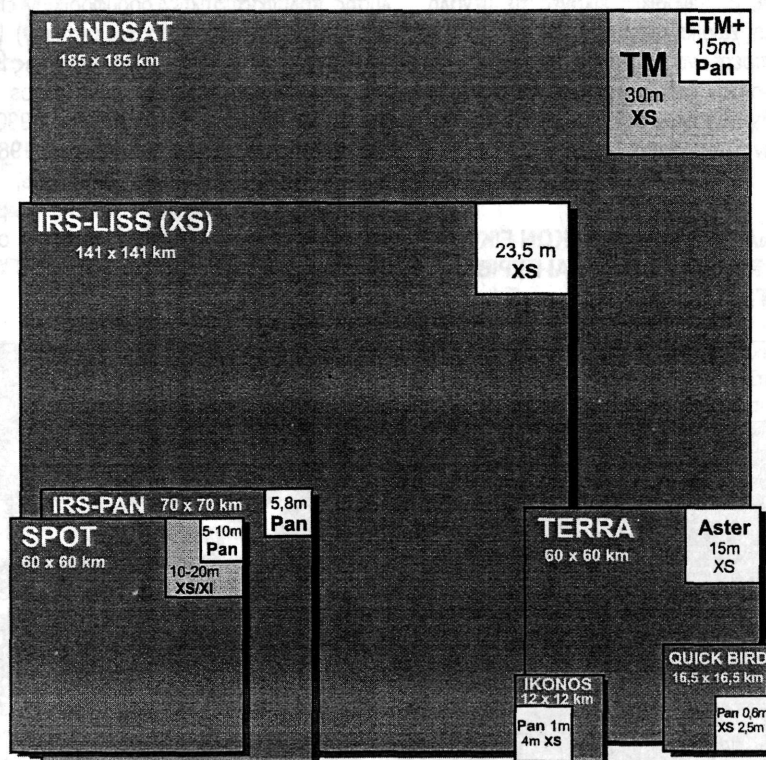
Η ταχύτατη εξέλιξη των εφαρμογών της επιστήμης της πληροφορικής και των επικοινωνιών,

καθώς και οι απαιτήσεις των χρηστών (γεωεπιστημόνων, περιβαλλοντολόγων κ.α.), οδήγησε στην ανάπτυξη νέων δορυφορικών συστημάτων, που προσέφεραν δεδομένα με καλύτερη επαναληψιμότητα (διαχρονική ανάλυση) και χωρική ανάλυση. Αυτά, τα νέας γενιάς

δορυφορικά δεδομένα, προσφέρονται την τελευταία πενταετία από τους εξής δορυφόρους:

A) Από το δορυφόρο (σύστημα) IKONOS (1999). Ο IKONOS διαθέτει πολυφασματικά δεδομένα (XS) χωρικής ανάλυσης 4m και παγχρωματικά δεδομένα χωρικής ανάλυσης 1m.

B) Από το δορυφόρο QuickBird. Ο δορυφόρος αυτός εκτοξεύτηκε το 2001 και διαθέτει πολυφασματικά δεδομένα (XS) χωρικής ανάλυσης 2,5m και παγχρωματικά δεδομένα (Pan) χωρικής ανάλυσης 0,6m (βλ. Εικ. 1)



Εικόνα 1. Περιοχή κάλυψης και χωρική ανάλυση των καταγραφών (sensors) στους κυριότερους δορυφόρους (Η ιδέα για τη σχεδίαση της εικόνας ελήφθη από τον Buchroithner, 1999).

#### 4. ΓΙΑΤΙ ΤΟΣΟΙ ΔΟΥΡΥΦΟΡΟΙ ΑΝΙΧΝΕΥΣΗΣ ΤΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ ΔΙΑΘΕΣΙΜΩΝ;

Σήμερα, υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός δορυφορικών συστημάτων (πάνω από 25). Ο μεγάλος αυτός αριθμός δορυφόρων αναπτύχθηκε για να καλύψει τις ανάγκες όλων των χρηστών.

Έτσι, ένας γεωεπιστήμονας - περιβαλλοντολόγος, ο οποίος ενδιαφέρεται για τη μελέτη χαρακτηριστικών/φαινομένων που καταλαμβάνουν μεγάλη έκταση (π.χ. εκτεταμένες γεωλογι-

κές δομές και ρήγματα), θα χρησιμοποιήσει δορυφόρους που δίνουν εικόνες χαμηλής ή μέσης χωρικής ανάλυσης και μεγάλης επιφανειακής κάλυψης (π.χ. εικόνες LANDSAT).

