

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΚΑΜΕΝΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΣΤΟΝ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ

I. M. Αθανασίου¹, Δ. Π. Καλύβας¹, Γ. Π. Πετρόπουλος^{1,2}, Β. Ι. Κόλλια¹

¹Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής, Γεωπονικό
Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 118 55, Αθήνα, Ελλάδα

²Ινστιτούτο Υπολογιστικών Μαθηματικών, Ίδρυμα Τεχνολογίας & Έρευνας ΙΤΕ, Ν.
Πλαστήρα, Βασιλικά Βουνών, 700 13, Ηράκλειο, Ελλάδα
athgia@aua.gr, kalivas@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα σημαντικό πρόβλημα των σύγχρονων κοινωνιών. Με την βοήθεια σύγχρονων τεχνολογιών, όπως η Τηλεπισκόπηση, τα Γεωγραφικά Πληροφοριακά Συστήματα (ΓΠΣ) οι σημερινές κοινωνίες είναι σε θέση να καταγράφουν, να αναλύουν και να χαρτογραφούν τέτοια φαινόμενα. Δύο τέτοια συστήματα τα οποία λειτουργούν σήμερα αποτελούν το MODIS του διαστημικού οργανισμού της NASA, και το EFFIS της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η παρούσα εργασία πραγματοποιεί συγκριτική μελέτη της χαρτογράφησης των καμένων εκτάσεων μεταξύ των δύο παραπάνω δορυφορικών προϊόντων, εστιασμένη ειδικά στις πυρκαγιές στην περιοχή της Ελλάδας σε σχέση με την γεωγραφική θέση, την συνολική καμένη έκταση των πυρκαγιών μεταξύ των δεδομένων MODIS & EFFIS, σε σχέση με τους παράγοντες τοπογραφίας και χρήσεις/ κάλυψης γης.

Λέξεις κλειδιά: Χαρτογράφηση καμένων περιοχών, τηλεπισκόπηση, MODIS, EFFIS

COMPARISON OF BURNT AREA ESTIMATES PRODUCTS OF GREEK WILDLAND FIRES

I. M. Athanasiou¹, D. P. Kalivas¹, G. P. Petropoulos^{1,2}, V. J. Kollias

¹Department of Natural Resources Development and Agricultural Engineering,
Agricultural University of Athens, Iera Odos 75, 118 55, Athens, Greece

²Institute of Applied and Computational Mathematics, Foundation for Research and
Technology 8 - Hellas (FORTH), N. Plastira 100, Vasilika Vouton, 70013, Heraklion,
Greece

athgia@aua.gr, kalivas@aua.gr

ABSTRACT

Wildland fires have long been recognized as one of the most threatening sources of disturbance for property, infrastructures as well as ecosystems. With the support of modern technologies, such as of remote sensing, today's societies are able to map and analyze wildland fires at large observational scales and at otherwise inaccessible locations in a cost-effective, repetitive and systematic way. Nowadays, a wide variety of remote sensing sensors are employed for this purpose, including also a number of relevant operational products. With regards to burnt area mapping in particular, two of the most widely used operational products consist the MODIS burnt area product and the European Forest Fires Information System EFFIS, operated by NASA and the European Union respectively. The objective of the present work has been to undertake a comparative study of the MODIS and EFFIS burnt area operational products in a

Mediterranean setting. For this purpose, the burnt area estimates by those two datasets for Greece are compared for a number of consecutive years for which observations from both operational products were available. In the framework of the analysis conducted, it was also performed an investigation of the main findings observed with respect to parameters such as topography and land use/cover.

Keywords: burnt area mapping, remote sensing, MODIS, EFFIS

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν μια σημαντική συνιστώσα διαφόρων τύπων οικοσυστημάτων που εκτείνονται σε διάφορα γεωγραφικά πλάτη και μήκη όπως τα βόρεια οικοσυστήματα, εύκρατα δάση, μεσογειακά οικοσυστήματα, λιβάδια και σαβάνες, οικοσυστήματα σε ξηρά και ημίξηρα κλίματα, τροπικές και εξωτικές φυτείες και άλλα (Chandler et al., 1983). Συχνά επίσης αποτελούν ένα ισχυρό διαχειριστικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα για την τροποποίηση του τοπίου, την αλλαγή των χρήσεων γης και των χλωριδικών συνιστωσών των οικοσυστημάτων (Salvador and Pons, 1995; Pereira and άλλοι, 1997). Οι δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα αποτελούν σοβαρό πρόβλημα δεδομένου ότι καταστρέφουν ετησίως μεγάλες και πολύτιμες δασικές εκτάσεις (Kozlowski and Ahlgren, 1974).

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση χρησιμεύει τόσο στην παρακολούθηση της εξέλιξης των δασικών πυρκαγιών όσο και της καταγραφής των ζημιών μετά την κατάσβεση τους. Η μικρή χρονική κλίμακα στην οποία αυτές εξελίσσονται απαιτεί τη χρήση δορυφορικών εικόνων με μεγάλη διακριτική ικανότητα για την παρακολούθηση της εξέλιξης τους, σε βάρος όμως της χωρικής ανάλυσης (Καρτάλης και Φεΐδας, 2006). Η δορυφορική τηλεπισκόπηση επιπλέον έχει εφαρμογές σε τομείς όπως η εκτίμηση του κινδύνου των δασικών πυρκαγιών, η καταγραφή της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, η πρόληψη των πυρκαγιών και η αποκατάσταση καμένων περιοχών (Μιχελάκης, 2010).

Η παρούσα εργασία έχει ως πρωτεύοντα στόχο τον εντοπισμό των διαφορών των εκτιμήσεων των καμένων εκτάσεων των δυο συστημάτων τηλεπισκόπησης για τον Ελλαδικό χώρο, δηλαδή το Ευρωπαϊκό Σύστημα Πληροφόρησης για τις Δασικές Πυρκαγιές EFFIS (European Forest Fire Information System) και το MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) της NASA. Η συγκριτική ανάλυση έγινε για την χαρτογράφηση - εκτίμηση των καμένων εκτάσεων των ετών 2007, 2006 και 2005. Ο στόχος της συγκριτικής ανάλυσης είναι να αναδείξει τα μειονεκτήματα και τα πλεονεκτήματα των δυο συστημάτων σε σχέση με τους σταθερούς παράγοντες που έχουν τεθεί. Επιπλέον να δοθούν πιθανές επεξηγήσεις σε σχέση με τα αποτελέσματα της σύγκρισης.

2. ΥΛΙΚΑ

Το **MODIS** (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) αποτελεί βασικό εργαλείο των δορυφόρων TERRA και AQUA. Ο δορυφόρος TERRA είναι σε τροχιά γύρω από τη γη και είναι προγραμματισμένος να διέρχεται από τον ισημερινό με κατεύθυνση από τον βορρά προς νότο το πρωί, ενώ ο AQUA περνάει τον ισημερινό με κατεύθυνση από τον νότο προς τον βορρά το απόγευμα. Τα TERRA MODIS και AQUA MODIS σαρώνουν την συνολική επιφάνεια της γης κάθε 1 έως 2 ημέρες. Η παρακολούθηση των θερμικών αλλαγών, η πυρανίχνευση δηλαδή βασίζεται σε απόλυτη ανίχνευση της φωτιάς όταν η ισχύς πυρός είναι αρκετή για να ενεργοποιήσει τον αισθητήρα. Το προϊόν περιέχει την εκδήλωση της πυρκαγιάς, την θέση της πυρκαγιάς,

τα λογικά κριτήρια που χρησιμοποιούνται για την επιλογή της φωτιάς και το βαθμό εμπιστοσύνης ανίχνευσης πυρκαγιάς (MODIS LAND, 2011: NASA, <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/index.htm>). Επιπλέον το προϊόν «MCD45» το οποίο χρησιμοποιούμε στην μελέτη είναι 500 μέτρα ανάλυσης (Boschetti et al., 2009).

Το **EFFIS** (European Forest Fire Information System) έχει δημιουργηθεί από το Joint Research Centre (JRC) και το Directorate General for Environment (DG ENV) με σκοπό να υποστηρίξει τις υπηρεσίες που είναι επιφορτισμένες με την προστασία των δασών από τις πυρκαγιές στις χώρες της ΕΕ (EFFIS WEB, 2011, <http://effis.jrc.ec.europa.eu/about>). Η καταγραφή του προϊόντος των πυρκαγιών γίνεται με τα λεγόμενα «καυτά σημεία» του MODIS και τους αισθητήρες, των δορυφόρων TERRA και AQUA, τα οποία εντοπίζουν τις περιοχές με σαφώς υψηλότερη θερμοκρασία από το υπόλοιπο περιβάλλον τους (hotspots) (EFFIS WEB, 2011, <http://effis.jrc.ec.europa.eu/about/brief-history>). Το EFFIS εφαρμόζει το σύστημα Rapid Damage Assessment (RDA) από το 2003, είναι ένα σύστημα ταχείας αξιολόγησης της ζημίας μιας πυρκαγιάς. Το σύστημα αυτό έχει χωρική ανάλυση 250μέτρα. Δίνει καθημερινή ενημέρωση καμένων περιοχών για περιπτώσεις τουλάχιστον 40 εκταρίων και πάνω, υπάρχουν όμως και περιπτώσεις χαρτογράφησης καμένων περιοχών μικρότερων από 40εκτάρια. Το ποσοστό των πυρκαγιών που χαρτογραφείται είναι 75-80% στο σύνολο των πυρκαγιών που έγιναν στην ΕΕ (EFFIS WEB, 2011, <http://effis.jrc.ec.europa.eu/about/technical-background/rapid-damage-assessment>). Το προϊόν RDA αποσκοπεί στην παροχή εκτιμήσεων των καμένων περιοχών σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Από το 2007 η εκτίμηση της ζημίας που προκαλούν οι φωτιές έχει βελτιωθεί αισθητά, δηλαδή δορυφορικές εικόνες λαμβάνονται με βελτιωμένη χωρική ανάλυση.

Το **ASTER GDEM** (Global Digital Elevation Map Announcement) είναι ένα ψηφιακό μοντέλο υψομέτρου που έχει ανακοινωθεί τον Ιούνιο 2009. Μέσω του ASTER καταλήξαμε στο πλεγματικό αρχείο χωρικής ανάλυσης 100 μέτρων με την πληροφορία του υψομέτρου για όλο τον ελλαδικό χώρο, με την βοήθεια κατάλληλων επεξεργασιών εξάγονται και άλλες σημαντικές τοπογραφικές ιδιότητες. Στο «ArcMap 9.3» από το «Toolbox» στην ενότητα «Spatial Analyst Tools» στην υποενότητα «Surface» και στην συνέχεια από την εντολή «Slope» στην οποία εισάγουμε το υψομετρικό αρχείο δημιουργούμε ένα νέο αρχείο χωρικής ανάλυσης 100 μέτρων που μας δίνει την πληροφορία της κλίσης σε μοίρες για όλη την Ελλάδα.

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος και η Ευρωπαϊκή Επιτροπή μας δίνουν την δυνατότητα να λάβουμε την κάλυψη/χρήσεις γης για το έτος 2000 **CORINE LAND COVER 2000** (JRC-EEA, 2005). Μας παρέχει πληροφορίες εδαφοκάλυψης πολύ υψηλής ποιότητας στις οποίες καταλήξανε ύστερα από συνεργασία ευρωπαϊκών υπηρεσιών αλλά και εθνικών ομάδων εργασίας.

3. ΜΕΘΟΔΟΙ

Το προϊόν του MODIS (πλεγματική μορφή) εισήχθη στο λογισμικό ENVI, προκειμένου να δημιουργηθεί ένα αρχείο για κάθε έτος που περιέχει όλες τις καμένες εκτάσεις σε ένα διανυσματικό αρχείο. Η εντολή «Math Band» χρησιμοποιήθηκε για την απομόνωση (masking) από το αρχικό αρχείο, ώστε να δημιουργηθεί νέα αρχείο με την καμένη περιοχή. Πάλι με την εντολή «Math Band» όλοι οι μήνες συγχωνεύθηκαν σε ένα αρχείου για κάθε έτος καμένης έκτασης χαρτογραφημένης από το MODIS. Τέλος, χρησιμοποιώντας τις εντολές «Raster to Vector» και «Export Active Layer to Shapefile» κατά αυτόν τον τρόπο δημιουργήθηκε αρχείο έτοιμο προς επεξεργασία στο ArcMap. Χρησιμοποιώντας πλεγματικές λειτουργίες, από το αρχείο του ASTER DEM, εφαρμόζοντας εντολές, όπως η slope και Int, υπολογίζονται την κλίση. Όλοι οι

τοπογραφικοί παράγοντες έχουν 100μέτρα χωρική ανάλυση. Επιπλέον δυνατότητες διανυσματικής ανάλυσης ΓΠΣ (intersect, erase, union & clip) εφαρμόστηκε στα «shapefiles» με τις καμένες περιοχές έτσι ώστε να εξαχθούν οι κοινές των καμένων περιοχών (MODIS & EFFIS), οι περιοχές οι οποίες ανιχνεύονται μόνο από MODIS ή EFFIS και οι μη κοινές καμένες περιοχές. Οι χρήσεις γης (CORINE 2000), το υψόμετρο και η κλίση των καμένων περιοχών, για κάθε έτος προσδιορίστηκαν χρησιμοποιώντας τα εργαλεία ανάλυσης GIS (Clip, Intersect και Int) για τα προϊόντα του MODIS & EFFIS αντίστοιχα.

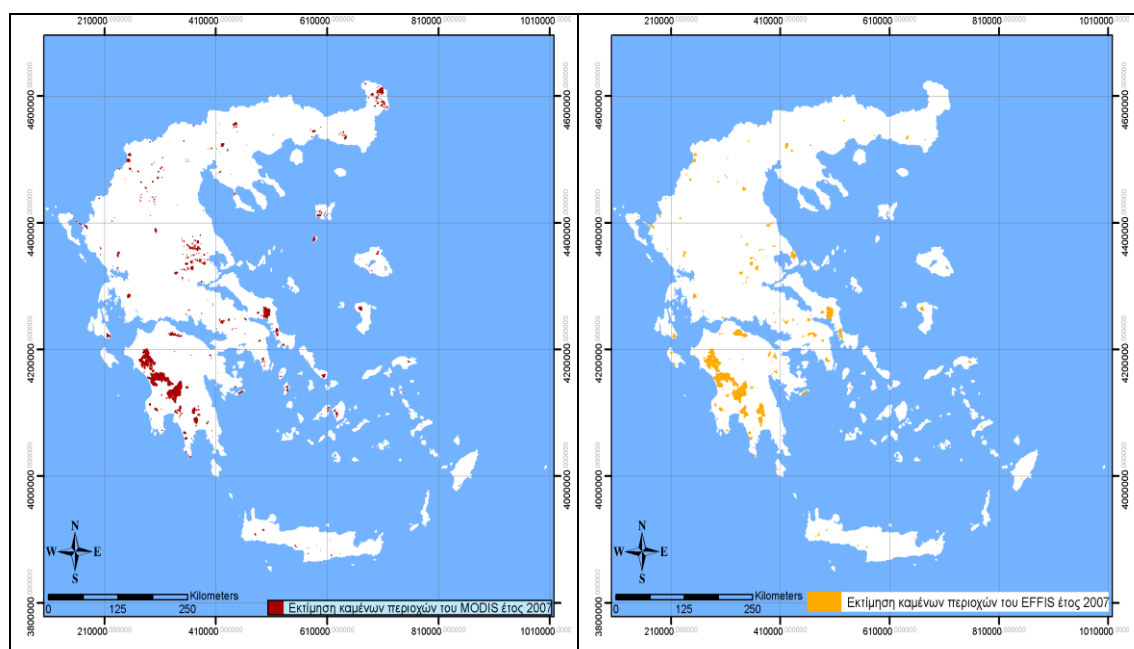
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι **συνολικές καμένες εκτάσεις** που εκτίμησαν το MODIS και το EFFIS σε απόλυτες τιμές αλλά και σε χαρτογραφικές απεικονίσεις συνοψίζονται στον Πινάκα 1. & Εικόνα 1. Από τον Πίνακα 1 έχουμε τα πρώτα σημαντικά αποτελέσματα και τις πρώτες διαφοροποιήσεις των δυο προϊόντων. Και για τις τρεις χρονιές μελέτης παρατηρούμε ότι οι δυο οργανισμοί έχουν χαρτογραφήσει διαφορετικές εκτάσεις πυρκαγιών για τον Ελλαδικό χώρο. Τις χρονιές 2005 και 2006 το MODIS έχει κατά μεγάλο ποσοστό περισσότερες εκτιμώμενες περιοχές από τον ευρωπαϊκό οργανισμό EFFIS. Ειδικά την χρονιά 2005 έχουμε μια τεράστια απόκλιση των αποτελεσμάτων καθώς έχουμε πενταπλάσια καταγραφή από τον MODIS σε σχέση με τον EFFIS. Για το έτος 2007 υπάρχει αξιοσημείωτη διαφοροποίηση των καταγραφών των πυρκαγιών. Συγκεκριμένα το EFFIS χαρτογράφησε 278.156ha καμένων περιοχών σε σχέση με τα σαφώς λιγότερα 228.105ha του MODIS. Πέρα από την διαφοροποίηση των απόλυτων εκτάσεων φαίνονται και διαφορές σε χωρικό επίπεδο μεταξύ των δυο προϊόντων (Εικόνα 1 & 2) για το έτος 2007.

Πίνακας 1: Έκταση εκτιμώμενων καμένων περιοχών από MODIS & EFFIS.

	Καμένες περιοχές σε εκτάρια (ha)	
	Modis	Effis
2007	228.105	278.156
2006	22.643	16.347
2005	26.256	4.515

Ανάλογη εργασία για την περιοχή της Ελλάδας έχει γίνει για την πυρική περίοδο 2007 από τον Boschetti L. το 2008 «A Modis assessment of the summer 2007 extent burned in Greece» (Boschetti, 2008). Στην εργασία αυτή έχουμε σαφής διαφοροποιήσεις στο σύνολο των καμένων εκτάσεων μεταξύ των δυο προϊόντων MODIS & EFFIS. Δηλαδή υπάρχει σημαντική απόκλιση στο σύνολο των χαρτογραφημένων καμένων περιοχών για το έτος 2007 και στις δύο εργασίες. Οι χωρικές και οι συνολικές εκτιμώμενες διαφοροποιήσεις πιθανώς οφείλονται στην διαφορετική χωρική ανάλυση ή και στα διαφορετικά φασματικά κανάλια των δυο συστημάτων. Επιπλέον διαφορετικές ελάχιστες εκτάσεις για την χαρτογράφηση μιας πυρκαγιάς, MODIS 50ha & EFFIS 40ha, δηλαδή το EFFIS χαρτογραφεί πυρκαγιές μικρού μεγέθους τις οποίες το MODIS τις αφήνει εκτός. Οι διαφορές μπορεί να αποδοθούν στις χωρικές, φασματικές και χρονικές ιδιότητες σε σχέση με τις τεχνικές προδιαγραφές του αισθητήρα του δορυφορικού (Robinson, 1991; Eva and Lambin, 2000; Boschetti et al., 2004).



Εικόνες 1 & 2. Εκτιμώμενες καμένες περιοχές 2007 κατά MODIS & EFFIS.

Στην συνέχεια εισάγονται οι **χρήσεις γης** στις εκτιμώμενες καμένες περιοχές. Παρατηρώντας (Πίνακας 2) τα δεδομένα για το έτος 2007 καταλήγουμε αμέσως στο συμπέρασμα ότι το μεν MODIS έχει εντοπίσει περισσότερες γεωργικές περιοχές από τις δασικές ενώ το EFFIS έχει εντοπίσει περισσότερες δασικές περιοχές από τις γεωργικές. Επιπλέον οι κοινές περιοχές είναι απολύτως μοιρασμένες μεταξύ των γεωργικών και δασικών περιοχών. Για το έτος 2006 (Πίνακας 3) είναι παρόμοια τα αποτελέσματα με την προηγούμενη χρονιά σε μεγαλύτερο βαθμό. Καθώς ξανά το EFFIS έχει εντοπίσει πολύ περισσότερες δασικές περιοχές σε σχέση με τις γεωργικές αλλά και σε σχέση με το MODIS. Καθώς το τελευταίο έχει ανιχνεύσει για την χρονιά 2006 μεγαλύτερο μέγεθος φωτιών σε γεωργικές εκτάσεις σε σχέση με τις δασικές.

Πίνακας 2. Χρήσεις γης εκτιμήσεων καμένων περιοχών 2007.

Χρήσεις γης σε εκτάρια (ha) για το έτος 2007

	Modis	Effis	Κοινές περιοχές	Μη κοινές περιοχές	Εντοπισμένες από Modis	Εντοπισμένες από Effis
Τεχνητές περιοχές	2.265	3.080	1.321	2.704	944	1.759
Γεωργικές περιοχές	125.263	113.020	78.600	81.082	46.662	34.419
Δάσος & ημιφυσικές περιοχές	99.839	154.928	79.355	96.057	20.484	75.573
Υγρότοποι	247	278	168	189	79	110
Υδάτινες περιοχές	375	178	138	278	238	40
Σύνολο	227.990	271.483	159.582	180.310	68.408	111.902

Για την χρονιά 2005 (Πίνακας 4) στις καμένες περιοχές κατά MODIS διαφαίνεται πολύ αυξημένο ποσοστό των γεωργικών εκτάσεων σε σχέση με τις δασικές. Πιθανή εξήγηση των αποτελεσμάτων για τα τρία έτη έχει να κάνει με το γεγονός ότι έχουν συμπεριληφθεί από την πυρανίχνευση (hotspots) και αγροτικές εργασίες που δεν είναι πυρκαγιές. Δηλαδή η μεθοδολογία αποκλεισμού των «hotspots» του MODIS διαφέρει σε σχέση με το EFFIS, δηλαδή οι αλγόριθμοι ανίχνευσης των δυο συστημάτων διαφέρουν.

Πίνακας 3. Χρήσεις γης εκτιμώμενων καμένων περιοχών 2006.

Χρήσεις γης σε εκτάρια (ha) για το έτος 2006

	Modis	Effis	Κοινές περιοχές	Μη κοινές περιοχές	Εντοπισμένες από Modis	Εντοπισμένες από Effis
Τεχνητές περιοχές	154	25	0	179	154	25
Γεωργικές περιοχές	17.550	5.798	1.619	20.109	15.931	4.179
Δάσος & ημιφυσικές περιοχές	4.868	10.525	3.071	9.252	1.797	7.454
Υγρότοποι	14	0	0	14	14	0
Υδάτινες περιοχές	31	0	0	31	31	0
Σύνολο	22.617	16.348	4.690	29.586	17.928	11.658

Πίνακας 4. Χρήσεις γης εκτιμώμενων καμένων περιοχών 2005.

Χρήσεις γης σε εκτάρια (ha) για το έτος 2005

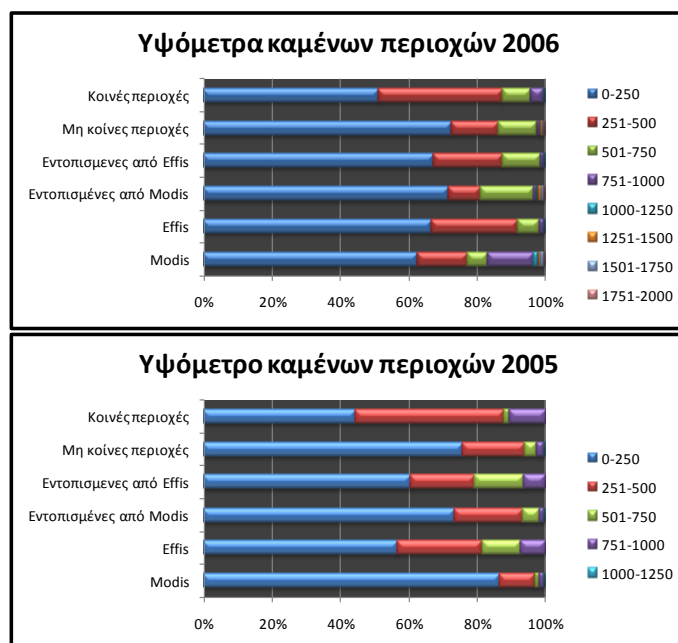
	Modis	Effis	Κοινές περιοχές	Μη κοινές περιοχές	Εντοπισμένες από Modis	Εντοπισμένες από Effis
Τεχνητές περιοχές	414	217	0	631	414	217
Γεωργικές περιοχές	22.310	2.003	370	23.573	21.940	1.633
Δάσος & ημιφυσικές περιοχές	3.508	2.295	680	4.442	2.828	1.614
Υγρότοποι	1	0	0	1	1	0
Υδάτινες περιοχές	20	0	0	20	20	0
Σύνολο	26.253	4.515	1.051	28.667	25.203	3.465

Στην συνέχεια εισάγεται ο παράγοντας του **υψόμετρου** για τις καμένες περιοχές των δυο συστημάτων. Για τις πυρκαγιές του 2007 (Γραφήματα 5, 6 & 7) διαπιστώνεται ότι στα χαμηλά υψόμετρα υπάρχει μεγαλύτερος όγκος μετρήσεων από το MODIS σε αντίθεση με το EFFIS. Για την χρονιά 2006 παρατηρείται η ανατροπή σε σχέση με το έτος 2007 για τα χαμηλά υψόμετρα μέχρι 500 μέτρα καθώς για το EFFIS έχουμε το μεγαλύτερο ποσοστό των μετρήσεων και σχεδόν όλες οι καμένες περιοχές βρίσκονται στις δυο πρώτες κατηγορίες. Στην κατηγορία (751-1000) το MODIS έχει εντοπίσει αρκετά μεγάλο ποσοστό σε σχέση με το ευρωπαϊκό που έχει ελάχιστες μετρήσεις. Δηλαδή στα χαμηλά υψόμετρα παρουσιάζονται καταγραφές σε μεγαλύτερο ποσοστό επί του συνόλου του από τον EFFIS.



Γραφήματα 1. Υψόμετρα εκτιμώμενων καμένων περιοχών σε ποσοστό επί του συνόλου.

Για το έτος 2005 στην πρώτη κατηγορία μέχρι 250 μέτρα υψόμετρο συγκεντρώνονται σχεδόν όλες οι καμένες περιοχές του MODIS, ενώ για το EFFIS έχουμε ομαλότερη διασπορά την μετρήσεων σε όλες τις κατηγορίες υψόμετρου. Συμπερασματικά για το 2005 έχουμε περιοχές χαρτογραφημένες με χαμηλότερα υψόμετρα από το MODIS σε σχέση με το EFFIS.



Γραφήματα 2 & 3. Υψόμετρα εκτιμώμενων καμένων περιοχών σε ποσοστό επί του συνόλου.

