

ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΜΕΤΑΠΥΡΙΚΗΣ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΑΠΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΔΕΙΚΤΩΝ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Πέττας, Ηλίας,¹; Ποϊραζίδης, Κωνσταντίνος¹; Δανέλη, Νίκη¹; Μαρτίνης, Αριστοτέλης¹; Λάττας, Παναγιώτης²

¹ΤΕΙ Ιονίων Νήσων, Τμήμα Τεχνολόγων Περιβάλλοντος, Ζάκυνθος, Παναγούλα 29100, e-mail: ecoroira@yahoo.gr

² Διεύθυνση Δασών Ηλείας, Δασαρχείο Πύργου, Αλφειού 42 Πύργος, 27100, e-mail: lattaspan@yahoo.gr

Περίληψη

Οι δασικές πυρκαγιές προκαλούν μεταβολές στην εξάπλωση και κατανομή της φυτοκάλυψης, επηρεάζοντας την οικολογική συνοχή των οικοσυστημάτων και σε μια σειρά οικοσυστηματικών υπηρεσιών και αγαθών. Η συστηματική παρακολούθηση των καμένων εκτάσεων και της μεταπυρικής αποκατάστασης έχουν θεμελιώδη σημασία για τη μετρίαση των επιπτώσεων και της λήψης αναγκαίων διαχειριστικών μέτρων. Στην εργασία αυτή αξιολογείται η μεταπυρική αποκατάσταση έντεκα πυρκαγιών από τέσσερις διαφορετικές περιοχές της Ελλάδος (Ηλεία, Εύβοια, Ζάκυνθος και Κεφαλονιά) με διαφορετικά χαρακτηριστικά εξάπλωσης και σφοδρότητας. Παρουσιάζεται μια γρήγορη, αλλά αποτελεσματική, τεχνική αποτύπωσης του περιγράμματος των καμένων εκτάσεων και μέσα από μια διαχρονική αξιολόγηση κατάλληλων δεικτών βλάστησης μελετήθηκε η μεταπυρική αποκατάστασή τους. Εντοπίστηκαν σημαντικές διαφορές, ανάμεσα στις διαφορετικές πυρκαγιές, που αποδόθηκε στη σταδιακή υποβάθμιση τους μετά από επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές.

Λέξεις κλειδιά: Αντικειμενοστραφή ταξινόμηση, Landsat, περίγραμμα πυρκαγιάς, NBR, μεταπυρική αξιολόγηση

Εισαγωγή

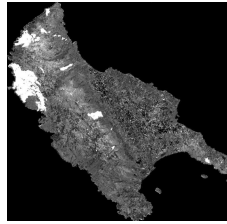
Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν το βασικό κινητήριο παράγοντα για τη μεταβολή της δομής και κατανομής των φυσικών διαπλάσεων στη Μεσογειακή ζώνη. Τα τελευταία χρόνια, η διαφοροποίηση του κλίματος, σε συνδυασμό με την αύξηση της βιομάζας, λόγω υποχώρησης των αγροτικών δραστηριοτήτων στην ύπαιθρο αλλά και την εγκατάλειψη της δασικής διαχείρισης έχουν επιδεινώσει το πρόβλημα, με συνέπεια την εμφάνιση μεγάλων και ανεξέλεγκτων καταστροφικών πυρκαγιών. Οι αρνητικές επιπτώσεις που ακολουθούν πάντοτε τις δασικές πυρκαγιές εντοπίζονται στην αλλαγή μικροκλίματος, στον εκτοπισμό ή περιορισμό εμφάνισης ειδών χλωρίδας και πανίδας, στη διάβρωση εδάφους, στην ισχυρή απορροή υδάτων με ακολουθία εμφάνισης πλημμυρικών γεγονότων, καθώς και στην υποβάθμιση της αισθητικής του τοπίου και στην αλλαγή των χρήσεων γης (Τσαγκάτη κ.α. 2011). Η επίδραση των πυρκαγιών μπορεί να είναι ευνοϊκή ή δυσμενής, ανάλογα με τη μορφή, την ένταση, τη συχνότητα επανάληψης, τη σύνθεση των οικοσυστημάτων, την τοπογραφία και τη συνεπίδραση άλλων παραγόντων (Ireland και Petropoulos 2015).

