

Μετρήσεις επιφανειακών θαλάσσιων θερμοκρασιών στο κεντρικό Αιγαίο από δεδομένα LANDSAT TM

Αθ. Γκανάς* και Μ. Στεφούλη**

*Department of Geography, GrHelveticaity of Reading, Whiteknights, Reading, RG6 2AB, UK.

**Διεύθυνση Τηλεπισκόπησης, ΙΓΜΕ, Μεσογείων 70, 11527 Αθήναι

Περίληψη

Η θερμοκρασία της θαλάσσιας επιφάνειας είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες μελέτης του φυσικού περιβάλλοντος, αφού υπεισέρχεται ως κυρία παράμετρος στον υπολογισμό παγκοσμίων ενεργειακών ισοζυγίων, ενώ ακόμη και απειροελάχιστες διακυμάνσεις της έχουν μεγάλες επιπτώσεις στην ισορροπία πολλών θαλασσιών οικοσυστημάτων. Η Τηλεπισκόπηση, παρέχει το μοναδικό, αξιόπιστο και συνεπές επιχειρησιακό σύστημα ταχείας και ακριβούς μετρήσεως των επιφανειακών θαλασσιών θερμοκρασιών (εθθε) σε παγκόσμια κλίμακα.

Στην εργασία αυτή παρουσιάζουμε μία μεθοδολογία εξαγωγής εθθε, χρησιμοποιώντας ψηφιακά δεδομένα του θερμικού διαύλου (10.4-12.5 μκρά) του σαρωτή TM (Thematic Mapper, Θεματικός Χαρτογράφος), ο οποίος μεταφέρεται επί των δορυφόρων Landsat-4 και Landsat-5. Τα δεδομένα TM έχουν ιδιαίτερη σημασία για χώρες με κλειστά αρχιπελάγη, όπως η Ελλάδα, επειδή τα ακτινόμετρα περιοχικής καλύψεως αδυνατούν να παράσχουν τοπικές μετρήσεις. Αξιοποιώντας την υψηλή χωρική διακριτική ικανότητα (120 m) του TM και εφαρμόζοντας ένα πρόσφατο μοντέλο ατμοσφαιρικής δισρθώσεως, χαρτογραφήσαμε τοπικές θερμοκρασιακές δομές σε περιοχές του Κεντρικού Αιγαίου, στον Παγασητικό και Βόρειο Ευβοϊκό Κόλπο, με ακρίβεια καλύτερη του 0.5°C. Η επεξεργασία θερμικών δεδομένων του TM παρέχει πολλαπλές, νέες δυνατότητες στις γεωεπιστήμες, όπως στην μελέτη των χωροχρονικών μεταβολών της θερμικής αδρανείας του εδάφους, στην αντίχνευση παρακτίων πηγών από καρστικούς υδροφορείς, και ακόμη στην εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων.

Abstract

Sea Surface Temperature (SST) is one of the most important parameters of the natural environment. It plays a key role in the

calculation of the global energy budgets and its fluctuations affect marine ecosystems considerably. It is therefore of paramount importance, the quick and accurate estimation of SST, using thermal infrared data collected by spaceborn sensors.

In oceanic scale, the most-commonly used sensors are AVHRR/2 and ATSR-1 and -2, carried by the satellites series NOAA and ERS, respectively, that are capable of extracting SST twice a day with an accuracy of less than 0.3 degrees Centigrade. However, within closed seas, such as the Aegean, the wide-field of view of the aforementioned sensors (resulting in a pixel area of approximately 1 km²), fails to map local temperature patterns. These patterns, on the other hand, are visible when the Thematic Mapper (TM) sensor, mounted on Landsat-4 and -5 satellites, is used that acquires thermal IR images with a 120-m spatial resolution.

This study applied TM thermal data collected by Landsat-4 on 28.1.1988 over Central Greece, towards the estimation of SST for the purpose of distinguishing local temperature patterns associated with sea currents, drainage supply and groundwater discharge. Brightness Temperatures were derived using the parameters from Singh (1988), and correction for the atmospheric effect was applied according to Richter (1991). We tested our results with SST extracted from digitally processed AVHRR imagery, of the same day, that was supplied to us in raw format by the GrHelveticality of Dundee Satellite Station. For the Central Aegean Sea and the Northern Gulf of Evia, our estimation differs by 0.5°C. For the coastal areas we do not have an independent spaceborn test or any seatruth information, so our results may deviate as much as 1°C from the actual SST. It is proposed that cold temperatures recorded on Maliakos Gulf resulted from Sperchios river outflow, whereas cold spots along the coastlines of Lokris, Pelion and Dirfy mountains are groundwater spring discharges.

Εισαγωγή

Η Τηλεπισκόπηση της θαλάσσιας επιφάνειας με την χρήση αερομεταφερομένων και δορυφορικών σαρωτών, αποτελεί πλέον μία πολύτιμη τεχνική για την μελέτη και παρακολούθηση της καταστάσεως αυτού του περιβαλλοντικού συστήματος. Ένα προϊόν της Τηλεπισκόπησης, η μέτρηση των επιφανειακών θαλασσίων θερμοκρασιών (*εθθε - SST*) χρησιμοποιείται σε επιχειρησιακή βάση από ορισμένα διεθνή Ωκεανογραφικά κέντρα και Μετεωρολογικές Υπηρεσίες, από το 1979, με την τροχιοθέ-

τηση της σειράς των Αμερικανικών πολικών δορυφόρων NOAA. Οι δορυφόροι της σειράς αυτής φέρουν τον σαρωτή AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) με δύο θερμικούς διαύλους, καθώς επίσης και μιά σειρά άλλων οργάνων-μετρητών διαφόρων ατμοσφαιρικών παραμέτρων (Πίνακας 1).