Αντίθετα, ο επιστήμονας που ενδιαφέρεται για λεπτομερή μελέτη μιας περιοχής (π.χ. καταγραφή φαινομένων διάβρωσης, ή εντοπισμό καταλισθήσεων σε μικροκλίμακα), θα χρησιμοποιήσει δορυφορικές εικόνες υψηλής χωρικής ανάλυσης και μικρής επιφανειακής κάλυψης (π.χ. εικόνες IKONOS, QuickBird).

Για τη μελέτη δυναμικών φαινομένων (π.χ. πλημμυρών) στην επιφάνεια της γης, απαιτούνται δορυφορικές εικόνες με μεγάλη διαχρονική ανάλυση (συχνή επαναληψιμότητα) (π.χ., SPOT, TERRA, IKONOS, QuickBird).

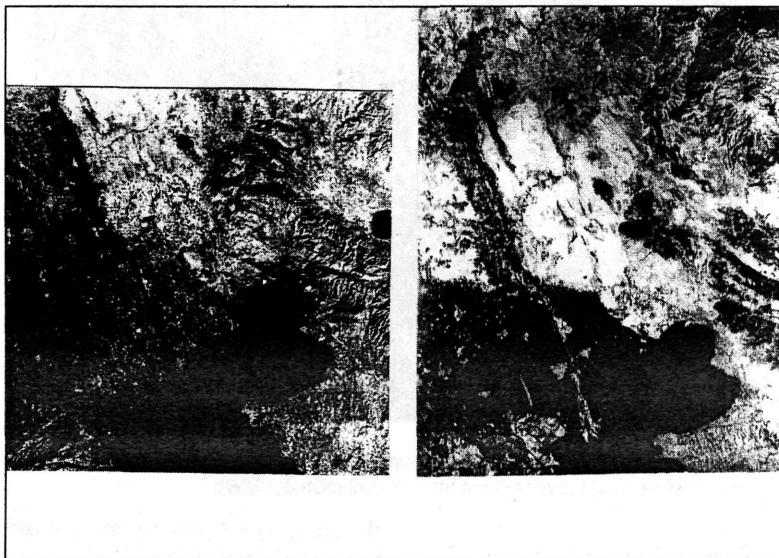
Ομοίως, για τον εντοπισμό εδαφολογικών ενοτήτων σε πεδινές περιοχές απαιτούνται πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες με μεγάλη φασματική και χωρική ανάλυση (π.χ. SPOT-5).

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί, ότι ο κάθε τύπος δορυφορικών δεδομένων δρα συμπληρωματικά και όχι ανταγωνιστικά με τα αντίστοιχα δεδομένα των άλλων δορυφόρων.

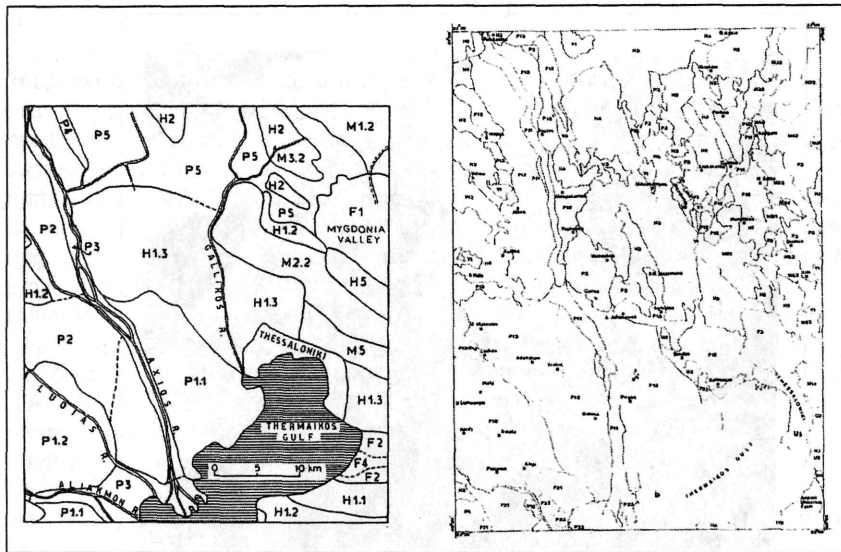
## 5. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΟΥΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΣΤΟΝ ΤΟΜΕΑ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΟΝΤΙΚΗΣ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ

### 5.1 Οπτική ανάλυση δορυφορικών εικόνων LANDSAT και SPOT

Στη δεκαετία του 1980, η δορυφορική έρευνα του Εργαστηρίου Φυσικής Γεωγραφίας προσανατολίσθηκε αρχικά στην ταξινόμηση του αναγλύφου, διαφόρων περιοχών της Ελλάδας. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια της οπτικής ανάλυσης πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων (ασπρόμαυρων και ψευδοχρωματικών) LANDSAT/MSS και TM, ένα μεγάλο τμήμα της Κεντρικής Μακεδονίας (Astaras and Silleos 1984, Silleos and Astaras 1986, Astaras 1990), της Πελοποννήσου (Silleos and Astaras, 1987) και της Θράκης (Astaras and Lambrinos, 1988), ταξινομήθηκε σε διάφορους τύπους γεωμορφολογικών συστημάτων (land complexes or land systems), κλίμακας περίπου 1:250.000 (Εικ. 2 και 3).



Εικόνα 2. Εικόνα LANDSAT-3/MSS (αριστερά) και LANDSAT-5/TM (δεξιά) τμήματος της Κεντρικής Μακεδονίας, στις οποίες βασίστηκε η ταξινόμηση γεωμορφολογικών ενοτήτων (βλ. Εικ. 3) (Silleos and Astaras, 1987).



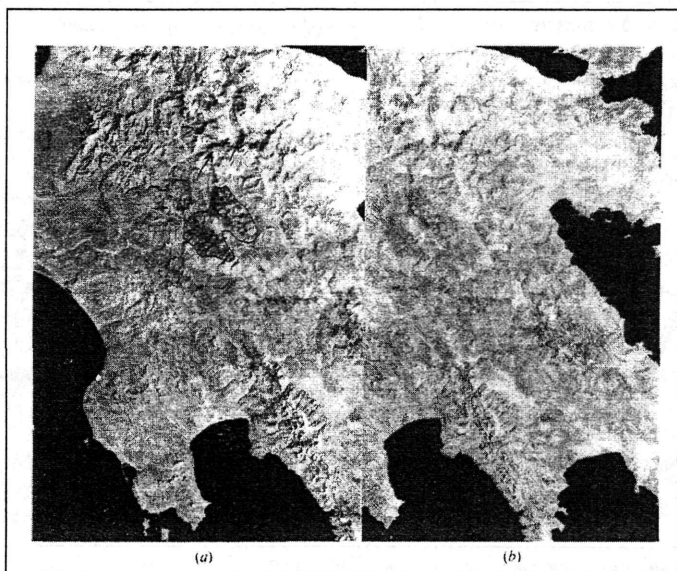
Εικόνα 3. Χάρτης γεωμορφολογικών ενότητων τμήματος της Κεντρικής Μακεδονίας, ο οποίος προήλθε από την ερμηνεία εικόνας LANDSAT-3/MSS (αριστερά) και εικόνας LANDSAT-5/TM (δεξιά) (βλ. Εικ. 2). Στη δεύτερη περίπτωση η ταξινόμηση των γεωμορφολογικών ενότητων είναι λεπτομερέστερη, καθώς βασίζεται σε δορυφορικές εικόνες με βελτιωμένη διακριτική ικανότητα (30m έναντι 80m της πρώτης περίπτωσης) (Silleos and Astaras 1986).

Τα γεωμορφολογικά συστήματα είναι γεωμορφολογικές ενότητες που αναγνωρίζονται στις δορυφορικές εικόνες (LANDSAT, SPOT), από τις συγκεκριμένες «φωτομορφικές ενότητες» (photomorphic units) που απαντούν σε αυτά και οι οποίες είναι περιοχές (πάνω στην εικόνα) με ομοιόμορφη φασματική ταυτότητα (Ackerson and Fish 1985, Astaras 1990). Οι φωτομορφικές ενότητες αναπαριστούν μία περιοχή ή ομάδα περιοχών, οι οποίες παρουσιάζουν την ίδια τοπογραφία-γεωλογία, τα ίδια χαρακτηριστικά εδάφους, βλάστησης και χρήσεις γης (land use) (Astaras 1976, 1984, 1990).