Η μεταπυρική αξιολόγηση της καμένων εκτάσεων (τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα) είναι σημαντική για το μετριασμό των οικονομικών και οικολογικών επιπτώσεων στα οικοσυστήματα (Gitas κ.α. 2012). Η αυξανόμενη διαθεσιμότητα και βελτίωση των τηλεπισκοπικών δεδομένων, καθιστά τη διαχρονική παρακολούθηση των μεταβολών του περιβάλλοντος μέσα από μεθόδους τηλεπισκόπησης, ένα απαραίτητο εργαλείο για την καταγραφή και αποτίμηση των επιπτώσεων των πυρκαγιών στα φυσικά οικοσυστήματα και στη λήψη μεταπυρικών διαχειριστικών δράσεων (Gitas κ.α. 2014). Τεχνικές βασισμένες στο εικονοστοιχείο των δορυφορικών εικόνων ή με βάση αντικειμενοστραφή ταξινόμηση έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς για την αποτύπωση των καμένων εκτάσεων (Mallinis και Koutsias 2012, Gitas κ.α. 2012), ενώ μια μεγάλη σειρά δεικτών έχουν αναπτυχθεί για την καταγραφή της σφοδρότητας των πυρκαγιών και της διαχρονικής φυσικής αποκατάστασής τους (Escuin κ.α. 2007, Franks κ.α. 2013).

Την τελευταία δεκαετία, μεγάλες πυρκαγιές έκαψαν σημαντικές εκτάσεις σε πολλές περιοχές της Ελλάδας, με αποκορύφωμα τις καταστροφικές πυρκαγιές του 2007– σε δασικές εκτάσεις αλλά και σε ανθρώπινες ζωές – στην Πελοπόννησο, στην Εύβοια και αλλού. Παράλληλα, άλλες περιοχές (όπως η Ζάκυνθος και η Κεφαλονιά) υποφέρουν από επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές στην ίδια περιοχή (Χαϊδευτού κ.α. 2013). Το βασικό αντικείμενο αυτής της εργασίας ήταν η αξιολόγηση της διαχρονικής παρακολούθησης του ρυθμού φυσικής αποκατάστασης καμένων δασικών περιοχών με χρήση τηλεπισκοπικών δεδομένων, με στόχο να αποτελεί ένα χρήσιμο διαχειριστικό εργαλείο για την μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των πυρκαγιών.

Υλικά και Μέθοδοι

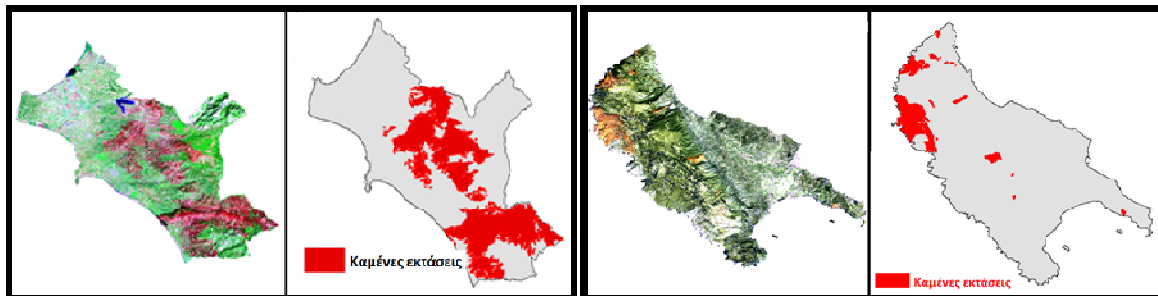
Η μεταπυρική παρακολούθηση της φυσικής αποκατάστασης των δασικών περιοχών έγινε με χρήση διαχρονικών τηλεπισκοπικών δεδομένων Landsat για την αποτύπωση των καμένων εκτάσεων σε τέσσερις περιοχές που έχουν πληγεί από πυρκαγιές τα τελευταία έτη (το 2007 σε Ηλεία Εύβοια και Κεφαλονιά, το 2009 στη Ζάκυνθο, ενώ εξετάστηκε και η διαχρονική παρακολούθηση μιας 2ης πυρκαγιάς στην Κεφαλονιά από το 1986) (Σχήμα 1). Οι εικόνες αυτές διορθώθηκαν γεωμετρικά και ραδιομετρικά για να μπορούν να αναλυθούν διαχρονικά. Παράλληλα, για την καλύτερη αποτύπωση των καμένων εκτάσεων διαμορφώθηκαν ειδικοί δείκτες που αποτυπώνουν με ακρίβεια αυτές τις εκτάσεις. Για κάθε δορυφορική εικόνα υπολογίστηκαν οι δείκτες *Normalized Burn Ratio* (NBR) και *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), όπου: $NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$ και $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, ενώ για την εκτίμηση της σφοδρότητας της πυρκαγιάς υπολογίστηκε ο δείκτης *Difference Normalized Burn Ratio* (DNBR), όπου υπολογίζει τη διαφορά του NBR από μια λήψη πριν τη φωτιά και μετά τη φωτιά: $\Delta NBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire}$. Ο δείκτης αυτός αναδεικνύει παράλληλα και τις πρόσφατες καμένες εκτάσεις, με αποτέλεσμα να αποτελέσει και την βασικότερη φασματική μεταβλητή για την γρήγορη αποτύπωση των καμένων εκτάσεων (Σχήμα 1).