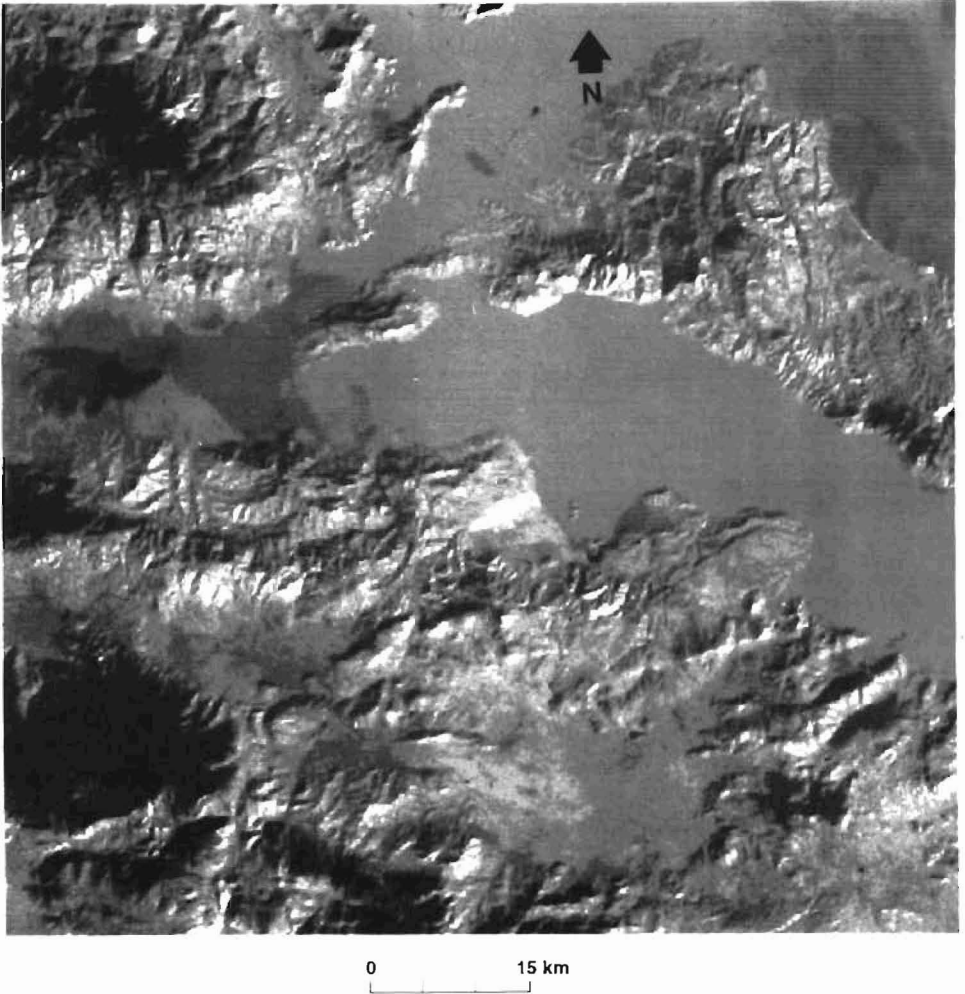
| | | |
|-----------------------------|----------------|------------------|
| ΕΥΡΟΣ ΣΑΡΩΣΕΩΣ | ± 55.4 degrees | |
| ΕΔΑΦΙΚΗ ΚΑΛΥΨΗ | 2700 km | |
| ΥΨΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ | 833 km | |
| .ΠΕΡΙΟΔΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ | 102 min | |
| ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΡΟΧΙΑΣ | 98.8 degrees | |
| ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΧΩΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ | 1.16 km nadir | |
| ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 10 -bits | |
| ΦΑΣΜΑΤΙΚΟ ΕΥΡΟΣ | ΔΙΑΥΛΟΣ - 1 | 0.58 - 0.68 μm |
| | Mapping | |
| | ΔΙΑΥΛΟΣ - 2 | 0.725 - 1.10 μm |
| | Surface Water | |
| | ΔΙΑΥΛΟΣ - 3 | 3.55 - 3.93 μm |
| | Cloud Mapping | |
| | ΔΙΑΥΛΟΣ - 4 | 10.30 - 11.30 μm |
| | SST | |
| | ΔΙΑΥΛΟΣ - 5 | 11.50 - 12.50 μm |
| | SST | |

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Χαρακτηριστικά συστήματος NOAA/AVHRR

Επιπλέον, από το 1991, γίνεται εξαγωγή εθθε με καλύτερη ακρίβεια από το ακτινόμετρο ATSR (Along Track Scanning Radiometer), το οποίο μεταφέρεται από τον Ευρωπαϊκό δορυφόρο ERS - 1 και - 2. Το ATSR έχει μικρότερο μεν εδαφικό αποτύπωμα (500 km), το οποίο όμως σαρώνεται διπλά κατά την ίδια διέλευση, λόγω της δυνατότητας ταυτόχρονης εμπρόσθιας σαρώσεως. Η διπλή σάρωση περιορίζει στο ελάχιστο τις ατμοσφαιρικές επιδράσεις στην εξαγωγή των εθθε, δηλαδή, τον σημαντικότερο παράγοντα σφάλματος κατά τους υπολογισμούς.