Η **κλίση** της επιφάνειας των εκτιμώμενων καμένων περιοχών αναλύεται σε κλάσεις στους Πίνακες 5, 6 & 7 όπου παρατηρείται μια πολύ δυνατή τάση των περιοχών του MODIS να έχουν κλίσεις χαμηλής τιμής σε σχέση με το EFFIS. Ο δεύτερος έχει τις τιμές των κλίσεων διασκορπισμένες σε όλες τις κατηγορίες των κλίσεων κάτι που δεν συμβαίνει με τον πρώτο που συγκεντρώνει πολύ μεγάλα ποσοστά στην πρώτη κλάση. Το φαινόμενο είναι ακόμα πιο έντονο στις καμένες περιοχές που είναι εντοπισμένες μόνο από το MODIS. Παρατηρείται ότι το MODIS έχει μεγαλύτερο ποσοστό καμένων περιοχών με μικρές κλίσεις που ανήκουν στην πρώτη κλάση, σε αντίθεση με το EFFIS που έχουμε μια μεγαλύτερη ισορροπία στην κατανομή των τιμών κλίσης. Για έτος 2007 το MODIS έχει χαρτογραφήσει κατά 83% καμένες περιοχές σχεδόν επίπεδες σε σχέση με το EFFIS που έχει καταγράψει 53,6%.

Πίνακες 5 & 6. Κλίσεις εκτιμώμενων καμένων περιοχών.

Κλίση καμένων περιοχών για το έτος 2007 σε ποσοστό επί της εκατό (%)						
	Κλίση (0-10)°	Κλίση (11-20)°	Κλίση (21-30)°	Κλίση (31-40)°	Κλίση (41-50)°	Κλίση (51-60)°
Modis	67,1	24,9	6,7	1,3	0,1	0,0
Effis	55,5	31,5	10,3	2,3	0,4	0,0
Κοινές περιοχές	61,3	29,2	7,9	1,5	0,1	0,0
Μη κοινές περιοχές	60,0	27,2	9,8	2,5	0,4	0,0
Εντοπισμένες από Modis	80,7	14,8	3,7	0,8	0,1	0,0
Εντοπισμένες από Effis	47,4	34,8	13,6	3,6	0,7	0,1

Κλίση καμένων περιοχών για το έτος 2006 σε ποσοστό επί της εκατό (%)					
	Κλίση (0-10)°	Κλίση (11-20)°	Κλίση (21-30)°	Κλίση (31-40)°	Κλίση (41-50)°
Modis	83,2	11,4	4,4	1,0	0,1
Effis	53,6	34,7	9,5	2,1	0,1
Κοινές περιοχές	43,9	38,4	13,8	3,6	0,2
Μη κοινές περιοχές	79,3	15,7	4,3	0,7	0,0
Εντοπισμένες από Modis	93,5	4,2	2,0	0,3	0,0
Εντοπισμένες από Effis	57,5	33,2	7,8	1,5	0,1

Για το 2006 αναδεικνύετε πιο έντονο το φαινόμενο καθώς πάνω από το 80% των καμένων περιοχών του MODIS είναι στις επίπεδες περιοχές. Για το έτος 2005 εξακολουθεί να ισχύει το ίδιο φαινόμενο με τις δυο προηγούμενες χρονιές.

Πίνακας 7. Κλίσεις εκτιμώμενων καμένων περιοχών.

Κλίση καμένων περιοχών για το έτος 2005 σε ποσοστό επί της εκατό (%)					
	Κλίση (0-10)°	Κλίση (11-20)°	Κλίση (21-30)°	Κλίση (31-40)°	Κλίση (41-50)°
Modis	93,1	5,3	1,4	0,1	0,0
Effis	72,0	22,1	5,6	0,4	0,0
Κοινές περιοχές	62,2	28,3	8,8	0,7	0,0
Μη κοινές περιοχές	92,1	6,3	1,5	0,1	0,0
Εντοπισμένες από Modis	94,4	4,4	1,1	0,1	0,0
Εντοπισμένες από Effis	75,0	20,1	4,6	0,3	0,0

Η συγκεκριμένη τάση επικρατεί και για τις τρεις χρονιές. Πιθανή εξήγηση έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι γεωργικές περιοχές, που έχει εντοπίσει το MODIS σε μεγαλύτερο ποσοστό, έχουν κατά κανόνα μικρότερες κλίσεις από τις δασικές.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την σύγκριση που εφαρμόστηκε στα δυο προϊόντα έχουμε σημαντικές διαφοροποιήσεις στο σύνολο των καμένων εκτάσεων και στην χωρική διαφοροποίηση των εκτιμώμενων καμένων περιοχών, δηλαδή αποκαλύφθηκαν διαφορές μεταξύ των δύο προϊόντων τόσο χωρικά όσο και σε απόλυτες τιμές.

Σε σχέση με τις χρήσεις γης το MODIS έχει χαρτογραφήσει πολύ περισσότερες γεωργικές καμένες περιοχές σε σχέση με το EFFIS, το οποίο έχει καταγράψει μεγαλύτερο ποσοστό δασικών περιοχών για τις 3 χρονιές.

Τα συμπεράσματα σε σχέση με το υψόμετρο των καμένων χαρτογραφημένων περιοχών αναδεικνύουν μια τάση στις περιοχές του MODIS να έχουν μεγαλύτερο ποσοστό περιοχών με χαμηλό υψόμετρο σε σχέση με το EFFIS. Εξαιρεση αποτελεί το έτος 2006 όπου έχουμε ισορροπημένα αποτελέσματα μεταξύ των δυο.

Η ιδιότητα της κλίσης των καμένων περιοχών δίνει την μεγαλύτερη στατιστική διαφοροποίηση καθώς οι περιοχές του MODIS δίνουν κατά πολύ μεγαλύτερο ποσοστό περιοχές με μικρή κλίση σε αντίθεση με το EFFIS που έχει μεγαλύτερη διασπορά.

Ο παράγοντας του δείκτη υγρασίας για το έτος 2007 παρέχει στατιστική ομοιότητα μεταξύ των δυο συστημάτων ενώ για τα άλλα δυο έτη το MODIS έχει περιοχές με μεγαλύτερη τάση να συγκρατούν υγρασία από το EFFIS.

Ανάλογες μελέτες που έγιναν στο παρελθόν συγκρίνοντας τη συμφωνία καμένων εκτάσεων επιχειρησιακών προϊόντων ανέδειξαν εξίσου μεγάλες διαφορές στην εκτιμώμενη καμένη έκταση. Είναι αρκετά σημαντικό να υπογραμμιστεί ότι η έλλειψη ακριβούς αντιστοιχίας μεταξύ των τελικών δεδομένων δεν σημαίνει απαραίτητα ότι το ένα ή το άλλο προϊόν είναι ανακριβή (Boschetti et al., 2004). Εν κατακλείδι η μεθοδολογία της σύγκρισης καθώς και τα ευρήματα από τη μελέτη πιθανός να είναι χρήσιμα για την εκτίμηση της αναμενόμενης απόδοσης των εξεταζόμενων εδώ επιχειρησιακών προϊόντων σε άλλες συνθήκες οικοσυστημάτων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Boschetti, L., Eva, H.D., Brivio, P.A., and Gregoire, JM. (2004): Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products. *Geophysical Research Letters*, 31, L21501.
- Boschetti, L., Eva, H.D., Brivio, P.A., and Gregoire, JM. (2004): Lessons to be learned from the comparison of three satellite-derived biomass burning products. *Geophysical Research Letters*, 31, L21501.
- Boschetti L., Roy D., Barbosa P., Boca R., Justice C., (2008): A Modis assessment of the summer 2007 extent burned in Greece, *Journal international of Remote Sensing*, 29: 8, 2433 – 2436

- Boschetti L., David Roy, Anja A. Hoffmann, (2009): MODIS Collection 5 Burned Area Product - MCD45, Version 2
- Chandler, C., P. Cheney, P. Thomas, L. Traband, and D. Williams, (1983): Fire in Forestry, Volume I. Forest Fire Behavior and Effects, A Wiley-Interscience Publication. John Wiley & Sons, 449
- Eva and Lambin (2000): H.D. Eva and E.F. Lambin, Fires and land-cover change in the tropics: a remote sensing analysis at the landscape scale. *Journal of Biogeography* 27 (2000), pp. 765–776
- JRC-EEA (2005): CORINE land cover updating for the year 2000: image 2000 and CLC2000. In: Lima, V. (Ed.), Products and Methods. Report EUR 21757 EN. JRC-Ispra [<http://reports.eea.europa.eu/COR0-landcover/en> , accessed on July, 28th, 2011].
- Kozlowski T.T., C.E Ahlgren, (1974): Fire and Ecosystems, Academic Press, New York, USA
- Robinson, J. (1991): Fire from space – global fire evaluation using infrared remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 12, pp. 3–24.
- Salvador R, Pons X, (1995): The role of fire in a Mediterranean area as a long term landscape modifier, In: Chuvieco E (ed) Remote Sensing and GIS applications to forest fire management, Universidad de Alcala de Henares, Spain, pp 69-71
- Καρτάλης Κ., Φεΐδας Χ., (2006): Αρχές & εφαρμογές δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Εκδόσεις «Β. Γκιούρδας», Αθήνα, 2, 550 – 559
- Μιχελάκης Δημήτρης, (2010): Εξέλιξη της χαρτογράφησης-Η χαρτογραφία στην Ελλάδα

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΑΚΡΙΒΕΙΑΣ ΤΩΝ ΨΗΦΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΕΔΑΦΟΥΣ (DEM) – ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ

Σ. Γιαννόπουλος¹, Χ. Χρηστίδης¹ και Α. Λουκάς²

¹Τμήμα Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Α.Π.Θ., 54124, Θεσσαλονίκη

² Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38334 Βόλος
giann@vergina.eng.auth.gr, christidisc@hotmail.com, aloukas@civ.uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στη παρούσα εργασία γίνεται έλεγχος της αξιοπιστίας Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (Ψ.Μ.Ε.) μορφής GRID, τα οποία έχουν προκύψει από: (α) ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών (β) δορυφορικές εικόνες ραντάρ SRTM. Η αξιολόγηση του Ψ.Μ.Ε. βασίστηκε στις ισούυνεις καμπύλες του αναλογικού χάρτη, ενώ για τα όρια ανοχής του στατιστικού λάθους που μπορεί να έχει ένα Ψ.Μ.Ε. για να θεωρείται αξιόπιστο ελήφθησαν υπόψη οι Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Έργων Οδοποιίας (Ο.Σ.Μ.Ε.Ο.) της Εγνατίας Α.Ε., οι οποίες κρίθηκαν ως οι καταλληλότερες για την παρούσα εργασία, δεδομένου ότι, στο βαθμό που έχουμε γνώση, δεν υπάρχουν άλλες ειδικότερες οδηγίες για το σκοπό αυτό, τουλάχιστον στην Ελλάδα. Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού Ποταμού με έξοδο στην Πύλη, που ανήκει στο υδατικό διαμέρισμα 08 της χώρας και έχει έκταση 136,9 km². Για την αξιολόγηση της ακρίβειας του Ψ.Μ.Ε. χρησιμοποιήθηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του υψομέτρου για ένα πλήθος 200 σημείων κατανεμημένων στην έκταση της λεκάνης απορροής.

Λέξεις κλειδιά: Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), διερεύνηση ακρίβειας, λεκάνη απορροής Πορταϊκού Ποταμού

INVESTIGATION OF DIGITAL ELEVATION MODELS (DEM) ACCURACY– COMPARATIVE EVALUATION OF METHODS

S. Yannopoulos¹, C. Christidis¹ and A. Loukas²

¹Department of Rural & Surveying Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, 54124 Thessaloniki, Greece

²Department of Civil Engineering, University of Thessaly, 38334 Volos, Greece
giann@vergina.eng.auth.gr, christidisc@hotmail.com, aloukas@civ.uth.gr

ABSTRACT

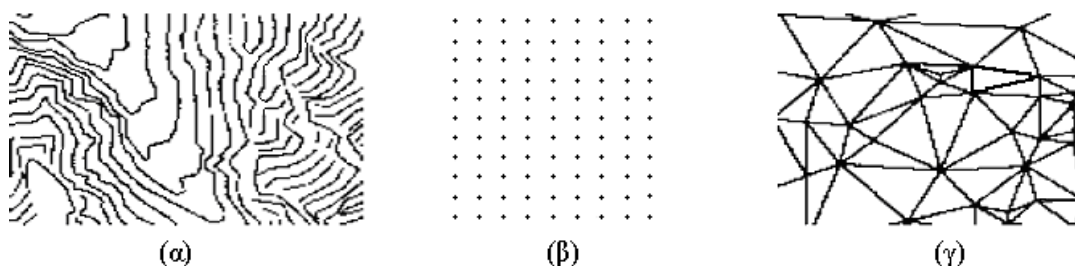
The present study examines the reliability of the Digital Elevation Models (D.E.M.) derived from: (a). digitization of topographical maps and (b) satellite images obtained from the Shuttle Radar Topography Mission (S.R.T.M.) The evaluation of the derived DEM was based on the contours of the analogue map. The tolerance limits of statistical error that can have a DEM to be considered reliable were taken by the Road Designing Studies Guidelines of Egnatia S.A. These guidelines are suitable for our work and they are the only ones applied in Greece. The application area was the Portaikos River watershed, which belongs to the 8th water district of Greece and it has an area of 136,9 km². The mean square error of altitude for a number of 200 points distributed over the study watershed was used for the evaluation of the accuracy of the DEM.

Key words: Digital Elevation Models (DEM), Geographic Information Systems (GIS), Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), accuracy evaluation, Portaikos River watershed

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικά, με τον όρο Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους (Ψ.Μ.Ε.) ή με τον αντίστοιχο αγγλικό όρο Digital Terrain Models (D.T.M.) νοείται η ψηφιακή περιγραφή του εδάφους, η οποία βασίζεται σε μετρήσεις σημείων του και συνοδεύεται από ένα σύνολο κανόνων που επιτρέπουν να εξαχθεί επιπλέον πληροφορία (Παρασχάκης κ.α., 1998). Σημειώνεται ότι το Ψ.Μ.Ε. μιας περιοχής περιέχει, επίσης, πληροφορίες για τα φυσικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της (Γιαννόπουλος κ.α., 2005).

Τα Ψηφιακά Μοντέλα Εδάφους αναπαριστούν το ανάγλυφο του εδάφους και αποτελούνται από σύνολο σημείων για τα οποία είναι γνωστές οι συντεταγμένες τους (x , y) και το υψόμετρό τους, z . Τα μοντέλα αυτά αποτελούν βασικά εργαλεία στις εφαρμογές των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (Geographic Information Systems, G.I.S.) και μπορούν να έχουν τη μορφή (Weibel and Heller, 1994): (α) Συνόλου ισοϋψών καμπύλων (Εικόνα 1α). (β) Συνόλου σημείων γνωστού υψομέτρου στις κορυφές τετραγωνικού ή άλλης μορφής κανονικού καννάβου (Digital Elevation Models, DEM ή GRID) (Εικόνα 1β). (γ) Συνόλου σημείων γνωστού υψομέτρου και τυχαίας κατανομής, που αποτελούν τις κορυφές δικτύου τριγωνικών επιφανειών με διαφορετικό μέγεθος, σχήμα και προσανατολισμό (Triangular Irregular Networks, TIN) (Εικόνα 1γ).



Εικόνα 1. Μορφές ψηφιακών μοντέλων εδάφους α). Ισοϋψείς καμπύλες, β) Κανονικός κάνναβος από υψομετρικά σημεία γ) Δίκτυο ακανόνιστων τριγώνων.

Σημειώνεται ότι για την ίδια ακρίβεια του Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους τα αρχεία μορφής TIN χρειάζονται πολύ χώρο αποθήκευσης στο σκληρό δίσκο του Η.Υ. απ' ότι τα αντίστοιχα αρχεία μορφής DEM ή GRID. Αυτό οφείλεται στον τρόπο με τον οποίο καταχωρούνται τα δεδομένα σε καθεμία περίπτωση. Συγκεκριμένα, στα αρχεία μορφής TIN για κάθε σημείο καταχωρούνται οι συντεταγμένες του x , y και το υψόμετρό του z , ενώ στα αρχεία μορφής DEM ή GRID ορίζεται το βήμα του καννάβου και καταχωρείται μόνο το υψόμετρο του σημείου (Palacios-Velez and Cuevas-Renaud, 1986).

Τα Ψ.Μ.Ε. λόγω της ευκολίας εφαρμογής τους στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές και της απλότητας τους αποτελούν και την πιο διαδεδομένη μορφή δεδομένων (Moore et al., 1991; Wise 1998). Όμως, τα πλεονεκτήματα αυτά αντισταθμίζονται τουλάχιστον από τρία μειονεκτήματα, όπως είναι: (α) Το μέγεθος των κελιών του δικτύου, που επηρεάζει συχνά τις απαιτήσεις αποθήκευσης, την υπολογιστική απόδοση και την ποιότητα των αποτελεσμάτων (Moore et al., 1991). (β) Τα Ψ.Μ.Ε. τετραγωνικού καννάβου δεν μπορούν να περιγράψουν εύκολα απότομες αλλαγές των υψομέτρων και συχνά παραλείπουν σημαντικές λεπτομέρειες της επιφάνειας της γης σε επίπεδες περιοχές (Carter, 1988). (γ) Δυσκολίες στον καθορισμό με ακρίβεια των ορίων των λεκανών απορροής (Zevenbergen and Thorne, 1987). Κατά τα τελευταία χρόνια αρκετά από αυτά τα μειονεκτήματα έχουν ξεπεραστεί, αφού για παράδειγμα, δεν υπάρχει κανένας ιδιαίτερος λόγος για τον οποίο τα Ψ.Μ.Ε. να μην μπορούν να αναπαραστήσουν την επιφάνεια του εδάφους πεδινών περιοχών, εφόσον ληφθεί υπόψη η επιφανειακή

απορροή (Wilson and Gallant, 2000). Όμως, αν και τα Ψ.Μ.Ε. είναι μια από τις πιο σημαντικές χωρικές πηγές δεδομένων για τις ψηφιακές υδρολογικές αναλύσεις και η χρήση τους είναι πανταχού παρούσα στις υδρολογικές μελέτες, ωστόσο η αβεβαιότητα που υπάρχει όσον αφορά στην ψηφιακή αναπαράσταση του εδάφους σπάνια εξηγείται από τους χρήστες των Ψ.Μ.Ε. (Wechsler, 2003). Συνεπώς, η αβεβαιότητα όσον αφορά στα Ψ.Μ.Ε. είναι πολύ σημαντική και πολύ σημαντικό θέμα από υδρολογικής απόψεως.

Στην παρούσα εργασία εξετάζεται η αξιοπιστία των Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους μορφής GRID, τα οποία έχουν προκύψει από: (α) την ψηφιοποίηση τοπογραφικών χαρτών και (β) εικόνων ραντάρ τύπου SRTM με σκοπό την περαιτέρω χρήση τους σε υδρολογικά ομοιώματα. Επίσης, γίνεται διερεύνηση των παραγόντων που μπορούν να επηρεάσουν την ακρίβεια ενός Ψ.Μ.Ε., που είναι: (α) η πηγή από την οποία προέρχεται (τοπογραφικός χάρτης, εικόνες ραντάρ κ.λπ.) και (β) το μέγεθος του κελιού με το οποίο έγινε η δόμηση αυτού. Για την αξιολόγηση της ακρίβειας χρησιμοποιήθηκε το μέσο τετραγωνικό σφάλμα υψομέτρου και ελήφθησαν υπόψη τα όρια ανοχής που καθορίζονται από τις Οδηγίες Σύνταξης Μελετών έργων Οδοποιίας (Ο.Σ.Μ.Ε.Ο.). Η εφαρμογή πραγματοποιήθηκε στη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού με έξοδο στην Πύλη.

2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης είναι η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού από τις πηγές του μέχρι τη φυσική του έξοδο στον οικισμό της Πύλης. Η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού ανήκει στο Υδατικό Διαμέρισμα 08 με βάση το Ν. 1739/87, το οποίο συμπίπτει με το διοικητικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας, αναπτύσσεται στις ανατολικές παρειές της οροσειράς της Πίνδου και είναι η φυσική δίοδος προς τον κάμπο της Θεσσαλίας (Γιαννόπουλος κ.α., 2005). Στην Εικόνα 2 απεικονίζονται το διοικητικό διαμέρισμα της Θεσσαλίας και η περιοχή μελέτης.



Εικόνα 2. Το διοικητικό διαμέρισμα της περιφέρειας Θεσσαλίας και η λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού.

2.2. ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΙΣΟΥΨΕΙΣ ΚΑΜΠΥΛΕΣ

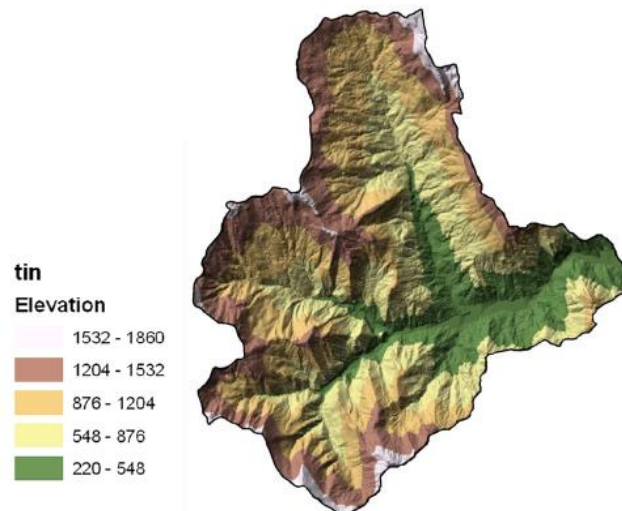
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ήταν το ArcMap v. 9.2 της ESRI, το οποίο έχει τη δυνατότητα να δημιουργεί και να διαχειρίζεται Ψ.Μ.Ε. μορφής TIN και GRID. Στην παρούσα εργασία επειδή ήταν διαθέσιμοι τέσσερις (4) αναλογικοί χάρτες αναφοράς, κλίμακας 1:50.000 της Γεωγραφικής Υπηρεσίας Στρατού

(Γ.Υ.Σ.) (Φ.Χ.: Μουζάκιον, Μυρόφυλλον, Καστανέα και Καλαμπάκα) δημιουργήθηκε το Ψ.Μ.Ε. μορφής T.I.N.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε είναι (Χρηστίδης, 2010):

- α. Γεωαναφορά χαρτών στο προβολικό σύστημα ΕΓΣΑ '87 με τη βοήθεια της βασικής εφαρμογής ArcMap του ArcGIS της ESRI.
- β. Ψηφιοποίηση των κύριων ισοϋψών γραμμών που έχουν ισοδιάσταση 100 m και των δευτερευουσών που έχουν ισοδιάσταση 20 m και σχεδίαση των χαρακτηριστικών γραμμών αλλαγής κλίσης (breaklines), που στη συγκεκριμένη περίπτωση ήταν οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου. Στις περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως είναι π.χ. οι χαράδρες έγινε πύκνωση των υψομετρικών σημείων. Για την ψηφιοποίηση ελήφθη υπόψη η διακριτική ικανότητα του ανθρώπινου ματιού ($\pm 0,25$ mm) (Παπαδοπούλου, 2010). Κατ' αυτό τον τρόπο δημιουργήθηκε το Ψ.Μ.Ε. μορφής TIN, το οποίο διορθώθηκε στις θέσεις των βυθίσεων (pits) και των οριζόντιων τριγώνων (flat triangles).
- γ. Δημιουργία Ψ.Μ.Ε. μορφής TIN
- δ. Δημιουργία Ψ.Μ.Ε. μορφής GRID

Στην Εικόνα 3 απεικονίζεται το Ψ.Μ.Ε. του Πορταϊκού ποταμού μορφής TIN και στην Εικόνα 4 μορφής GRID.



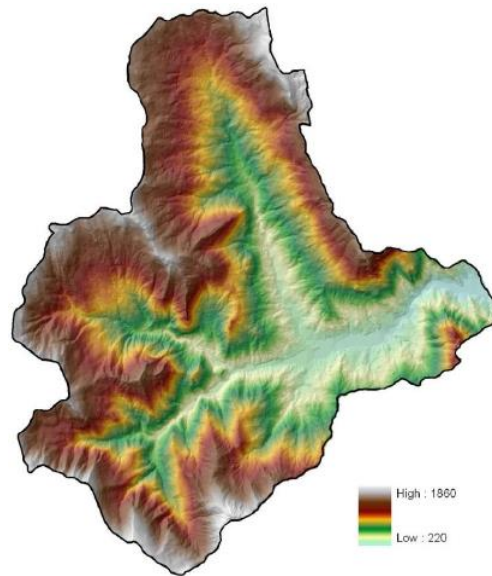
Εικόνα 3. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους μορφής TIN του Πορταϊκού ποταμού.

2.3. ΨΗΦΙΑΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΔΑΦΟΥΣ ΑΠΟ ΑΡΧΕΙΑ SRTM

Το πρόγραμμα SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) ήταν μια κοινή προσπάθεια της NASA, του Κέντρου Αεροναυπηγικής της Γερμανίας (DLR) και της Ιταλικής Υπηρεσίας Διαστήματος (ASI) και αποσκοπούσε στη δημιουργία Ψηφιακού Μοντέλου Εδάφους της επιφάνειας του εδάφους που εκτείνεται μεταξύ 60° βόρειου γεωγραφικού πλάτους και 56° νότιου γεωγραφικού πλάτους δηλαδή περίπου 80% της επιφάνειας του εδάφους της Γης.

Για το σκοπό αυτό το Φεβρουάριο του 2000 τοποθετήθηκαν σ' ένα διαστημικό λεωφορείο συσκευές Radar με τις οποίες ελαμβάνοντο τοπογραφικά δεδομένα από την επιφάνεια της Γης και καταγραφόντουσαν με ασύρματη τεχνολογία. Χρησιμοποιήθηκαν ραντάρ τύπου συνθετικού ανοίγματος (Synthetic Aperture Radar, S.A.R.). Τα στοιχεία που συλλέγονταν μετατρέπονταν σε δεδομένα υψομέτρου με σκοπό τη δημιουργία Ψηφιακών Μοντέλων Εδάφους (DEM), τα οποία στη συνέχεια

χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία ενός πιο ακριβούς τρισδιάστατου μοντέλου εδάφους της επιφάνειας της γης (Farr et al., 2007).



Εικόνα 4. Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους μορφής GRID του Πορταϊκού ποταμού.

Χρησιμοποιήθηκαν δύο κεραίες, από τις οποίες η κύρια ήταν τοποθετημένη στο κυρίως σκάφος και η άλλη στο τέλος μιας επέκτασης μήκους 60 m, από την αριστερή πλευρά του σκάφους. Για τη δημιουργία των τρισδιάστατων εικόνων χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα από τις δύο κεραίες, καθώς επίσης και μια τεχνική που ονομάζεται “interferometry”. Τα ψηφιακά αρχεία που παρήχθησαν είναι μορφής Geotiff και παρέχονται δωρεάν στο διαδίκτυο (<http://srtm.csi.cgiar.org>). Για τις Η.Π.Α. οι διαστάσεις των κελιών είναι 30×30 m, ενώ για το υπόλοιπο κόσμο 90×90m. Περισσότερες εκτεταμένες λεπτομέρειες για το πρόγραμμα SRTM δίνονται από τους Rodriguez et al. (2005).