Σχήμα 1: Ο Δείκτης DNBR, της πυρκαγιάς του 2009, του Νομού Ζακύνθου
Figure 1: Index DNBR, of the fire of 2009, in the Prefecture of Zakynthos

Αποτύπωση πυρκαγιών

Για την αποτύπωση των καμένων εκτάσεων και του περιγράμματος των πυρκαγιών έχουν χρησιμοποιηθεί πολλοί αλγόριθμοι με σχετικά παρόμοια αποτελέσματα (Mallinis και Koutsias 2012), επιχειρώντας να βρουν μια ισορροπία ανάμεσα στη μείωση των ψευδών αναγνωρίσεων (*commission errors*) και να αυξήσουν το βαθμό αναγνώρισης (*omission errors*) των καμένων χωροψηφίδων (Bastarrika κ.α. 2011). Σε αυτή την εργασία, ως στόχο θέσαμε τη διαμόρφωση μιας γρήγορης - αλλά συγχρόνως σχετικά ακριβής χωρικά - μεθοδολογίας για την αποτύπωση του περιγράμματος των καμένων εκτάσεων, που θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τις διάφορες υπηρεσίες χωρίς ιδιαίτερη γνώση σύνθετων μεθόδων ταξινόμησης. Μετά από διάφορους πειραματισμούς τόσο με μεθόδους *pixel-based* όσο και με μεθόδους *object-based*, καταλήξαμε σε μια τεχνική αντικειμενοστραφούς ταξινόμησης (με τη χρήση του προγράμματος eCognition 9.0), η οποία βασίζεται στην ταξινόμηση με κύρια κριτήρια τους δείκτες DNBR και NDVI. Καθορίστηκε μικρή κλίμακα αναγνώρισης καμένων θέσεων (*scale factor* = 5) και διπλάσιο σχετικό βάρος κατάτμησης στο δείκτη DNBR. Τα όρια τιμών των δεικτών που καθορίστηκαν για την αναγνώριση αυτών των εκτάσεων ήταν λίγο διευρυμένα ($\Delta NBR \Rightarrow 140$ και $NDVI \leq 0.25$) για την αποτύπωση όλων των καμένων μικροθέσεων, περιλαμβάνοντας στην αρχική ταξινόμηση και μερικές άκαυτες θέσεις. Για την απομάκρυνση αυτών των άκαυτων θέσεων, σε ένα 2ο στάδιο, στην ταξινομημένη ως "καμένη" περιοχή, πραγματοποιήθηκε ταξινόμηση με τον αλγόριθμο Nearest Neighboring, με συλλογή δειγμάτων τόσο άκαυτων όσο και καμένων "αντικειμένων από την εικόνα, για τον τελικό διαχωρισμό τους. Το περίγραμμα της κάθε πυρκαγιάς δημιουργήθηκε με την ενσωμάτωση των άκαυτων εσωτερικών μικρο-νησίδων μέσα στο τελικό περίγραμμα, μέσα από αλγόριθμο του προγράμματος (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Η ταξινόμηση των πυρκαγιών του νομού Ηλείας (2007) και του νομού Ζακύνθου (2009)
Figures 2: Classification of fires in the prefecture of Ileia (2007) and in the prefecture of Zakynthos (2009)