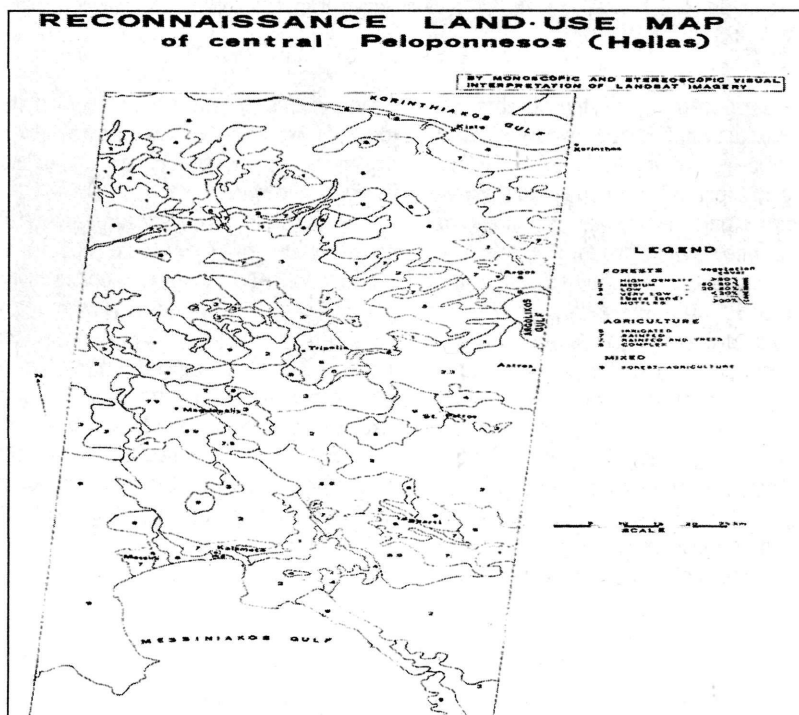
Οι χάρτες που δείχνουν την κατανομή των διαφόρων γεωμορφολογικών συστημάτων σε μία περιοχή, παρουσιάζουν σημαντικό ενδιαφέρον, γιατί αποτελούν τη βάση για την αναθε-

ώρηση-βελτίωση γεωλογικών χαρτών, την κατασκευή λεπτομερέστερων γεωλογικών, γεωμορφο-τεκτονικών, εδαφολογικών και λοιπών θεματικών χαρτών.

Κατά την οπτική ανάλυση (ερμηνεία) των δορυφορικών εικόνων MSS, προέκυψαν ορισμένα προβλήματα ακριβούς οριοθέτησης των γεωμορφολογικών ενότητων, εξαιτίας της χαμηλής χωρικής ανάλυσης των 80m. Μερικά από τα προβλήματα αυτά αντιμετωπίστηκαν με τη στερεοσκοπική ερμηνεία γειτονικών δορυφορικών εικόνων, που παρουσίαζαν αλληλοεπικάλυψη (side-lap), όπως στην περίπτωση των εικόνων MSS της Πελοποννήσου, που παρουσίαζαν αλληλοεπικάλυψη 37,6% (Silleos and Astaras, 1987) (βλ. Εικ. 4 και 5).



Εικόνα 4. Στερεοζεύγος εικόνων LANDSAT-3/MSS: (α) Εικόνα Νοεμβρίου, (β) Εικόνα Αυγούστου (Silleos and Astaras, 1987).



Εικόνα 5. Χάρτης χρήσεων γης της Κεντρικής Πελοποννήσου, ο οποίος κατασκευάστηκε με οπτική μονοσκοπική και στερεοσκοπική ερμηνεία εικόνων LANDSAT-3/MSS (Εικ. 2) (Silleos and Astaras, 1987).



Η έρευνα του Εργαστηρίου προσανατολίστηκε και στην ταχύτερη και ακριβέστερη λήψη μορφομετρικών παραμέτρων των υδρογραφικών συστημάτων (ρεμάτων και λεκανών απορροής) από εικόνες MSS. Από την ποσοτική ανάλυση των υδρογραφικών συστημάτων της περιοχής Ολύμπου-Πιερίων (Astaras, 1985), προερχόμενων από εικόνες MSS, διαπιστώθηκε η σημαντικότερη υπεροχή αυτών έναντι της ίδιας κλίμακας τοπογραφικών χαρτών.

Στη δεκαετία του 1990, όταν οι εικόνες LANDSAT-5/TM και SPOT ήταν διαθέσιμες και σε προσθήκη τιμή για το Εργαστήριό μας, η έρευνα συνεχίστηκε και κατέληξε στην ακριβέστερη οριοθέτηση γεωμορφολογικών συστημάτων και την ποσοτική ανάλυση των υδρογραφικών συστημάτων περιοχών της Κεντρικής Μακεδονίας (βλ. Εικ. 4 και 5) (Silleos and Astaras 1986, Astaras et al. 1990), κλίμακας περίπου 1:100.000, με έμφαση στην οριοθέτηση περιοχών που παρουσιάζουν έντονα φαινόμενα διάβρωσης και τεκτονισμού και την λεπτομερέστερη οριοθέτηση υδρογραφικών συστημάτων.

