

## ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΗ ΧΡΗΣΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΙ ΓΕΩΦΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΥΠΟΣΤΗΡΙΞΗ ΤΗΣ ΕΝΙΑΙΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ: ΤΟ ΕΡΓΟ REALDEMS

Χρυσουλάκης Ν.<sup>1</sup>, Φείδας Χ.<sup>2</sup>, Βελιανίτης Δ.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ίδρυμα Τεχνολογίας και Έρευνας, Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών,

<sup>2</sup>Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Μετεωρολογίας - Κλιματολογίας,

<sup>3</sup>PLANO A.E.

### Περίληψη

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα του έργου REALDEMS, στα πλαίσια του οποίου παρήχθησαν ψηφιακά μοντέλα εδάφους και θεματικοί χάρτες κάλυψης γης για τις περιοχές της Κρήτης και της Λέσβου. Τα προϊόντα αυτά παρήχθησαν με χρήση δορυφορικής τεχνολογίας και συγκεκριμένα με τηλεπισκοπικά δεδομένα του ραδιομέτρου ASTER (Advance Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer), δεδομένα του παγκόσμιου συστήματος προσδιορισμού θέσης, καθώς και επιτόπιων παρατηρήσεων. Τα ψηφιακά μοντέλα εδάφους προέκυψαν με εφαρμογή φωτογραμμετρικών μεθόδων σε στερεοζεύγη εικόνων ASTER. Η ακρίβεια των ψηφιακών μοντέλων εδάφους που παρήχθησαν ήταν της τάξης των 15 – 20 m. Οι θεματικοί χάρτες κάλυψης του εδάφους παρήχθησαν με εφαρμογή μεθόδων επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε πολυφασματικά δεδομένα ASTER. Επιτόπιες παρατηρήσεις καθόρισαν τις φασματικές υπογραφές σε δεδομένες περιοχές εκπαίδευσης για την πραγματοποίηση της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια του έργου για το χαρακτηρισμό λεκανών απορροής στις παραπάνω περιοχές με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών. Συνεπώς, αναμένεται να αποτελέσουν πολύτιμο εργαλείο για την υποστήριξη της διαχείρισης των υδάτινων πόρων στις περιοχές εφαρμογής.

### COMBINED USE OF REMOTE SENSING AND GIS TO SUPPORT INTEGRATED WATER MANAGEMENT: THE REALDEMS PROJECT.

Chrysoulakis N.<sup>1</sup>, Feidas H.<sup>2</sup>, Velianitis D.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Foundation for Research and Technology – Hellas,  
Institute of Applied and Computational Mathematics

<sup>2</sup>Aristotle University of Thessaloniki, Department of Geology, Division of Meteorology - Climatology

<sup>3</sup>PLANO S.A.

### Abstract

In this study, the methodology and results of the project REALDEMS (REmote sensing Application for Land cover and DEMs Service) are presented. This project aimed at providing accurate DEM and land cover databases for Greek islands, capable of being used in local studies. ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) images were used in combination with Global Positioning System (GPS) data and field observations. A digital stereo correlation approach was applied to produce DEM from ASTER stereo pairs, whereas supervised classification techniques were applied for land cover mapping. Three main stages were planned in REALDEMS: In the first stage, ASTER images were pre-processed and the field measurements and observations were performed. The second stage included all remote sensing analysis tasks, whereas the third stage was related to GIS analysis and validation of results, in terms of application of the produced DEM and land

cover for watershed characterization. This type of application had been selected because of the great importance of water resources for Greek islands. Thus, REALDEMS also aimed at introducing satellite remote sensing data and methodologies in support of local level watershed management providing also valuable information to hydrological modelling.

**Λέξεις κλειδιά:** Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους, Χάρτης Κάλυψης Γης, Υδρολογικές Εφαρμογές.

**Key words:** Digital Elevation Model, Land Cover Map, Hydrological Applications.

## 1. Εισαγωγή

Η ορθολογική εκμετάλλευση και η ενιαία διαχείριση των υδατικών πόρων επιβάλλει την αντιμετώπιση του νερού συνολικά ως φυσικού πόρου και ως φυσικού αγαθού. Για το λόγο αυτό θεσπίστηκε πλαίσιο κοινοτικής δράσης στο πεδίο της πολιτικής υδάτων (Οδηγία 2000/60/ΕΚ). Η οδηγία αυτή καθιερώνει την διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού και ορίζει ότι εντός της λεκάνης θα εξασφαλίζεται έτσι η διοικητική διάρθρωση ώστε να διασφαλίζει τη συνολική διαχείριση των υδάτων που ανήκουν στο ίδιο οικολογικό και υδρογεωλογικό σύστημα, είτε τα ύδατα αυτά είναι παρόντα ως υπόγεια, είτε ως επιφανειακά ύδατα. Συνεπώς, η οδηγία απαιτεί ολοκληρωμένο υδατικό σχεδιασμό ανά ποτάμια λεκάνη.