Εν τούτοις, ήδη από το 1982, με την τροchioθέτηση του δορυφόρου Landsat - 4, ενέκυψε η δυνατότητα χωροχρονικής παρακολουθήσεως των μεταβολών των εθθε, σε κλίμακα δέκα φορές μεγαλύτερη αυτής των ακτινομέτρων περιοχικής καλύψεως. Η εργασία αυτή παρουσιάζει μία μεθοδολογία εξαγωγής εθθε χρησιμοποιώντας παράμοια θερμικά δεδομένα για τις θαλάσσιες περιοχές του Κεντρικού Αιγαίου, του Παγασσητικού, Μαλιακού και Βορείου Ευβοϊκού κόλπου (Εικ. 1). Η αξιοποίηση του χωρικού πλεονεκτήματος, καθιστά τις εξαγόμενες εθθε εξαιρετικά σημα-

ντικές, ιδιαίτερα για την μελέτη παρακτίων φαινομένων. Επί παραδείγματι, δεδομένα Landsat έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία στην παρακολούθηση της καταστάσεως θερμικών πιδάκων, προϊόντων της λειτουργίας πυρηνικών αντιδραστήρων (Liu and Kuo, 1994).



Εικ. 1. Θερμική εικόνα της Ανατολικής Στερεάς και θαλασσιών περιοχών, της 28.1.1988, συλλεχθείσα από τον σαρωτή TM του δορυφόρου Landsat-4. Ο πίνακας συσχέτισεως (LUT) ψηφιακών τιμών-τιμών ακτινοβολίας είναι κανονικός, δηλαδή, οι ψυχρότερες περιοχές αντιπροσωπεύονται με μελανές αποχρώσεις του τεφρού, και οι θερμότερες με λευκότερες. Η επίδραση του αναγλύφου στην κατανομή των θερμοκρασιών είναι καταλυτική, με τις προσήλιες δομές να ακτινοβολούν περισσότερο. Ορισμένες τοπικές θερμοκρασιακές ανωμαλίες διακρίνονται στην θάλασσα, ειδικά στις παράκτιες περιοχές. Κλίμακα περίπου 1:500000.

Ακόμη, στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετά παραδείγματα χρήσεως τέτοιων δεδομένων με ιδιαίτερως ικανοποιητική ακρίβεια (π.χ., 0.6°C αναφέρουν οι Schneider and Mauser, 1991). Πιστεύουμε ότι τα δεδομένα αυτά χρήζουν μεγαλύτερης προσοχής από τους γεωεπιστήμονες, ειδικά στον Ελληνικό χώρο, ο οποίος λόγω της νεοτεκτονικής του κατασκευής, έχει καταταμηθεί σε μία σειρά θαλασσιών λεκανών, κόλπων και ορμίσκων. Οι εξαγόμενες εθθε έχουν εξαιρετική σημασία σε επιστημονικές περιοχές όπως στην Θαλάσσια Γεωλογία και Βιολογία, στην Ιχθυολογία, στην Παράκτια Γεωμορφολογία και στην Υδρογεωλογία.

Θεωρητικό υπόβαθρο

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που λαμβάνει ο δορυφορικός σαρωτής από την θαλάσσια επιφάνεια έχει τρεις συνιστώσες, την πηγή (επιφάνεια) εκπομπής, την ατμόσφαιρα, και τον ήλιο. Η ατμόσφαιρα επηρεάζει δραστικώς το εκπεμπόμενο σήμα μέσω των διεργασιών της απορροφήσεως, της ίδιας εκπομπής ακτινοβολίας και της σκεδάσεως. Αυτές οι διεργασίες προκαλούνται από τα διάφορα συστατικά της ατμόσφαιρας, δηλαδή τους υδρατμούς, τα αιωρούμενα σωματίδια, διάφορες χημικές ενώσεις αερίων (π.χ., CO₂, O₃), κρυστάλλους πάγου και άλατος και τέλος από διάφορους ρύπους (ηφαιστειακής ή αιολικής προελεύσεως). Μία περιεκτική παρουσίαση των ατμοσφαιρικών επιδράσεων στο θερμικό υπέρυθρο δίνει ο Fiuza (1992), αναδεικνύοντας τον ρόλο της απορροφήσεως στην απόσβεση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, και ειδικότερα την σημασία των υδρατμών.

Η κατανόηση της λειτουργίας του TM και τα χαρακτηριστικά κατασκευαστικά του σημεία, είναι απαραίτητα για την παρακολούθηση της μεθοδολογίας που παρουσιάζουμε εδώ. Ετσι στο σημείο αυτό παραθέτουμε μία σύνοψη (περισσότερα στοιχεία δίνουν οι Καρτέρης και Μελιάδης, 1992). Αναλυτική περιγραφή αυτού του σαρωτή δίνεται σε ειδικές εκδόσεις της NASA (1984, 1985). Ο TM είναι ένας ηλεκτρομηχανικός σαρωτής, τροchioθετημένος επί της δεύτερης γενιάς των δορυφόρων Landsat (Landsat-4 και -5). Καταγράφει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε επτά (7) φασματικές ζώνες, εκ των οποίων η μία εκτείνεται από τα 10.45-12.43 μm, όπου σημειώνεται το μέγιστο της εκπομπής ακτινοβολίας από την γήινη επιφάνεια. Επίσης, η χωρική διακριτική ικανότητα του σαρωτή είναι 120 m, καθιστώντας τον TM τον αναλυτικότερο διαστημικό θερμικό καταγραφέα ακόμη μέχρι και σήμερα. Η ψηφιοποίηση του σήματος γίνεται εν τροχιά, σε 256 επίπεδα, αν και στο

θερμικό υπέρυθρο η διακύμανση της καταγραφής σπανίως ξεπερνά τα 50 εξ' αυτών.