## 5.2 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνων LANDSAT και SPOT και εφαρμογές στη γεωμορφολογία

Με την απόκτηση και εγκατάσταση συστήματος ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων στο Εργαστήριο Φυσικής Γεωγραφίας (αρχικά με το λογισμικό IDRISI και στη συνέχεια με το λογισμικό EASIPACE), η οπτική ανάλυση και ερμηνεία εικόνων αντικαταστάθηκε από την ψηφιακή επεξεργασία και ανάλυση δορυφορικών εικόνων LANDSAT-5/TM και SPOT/XS.

Από τη ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων LANDSAT και SPOT προέκυψαν τα εξής:

Στην ευρύτερη περιοχή της Μυθονίας λεκάνης, έγινε ο εντοπισμός-οριοθέτηση και χαρτογράφηση των επιφανειών επιπέδωσης λιθολογικών ενοτήτων, ρηγμάτων και περιοχών διάβρωσης και απόθεσης (Astaras and Soulakellis 1990, Σουλακέλλης 1994).

Στην ορεινή περιοχή του Ολύμπου επιτεύχθηκε η ακριβέστερη χάραξη του υδρογραφικού δικτύου, σε σύγκριση με προηγούμενες μελέτες (Astaras and Soulakellis, 1992).

Από την ψηφιακή επεξεργασία διαχρονικών εικόνων TM, στην περιοχή της Σαντορίνης (Astaras et al., 1996a), οριοθετήθηκαν καλύτερα τα όρια γεωμορφολογικών ενοτήτων.

Στην περιοχή της Πίνδου (ευρύτερη περιοχή του Μεσοβίτικου ποταμού) (Astaras et al., 1996b), εντοπίστηκαν περιοχές που κατολήσθησαν στο παρελθόν και περιοχές, οι οποίες είναι επιδεκτικές για κατολήσθηση, με τη βοήθεια διαχρονικών εικόνων TM.

Ομοίως, στην παράκτια περιοχή Ασπροβάλας-Στρυμόνα (Δομακίνης, 2005), χρησιμοποιώντας διαχρονικές εικόνες ASTER, εντοπίστηκαν περιοχές που κατολήσθησαν στο παρελθόν και περιοχές, οι οποίες είναι επιδεκτικές για κατολήσθηση (Εικ. 6 και 7).

Και στις δύο παραπάνω περιπτώσεις ο εντοπισμός των κατολήσθησεων έγινε με τη βοήθεια της διαφορετικής «φασματικής ταυτότητάς» τους και του σχήματός τους, σε σχέση με τις γειτονικές σταθερές περιοχές. Τα αποτελέσματα των εργασιών αυτών χρησιμεύουν στους γεωλόγους-γεωτεχνικούς, οι οποίοι ασχολούνται με κατολήσθητικά φαινόμενα.

Επίσης, από την ψηφιακή επεξεργασία δορυφορικών εικόνων που κάλυπταν το νοτιοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής του Ανθεμούντα ποταμού (Φουρνιάδης 2002, Φουρνιάδης κ.α. 2002), εντοπίστηκαν και χαρτογραφήθηκαν περιοχές με έντονα διαβρωτικά φαινόμενα (gullies) (Εικ. 8 και 9).

Τέλος, κατάλληλα επεξεργασμένες (ενισχυμένες) δορυφορικές ψηφιακές εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για τον εντοπισμό και χαρτογράφηση γραμμώσεων (lineaments), που απαντούν στην ευρύτερη περιοχή της Μυθονίας λεκάνης (Pavlidis and Soulakellis, 1990), δηλαδή πολλαπλών ρηγμάτων τα οποία είναι υπεύθυνα για τη σημερινή εμφάνιση χαρακτηριστικών αναβαθμίδων, απότομων κλιτύων (scarps) και τον έλεγχο των ρευμάτων από την τεκτονική της περιοχής (stream deviations).



Εικόνα 6. Ασπρόμαυρη εκτύπωση ψευδοέγχρωμης εικόνας (2/3, 1/3, 1/2): RGB του TERRA / ASTER, η οποία λήφθηκε στις 1/3/2003. Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε πως στη θέση που υποδεικνύει το ορθογώνιο πλαίσιο στην περιοχή μελέτης Ασπροβάλτας – Στρυμόνα δεν έχει εκδηλωθεί κατολίσθηση (Δομακίνης, 2005).