2.4. ΑΚΡΙΒΕΙΑ ΨΗΦΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΕΔΑΦΟΥΣ

Η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. εξαρτάται, κατά κύριο λόγο, από τη μορφολογία του εδάφους και περιγράφεται με στατιστικά κριτήρια, όπως είναι π.χ. η διαφορά μεταξύ πραγματικού υψομέτρου και του υπολογισμένου με τη βοήθεια του Ψ.Μ.Ε. Επίσης, η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. εξαρτάται από τη διάταξη, την απόσταση και την πυκνότητα των υψομετρικών σημείων, το σχήμα του καννάβου και τέλος, το είδος και την κλίση του εδάφους. Για δεδομένη εδαφική επιφάνεια η ακρίβεια του Ψ.Μ.Ε. μπορεί να βελτιωθεί με την κατάλληλη προσαρμογή της πυκνότητας των σημείων στη μορφολογία του εδάφους (Turcotte et al., 2001).

Στις τοπογραφικές εφαρμογές ο όρος Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα είναι πολύ εύχρηστος, γιατί εκφράζει τη Μέση Τυπική Απόκλιση από την πραγματική τιμή και είναι το μέτρο της ακρίβειας (Δερμάνης, 1992). Στην περίπτωση των Ψ.Μ.Ε. για την εκτίμηση της ακρίβειας, θεωρείται ότι τα σημεία κατά μήκος των σχεδιασμένων ισοϋψών του χάρτη αναφοράς έχουν γνωστό απόλυτο υψόμετρο H_{oi} , ενώ τα σημεία που υπολογίστηκαν από το Ψ.Μ.Ε. κατά μήκος των ίδιων ισοϋψών έχουν τιμή που αντιπροσωπεύεται από τη μεταβλητή H_i και της οποίας πρέπει να ελεγχθεί η ακρίβεια. Συνεπώς, το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, m_z , έχει μέτρο (Γιαννόπουλος κ.α., 2005):

$$m_z = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N (H_i - H_{oi})^2} \quad (1)$$

όπου N είναι το πλήθος των υψομετρικών σημείων που ελέγχονται.

Σημειώνεται ότι ένα Ψ.Μ.Ε. μπορεί να δημιουργηθεί με τη συλλογή πρωτογενών δεδομένων (τοπογραφικές, φωτογραμμετρικές, τηλεπισκοπικές μέθοδοι) ή δευτερογενών (ψηφιοποίηση ή σάρωση της υψομετρικής πληροφορίας υφιστάμενων χαρτών). Οι διαδικασίες ψηφιοποίησης υπαρχόντων χαρτών παρέχουν υψομετρική πληροφορία με τη μορφή ισοϋψών καμπυλών σε διανυσματική ή ψηφιδωτή μορφή.

Κατά την ψηφιακή δημιουργία των ισοϋψών καμπυλών πρέπει η απεικόνιση της ισοϋψούς να συμφωνεί με τις απαιτήσεις που προδιαγράφονται από τις Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Έργων Οδοποιίας, Τοπογραφικές Μελέτες (Ο.Σ.Μ.Ε.Ο., 2002). Οι προδιαγραφές αυτές αφορούν μεν έργα οδοποιίας, όμως, θεωρούνται και για τη παρούσα εργασία ως οι καταλληλότερες, γιατί είναι οι πλέον σχετικές προδιαγραφές, εφόσον ισχύουν για τοπογραφικές μελέτες, αφορούν στη σύγχρονη χαρτογράφηση με Ψ.Μ.Ε. και επιπλέον, οι απαιτήσεις για αξιόπιστο υπόβαθρο των έργων οδοποιίας είναι τουλάχιστον ισοδύναμες με αυτές της υδρολογικής προσομοίωσης (Γιαννόπουλος κ.α., 2005). Στον Πίνακα 1 δίνονται τα όρια των ανοχών σφαλμάτων ισοϋψών για έδαφος με κλίση μέχρι 50%. Κάθε ψηφιακή ισοϋψή για την οποία το Μ.Τ.Σ. βρίσκεται στα όρια του Πίνακα 1 θεωρείται αποδεκτή (Γιαννόπουλος κ.α., 2005).

Πίνακας 1. Ανοχές σφαλμάτων ισοϋψών (Ο.Σ.Μ.Ε.Ο., 2002).

Κλίμακα Χάρτη	Ισοδιάσταση (m)	Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα, m_z (m)
1:2.000	2	$\pm 0,30$
1:5.000	5	$\pm 0,60$
1:20.000	20	$\pm 3,00$
1:50.000	50	$\pm 6,00$

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Το κυριότερο στοιχείο που καθορίζει την ακρίβεια ενός γεωμετρικού χάρτη είναι η ακρίβεια των ισοϋψών καμπύλων. Στην παρούσα εργασία, γίνεται η διερεύνηση του ρόλου που μπορεί να παίζει το μέγεθος του κελιού, ενός αρχείου μορφής GRID, όσον αφορά στην ακρίβεια στην απεικόνιση του στερεού αναγλύφου. Γι' αυτό το λόγο δημιουργήθηκαν τέσσερα αρχεία μορφής GRID, με μέγεθος κελιού 5×5 m, 10×10 m, 50×50 m και 100×100 m, τα οποία προέκυψαν από τις ψηφιοποιημένες ισοϋψείς καμπύλες τοπογραφικών χαρτών κλίμακας 1:50.000 της Γ.Υ.Σ. Επίσης, κρίθηκε σκόπιμο στη διερεύνηση αυτή να συμπεριληφθεί και το Ψ.Μ.Ε. που προέκυψε από εικόνες ραντάρ τύπου STRM ανάλυσης 90×90 m. Τα Ψ.Μ.Ε. μορφής DEM που δημιουργήθηκαν ελέγχθηκαν ως προς την αξιοπιστία τους. Ο έλεγχος αυτός αφορά στην ακρίβεια των υπολογισμένων ισοϋψών σε σχέση με τις ισοϋψείς του χάρτη αναφοράς. Κατά τη διερεύνηση ελήφθη υπόψη ότι οι μορφές T.I.N. και D.E.M. παρέχουν την ίδια ακρίβεια και δεν απαιτείται σύγκριση μεταξύ τους (W.M.S., 1999).

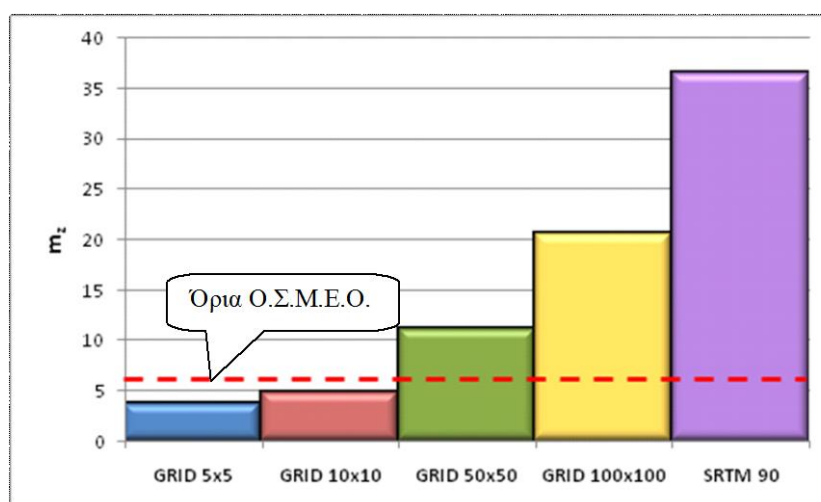
Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα των ισοϋψών υπολογίστηκε (Πίνακας 2) με την εξίσωση (1), όπου από το σύνολο των εισαγομένων στο πρόγραμμα υψομετρικών σημείων επιλέχθηκε ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα 200 σημείων, τα οποία σημειώνεται ότι ανήκαν σε εσωτερικά εικονοστοιχεία, γιατί στα όρια το μοντέλο παρουσιάζει εξ ορισμού αποκλίσεις (W.M.S., 1999). Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν σημεία σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως είναι οι χαράδρες και οι κορυφές και κατά μήκος

των υδατορρεμάτων. Η στατιστική ποσότητα που ελέγχεται στην εκτίμηση της ακρίβειας είναι το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Μ.Τ.Σ.), το οποίο πρέπει να ικανοποιεί ορισμένα όρια κατά περίπτωση (Πίνακας 1).

Πίνακας 2. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα ισοϋψών m_z για τα διάφορα μεγέθη κελιών.

	GRID				
Μέγεθος κελιού (m)	5×5	10×10	50×50	100×100	STRM 90
$\Sigma (H_i - H_{oi})^2 \text{ (m}^2\text{)}$	2789,66	4835,59	25219,35	84747,73	266880,00
$m_z \text{ (m)}$	3,74	4,92	11,23	20,58	36,53

Από το Σχήμα 1, στο οποίο απεικονίζεται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα, m_z , για διάφορες διαστάσεις κελιών, διαπιστώνεται ότι μόνο για διαστάσεις 5×5m και 10×10m τα αντίστοιχα m_z βρίσκονται μέσα στα επιτρεπτά όρια ανοχών που προβλέπονται από τις ισχύουσες προδιαγραφές ΟΣΜΕΟ (Πίνακας 1).



Σχήμα 1. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα, m_z , ισοϋψών.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συνοψίζοντας, τις διαδικασίες δημιουργίας και ελέγχου του Ψ.Μ.Ε. της περιοχής μελέτης προκύπτει ότι με μόνο διαθέσιμο στοιχείο τον αναλογικό χάρτη γενικής χρήσεως της Γ.Υ.Σ. κλίμακας 1:50.000 και με χρήση ενός λογισμικού γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, όπως είναι το ArcMap της ESRI, είναι δυνατή η δημιουργία Ψ.Μ.Ε. ικανοποιητικής ποιότητας και ακρίβειας για υδρολογικές και υδρογεωλογικές μελέτες σύμφωνα με τα κριτήρια που καθορίζονται από τις Ο.Σ.Μ.Ε.Ο. Σημειώνεται και πάλι ότι οι οδηγίες αυτές αφορούν μεν έργα οδοποιίας, αλλά κρίθηκαν ως οι καταλληλότερες για την παρούσα εργασία, δεδομένου ότι στο βαθμό που έχουμε γνώση δεν υπάρχουν άλλες ειδικότερες οδηγίες για το σκοπό αυτό τουλάχιστον στην Ελλάδα.

Επίσης, λαμβάνοντας υπόψη τον συνολικό χρόνο εργασίας και τα στατιστικά αποτελέσματα του ελέγχου ακρίβειας, συνάγεται ότι υπάρχει η δυνατότητα δημιουργίας αξιόπιστου Ψ.Μ.Ε. από αναλογικούς χάρτες μικρής κλίμακας με την προϋπόθεση ότι θα δίνεται ιδιαίτερη σημασία στο μέγεθος του κελιού που χρησιμοποιείται για τη δόμηση του GRID αρχείου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Carter, J.R., 1988. *Digital representation of topographic surfaces*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54(11): 1577-1580.
- Farr, T.G., Rosen, P.A., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M. et al., 2007. *The Shuttle Radar Topography Mission*. Reviews of Geophysics, 45, RG2004. doi:[10.1029/2005RG000183](https://doi.org/10.1029/2005RG000183)
- Moore, I. D., Grayson, R. B. and Ladson, A. R., 1991. *Digital terrain modelling - A review of hydrological, geomorphological, and biological applications*. Hydrol. Processes, 5: 3 – 30.
- Palacios-Velez, O. and Cuevas-Renaud, B., 1986. *Automated rivercourse, ridge and basin delineation from digital elevation data*. J. Hydrol., 86: 299–314.
- Rodríguez, E., Morris, C.S., Belz, J.E., Chapin, E.C., Martin, J.M., Daffer, W., Hensley, S., 2005. *An Assessment of the SRTM Topographic Products*. Jet Propulsion Laboratory, Publication D31639, 143pp.
- Turcotte R., Fortin J.-P., Rousseau A.N., Massicotte S. and Villeneuve J.-P., 2001. *Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network*. J. Hydrol, 240 (3-4): 225-242.
- W.M.S., 1999. *Water Modelling System v6.0. Reference Manual*. Brigham Young University, Environmental Modeling Research Laboratory, Utah, USA.
- Weibel, R. and Heller, M., 1994. *Digital Terrain Modelling*. In: D.J. Maguire, M.F. Goodchild and D.W. Rhind (eds.), *Geographical Information Systems*, vol. 1. Longman Scientific Technical, Essex, England, pp. 269-297.
- Wechsler, S. P., 2003. *Perceptions of Digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users*. URISA Journal, 15(2): 57–64.
- Wilson, J.P. and Gallant, J.C., 2000. *Digital Terrain Analysis*. In: P. Wilson and J.C. Gallant (Editors), *Terrain Analysis: Principles and Applications*, John Wiley & Sons Inc., pp. 1-28.
- Wise, S., 1998. *The Effect of GIS Interpolation Errors on the Use of Digital Elevation Models in Geomorphology*. In: S.N. Lane, K.S. Richards and J.H. Chandler (Editors), *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. John Wiley and Sons, 300 pp.
- Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R., 1987. *Quantitative analysis of land surface topography*. Earth Surface and Landforms, 12(1): 47-56.
- Γιαννόπουλος, Σ., Κατσή Α., Παπαμιχαήλ Δ., και Τζιμόπουλος Χ., 2005. *Προσδιορισμός των Γεωμορφολογικών Χαρακτηριστικών της Λεκάνης του Πορταϊκού Ποταμού με το λογισμικό WMS*. Πρακτικά 5ου Εθνικού Συνεδρίου της Ε.Ε.Δ.Υ.Π., Απρίλιος 6-9, Ξάνθη: 169-176.
- Δερμάνης, Α., 1992. *Συνορθώσεις παρατηρήσεων και θεωρία εκτίμησης*. Τόμος Ι, Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη.
- Ο.Σ.Μ.Ε.Ο, 2002. *Οδηγίες Σύνταξης Μελετών Έργων Οδοποιίας*. 3η Αναθεώρηση. Εγνατία ΟΔΟΣ Α.Ε., Υ.ΠΕ.ΧΩ.Δ.Ε., Αθήνα.
- Παπαδοπούλου Μ., 2010. *Εισαγωγή στη Χαρτογραφία*. Πανεπιστημιακές Παραδόσεις. Τμήμα Εκδόσεων Α.Π.Θ.
- Παρασχάκης, Ι., Παπαδοπούλου, Μ. και Πατιάς Π., 1998. *Αυτοματοποιημένη Χαρτογραφία*. Εκδόσεις Ζήτη. Θεσσαλονίκη, 271 pp.
- Χρηστίδης Χ., 2010. *Διερεύνηση του μετασχηματισμού της βροχής σε απορροή με τη μέθοδο του στιγμιαίου Μοναδιαίου υδρογραφήματος του Clark και με χρήση GIS. Εφαρμογή στη λεκάνη απορροής του Πορταϊκού ποταμού*. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Τ.Α.Τ.Μ./Α.Π.Θ., Π.Μ.Σ. «Γεωπληροφορική», Ειδίκευση «Υδατικοί Πόροι».

ΧΡΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΤΟΠΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΓΡΟ-ΟΙΚΟΛΟΓΙΚΗΣ ΑΕΙΦΟΡΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Κ. Καρκαλής και Γ. Αράπης

Εργαστήριο Οικολογίας και Προστασίας Περιβάλλοντος, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο
Αθηνών, Ιερά Οδός 75, 11855, Αθήνα
persseas@hotmail.com, mani@aua.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτήν την εργασία το αντικείμενο της μελέτης αποτελεί μια σύγκριση των οικολογικών δομών σε επίπεδο τοπίου σε μία Μεσογειακή χώρα, όπως η Ελλάδα. Αποτελεί μια πρώτη προσπάθεια να καθοριστούν συγκεκριμένοι περιβαλλοντικοί δείκτες τοπίου, ώστε να είναι εφικτή μια εκτίμηση των επιδράσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στην αειφορική ανάπτυξη μιας περιοχής. Στόχος είναι οι δείκτες που θα προκύψουν να φανούν χρήσιμοι σε ειδικούς διαχείρισης περιβάλλοντος και σε φορείς λήψης αποφάσεων. Μελετήθηκαν δυο οικο-περιοχές που περιλάμβαναν η καθεμία έκταση περίπου 150 km². Η πρώτη περιοχή ήταν στην Βόρεια Ελλάδα (Ημαθία) και η δεύτερη στην Κεντρική Ελλάδα (Εύβοια).

Λέξεις κλειδιά: Περιβαλλοντικοί δείκτες, περιβαλλοντική διαχείριση, αειφορική γεωργία, οικολογία τοπίου

USE OF LANDSCAPE INDICATORS TO ASSESS SOME AGROECOLOGICAL ASPECTS OF SUSTAINABILITY IN GREECE

K. Karkalis and G. Arapis

Laboratory of Ecology and Environmental Sciences, Agricultural University of
Athens, Iera Odos 75, 11855, Athens-Greece
persseas@hotmail.com, mani@aua.gr

ABSTRACT

In this research, the field of study consists in a comparison of ecological structures at the landscape level in a Mediterranean Country (Greece). This research seeks to identify specific environmental landscape indicators in order to assess the effects of human activities on landscape sustainability. Objective of the indicators is to provide additional assistance for experts/decision makers. The ecoregions under study are both 150 km² large, approximately. The first one is in Northern Greece (in the Prefecture of Imathia) and the second one is in Central Greece (in the Prefecture of Euboea).

Key Words: Environmental indicators, environmental management, sustainable agriculture, landscape ecology

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πίεση που οι ανθρώπινες δραστηριότητες μπορούν να ασκήσουν πάνω στο φυσικό τοπίο και στο περιβάλλον χάνεται βαθειά στην ιστορία, από τους προϊστορικούς χρόνους (Turner κ.α., 2001), τις αρχαίες υδραυλικές αυτοκρατορίες του παρελθόντος μέχρι και σήμερα, αυτές οι επιδράσεις έχουν μια τάση να επιταχύνουν σε ένταση, απειλώντας σήμερα την επιβίωση πολλών ειδών στον πλανήτη και φυσικά το ίδιο το ανθρώπινο είδος.

Η χωρική επέκταση της γεωργίας, οι χερσαίες μεταφορές, η διεύρυνση των αστικών περιοχών κτλ. μπορούν να προκαλέσουν αρνητικές επιδράσεις στην ποιότητα του περιβάλλοντος (Calderon κ.α., 2009a; Joumard κ.α., 2010; Trocmé κ.α., 2003). Οι επιδράσεις της διεύρυνσης των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, συμπεριλαμβανόμενης και της γεωργίας, σε πολλές περιπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν περισσότερα μειονεκτήματα υπό την μορφή της περιβαλλοντικής υποβάθμισης και μείωσης της βιοποικιλότητας (Clay, 2004; Killebrew κ.α., 2010), σε σχέση με τα οικονομικά οφέλη που θα μπορούσαν αρχικά να αποφέρουν στην ανθρώπινη κοινότητα. Μάλιστα, στην περίπτωση της γεωργίας, μια ανεξέλεγκτη επέκταση και εντατικοποίηση της παραγωγής, όταν αυτή δεν έχει γίνει με ορθά περιβαλλοντικά κριτήρια, μπορεί μακροπρόθεσμα να έχει σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στον ίδιο τον παραγωγικό τομέα (Cebrian Calvo κ.α., 2007). Από την άλλη πλευρά, οι ανθρώπινες δραστηριότητες, όταν εναρμονίζονται με το περιβάλλον π.χ. η οργανική γεωργία έναντι της εντατικής γεωργίας, μπορούν να έχουν ευεργετική επίδραση σε διάφορους τομείς όπως η βιοποικιλότητα (Caporali κ.α., 2003; Marinari κ.α., 2006), και προσφέροντας επιπρόσθετες υπηρεσίες, όπως η βελτίωση της ποιότητας της ζωής, που ξεπερνούν την απλή παραγωγή τροφής (Caporali, 2004).

Υπάρχουν πολλές απόψεις σχετικά με το πώς η ποικιλότητα τοπίου θα πρέπει να αξιολογείται και να καταμετράται (Magurran, 1988). Αυτό δημιουργεί δυσκολίες στους ειδικούς που καλούνται να λάβουν αποφάσεις, ώστε να είναι εφικτή η καταμέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που θα μπορούσαν να προκληθούν από τη δημιουργία νέων υποδομών ή μιας παραγωγικής δραστηριότητας (π.χ. μεταβολές στην χρήση γης, δημιουργία νέων αυτοκινητόδρομων κτλ.).

Με βάση τα όσα λέχθηκαν παραπάνω, ο καθορισμός και η χρήση δεικτών που θα μπορούσαν να καταμετρήσουν τον βαθμό αειφορίας των αγρο-οικοσυστημάτων (Caporali κ.α., 2007; Di Felice, 2010), είτε σε επίπεδο τοπίου είτε σε επίπεδο αγροκτήματος, θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο που να συνεισφέρει στο «πρασίνισμα» της νέας Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (Κ.Α.Π.).

Βασικοί στόχοι της εργασίας είναι κυρίως : i. μια σύγκριση και αξιολόγηση μεταξύ δύο περιοχών της Ελλάδας με διαφορετικά οικολογικά χαρακτηριστικά τοπίου, διαμέσου περιβαλλοντικών δεικτών, ώστε να μπορούν να εκτιμηθούν οι συνολικές πιθανές επιδράσεις της γεωργίας στο περιβάλλον, ii. ο καθορισμός συγκεκριμένων περιβαλλοντικών δεικτών, ώστε να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν από ειδικούς διαχείρισης περιβάλλοντος και φορείς λήψης αποφάσεων, για την ποσοτική και ποιοτική καταμέτρηση των επιπτώσεων των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων στην ποικιλότητα του τοπίου, iii. οι δείκτες αυτοί να αποτελέσουν ένα χρήσιμο εργαλείο που να συνεισφέρει στο «πρασίνισμα» της νέας Κοινής Αγροτικής Πολιτικής (Κ.Α.Π.).

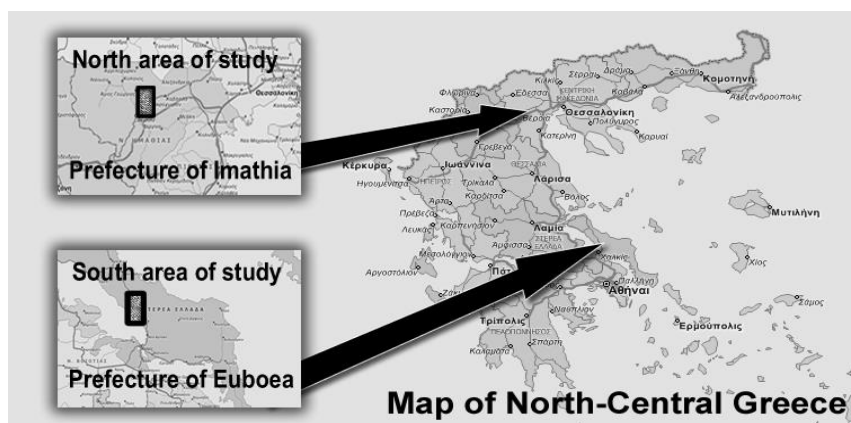
2. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Η παρούσα έρευνα προσπαθεί να δώσει μια εκτίμηση των αλληλοεπιδράσεων μεταξύ ανθρώπου και περιβάλλοντος, όπως αυτά εκφράζονται σε επίπεδο τοπίου, με τη χρήση συγκεκριμένων δεικτών. Η πληροφορία που αυτοί οι περιβαλλοντικοί δείκτες θα μας δώσουν, μπορεί να είναι χρήσιμη σε ειδικούς, στην προσπάθειά τους να πετύχουν μια ισορροπημένη ανάπτυξη, διατηρώντας την ποιότητα του περιβάλλοντος και των αγρο-συστημάτων από την μία πλευρά, και βελτιώνοντας την παραγωγικότητα από την άλλη.

Το βασικό πεδίο έρευνας αποτελείται από μια σύγκριση ανάμεσα σε δύο πραγματικές μεσογειακού τοπίου μέσα στον γεωγραφικό χώρο της Ελλάδας (εικ. 1). Τα δύο επιλεγμένα τοπία είναι λίγο πολύ χαρακτηριστικά της ελληνικής γης, όπου το σύνολο των γεωργικών, πολιτικών και οικονομικών χαρακτηριστικών πρέπει να προσαρμοστούν με τα τοπικά χαρακτηριστικά όπως: 1. Είδος αγρο - οικοσυστημάτων και αγροτικής παραγωγής, 2. Είδη αλληλοεπιδράσεων μεταξύ αγρο-οικοσυστημάτων, 3. Δημογραφική πίεση και 4. Χωρο-κλιματικά χαρακτηριστικά.

Η πρώτη περιοχή που μελετήθηκε βρίσκεται στον νομό Ημαθίας στην Βόρεια Ελλάδα ($40^{\circ} 35' 0''$ N, $22^{\circ} 15' 0''$ E), κοντά στον Δήμο Βέροιας. Ο νομός Ημαθίας αποτελείται από τρεις Δήμους, Βέροιας, Αλεξάνδρειας και Νάουσας, με μία έκταση γύρω στα 1.700 τ.χιλ. και πληθυσμό περίπου 140.000 κατοίκους. Σχετικά με το σύνολο της γεωργικής παραγωγής, ο νομός Ημαθίας χαρακτηρίζεται από μια πλούσια γεωργική δραστηριότητα με μια παραπάνω έμφαση σε εντατικές μεθόδους γεωργικής διαχείρισης, συμπεριλαμβάνοντας όμως και αρκετές δραστηριότητες βιολογικής γεωργίας. Η Ημαθία περιλαμβάνει δύο σημαντικά βουνά, το Βέρμιο και τα Πιέρια Όρη και ένα ποτάμι, τον Αλιάκμονα, που διαμορφώνουν το μικροκλίμα. Η οικοπεριοχή συμπεριλαμβάνει ένα σχετικά ανεπτυγμένο δίκτυο μεταφορών, αστικό και γεωργικό. Οι αγρότες της περιοχής είναι αρκετά ειδικευμένοι με έφεση στη χρήση πρωτοποριακών γεωργικών πρακτικών. Η γεωργική παραγωγή περιλαμβάνει ανάμεσα στα πολλά, δενδρώδεις καλλιέργειες όπως π.χ. ροδάκινα, κεράσια, που απευθύνονται στις εγχώριες όσο και του εξωτερικού αγορές.

Η δεύτερη οικοπεριοχή της μελέτης βρίσκεται στον νομό Εύβοιας ($38^{\circ} 36' 51''$ N, $23^{\circ} 37' 16''$ E), κυρίως στον Δήμο Διρφύων – Μεσσαπίων. Ο νομός αποτελείται συνολικά από μια έκταση περίπου 4.000 τ.χιλ. (3.500 τ. χιλ. το κυρίως νησί της Εύβοιας). Ο πληθυσμός κυμαίνεται στους 200.000 κατοίκους περίπου. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η δεύτερη περιοχή έρευνας, είναι κυρίως ορεινή. Η αγροτική παραγωγή στην περιοχή περιλαμβάνει κυρίως ελιές, αμπελώνες, σπαρτά και ζωική παραγωγή. Η οργανική παραγωγή του νομού στον οποίο ανήκει η δεύτερη περιοχή υπό μελέτη είναι σε έκταση μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν του νομού της πρώτης περιοχής (Louloudis, 2001).