Η δημιουργία βάσεων δεδομένων που είναι απαραίτητες για την εφαρμογή της Οδηγίας απαιτεί τη χρήση σύγχρονων τεχνικών για την εκτίμηση χωρικών κατανομών φυσικών παραμέτρων καθώς και εργαστηριακών αναλύσεων για τον εντοπισμό χημικών ουσιών σε νερό και έδαφος. Στην πρώτη κατεύθυνση έρχεται να συμβάλει το έργο REALDEMS (REmote sensing Application for Land cover and Digital Elevation Models Service), το οποίο εκπονήθηκε με χρηματοδότηση της Γενικής Γραμματείας Έρευνας και Τεχνολογίας από το Ίδρυμα Τεχνολογίας, το Jet Propulsion Laboratory της NASA, το Πανεπιστήμιο Αιγαίου και την εταιρεία PLANO Α.Ε. Στόχος του έργου ήταν να εισάγει και να διαχύσει στην ελληνική επιστημονική κοινότητα τεχνολογία σχετική με την εφαρμογή σύγχρονων δορυφορικών τεχνικών για την παραγωγή ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DEM: Digital Elevation Model) και θεματικών χαρτών κάλυψης γης σε τοπικό επίπεδο για την υποστήριξη τόσο του χαρακτηρισμού λεκανών απορροής, όσο και της εφαρμογής υδρολογικών μοντέλων, εφόσον για το χαρακτηρισμό, απαιτείται η γνώση της τοπογραφίας (DEM) και της κάλυψης του εδάφους (land cover), ενώ και τα δύο αυτά προϊόντα αποτελούν δεδομένα εισαγωγής για τα υδρολογικά μοντέλα (Chrysoulakis et al., 2003; 2004; Nikolakopoulos et al., 2006).

Το ραδιόμετρο ASTER (Advance Spaceborn Thermal Emission and Reflection Radiometer), καλύπτει μία ευρεία φασματική περιοχή από το ορατό μέχρι το θερμικό υπέρυθρο με 14 φασματικές ζώνες υψηλής χωρικής διακριτικής και ραδιομετρικής ικανότητας (Abrams, 2000). Το υποσύστημα ορατού - εγγύς υπέρυθρου του ASTER, το οποίο αποτελείται από 3 φασματικές ζώνες που κατοπτεύουν στο ναδίρ και μία επιπλέον η οποία κατοπτεύει προς τα πίσω, παρέχει στερεοσκοπική κάλυψη κατά μήκος της τροχιάς (along track). Στην διανυσματική απεικόνιση (push broom), την οποία χρησιμοποιεί το σύστημα ASTER, κάθε γραμμή της εικόνας έχει το δικό της προοπτικό σημείο. Η θέση και ο προσανατολισμός της πλατφόρμας λήψης μπορεί να προσδιοριστεί και να περιγραφεί από 6 παραμέτρους, που όλες επηρεάζουν τη γεωμετρία της εικόνας. Οι παράμετροι αυτές είναι οι καρτεσιανές συντεταγμένες της θέσης της πλατφόρμας και οι τρεις γωνίες στροφής της. Πέραν των ανωτέρω παραγόντων, υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την γεωμετρία της εικόνας, όπως η ταχύτητα της πλατφόρμας και το ανάγλυφο του εδάφους. Κατά κανόνα οι διάφορες πηγές γεωμετρικών παραμορφώσεων των εικόνων μπορούν να συνοψιστούν στις παραμορφώσεις που οφείλονται στον παρατηρητή και στις παραμορφώσεις που οφείλονται στο αντικείμενο παρατήρησης (Toutin, 2004). Οι παραμορφώσεις αυτές απαιτούν μαθηματικά μοντέλα για την διόρθωσή τους τα οποία περιγράφουν τη σχέση του συστήματος αναφοράς της εικόνας με το γεωδαιτικό σύστημα. Υπάρχουν διαφόρων ειδών μοντέλα και αλγόριθμοι που έχουν αναπτυχθεί για το σκοπό αυτό (Toutin, 2001), όμως τα πιο

ακριβή είναι τα φυσικά μοντέλα, τα οποία προσομοιώνουν την τροχιά του δορυφόρου, τη γεωμετρία και την απόδοση των οπτικών συστημάτων του, λαμβάνοντας υπόψη τις επικρατούσες συνθήκες κατά τη διάρκεια λήψης ενός στερεοζεύγους. Σε κάθε περίπτωση θα πρέπει να καθοριστεί με ακρίβεια ο εσωτερικός και ο εξωτερικός προσανατολισμός για την επίλυση των εξισώσεων του αερο-τριγωνισμού, να υπολογιστεί η επίδραση που έχουν στη στερεοσκοπική παράλλαξη οι προαναφερθέντες παράμετροι μέσω της προσομοίωσης του φυσικού μοντέλου και να γίνει μετασχηματισμός σε κατάλληλο σύστημα αναφοράς στο οποίο η στερεοσκοπική παράλλαξη θα είναι συνάρτηση μόνο της επίδρασης του αναγλύφου, συνεπώς θα μπορεί να υπολογιστεί από αυτήν το υψόμετρο για κάθε εικονοστοιχείο (Toutin, 2001).

Για την παραγωγή DEM από εικόνες ASTER χρησιμοποιούνται δεδομένα Επιπέδου 1 (Fujisada, 1998). Κάθε στερεοζεύγος περιλαμβάνει εικόνες που έχουν ληφθεί στα φασματικά κανάλια του εγγύς υπερύθρου με κατακόρυφη και με προς τα πίσω λήψη τα οποία παρέχουν με τον τρόπο αυτό στερεοσκοπική κάλυψη. Η ακρίβεια των τελικών προϊόντων εξαρτάται από τις παραμορφώσεις της εικόνας, την ακρίβεια του εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού, την αξιοπιστία της διαδικασίας συσχέτισης και την ακρίβεια και την πυκνότητα των επίγειων σημείου ελέγχου και την αναλογία βάση προς ύψος του υποσυστήματος ορατού – εγγύς υπερύθρου του ASTER (Lang and Welch, 1999). Για την κατά μήκος της τροχιάς κατόπτευση του συστήματος ASTER υπάρχει μια σταθερή αναλογία βάση προς ύψος και η διαφορική παράλλαξη που υπολογίζεται με τη διαδικασία της στερεοταύτισης, είναι ανάλογη του υψομέτρου. Οι τεχνικές στερεοταύτισης καθορίζουν την αντιστοιχία μεταξύ δύο περιοχών της εικόνας εξετάζοντας την ομοιότητα των ψηφιακών τιμών τους. Οι πιο γνωστές μέθοδοι αυτής της κατηγορίας είναι ο αλγόριθμος διασυσχετισμού (cross correlation) και ο αλγόριθμος συσχετισμού ελαχίστων τετραγώνων (least square correlation). Οι αλγόριθμοι αυτοί χρησιμοποιούν παράθυρα συσχέτισης που αποτελούνται από ομάδες εικονοστοιχείων (π.χ. τετράγωνα παράθυρα 3x3, 5x5 ή 7x7 εικονοστοιχείων) και τα χαρακτηριστικά των οποίων χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό ομοειδών αντικειμένων στην επιφάνεια της γης που μπορούν να διακριθούν και στις δύο εικόνες. Πρακτικά, υπολογίζεται ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ του παραθύρου αναφοράς και κάθε παραθύρου αναζήτησης και εκείνο για το οποίο ο συντελεστής παρουσιάζει μέγιστο αντιστοιχείται στο παράθυρο αναφοράς (Toutin, 2001; Leica, 2002; PCI, 2003; Radhika et. al., 2007).

