

ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΡΟΦΙΚΩΝ ΠΛΗΜΜΥΡΩΝ ΤΟΥ ΟΚΤΩΒΡΙΟΥ 2006 ΣΤΗ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ ΚΑΙ ΤΗ ΧΑΛΚΙΔΙΚΗ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΩΝ ΕΙΚΟΝΩΝ ΡΑΝΤΑΡ (ENVISAT/ASAR)

Νικολαΐδου Μελίνα¹, Μουρατίδης Αντώνιος^{2*}, Οικονομίδης Δημήτριος³
και Αστάρης Θεόδωρος⁴

¹ Γεωλόγος M.Sc., Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη, Τηλ. 2310 998523, Email: melinikol@gmail.com

² Διδάκτωρ Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη, Τηλ. 2310 998521, Email: amourati@geo.auth.gr

³ Λέκτορας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη, Τηλ. 2310 998790, Email: oikonomi@geo.auth.gr

⁴ Καθηγητής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Φυσικής και Περιβαλλοντικής Γεωγραφίας, Πανεπιστημιούπολη Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη, Τηλ. 2310 998571, Email: astaras@geo.auth.gr

Περίληψη

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με αφορμή τις πλημμύρες που έπληξαν τους Νομούς Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής στις αρχές Οκτωβρίου 2006, προκαλώντας πολυάριθμες καταστροφές. Ο κύριος σκοπός της μελέτης ήταν η αξιολόγηση των εικόνων ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar/SAR) στη χαρτογράφηση των πλημμυρισμένων περιοχών. Για τον παραπάνω σκοπό χρησιμοποιήθηκαν 3 εικόνες ASAR του δορυφόρου ENVISAT (δύο εικόνες πριν το επεισόδιο και μία εικόνα μετά). Σε αυτές εφαρμόστηκε μία σειρά τεχνικών ψηφιακής επεξεργασίας εικόνας για τον εντοπισμό των πλημμυρισμένων περιοχών, όπως η τεχνική κατάτμησης (segmentation), ψευδοχρωματική απεικόνιση και αριθμητικές πράξεις μεταξύ φασματικών τιμών των εικονοστοιχείων. Εντοπίστηκαν δύο κατηγορίες περιοχών: (1) νερό με σημαντικό βάθος και (2) αυξημένη υγρασία εδάφους. Οι περιοχές όπου παρατηρήθηκε νερό με βάθος ήταν λίγες και μικρές σε έκταση, με εξαίρεση τις θέσεις των αποξηραμένων λιμνών Λάντζας και Μαυρούδας. Αντίθετα, οι περιοχές με αυξημένη υγρασία υπήρξαν πολύ περισσότερες.

MAPPING THE CATASTROPHIC OCTOBER 2006 FLOOD EVENTS IN THESSALONIKI AND HALKIDIKI WITH ENVISAT/ASAR DATA

Nikolaidou Melina¹, Mouratidis Antonios² Oikonomidis Dimitrios³ and Astaras Theodore⁴

¹Geologist (M.Sc.), Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Physical and Environmental Geography, Aristotle University Campus, Thessaloniki 54124, Greece, Tel. +30 2310 998523, Email: melinikol@gmail.com

²Dr. Geologist, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Physical and Environmental Geography, Aristotle University Campus, Thessaloniki 54124, Greece, Tel. +30 2310 998521, Email: amourati@geo.auth.gr

³Lecturer, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Physical and Environmental Geography, Aristotle University Campus, Thessaloniki 54124, Greece, Tel. +30 2310 998790, Email: oikonomi@geo.auth.gr

⁴Professor, Aristotle University of Thessaloniki, School of Geology, Department of Physical and Environmental Geography, Aristotle University Campus, Thessaloniki 54124, Greece, Tel. +30 2310 998571, Email: astaras@geo.auth.gr

Abstract

The present study was carried out due to the floods that took place in the beginning of October 2006, in the prefecture of Thessaloniki, causing numerous damages. The main purpose of the study was the use of Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite images for the delineation and mapping of the flooded areas. For the above purpose 3 ENVISAT ASAR images were used (two acquired before the flood and one acquired after the flood). A range of image processing techniques was used for the extraction of the flooded areas including, segmentation technique, false color composition and implementation of mathematical expressions to spectra. Two different kind of changes were identified: (1) flooded areas and (2) increase in soil moisture. Delineated flooded areas were generally of small extent, except for the areas where the lakes Lantza and Mavrouda used to exist several decades ago. On the contrary, a plethora of areas with increased soil moisture content was identified.

Λέξεις κλειδιά: Χαρτογράφηση, Πλημμύρες 2006, Εικόνες ραντάρ (SAR), Θεσσαλονίκη, Χαλκιδική

Key words: Mapping, Floods 2006, SAR images, Thessaloniki, Halkidiki

1. Εισαγωγή

Οι πλημμύρες θεωρούνται μεταξύ των σημαντικότερων φυσικών καταστροφών, υπό την έννοια ότι σε παγκόσμιο επίπεδο επηρεάζουν έναν πολύ μεγάλο πληθυσμό ανθρώπων (Bell, 1999). Ως εκ τούτου, η παρακολούθηση της εξέλιξης τέτοιων φαινομένων λαμβάνει ιδιαίτερη σημασία για την ελαχιστοποίηση, εκτίμηση και αποκατάσταση των καταστροφών που προκαλούνται. Προς την κατεύθυνση αυτή, τα κράτη-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν λάβει σημαντικές αποφάσεις δράσης (European Union, 2007).