Σφοδρότητα πυρκαγιών και μεταπυρική αποκατάσταση των καμένων περιοχών

Η σφοδρότητα και η μεταπυρική αποκατάσταση της κάθε πυρκαγιάς, υπολογίστηκε με το δείκτη ΔNBR, όσο και με το δείκτη NBR, με βάση το περίγραμμα της καμένης έκτασης που είχε προσδιοριστεί από το προηγούμενο στάδιο. Μια αρχική συσχέτιση του δείκτη NBR με τον αντίστοιχο NDVI έδειξε συσχέτιση $r^2 > 0.95$, αλλά επιλέχθηκε να παρουσιαστεί ο NBR λόγω της καλύτερης αποτύπωσης της μεταπυρικής εξέλιξης των καμένων περιοχών, καθώς το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του - Band 7 στον Landsat 5 και 7 - έχει αποδειχθεί ότι είναι ευαίσθητο στο διαχωρισμό του μη φωτοσυνθετικά ενεργό (νεκρό) ξύλο από το έδαφος και την τέφρα σε ένα μεταπυρικό περιβάλλον (Jia κ.α. 2006). Για τη μεταπυρική παρακολούθηση της αποκατάστασης των καμένων εκτάσεων, ο δείκτης ΔNBR υπολογίστηκε σε κάθε χρονικό βήμα με βάση την εικόνα πριν τη φωτιά και την εικόνα τη χρονιά αναφοράς (π.χ. ο ΔNBR Ζακύνθου 2011 υπολογίστηκε με βάση τον NBR - του περιγράμματος της φωτιάς 2009 - σε εικόνα πριν τη φωτιά και τον NBR του ίδιου περιγράμματος σε εικόνα του 2011). Ο δείκτης αυτός όταν πολλαπλασιαστεί με 1000, λαμβάνει τιμές από ≈ -500 σε $+1300$, όπου ≈ -100 σε $+99$ οι εκτάσεις χωρίς μεταβολή ανάμεσα στις δύο χρονικές στιγμές, αρνητικές τιμές σε θέσεις με αναβλάστηση σε σχέση με την αρχική εικόνα και με θετικές τιμές σε θέσεις με λιγότερη αναβλάστηση (Key και Benson 2005). Ο αρχικός υπολογισμός του, προσδιορίζει τη σφοδρότητα της πυρκαγιάς και την παρουσία άκαυτων νησίδων, ενώ η διαχρονική παρακολούθηση του προσδιορίζει τη χωρική αποκατάσταση (ή και βελτίωση) της καμένης περιοχής.

Αποτελέσματα

Αναλύθηκαν συνολικά 11 διαφορετικές ενότητες πυρκαγιών για να αξιολογηθεί η δυνατότητα μεταπυρικής παρακολούθησης των καμένων περιοχών με βάση τη χρήση της παραπάνω μεθοδολογίας. Στο νομό Ηλείας αναλύθηκε η "φωνική" πυρκαγιά του Αυγούστου 2007 σε δύο διαφορετικές ζώνες (βόρεια και νότια περιοχή) με συνολική έκταση περιγράμματος καμένων εκτάσεων (εντός νομού) 59.865 ha, στην Εύβοια οι μεγάλες πυρκαγιές του Αυγούστου 2007 σε τρεις ζώνες και συνολική έκταση 23.107 ha, στη Ζάκυνθο το καλοκαίρι του 2009 σε τέσσερις ζώνες και έκταση 2.242 ha, ενώ για την Κεφαλονιά μελετήθηκε αρχικά μια πυρκαγιά το καλοκαίρι του 1986 έκτασης 1.148 ha και στη συνέχεια μια φωτιά του 2007 έκτασης 2.214 ha η οποία σε ένα τμήμα της είχε επικάλυψη με την πυρκαγιά του 1986.