Εικ 1: Χάρτης της Ελλάδας με τις περιοχές υπό μελέτη (πηγή: Υπουργείο Εσωτερικών, URL: <http://www.ypes.gr/el/> πρόσβαση 19/02/2011).

2.1 ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε βασίζεται στο Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών (Σ.Γ.Π. = G.I.S.), φωτο-ανάλυση πάνω σε υψηλής ανάλυσης αεροφωτογραφίες γεωμετρικά διορθωμένες (orthorectified), οι οποίες προήλθαν από το Εργαστήριο Ορυκτολογίας-Γεωλογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Η ανάλυση ήταν 1m² ανά pixel, η δε περίοδος αναφοράς ήταν 1994-1997 και οι δραστηριότητες Σ.Γ.Π. συνδυάστηκαν με εργασίες πεδίου.

Η δομή του τοπίου αναλύθηκε μελετώντας το χερσαίο μωσαϊκό το οποίο αποτελείται από αγροτεμάχια (Forman 1995a) τα οποία κατηγοριοποιήθηκαν και ομαδοποιήθηκαν με βάση τις αρχές της Ευρωπαϊκής Χερσαίας Ανάλυσης (π.χ. Πρόγραμμα COR.IN.E.), στις ακόλουθες κατηγορίες (ή συμπλέγματα τοπίου): Δάση (W), Βοσκότοποι (P), Ελαιώνες (O), Μόνιμες Καλλιέργειες (OT), Ελαιώνες – Αμπελώνες και άλλες Καλλιέργειες (OVOT), Αροτραίες (HC), Χωρίς Βλάστηση Περιοχές (NV), Αστικές Περιοχές (U).

Μιας και η δυναμική των χρήσεων γης έχει μια στενή σχέση με τις δομές της τοπικής ιδιοκτησίας γης (Brown κ.α., 2000), δύο οικοπεριοχές αναλύθηκαν, καθεμία με τη χρήση των προαναφερόμενων δομών τοπίου. Για να μπορέσουν να αξιολογηθούν κάποιες πλευρές της βιοποικιλότητας και αειφορίας, όλες οι πληροφορίες χωρικών δεδομένων (διανυσματικές) πάρθηκαν με τη χρήση του ArcGIS 9.2 (ESRI) λογισμικού και μετατράπηκαν σε μορφή κοκκιοπλαίσιου (5 τ. μέτρα ανά pixel) που έπειτα μετατράπηκαν σε επιλεγμένες μονάδες - δείκτες εδαφοκάλυψης, χρησιμοποιώντας τα προγράμματα FRAGSTAT και EXCEL (Πίν. 1).

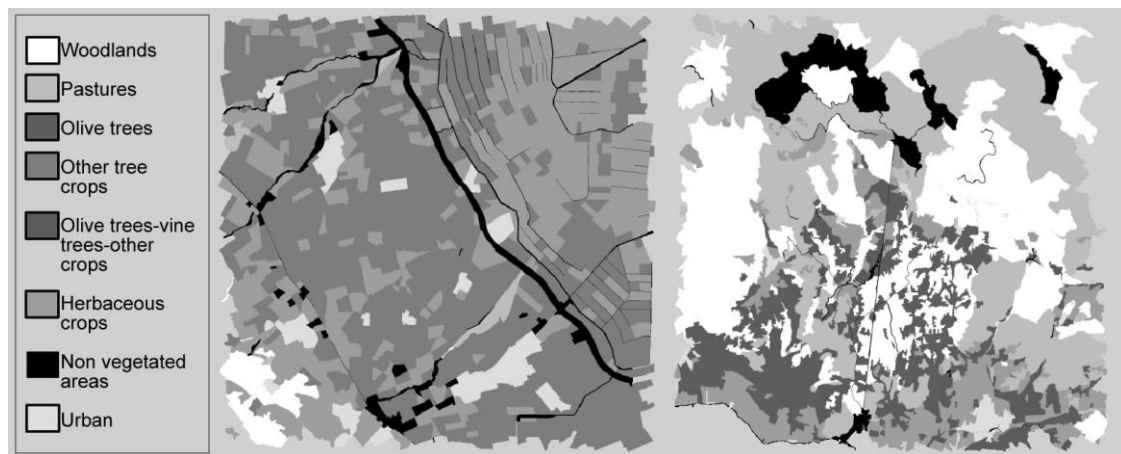
Name	Symbol	Unit	Description
Class area	CA	ha	Describes how much of the landscape is comprised of a particular patch type
Total area	TA	ha	Defines the extent of the landscape
Percentage of landscape	PLAND	%	Quantifies the proportional abundance of each patch type in the landscape
Number of patches	NP	-	A simple measure of the extent of subdivision or fragmentation of the patch type
Patch density	PD	num./100 ha	Similar to NP, facilitates comparisons among landscapes of varying size
Total edge	TE	km	An absolute measure of total edge length
Edge density	ED	m/ha	Reports edge length on a per unit area
Mean patch size	AREA_MN	ha	Average size of the patches
AREA coefficient of variation	AREA_CV	%	Measures relative variability about the AREA_MN, not absolute variability
Perimeter-area fractal dimension	PAFRAC	-	Reflects shape complexity across a range of spatial scales (patch sizes)
Shape index	SHAPE_MN	-	A simplest and perhaps most straightforward

			measure of overall shape complexity
SHAPE coefficient of variation	SHAPE_CV	%	Measures relative variability about the SHAPE_MN, not absolute variability
Patch cohesion index	COHESION	-	Measures the physical connectedness of the patch
Splitting index	SPLIT	-	Interpreted as the effective mesh number
Patch richness	PR	-	Number of different patch types
Patch richness density	PRD	num./100 ha	Standardizes richness that facilitates comparison among landscapes
Herbaceous/tree crops ratio	HTR	-	Ratio between herbaceous crops and tree crops
Cultivated land ratio	CR	%	Amount of cultivated land on total landscape area
Woodlands/cultivated land ratio	WCR	-	Ratio between woodlands and cultivated lands
Pasture/cultivated land ratio	PCR	-	Ratio between pasture and cultivated lands

Πίν. 1: Κατάλογος και σύντομη περιγραφή των επιλεγμένων τάξεων και δείκτες / μονάδες τοπίου (McGarigal and Marks, 1995; Mancinelli κ.α., 2009).
Χρησιμοποιείται αυτοβούλως η διεθνής ορολογία.

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Η γραφική έκφραση (κοκκίδο-πλαίσιο) και η ανάλυση που έγινε στις περιοχές Ημαθίας και Εύβοια φαίνεται στην Εικ. 2.



Εικ. 2: Εικόνες ArcGIS 9.2 των δύο οικοπεριοχών (5 τ.μ. ανά pixel) του Νομού Ημαθίας (αριστερά) και του Νομού Εύβοιας (δεξιά).

Στον Πίν. 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα σε μορφή τιμών / δεικτών του τοπίου, όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση ανάμεσα σε τάξεις (μέσα αλλά και μεταξύ των οικοπεριοχών).

	CA	PLAND	NP	PD	TE	ED	AREA_MN	AREA_CV	PAFRAC	SHAPE_MN	SHAPE_CV	COHESION	SPLIT
Imathia													
W	314	2.39	5	0.04	29	2.21	62.7	190.2	N/A*	2.82	23.88	99.68	1901
P	117	0.89	4	0.03	16	1.25	29.3	87.5	N/A*	1.92	21.56	99.27	28455
O	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
OT	6922	52.67	78	0.59	474	36.07	88.7	346.2	1.42	1.75	37.72	99.80	22
OVOT	-	-	-	-	-	-	-	-		-	-	-	-
HC	4503	34.26	91	0.69	436	33.21	49.5	241.4	1.42	1.73	40.26	99.66	114
NV	672	5.12	58	0.44	342	26.04	11.6	424.3	1.61	4.86	69.93	99.56	1166
U	615	4.68	14	0.11	59	4.47	43.9	102.5	1.30	1.67	15.41	99.39	3120
Euboea													
W	4549	35.77	60	0.47	404	31.76	75.8	252.3	1.32	2.28	43.19	99.71	64
P	3705	29.14	45	0.35	285	22.42	82.3	258.9	1.21	2.21	43.73	99.77	69
O	1024	8.05	70	0.55	213	16.78	14.6	232.6	1.34	2.02	47.00	99.35	1684
OT	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
OVOT	1159	9.11	114	0.90	256	20.12	10.2	237.7	1.33	1.87	29.88	99.07	2065
HC	1450	11.40	81	0.64	241	18.93	17.9	291.8	1.31	1.92	37.90	99.46	655
NV	661	5.20	20	0.16	166	13.05	33.1	330.5	1.60	5.22	80.56	99.55	620
U	168	1.32	19	0.15	37	2.89	8.9	226.1	1.23	1.84	24.57	98.98	17772

* λιγότερο από 10 αγροτεμάχια.

Πίν. 2: Τιμές κάλυψης των υπό μελέτη περιοχών τοπίου σε σχέση με τις τάξεις χερσαίας επικάλυψης

Τέλος, στον Πίν. 3 αναγράφεται μέρος των αποτελεσμάτων (εξαγωγή δεδομένων από FRAGSTAT) πάντα υπό μορφή τιμών / δεικτών τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη συνθετική ανάλυση μεταξύ των δύο περιοχών της μελέτης.

	Imathia	Euboea
TA	13143	12716
NP	250	409
PD	1,9	3,22
TE	725	868
ED	55	68
AREA_MN	52,6	31,1
AREA_CV	363,1	362,2
PAFRAC	1,32	1,32
SHAPE_MN	2,48	2,17
SHAPE_CV	87,62	64,8
COHESION	99,7	99,6
SPLIT	18	29
PR	6	7
PRD	0,046	0,055

Πίν. 3: Τιμές τοπίου για τις υπό μελέτη περιοχές της Ημαθίας και της Εύβοιας.

Από τους παραπάνω πίνακες, ο λόγος μεταξύ Αροτραίων και Δενδρώδων περιοχών (HTR) ανάμεσα στην Ημαθία και Εύβοια, βρέθηκε να είναι 0,66 για την πρώτη οικοπεριοχή και 0,32 για την δεύτερη. Ο λόγος συνολικής καλλιεργήσιμης γης προς το σύνολο της υπό μελέτη περιοχής (CR) βρέθηκε να είναι 86,93% και 28,56 % αντίστοιχα. Ο λόγος μεταξύ δασών και καλλιεργήσιμων περιοχών (WCR) βρέθηκε να είναι 0,03 και 1,25. Τέλος, ο λόγος μεταξύ βοσκότοπων και καλλιεργήσιμων περιοχών (PCR) βρέθηκε να είναι 0,01 για την Ημαθία και 1,02 για την Εύβοια.

Οι χάρτες χερσαίας επικάλυψης και των δύο περιοχών μας δίνουν βασικές πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους του τοπίου και μας καθορίζουν τις διαφορετικές μορφές συμπλεγμάτων τοπίου, ώστε να μπορούμε να τις συγκρίνουμε μεταξύ τους και να αξιολογήσουμε τις πιθανές υπάρχουσες διαφορές τους όσον αφορά την αειφορία. Στο υπό μελέτη τμήμα της Ημαθίας, το τοπίο χαρακτηρίζεται κυρίως από μονοκαλλιέργειες, δενδρώδεις και αροτραίες. Η συνολική έκταση αυτών των χαρακτηριστικών τάξεων (CA) που κυριαρχούν στο τοπίο της Ημαθίας είναι σε εκτάρια 6.922 για τις δενδρώδεις και 4.503 για τις αροτραίες; όσον αφορά πάντα τις μονοκαλλιέργειες, η πληθώρα τους επί τοις 100 σε σχέση με το τοπίο (PLAND), δηλ. η ποσότητα των καλλιεργειών σε σχέση με το συνολικό τοπίο, είναι 52,67 % για τις δενδρώδεις και 34,26 % για τις αροτραίες μονοκαλλιέργειες.

Από την άλλη πλευρά, για την Εύβοια το τοπίο είναι δασώδες σχεδόν κατά το 1/3 της συνολικής της έκτασης. Η συνολική έκταση αυτής της χαρακτηριστικής τάξης (CA) που κυριαρχεί σε αυτό το τοπίο είναι σε εκτάρια 4.549 και η πληθώρα των δασών επί τοις 100 (PLAND) του συνολικού τοπίου, είναι 35,77 %. Το δεύτερο χαρακτηριστικό 1/3 του συνολικού τοπίου της Εύβοιας αποτελείται από βοσκοτόπια (τάξη P) με έκταση σε εκτάρια 3.705 και η πληθώρα του επί τοις 100 σε σχέση με το τοπίο (PLAND), είναι 29,14%.

Όσον αφορά τη γεωργία, στο υπό μελέτη τμήμα της Εύβοιας υπήρχε μια αρκετά εμφανής παρουσία από μονοκαλλιέργειες ελαιώνων αλλά και σύνθετες καλλιέργειες

ελαιώνων μαζί με αμπελώνες και άλλες δενδρώδεις και αροτραίες καλλιέργειες. Αυτές οι μορφές από σύνθετες καλλιέργειες αποτελούν ένα πάρα πολύ ωραίο παράδειγμα ποικιλότητας τοπίου οι οποίες βελτιώνουν την αγρο-ποικιλότητα μέσα στον αγρό αλλά και στο σύνολο της περιοχής, αυξάνοντας την οικολογική ποιότητα και μειώνοντας την εξάρτηση από εξωτερικές πηγές ενέργειας (Caporali κ.α., 2007). Αξίζει να σημειώσουμε ότι τάξη Ελαιώνες – Αμπελώνες και άλλες Καλλιέργειες (OVOT) έχει την υψηλότερη πυκνότητα αγροτεμαχίων (PD) που είναι 0,9 αγροτεμάχια ανά 100 εκτάρια. Αυτό πιθανόν σημαίνει ότι αυτό το είδος της αγροτικής διαχείρισης της περιοχής εκφράζει την παραδοσιακή μορφή γεωργίας της περιοχής και τις σχέσεις που υπήρχαν κυρίως στο παρελθόν ανάμεσα στην ανθρώπινη ζήτηση και το περιβάλλον σε επίπεδο κοινότητας – οικογένειας. Αυτή η υπόθεση ενισχύεται από την μέση έκταση των αγροτεμαχίων όπου η τάξη Ελαιώνες – Αμπελώνες και άλλες Καλλιέργειες (OVOT) έχει την μικρότερη έκταση αν συγκριθούν με άλλες τάξεις βλάστησης και στους δύο οικοτομείς υπό μελέτη.

Όσον αφορά πάντα την κατάσταση της γεωργίας στις δύο περιοχές αξίζει να σημειώσουμε ότι στην Ημαθία το μέσο μέγεθος αγροτεμαχίων είναι μεγαλύτερο (Μόνιμες Καλλιέργειες OT = 88.7 ha; Αροτραίες HC = 49.5 ha) από την Εύβοια (Ελαιώνες O = 14.6 ha; Ελαιώνες – Αμπελώνες και Άλλες Καλλιέργειες OVOT = 10.2 ha; Αροτραίες HC = 17.9 ha). Ωστόσο η γωνιώδης πυκνότητα δείχνει την μεγαλύτερη ικανότητα που έχει η καλλιεργήσιμη γη της Ημαθίας στο να δεχθεί εκοτόνους (διαδρόμους μετάβασης μεταξύ οικολογικών κοινοτήτων, συνδέοντας καλλιεργήσιμη γη και δάση), που φυσικά είναι πάρα πολύ σημαντική για την αγρο – βιοποικιλότητα (Di Felice, 2010). Αυτή η ιδιομορφία της Ημαθίας, αν χρησιμοποιηθεί σωστά, θα μπορούσε να αποδειχθεί ένα αποτελεσματικό εργαλείο, ώστε να αντισταθμίσει τις ανθρωπογενείς πιέσεις στο περιβάλλον.

Όσον αφορά τον κατακερματισμό, οι τιμές του δείκτη PAFRAC (λόγος περιμέτρου προς επιφάνεια) μας δείχνουν ότι η κατάσταση ανάμεσα στις χαρακτηριστικές καλλιεργήσιμες τάξεις στις δύο υπό μελέτη περιοχές είναι παρόμοια, με τιμές 1,32 και για τις δύο. Ο δείκτης PAFRAC παίρνει τιμές από $1 \leq \text{PAFRAC} \leq 2$; οι τιμές αυτές τείνουν προς το 1 για σχήματα (αγροτεμάχια) με πολύ απλή περίμετρο, όπως τετράγωνα, και τείνουν στο 2 για σχήματα (αγροτεμάχια) υψηλής ανομοιομορφίας. Οι τιμές του δείκτη SHAPE_MN, οι οποίες περιγράφουν την πολυπλοκότητα του τοπίου δείχνουν πως η τάξη Χωρίς Βλάστηση Περιοχές (NV = ποτάμια, κανάλια, δρόμοι κτλ.) αποτελούν τα πιο σύνθετα συμπλέγματα και στις δύο οικοπεριοχές (SHAPE_MN για το NV είναι 4.86 και 5.22 για την Ημαθία και την Εύβοια αντίστοιχα). Ο δείκτης COHESION που μετράει τη φυσική συνδεσιμότητα τεμαχίων της ίδιας χαρακτηριστικής τάξης (παίρνει τιμές από 0 έως 100 και αυξάνεται όσο τα αγροτεμάχια είναι πιο συνδεδεμένα) είναι υψηλός σε όλες τις τάξεις και των δύο περιοχών. Αυτό βέβαια μπορεί να έχει θετικά και αρνητικά αποτελέσματα. Από την μία πλευρά η μεγάλη συνδεσιμότητα σημαίνει ελεύθερη επικοινωνία πληθυσμών, με θετικά αποτελέσματα για την βιοποικιλότητα, θα μπορούσε όμως από την άλλη να έχει και αρνητικά αποτελέσματα λειτουργώντας ως ένα διάμεσο που θα μπορούσε να επιταχύνει τη διάδοση ενός εισβάλλοντος επιβλαβούς οργανισμού. Ο δείκτης SPLIT (παίρνει τιμές από 1 έως τον αριθμό τεμαχίων υψωμένα στο τετράγωνο; θα είναι 1 όταν το τοπίο αποτελείται από ένα μόνο αγροτεμάχιο και μεγαλώνει όσο μεγαλώνει ο αριθμός των αγροτεμαχίων που αποτελούν το σύνολο του τοπίου) ουσιαστικά απεικονίζει τον βαθμό πλεγμάτωσης του τοπίου και στην συγκεκριμένη περίπτωση μας δείχνει ότι ανάμεσα στις δύο υπό μελέτη περιοχές όσον αφορά τουλάχιστον τις καλλιεργήσιμες γαίες, η Εύβοια παρουσιάζει μια μεγαλύτερη πλεγμάτωση τοπίου.

Λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές του Πίν.3 μπορούμε να εξάγουμε κάποια επιπλέον συμπεράσματα για τις δύο οικοπεριοχές. Κατ'αρχάς οι δύο περιοχές υπό μελέτη έχουν την ίδια περίπου έκταση (13.143 εκτάρια για την Ημαθία και 12.716 εκτάρια για την Εύβοια). Σε γενικές γραμμές το τοπίο στην Ημαθία δείχνει να είναι λιγότερο κατακερματισμένο, σε σχέση με αυτό της Εύβοιας. Επίσης, στην Ημαθία η ποικιλότητα του τοπίου είναι χαμηλότερη από αυτή της Εύβοιας.

Κάτω από το πρίσμα αγρο – οικολογικών όρων, οι διάφοροι δείκτες όπως HTR, CR, WCR και PCR μας δίνουν σημαντικές πληροφορίες. Ο πρώτος δείκτης HTR (λόγος μεταξύ ως επί το πλείστον ετήσιων μονοκαλλιεργειών και πολυετών καλλιεργειών) μας δίνει αριθμητικές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα συχνότητα άροσης, βιομάζα, ετήσια εδαφική κάλυψη κτλ. Στην περίπτωση των οικοπεριοχών υπό μελέτη έχουμε τη δυνατότητα να πούμε ότι στην Ημαθία υπάρχει μια πιο πολυάριθμη παρουσία αροτραίων καλλιεργειών σε σχέση με την Εύβοια. Αυτό βέβαια μας οδηγεί στο να υποθέσουμε ότι στην Ημαθία θα υπάρχει μεγαλύτερη διάβρωση του εδάφους σε επικλινείς περιοχές (η συμπίεση του εδάφους λόγω του περάσματος μηχανοκίνητων γεωργικών μέσων τα οποία συνήθως είναι πιο βαριά σε σχέση με αυτά που χρησιμοποιούνται στην δένδροκομία, και η συνήθης έλλειψη φυτών κατά την χειμερινή περίοδο είναι κάποιοι από τους συνηθισμένους παράγοντες που επιδεινώνουν την διάβρωση του εδάφους). Ο δείκτης CR (επί τοις εκατό αναλογία καλλιεργήσιμης γης ως προς το σύνολο καλλιεργήσιμης γης) επιβεβαιώνει το παραπάνω νούμερο καλλιεργήσιμων γαιών στην περιοχή μελέτης της Ημαθίας σε σχέση με την Εύβοια (86,93% είναι η καλλιεργήσιμη έκταση στην Ημαθία σε σχέση με 28,56% στην Εύβοια). Πάντα σε σχέση με την Ημαθία, οι δείκτες WCR (λόγος μεταξύ δασών και καλλιεργούμενων περιοχών) και PCR (λόγος μεταξύ βοσκοτόπων και καλλιεργούμενων περιοχών) δείχνουν ότι υπάρχει μια σχετική έλλειψη για περιοχές ικανές να στηρίζουν σημαντικές οικολογικές υπηρεσίες, όπως είναι τα δάση (WCR=0,03) και τα βοσκοτόπια (PCR=0,01). Αντίθετα, στην Εύβοια, για κάθε εκτάριο γεωργικής γης που χαρακτηρίζεται με υψηλές ανθρώπινες δραστηριότητες, υπάρχει πάνω από ένα εκτάριο γης επικαλυμμένης με πράσινο, με χαμηλές ανθρώπινες δραστηριότητες (δάση - WCR=1,25 και βοσκοτόπια - PCR=1,2).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Με βάση τις συνολικές πληροφορίες της παραπάνω έρευνας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι φανερό πως υπάρχουν αρκετές διαφορές μεταξύ των δύο περιοχών που μελετήθηκαν. Μάλιστα, στην πρώτη οικοπεριοχή (Ημαθία) η παρουσία και η επίδραση των ανθρωπίνων δραστηριοτήτων είναι πιο ενεργή σε σχέση με εκείνη της δεύτερης οικοπεριοχής (Εύβοια). Η πρώτη οικοπεριοχή (κομμάτι του νομού Ημαθίας) θα μπορούσε, στο σύνολό της, να χαρακτηριστεί ως λιγότερο αειφορική σε σχέση με την δεύτερη οικοπεριοχή (κομμάτι του νομού Εύβοιας), της οποίας η μεγαλύτερη μη κατακερματισμένη δομή αποτελείται από δάση και σε λιγότερο βαθμό από ανθρώπινες δομές.

Με την απλή δημιουργία ή αύξηση στρατηγικά τοποθετημένων οικολογικών διαδρόμων στην πρώτη περιοχή μελέτης (ενδιάμεσες ελεύθερες περιοχές ανάμεσα σε ποτάμια, κανάλια, μικρές περιοχές ελεύθερες από καλλιέργειες, φυσικοί αεροφράκτες, θάμνοι, θαμνώδη συμπλέγματα κτλ.) που θα συνέδεαν τις διάφορες περιοχές, θα είχαν ως αποτέλεσμα την βελτίωση της επικοινωνίας, αλληλεπιδρώντας με το υπάρχον επίπεδο κατακερματισμού των καλλιεργούμενων περιοχών, αυξάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την αειφορία.

Τέλος, μια αύξηση της υπό μελέτη έκτασης έρευνας των δύο περιοχών ή η εισαγωγή επιπλέον πληροφοριών σχετικά με το τοπίο θα μπορούσαν να δώσουν μια καλύτερη εικόνα για την αειφορική κατάσταση ανάμεσα στις δύο οικοπεριοχές. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με την εισαγωγή επιπλέον στοιχείων που θα αφορούσαν π.χ. το σύνολο των γεωργικών κατασκευών τα οποία βρίσκονται στο τοπίο, όπως θερμοκήπια, αχυρώνες, στάβλοι, γεωργικά κτίσματα κτλ., όπως επίσης, και εξαγωγή και συσχέτιση της θέσης των οικοπεριοχών σε συνάρτηση με την υψομετρική της διάσταση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Calderon E., Pronello C. and Goger T., 2009. *Integrated assessment of environmental impact of traffic and transport infrastructure*. COST 350 final report, Univ. Politécnica Madrid. ISBN 978-84-7493-401-4, 405 pp.
- Caporali F., 2004. *Agriculture and Health: The challenge of Organic Agriculture*, Editeam sas, Cento (FE). ISBN 88-89238-02-X, 98 pp.
- Caporali F., Mancinelli R., and Campiglia E., 2003. *Indicators of Cropping System Diversity in Organic and Conventional Farms in Central Italy*, International Journal of Agricultural Sustainability, 1, Nr. 1, pp. 67-72.
- Caporali F., Mancinelli R., Campiglia E., Di Felice V. and Xie Y.L., 2007. *Evaluation of organical and conventional farms through sustainability indicators*. On: Farming Systems Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems, M. Donatelli, J. Hatfield, A. Rizzoli Eds., Catania (Italy), 10-12 September 2007, book 2 - Field-farm scale design and improvement, pp. 145-146.
- Cebrian Calvo E., and McGlade J., 2007. URL: <http://www.stats.gov.cn/english/icas/papers/P020071114302440168896.pdf> (πρόσβαση 08/02/2011)
- Clay J., 2004. URL: <http://www.krishibid.com/ebook/1559633700.pdf> (πρόσβαση 28/10/2010)
- Di Felice, V., 2010. *Sostenibilità degli agroecosistemi: Valutazione tramite indicatori di paesaggio*, Dottorato di Ricerca in Scienze Ambientali Ciclo XXII, Università degli studi della Tuscia (In Italian).
- Joumard R., and Gudmundsson H., 2010. *Indicators of environmental sustainability in transport: an interdisciplinary approach to methods*. COST Action 356: "EST Towards the definition of a measurable Environmentally Sustainable Transport", ISBN 978-2-85782-684-2, ISSN 0768-9756, 421 pp.
- Killebrew K., and Wolff H., 2010. URL: http://faculty.washington.edu/hgwolff/Evans%20UW_Request%2065_Enviro%20Impacts%20of%20Ag%20Technologies_03-17-2010.pdf (πρόσβαση 07/01/2011)
- Louloudis L., 2001. URL: http://aei.pitt.edu/562/1/4_Louloudis.pdf
- Magurran A., 1988. *Ecological diversity and its measurement*, Princeton University Press. ISBN 0-691-08491-2, 179 pp.
- Mancinelli R., Campiglia E., Di Felice V. and Caporali F., 2009. *Analisi a livello di Paesaggio*. In: Forconi V., Crosti R. (Ed.) *Indicatori di Biodiversità per la Sostenibilità in Agricoltura: Linee guida, strumenti e metodi per la valutazione della qualità degli agroecosistemi*. ISPRA, Roma, ISBN: 978-88-448-0337-7, pp. 9-73.