Η Τηλεπισκόπηση παρέχει έναν ασφαλή και οικονομικό τρόπο παρακολούθησης των πλημμυρών. Σε αντίθεση με τις δορυφορικές εικόνες του ορατού και υπέρυθρου τμήματος του φάσματος, οι εικόνες ραντάρ συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar/SAR) παρέχουν μοναδικές δυνατότητες μελέτης των πλημμυρικών φαινομένων. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των εγγενών χαρακτηριστικών της μικροκυματικής ακτινοβολίας που χρησιμοποιούνται στις εικόνες SAR και τους επιτρέπουν να λειτουργούν υπό σχεδόν οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες, μέρα και νύκτα.

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε με αφορμή τις πλημμύρες που έπληξαν τους Νομούς Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής στις αρχές Οκτωβρίου 2006, προκαλώντας πολυάριθμες καταστροφές. Ο κύριος σκοπός της μελέτης ήταν η αξιολόγηση των εικόνων SAR στη χαρτογράφηση των πλημμυρισμένων περιοχών.

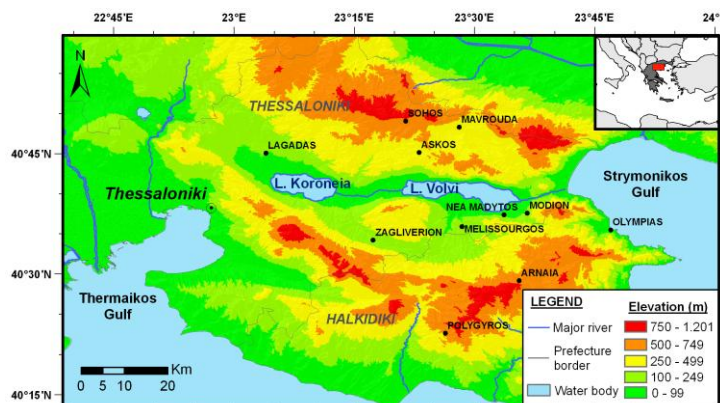
2. Η περιοχή μελέτης και οι πλημμύρες του 2006

2.1 Περιοχή μελέτης

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης (Σχήμα 1) εντοπίζεται στην Κεντρική Μακεδονία και πιο συγκεκριμένα στους Νομούς Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής. Αποτελεί τμήμα ενός ευρύτερου μορφολογικού βυθίσματος γνωστού ως Μυγδονία λεκάνη, ένα εκτεταμένο επίμηκες βύθισμα, το οποίο με τη σειρά του είναι τμήμα ενός ακόμη ευρύτερου βυθίσματος (Προμυγδονιακού), που περιλαμβάνει επίσης τις γειτονικές λεκάνες του Ζαγκλιβερίου και της Μαραθούσας. Το εν λόγω βύθισμα διαχωρίζει τη χερσόνησο της Χαλκιδικής από τον κεντρικό κορμό της Μακεδονίας και αποτελείται από δύο τμήματα: (1) την υπολεκάνη Βόλβης στα ανατολικά και (2) την υπολεκάνη Λαγκαδά (Κορώνειας) στα δυτικά (Ψιλοβίκος, 1977). Από μία γενική κατηγοριοποίηση της κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης (Υπουργείο Γεωργίας, 1991; 1994) προκύπτει, ότι αποτελείται κυρίως από καλλιεργούμενες εκτάσεις (51%), θαμνώνες (22%), δάση (13%) και βοσκότοπους (7%).

Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας εντοπίζεται γύρω από τη

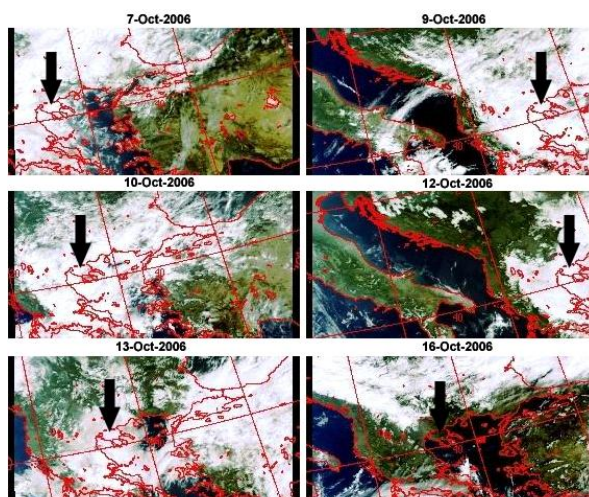
λίμνη Βόλβη, όπου συγκεντρώθηκε το μεγαλύτερο ποσοστό των καταστροφών.



Σχήμα 1. Ευρύτερη περιοχή μελέτης.