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του TM αφορά τον τρόπο σαρώσεως. Ο TM συλλέγει δεδομένα και κατά τις δύο διευθύνσεις του περιστρεφόμενου κατόπτρου, εγκαρσίως ως προς το εδαφικό ίχνος της τροχιάς. Καθώς οι ανιχνευτές στη θερμική φασματική ζώνη είναι 4, αυτό σημαίνει ότι 4 γραμμές δεδομένων συλλέγονται κατά την πρόσθια (προς ανατολός) σάρωση, και 4 γραμμές κατά την ανάστροφη, με αποτέλεσμα την παραγωγή ενός συστηματικού θορύβου, γραμμικής διαμορφώσεως και περιόδου 4 γραμμών (banding, 16 γραμμών στους ανακλώμενους διαύλους). Πάντως η αφαίρεση αυτού του θορύβου θεωρείται πλέον τυπική διαδικασία για σύγχρονα λογισμικά επεξεργασίας εικόνας.

Απεναντίας, δυσκολότερη καθίσταται η αφαίρεση συστηματικών λωριδώσεων (striping), εμφανιζομένων εντός της τετρα-γραμμικής σαρώσεως, εξ' αιτίας διαφορετικών αποκρίσεων ορισμένων εκ των ανιχνευτών (π.χ., Malaret et al., 1985). Η συνήθης αντιμετώπιση αυτού του θορύβου στα κέντρα προ-επεξεργασίας γίνεται με μετασχηματισμούς Fourier, συχνά με μεγάλα ποσοστά αποτυχίας, έτσι ώστε ο θόρυβος αυτός να μεταφέρεται στο τελικό προϊόν το οποίο παραδίδεται στον χρήστη.

Επιπλέον, τα συλλεγόμενα δεδομένα εμπεριέχουν και σειρά άλλων θορύβων, είτε ακτινομετρικής είτε γεωμετρικής υφής. Η αφαίρεση αυτών των ανεπιθυμητών συστατικών της σαρώσεως λαμβάνει χώρα στα κατά τόπους κέντρα λήψεως και προ-επεξεργασίας, με την εφαρμογή κατάλληλων αλγορίθμων επί των πρωτογενών δεδομένων. Εν συντομία, οι ακτινομετρικές διορθώσεις σποσκοπούν στην ενίσχυση του λάγου σήματος/θορύβου εξ' αιτίας διακυμάνσεως της αποδόσεως των συστημάτων ψύξεως, και στον έλεγχο της βαθμονομήσεως, ο οποίος είναι απαραίτητος για την άμεση διάγνωση ολισθήσεων του gain του σαρωτή, οι οποίες μπορούν να εισαγάγουν ένα τυπικό σφάλμα στις μετρήσεις έως και 6°C (Schott and Volchok, 1985). Η ακτινομετρική προ-επεξεργασία ολοκληρώνεται με την επανασύνθεση (resampling) της εικόνας μέσω ενός πολυωνύμου παρεμβολής, συνήθως τρίτου βαθμού. Οι γεωμετρικές διορθώσεις αποκαθιστούν τις παραμορφώσεις λόγω της περιστροφής της γής κατά την διάρκεια της διελεύσεως, καθώς και τυχαίων αποκλίσεων του δορυφόρου από την καθορισμένη τροχιά. Τέλος, η σκηνή εγγράφεται σε ένα παγκόσμιο σύστημα συντετογμένων, συνήθως UTM (ζώνη 34 για την Ελλάδα), και παραδίδεται στον χρήστη.

Μεθοδολογία Εργασίας

Τα δεδομένα TM προέρχονται από το αρχείο δορυφορικών εικόνων του ΙΓΜΕ και η σκηνή που μελετήθηκε (Πίνακας 2) έχει παραχθεί από τον Landsat-4 στις 28 Ιανουαρίου 1988 και φέρει τον αριθμό 4202208284 (πλαίσιο 183/33 στο παγκόσμιο σύστημα αναφοράς των δορυφόρων Landsat).

| | |
|----------------------------|---------------------------------|
| ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ | LANDSAT-4 |
| ΣΑΡΩΤΗΣ | THEMATIC MAPPER |
| ΥΨΟΣ ΤΡΟΧΙΑΣ | 705.3 Km |
| ΤΑΥΤΟΤΗΤΑ ΕΙΚΟΝΑΣ | 4202208284 |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΛΗΨΕΩΣ | 28 - 1 - 1988 |
| ΩΡΑ ΛΗΨΕΩΣ | 09:42 local time |
| ΗΛΙΑΚΗ ΓΩΝΙΑ | 25 degrees |
| ΗΛΙΑΚΟ ΑΖΙΜΟΥΘΙΟ | 145 degrees North |
| ΧΩΡΙΚΗ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΑΝΑΛΥΣΕΩΣ | 120 m |
| ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ | 8-bits |
| ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΗ | Cubic Convolution |
| ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΓΕΩΜΕΤΡΙΚΗ | system corrected (UTM, zone 34) |
| ΜΕΓΕΘΟΣ ΕΙΚΟΝΑΣ | 4096 × 4096 pixels |