Σφοδρότητα πυρκαγιών

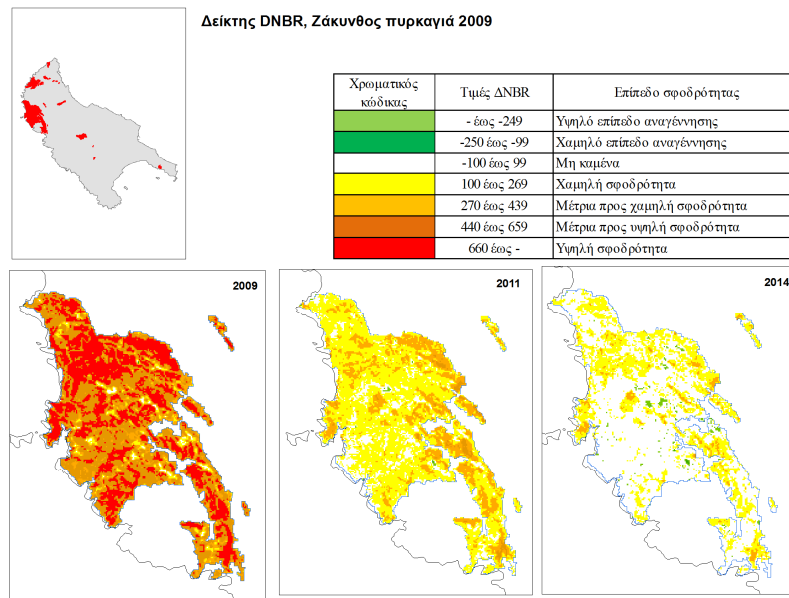
Η εκτίμηση της σφοδρότητας των καμένων εκτάσεων είναι μια σημαντική παράμετρος που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τις άμεσες και βραχυπρόθεσμες μεταπυρικές επιπτώσεις στην οικολογική συνοχή των επηρεαζόμενων οικοσυστημάτων και στη τοπική βιοποικιλότητα (Χαϊδευτού κ.α. 2013), ενώ εν μέρει επηρεάζει και τη δυναμική της φυσικής αποκατάστασης των καμένων εκτάσεων. Η σφοδρότητα των πυρκαγιών ήταν διαφορετική ανάμεσα στις μελετούμενες περιοχές. Η μεγαλύτερη ένταση εντοπίστηκε στη Ζάκυνθο, όπου παράλληλα είχε και τις λιγότερο άκαυτες νησίδες σε ποσοστό μόλις 0,7%. Σχετικά παρόμοια αποτελέσματα βρέθηκαν για τις πυρκαγιές στην Εύβοια με το ποσοστό μέσης και υψηλής σφοδρότητας να μεγαλύτερο από 90% (Πίνακας 1). Αντίθετα, στην Ηλεία και στις δύο πυρκαγιές στην Κεφαλονιά, μεγάλα τμήματα των καμένων περιοχών αναγνωρίστηκαν ως περιοχές με χαμηλή σφοδρότητα πυρκαγιάς (φθάνοντας σε ποσοστό 24% στην Κεφαλονιά το 1986).

Ιδιαίτερη σημασία είναι ο προσδιορισμός των άκαυτων νησίδων εντός του περιγράμματος των καμένων εκτάσεων, που σε συνδυασμό με τις περιοχές χαμηλής σφοδρότητας καθορίζουν ουσιαστικά το δυναμικό για την οικολογική αποκατάσταση των οικοσυστημικών λειτουργιών της επηρεαζόμενης έκτασης. Η Ηλεία εμφάνισε τα μεγαλύτερα ποσοστά σε αυτή την ενότητα, ίσως λόγω της πολυήμερης διάρκειας της πυρκαγιάς και εκτενής εξάπλωσης της, με αποτέλεσμα τη συχνή αλλαγή κατεύθυνσης των ανέμων όσο και λόγω των πολλαπλών μεθόδων καταπολέμησης της (Πίνακας 1).

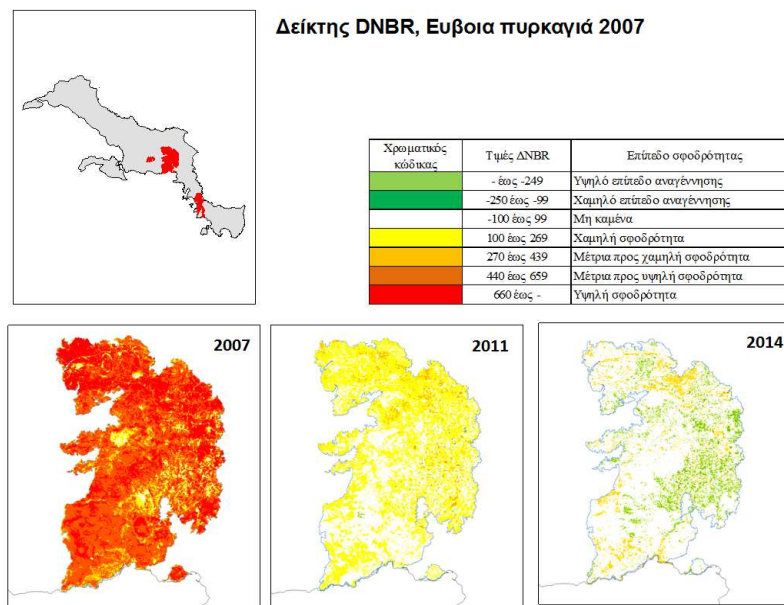
Πίνακας 1. Ποσοστά με κατηγορίες σφοδρότητας των καμένων εκτάσεων
Table 1. Percentage with severity categories of burned areas