Η κάλυψη του εδάφους, όπως έχει δείχθει σε πολλές εργασίες, μπορεί να προκύψει από ανάλυση δορυφορικών καταγραφών με εφαρμογή μεθόδων φασματικής ταξινόμησης (Haack et al., 1987; Gong and Howarth, 1990; Bastin, L., 1997; Ridd and Liu 1998; Vogelmann et al., 1998; Stefanov et al., 2001; Chrysoulakis, 2003). Στις περισσότερες από τις παραπάνω εργασίες, επιχειρείται ταξινόμηση με βάση την ψηφιακή τιμή κάθε εικονοστοιχείου, ωστόσο, η τεχνική αυτή δεν είναι πάντα αξιόπιστη σε ανομοιογενείς επιφάνειες με μικρή χωρική διάσταση στοιχείων (Foody, 2000; Kontoes et al., 2000).

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα του έργου REALDEMS και συγκεκριμένα τα DEM και οι θεματικοί χάρτες κάλυψης γης που δημιουργήθηκαν με βάση στερεοσκοπικά και πολυφασματικά δεδομένα του ραδιομέτρου ASTER για τις περιοχές της Κρήτης και της Λέσβου. Τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια για το χαρακτηρισμό λεκανών απορροής στις παραπάνω περιοχές με χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ).

## 2. Μεθοδολογία

Για τη δημιουργία των DEM από στερεοζεύγη εικόνων ASTER χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις φωτοσταθερών σημείων στο πεδίο (GCPs: Ground Control Points) με τη βοήθεια διαφορικού GPS (Global Positioning System) το οποίο διαθέτει το ΙΤΕ. Για τη συλλογή των GCPs αρχικά έγινε η επιλογή των περιοχών στις οποίες θα λαμβάνονταν οι μετρήσεις. Στη συνέχεια προσδιορίστηκαν οι περιοχές αυτές στις εικόνες ASTER και εντοπίστηκαν σε αυτές διακριτά και εμφανή σημεία. Τα σημεία αυτά θα έπρεπε να είναι προσεχτικά επιλεγμένα έτσι

ώστε αργότερα να μπορούν να προσδιοριστούν στην εικόνα με ακρίβεια ενός εικονοστοιχείου. Παραδείγματα τέτοιων σημείων είναι: Διασταυρώσεις δρόμων, φάροι, λιμενοβραχίονες, γέφυρες ποταμών, απότομες στροφές κ.α.

Η εξαγωγή του DEM βασίστηκε στην αρχή του υπολογισμού του υψομέτρου μέσω της στερεοσκοπικής παράλλαξης. Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του παραγόμενου DEM χρησιμοποιήθηκαν τριγωνομετρικά σημεία. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Orthoengine της PCI Geomatics (PCI, 2003) το οποίο διαθέτει φυσικό μοντέλο για το σύστημα ASTER. Το μοντέλο αυτό που χρησιμοποιείται για την αντιστοίχιση - σύνδεση των εικονοστοιχείων των εικόνων με τα αντίστοιχα σημεία στο έδαφος (υπολογισμός εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού), είναι ένα αυστηρό τροχιακό μοντέλο για την εξισορρόπηση και διόρθωση παραμορφώσεων της εικόνας που οφείλονται στη γεωμετρία των αισθητήρων, στην τροχιά του δορυφόρου, και στις μεταβολές του ύψους, του σχήματος της γης, της στροφής και του ανάγλυφου. Το μοντέλο επιλύθηκε αριθμητικά για κάθε προβολικό κέντρο, κάθε σκηνής ASTER με τη χρήση οριακών συνθηκών που προέκυψαν από τα GCPs.