- Marinari S., Mancinelli R., Campiglia E., and Grego St., 2006. *Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy*, Ecological Indicators, 6, pp. 701–711.
- McGarigal K. and Marks B.J., 1995. *FRAGSTATS: Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure*, Oregon State University Forest Science Department, Corvallis.
- Trocchè M., 2003. *Habitat fragmentation due to transportation infrastructure*. COST ACTION 341 - EUR 20721, the European review, Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-894-5591-8, 251 pp.
- Turner, M., Gardner, R., O'Neill, R., 2001. *Landscape Ecology in Theory and Practice: Pattern and Process*, Springer, ISBN 0-387-95122-9, 416 pp.

**ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
ΛΑΤΟΜΕΙΩΝ - ΑΝΟΙΧΤΩΝ ΟΡΥΧΕΙΩΝ
ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ/GIS & ΕΜΠΕΙΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ
ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ**

Δρ. Νικόλαος Β. Σπυρόπουλος

Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων & Γεωργικής Μηχανικής
Ιερά Οδός 75, 11855 Αθήνα, Τηλ.: 6948 533 544, Email.: nicosp@hol.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Προτείνεται μια καινοτομική προσέγγιση για την αξιόπιστη διαχρονική καταγραφή, παρακολούθηση και έλεγχο αποκατάστασης της λατομικής και μεταλλευτικής δραστηριότητας με γρήγορο και οικονομικό τρόπο, χάρις στην επιστήμη της τηλεπισκόπησης και των GIS. Δημιουργείται ένα επικουρικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την αποκατάσταση μιας περιοχής εξόρυξης με βάση την αποτύπωση και χαρτογράφηση των διαχρονικών σταδίων της εκμετάλλευσης και των γειτονικών χρήσεων γης, η οποία καταγράφεται μέσα από τη συνδυαστική χρήση δεδομένων Landsat TM, KVR-1000 και SPOT. Έμφαση δόθηκε ώστε το Σύστημα Λήψης Αποφάσεων (ΣΛΑ) να παρουσιάζει και να προσομοιώνει όλα τα απαραίτητα βήματα που ακολουθεί ο υπεύθυνος κατά τη διάρκεια της σύνταξης μελετών αποκατάστασης.

Λέξεις Κλειδιά: Αποκατάσταση, Τηλεπισκόπηση, GIS, Πολυκριτηριακή Ανάλυση

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αναγνωρισμένη ανάγκη προστασίας του φυσικού περιβάλλοντος και η διατήρηση της ισορροπίας των φυσικών οικοσυστημάτων αφενός και της αιφόρου, οικονομικής και κοινωνικής ανάπτυξης αφετέρου, συνδυασμένη με την απειλή της αλλαγής του κλίματος, καθίσταται τώρα περισσότερο από ποτέ άλλοτε αναγκαία και επιβάλλει την εφαρμογή μιας αποτελεσματικής προσέγγισης (ή μεθοδολογίας) που να εξασφαλίζει την αιφόρο διατήρηση και ανάπτυξη των φυσικών πόρων μετά από ορθολογική εκμετάλλευση πλουτοπαραγωγικών μη ανανεώσιμων πηγών (Harris, 1971). Οι λατομικές και μεταλλευτικές δραστηριότητες στην Ευρώπη εκτιμάται ότι καλύπτουν μια περιοχή έκτασης όση είναι το 1/2 της Πελοποννήσου, περιλαμβάνοντας μεγάλα υπαίθρια ορυχεία λιγνίτη και βασικών ορυκτών-μεταλλευμάτων καθώς και αρκετές μικρότερες εκμεταλλεύσεις αδρανών υλικών (άμμου, χαλικιών), βιομηχανικών υλικών (ποτάσας, αργίλου) και οικοδομικών υλικών (γρανίτη, μάρμαρου). Και η εθνική και η κοινοτική νομοθεσία απαιτούν την υποβολή στις αρμόδιες αρχές ενός σχεδίου αποκατάστασης πριν την έναρξη της εξόρυξης. Ουσιαστικά, όλα σχεδόν τα κράτη Μέλη και η Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν εκδώσει οδηγίες, οι οποίες επιβάλλουν με την ολοκλήρωση των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, την αποκατάσταση των υπαίθριων εκμεταλλεύσεων στην αρχική τους κατάσταση. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση αυτού του έργου έχουν παραδοσιακά αναληφθεί από τοπογραφικές αποτυπώσεις, επικουρούμενες από αεροφωτογραφήσεις, εργασίες που απαιτούν μεγάλο αριθμό εργαζομένων και είναι χρονοβόρες, και συνεπώς δαπανηρές, ειδικά καθώς απαιτείται συνήθως τακτική ενημέρωση (Wadge και λοιποί 1993). Οι εφαρμογές των Ψηφιακών

Δορυφορικών Τηλεπισκοπικών Απεικονίσεων (ΨΔΤΑ) ή των ψηφιακών δορυφορικών δεδομένων στη βιομηχανία των λατομικών και μεταλλευτικών δραστηριοτήτων εντοπίζονται στην δημιουργία θεματικών χαρτών που χρησιμοποιούνται στις εργασίες πεδίου και στους χάρτες ανίχνευσης και εξερεύνησης νέων ορυκτών μεταλλευμάτων, τα οποία ενδέχεται να απεικονίζονται στην επιφάνεια του εδάφους ή διαφαίνονται έμμεσα σχετίζοντας την επιφανειακή και την υπόγεια γεωλογία (Elroi, 1995).

Η συνηθισμένη τακτική παρακολούθηση της αποκατάστασης είναι η Αυτόματη Λογική Σύγκριση μετά την Κατηγοριοποίηση (PCALC – Post Classification Automatic Logical Comparison) η οποία συνίσταται στη παραγωγή των χαρτών με αεροφωτογράφιση που χρησιμοποιούνται στην τακτική παρακολούθηση της αποκατάστασης. Η ανίχνευση μεταβολών είναι η διαδικασία προσδιορισμού διαφορών μεταξύ καταστάσεων μέσω της παρατήρησης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Διάφορες τεχνικές ανίχνευσης έχουν αναπτυχθεί για την ανάλυση μιας ολόκληρης σειράς μεταβολών στα φυσικά και ανθρωπογενή χαρακτηριστικά της επιφάνειας της γης. Η τεχνική ανίχνευσης επιλέγεται ανάλογα με την κάλυψη της γης και τον αντικειμενικό στόχο της έρευνας. Για ομογενή τοπία, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές που βασίζονται σε ραδιομετρικές αλλαγές μεταξύ ημερομηνιών λήψεων. Για ομογενή τοπία, μπορούν να εφαρμοστούν τεχνικές που βασίζονται σε ραδιομετρικές αλλαγές μεταξύ ημερομηνιών λήψεων. Στις μεθόδους αυτές περιλαμβάνονται οι τεχνικές φασματικών διαφορών (Macleod και Congalton, 1998), διαφορών φασματικών μετασχηματισμών – λ.χ. λόγοι μεταξύ φασμάτων και δείκτες βλάστησης (Γήτας και Khaldoun, 2003) και Κυρίων Συνιστωσών (Ingebritsen και Lyon, 1985). Ένας χάρτης αποκατάστασης ενός ορυχείου επιφανειακής εξόρυξης στοχεύει στην παρακολούθηση και τον ποσοτικό προσδιορισμό της διαδικασίας αποκατάστασης. Στην πραγματικότητα είναι ένας χάρτης ανίχνευσης μεταβολών, ο οποίος υποδεικνύει τις αλλαγές που εμφανίζονται με την πρόοδο της εκμετάλλευσης και την αποκατάσταση που επιτυγχάνεται σε μια καθορισμένη χρονική περίοδο. Οι κατηγορίες αποκατάστασης προσδιορίζονται με βάση τον τύπο της πιο πρόσφατης κατηγορίας χρήσεως γης. Οι κατηγορίες αποκατάστασης χωρίζονται σε δύο ομάδες, αυτές της μεταβολής και της μη μεταβολής. Οι κατηγορίες αποκατάστασης είναι αυτές που σχετίζονται με τη φύτευση σε ανακτημένες περιοχές. Οι χάρτες αποκατάστασης επιτρέπουν την παρακολούθηση της εξέλιξης της διαδικασίας αποκατάστασης και τον ποσοτικό τους προσδιορισμό. Επιπλέον η Ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης που βασίζονται σε γραμμικά μοντέλα που αξιοποιούν τεχνικές βελτιστοποίησης μεταβάλλοντας προκαθορισμένους βαθμούς εμπιστοσύνης, τα οποία περιγράφουν την αποκατάσταση και τις σχέσεις της με τους άλλους πόρους ενός φυσικού οικοσυστήματος, είναι αξιόπιστα και η αξιοπιστία τους έχει πλήρως ελεγχθεί σε υδρολογικά μοντέλα (Aerts και λοιποί, 1999). Η αποκατάσταση λατομικών και μεταλλευτικών δραστηριοτήτων είναι ένα σύνθετο και πολύπλοκο επιστημονικό αντικείμενο, το οποίο αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν σχετίζεται με την παρακολούθηση και προστασία του περιβάλλοντος από τέτοιου είδους δραστηριότητες. Το σημαντικό στάδιο στην διαδικασία αποκατάστασης μιας υπαίθριας εκμετάλλευσης είναι ο εντοπισμός-καταγραφή και αποτύπωση σε χάρτες των χώρων όπου γίνεται μεταλλευτική ή/και λατομική δραστηριότητα (Spyropoulos και λοιποί 2010). Όλοι οι παραπάνω προβληματισμοί οδήγησαν στην αναζήτηση μιας νέας μεθοδολογίας προς αντικατάσταση των συμβατικών μεθόδων στηριγμένης σε μια προσέγγιση με δορυφορική τηλεπισκόπηση, ΣΓΠ και χωρικών συστημάτων λήψης αποφάσεων με στόχο τον την παρακολούθηση και επισκόπησή τους, με απώτερο στόχο την κατάστρωση διαχειριστικών σχεδίων δράσης και προγραμματισμού έργων υποδομής αναπτυξιακού χαρακτήρα και προστασίας.

2. ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΤΩΝ ΟΡΥΧΕΙΩΝ ΚΑΙ ΔΕΔΟΜΕΝΑ

Η περιοχή μελέτης ήταν τα ορυχεία νικελίου της ΛΑΡΚΟ τα οποία βρίσκονται στο νησί της Εύβοιας, περίπου 60 χλμ. Βόρεια της Αθήνας Τρεις τοποθεσίες εξόρυξης εξετάστηκαν λεπτομερώς: ο Παγώντας ($N38^{\circ} 40'$ και $E23^{\circ} 35'$), το Σούρτζι ($N38^{\circ} 39'$ και $E23^{\circ} 40'$) και το Ίσωμα ($N38^{\circ} 35'$ και $E23^{\circ} 43'$). Οι δύο πρώτες τοποθεσίες χρησιμοποιήθηκαν ως τοποθεσίες ελέγχου για την ανάπτυξη του Συστήματος Υποστήριξης Αποφάσεων, ενώ η τρίτη τοποθεσία ως τοποθεσία επαλήθευσης για το μοντέλο. Η τελευταία τοποθεσία έχει το τελευταίο ενεργό ορυχείο σήμερα (η εκμετάλλευση άρχισε το 1983). Τρεις πολυφασματικές δορυφορικές εικόνες LANDSAT με μηδενικό ποσοστό νεφοκάλυψης και με ημερομηνίες λήψης 22 Μαΐου 1986, 29 Ιουνίου 1991 και 18 Απριλίου 1997, τελικά επιλέχθηκαν. Όλες οι εικόνες LANDSAT προέρχονταν από το ίδιο κωδικό κάλυψης (path 183/row 033) του παγκόσμιου κανάβου κάλυψης (World Reference System) του δορυφόρου LANDSAT. Η επιλογή της εποχής λήψης των εικόνων έγινε με γνώμονα να κρατηθεί όσο το δυνατό μικρότερη η επίδραση της γωνίας πρόσπτωσης των ακτινών του ήλιου και να ελαττωθούν τα φαινόμενα σκιερών επιφανειών από τις εναλλαγές του υψόμετρου του ανάγλυφου. Η παγχρωματική εικόνα που χρησιμοποιήθηκε προέρχονταν από τα δεδομένα KVR-1000 με ημερομηνία λήψης 17 Μαΐου 1992 του ρωσικού δορυφόρου COSMOS τα οποία παρείχαν να μεν ικανοποιητική χωρική ανάλυση (2 μέτρα ανά εικονοστοιχείο) όχι όμως και καλό ρυθμό και συστηματικό επισκεψιμότητας (μόνο μία εικόνα καλής ποιότητας διαθέσιμη σε μια δεκάετία). Ένα στερεοζεύγος SPOT με ημερομηνίες λήψης 16 Ιανουαρίου και 4 Φεβρουαρίου 1993 αντίστοιχα χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή του ψηφιακού μοντέλου εδάφους. Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν και αναλογικά βοηθητικά δεδομένα όπως χάρτης χρήσεων γης της ΓΥΣ και γεωλογικός του ΙΓΜΕ κλίμακα 1/50.000 αντίστοιχα.

3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Οι ψηφιακές τιμές (Digital Numbers -DN) που κατεγράφησαν από τα κανάλια του αισθητήρα του θεματικού Χαρτογράφου (Thematic Mapper - TM) του δορυφόρου Landsat μετασχηματίστηκαν σε τιμές ακτινοβολίας (reflectance) και μετέπειτα σε τιμές ανάκλασης (radiance). Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας τους συντελεστές βαθμονόμησης των πινάκων του Robinove (Robinove 1981, EOSAT - LANDSAT technical notes 1986). Τα αποτελέσματα των μετασχηματισμών είναι εικόνες που οι τιμές των pixel τους είναι κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Οι τιμές ανορθώθηκαν με μία Βελτίωση Αντίθεσης σε μία κλίμακα από 0 έως 255. Η ραδιομετρική διόρθωση έγινε και για τα λάθη που οφείλονταν στον αισθητήρα, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα DESTRIPE. Η ατμοσφαιρική διόρθωση έγινε με τη χρήση της μεθόδου της Διαφοράς Μαύρου Σώματος (Dark Object Subtraction - DOS) η οποία ταίριαζε περισσότερο στα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν.

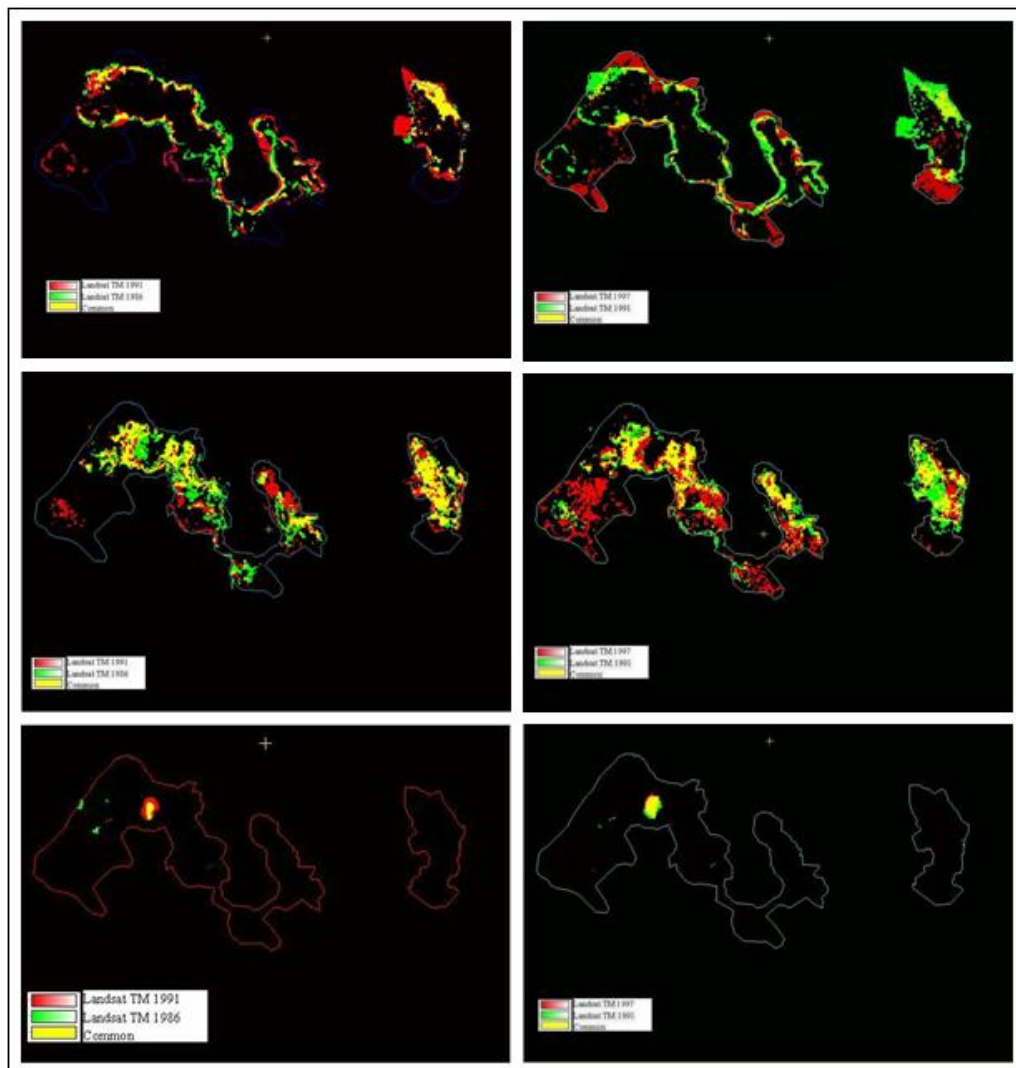
Η γεωμετρική διόρθωση περιελάμβανε την γεωαναφορά της εικόνας Landsat TM με ημερομηνία λήψης 1986 σε αρχείο ανυσματικής μορφής – vector, (γεωμετρικά διορθωμένο) με τη μέθοδο της κοντινότερης γειτνίασης (Nearest Neighbor) η οποία δεν άλλαζε τις τιμές των εικονοστοιχείων για την μετέπειτα εφαρμογή της εποπτευόμενης ή μη εποπτευόμενης ταξινόμησης. Το αρχείο αυτό ήταν η ακτογραμμή της Ελλάδος σε προβολή ΕΓΣΑ '87. Το αρχείο χρησιμοποιήθηκε ως αρχείο αναφοράς για την προβολή των δορυφορικών δεδομένων Landsat TM. Η διανυσματική μορφή της ακτογραμμής επιτρέπει στα γεωμετρικά στοιχεία της γραμμής να περιγράφονται από τις συντεταγμένες των ακρότατων σημείων τους. Κατ' αυτή την έννοια τα γεωμετρικά στοιχεία της ακτογραμμής αποκτούν μια ταυτότητα που αφ' ενός μεν τα διακρίνει, αφ'

ετέρου δε εξοικονομεί χώρο στην καταχώρησή τους. Το πρόγραμμα OrthoEngine του GEOMATICA χρησιμοποιήθηκε κατά την εφαρμογή της γεωμετρικής διόρθωσης της 1^{ης} Landsat TM ως προς την ακτογραμμή με τη βοήθεια επίγειων σημείων ελέγχου (GCPs) και μετέπειτα της διόρθωσης των υπόλοιπων εικόνων Landsat του 1991 και 1997 ως προς την πρώτη μέσω προγραμμάτων διόρθωσης εικόνα σε εικόνα. Η διόρθωση έγινε με την χρήση 1ου βαθμού πολυνομιακής εξίσωσης για την αποφυγή περιττών παραμορφώσεων της εικόνας στις ημιορεινές – ορεινές περιοχές, καθώς δεν υπήρχε τρόπος να ελεγχθεί η χωρική ακρίβεια σε τέτοια σημεία. Με αυτή τη μέθοδο το σύστημα συντεταγμένων του δορυφόρου Landsat μέσω του χαρτογραφικού μετασχηματισμού μεταφέρθηκε στη χαρτογραφική προβολή UTM (εγκάρσια Μερκατορική προβολή με σύστημα αναφοράς το ΕΓΣΑ '87). Τα σημεία ελέγχου διαλέχθηκαν ομοιόμορφα και κατά μήκος της ακτογραμμής. Για όλες τις εικόνες δόθηκε ιδιαίτερη προσοχή ώστε η μέγιστη απόκλιση της εικόνας (RMS –Root Mean Square- Error) στους άξονες των X και Y να μην υπερβαίνει το 1 εικονοστοιχείο.

Οι κλάσεις που επιλέχθηκαν ήταν δάση και δασικές εκτάσεις, θαμνώνες και φρύγανα, τεχνική λίμνη, μητρικό πέτρωμα, δρόμοι και αναβαθμίδες, επικαλύψεις εδαφών και σκιαζόμενες επιφάνειες. Η κλασική μέθοδος της Μέγιστης Πιθανοφάνειας (Maximum Likelihood) που βασίζεται στη στατιστική ανάλυση των εικονοστοιχείων (Pixel by Pixel) αναπτύχθηκε και στις τρεις σκηνές Landsat χρησιμοποιώντας τις ίδιες κατηγορίες χρήσεων γης. Τρεις διαχρονικοί χάρτες για κάθε κατηγορία χρήσεων γης δημιουργήθηκαν με το ακόλουθο συνδυασμό 1997-1986, 1997-1991 και 1991-1986. Στη περίπτωση μας η κατάσταση πριν την εξόρυξη είναι δάσος και γυμνό έδαφος. Η περιοχή που έχει αποκατασταθεί είναι δάσος και επιφανειακά νερά (τεχνητή λίμνη). Τρεις μέθοδοι αλλαγών εφαρμόστηκαν όπως η σύγκριση μετά τη ταξινόμηση, διαφορές και λόγοι συγκεκριμένων καναλιών και η Ανάλυση των Κύριων Συνιστωσών. Το τελικό ψηφιογραφικό αρχείο ανίχνευσης των μεταβολών είναι η εικόνα που δείχνει τις “μεταβολές” (πράσινο για το 1986, κόκκινο για το 1991) και την “απουσία μεταβολών” (κίτρινο) για όλες τις κατηγορίες μεταξύ των ετών 1986 – 1991 (Spyropoulos και λοιποί, 2010). Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται στις εικόνες των ετών 1991 και 1997 (Εικόνα 1). Η δομή του Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών -ΣΓΠ (GIS) περιελάμβανε τα εξής εννιά επίπεδα πληροφορίας: ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου, γεωλογικό ψηφιακό μοντέλο, ψηφιακό μοντέλο της κάλυψης του εδάφους, ψηφιακό μοντέλο του υδρογραφικού δικτύου, ψηφιακό μοντέλο των κλίσεων, ψηφιακό μοντέλο του προσανατολισμού των κλίσεων, όρια δήμων και κοινοτήτων, οδικό δίκτυο, Κάλυψη CORINE Land-Cover 1990.

Το μοντέλο του ΣΛΑ βασίστηκε σε ελεύθερο λογισμικό/λογισμικό ανοικτού κώδικα και πιο συγκεκριμένα σε freeware έκδοση του DAS v2.5 (Decision Analysis System, για την Ανάλυση Πολλαπλών Κριτηρίων) και MapObject Lite της ESRI (για να αποκτήσει το μοντέλο δυνατότητες GIS) σε πλατφόρμα windows 2000 και ο προγραμματισμός έγινε σε JavaScript/HTML πάλι σε freeware έκδοση. Το μοντέλο συνδέθηκε με τη βάση δεδομένων GIS του Geomatica (raster/vector) ανταλλάσσοντας δεδομένα σε XML μορφή. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης η κύρια έμφαση δόθηκε στη χρήση FFA (Functional Flow Analysis – Ανάλυση Λειτουργικής Ροής) για τη συγκρότηση ενός συστήματος λήψεως αποφάσεων για την αποκατάσταση επιφανειακών ορυχείων. Το αναλυτικό αυτό σύστημα είναι ένα κανονιστικό πλαίσιο για την ανάλυση και τη διαμόρφωση θεμάτων ανάλυσης πολιτικής (Aerts 1999). Αποτελείται από 6 στάδια τα οποία αντικατοπτρίζουν τον τρόπο σκέψης ενός υπευθύνου για τη λήψη αποφάσεων, ο οποίος επεξεργάζεται μια απόφαση για να επιλέξει την «καλύτερη» εναλλακτική. Στο πρώτο στάδιο, παρατίθενται στον υπεύθυνο για τη λήψη αποφάσεων ιστορικά στοιχεία σχετικά με τα θέματα και τα προβλήματα

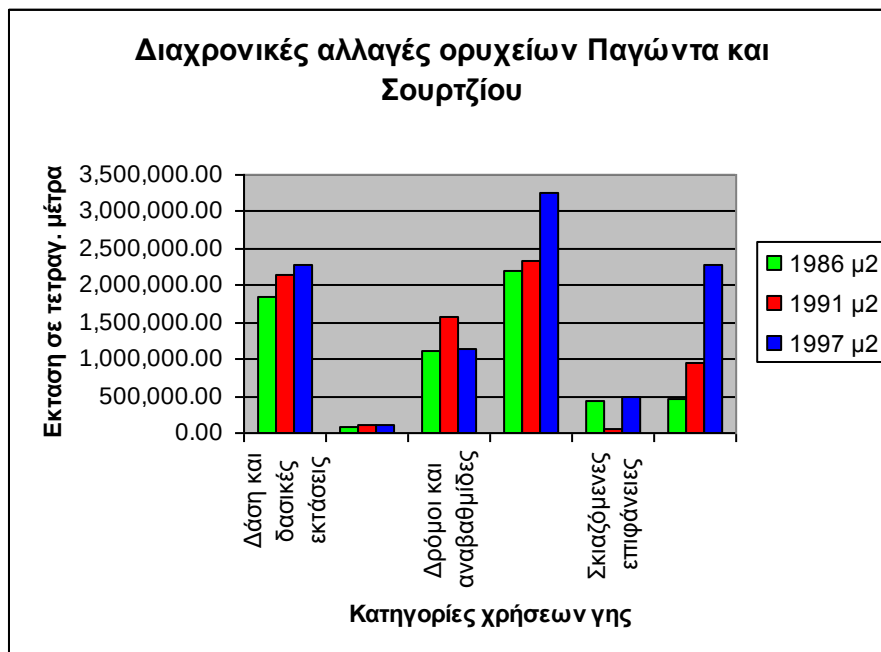
που τα συνοδεύουν. Στο δεύτερο στάδιο διαμορφώνονται οι κύριοι στόχοι και τα κριτήρια που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση των πιθανών εναλλακτικών λύσεων. Στο τρίτο στάδιο, ο υπεύθυνος για τη λήψη αποφάσεων μπορεί να επιλέξει μια σειρά μέτρων (διοικητικές επιλογές ή «ενέργειες») που διαμορφώνουν μια στρατηγική. Στο τέταρτο στάδιο, μια στρατηγική μπορεί να συνδυαστεί με εξωτερικούς παράγοντες, λ.χ. κλιματική αλλαγή ή οικονομική ανάπτυξη και έτσι δημιουργείται ένα σενάριο. Μια στρατηγική σε συνδυασμό με ένα σενάριο είναι μια Περίπτωση. Στο πέμπτο στάδιο κάθε περίπτωση αναλύεται βαθμολογώντας την με τη χρήση των προκαθορισμένων κριτηρίων. Στο στάδιο αυτό μπορούν να εφαρμοστούν μοντέλα λήψεως αποφάσεων (λ.χ. τεχνικές βελτιστοποίησης) για να βρεθεί η βέλτιστη περίπτωση (Ganas και λοιποί, 2004, De Vente και Aerts 2000). Στο τελευταίο στάδιο, όλες οι περιπτώσεις αξιολογούνται έναντι των κριτηρίων, σε έναν κοινό πίνακα.