	Άκαυτα	Χαμηλή σφοδρότητα	Μέση-Υψηλή σφοδρότητα
Ηλεία 2007	5,31%	16,17%	78,51%
Ζάκυνθος 2009	0,70%	3,46%	95,84%
Εύβοια 2007	1,51%	6,77%	91,72%
Κεφαλονιά 1986	1,49%	24,26%	74,25%
Κεφαλονιά 2007	2,91%	19,37%	77,73%

Η χωρική απεικόνιση της διαχρονικής μεταβολής της σφοδρότητας, είναι ένας πολύ καλός δείκτης για την αξιολόγηση της φυσικής αποκατάστασης και τον προσδιορισμό περιοχών πιθανών διαχειριστικών μέτρων. Στο σχήμα 3, παρουσιάζεται ενδεικτικά η μεταβολή του ΔNBR στις καμένες εκτάσεις της Εύβοιας και Ζακύνθου για μια περίοδο επτά και πέντε χρόνων αντίστοιχα. Είναι εμφανής η σχετικά γρήγορη φυσική επανόρθωση των καμένων περιοχών, αν και σημαντικό βαθμό σε αυτό παίζει η πρότερη κατάσταση των δασικών περιοχών. Για παράδειγμα στην εμφανιζόμενη πυρκαγιά της Ζακύνθου, μεγάλο τμήμα της καμένης περιοχής (ΝΔ) καταλαμβάνονταν από πετρώδεις περιοχές με αραιή βλάστηση, όπου ήταν αναμενόμενο η γενική εικόνα να επανέλθει σύντομα στην προ πυρκαγιάς κατάσταση (Σχήμα 3). Αντίθετα, στην Εύβοια, παρουσιάζεται μετά από επτά χρόνια από την πυρκαγιά, μια πιο βελτιωμένη εικόνα, με περιοχές με περισσότερη βλάστηση κατά θέσεις (Σχήμα 4), κάτι που υποστηρίζεται και από την μεταβολή του NBR (Σχήμα 7).



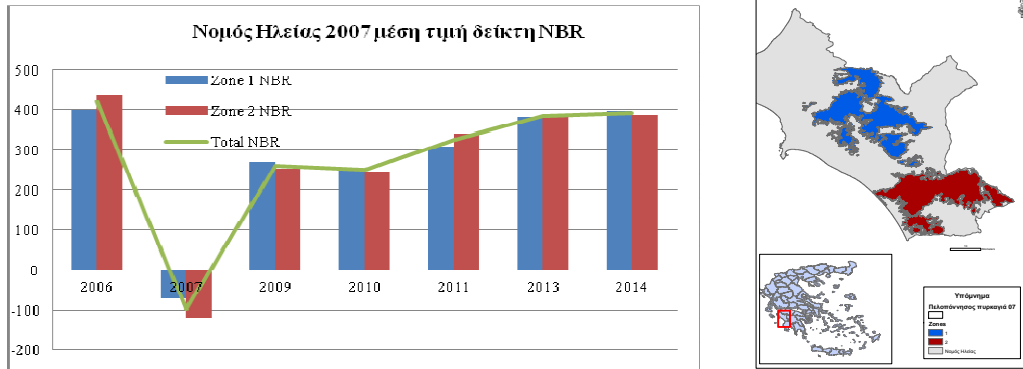
Σχήμα 3: Διαχρονική μεταβολή του δείκτη ΔNBR στο νομό Ζακύνθου
Figure 3: Temporal change of DNBR index in Zakinthos



Σχήμα 4: Διαχρονική μεταβολή του δείκτη ΔNBR στο νομό της Εύβοιας
Figure 4: Temporal change of DNBR index in Evia

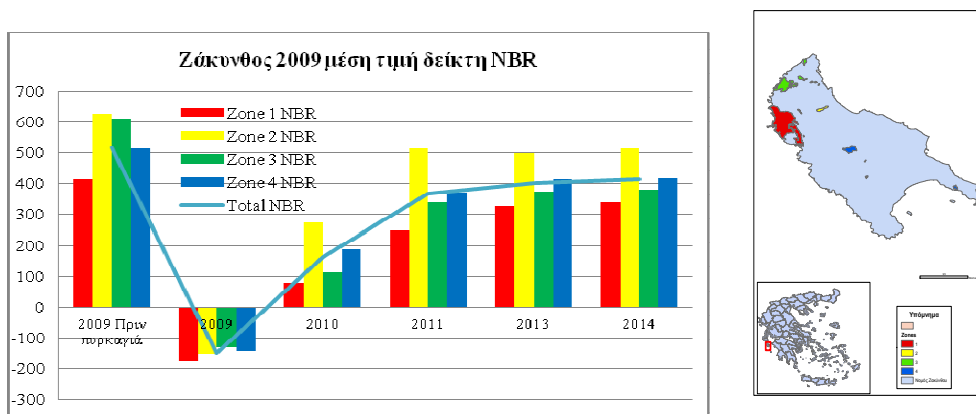
Μεταπυρική αποκατάσταση καμένων περιοχών