Σημαντικό τμήμα της διαδικασίας, μετά την συλλογή των GCPs ήταν η σαφής αναγνώριση του αντίστοιχου εικονοστοιχείου και ο προσδιορισμός των συντεταγμένων του. Κατά την προσθήκη των σημείων υπήρχε η δυνατότητα ταυτόχρονου υπολογισμού του μαθηματικού μοντέλου, οπότε μπορούσε να εκτιμηθεί η ποιότητα των σημείων που εισάγονταν κάθε φορά. Ο έλεγχος αυτός, πραγματοποιούνταν με βάση τα υπολειμματικά σφάλματα (residual errors). Τα υπολειμματικά σφάλματα αποδίδουν τη διαφορά μεταξύ της θέσης (εικονοσυντεταγμένες) που δηλώθηκε ένα συγκεκριμένο GCP σε μια συγκεκριμένη εικόνα, και της θέσης που υπολογίζει για αυτό το σημείο, το μοντέλο, μέσω της τεχνικής συνόρθωσης κατά δέσμες (bundle adjustment) την οποία χρησιμοποιεί. Η τεχνική αυτή αναζητεί την καλύτερη δυνατή θέση κάθε εικονοστοιχείου σε μια εικόνα, χρησιμοποιώντας όλα τα σημεία, καθώς και τα στοιχεία εσωτερικού και εξωτερικού προσανατολισμού. Το κριτήριο για την επίλυση αυτή είναι η ελαχιστοποίηση του αθροίσματος των τετραγώνων των υπολειμματικών σφαλμάτων. Όταν ο προσανατολισμός και η θέση του αισθητήρα έχουν αναγνωρισθεί, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ακριβή διόρθωση της εικόνας από γνωστές παραμορφώσεις. Με την προσθήκη νέων GCPs, επανακαθορίζεται η λύση του μαθηματικού μοντέλου με αποτέλεσμα να προκύπτουν περισσότερο ακριβή αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, μετά τον καθορισμό των παραμέτρων του φυσικού μοντέλου για κάθε σκηνή ASTER, ο υπολογισμός της στερεοσκοπικής παράλλαξης επιτελέστηκε στο χώρο των επιπολικών εικόνων. Οι επιπολικές εικόνες είναι στερεοζεύγη εικόνων που προκύπτουν με την επαναπροβολή του αρχικού στερεοζεύγους, ώστε οι δύο εικόνες να έχουν κοινό προσανατολισμό. Ο λόγος για τον οποίο χρησιμοποιούνται επιπολικές εικόνες είναι για τη διευκόλυνση του αλγόριθμου στερεοαύτισης. Η επαναπροβολή αυτή πραγματοποιείται με τη συνθήκη κάθε σημείο στην επιφάνεια της γης το οποίο κατοπτεύεται και τα αντίστοιχα είδωλά του σε κάθε εικόνα του στερεοζεύγους να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο (επιπολικό επίπεδο). Η ανίχνευση για ομοειδή αντικείμενα πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια παραθύρων συσχέτισης. Συνεπώς η στερεοσκοπική παράλλαξη υπολογίστηκε στο χώρο των επιπολικών εικόνων από τη διαφορά θέσης ομοειδών εικονοστοιχείων ως προς το κεντρικό, επομένως το υψόμετρο σε κάθε σημείο εξάχθηκε από την επικαλυπτόμενη περιοχή μεταξύ των επιπολικών εικόνων. Σε κάποιες περιπτώσεις υπήρχαν περιοχές των εικόνων στις οποίες απέτυχε η συσχέτιση. Ως τιμή ασυσχέτιστου εικονοστοιχείου (εικονοστοιχείο για το οποίο απέτυχε η διαδικασία συσχέτισης) δόθηκε η τιμή -9999. Η αποτυχία συσχέτισης ενδεχομένως να οφειλόταν, σε ατμοσφαιρικές παρεμβολές (σύννεφα), σκιές λόγω ανάγλυφου, υδάτινες μάζες (φράγματα, λίμνες), πυκνές αστικές περιοχές, λατομικές ζώνες και στην ακτογραμμή. Για τις περιοχές αυτές το υψόμετρο στο τελικό DEM υπολογίστηκε με χωρική παρεμβολή.

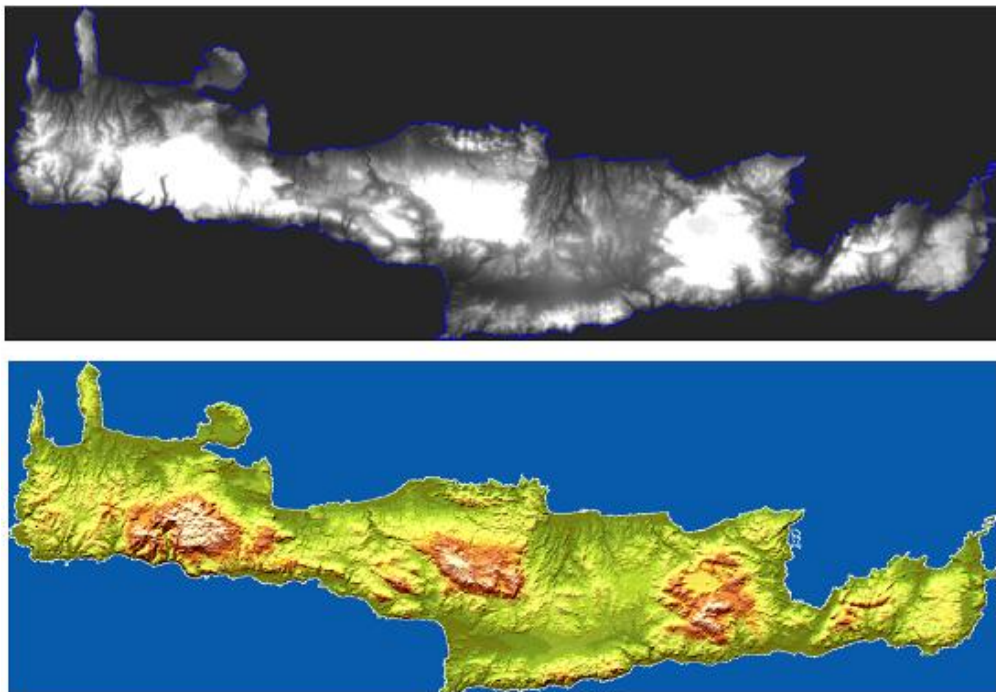
Για την αξιολόγηση των παραγόμενων DEM χρησιμοποιήθηκαν τριγωνομετρικά σημεία της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού από χάρτες 1:5000, καθώς και σημεία ελέγχου που συλλέχθηκαν στο πεδίο και δεν χρησιμοποιήθηκαν ως GCPs. Η αξιολόγηση στηρίχθηκε στην