Εικόνα 7. Ασπρόμαυρη εκτύπωση ψευδοέγχρωμης εικόνας (2/3, 1/3, 1/2): RGB του TERRA / ASTER, η οποία λήφθηκε στις 11/10/2003. Στην εικόνα αυτή παρατηρούμε πως στην ίδια θέση (περιοχή μελέτης Ασπροβάλτας – Στρυμόνα), που υποδεικνύεται από το ορθογώνιο πλαίσιο έχει εκδηλωθεί κατολίσθηση. Αυτό γίνεται αντιληπτό από τη μεταβολή της γεωμετρίας του σχήματός της. Στην περιοχή αυτή δεν μπορούμε να διακρίνουμε τους δρόμους γιατί δεν είχαν ακόμη οδοστρωθεί (Δομακίνης, 2005).



Εικόνα 8. Κατάλληλα επεξεργασμένη δορυφορική εικόνα LANDSAT-5/TM (Δείκτης Βλάστησης-Φυτοκάλυψης NDVI), του ΝΔ τμήματος της λεκάνης του Ανθεμούνα, που καλύπτεται από φαμμινικά ιζήματα και ερυθροπηλούς. Στην εικόνα με ανοικτό τόνο είναι οι περιοχές στις οποίες απαντούν έντονα διαβρωτικά φαινόμενα (gullies) (βλ. Εικ.9) (Φουρνιάδης κ.α., 2002).



Εικόνα 9. Φωτογραφία περιοχής, στο ΝΔ τμήμα της λεκάνης του Ανθεμούντα, με έντονα διαβρωτικά φαινόμενα (Φουρνιάδης κ.α., 2002).

## 6. ΣΥΖΗΤΗΣΗ-ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τη σύντομη περιγραφή των δορυφόρων ανίχνευσης των φυσικών διαθεσίμων της Γης, της διαθεσιμότητας των πολυφασματικών ψηφιακών δεδομένων (εικόνων) την τελευταία 30ετία και των διαφόρων εφαρμογών τους στη γεωλογία-γεωμορφολογία, διαπιστώνονται τα εξής:

Αύξηση της ραδιομετρικής ευαισθησίας των καταγραφών (σαρωτών) από 64 (MSS) σε 256 (TM, SPOT κ.α.) διαβαθμίσεις του τεφρού χρώματος.

Αύξηση των φασματικών ζωνών τους από 4 (MSS) σε 14 (ASTER) και πλέον [υπερφασματικά (hyperspectral) συστήματα].

Αύξηση της χωρικής ανάλυσής τους από 80m (MSS) σε 0,61m (QuickBird).

Μείωση του χρόνου επαναληψιμότητας (repetition rate).

Μείωση του κόστους των δορυφορικών δεδομένων.

Διάθεση DEM ακρίβειας 15-30m, τα οποία προκύπτουν από τη συμβολομετρία (αποστολές SRTM και ERS Tandem Mission), που σε συνδυασμό με τις πολυφασματικές εικόνες δίδουν πληρέστερη απεικόνιση του αναγλύφου.

Διάθεση δορυφορικών δεδομένων από πλάγιες λήψεις, για στερεοσκοπική παρατήρηση.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά και οι βελτιώσεις των δορυφορικών δεδομένων, συνδυαζόμενα με τη ραγδαία εξέλιξη των τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνων, που βελτιώνουν-ενισχύουν τις εικόνες, ανάλογα με τις απαιτήσεις του χρήστη (Gupta 2003, Vaioroulos et al. 2004), τα κάνουν να υπερέχουν έναντι των δεδομένων των φωτογραφικών συστημάτων.

Η χρήση των ψηφιακά ενισχυμένων πολυφασματικών δορυφορικών εικόνων προσφέρει στους γεωεπιστήμονες τη δυνατότητα, να εξερευνούν και να καταγράφουν τα φυσικά διαθέσιμα της Γης και να παρακολουθούν περιοδικά

το στατικό και δυναμικό περιβάλλον αυτής (Sabins 1997, Prost 2001).

Έτσι, ο εντοπισμός των γεωμορφολογικών ενότητων και των υδρογραφικών δικτύων γίνεται εύκολα, καθότι οι μορφές αυτές του αναγλύφου αποτελούν τα πιο ευκρινή στοιχεία, που μπορούν να φανούν κατά την ανάλυση και ερμηνεία των δορυφορικών εικόνων. Οι γεωμορφολογικές αυτές ενότητες και τα υδρογραφικά δίκτυα, σε συνδυασμό με τις σύγχρονες τεχνικές των Γ.Σ.Π., είναι πολύ χρήσιμες, γιατί αποτελούν τη βάση για την κατασκευή ίδιας κλίμακας χαρτών, όπως γεωλογικών, χρήσεων γης, διαβρωσιμότητας εδαφών, επιδεκτικότητας σε κατολισθήσεις, κλπ (Φουρνιάδης κ.α. 2002, Δομακίνης 2005). Επίσης, χρησιμοποιούνται για την αναθεώρηση παλαιών θεματικών χαρτών (π.χ. γεωλογικοί-γεωμορφολογικοί, τοπογραφικοί), που κατασκευάστηκαν στο παρελθόν με άλλες τεχνικές (Nikolakopoulos et al. 2004).