Η δυνατότητα για γρήγορη παρακολούθηση της μεταπυρικής φυσικής αποκατάστασης των καμένων περιοχών είναι ένα σημαντικό εργαλείο για την αποτελεσματική διαχείριση αυτών των περιοχών. Ο δείκτης NBR (ως δείκτης φυτικής βιομάζας) εμφανίζει μια ξεκάθαρη μεταβολή λόγω της επίδρασης της πυρκαγιάς. Παράλληλα, η ανάλυση του ανά διαφορετική ζώνη (πυρκαγιά) δίνει τη δυνατότητα για έγκαιρη αναγνώριση "προβληματικών" περιοχών φυσικής αποκατάστασης. Η μεταβολή του δείκτη στην Ηλεία έδειξε μια σταθερή και γρήγορη αποκατάσταση των καμένων περιοχών, αν και στη νότια ζώνη (zone 2) υπάρχει μια υστέρηση σε σχέση με την βιομάζα πριν τις φωτιές, σε σχέση με τη βόρεια ζώνη (Σχήμα 5). Αυτό ίσως οφείλεται σε προβληματική φυσική αναγέννηση στις ασβεστολιθικές νότιες εκθέσεις αυτής της περιοχής, κάτι που έχει αναφερθεί και σε προγενέστερες μελέτες πρόβλεψης της αναγέννησης (Poirazidis κ.α. 2012).



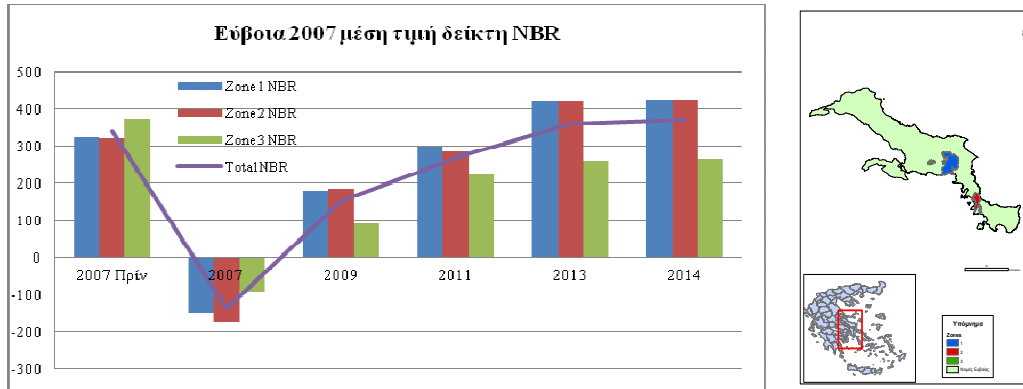
Σχήμα 5: Διαχρονική μεταβολή του δείκτη NBR στο νομό της Ηλείας
Figure 5: Temporal change of NBR index in Ilia

Στη Ζάκυνθο, η μεταβολή του δείκτη έδειξε αρχικά μια συνολική υποβάθμιση της φυτοκάλυψης μετά από τις πυρκαγιές του 2009 σε αυτές τις θέσεις, η οποία μετά από μια έντονη δραστηριότητα αναγέννησης το 2010, παρέμεινε σχετικά σταθερή τα επόμενα χρόνια. Παράλληλα, η μεταβολή του δείκτη έδειξε μια διαφορετική πορεία ανάμεσα στις τέσσερις μελετούμενες ζώνες πυρκαγιάς (Σχήμα 6). Η Ζώνη 3 (πευκοδάση Βολμίων) είχε την μεγαλύτερη κατάρπωση της φυτοκάλυψης σε σχέση με την κατάσταση πριν την πυρκαγιά, ενώ η Ζώνη 2 αν και είχε έντονη σφοδρότητα παρουσίασε την καλύτερη ανάκαμψη. Ενδιαφέρον έχει η μεταβολή της Ζώνης 1 (περιοχή Πόρτο Ρόξα) που εμφανίζεται και στο Σχήμα 3. Η χαμηλή τιμή του NBR πριν τη φωτιά υποδηλώνει το βραχώδες χαρακτήρα της περιοχής (όπου φύονταν μεμονωμένα μικρά πεύκα ανάμεσα στα βράχια) ως αποτέλεσμα προηγούμενων πυρκαγιών και η μείωση του μετά τις φωτιές δείχνει την τελική βραχοποίηση αυτών των θέσεων, κάτι που έχει αναγνωριστεί και σε άλλες μελέτες (Kefalas κ.α. 2014).