σύγκριση των υψών των τριγωνομετρικών σημείων με τα ύψη των αντίστοιχων σημείων του DEM. Λόγω της μεθοδολογίας στερεοταύτισης (cross correlation) το σφάλμα ως προς το οριζόντιο επίπεδο ήταν της τάξης μεγέθους του ενός εικονοστοιχείου (15 m). Συνεπώς, για τη σύγκριση των υψών ήταν αναγκαίο εξαλειφθεί το οριζόντιο (planimetric) σφάλμα. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τη δημιουργία κυκλικών ζωνών επέκτασης (buffers) ακτίνας 15 m γύρω από κάθε τριγωνομετρικό σημείο. Σε κάθε ζώνη επέκτασης με τον τρόπο αυτό αντιστοιχήθηκε ένα πολύγωνο (κυκλικός δίσκος) ακτίνας 15 m. Παρήχθη ένα σύνολο ζωνών επέκτασης σε 1 - 1 αντιστοιχία με τα τριγωνομετρικά σημεία και υπολογίστηκε για καθένα η μέση τιμή του υψομέτρου των εικονοστοιχείων τα οποία περιλαμβάνονταν σε κάθε ζώνη επέκτασης. Κατόπιν, η τιμή αυτή συγκρίθηκε με την τιμή υψομέτρου του αντίστοιχου τριγωνομετρικού σημείου από το οποίο δημιουργήθηκε αρχικά το πολύγωνο ως ζώνη επέκτασης. Από τη σύγκριση αυτή προέκυψε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE: Root Mean Square Error) το οποίο αποτελεί μέτρο της διαφοράς των δύο πηγών υψομέτρων.

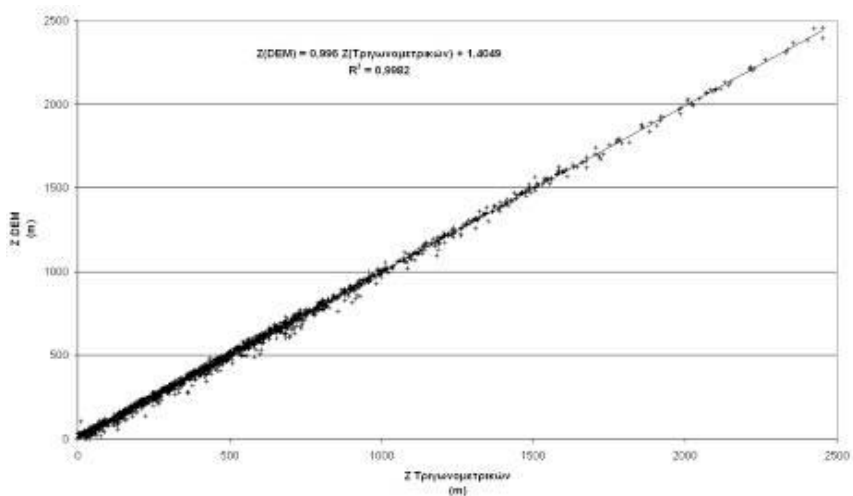
Το παραχθέν DEM κάθε επιμέρους σκηνής ASTER χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια, σε συνδυασμό με τα διαθέσιμα GCPs, για την ορθοαναγωγή των εικόνων των καναλιών του ορατού, του εγγύς υπερύθρου και του υπερύθρου μικρού μήκους κύματος της σκηνής (9 φασματικά κανάλια). Οι πολυφασματικές ορθοεικόνες που δημιουργήθηκαν από τις επιμέρους σκηνές, συνενώθηκαν κατόπιν σε μωσαϊκό ορθοεικόνων για τις περιοχές της Κρήτης και της Λέσβου και οι αντίστοιχοι χάρτες κάλυψης γης παρήχθησαν με φασματική ταξινόμηση στα μωσαϊκά αυτά. Λόγω των διαφορετικών συνθηκών λήψης (π.χ θέση του ήλιου, ημερομηνία λήψης, κατάσταση ατμόσφαιρας) των επιμέρους σκηνών ASTER υπήρχαν διαφορές στα φασματικά χαρακτηριστικά τους, με συνέπεια να πραγματοποιηθεί κανονικοποίηση των φασματικών χαρακτηριστικών των εικόνων πριν τη συνένωσή τους σε μωσαϊκό. Κατόπιν εφαρμόστηκε στα μωσαϊκά των εικόνων η μέθοδος της επιβλεπόμενης ταξινόμησης, με βάση την ικανότητα αναγνώρισης πεδίων και την a priori γνώση των στοιχείων ώστε ο αλγόριθμος ταξινόμησης να καθορίσει τα στατιστικά κριτήρια (φασματικές υπογραφές) για την ταξινόμηση των εικονοστοιχείων. Χρησιμοποιήθηκαν τρεις κανόνες ταξινόμησης (Leica, 2002): ο κανόνας της ελάχιστης απόστασης, της απόστασης Mahalanobis, και ο κανόνας μέγιστης πιθανοφάνειας. Για κάθε ταξινόμηση αξιολογήθηκαν οι παραγόμενες υπογραφές με βάση τον πίνακα σύμπτωσης (Contingency Matrix) και επιλέχθηκε ο αλγόριθμος της μέγιστης πιθανοφάνειας επειδή έδωσε καλύτερα και σαφέστερα αποτελέσματα. Η επιλογή των περιοχών εκπαίδευσης για την επιβλεπόμενη ταξινόμηση έγινε με βάση τη γνώση των δεδομένων της περιοχής (π.χ. υπάρχουσα βλάστηση) και των προς εξαγωγή τάξεων και καταγραφή των σημείων στο πεδίο με τη χρήση GPS. Για τον υπολογισμό της διαχωριστικότητας (separability) τάξεων με βάση τις φασματικές υπογραφές των περιοχών εκπαίδευσης, ελήφθησαν υπόψη αφενός η διακύμανση των υπογραφών στα 9 φασματικά κανάλια του ASTER και αφετέρου τα μέσα διανύσματα των υπογραφών.