Με τη διαχρονική παρακολούθηση του περιβάλλοντος, από δορυφορικές εικόνες, εντοπίζονται-καταγράφονται οι διάφορες αλλαγές και υποβαθμίσεις του (Nikolakopoulos et al. 2005), οπότε δίδεται η δυνατότητα στον άνθρωπο να λάβει τα σωστά, αποτελεσματικά μέτρα προστασίας, αποκατάστασης, αξιοποίησης και ορθολογικής διαχείρισης του περιβάλλοντος.

## BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ackerson, V. and Fish, E., 1985. *An evaluation of landscape units. In: The Surveillance Science: Remote Sensing of the Environment*, second edition, R. Holz (Editor), Wiley & sons Inc., New York, pp. 77-89.
- Astaras, Th., 1976. *A geomorphological approach to Natural Resources Surveys in the Mula area, Murcia, Southeast Spain*. Unpublished thesis for Master of Science in Applied Geomorph., Sheffield Univ., England.
- Astaras, Th., 1984. *Land complex classification of the Mula area, Murcia Province, Southeast Spain*. *Geografiska annaler*, 66A, 4, pp. 307-325.
- Astaras Th., 1985. *Drainage network analysis of LANDSAT images of the Olympus-Pieria mountain area, northern Greece*. *Intern. Journal of Remote Sensing (U.K.)*, 6, 673-686.
- Αστάρας, Θ., 1986. *Τηλεπισκόπησης Γεωπιστήμες Πανεπιστημιακές σημειώσεις*, Α.Π.Θ. Υπηρεσία Δημοσιευμάτων, 200 σελ.
- Astaras, Th., 1990. *The contribution of LANDSAT Thematic Mapper imagery to geological and geomorphological reconnaissance mapping in the mountain area of Kerkini - SW part of Rhodope massif and the surrounding plains (Hellenic - Bulgarian borders)*. Ανακοινώθηκε στο "2nd Hellenic-Bulgarian Symposium on the Geological and Physiological problems of the Rhodope Massif", Thessaloniki, October, 1989, GEOGRAPHICA RHODOPICA, volume 2, pp. 104-114.
- Astaras Th, 1994. *The present state of Remote Sensing applications to geological science in Greece*. *International Journal of Remote Sensing*, vol.15 (6), 1251-1258.
- Astaras Th. and Lambrinos N., 1988. *Land classification of part of Thrace (East Rhodope) by visual interpretation of MSS images of First and Second generation LANDSAT images*. *GeoJournal (F.R.G.)*, 17.3, 357-363.
- Astaras Th, and N. Silleos, 1984. *Land classification of part of Central Macedonia (Greece) by the use of Remote Sensing techniques*. *International Journal of Remote Sensing (U.K)* 5 (1), 289-302.
- Astaras, Th. and Soulakellis, N., 1990. *Landsat-TM data enhancement techniques for mapping geological and geomorphological features in Central Macedonia Area, N.Greece*. *Proceedings of IESCA-1990, (International Earth Sciences Congress on Aegean Regions), Izmir, Turkey, volume II, Tectonic Section*, pp. 76-91.
- Astaras, Th. and Soulakellis, N., 1992. *Contribution of digital image analysis techniques on Landsat-5 TM imageries for drainage network delineation. A case study from the Olympus mountain, W. Macedonia, Greece*. *Proceedings of the 18th Annual Conference of the Remote Sensing Society*, 15-17 September 1992, pp. 163-172.