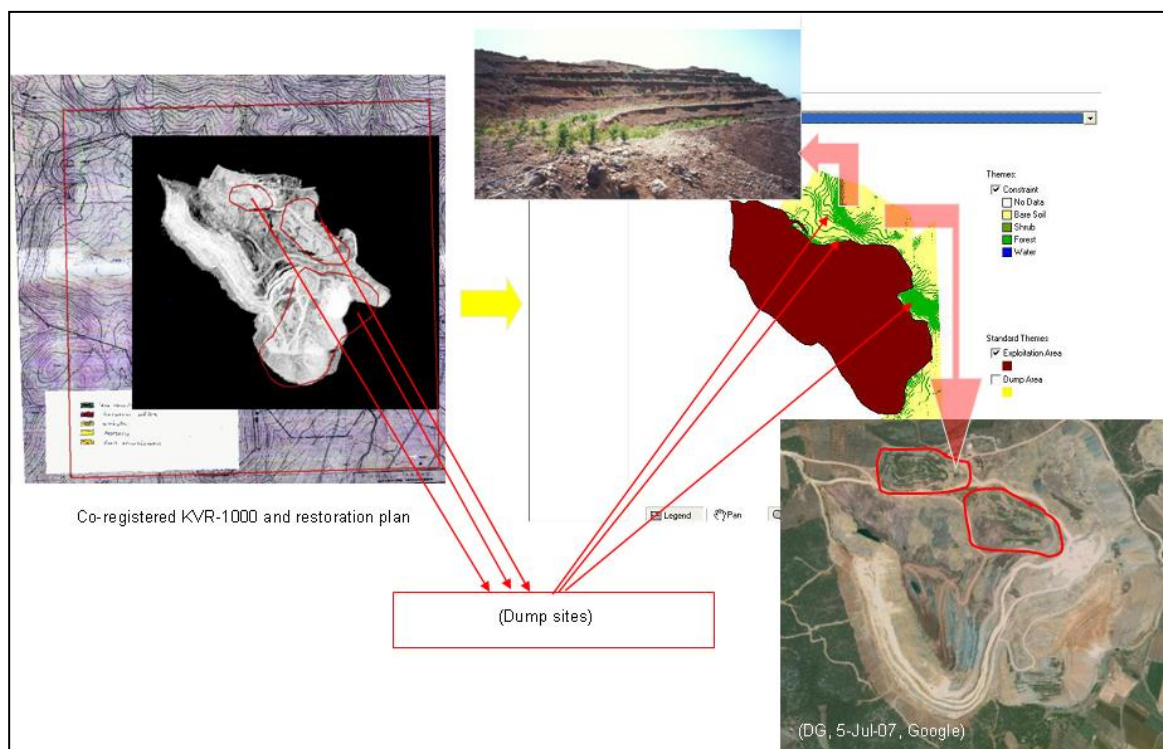
Εικόνα 1. Από πάνω προς τα κάτω: Χάρτης Αλλαγών για τα δάση και δασικές εκτάσεις (91-97 και 86-91), χάρτης αλλαγών αποθέσεων (91-97 και 86-91), και χάρτης αλλαγών για τη τεχνητή λίμνη (91-97 και 86-91). Ορυχείο Παγώντα.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Προκειμένου να μετρηθεί ακριβώς η διαφορά στις τιμές φωτεινότητας των εικονοστοιχείων μεταξύ των εικόνων των διαφορετικών ημερομηνιών, οι εικόνες πρέπει να καταχωρηθούν με μία χωρική ακρίβεια της τάξης του ενός εικονοστοιχείου και καλύτερη. Η κανονικοποίηση της ραδιομετρικής ανάλυσης των καναλιών επιδρά θετικά στην αποτελεσματικότητα της ανίχνευσης αλλαγών από εικόνα σε εικόνα. Οι λόγοι των αντίστοιχων καναλιών στις ημερομηνίες 1986, 1991 και 1997 στη κόκκινη και κοντινή υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος των εικόνων LANDSAT TM, που αποκτήθηκαν κατά τις διαφορετικές ημερομηνίες, παρήγαγαν εικόνες με ικανοποιητικές αλλαγές αλλά μόνο για την οπτική ερμηνεία. Οι μέθοδοι της ανάλυσης των κύριων συνιστωσών απέδωσαν ακόμα καλύτερα αποτελέσματα ενισχύοντας και τις πιο μικρές αλλαγές. Οι νέες εικόνες (eigens) που δημιουργήθηκαν από τα ανεπεξέργαστα δεδομένα (μη ραδιομετρικά διορθωμένα) έδωσαν καλύτερα αποτελέσματα από τα επεξεργασμένα (ραδιομετρικά διορθωμένα). Όλες οι εικόνες που σχηματίστηκαν από το μετασχηματισμό των Κύριων Συνιστωσών βοήθησαν μόνο το οπτικό εντοπισμό των αλλαγών, χωρίς ο χρήστης να είναι ικανός να αιτιολογήσει το είδος της αλλαγής. Η σύγκριση των ψηφιακών δορυφορικών δεδομένων μετά από τη δοκιμασία της εποπτευόμενης ταξινόμησης αποδείχθηκε πιο αποτελεσματική στην εφαρμογή του εντοπισμού των διαχρονικών αλλαγών εξαιτίας του γεγονότος ότι οι περιοχές από κάθε κατηγορία χρήσεως γης μπορούν να υπολογιστούν ποσοτικά και ποιοτικά. Η εξέλιξη των χρήσεων γης και της φυσικής κάλυψης του εδάφους στη περιοχή των ορυχείων του Παγώντα και Σούρτζι άλλαξαν ως συνέπεια της εντατικοποίησης των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, της κατάρρευσης των αναβαθμίδων και του μικρού βαθμού αποκατάστασης σε εκτάσεις μικρότερες από 100 στρέμματα.



Σχήμα 1. Διαχρονικές αλλαγές στα ορυχεία του Παγώντα και Σουρτζίου. Σύγκριση δορυφορικών δεδομένων Landsat TM 1986, 1991 και 1997 μετά από τη δοκιμασία της εποπτευόμενης ταξινόμησης



Εικόνα 2. Επιβεβαίωση του σεναρίου αποκατάστασης στο ορυχείο του Ισώματος. Το παράθυρο επάνω αριστερά είναι η δορυφορική εικόνα KVR-1000 με εντοπισμένες τις περιοχές αποκατάστασης στις αποθέσεις έτσι όπως επιλέχθηκαν από τον υπεύθυνο αποκατάστασης. Το παράθυρο στο κέντρο είναι οι φωτογραφίες της αποκατάστασης στην ίδια περιοχή των αποθέσεων. Το παράθυρο στο επάνω δεξιό μέρος της εικόνας είναι το αποτέλεσμα του ΣΛΑ χρησιμοποιώντας τη πολυκριτηριακή μεθοδο της Αθροιστικής Συνάρτησης Ομάδων Κριτηρίων (Multi Attribute Value or Utility Theory). Με κίτρινο οι περιοχές των αποθέσεων και πράσινο η φύτευση των αναβαθμίδων. Στο κάτω δεξιά παράθυρο επαληθεύεται το αποτέλεσμα του ΣΛΑ χρησιμοποιώντας μια δορυφορική εικόνα QuickBird του 2007.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία της εκτίμησης για την αξιόπιστη καταγραφή-παρακολούθηση της λατομικής και μεταλλευτικής δραστηριότητας στη χώρα μας με γρήγορο και οικονομικό τρόπο, είναι μια πολύ σημαντική πρόκληση τόσο για την τεχνολογία των ΣΓΠ και της δορυφορικής τηλεπισκόπησης, δηλαδή τη συλλογή δεδομένων για τη επιφάνεια της γης από τους δορυφόρους, όσο και για την βέλτιστη διαχείριση ευαίσθητων χρήσεων γης και τη γνώση τους κατά τον αστικό, βιομηχανικό και αγροτικό σχεδιασμό. Η παρούσα έρευνα κατέδειξε και παρουσίασε τις πολλαπλές δυνατότητες χρήσεως και επιλογών των εξελιγμένων τεχνικών και μεθόδων της ψηφιακής επεξεργασίας δορυφορικών δεδομένων και των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών στην χαρτογράφηση και διαχρονική παρακολούθηση-καταγραφή και έλεγχο αποκατάστασης των μεταλλευτικών δραστηριοτήτων που δεν ξεπερνούν σε έκταση τα 10 τετραγωνικά χλμ. Η προσπάθεια για μια ολοκληρωμένη και πολυδιάστατη προσέγγιση για την διαχρονική επισκόπηση και καταγραφή των μεταλλείων της ΛΑΡΚΟ στο Παγώντα, Σούρτζι και Ίσωμα του Νομού Ευβοίας πέτυχε

το στόχο της παροχής ενός εργαλείου για την κατάστρωση διαχειριστικών σχεδίων δράσης και προγραμματισμού έργων αποκατάστασης. Τα δορυφορικά δεδομένα περιέχουν πολλά στοιχεία που μπορεί να χρησιμοποιηθούν σε ένα χάρτη με θεματικό υπόβαθρο, ανάλογα με τον τύπο του χάρτη (χάρτες χρήσεων γης, χάρτες διαχρονικής εξέλιξης χρήσεων γης και φυσικής κάλυψης). Μέχρι πολύ πρόσφατα η λεπτομέρεια των δορυφορικών εικόνων δεν μπορούσε να θεωρηθεί ιδανική για όλους τους τύπους χαρτών και για όλες τις κλίμακες ενώ μέχρι πρότινος η κλίμακα 1:5.000 θεωρείτο η ιδανικότερη και ήταν επιτευκτή με τη χρήση του αμερικανικού δορυφόρου IKONOS. Τα νέα δορυφορικά τηλεπισκοπικά συστήματα με δυνατότητα χωρικής ανάλυσης της τάξης του μισού (0,5) μέτρου και πολυφασματική της τάξης των τριών (2) μέτρων, αυξάνουν κατακόρυφα τη λεπτομέρεια των δορυφορικών τους εικόνων και ταυτόχρονα τα καθιστούν ικανά να χρησιμοποιηθούν και για άλλους σκοπούς όπως την αναζήτηση θεματικών περιοχών (χαρτογράφηση βλάστησης, οικισμών, ικανοποίηση περιβαλλοντικής νομοθεσίας κλπ.) ή για την ενημέρωση χαρτών. Τέτοια δεδομένα σε συνδυασμό με συστήματα ΣΓΠ βοηθούν στη λήψη αποφάσεων για αποκατάσταση λατομικών και μεταλλευτικών δραστηριοτήτων, επεκτάσεις πόλεων, έργα πρασίνου, χαρτογράφησης καλλιεργειών, προστασία περιβαλλοντικού πρασίνου, ανοικοδομήσεις, διατηρητέες περιοχές και γενικά διαχείριση της χωρικής πληροφορίας στο αστικό, ημιαστικό και αγροτικό περιβάλλον.

Η μεθοδολογική γνώση που δημιουργήθηκε από την ανάλυση των δεδομένων μπορεί σαφώς να υποδείξει «αρχές οικονομίας» στην αποκατάσταση υπαίθριων εκμεταλλεύσεων που αξιοποιούν πλουτοπαραγωγικούς πόρους. Αυτή η πτυχή είναι πολύ σημαντική όχι μόνο για τους υπεύθυνους και υπόλογους της αποκατάστασης, αλλά και για τις τοπικές, διοικητικές αρχές και περιβαλλοντικές οργανώσεις. Το χαμηλό κόστος κατά 40% σε σύγκριση με τις συμβατικές μεθόδους είναι σημαντικό πλεονέκτημα που καθιστά τη μεθοδολογία αυτή αποδεκτή σε εύκρατα κλίματα λόγω της μεγάλης διάρκειας της ηλιοφάνειας που επιτρέπει μια ασφαλή παρακολούθηση σε σταθερά χρονικά διαστήματα. Το χαμηλό κόστος αλλά και η προσβασιμότητα σε δεδομένα μπορεί να αποτελέσουν θετικά κριτήρια για την ενσωμάτωση τέτοιων προϊόντων στις λειτουργικές δραστηριότητες των μεταλλευτικών επιχειρήσεων.

6. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aerts, J., Kriek, M., and Schepel, M., 1999. STREAM (Spatial Tools for River Basins and Environment and Analysis of Management Options): set up and requirements. *Physics and Chemistry of the Earth Part b—Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24, 591–595.
- De Vente, J., and Aerts, J. C. J. H., 2000. Environmental restoration of a surface mining area. The application of remote sensing and GIS in a management information system. In *MIS 2000, GIS and Remote Sensing*, MIS 2000 Conference, Lisbon, June 2000, edited by C. A. Brebbia and P. Pascolo (Southampton: WIT Press), pp. 393–402.
- Elroi Daniel, 1995. Opportunities for implementing GIS Technologies in the Mining industry. *The International Journal Integrating GeoTechnologies For Earth Solutions*. EO Magazine. Remote Sensing, GIS, GPS in Oil, Gaz and Mining. January edition.
- EOSAT NOTES, 1995. Washington, DC - KVR-1000 and Landsat TM Merge. Volume 10, Number 3 - Fall/Winter 1995.

- Ganas, A., Aerts, J., Astaras, T., Ventes, J., Frogoudakis, E., Lambrinos, N., Riskakis, C., Oikonomides, D., Filippidis, A., Kassoli-Fournaraki, A., 2004. The use of earth observation and decision support systems in the restoration of open cast nickel mines in Evia, central Greece. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 25, No 16. , 3261–3274.
- Harris, J.R., 1971. Urban and Industrial Deconcentration in Developing Economies: An Analytical Framework. *Regional and Urban Economics* 1:139-152.
- Ingebritsen, S.E., and Lyon, R.J.P., 1985. Principal Components Analysis of Multitemporal image pairs. *Int. J. Remote Sensing* 6:687-696.
- Landsat Applications. Surface mining. Environmental aspects of surface mining. EOSAT notes, Is. 2.
- McLeod R.D. & Congalton R.G., 1998. A quantitative comparison of change detection algorithms for monitoring eelgrass from remotely sensed data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 64(3): 207-216
- Robinson, C.J., Chavez, Jr., Gehring, D., and Holmgren, R., 1981. *Arid Land Monitoring using Landsat Albedo Difference Images*. *Remote Sens. Environ.* 11:133-156.
- Spyropoulos, N., Valmis, S., Ganas, A., Metaxas, G., 2010. Land reclamation of surface mining based in imagery intelligence and spatial decision support systems. *World Transactions on Engineering and Technology Education*. Vol. 8, No.1.
- Wadge G., et al., 1993. Mapping hydrous pathfinder minerals associated with gold mineralization. *Proceeding of the 25th International Symposium: Remote Sensing and Global Environmental Change*. Graz, Austria, 4-8 April 1993.
- Γήτας, Ζ.Ι., και Khaldoun, N.R, 2003. Συγκριτική μελέτη της χρήσης δορυφορικών εικόνων χαμηλής, μέσης-υψηλής διακριτικής ικανότητας στην χαρτογράφηση καμένων εκτάσεων, *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*, Τόμος 14.

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΑΤΟΣ ΜΕ ΔΟΡΥΦΟΡΙΚΗ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ GIS ΣΤΗΝ ΠΕΔΙΑΔΑ ΣΕΡΡΩΝ

Σταυρινός, Ε.¹, Θ. Αλεξανδρίδης ², Γ. Γαλάνης ³, και Γ. Ζαλίδης ³

¹ Δ/ση Σχεδιασμού Εγγ/κών Έργων & Αξιοπ/σης Εδαφικών-Υδατικών Πόρων, Υπουργείο Αγροτικής Ανάπτυξης & Τροφίμων, li210uo16@minagric.gr

² Εργαστήριο Τηλεπισκόπησης και GIS, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, thalex@agro.auth.gr

³ Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Εδαφολογίας, Γεωπονική Σχολή, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, gegalani@agro.auth.gr, zalidis@agro.auth.gr

Περίληψη

Στην πεδιάδα Σερρών, όπου επί δεκαετίες ανακύπτει το πρόβλημα της ζήτησης νερού σε σχέση με την αποδοτικότητα και τη χρήση του αρδευτικού νερού, ο χαρακτηρισμός της λειτουργίας των αρδευτικών δικτύων έχει προταθεί ως ένα πρώτο βήμα επίλυσης αυτών των προβλημάτων. Στην εργασία εξετάζεται η χωρική και χρονική μεταβολή της ζήτησης και προσφοράς του αρδευτικού νερού με δορυφορική τηλεπισκόπηση και GIS προσδιορίζοντας δείκτες λογιστικής ύδατος. Διαπιστώθηκε ότι α) υπάρχει ελάχιστη βελτίωση της απόδοσης των δικτύων παρά το μικρό βαθμό συντήρησής τους, και β) κατά το έτος υψηλής διαθεσιμότητας νερού η αποδοτικότητα άρδευσης και η παραγωγικότητα νερού δεν ήταν ανάλογες με αποτέλεσμα η επιπλέον χρήση νερού να μην αξιοποιείται για την αγροτική παραγωγή.

Λέξεις κλειδιά : άρδευση, δείκτες λογιστικής νερού, δορυφορική τηλεπισκόπηση, GIS

IDENTIFYING WATER ACCOUNTING INDICATORS USING REMOTE SENSING AND GIS IN SERRES PLAIN

Stavrinos, E¹., Th. Alexandridis², G. Galanis³, and G. Zalidis³

¹ Directorate of Land Reclamation and Soil-Water Resources Planning, Hellenic Ministry of Rural Development and Food, estav2@yahoo.gr,

² Laboratory of Remote Sensing and GIS, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, Greece thalex@agro.auth.gr

³ Laboratory of Applied Soil Science, School of Agriculture, Aristotle University of Thessaloniki, Greece gegalani@agro.auth.gr, zalidis@agro.auth.gr

Abstract

In the plain of Serres, where for decades arises the problem of water demand in relation to the efficiency and the use of irrigation water, the characterization of the operation of irrigation networks has been suggested as a first step to account for these problems. The objectives of the study were to examine the spatial and temporal change of demand and supply of irrigation water with satellite remote sensing and GIS using water accounting indicators. Results show that: a) there is a slight increase of irrigation efficiency despite the low level of irrigation system maintenance, and b) during the year of high irrigation water availability the irrigation efficiency and the water productivity were not proportional, so the extra water use was not utilized for agricultural production.

Key words: irrigation, water accounting indicators, remote sensing, GIS.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μη ορθολογική και εντατική άσκηση της γεωργικής δραστηριότητας σε συνδυασμό με την αρδευτική χρήση του νερού έχουν σημαντικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την υποβάθμιση των εδαφικών, των υδατικών και γενετικών πόρων (βιοποικιλότητα) που με τη σειρά τους οδηγούν στην υποβάθμιση των αγαθών και υπηρεσιών (κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις). Η τιμολογιακή πολιτική της χώρας, σύμφωνα με την Οδηγία 2000/60/EK, βασισμένη στη βιώσιμη ανάπτυξη των καλλιεργειών και την αειφορική διαχείριση των υδατικών πόρων απαιτεί την καταγραφή της κατανάλωσης αρδευτικού νερού και την ανάλυση της προσφοράς και ζήτησης με τη χρήση σύγχρονων τεχνικών, όπως και την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Με την πρόσφατη αναθεώρηση της Κοινής Αγροτικής Πολιτικής για την αδειοδότηση των δικαιωμάτων χρήσης νερού συμπεριλήφθηκε στις υποχρεώσεις της πολλαπλής συμμόρφωσης ένα νέο περιβαλλοντικό πρότυπο για κάθε υδροληψία (ΚΥΑ, 2010).

Σημαντική παράμετρος στην εκτίμηση της αγροτικής χρήσης νερού είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (ETa), ο υπολογισμός της οποίας με δορυφορικές εικόνες και το μοντέλο SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (Bastiaanssen, et al., 1998) παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα σε αντίθεση με τη μέθοδο Penman-Monteith (Allen et al., 1998), όπως: (i) λαμβάνει υπόψη τις πραγματικές συνθήκες ανάπτυξης των φυτών που διαφέρουν από τις βέλτιστες συνθήκες που θεωρεί η Penman-Monteith, (ii) παρέχει χωρική μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων και όχι ένα ενιαίο αποτέλεσμα για κάθε καλλιέργεια, και (iii) δεν στηρίζεται σε στατιστικές για την έκταση των καλλιεργειών, οι οποίες παρέχουν μια αποσπασματική εικόνα και συχνά πολλές ανακρίβειες.

Περαιτέρω χρήση των αποτελεσμάτων του μοντέλου SEBAL γίνεται με την διαδικασία της λογιστικής ύδατος (water accounting), που αναπτύχθηκε από το International Water Management Institute, με την οποία παρέχεται η δυνατότητα οριοθέτησης και χαρακτηρισμού της περιοχής λεκάνης απορροής λαμβάνοντας υπόψη τη περιβαλλοντική διάσταση της χρήσης των υδατικών πόρων για άρδευση και όχι μόνο για αγροτική (Molden, and Sakthivadivel, 1999).

Σκοπός της εργασίας είναι ο προσδιορισμός της μεταβολής των δεικτών λογιστικής ύδατος μεταξύ των αρδευτικών δικτύων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Στρυμόνα κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου με τη χρήση δορυφορικής τηλεπισκόπησης και GIS για τη δημιουργία πληροφορίας ορθολογικής χρήσης των υδατικών πόρων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται σε γεωγραφική μονάδα αναφοράς την περιοχή αρδευτικού δικτύου ή περιοχή ευθύνης ΤΟΕΒ, και σε δύο έτη αναφοράς, το 1994 (χαμηλής διαθεσιμότητας υδατικών πόρων) και το 2003 (υψηλής διαθεσιμότητας υδατικών πόρων).

2 ΥΔΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ

Στην πεδιάδα Σερρών υπάρχουν περισσότερα από ένα εκατομμύριο στρέμματα καλλιεργειών, από τα οποία 845.000 αρδεύονται απ' ευθείας από τον Στρυμόνα και την Κερκίνη ή από πηγές και υπόγεια ύδατα (Εικόνα 1). Η διαχείριση του αρδευτικού νερού στα δίκτυα της λεκάνης, πραγματοποιείται σε επίπεδο διοικητικών περιοχών από υπηρεσίες (Διευθύνσεις Εγγείων Βελτιώσεων) της Περιφερειακής Αυτοδιοίκησης, τον Γενικό Οργανισμό Εγγείων Βελτιώσεων (ΓΟΕΒ) καθώς και από δώδεκα Τοπικούς Οργανισμούς Εγγείων Βελτιώσεων (ΤΟΕΒ).



Εικόνα 1. Κατηγορίες αρδευτικού νερού ανά περιοχή αναφοράς

2.2. ΧΑΡΤΟΓΡΑΦΗΣΗ ΑΡΔΕΥΟΜΕΝΩΝ ΕΚΤΑΣΕΩΝ

Η παρακάτω μεθοδολογία εφαρμόστηκε για τη χαρτογράφηση των αρδευόμενων εκτάσεων (Alexandridis et al., 2008). Αρχικά, έγινε η φασματική βελτίωση των δορυφορικών εικόνων Landsat (14/09/1993, 28/06/2000 και 24/08/2000) για την παραγωγή του δείκτη βλάστησης NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), ο οποίος αναδεικνύει την υγιή φωτοσυνθέτουσα χλωροφύλλη. Η χαρτογράφηση στηρίχθηκε στην υπόθεση ότι κατά τη διάρκεια του σχεδόν άνυδρου καλοκαιριού στις αγροτικές περιοχές μόνο οι αρδευόμενες καλλιέργειες θα έχουν υψηλή συγκέντρωση υγιούς χλωροφύλλης και επομένως υψηλή τιμή του δείκτη NDVI. Εφαρμόζοντας την τεχνική διαχωρισμού κατηγοριών με τιμή κατωφλίου (thresholding) χαρτογραφήθηκαν οι περιοχές με υψηλή τιμή NDVI και ορίστηκαν ως αρδευόμενες καλλιέργειες. Στη συνέχεια, ο χάρτης αρδευόμενων καλλιεργειών βελτιώθηκε μέσω γεωγραφικής σύγκρισης με τα πολύγωνα των αγροτικών ενοτήτων (ilots, κλίμακα 1:5000). Αφαιρώντας τις αρδευόμενες περιοχές που δεν είχαν χαρακτηριστεί ως αγροτικές (π.χ. φυσική βλάστηση γύρω από αρδευτικές τάφρους, κήπους σε αστικές περιοχές κ.λπ.), δημιουργήθηκε ο τελικός χάρτης αρδευόμενων περιοχών για τα έτη αναφοράς.

2.3. ΠΡΟΣΦΟΡΑ ΝΕΡΟΥ

Η εκτίμηση της προσφοράς νερού ανά αρδευτικό δίκτυο προσδιορίστηκε με την επιλογή των παρακάτω κριτηρίων: 1. Πηγή υδροληψίας (είσοδος αρδευτικού νερού από υδροληψία, υδάτινο σώμα, γεωτρήσεις κλπ), 2. Αποδέκτης απορροής (κύρια έξοδος αρδευτικού νερού), 3. Προέλευση αρδευτικού νερού (επιφανειακό, υπόγειο, στράγγιση ανάντη περιοχών), 4. Μεταφορά αρδευτικού νερού (είδος αρδευτικού δικτύου), και 5. Εφαρμογή αρδευτικού νερού (μέθοδος άρδευσης). Τα παραπάνω κριτήρια απεικονίζονται στην Εικόνα 1.

Για την εκτίμηση του όγκου νερού άρδευσης ανά δίκτυο λήφθηκε υπόψη η κατανάλωση των αρδευόμενων καλλιεργειών, αλλά και από το γεγονός ότι η εξερχόμενη παροχή από ορισμένα αρδευτικά δίκτυα καλύπτει τις ανάγκες των κατάντη δικτύων. Επίσης, χρησιμοποιήθηκε η έμπειρη γνώμη των χειριστών των δικτύων και η ονομαστική μέγιστη παροχή που υπολογίστηκε από τη διατομή και κλίση των κεντρικών διωρύγων.