### 3. Αποτελέσματα

Στην Εικόνα 1 παρουσιάζεται το παραγόμενο DEM για την περιοχή της Κρήτης, ως αποτέλεσμα της συνένωσης των DEM που παρήχθησαν από τις 12 επιμέρους σκηνές ASTER. Στην ίδια εικόνα παρατίθεται επίσης μια ψευδόχρωμη κωδικοποίησή του DEM της Κρήτης με το λευκό και τα σκούρα χρώματα να αντιστοιχούν σε μεγάλα υψόμετρα. Η ακτογραμμή έχει προστεθεί και στις δύο περιπτώσεις για λόγους εποπτείας. Για το σύνολο των σκηνών ASTER της περιοχής της Κρήτης το RMSE βρέθηκε στην πλειοψηφία των περιπτώσεων κάτω των 20 m, γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία της μεθόδου και την καταλληλότητα των τελικών προϊόντων για εφαρμογές τοπικού χαρακτήρα, όπως ο χαρακτηρισμός λεκανών απορροής. Η πολύ καλή συσχέτιση μεταξύ των υψομέτρων των δύο αυτών πηγών για την Κρήτη συνολικά φαίνεται στην Εικόνα 2. Το μέγιστο υψόμετρο του παραχθέντος DEM είναι 2460 m, ο αριθμός των τριγωνομετρικών σημείων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 1854 και υπολογίστηκε RMSE = 18,7 m

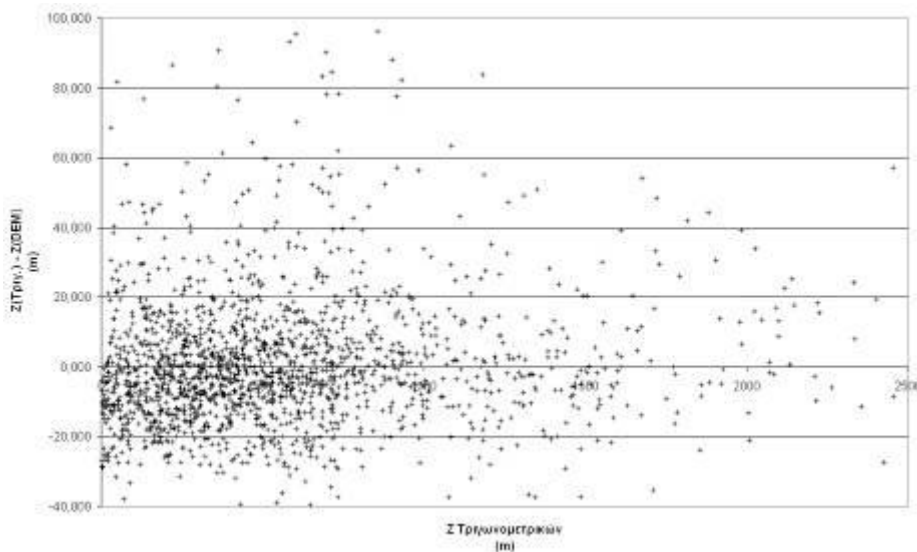


Εικόνα 1. Αποτέλεσμα της συνένωσης των παραγομένων DEM από κάθε σκηνή ASTER για την περιοχή της Κρήτης (άνω). Ψευδόχρωμη κωδικοποίηση. Το λευκό και τα σκούρα χρώματα να αντιστοιχούν σε μεγάλα υψόμετρα (κάτω).

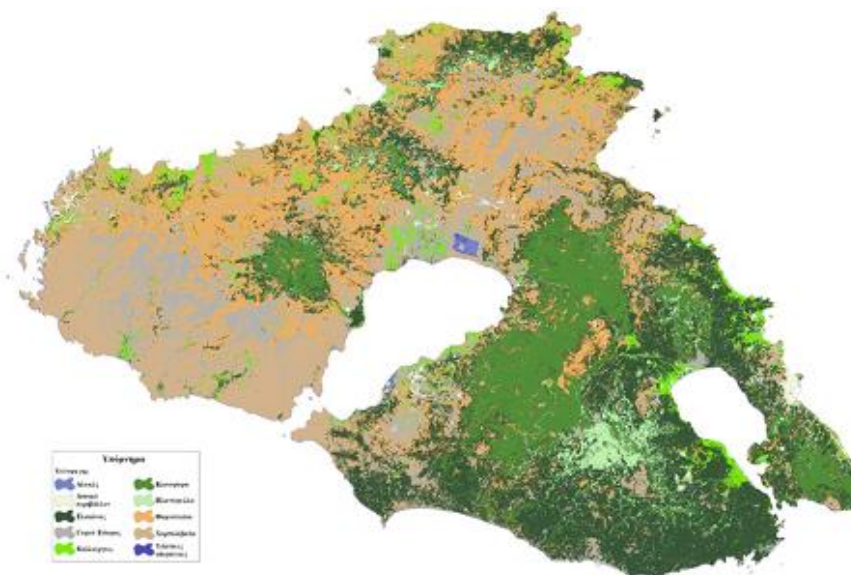


Εικόνα 2. Συσχέτιση μεταξύ των υψομέτρων των τριγωνομετρικών σημείων και των υψομέτρων που προκύπτουν από το παραχθέν DEM για της Κρήτης συνολικά.

Επίσης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3, λόγω της ομοιόμορφης κατανομής της διαφοράς των υψομέτρων μεταξύ τριγωνομετρικών και DEM σε σχέση με το πραγματικό υψόμετρο (τριγωνομετρικά), γίνεται φανερό ότι δεν υπάρχει συστηματικό σφάλμα της μεθόδου το οποίο να εξαρτάται από το υψόμετρο.