- Astaras Th., Lambrinos N. and N. Soulakellis., 1990. *A drainage system analysis evaluation of, and comparison between, LANDSAT-3 RBV, LANDSAT-5 TM and SPOT PA image-ries covering the Central Macedonia district, Greece*". International Journal of Remote Sensing, vol.11, 1549-1560.
- Astaras, Th., Lambrinos, N., Soulakellis, N., 1996a. *Multitemporal monitoring of the Santorini volcano by the use of the short and thermal infrared images of Landsat -5 TM*. Proceedings of International Symposium of IAEG, Athens, June 23-27, 1997. Balkema Publications, Rotterdam / Brookfield (in print).
- Astaras T., Lambrinos, N., Soulakellis, N., Oikonomidis, D., Kalathas, A., 1996b. *Delineation of landslides usiging digital image processing techniques on multitemporal TM image-ries and GIS. A case study from the Pindus mountainous area, Greece*. Proceedings of the 16th EARSeL Congress, Malta, Edited by A. Spiteri, Balkema Publications, Rotterdam / Brookfield, 1997, pp. 215-222 and 360 (color plate).
- Astaras, T., Oikonomidis, D., Lambrinos, N., Filippidis, A., Dimopoulos, G., 1996. *Environmental monitoring of the Straton-Stratoniki area, Chalkidiki, Greece, using LANDSAT /TM digital imageries*. Proceedings of the 16th EARSeL Congress, Malta, Edited by A. Spiteri, Balkema Publications, Rotterdam / Brookfield, 1997, pp. 145-149.
- Buchroithner, M., 1999 (Editor). *Remote Sensing for Environmental Data in Albania: A strategy for integrated Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, NATO Science Series 2, Vol. 72, 241p.
- Δομακίνης, Χρ., 2005. *Η χρήση της Τηλεπισκό-πησης και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών στη χαρτογράφηση κατολι-σθήσεων στην παράκτια περιοχή Στρυμωνι-κού κόλπου - Καβάλας*. Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 131 σελ.
- Gupta, R. P., 2003. *Remote Sensing Geology*. Second edition, Springer, Berlin, 655 p.
- Kramer, H. J., 2002. *Observation of the Earth and Its Environment*. 4<sup>th</sup> edition, Springer, Berlin, 1510p.
- Nikolakopoulos, K. G., Vaiopoulos, D. A., and Skianis, G. A., 2004: *Monitoring the changes of the lower Alfios River Basin with multisensor satellite data*. In Chatzipetros A.A. and Pavlides S.B. (editors): Proceedings of the 5th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Thessaloniki, Greece, 14-20 April 2004, pp 724-725.
- Nikolakopoulos, K., Vaiopoulos, D., Skianis, G. Aim., 2005: *Monitoring the environmental changes at Lefkas Island using remote sensing data and GIS techniques*. Proc. SPIE Vol.5983, 299-308, Remote Sensing of Environmental Monitoring, GIS Applications and Geology V; Manfred Ehlers, Ulrich Michel; Eds.
- Pavlides, S. and Soulakellis, N., 1990. *Multifrac-tured seismogenic area of Thessaloniki 1978 earthquacke (Northern Greece)*. Proceed-ings of IESCA-1990 (International Earth Sci-ences Congress on Aegean Regions), Izmir, Turkey, volume II, Tectonic Section, pp. 64-74.
- Prost, G.L., 2001. *Remote Sensing for Geolo-gists. A Guide to Image Interpretation*. Sec-ond edition, Taylor and Francis, New York, 374 p.
- Sabins, F.F., 1997: *Remote Sensing. Principles and Interpretation*. Third edition, W.H. Free-man and Co., New York, 494 p.
- Silleos N. and Astaras Th., 1986. *Land classifi-cation for terrain resources using SGEOS images. An example from Thessaloniki-Kilkis area (Greece)*. Meeting of the I.G.O., Work-ing Group Landscape Synthesis Banyoles, August 1986, Monographies d'I'EQUIPE, 2, Universitat de Barcelona, Barcelona 1986.
- Silleos N. and Astaras Th., 1987. *Terrain re-sources survey by visual monoscopie and stereoscopic interpretation of FGEOs im-ages*. International Journal of Remote Sens-ing (U.K.), 8 (9), 1335-1348.
- Σουλακέλλης, Ν., 1994. *Συμβολή της ανάλυσης δορυφορικών εικόνων Landsat-5/TM και των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφο-ριών στην τεκτονική γεωμορφολογία περιο-*

- χών του Βορειοελλαδικού Χώρου. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., 219 σελ.
- Vaioroulos, D. A., Skianis, G. A., Nikolakopoulos, K., 2004: *The contribution of probability theory in assessing the efficiency of two frequently used vegetation indices*. International Journal of Remote Sensing, 25 (20), 4219-4236.
- Φουρνιάδης, Ι., 2002. Γεωμορφολογική και περιβαλλοντική εξέλιξη της κοιλάδας του Ανθεμούντα, με τη χρήση μεθόδων GIS και Τηλεπισκόπησης. Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., 121 σελ.
- Φουρνιάδης, Ι., Οικονομίδης, Δ. και Αστάρης, Θ., 2002. Εντοπισμός περιοχών επιδεκτικών σε διάβρωση, με τη βοήθεια των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (GIS) και της Τηλεπισκόπησης. Ένα παράδειγμα από την υδρογραφική λεκάνη του Ανθεμούντα. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου, Τόμος II, σελ. 273-280.