2.4. ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΕΠΟΧΙΑΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ (ET_s)

Το μοντέλο SEBAL εφαρμόστηκε σε μηνιαία χρονοσειρά εικόνων NOAA AVHRR και Landsat TM/ETM+. Ακολουθώντας τη μέθοδο που αναφέρεται στις εργασίες των Bastiaanssen et al.(2001) και Chemin and Alexandridis (2004), η ελλιπής χρονική συνιστώσα παρασχέθηκε από την καθημερινή εξατμισοδιαπνοή αναφοράς (ET_r – reference evapotranspiration). Η ET_r υπολογίστηκε με την τυποποιημένη μέθοδο Penman-Monteith (FAO56 - Allen et al., 1998) χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα που λήφθηκαν από τον σταθμό των Σερρών (Πηγή: EMY). Για το σκοπό αυτό συντέθηκε η εικόνα $[K_m] = [ET_a]/ET_r$, όπου $[ET_a]$ είναι η εικόνα ET_a που υπολογίστηκε από τον απεικονιστή NOAA AVHRR και αντιπροσωπεύει τη χρονική περίοδο γύρω από τη λήψη της και ET_r είναι η τιμή της εξατμισοδιαπνοής αναφοράς που υπολογίστηκε από μετεωρολογικά δεδομένα για τη μέρα της λήψης της κάθε εικόνας NOAA AVHRR. Η εικόνα K_m ονομάζεται κλάσμα εξατμισοδιαπνοής αναφοράς (reference evapotranspiration fraction – ET_rF) και μπορεί να θεωρηθεί σαν ένας γενικευμένος φυτικός συντελεστής K_c, ο οποίος είναι ο συνδυασμός όλων των καλύψεων γης που υπάρχουν σε κάθε εικονοστοιχείο της περιοχής μελέτης. Θεωρώντας την εικόνα K_m σταθερή και αντιπροσωπευτική για το χρονικό διάστημα που καλύπτει πριν και μετά τη λήψη της αντίστοιχης δορυφορικής εικόνας, η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή ET_s υπολογίστηκε με την εξίσωση (1):

$$ET_s = \sum_{i=1}^n (ET_a)_i (K_m)_i \quad (mm/εποχή) \quad (1)$$

όπου ET_a είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή για 24 ώρες όπως υπολογίζεται από το μοντέλο SEBAL, K_m είναι το κλάσμα εξατμισοδιαπνοής αναφοράς, και n είναι ο αριθμός των δορυφορικών εικόνων που χρησιμοποιήθηκαν για να καλύψουν την χρονική περίοδο μελέτης. Η παραγόμενη εικόνα ET_s εκφράζει τη μη σημειακή κατανάλωση νερού από όλους τους τύπους κάλυψης γης στην περιοχή μελέτης.

Στη συνέχεια, έγινε βελτίωση της χωρικής διακριτικής ικανότητας χρησιμοποιώντας τις εικόνες υψηλής ανάλυσης Landsat TM/ETM+. Το τελικό αποτέλεσμα παρουσιάζει την εποχιακή εξατμισοδιαπνοή (ET_s) σε μορφή ψηφιδωτού (raster) με ανάλυση 60m (pixel). Η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή των αρδευόμενων καλλιεργειών για τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (15 Απριλίου έως 30 Σεπτεμβρίου) αντιστοιχεί στην κατανάλωση νερού από τα φυτά, ανεξάρτητα από την πηγή του νερού (άρδευση ή βροχόπτωση).

2.5. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΒΙΟΜΑΖΑΣ

Για την εκτίμηση της ανάπτυξης βιομάζας χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο οικολογικής παραγωγής (ecological production model). Το μοντέλο αυτό στηρίζεται στο γεγονός ότι η πρόσληψη άνθρακα από τα φύλλα με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης είναι ανάλογη με το ρυθμό απορρόφησης ηλιακής ακτινοβολίας. Πλεονεκτήματα του μοντέλου είναι η απλότητά του, ότι δεν απαιτεί μετρήσεις πεδίου, και το γεγονός ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δορυφορικά δεδομένα. Οι Bastiaanssen

and Ali (2003) συνδύασαν το μοντέλο οικολογικής παραγωγής με το μοντέλο αποδοτικότητας χρήσης της ηλιακής ακτινοβολίας (light use efficiency) και με το μοντέλο SEBAL για να εκτιμήσουν την ανάπτυξη των καλλιεργειών κάτω από συνθήκες άρδευσης.

Για την εφαρμογή της μεθόδου, αρχικά υπολογίζεται η φωτοσυνθετικά ενεργός ακτινοβολία (Photosynthetically Active Radiation – PAR) από ημερήσια μετεωρολογικά δεδομένα και εικόνες δείκτη βλάστησης NDVI. Στη συνέχεια υπολογίζεται ο χάρτης ανάπτυξης βιομάζας ανά χρονική περίοδο χρησιμοποιώντας το κλάσμα εξάτμισης (Λ) που υπολογίστηκε μέσω του μοντέλου SEBAL, και τον παράγοντα μετατροπής βιομάζας από τη βιβλιογραφία (Gower et al., 1999).

2.6 ΔΕΙΚΤΕΣ ΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΥΔΑΤΟΣ

Οι δείκτες λογιστικής ύδατος που συνδέονται με την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα του αρδευτικού συστήματος στις διάφορες γεωγραφικές μονάδες και συνδέονται με την αξιολόγηση της χρήσης του αρδευτικού νερού υπολογίστηκαν με τις παρακάτω σχέσεις :

- *Δείκτης αποδοτικότητας άρδευσης.*

Περιγράφει το ποσοστό του εισερχόμενου νερού άρδευσης που χρησιμοποιείται από τα φυτά. Υπολογίζεται διαιρώντας την πραγματική κατανάλωση αρδευτικού νερού από τα φυτά προς την παρεχόμενη προς το δίκτυο ποσότητα (εξίσωση 2):

$$a = (ETs - R') / Q_{in} \text{ (χωρίς μονάδες)} \quad (2)$$

όπου ETs η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή, R' η ωφέλιμη βροχόπτωση και Q_{in} η παρεχόμενη προς το αρδευτικό δίκτυο ποσότητα (από επιφανειακά ή/και υπόγεια νερά).

- *Δείκτης παραγωγικότητας νερού.*

Περιγράφει την αξία που απορρέει από το νερό που χρησιμοποιήθηκε. Εκφράζεται ως η ανάπτυξη βιομάζας για κάθε κυβικό μέτρο νερού που καταναλώνεται από τις καλλιέργειες μέσω της εξατμισοδιαπνοής (εξίσωση 3):

$$p = B / ETs \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3)$$

όπου B είναι η ανάπτυξη βιομάζας και ETs η εποχιακή εξατμισοδιαπνοή.

Οι δείκτες λογιστικής ύδατος επιλέχθηκαν για το χαρακτηρισμό των αρδευτικών μονάδων της περιοχής μελέτης (ΤΟΕΒ), επειδή περιγράφουν καλύτερα όλες τις απόψεις του συστήματος και τα δεδομένα εισόδου μπορούν να μετρηθούν με τις προαναφερθείσες μεθόδους.

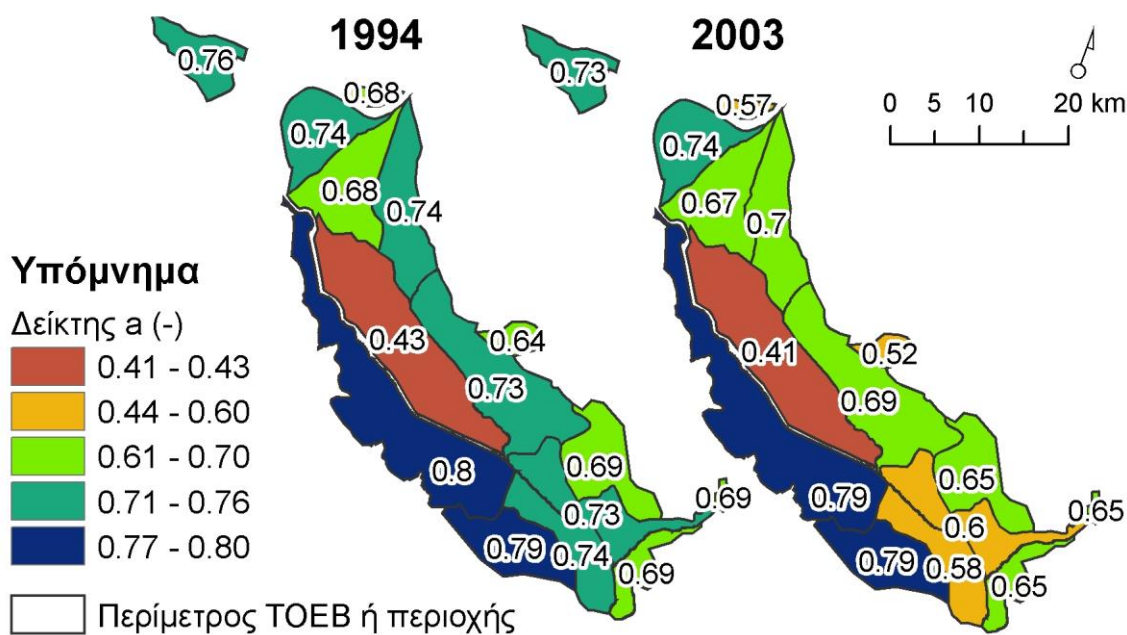
3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ & ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με την εφαρμογή της τηλεπισκοπικής μεθόδου καταγραφής των αρδευόμενων καλλιεργειών εκτιμήθηκε η συνολική αρδευόμενη έκταση ανά γεωγραφική μονάδα και έτος αναφοράς (Πίνακας 1). Η ακρίβεια της μεθόδου εκτιμήθηκε με ένα τυχαίο δείγμα 250 σημείων, στα οποία ανατέθηκε μία κλάση (αρδευόμενο ή μη-αρδευόμενο) μέσω φωτοερμηνείας των εικόνων υψηλής ανάλυσης Landsat TM/ETM+. Η σύγκριση του δείγματος με το χάρτη αρδευόμενων εκτάσεων έδειξε ακρίβεια 97% και αξιοπιστία 94% και για τα δύο έτη αναφοράς. Γενικά παρατηρήθηκε μικρή αύξηση της αρδευόμενης έκτασης κατά 8% από το 1994 στο 2003, που οφείλεται κυρίως στην εγκατάσταση περισσότερων ιδιωτικών γεωτρήσεων και λιγότερο στην επέκταση των αρδευτικών δικτύων.

Η προσφορά νερού, η εποχιακή εξαμυσοδιαπνοή και η ανάπτυξη βιομάζας χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών λογιστικής ύδατος ανά γεωγραφική μονάδα και έτος αναφοράς (Πίνακας 1).

Πίνακας 1. Αρδευόμενη έκταση και δείκτες λογιστικής ύδατος ανά γεωγραφική μονάδα και έτος αναφοράς

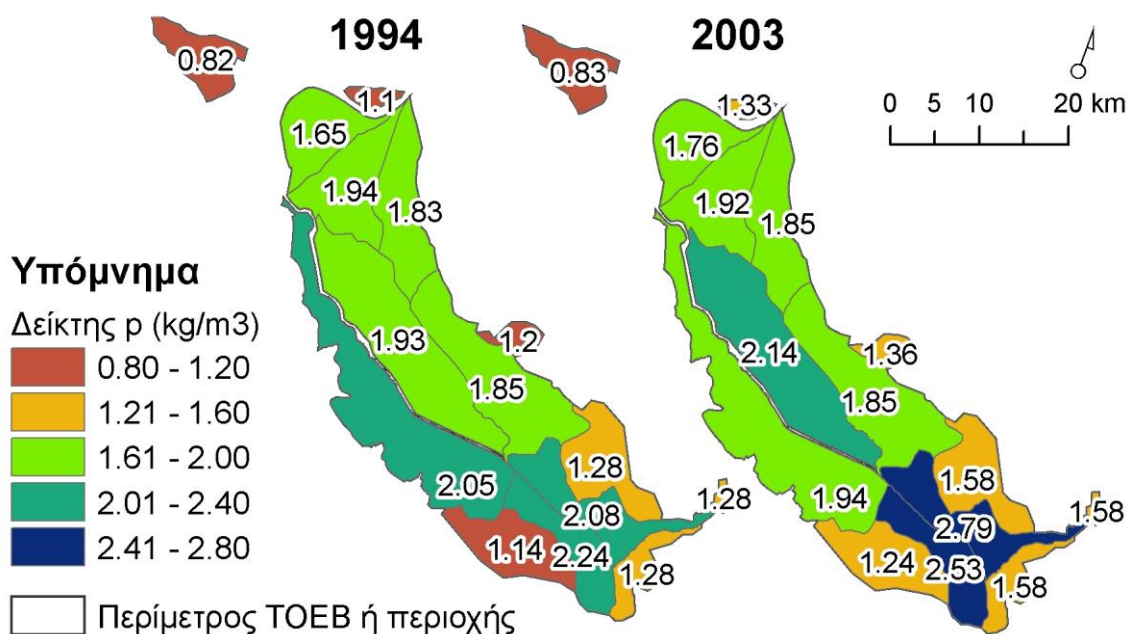
Κωδ.	Περιοχή αναφοράς	Αρδευόμ. έκταση 1994 (στρ)	Αρδευόμ. έκταση 2003 (στρ)	Δείκτης a 1994 (-)	Δείκτης a 2003 (-)	Δείκτης p 1994 (kg/m ³)	Δείκτης p 2003 (kg/m ³)
1	Δυτικής διώρυγας	49.048	51.252	0,74	0,74	1,65	1,76
2	Ηράκλειας	66.304	71.489	0,68	0,67	1,94	1,92
3	Προβατά (II)	148.676	151.970	0,43	0,41	1,93	2,14
4	Σιδηρόκαστρου (III)	63.000	69.000	0,74	0,70	1,83	1,85
5	Σερρών	82.746	98.800	0,73	0,69	1,85	1,85
6	Ψυχικού-Πεθελινού	62.485	65.730	0,73	0,60	2,08	2,79
8	Φυλλίδας (V)	43.595	65.793	0,69	0,65	1,28	1,58
9	Πρόχειρα δίκτυα ΓΟΕΒ	48.512	50.736	0,74	0,58	2,24	2,53
10	Στρυμονικού-Νιγρίτας (IV)	131.567	125.060	0,80	0,79	2,05	1,94
11	Π. Κερκίνης-Λιβαδιάς	15.197	15.197	0,76	0,73	0,82	0,83
22	Π. Μαυροθάλασσας	24.366	33.594	0,79	0,79	1,14	1,24
23	Πετριτσίου	4.691	3.391	0,68	0,57	1,10	1,33
24	Αγ. Ιωάννη	6.137	5.600	0,64	0,52	1,20	1,36
	Σύνολο ή Μ.Ο.	746.324	807.611	0,64	0,60	1,87	1,97



Εικόνα 2. Δείκτης αποδοτικότητας αρδευτικού συστήματος (a) ανά περιοχή και έτος αναφοράς

Ο δείκτης αποδοτικότητας άρδευσης (a) έχει ελάχιστα υψηλότερες τιμές το 1994 λόγω της καλύτερης αποδοτικότητας των συστημάτων άρδευσης σε ξηρότερες συνθήκες (Εικόνα 2). Αντίθετα, το 2003 η υψηλότερη βροχόπτωση ήταν η αιτία της χαμηλότερης κατανάλωσης αρδευτικού νερού σε σχέση με την παρεχόμενη προς το αρδευτικό δίκτυο ποσότητα (από επιφανειακή ή/και υπόγεια νερά). Άλλοι παράγοντες που πιθανώς να επηρεάζουν τη μεταβολή του δείκτη (a) είναι η ελλιπής συντήρηση του δικτύου μεταφοράς και ο σταδιακός εκσυγχρονισμός του δικτύου εφαρμογής άρδευσης.

Ο ΤΟΕΒ Προβατά παρουσιάζει πολύ χαμηλή τιμή λόγω των υψηλών απωλειών του χωματινού δικτύου μεταφοράς, και των υψηλών αρδευτικών απαιτήσεων της καλλιέργειας ρυζιού, η οποία απαιτεί συγχρονισμένες καλλιεργητικές και αρδευτικές εφαρμογές. Στους υπόλοιπους ΤΟΕΒ, οι υψηλότερες τιμές του δείκτη αποδοτικότητας άρδευσης οφείλονται στην ύπαρξη πιο σύγχρονου δικτύου μεταφοράς και διανομής (με επενδεδυμένες διώρυγες ή με κλειστούς αγωγούς).



Εικόνα 3. Δείκτης παραγωγικότητας νερού (e) ανά περιοχή και έτος αναφοράς

Η παραγωγικότητα νερού (ρ) απεικονίζει την ανάπτυξη βιομάζας για κάθε μονάδα νερού άρδευσης που καταναλώνεται από τις καλλιέργειες (Εικόνα 3). Η ανάπτυξη βιομάζας σε κάθε εικονοστοιχείο της δορυφορικής εικόνας εξαρτάται σε μεγαλύτερο βαθμό από το είδος της καλλιέργειας, και σε μικρότερο βαθμό από τη στρεμματική απόδοση των καλλιεργειών. Επομένως, οι διαφορές της παραγωγικότητας νερού μεταξύ των περιοχών αναφοράς στο ίδιο έτος σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την κατανομή των κύριων καλλιεργειών στις περιοχές αναφοράς. Αντίστοιχα, οι χρονικές μεταβολές της παραγωγικότητας νερού από το ένα έτος αναφοράς στο άλλο, σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την μεταβολή της κατανομής των κύριων καλλιεργειών και τη μεταβολή στην κατανάλωση αρδευτικού νερού. Η συνολική αύξηση του δείκτη στο έτος 2003 οφείλεται στην μείωση των υδροβόρων καλλιεργειών (ρύζι) και στην εισαγωγή νέων ποικιλιών (βαμβακιού και καλαμποκιού), οι οποίες είναι πιο μικρόσωμες και επομένως παράγουν λιγότερη βιομάζα (με ταυτόχρονη αύξηση της στρεμματικής απόδοσης σε καρπό).

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν σχετικά με τη χρήση των υδατικών πόρων στην περιοχή μελέτης είναι:

- Παρά την υψηλή σχετική προσφορά νερού το 1994, η ανάπτυξη βιομάζας δεν ήταν ανάλογη, επομένως η επιπλέον χρήση νερού δεν αξιοποιήθηκε για την αγροτική παραγωγή.
- Τα αρδευτικά συστήματα βελτιώθηκαν ούτως ώστε να έχουμε λιγότερες απώλειες, παρόλο το χαμηλό βαθμό συντήρησης των δικτύων. Αυτό οφείλεται στη σταδιακή

αντικατάσταση της μεθόδου άρδευσης με καταιονισμό από τη μέθοδο της στάγδην άρδευσης, η οποία παρουσιάζει σαφώς καλύτερο βαθμό αποδοτικότητας εφαρμογής του νερού στον αγρό.

- Κατά το έτος 1994 που υπήρχε χαμηλότερη διαθεσιμότητα νερού, παρατηρήθηκε υψηλή προσφορά νερού άρδευσης για να καλύψει τις αυξημένες ανάγκες των καλλιεργειών. Αυτό αποκαλύπτει μια σχετικά καλή και σταθερή στο χρόνο αποδοτικότητα του συστήματος άρδευσης, το οποίο οφείλεται σε ένα σχετικά αποτελεσματικό διαχειριστικό έργο.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Alexandridis, T.K., G.C. Zalidis, and N.G. Silleos, 2008. *Mapping irrigated area in Mediterranean basins using low cost satellite Earth Observation*. Computers and Electronics in Agriculture, 64(2):93-103.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., and M. Smith. 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements*. In: FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO), no. 56 / FAO, Rome (Italy). Land and Water Development Div., 300 p.

Chemin, Y. and T. Alexandridis, 2004. *Improving spatial resolution of ET seasonal for irrigated rice in Zhanghe, China*. Asian Journal of Geoinformatics, 5(1):3-11.

Bastiaanssen, W.G.M., Ali, S., 2003. *A new crop yield forecasting model based on satellite measurements applied across the Indus Basin, Pakistan*. Agriculture, Ecosystems and Environment, 94(3):321-340.

Bastiaanssen, W.G.M., Menenti, M., Feddes, R.A., Holtslag, A.A.M., 1998. *A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL): 1. Formulation*. J. Hydrol. 212-213, 198-212.

Doorenbos, J. and W. O. Pruitt, 1977. "Crop Water Requirements", FAO Irrigation and Drainage Paper, No 24, FAO, Rome, 156 p.

Droogers, P. 2002. *Global irrigated area mapping: Overview and recommendations*, Working Paper 36. International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka.

Gower, S.T., C.J. Kucharik, and J.M. Norman, 1999. *Direct and indirect estimation of leaf area index, f_{PAR} , and net primary production of terrestrial ecosystems*. Rem. Sens. Environ. 70:29-51.

Κοινή Υπουργική Απόφαση, 2010. *Εφαρμογή του καθεστώτος της πολλαπλής συμμόρφωσης και συμπληρωματικά μέτρα σε εκτέλεση των Κανονισμών (ΕΚ) 73/2009 και 1698/05 του Συμβουλίου (ΦΕΚ 509/Β/28-04-2010)*.

Molden, D., and R. Sakthivadivel. 1999. *Water accounting to assess use and productivity of Water*. Water Resources Development. 15: 55-71.

Water Framework Directive 2000/60/EC. *Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the Community action in the field of water policy*. OJ L 327.

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΔΕΙΚΤΩΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΥΔΡΟΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

**N.P. Δαλέζιος¹, E. Μπουκουβάλα¹, A. Μπλάντα¹, N. Πισμίχος¹, N. Σπυρόπουλος¹
και A. Ψιλοβίκος¹**

¹Εργαστήριο Αγρομετεωρολογίας, Τμήμα Γεωπονίας Ιχθυολογίας και Υδάτινου
Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, 38446, Νέα Ιωνία, Βόλος
dalezios@uth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην εργασία αυτή επιχειρείται πιστοποίηση και διερεύνηση της αξιοπιστίας συμβατικών δεικτών εκτίμησης ξηρασίας. Εφαρμόζονται τέσσερις ευρέως χρησιμοποιούμενοι δείκτες ποσοτικής εκτίμησης υδρομετεωρολογικής ξηρασίας, όπως ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας Palmer (PDSI), ο αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI), ο τυποποιημένος δείκτης υετού (SPI) και ο δείκτης δεκατημορίων (DI). Για την πιστοποίηση των δεικτών χρησιμοποιούνται μερικοί ευρέως διαδεδομένοι στατιστικοί δείκτες. Η εκτίμηση πραγματοποιείται στο σταθμό Λάρισας Θεσσαλίας με βάση μια χρονοσειρά 60 ετών. Τα αποτελέσματα κρίνονται πολύ ικανοποιητικά. Όλοι οι δείκτες εκτίμησης ξηρασίας παρουσίασαν την ίδια συμπεριφορά με ταύτιση των περιόδων ξηρασίας. Επίσης, οι τιμές των στατιστικών δεικτών θεωρούνται πολύ ικανοποιητικές και κυμαίνονται εντός αποδεκτού εύρους για κάθε δείκτη ξηρασίας.

Λέξεις κλειδιά: συμβατικοί δείκτες ξηρασίας, πιστοποίηση, στατιστικοί δείκτες

VALIDATION AND RELIABILITY ASSESSMENT OF CONVENTIONAL INDICES FOR THE ESTIMATION OF HYDROMETEOROLOGICAL DROUGHT

**N.R. Dalezios¹, E. Boukouvala¹, A. Blanta¹, N. Pismichos¹, N. Spyropoulos¹
and A. Psilovikos**

¹ Laboratory of Agrometeorology, Department of Agriculture Ichthyology and Aquatic
Environment, University of Thessaly, 38446, Nea Ionia, Volos
dalezios@uth.gr

ABSTRACT

In this paper, validation and reliability assessment of conventional drought estimation indices is attempted. Four widely used indices of quantitative estimation of hydrometeorological drought are applied, namely Palmer Drought Severity Index (PDSI), Reconnaissance Drought Index (RDI), Standardised Precipitation Index (SPI) and Deciles Index (DI). Also several widely used error statistics are employed for validation of the analysis. The assessment is implemented at the station of Larissa Thessaly using a time series of monthly data for 60 years. The results are considered very satisfactory. All the drought estimation indices have indicated the same temporal behavior during periods of drought. Also the values of error statistics are considered very satisfactory and vary within acceptable ranges for each drought index.

Key words: conventional drought indices, validation, error statistics

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ξηρασία είναι περιοχικό φαινόμενο, που θεωρείται ένας από τους μεγαλύτερους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Η βασική αιτία της ξηρασίας είναι η έλλειψη βροχοπτώσεων για μια χρονική περίοδο σε μια περιοχή, που συνεπάγεται ελλειμματικούς υδατικούς πόρους (Palmer, 1965· Rossi *et al.*, 2007). Δεν υπάρχει διεθνώς ενιαίος και αποδεκτός ορισμός της ξηρασίας, καθόσον υπάρχει ένα μεγάλο εύρος τομέων ανθρώπινης δραστηριότητας που επηρεάζονται από την ξηρασία και την χωροχρονική της μεταβλητότητα, καθώς και τη ζήτηση παροχής νερού για χρήση από τον άνθρωπο (Heim, 2002). Αν η ξηρασία θεωρηθεί ως φαινόμενο, είναι ασφαλώς ατμοσφαιρικό φαινόμενο. Ωστόσο, αν η ξηρασία θεωρηθεί ως περιβαλλοντικός κίνδυνος, υπάρχει διεθνώς η τάση ταξινόμησης των τύπων ξηρασίας σε τρεις κατηγορίες, τη μετεωρολογική ή κλιματολογική, τη γεωργική και την υδρολογική ξηρασία και να περιλαμβάνεται ως τέταρτη κατηγορία οι κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις της ξηρασίας (Keyantash and Dracup, 2002).

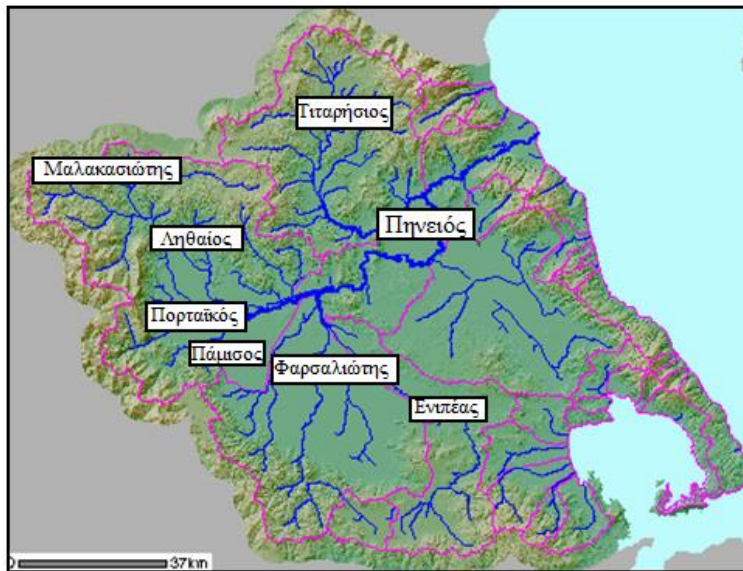
Υπάρχουν ενδείξεις ξηρασίας, που είναι στην ουσία μεταβλητές περιγράφοντας χαρακτηριστικά της ξηρασίας. Σύνθεση διαφόρων ενδείξεων μπορεί να οδηγήσει σε μια μεμονωμένη ένδειξη σε ποσοτική κλίμακα, που ονομάζεται δείκτης ξηρασίας. Τελικά, για τον προσδιορισμό, παρακολούθηση και ποσοτική εκτίμηση της ξηρασίας σε μια περιοχή χρησιμοποιούνται συνήθως δείκτες ξηρασίας. Υπάρχει μεγάλος αριθμός δεικτών που έχουν αναπτυχθεί και εφαρμόζονται βασιζόμενοι σε διάφορες μεταβλητές χρησιμοποιώντας είτε συμβατικά είτε τηλεπισκοπικά δεδομένα (Heim, 2002· Keyantash and Dracup, 2002· Κανέλλου, 2010).