2.2 Εξέλιξη του πλημμυρικού επεισοδίου του Οκτωβρίου 2006

Το κυρίως καταστροφικό γεγονός έλαβε χώρα στις 8 Οκτωβρίου 2006, ως αποτέλεσμα πολύ ισχυρής βροχόπτωσης και ευνοϊκών γεωλογικών-γεωμορφολογικών συνθηκών. Πολλές περιοχές της Κεντρικής Μακεδονίας δέχθηκαν μεγάλα ποσά κατακρημνισμάτων, αλλά οι εκτεταμένες πλημμύρες συνέβησαν κυρίως στους Νομούς Θεσσαλονίκης και Χαλκιδικής. Όπως φαίνεται στις εικόνες ENVISAT/MERIS (Σχήμα 2), οι οποίες ελήφθησαν την περίοδο 7-16 Οκτωβρίου, οι δυσμενείς μετεωρολογικές συνθήκες επικράτησαν για αρκετές ημέρες στον ευρύτερο Ελληνικό χώρο.



Σχήμα 2. Μετεωρολογικές συνθήκες πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τα πλημμυρικά επεισόδια, όπως καταγράφηκαν από δορυφορικά δεδομένα ENVISAT/MERIS (πηγή: eolisa).

Στις 8 Οκτωβρίου, οι μετεωρολογικοί σταθμοί της Χαλκιδικής (Πολύγυρος) κατέγραψαν περισσότερα από 100mm κατακρημνισμάτων (Vouvalidis *et al.*, 2006).

Κατά τη διάρκεια των επόμενων ημερών ανάλογα φαινόμενα συνέβησαν σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας, ενώ η ισχυρή βροχόπτωση συνέχισε να δημιουργεί προβλήματα στη Χώρα μέχρι το τέλος του Οκτωβρίου.

2.3 Καταστροφές

Τα υπέρμετρα κατακρημνίσματα που συγκεντρώθηκαν σε μικρό χρονικό διάστημα προκάλεσαν την απότομη αύξηση των υδάτων σε ποταμούς, ρέματα και χειμάρρους με αποτέλεσμα τις εκτεταμένες πλημμύρες. Αρκετοί οικισμοί νότια της λίμνης Βόλβης υπέστησαν σοβαρές καταστροφές, ενώ πολλά ακόμη χωριά, αγροτικές καλλιέργειες, ιδιοκτησίες και υποδομές επλήγησαν σε μεγάλο βαθμό. Από τις μεγαλύτερες συνέπειες υπήρξε η ολοσχερής καταστροφή σημαντικής γέφυρας, τμήμα του παλιού εθνικού οδικού δικτύου, που συνδέει τη Θεσσαλονίκη με την Καβάλα, κοντά στον οικισμό του Μοδίου. (Σχήμα 3).



Σχήμα 3. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα των καταστροφών που προκλήθηκαν ήταν αυτή της γέφυρας κοντά στον οικισμό του Μοδίου. Μόνο η ανακατασκευή της γέφυρας αυτής, δύο χρόνια αργότερα, κόστισε 2,25 εκατομμύρια Ευρώ.

Αρκετές ακόμη μικρότερες γέφυρες της περιοχής καταστράφηκαν μερικώς ή ολοκληρωτικά. Το συνολικό οικονομικό κόστος των καταστροφών στην Ελλάδα εκτιμήθηκε στα 100 εκατομμύρια Ευρώ (Barredo, 2009).

3. Δεδομένα και μεθοδολογία

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκαν τρεις εικόνες ραντάρ του συστήματος ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) (IMG mode) κατακόρυφης πόλωσης (VV Polarisation), από κατερχόμενες (descending) τροχιές του δορυφόρου ENVISAT (track: 7, swath: IS2), με γωνία πρόσπτωσης (incidence angle) $19.20^{\circ} - 26.70^{\circ}$.

Οι ημερομηνίες λήψης των εικόνων ήταν αντίστοιχα: 5/10/2004 (τροχιά 13588), 25/10/2005 (τροχιά 19099) και 10/10/2006 (τροχιά 24109).

Η χωρική διακριτική ικανότητα των εικόνων είναι 28m και το μέγεθος του εικονοστοιχείου (pixel size) 12,5m.

Για την ψηφιακή επεξεργασία των εικόνων χρησιμοποιήθηκαν τα λογισμικά ENVI™ και ERDAS IMAGINE™, καθώς και το ελεύθερης διανομής λογισμικό BEAM (Basic ERS & Envisat AATSR and MERIS Toolbox) του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος/ΕΟΔ (European Space Agency/ESA).

3.1 Χαρακτηριστικά των εικόνων SAR

Τα συστήματα SAR λειτουργούν στην περιοχή των μικροκυμάτων και οι εικόνες που δίδουν αναπαριστούν την επιστροφή (οπισθοσκέδαση/backscattering) της μικροκυματικής ακτινοβολίας (Αστάρης, 2006).

Τα διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της επιφάνειας συμπεριφέρονται διαφορετικά ως προς την προσπίπτουσα μικροκυματική ακτινοβολία των ραντάρ, παρουσιάζουν δηλαδή διαφορετική οπισθοσκέδαση.