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Στοιχεία εικόνας Landsat

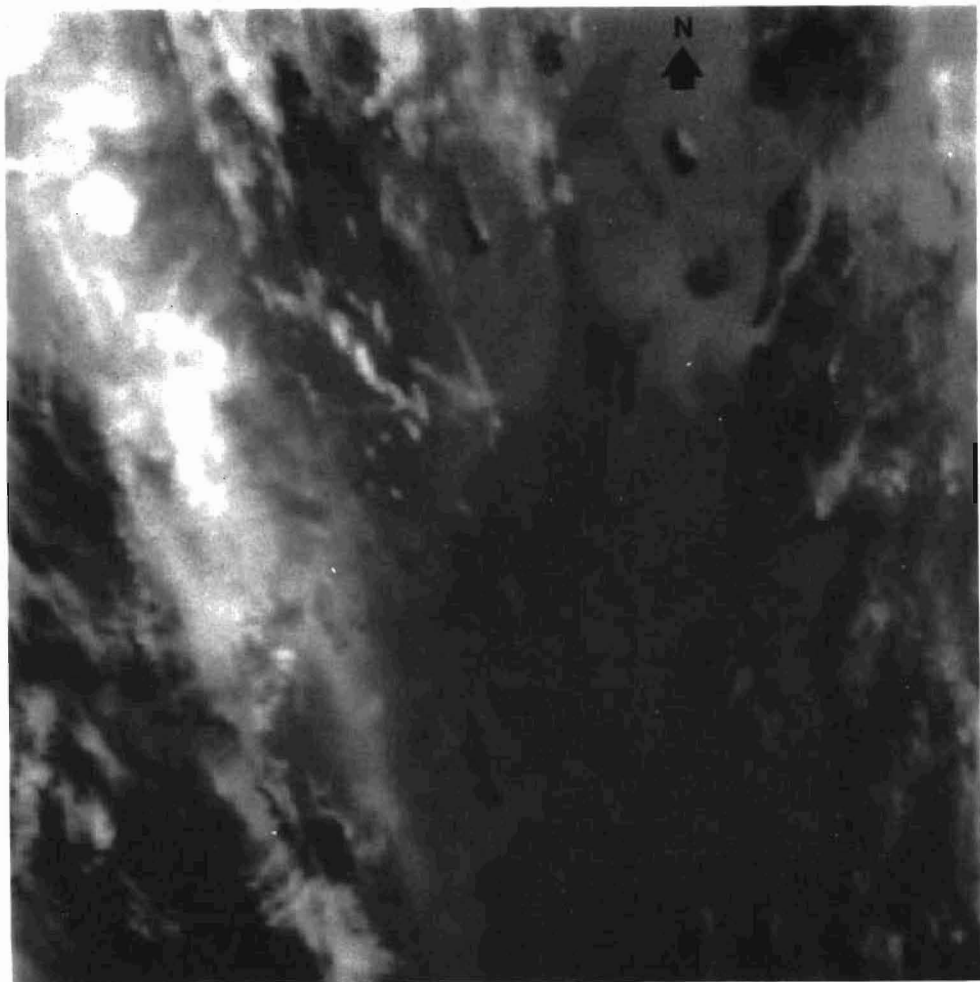
Η σκηνή έχει υποστεί τις τυποποιημένες διορθώσεις σε επίπεδο system-corrected, στο κέντρο παραγωγής του Fucino. Η μεθοδολογία της εργασίας μας, στα βασικά της στάδια, συνίσταται (Πίνακας 3) πρώτον, στην αφαίρεση των εικονοστοιχείων της ξηράς από την εικόνα (masking) μέσω της ψηφιοποίησεως της ακτογραμμής στο διάυλο -4 (εγγύς υπέρυθρο), και κατασκευή νέου εικονοαρχείου, δεύτερον, στην εφαρμογή του αλγορίθμου ατμοσφαιρικής διορθώσεως ATCOR (Richter, 1991), τρίτον στην εφαρμογή ενός ισοτροπικού φίλτρου εξομαλύνσεως για την ομογενοποίηση του τελικού ιστογράμματος, και, τέταρτον, στις δοκιμές τεχνικών ψευδο-έγχρωμης τονώσεως των αποτελεσμάτων, για την ανάδειξη των θερμοκρασιακών διαβαθμίσεων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ, system corrected
2. ΑΝΑΓΝΩΣΗ ΘΕΡΜΙΚΟΥ ΔΙΑΥΛΟΥ (band 6)
ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ ΙΣΤΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ
ΤΟΝΩΣΗ ΑΝΤΙΘΕΣΕΩΣ
3. ΑΠΟΜΑΚΡΥΝΣΗ ΞΗΡΑΣ
ΨΗΦΙΟΠΟΙΗΣΗ ΑΚΤΟΓΡΑΜΜΩΝ ΣΤΟΝ ΔΙΑΥΛΟ 4
4. ΤΕΜΑΧΙΣΜΟΣ ΕΙΚΟΝΑΣ ΣΤΟ ΘΕΡΜΙΚΟ
5. ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΗ ΔΙΟΡΘΩΣΗ (Richter, 1991)
6. ΕΞΑΓΩΓΗ SST
7. ΙΣΟΤΡΟΠΙΚΟ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΦΙΛΤΡΟ, 7 x 7
8. ΨΕΥΔΟΕΓΧΡΩΜΗ ΤΟΝΩΣΗ
ΕΠΙΛΟΓΗ LUT
9. ΕΚΤΥΠΩΣΗ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. Μεθοδολογία επεξεργασίας δεδομένων TM