Εικόνα 3. Κατανομή της διαφοράς των υψομέτρων μεταξύ τριγωνομετρικών και DEM σε σχέση με το πραγματικό υψόμετρο για την περιοχή της Κρήτης συνολικά.



Εικόνα 4. Χάρτης κάλυψης γης για την περιοχή της Λέσβου.

Η φασματική ταξινόμηση για την εξαγωγή της κάλυψης γης για Κρήτη και Λέσβο πραγματοποιήθηκε με χρήση των μωσαϊκών ορθοεικόνων της κάθε περιοχής. Για την περίπτωση της Λέσβου το σχήμα ταξινόμησης περιλάμβανε 10 τάξεις (υδάτινες περιοχές, αλυκές, αστικό περιβάλλον, γυμνό έδαφος, καλλιέργειες, κωνοφόρα, πλατύφυλλα, θαμνότοποι, ελαιώνες, χορτολίβαδα), αριθμός που θεωρήθηκε αντιπροσωπευτικός αφενός για την αποφυγή ασήμαντων (περισσότερων) τάξεων (με μικρή φασματική κάλυψη) και αφετέρου για την αποφυγή δημιουργίας λιγότερων τάξεων στις οποίες θα χάνονταν σημαντικό τμήμα πληροφορίας. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται ο θεματικός χάρτης κάλυψης γης για την περιοχή της Λέσβου. Στην ταξινομημένη αυτή εικόνα οι 10 τάξεις μπορούν να θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ως προς την ομοιογένεια για κάθε είδος που έχει καταγραφεί. Το ανατολικό τμήμα της Λέσβου καλύπτεται κυρίως από δασικές εκτάσεις και ελαιώνες, ενώ το δυτικό τμήμα έχει χαμηλή ή καθόλου βλάστηση. Το μεγαλύτερο μέρος του νησιού καλύπτεται από ελαιώνες. Σημαντική έκταση κωνοφόρου δάσους εμφανίζεται στην κεντρική νήσο, ενώ στα νότιο-ανατολικά καταλήγει σε δάσος πλατύφυλλων. Το βόρειο τμήμα της νήσου περιλαμβάνει όλα τα είδη κάλυψης σε σχετικά ίδιες εκτάσεις. Για την εκτίμηση της ακρίβειας της ταξινόμησης χρησιμοποιήθηκε χάρτης κάλυψης γης σε κλίμακα 1:10000 που είχε παραχθεί από το Πανεπιστήμιο Αιγαίου με βάση δορυφορικές εικόνες πολύ υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας. Χρησιμοποιήθηκαν 167 τυχαία καταναμημένα σημεία ελέγχου στην εικόνα με μοναδικό κριτήριο η κάθε κατηγορία να περιλαμβάνει τουλάχιστον 5. Για να ελαχιστοποιηθούν κατά το δυνατόν τα σφάλματα λόγω μεγάλης διαφοράς στην κλίμακα των δύο χαρτών, επιλέχθηκε κάρναβος 3x3 εικονοστοιχείων γύρω από κάθε σημείο και αναγνωρίστηκε η τάξη με την απόλυτη πλειοψηφία. Με τα στοιχεία αυτά υπολογίζεται ο πίνακας σφαλμάτων (Πίνακας 1) ο οποίος περιγράφει τις εμφανίσεις εικονοστοιχείων που ανήκουν σε κάθε τάξη από τις δύο εικόνες και υπολογίζει την ακρίβεια του χρήστη. Όπως φαίνεται από τα στοιχεία, στις έξι από τις δέκα περιπτώσεις η ακρίβεια του χρήστη είναι μικρότερη από την ακρίβεια του παραγωγού. Η συνολική ακρίβεια της ταξινόμησης κυμάνθηκε στο 61% που κρίνεται ικανοποιητικό για το είδος των διαθέσιμων δεδομένων.

Πίνακας 1. Συγκεντρωτικός πίνακας ακρίβειας αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.

Τάξεις	Εικονοστοιχείο α αναφοράς	Ταξινομημένα εικονοστοιχεία	Αριθμός ταυτίσεων	Ακρίβεια παραγωγού (%)	Ακρίβεια χρήστη (%)
Κωνοφόρα	31	23	21	67.74	91.30
Αλυκές	16	19	15	93.75	78.95
Άστικό περιβάλλον	3	8	3	100.00	37.50
Υδάτινο περιβάλλον	3	5	1	33.33	20.00
Θαμνότοποι	10	22	6	60.00	27.27
Γυμνό έδαφος	3	10	3	100.00	30.00
Πλατύφυλλα	9	16	7	77.78	43.75
Χορτολίβαδα	37	21	17	45.95	80.95
Ελαιώνας	39	23	17	43.59	73.91
Καλλιέργειες	16	20	12	75.00	60.00

#### 4. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την δημιουργία DEM, ορθοεικόνων και θεματικών χαρτών κάλυψης γης με βάση στερεοσκοπικά και πολυφασματικά δεδομένα του ραδιομέτρου ASTER για τις περιοχές της Κρήτης και της Λέσβου, στα πλαίσια του έργου REALDEMS. Παρουσιάστηκαν επίσης κάποια από τα προϊόντα του έργου, καθώς τα αποτελέσματα της αξιολόγησής τους. Τα DEM προέκυψαν με εφαρμογή