Μέτρο της οπισθοσκέδασης αποτελεί ο συντελεστής οπισθοσκέδασης (backscattering coefficient) σ_0 , ο οποίος παρέχει πληροφορίες για την περιοχή που απεικονίζεται κάθε φορά. Ο συντελεστής οπισθοσκέδασης επηρεάζεται από πολύπλοκες παραμέτρους του συστήματος (συχνότητα f , πόλωση p και γωνία πρόσπτωσης των εκπεμπόμενων ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων) αλλά και της επιφάνειας του στόχου, όπως είναι η τραχύτητα και οι διηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους.

Στην περιοχή των μικροκυμάτων, η διαφορά τραχύτητας στις ζώνες επαφής μεταξύ ξηράς και νερού είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε εφαρμογές όπως την μέτρηση της έκτασης πλημμυρών. Οι επιφάνειες κλειστών υδάτων τείνουν να είναι αρκετά ομαλές, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος της προσπίπτουσας μικροκυματικής ενέργειας να αντανακλάται μακριά από το ραντάρ και μόνο ένα μικρό ποσοστό αυτού προς το ραντάρ. Σε αντίθεση, οι επιφάνειες ξηράς τείνουν να έχουν ψηλότερη τραχύτητα, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσοστό ενέργειας να επιστρέφει προς το ραντάρ. Έτσι, οι συγκεντρώσεις κλειστών υδάτων εμφανίζονται με σκούρους τόνους του τεφρού στις εικόνες ραντάρ (χαμηλή οπισθοσκέδαση) και διακρίνονται εύκολα από την περιβάλλουσα ξηρά όπου οι αποχρώσεις του τεφρού είναι πιο ανοιχτές (ψηλότερη οπισθοσκέδαση). Εξαιρέση αποτελεί

η παρουσία ανέμου ή κυμάτων, που προκαλούν αύξηση της τραχύτητας στην επιφάνεια του νερού, με συνέπεια την αύξηση της οπισθοσκέδασης (Bragg scattering).

Η σύνθετη διηλεκτρική σταθερά είναι ένα μέτρο των ηλεκτρικών ιδιοτήτων των υλικών της επιφάνειας. Αποτελείται από δύο μέρη, τη διαπερατότητα (permittivity) και την αγωγιμότητα (conductivity). Οι δύο αυτές φυσικές ιδιότητες εξαρτώνται ιδιαίτερα από την περιεκτικότητα σε υγρασία του εξεταζόμενου υλικού. Στην περιοχή μικροκυμάτων, τα περισσότερα φυσικά υλικά έχουν μια διηλεκτρική σταθερά μεταξύ 3 και 8, σε ξηρές συνθήκες. Το νερό έχει μια υψηλή διηλεκτρική σταθερά (80), τουλάχιστον 10 φορές υψηλότερη απ' ό,τι το ξηρό χρώμα. Κατά συνέπεια, μια αλλαγή στην περιεκτικότητα σε υγρασία προκαλεί γενικά μια σημαντική αλλαγή στις διηλεκτρικές ιδιότητες των φυσικών υλικών. Η αυξανόμενη υγρασία συνδέεται με μια αυξανόμενη οπισθοσκέδαση ραντάρ. Όταν η υγρασία είναι μεγαλύτερη από 30% η οπισθοσκέδαση παραμένει σταθερή.

Η διείσδυση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων σε ένα αντικείμενο είναι αντιστρόφως ανάλογη της περιεκτικότητας σε νερό. Στη περίπτωση βλάστησης, το βάθος διείσδυσης εξαρτάται από την υγρασία, την πυκνότητα και τη γεωμετρική δομή των φυτών (φύλλα, κλαδιά).

3.2 Προεπεξεργασία των εικόνων SAR

Η λήψη της εικόνας 10/10/2006 πραγματοποιήθηκε τρία 24ωρα μετά την εκδήλωση της πλημμύρας στην περιοχή μελέτης και οι 5/10/2004, 25/10/2005 δύο έτη πριν την πλημμύρα και ένα έτος πριν την πλημμύρα αντίστοιχα. Οι εικόνες 5/10/2004 και 25/10/2005 λήφθηκαν ίδια εποχή με την εικόνα μετά την πλημμύρα (μήνας Οκτώβριος), σε στεγνές περιόδους και επιλέχθηκαν έπειτα από έλεγχο των μετεωρολογικών δεδομένων δύο σταθμών μέτρησης στην περιοχή μελέτης.

Οι εικόνες ραντάρ είναι γεωμετρικά διορθωμένες. Η προβολή τους είναι η Παγκόσμια Εγκάρσια Μερκατορική Προβολή (Universal Transverse Mercator/UTM), με αναφορά στο Παγκόσμιο Γεωδαιτικό Σύστημα WGS84 (World Geodetic System 1984).

Για την μείωση της κροκιδωτής υφής (speckle), εγγενούς θορύβου στις εικόνες SAR, εφαρμόστηκε φίλτρο "enhanced Lee" και τέλος εξήχθη η περιοχή ενδιαφέροντος από κάθε εικόνα.