Το ισοτροπικό φίλτρο εξομαλύνσεως εφαρμόστηκε για να εξαλείψουμε τον ακατάστατο, γραμμικής υφής, θόρυβο (striping). Υίθετησαμε ένα παράθυρο 7 επί 7 εικονοστοιχείων, επειδή αφ' ενός μεν το φίλτρο 5 επί 5 έδειξε ελάχιστη βελτίωση, αφ' ετέρου δε το φίλτρο 11 επί 11 υποβάθμισε υπερβολικά την ποιότητα της εικόνας. Επιλέξαμε δε την γραμμική εξομάλυνση έναντι άλλων φίλτρων (πχ., ενδιαμέσου-median), επειδή τα γραμμικά φίλτρα αποκόπτουν τον θόρυβο στα άκρα του ιστογράμματος (π.χ., Cushnie and Atkinson, 1985), και ως εκ τούτου ομογενοποιούν την εικόνα απορρίπτοντας θερμοκρασιακές τιμές άνω των δεκατεσσάρων (14) και κάτω των οκτώ (8) βαθμών Κελσίου, αντιστοίχως.

Ο αλγόριθμος ATCOR χρησιμοποιεί τη μέθοδο του Singh (1988) για τον υπολογισμό των θερμοκρασιών λαμπρότητας, υίθετει τους ατμοσφαιρικούς συντελεστές του μοντέλου Lowtran 7, και προϋποθέτει μία τυπική τιμή ειδικής εκπομπής για τη θαλάσσια επιφάνεια ίση με 0.98. Ο έλεγχος της ακρίβειας των μετρήσεων μας, έγινε με την σύγκριση σειράς τιμών 10 x 10 εικονοστοιχείων TM έναντι μετρήσεων εθθε εξαχθέντων διά της «κλασσικής» μεθόδου, δηλαδή από ψηφιακή επεξεργασία δεδαμένων του ααρωτή AVHRR, του δορυφόρου NOAA-9, ο οποίος διήλθε υπεράνω του ελληνικού χώρου την ίδια ημέρα (Εικ. 2), κινούμενος σε ανοδική τραχιά και με διαφορά 5 ωρών.



Εικ. 2. Θερμική εικόνα της περιοχής του Αιγαίου από το ακτινόμετρο περιοχικής σαρώσεως AVHRR (δίαυλος-4), δορυφόρου NOAA-9, στις 2μ.μ της 28.1.1988. Εξ' αιτίας του ανεστραμμένου πίνακα συσχέτισεως (LUT), τα ψυχρά νέφη εμφανίζονται με λευκό χρώμα, ενώ οι διάφορες θερμοκρασίες στην θάλασσα στην κλίμακα αποχρώσεων του τεφρού. Διακρίνεται καθαρά το θερμικό μέτωπο στο Βόρειο Αιγαίο.

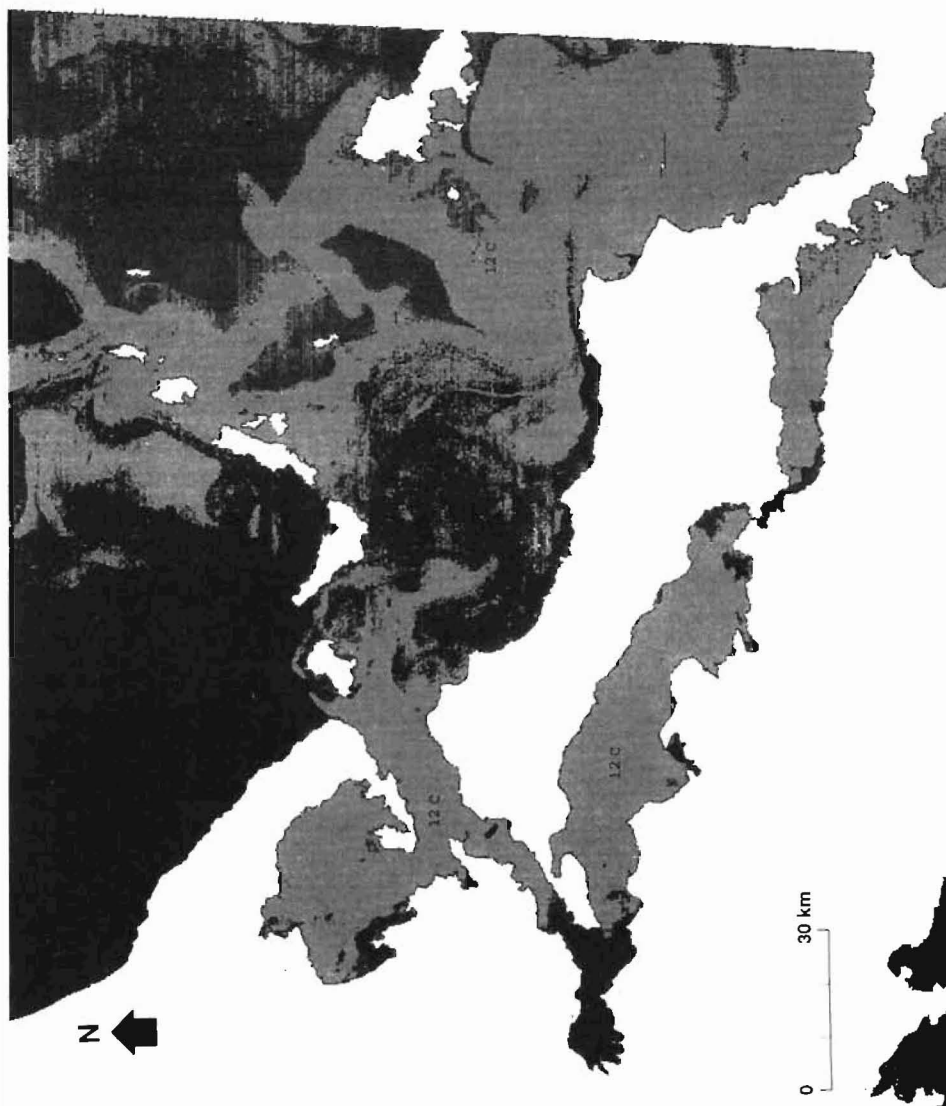
Η σκηνή AVHRR που χρησιμοποιήσαμε φέρει τον αριθμό 714/09A (αριθμός τροχιάς 16111) και μας χορηγήθηκε από τον σταθμό λήψεως του Dundee. Το διάγραμμα ροής της ψηφιακής επεξεργασίας των δεδομένων AVHRR περιλαμβάνει τα εξής βήματα: ανάγνωση των δεδομένων και εξαγωγή των παραμέτρων βαθμονομήσεως από το αρχείο header,