φωτογραμμετρικών μεθόδων σε στερεοζεύγη εικόνων ASTER που καλύπτουν τις περιοχές ενδιαφέροντος. Τα πλεονέκτημα της χρήσης στερεοζευγών ASTER είναι η σχεδόν ταυτόχρονη λήψη τους κατά μήκος της τροχιάς. Οι θεματικοί χάρτες κάλυψης γης παρήχθησαν με εφαρμογή μεθόδων επιβλεπόμενης ταξινόμησης σε πολυφασματικά δεδομένα ASTER. Το πλεονέκτημα της μεθόδου έγκειται στο ότι η ορθοαναγωγή κάθε σκηνής ASTER πραγματοποιήθηκε με χρήση DEM το οποίο είχε παραχθεί από το αντίστοιχο στερεοζεύγος. Επιτόπιες παρατηρήσεις με τη βοήθεια GPS καθόρισαν τις φασματικές υπογραφές σε δεδομένες περιοχές εκπαίδευσης για την πραγματοποίηση της επιβλεπόμενης ταξινόμησης. Συνοπτικά, τα προϊόντα του έργου, για τις περιοχές της Κρήτης και της Λέσβου είναι:

- DEM με  $\pm 15 - 20$  m ακρίβεια σε οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο.
- Ορθοκανονικές πολυφασματικές εικόνες ASTER (9 κανάλια) με χωρική διακριτική ικανότητα 15 m και ακρίβεια  $\pm 15$  m.
- Θεματικοί χάρτες κάλυψης γης.

Τα προϊόντα αυτά χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια, στα πλαίσια του έργου για το χαρακτηρισμό λεκανών απορροής (κλίσεις και προσανατολισμοί των επιφανειών, όρια των λεκανών απορροής, όρια των υπολεκανών κάθε λεκάνης, υδρογραφικό δίκτυο, καμπυλότητα επιφανειών κλπ.) με εφαρμογή τεχνικών ΓΣΠ σε συγκεκριμένες περιοχές εφαρμογής σε Κρήτη και Λέσβο. Μελλοντικές δράσεις αφορούν στη χρήση τους σε εφαρμογές τοπικής κλίμακας όπως η ατμοσφαιρική διόρθωση δορυφορικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της τοπογραφίας, ο προσδιορισμός του ενεργειακού ισοζυγίου, ο προσδιορισμός των μεταβολών στις χρήσεις γης κλπ. Αναλυτική περιγραφή του έργου REALDEMS υπάρχει στο δικτυακό τόπο: <http://www.realdems.gr>.

## Βιβλιογραφία

Abrams, M., 2000: ASTER: data products for the high spatial resolution imager on NASA's EOS-AM1 platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 847-861.

Bastin, L., 1997: Comparison of fuzzy c-means classification, linear mixture modeling and MLC probabilities as tools for unmixing coarse pixels. *International Journal of Remote Sensing*, 18, 3629 – 3648.

Chrysoulakis, N., 2003: Estimation of the all-wave urban surface radiation balance by use of ASTER multispectral imagery and in situ spatial data, *Journal of Geophysical Research*, 108, D18, 4582, doi: 10.1029/2003JD003396.

Chrysoulakis, N., Diamandakis, M., and P. Prastacos, 2003: GIS Integration of ASTER stereo imagery for the support of Watershed Management. *Global Nest: The International Journal*, 5, 47 - 56.

Chrysoulakis, N., Abrams, M., Feidas, H. and Velianitis, D., 2004: Analysis of ASTER Multispectral Stereo Imagery to Produce DEM and Land Cover Databases for Greek Islands: The REALDEMS Project. In: Prastacos, P., Cortes, U. De Leon, J. L., Murillo, M. (Eds): *Proc. e-Environment*, pp. 411-424

Foody, G. M., 2000: Estimation of sub-pixel land cover composition in the presence of untrained classes. *Computers & Geosciences*, 26, 469 – 478.

Fujisada, H., 1998: ASTER Level 1 data processing algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36, n. 4, p. 1101-1112.

Gong, P., and Howarth, P. J., 1990: The use of structural information for improving land-cover classification accuracies at the rural – urban fringe. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56, 67 – 73.

Haack, B., Bryant, N. and Adams, S., 1987: An assessment of Landsat MSS and TM data for urban and near-urban land-cover digital classification. *Remote Sensing of Environment*, 21, 201 – 213.

Kontoes, C. C., Raptis, V., Lautner, M., and Oberstadler, R., 2000: The potential of kernel classification techniques for land use mapping in urban areas using 5 m-spatial resolution IRS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 3145–3151.

Lang, H., and Welch, R., 1999: ATBD-AST-08 Algorithm Theoretical Basis Document for ASTER Digital Elevation Models (Standard Product AST14). The Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Los Angeles, USA.

Leica, 2002: ERDAS Field Guide. Leica Geosystems. Atlanta, Georgia, USA.

Nikolakopoulos, K., Kamaratakis, E. and N. Chrysoulakis, 2006: SRTM vs ASTER Elevation Products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 27, 4819-4838.

PCI, 2003: OrthoEngine User Guide, PCI Geomatics, Ontario, Canada.

Radhika, V. N., Kartikeyan, B., Krishna, B. G., Chowdhury, S. and Srivastava, P. K., 2007. Robust Stereo Image Matching for Spaceborne Imagery. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 45, 2993 – 3000.

Ridd, M. K., and Liu, J., 1998: A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment. *Remote Sensing of Environment*, 63, 95 – 100.

Stefanov, W. L., Ramsey, M. S. and Christensen, P. R., 2001: Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment*, 77, 173 – 185.

Toutin, Th., 2001: Elevation Modelling from Satellite VIR Data: A Review. *International Journal of Remote Sensing*, 22, 1097 - 1125.

Toutin, Th, 2004: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and method. *International Journal of Remote Sensing*, 25, 1893 - 1924.

Vogelmann, J. E., Sohl, T. and Howard, S. M., 1998: Regional characterization of land cover using multiple sources of data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 64, 45 – 57.