3.3 Τεχνική κατάτμησης

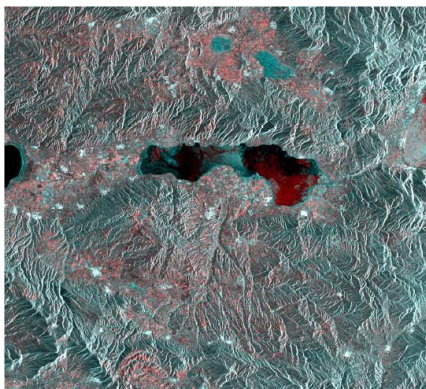
Η τεχνική της κατάτμησης μίας εικόνας (image segmentation) είναι η διεργασία εκείνη, κατά την οποία το περιεχόμενο μίας ψηφιακής εικόνας διαμελίζεται σε πολυάριθμες περιοχές (ομάδες εικονοστοιχείων). Ο σκοπός της τεχνικής αυτής είναι η απλούστευση και/ή η αλλαγή της αναπαράστασης της εικόνας ώστε να διευκολυνθεί η ανάλυσή της. Το κάθε εικονοστοιχείο της κάθε ομάδας είναι παρόμοιο με εκείνα της υπόλοιπης ομάδας στην οποία ανήκει, με βάση κάποια χαρακτηριστικά που παρουσιάζουν ομογένεια όπως χρώμα, τιμή έντασης, ή υφή. Γειτονικές ομάδες είναι σημαντικά διαφορετικές με βάση τα ίδια χαρακτηριστικά.

Η τεχνική της κατάτμησης εφαρμόστηκε στην εικόνα της οποίας η λήψη έγινε μετά την πλημμύρα (10/10/2006) για την ομαδοποίηση εικονοστοιχείων με παρόμοια τιμή έντασης, με τελικό στόχο την εύρεση περιοχών νερού. Μετά από πολλούς πειραματισμούς με τις παραμέτρους της κατάτμησης, το αποτέλεσμα εξακολουθούσε να είναι φτωχό, γεγονός που οφείλεται προφανώς στην λήψη της εικόνας ραντάρ, η οποία δεν έγινε αμέσως μετά το πλημμυρικό επεισόδιο αλλά τρεις μέρες μετά από αυτό, με αποτέλεσμα ο μεγαλύτερος όγκος νερού να υποχωρήσει στο μεσοδιάστημα μεταξύ πλημμύρας και λήψης.

3.4 Ψευδοχρωματική απεικόνιση

Η οπτική εξέταση ψευδοχρωματικών εικόνων είναι μία αρκετά αποτελεσματική μέθοδος, απλή στην εκτέλεση, που διευκολύνει τον ερμηνευτή στην ανάλυση των δεδομένων.

Η τεχνική της ψευδοχρωματικής διαχρονικής απεικόνισης εφαρμόστηκε στις 3 διαθέσιμες εικόνες ραντάρ με σκοπό την ανίχνευση των διαφορών μεταξύ των εικόνων στεγνών συνθηκών και της εικόνας της πλημμύρας. Προκειμένου να προκύψει οπτικά καλύτερο αποτέλεσμα χρησιμοποιήθηκαν δύο εικόνες. Η εικόνα μετά την πλημμύρα, και η εικόνα που προέκυψε από την μέση τιμή των εικόνων πριν την πλημμύρα $(5/10/2004+25/10/2005)/2$. Στην κόκκινη φασματική έξοδο δόθηκε η εικόνα της πλημμύρας ενώ στην πράσινη και στην μπλε φασματική έξοδο δόθηκε η εικόνα μέσης τιμής των «στεγνών» εικόνων. Η επιλογή των φασματικών καναλιών για την κάθε εικόνα έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε οι περιοχές στις οποίες εντοπίζεται νερό μόνο στην εικόνα της πλημμύρας (οι περιοχές δηλαδή με χαμηλή οπισθοσκέδαση στην εικόνα 10/10/2006) να χρωματιστούν με χρώμα κυανό, το οποίο είναι πιο κοντά στο φυσικό χρώμα του νερού (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Σύνθεση ψευδοχρωματικής εικόνας ENVISAT/ASAR:
 $R=10/10/2006$, $G=(5/10/2004+25/10/2005)/2$, $B = (5/10/2004+25/10/2005)/2$

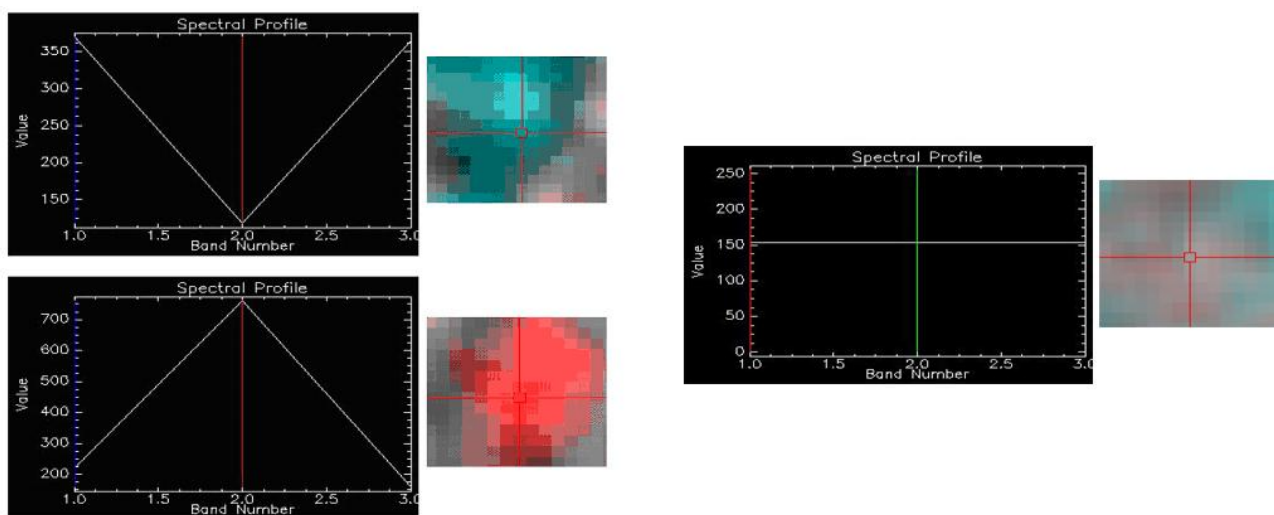
Πιο συγκεκριμένα η ερμηνεία των χρωμάτων στην νέα εικόνα έχει ως εξής:

Στις περιοχές όπου δεν υπάρχει καμία ή σχετικά μικρή αλλαγή, κάθε εικονοστοιχείο έχει 3 φορές την ίδια περίπου τιμή έντασης, προβαλλόμενη στο κόκκινο, πράσινο, και μπλε φασματικό κανάλι αντίστοιχα. Στην περίπτωση λοιπόν αυτή όπου τα R, G, B είναι ίσα, το χρώμα που προκύπτει είναι πάντα απόχρωση του τεφρού, δηλαδή από εντελώς λευκό έως εντελώς μαύρο. Το αποτέλεσμα δηλαδή είναι κατά προσέγγιση το ίδιο με εκείνο της κάθε εικόνας χωριστά.

Στις περιοχές όπου παρατηρείται σημαντικά χαμηλότερη οπισθοσκέδαση στην εικόνα της πλημμύρας (σκούρο τεφρό έως μαύρο), δηλαδή πολύ χαμηλές τιμές έντασης των εικονοστοιχείων (πιθανή παρουσία νερού), το αποτέλεσμα είναι απόχρωση του κυανού το οποίο προκύπτει από τον συνδυασμό του πράσινου και του μπλε στα κανάλια των οποίων οι τιμές έντασης των εικονοστοιχείων είναι ψηλότερες συγκριτικά με τις τιμές στο κόκκινο κανάλι R. Όσο πιο σκούρο λοιπόν είναι το τεφρό στο κανάλι R και όσο πιο ανοιχτό στα κανάλια G, B (δηλαδή όσο μεγαλύτερη αλλαγή), τόσο πιο έντονο εμφανίζεται το κυανό στο τελικό αποτέλεσμα.

Στις περιοχές όπου παρατηρείται σημαντικά υψηλότερη οπισθοσκέδαση στην εικόνα της πλημμύρας (ανοιχτό τεφρό έως λευκό), δηλαδή πολύ ψηλές τιμές έντασης των εικονοστοιχείων (πιθανή αύξηση υγρασίας), το αποτέλεσμα είναι απόχρωση του κόκκινου λόγω του ότι η εικόνα της πλημμύρας δόθηκε στο κανάλι R. Μάλιστα όσο πιο ανοιχτό είναι το τεφρό στο κανάλι R και όσο πιο σκούρο στα κανάλια G, B (δηλαδή όσο μεγαλύτερη αλλαγή), τόσο πιο έντονο εμφανίζεται το κόκκινο στο τελικό αποτέλεσμα.

Τα διαγράμματα που ακολουθούν (Σχήμα 5) απεικονίζουν ενδεικτικά τα φασματικά προφίλ για εικονοστοιχεία κυανού, κόκκινου και τεφρού χρώματος αντίστοιχα της ψευδοχρωματικής εικόνας. Το φασματικό προφίλ κυανού εικονοστοιχείου απεικονίζει περιοχή λίγο νότια της λίμνης Βόλβης, όπου φαίνεται ξεκάθαρα η διαφορά μεταξύ εικόνας πλημμύρας και "στεγνών" εικόνων με πολύ χαμηλότερη οπισθοσκέδαση της περιοχής στην εικόνα της πλημμύρας συγκριτικά με τις άλλες δύο εικόνες (νερό με βάθος). Το φασματικό προφίλ κόκκινου εικονοστοιχείου απεικονίζει περιοχή πλησίον του χωριού Ζαγκλιβέρι, όπου η εικόνα της πλημμύρας παρουσιάζει πολύ μεγαλύτερη οπισθοσκέδαση συγκριτικά με τις άλλες δύο εικόνες (έδαφος με πολύ μεγάλη υγρασία).