αποκοπή παραθύρου εργασίας 512×512 εικονοστοιχείων περικλειόντων την περιοχή ενδιαφέροντος, μετατροπή των 10-bit ψηφιακών τιμών των δύο θερμικών διαύλων σε αντίστοιχες τιμές ακτινοβολίας $mW/cm^2 sr$ μη με την επίλυση των γραμμικών εξισώσεων για τη συγκεκριμένη διά-
 λευση του NOAA-9, υπολογισμό των θερμοκρασιών λαμπρότητας διά
 κάθε εικονοστοιχείο μέσω της επιλύσεως της εξισώσεως του Planck για
 κάθε διάυλο και, τέλος, εφαρμογή του split-window αλγορίθμου MCSST
 $[MCSST(4,5) = [T_{12} + 3.15(T_{11} - T_{12}) + 0.10] - 273.15]$ του Walton (1988),
 ο οποίος και παρέχει τις τελικές θερμοκρασίες. Οι παράμετροι βαθμο-
 νομήσεως ήταν οι εξής: κλίσεις διαύλων -4 και -5 -0.164855 και
 -0.195250, αντιστοίχως, και τεταγμένες διαύλων -4 και -5 159.499 και
 191.703, αντιστοίχως. Η επεξεργασία έγινε σε σταθμό εργασίας Sun
 Sparc 20, με τη χρήση του λογισμικού ERDAS.

Αποτελέσματα

Η σύγκριση των εξαχθέντων εθθε από τους δύο διαφορετικούς σα-
 ρωτές έδωσε εντυπωσιακά αποτελέσματα. Η μέση θερμοκρασιακή από-
 κλιση στα ανοικτά των Κόλπων Μαλιακού, Βορείου και Νοτίου Ευβοί-
 κού, Παγασητικού, καθώς και στο Κεντρικό Αιγαίο πέλαγος, ήταν 0.5
 βαθμοί Κελσίου. Αυτό αποδεικνύει ότι το ατμοσφαιρικό μοντέλο χειμώ-
 νος μέσω των γεωγραφικών πλατών που επιλέξαμε ως βασική παράμετρο
 του αλγορίθμου ATCOR ήταν σωστό, γιά την συγκεκριμένη εποχή (Ια-
 νουάριος). Επιπλέον, οι τιμές των παρακτίων εικονοστοιχείων θα πρέπει
 να παρακολουθούν αυτή την εντυπωσιακή συμπεριφορά, με κάποια ίσως
 μεγαλύτερη απόκλιση (που δεν εκτιμούμε ότι υπερβαίνει τον ένα βαθμό
 Κελσίου). Αναλυτικότερα, μεταξύ των αποτελεσμάτων μας (Εικ. 3) συ-
 γκαταλέγεται η ανίχνευση πολλών παρακτίων θερμοκρασιακών ανωμα-
 λιών, τις οποίες και αποδίδουμε στην εμφάνιση υποθαλασσιών πηγών, οι
 οποίες εκφορτίζουν τους καρστικούς υδροφορείς των ορεινών μαζών
 της Λοκρίδος, του Πηλίου, της Δίρφυος και του Παρνασσού. Μία εξ' αυ-
 τών, η μεγάλη παράκτια πηγή της Τραγάνας, επιβεβαιώθηκε με εργασίες
 πεδίου. Επίσης, εντοπίζεται ένα θερμικό μέτωπο στον άξονα Σκύρου-
 Αγ. Ευατρατίου, το οποίο διαχωρίζει το ψυχρό ρεύμα του Βορείου Αι-
 γαίου με τα ανερχόμενα θερμά ύδατα της Ανατολικής Μεσογείου. Η θα-
 λάσσια περιοχή δυτικώς της Σκύρου και νοτίως των Σποράδων νήσων
 χαρακτηρίζεται από χαμηλές θερμοκρασίες.