Στην εργασία αυτή εφαρμόζονται τέσσερις ευρέως χρησιμοποιούμενοι συμβατικοί δείκτες ποσοτικής εκτίμησης υδρομετεωρολογικής ξηρασίας. Οι δείκτες αυτοί είναι: ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας Palmer (PDSI) (Palmer, 1965), ο αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (RDI) (Tsakiris and Vangelis, 2005), ο τυποποιημένος δείκτης νετού (SPI) (McKee *et al.*, 1993) και ο δείκτης δεκατημορίων (DI) (Kanellou *et al.*, 2008). Εφαρμογή πραγματοποιείται στην περιοχή της Θεσσαλίας, που αποτελεί την κύρια αγροτική περιοχή της χώρας και παρουσιάζει ελλείμματα στους διαθέσιμους υδατικούς πόρους λόγω κυρίως της συχνής εμφάνισης ξηρασιών και της μη ορθολογικής διαχείρισης των φυσικών πόρων (Dalezios *et al.*, 2000· Loukas *et al.*, 2002). Επιχειρείται πιστοποίηση και διερεύνηση της αξιοπιστίας των δεικτών χρησιμοποιώντας μερικούς ευρέως διαδεδομένους στατιστικούς δείκτες. Η εργασία οργανώνεται ως εξής: στο εδάφιο 2 περιγράφεται η περιοχή μελέτης και η βάση δεδομένων· στο εδάφιο 3 καταγράφονται οι δείκτες ξηρασίας και στο εδάφιο 4 οι στατιστικοί δείκτες· τέλος στο εδάφιο 5 παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα.

2. ΠΕΡΙΟΧΗ ΜΕΛΕΤΗΣ ΚΑΙ ΒΑΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Η περιοχή μελέτης στην παρούσα εργασία είναι η περιοχή της Θεσσαλίας και η κύρια υδρολογική λεκάνη του υδατικού διαμερίσματος, εκείνη του Πηνειού ποταμού (Εικόνα 1). Ο Πηνειός ποταμός κατέχει την 3^η θέση ανάμεσα στους ποταμούς της Ελλάδας με μήκος 205 km και συνολική επιφάνεια της λεκάνης απορροής 9.500 km². Σχετικά με τις κλιματικές συνθήκες, τα καλοκαίρια στα πεδινά είναι συνήθως πολύ ζεστά και ξηρά, όπου τον Ιούλιο και τον Αύγουστο οι θερμοκρασίες μπορεί να φθάσουν τους 40°C. Η μέση ετήσια βροχόπτωση σε όλη την περιοχή της Θεσσαλίας είναι περίπου 700 χιλιοστά και είναι άνισα κατανομημένη στο χώρο και το χρόνο. Συγκεκριμένα, κυμαίνεται από περίπου 400 χιλιοστά στην περιοχή της κεντρικής πεδιάδας έως και πάνω από 1.850 χιλιοστά στις δυτικές βουνοκορφές της Πίνδου.

Η βάση δεδομένων αποτελείται από στοιχεία προερχόμενα από τον μετεωρολογικό σταθμό της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (ΕΜΥ) στη Λάρισα για τα υδρολογικά έτη 1950 – 2010. Τα μετεωρολογικά δεδομένα περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης, θερμοκρασίας αέρα, ταχύτητας και διεύθυνσης ανέμου.



Εικόνα 1. Υδρολογικός χάρτης Θεσσαλίας

3. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Στην παρούσα μελέτη πραγματοποιείται ποσοτική εκτίμηση της ξηρασίας στην περιοχή της Θεσσαλίας, χρησιμοποιώντας ορισμένους από τους πιο διαδεδομένους συμβατικούς δείκτες εκτίμησης ξηρασίας. Στη συνέχεια, ακολουθείται πιστοποίηση της μεθοδολογίας με τη χρήση στατιστικών δεικτών.

3.1 ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΗΣ ΞΗΡΑΣΙΑΣ

Υπάρχει πληθώρα συμβατικών δεικτών οι οποίοι εκτιμούν την ξηρασία, οι πιο ευρέως γνωστοί εκ των οποίων είναι ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας Palmer, ο αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας, ο τυποποιημένος δείκτης νετού και ο δείκτης δεκατημορίων.

3.1.1. Δείκτης δριμύτητας ξηρασίας Palmer

Ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας Palmer (Palmer Drought Severity Index - PDSI), είναι γνωστός ως μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας, όπου για τον υπολογισμό του χρησιμοποιούνται τιμές βροχόπτωσης, εδαφικής υγρασίας και απορροής. Μετεωρολογική ξηρασία θεωρείται μια παρατεταμένη μη κανονική έλλειψη υγρασίας που προέρχεται βασικά από έλλειψη βροχοπτώσεων (Palmer, 1965). Για τον υπολογισμό του PDSI απαιτούνται πέντε στάδια: το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του κλιματικού υδατικού ισοζυγίου μιας περιοχής. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι κλιματικοί συντελεστές. Κατόπιν υπολογίζονται οι κλιματικά κατάλληλες για τις υπάρχουσες συνθήκες τιμές των παραμέτρων. Το προτελευταίο στάδιο περιλαμβάνει τον υπολογισμό του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας, απ' όπου υπολογίζεται τελικά ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας του Palmer (PDSI) από την εξίσωση:

$$X_j = 0,897 \times X_{j-1} + (Z_j/3) \quad (1)$$

όπου το Z_j αντιπροσωπεύει τις συσσωρευμένες τιμές του δείκτη ανωμαλίας υγρασίας Z για τα διαστήματα με έντονη ξηρασία, και X_j είναι η τιμή του PDSI για το μήνα j . Η κλίμακα του δείκτη PDSI παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1. Κατηγοριοποίηση της ξηρασίας σύμφωνα με το δείκτη PDSI (Palmer, 1965)

Τιμές δείκτη PDSI	Κλιματικές συνθήκες
≥ 4.0	Ακραία υγρές
3.0 έως 3.99	Πολύ υγρές
2.0 έως 2.99	Μέτρια υγρές
1.0 έως 1.99	Ελαφρώς υγρές
0.5 έως 0.99	Ίχνη υγρασίας
0.49 έως -0.49	Κανονικές συνθήκες
-0.5 έως -0.99	Ίχνη ξηρασίας
-1.0 έως -1.99	Ασθενώς ξηρές
-2.0 έως -2.99	Μέτρια ξηρές
-3.0 έως -3.99	Ισχυρά ξηρές
≤ -4.0	Ακραία ξηρές

3.1.2. Αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας

Ο αναγνωριστικός δείκτης ξηρασίας (Reconnaissance Drought Index - RDI), έχει τη δυνατότητα να προσφέρει πληροφορίες για την υδρολογική ξηρασία και χρησιμοποιεί πολύ απλούς μεθόδους υπολογισμού (Tsakiris and Vangelis, 2005). Πρόκειται για έναν έγκυρο δείκτη, ο οποίος υπερτερεί έναντι άλλων δεικτών ξηρασίας, αφού προσφέρει περισσότερο ολοκληρωμένες πληροφορίες για τις συνθήκες της περιοχής, χρησιμοποιώντας επιπλέον και τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή. Για τον υπολογισμό του δείκτη, απαιτείται η μέση μηνιαία θερμοκρασία αέρα και η μηνιαία αθροιστική βροχόπτωση και χρησιμοποιείται η σχέση:

$$a_k = \sum_{j=1}^{j=k} P_j / \sum_{j=1}^{j=k} PET_j \quad (2)$$

όπου k η εξεταζόμενη περίοδος σε μήνες του έτους, P_j η βροχόπτωση και PET_j η δυνητική εξατμισοδιαπνοή για κάθε μήνα j . Ο δείκτης RDI εκφράζεται ως ομαλοποιημένος RDI (εξ. 3) και ως τυποποιημένος RDI (εξ. 4).

$$RDI_n(k) = (a_k / \bar{a}_k) - 1 \quad (3) \quad RDI_{st}(k) = (y_k - \bar{y}_k) / \hat{\sigma}_k \quad (4)$$

όπου $\bar{a}_k$ είναι ο μέσος όρος των a_k , y_k ο νεπέριος λογάριθμος του a_k , $\bar{y}_k$ ο μέσος όρος των y_k και $\hat{\sigma}_k$ η τυπική απόκλιση των y_k . Στην εργασία αυτή χρησιμοποιείται ο τυποποιημένος δείκτης RDI. Οι τιμές του δείκτη RDI που προσδιορίζουν τις συνθήκες ξηρασίας της κάθε περιοχής παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

3.1.3. Τυποποιημένος δείκτης υετού

Ένας σχετικά απλός μετεωρολογικός δείκτης ξηρασίας, που χρησιμοποιείται ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, είναι ο τυποποιημένος δείκτης υετού (Standardized Precipitation Index - SPI) (McKee et al., 1993), ο οποίος ποσοτικοποιεί το έλλειμμα της

βροχόπτωσης σε διάφορες χρονικές κλίμακες. Ο υπολογισμός του SPI πραγματοποιείται με την κατανομή Γάμμα. Ο υπολογισμός των παραμέτρων α και β μπορεί να γίνει για οποιαδήποτε χρονική κλίμακα (1, 3, 6, 9, 12 μήνες). Ο προσδιορισμός των παραμέτρων γίνεται με τις εξισώσεις:

$$\alpha = (1/4A) \left(1 + \sqrt{1 + 4A/3} \right) \quad (5) \quad \text{και} \quad \beta = \bar{x}/\alpha \quad (6)$$

όπου $A = \ln \bar{x} - (\sum \ln(x)/n)$ και n ο αριθμός των παρατηρήσεων. Για το λόγο του ότι η συνάρτηση Γάμμα δεν ορίζεται για $x = 0$, ενώ η χρονοσειρά της βροχόπτωσης είναι δυνατόν να περιλαμβάνει μηδενικές τιμές, η αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας παίρνει τη μορφή:

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (7)$$

όπου q είναι η πιθανότητα μηδενικών τιμών, $G(x)$ είναι η αθροιστική πιθανότητα της μη πλήρους συνάρτησης Γάμμα. Η αθροιστική πιθανότητα $H(x)$ μετασχηματίζεται στην τυποποιημένη τυχαία μεταβλητή Z με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση ένα, η οποία δίνει τις τελικές τιμές του SPI σύμφωνα με την εξίσωση (8):

$$Z_{spi} = (X_{ij} - X_{im})/\sigma \quad (8)$$

όπου X_{ij} είναι η εποχική βροχόπτωση σε ένα συγκεκριμένο σταθμό, X_{im} η μέση εποχική βροχόπτωση και σ είναι η τυπική απόκλιση.

Χαρακτηριστικά του δείκτη είναι ότι δεν επηρεάζεται από την τοπογραφία της υπό μελέτη περιοχής, αλλά και το ότι δεν εξαρτάται από την εδαφική υγρασία πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί εξίσου καλά τόσο κατά τη διάρκεια της χειμερινής, όσο και κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής περιόδου. Οι τιμές του δείκτη SPI που προσδιορίζουν τις συνθήκες ξηρασίας της κάθε περιοχής παρουσιάζονται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Κατηγοριοποίηση της ξηρασίας σύμφωνα με τους δείκτες RDI και SPI	
Τιμές δείκτη RDI και SPI	Κλιματικές συνθήκες
>2.00	Εξαιρετικά υγρές
1.50 έως 1.99	Πολύ υγρές
1.00 έως 1.49	Μέτρια υγρές
-0.99 έως 0.99	Κανονικές συνθήκες
-1.00 έως -1.49	Μέτρια ξηρές
-1.50 έως -1.99	Ισχυρά ξηρές
< -2.00	Ακραία ξηρές

3.1.4. Δείκτης δεκατημορίων

Μια απλοποιημένη μέθοδος για την παρακολούθηση της μετεωρολογικής ξηρασίας προκύπτει από την κατανομή των μηνιαίων στοιχείων βροχόπτωσης μιας μακροχρόνιας σειράς δεδομένων, η οποία στη συνέχεια διακρίνεται σε δέκα κατηγορίες ή δεκατημόρια (Deciles Index - DI). Η απλότητα του δείκτη, έγκειται στην ευκολία υπολογισμού του, αφού απαιτεί μόνο δεδομένα βροχόπτωσης και λιγότερες παραδοχές σε σχέση με άλλους δείκτες. Οι τιμές του δείκτη δεκατημορίων που προσδιορίζουν τις συνθήκες ξηρασίας της κάθε περιοχής παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.

Πίνακας 3. Κατηγοριοποίηση της ξηρασίας σύμφωνα με το δείκτη Deciles

Δεκατημόρια Βροχόπτωσης	Κλάσεις	Κλιματικές συνθήκες
1-2	< 20%	Ιδιαίτερα κάτω του κανονικού
3-4	20% - 40%	Κάτω του κανονικού
5-6	40% - 60%	Κανονικές συνθήκες
7-8	60% - 80%	Πάνω του κανονικού
9-10	80% - 100%	Ιδιαίτερα πάνω του κανονικού

3.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΙ ΔΕΙΚΤΕΣ

Η πιστοποίηση της μεθοδολογίας πραγματοποιείται με τον υπολογισμό ευρέως διαδεδομένων στατιστικών δεικτών. Ειδικότερα, χρησιμοποιούνται οι κάτωθι δείκτες:

1. Δείκτης αποτελεσματικότητας (Efficiency Coefficient - E_{ff}) (Nash and Sutcliffe, 1970), που δίνεται από την εξίσωση:

$$E_{ff} = 1 - ((\sum_{i=1}^n (PDSI - I_{sim})^2 / \sum_{i=1}^n (PDSI - \overline{PDSI})^2)) \quad (9)$$

όπου PDSI είναι ο δείκτης PDSI του μήνα i , I_{sim} είναι οι τιμές των δεικτών RDI, SPI, DI του μήνα i , αντίστοιχα, και $\overline{PDSI}$ είναι οι μέσες μηνιαίες τιμές δείκτη PDSI. Η βέλτιστη τιμή του E_{ff} είναι το 1,00.

2. Μέσο τετραγωνικό σφάλμα (Root Mean Square Error - RMSE) (Dalezios, 1988)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (I_{sim} - \overline{I_{sim}})^2 / N} \quad (10)$$

όπου I_{sim} είναι οι τιμές των επίγειων δεικτών κάθε μήνα i , $\overline{I_{sim}}$ είναι οι μέσες μηνιαίες τιμές τους και N είναι ο συνολικός αριθμός ετών. Το εύρος τιμών του RMSE κυμαίνεται μεταξύ 0,00 και $+\infty$.

3. Στατιστική μεροληψία (BIAS) (Dalezios, 1988)

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (PDSI - I_{sim}) \quad (11)$$

όπου PDSI είναι οι τιμές του δείκτη PDSI του μήνα i , I_{sim} είναι οι τιμές των δεικτών RDI, SPI, DI του μήνα i και N ο συνολικός αριθμός ετών. Με το δείκτη αυτό υπολογίζεται η απόκλιση από τις μέσες τιμές και η βέλτιστη τιμή για τον στατιστικό αυτό δείκτη είναι το 0,00.

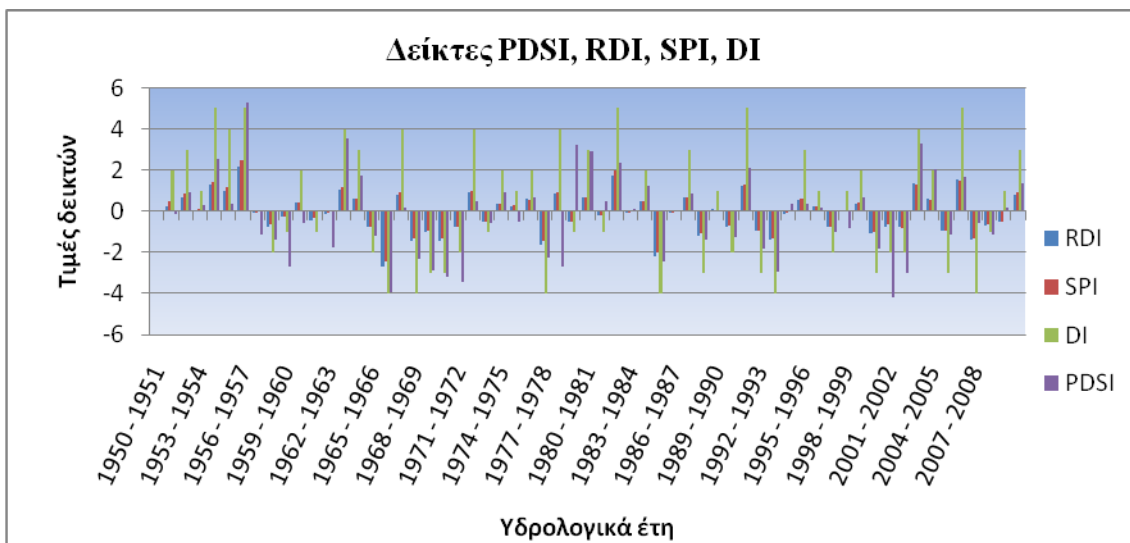
4. Συντελεστής υπολογισμού (Coefficient of Determination - r^2) (Dalezios, 1988)

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (PDSI - \overline{PDSI})(I_{sim} - \overline{I_{sim}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (PDSI - \overline{PDSI})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{sim} - \overline{I_{sim}})^2}} \right)^2 \quad (12)$$

όπου PDSI είναι οι τιμές PDSI, $\overline{PDSI}$ οι μέσες μηνιαίες τιμές του, I_{sim} είναι οι τιμές των δεικτών RDI, SPI, DI, αντίστοιχα, και $\overline{I_{sim}}$ οι μέσες μηνιαίες τιμές του κάθε δείκτη. Με το στατιστικό αυτό δείκτη μετριέται το μέγεθος συσχέτισης μεταξύ δυο μεταβλητών. Τιμές κοντά στο 1,00 υποδεικνύουν πολύ υψηλή συσχέτιση.

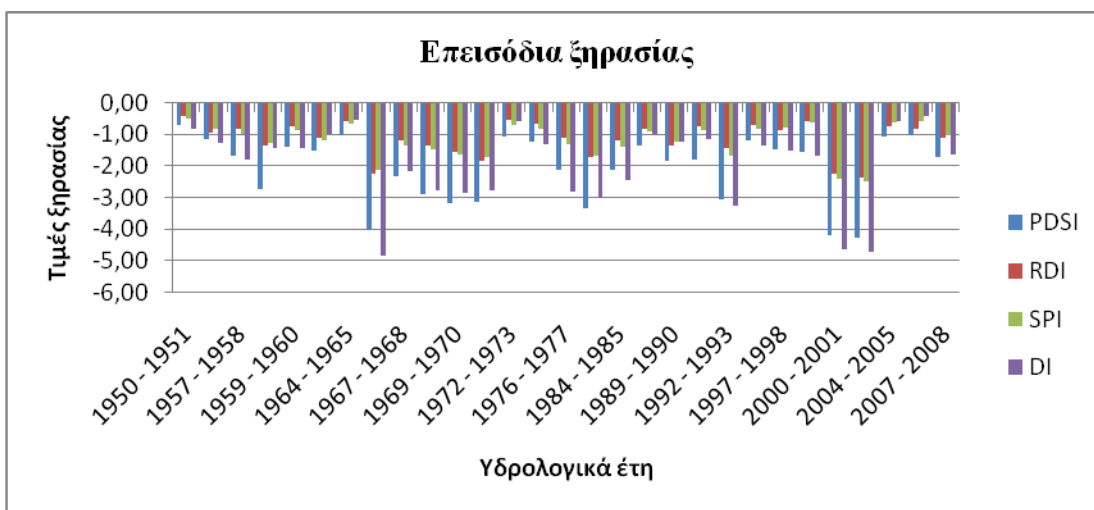
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΗΜΑΝΣΕΙΣ

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν υπολογίζοντας τους συμβατικούς δείκτες ξηρασίας απεικονίζονται στο Σχήμα 1. Παρατηρείται ότι όλοι οι δείκτες παρουσιάζουν την ίδια μορφή τόσο κατά τις περιόδους ξηρασίας όσο και κατά τις περιόδους υγρασίας και σχεδόν ταυτίζονται για την ίδια χρονική περίοδο. Οι ελάχιστες διαφοροποιήσεις μεταξύ των τιμών των τεσσάρων δεικτών θεωρούνται αμελητέες και δεν μεταβάλλουν σε καμία περίπτωση την τάξη μεγέθους της ξηρασίας. Οι μεταβολές αυτές ανάμεσα στις τιμές των δεικτών που εξετάζονται, κυμαίνονται μεταξύ των ορίων της κάθε κλάσης της ξηρασίας (μέτρια, ισχυρή, ακραία), και εξηγούνται βάσει της διαφορετικής φύσης των δεδομένων που εισάγονται κατά τη διαδικασία υπολογισμού τους.



Σχήμα 1. Δείκτες ξηρασίας για τα υδρολογικά έτη 1950 – 2010 για το σταθμό Λάρισας

Ο δείκτης δριμύτητας ξηρασίας Palmer αποτελεί ένα μοντέλο ξηρασίας, το οποίο παρουσιάζει ευρεία χρήση αφού εύκολα μπορεί να δώσει μια γενική εικόνα της ξηρασίας. Θεωρείται ένας από τους πλέον αξιόπιστους δείκτες διεθνώς και αποτελεί βάση σύγκρισης στην παρούσα εργασία. Σύμφωνα με αυτόν τον δείκτη έχουν προκύψει 29 επεισόδια ξηρασίας για το χρονικό διάστημα 1950 – 2010. Στο Σχήμα 2 δίνονται τα επεισόδια ξηρασίας στο σύνολό τους και για τους τέσσερις δείκτες.



Σχήμα 2. Επεισόδια ξηρασίας των συμβατικών δεικτών

Προκειμένου να εξασφαλισθεί μια περισσότερο ολοκληρωμένη προσέγγιση των δεικτών στοχεύοντας παράλληλα στην πιστοποίηση της μεθοδολογίας, χρησιμοποιούνται οι στατικοί δείκτες τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.

Πίνακας 4. Αποτελέσματα στατιστικών δεικτών				
Δείκτης ξηρασίας	E_{ff}	RMSE	BIAS	r^2
RDI	0,53	0,97	-0,15	0,62
SPI	0,52	0,97	-0,21	0,62
DI	-0,10	2,83	-0,65	0,57
PDSI	-	1,98	-	-

Τα αποτελέσματα του κάθε δείκτη θεωρούνται πολύ ικανοποιητικά και κυμαίνονται εντός του αποδεκτού εύρους τιμών των στατιστικών δεικτών, γεγονός που αποδεικνύει την αξιοπιστία της μεθοδολογίας. Οι διαφορές που παρατηρούνται, μεταξύ των δεικτών εξηγούνται λόγω της διαφορετικής φύσης και δομής τους.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη χρήση των ευρέως διαδεδομένων δεικτών, PDSI, RDI, SPI, και DI, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι πρόκειται για εύχρηστους και αξιόπιστους δείκτες ποσοτικής εκτίμησης της ξηρασίας. Παρατηρείται ότι οι τέσσερις δείκτες προσδιορίζουν με τον ίδιο τρόπο τα επεισόδια ξηρασίας, εμφανίζοντας ως επί το πλείστον τις ίδιες χρονικές διάρκειες μηνών μέσα στα ίδια υδρολογικά έτη και την ίδια περίπου μέση δριμύτητα. Επιπλέον, η αποτελεσματικότητα και η εγκυρότητα των μεθόδων RDI, SPI και DI προκύπτει από τη σύγκρισή τους με τον PDSI. Από τη σύγκριση αυτή εξάγονται ικανοποιητικά αποτελέσματα, αφού οι χρονοσειρές που προέκυψαν από όλες τις μεθόδους συμπίπτουν, παρουσιάζοντας μικρές αυξομειώσεις όσον αφορά στη δριμύτητα της ξηρασίας, οι οποίες είναι και αναμενόμενες. Πιστοποίηση και διερεύνηση αξιοπιστίας των δεικτών πραγματοποιείται με τη χρήση ορισμένων ευρέως διαδεδομένων στατιστικών δεικτών από τους οποίους προκύπτουν συγκρίσιμα και ικανοποιητικά αποτελέσματα. Από τον υπολογισμό των στατιστικών δεικτών παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα κυμαίνονται στα επιτρεπτά όρια πλησιάζοντας μάλιστα τις βέλτιστες τιμές του κάθε δείκτη, γεγονός που επαληθεύει τα ήδη υπάρχοντα αποτελέσματα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα αυτή χρηματοδοτήθηκε από προγράμματα της Ευρωπαϊκής Ένωσης PLEADES, SMART και HYDROSENSE. Τα συμβατικά μετεωρολογικά στοιχεία προέρχονται από το σταθμό της Λάρισας της Εθνικής Μετεωρολογικής Υπηρεσίας (EMY).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Dalezios, N.R, A., Loukas L. Vasiliades and H. Liakopoulos, 2000. Severity- Duration-Frequency analysis of droughts and wet periods in Greece. Journal of Hydrological Sciences, 45 (5), pp. 751-770.
- Dalezios, N.R., 1988. Objective Rainfall Evaluation in Radar Hydrology. J. of Water Resour. Plan. and Management (JWRMDS), ASCE, 114 (5), Sep., pp. 531-546.
- Heim, R.R. Jr., 2002. A review of twentieth- century drought indices used in the United States. Bulletin of the American Meteorological Society, 83 (8), pp. 1149-1165.

- Κανέλλου, Ε., 2010. Περιοχική εκτίμηση ξηρασίας. Διδακτορική διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 229 pp.
- Kanellou, E., C. Domenikiotis, A. Blanta, E. Hondronikou and N. R. Dalezios, 2008. Index-based Drought Assessment in Semi-Arid Areas of Greece based on Conventional Data. *European Water* 23/24, pp 87-98.
- Keyantash, J. and J. A. Dracup, 2002. The quantification of drought: An evaluation of drought indices. *Bulletin of American Meteorological Society*, pp 1167-1180.
- Loukas A., L. Vasiliades and N.R. Dalezios, 2002. Hydroclimatic variability of regional droughts in Greece using the Palmer Moisture Anomaly Index. *Nordic Hydrology*, 33 (5), pp 425-442.
- McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist, 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scale. Preprints, Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA, pp 179-184.
- Μπουκουβάλα, Ε., 2011. Σύγκριση συμβατικών μεθόδων εκτίμησης ξηρασίας στη λεκάνη απορροής του Πηνειού ποταμού. Μεταπτυχιακή διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Βόλος, 75 pp.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V.: 1970, River flow forecasting through conceptual models. Part-1: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), pp 282-290.
- Palmer, W.C., 1965. Meteorological drought. Research Paper No. 45, U.S. Department of Commerce, Weather Bureau, Washington, D.C., 58 pp.
- Rossi, G., T. Vega and Br. Bonaccorco (eds), 2007. Methods and tools for drought analysis and management, Springer publications, 418 pp.
- Tsakiris, G. and H. Vangelis, 2005. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9/10, pp 3-11.