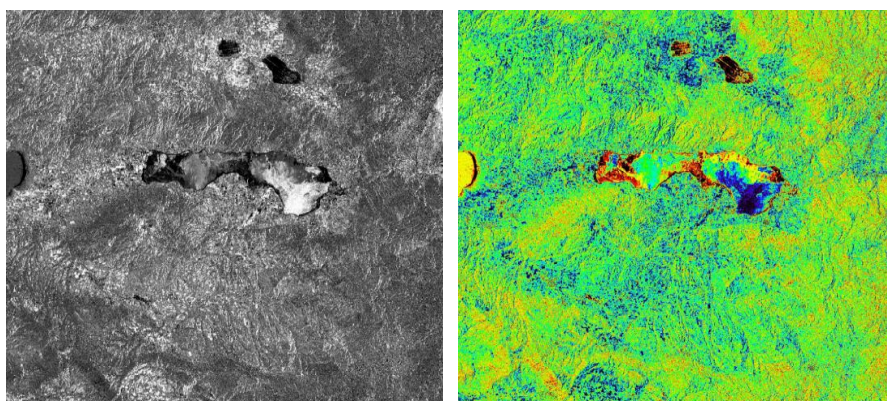
Σχήμα 5. Ενδεικτικά φασματικά προφίλ κυανού, κόκκινου και τεφρού εικονοστοιχείου. Στον οριζόντιο άξονα δίνεται η φασματική έξοδος, όπου $Band\ 1 = (5/10/2004+25/10/2005)/2$, $Band\ 2 = 10/10/2006$ (πλημμύρα), $Band\ 3 = (5/10/2004+25/10/2005)/2$, ενώ στον κατακόρυφο άξονα δίνεται η τιμή έντασης των εικονοστοιχείων.

3.5 Ανίχνευση αλλαγών με την εφαρμογή αριθμητικών πράξεων

Η τεχνική της ανίχνευσης αλλαγών μέσω μαθηματικών πράξεων προσφέρει μία ακριβή και άμεση προσέγγιση στην μέτρηση των αλλαγών μεταξύ ζεύγους εικόνων που αντιπροσωπεύουν μία αρχική και μία τελική κατάσταση.

Οι αρχικές εικόνες πρέπει να είναι εικόνες ενός φάσματος οποιουδήποτε τύπου δεδομένων. Οι αλλαγές υπολογίζονται με την αφαίρεση της εικόνας που αντιπροσωπεύει την αρχική κατάσταση από την εικόνα που αντιπροσωπεύει την τελική κατάσταση (τελική – αρχική) και στη συνέχεια μπορούν να οριστούν κλάσεις, με όρια τα όρια αλλαγών (change thresholds) (Kiage *et al.*, 2005). Μία θετική αλλαγή αντιπροσωπεύει φωτεινότερα εικονοστοιχεία (pixel), (η τελικής κατάστασης φωτεινότητα ήταν μεγαλύτερη από την φωτεινότητα της αρχικής κατάστασης), ενώ μία αρνητική αλλαγή αντιπροσωπεύει εικονοστοιχεία λιγότερο φωτεινά (η τελικής κατάστασης φωτεινότητα ήταν μικρότερη από την φωτεινότητα της αρχικής κατάστασης).

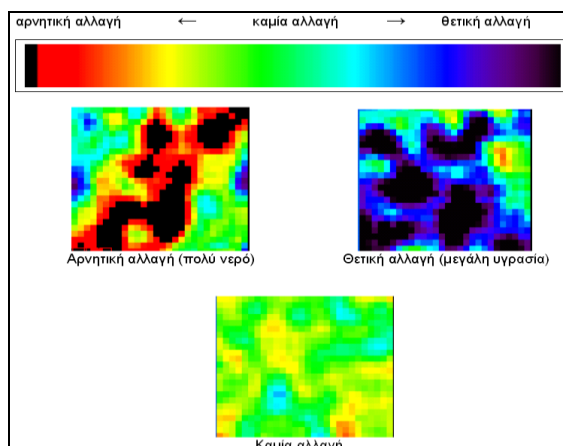
Τα βέλτιστα αποτελέσματα έδωσε η εικόνα (Σχήμα 6) που προέκυψε από τον υπολογισμό του μέσου όρου των τιμών έντασης των εικονοστοιχείων των εικόνων 5/10/2004 (πριν την πλημμύρα) και 25/10/2005 (πριν την πλημμύρα) και ακολούθως την αφαίρεση αυτών από τις αντίστοιχες τιμές των εικονοστοιχείων της εικόνας 10/10/2006 (μετά την πλημμύρα).



Σχήμα 6. Αριστερά: Εικόνα που προέκυψε από την εφαρμογή αριθμητικών πράξεων μεταξύ των τριών διαθέσιμων εικόνων (επεξήγηση στο κείμενο). Δεξιά: Ψευδοχρωματική απεικόνιση (pseudocolour display) της αριστερής εικόνας.

Στην ψευδοχρωματική απεικόνιση του σχήματος 6, οι αρνητικές αλλαγές (στην ασπρόμαυρη εικόνα αντιστοιχούν σε χρώμα μαύρο) απεικονίζονται με χρώμα μαύρο με κόκκινο περίγραμμα, ενώ οι θετικές αλλαγές (στην ασπρόμαυρη εικόνα αντιστοιχούν σε χρώμα λευκό) απεικονίζονται με

χρώμα μαύρο με μωβ περίγραμμα. Τα ενδιάμεσα χρώματα (πορτοκαλί, κίτρινο, πράσινο, γαλάζιο, μπλε) αντιστοιχούν σε περιοχές με μικρή έως απουσία αλλαγών (βλ. Σχήμα 7).