Η ψηφιακή επεξεργασία των θερμικών δεδομένων του TM παρέχει
 νέες, πολλαπλές δυνατότητες στις γεωεπιστήμες, όπως στη μελέτη
 των χωροχρονικών μεταβολών της θερμικής αδρανείας του εδάφους



Εικ. 3. Χωρική κατανομή των επιφανειακών θαλασσιών θερμοκρασιών μετά το τέλος της ψηφιακής επεξεργασίας. Με λευκό χρώμα απεικονίζεται η ξηρά. Η κλίμακα των χρωμάτων, ερυθρό έως κίτρινο, παρακολουθεί τις θερμοκρασιακές διαβαθμίσεις από τις ψυχρότερες στις θερμότερες *εθθε*. Με ερυθρό χρώμα απεικονίζονται οι ιδιαίτερες ψυχρές περιοχές, συσχετιζόμενες με παράκτια και αναβλύζοντα καρστικά ύδατα, και εκβολές υδρογραφικών δικτύων (π.χ. Σπερχειός). Ένας μεγάλος χώρος μίξεως των θαλασσιών υδάτων εμφανίζεται βορειώς της Ευβοίας. Κλίμακα περίπου 1:1000000.

προς τον εντοπισμό ορυκτών πρώτων υλών και στην παρακολούθηση των μεταβολών της εδαφικής υγρασίας, στην ανίχνευση υποθαλασσίων πηγών από καρστικούς υδροφορείς, όπως δείξαμε παραπάνω, και ακόμη στη χαρτογράφηση και εκμετάλλευση γεωθερμικών πεδίων. Επίσης, ο συνδυασμός τέτοιων δεδομένων με ψηφιακά μοντέλα εδάφους οδηγεί στον άμεσο υπολογισμό ουσιαδών περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως της χιονοκαλύψεως, η οποία και αποτελεί απαραίτητο στοιχείο εισόδου σε υδρολογικά μοντέλα (π.χ., Δαλέζιος, 1993). Η πρόσφατη ίδρυση σταθμών λήψεως ψηφιακών δεδομένων υψηλής ευκρίνειας AVHRR στην Ελλάδα (Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, ΕΜΥ) παρέχει πλέον τη δυνατότητα συνεχούς βαθμονόμησης του θερμικού διούλου του TM, ώστε να καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη ερευνητικών και επιχειρησιακών δραστηριοτήτων στους ανωτέρω τομείς.

Ευχαριστίες

Τα δεδομένα Ιανουαρίου 1988 του AVHRR παραχωρήθηκαν ευγενώς από τον δορυφορικό σταθμό του πανεπιστημίου Dundee του Ηνωμένου Βασιλείου. Ευχαριστούμε ιδιαίτέρως, εκεί, τους Peter Baylis και N. Lonie. Ευχαριστούμε θερμώς τον Dr. Sadhu Singh του ερευνητικού κέντρου NUTIS (Reading) διά την διάθεση προγραμμάτων αναγνώσεως, σε περιβάλλον SunOs, αυτών των δεδομένων. Αναγνωρίζουμε επίσης, τις χρήσιμες συζητήσεις περί *εθθε* με τον Graham Ferrier, και την τεχνική βοήθεια των Peter Read και Erica Meller, όλων του Τμήματος Γεωγραφίας του Πανεπιστημίου Reading. Ο πρώτος εκ των συγγραφέων υποστηρίζεται από το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (Πρόγραμμα Υποτροφιών Εξωτερικού).

Βιβλιογραφία

- Cushnie, J.L., and Atkinson, P. (1985). Effect of spatial filtering on scene noise and boundary detail in Thematic Mapper Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1483-1493.
- Δαλέζιος, Ν. (1993). *Remote Sensing in Water Resources*. Σημειώσεις για το καινοτομικό πρόγραμμα κατάρτισης Συμβούλων Τηλεπισκόπησης, ΕΛΚΕΠΑ/ΙΤΕ, Αθήνα, 37 σελ.
- Fiuza, A.F. (1992). The measurement of sea surface temperature from satellites. In: *Space Oceanography* (Edited by A.P. Cracknell), World Scientific Ltd., Singapore, 197-279.

- Καρτέρης, Μ.Α., και Μελιάδης, Ι.Μ. (1992). Τηλεπισκόπηση Φυσικών Πόρων και Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών. Τόμος ΙΙ. Έκδοση Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη, 278 σελ.
- Liu, G.-R., and Kuo, T.-H. (1994). Improved atmospheric correction process in monitoring SST around the outfall of a nuclear plant. *Int. J. Remote Sensing*, 15, 2627-2636.
- Malaret, E., Bartolucci, L.A., Lozano, D.F., Anuta, P.E., and McGillem, C. D. (1985). Landsat-4 and Landsat-5 Thematic Mapper Data Quality Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1407-1416.
- NASA, (1984). Landsat-4 Science Investigations Summary. Conference Publication 2326, Vol. I, 199 p; Vol. II, 174 p.
- NASA, (1985). Landsat-4 Science Characterisation Early Results. Conference Publication 2355, Vol. II, 477 p.; Vol. III, 593 p.; Vol. IV, 448 p.
- Richter, R. (1991). Atmospheric Correction of Landsat TM, MSS, and SPOT Images: ATCOR User Manual, DLR-IB 552-14/90, Oberpfaffenhofen, 35 p.
- Schneider, K., and Mauser, W. (1991). The impact of the meteorological situation upon the satellite-derived surface skin temperature. *Proceedings of the 11th EARSeL Symposium, Graz*, 270-283.
- Schott, J.R., and Volchok, W.J. (1985). Thematic Mapper Thermal Infrared calibration. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51, 1351-1357.
- Singh, S.M. (1988). Brightness Temperature Algorithms for Landsat Thematic Mapper Data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 509-512.
- Walton, C.C. (1988). Nonlinear multichannel algorithms for estimating sea surface temperature with AVHRR satellite data. *Journal of Applied Meteorology*, 27, 115-124.