Σχήμα 7. Ενδεικτική απεικόνιση των αλλαγών στην ψευδοχρωματική απεικόνιση του σχήματος 6.

4. Συμπεράσματα

Από την παρούσα μελέτη προκύπτει, ότι οι περιοχές όπου εντοπίζεται νερό με αρκετό βάθος είναι πολύ λιγότερες συγκριτικά με εκείνες όπου εντοπίζεται αυξημένη υγρασία. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανόν στο ότι η λήψη της εικόνας της πλημμύρας έγινε τρία 24ωρα μετά το πλημμυρικό επεισόδιο, με αποτέλεσμα την υποχώρηση του μεγαλύτερου όγκου του νερού πριν το πέρασμα του δρουφόρου.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει το κομμάτι της εικόνας πάνω από την λίμνη Βόλβη, στις θέσεις των αποξηραμένων λιμνών Λάντζα και Μαυρούδα, όπου η ύπαρξη νερού με βάθος είναι ευδιάκριτη και μεγάλης έκτασης, δίνοντας την εντύπωση ότι οι λίμνες έχουν ξαναγεμίσει. Παράλληλα η παρουσία εδάφους με αυξημένη υγρασία εντοπίζεται περιφερειακά των παλιών λιμνών. Νερό με βάθος εντοπίζεται επίσης και σε διάσπαρτες θέσεις μικρότερης έκτασης νότια της λίμνης Βόλβης κοντά στα χωριά Απολλωνία, Μελισσουργός, Μόδι και Ζαγκλιβέρι. Αυξημένη υγρασία εντοπίζεται σε πολλά σημεία νότια της Βόλβης, με την μεγαλύτερη συχνότητα να εμφανίζεται στις δύο υδρολογικές λεκάνες 6^{ης} τάξης (κατά Strahler), των χωριών Απολλωνία και Μελισσουργός.

Οι τρεις τεχνικές που εφαρμόστηκαν στις εικόνες SAR με στόχο την ανίχνευση πλημμυρισμένων περιοχών στην περιοχή μελέτης, δείχνουν αρκετούς περιορισμούς στον εντοπισμό των τμημάτων εκείνων που επλήγησαν στην αιχμή του γεγονότος. Το γεγονός αυτό οφείλεται πιθανόν στην καθυστέρηση λήψης της εικόνας μετά την πλημμύρα σε σχέση με το μέγιστο της πλημμύρας (3 ημέρες μετά), με αποτέλεσμα την υποχώρηση του μεγαλύτερου όγκου του νερού πριν το πέρασμα του δρουφόρου. Ωστόσο, ο εντοπισμός αρκετά μεγάλων σε έκταση πλημμυρισμένων περιοχών στην εικόνα πιστοποιεί τη σημαντικότητα των παραπάνω τεχνικών στην ανίχνευση και καταγραφή πλημμυρών.

Οι τεχνικές επομένως της κατάτμησης (segmentation), της ψευδοχρωματικής απεικόνισης και των φασματικών πράξεων, αποδεικνύονται εξαιρετικά χρήσιμες στον εντοπισμό και καταγραφή πλημμυρικών γεγονότων με εικόνες SAR, με την προϋπόθεση ότι τα δεδομένα έχουν ληφθεί κάτω από τις καταλληλότερες το δυνατόν συνθήκες.

Βιβλιογραφία

- Αστάρης Θ. Α., 2006: Τηλεπισκόπηση - Φωτοερμηνεία στις Γεωεπιστήμες, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Νικολαΐδου Μ., 2009: Χρήση της τηλεπισκόπησης και των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών στην καταγραφή των πλημμυρών της ορεινής περιοχής νοτίως της λίμνης Βόλβης. Μια περιβαλλοντική προσέγγιση. Διατριβή ειδίκευσης, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Υπουργείο Γεωργίας, 1994: Δασικός χάρτης (1:200.000): Νομός Θεσσαλονίκης.
- Υπουργείο Γεωργίας, 1991: Δασικός χάρτης (1:200.000): Νομός Χαλκιδικής - Άγιο Όρος.

- Ψιλοβίκος Α., 1977: Παλαιογεωγραφική εξέλιξη της λεκάνης και της λίμνης της Μυγδονίας. Διδακτορική διατριβή, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Barredo J. I., 2009: Normalised flood losses in Europe: 1970–2006, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **9**, 97–104.
- Bell F. G., 1999: *Geological Hazards. Their assessment, avoidance and mitigation*. E & FN SPON, London.
- European Union, 2007: Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*, L 288/27.
- Kiage L. M., Walker N., Balasubramanian S., Babin A., and Barras J., 2005: Applications of Radarsat -1 synthetic aperture radar imagery to assess hurricane – related flooding of coastal Luisiana, *International Journal of Remote sensing*, **26**, 5359-5380.
- Vouvalidis K., Albanakis K., Mourtziotis P., Nikolaidou M., Papadopoulou S., Stavrianou K., 2006: The flood event of the Melissourgos village, Thessaloniki Prefecture, October 2006. A geomorphological approach. *Bull. of the Geological Society of Greece*, **39**, 86-95.