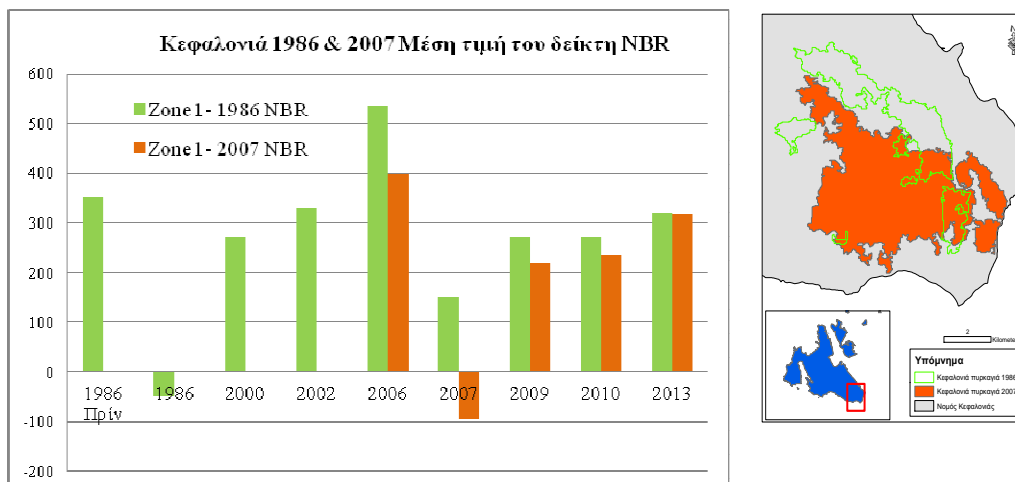
Σχήμα 6: Διαχρονική μεταβολή του δείκτη NBR στο νομό της Ζακύνθου
Figure 6: Temporal change of NBR index in Zakynthos

Η μεταπυρική εικόνα των πυρκαγιών του 2007 στην Εύβοια έδειξε μια εντυπωσιακή μεταπυρική αποκατάσταση για τις δύο μεγαλύτερες σε καμένη έκταση ζώνες (Ζώνη 1 και 2) με βελτίωση της φυτοκάλυψης σε σχέση με την εικόνα πριν τις πυρκαγιές (Σχήμα 7). Αυτό είχε φανεί και στη χωρική απεικόνιση της μεταβολής του δείκτη ΔNBR (Σχήμα 4), όπου σε πολλές εκτάσεις παρατηρήθηκε έντονη αναβλάστηση. Αντίθετα στη Ζώνη 3, παρατηρήθηκε μια μεγάλη μείωση της επανάκαμψης της καμένης περιοχής, που πιθανώς υποδηλώνει περιοχή σε τελικό στάδιο υποβάθμισης και βραχοποίησης, μετά από επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές.



Σχήμα 7: Διαχρονική μεταβολή του δείκτη NBR στο νομό της Εύβοιας
Figure 7: Temporal change of NBR index in Evia

Στην Κεφαλονιά, μελετήθηκαν δύο πυρκαγιές στην ίδια περιοχή με διαφορετική χρονική απόσταση. Η πυρκαγιά στη Ζώνη 1 έγινε το 1986, με μια αρχικά εντυπωσιακή ανάκαμψη τα επόμενα χρόνια, όπου το 2006 (μετά από 20 χρόνια) είχε σχεδόν διπλασιάσει τη φυτοκάλυψη της (Σχήμα 8). Μια επόμενη όμως γειτονική πυρκαγιά το 2007, που έκαψε και μέρος της 1ης καμένης έκτασης, είχε ως αποτέλεσμα την απότομη πτώση του δείκτη NBR στη Ζώνη 1, από το 2006 στο 2007 και μια γενικότερη υποβάθμιση του τα επόμενα χρόνια. Παράλληλα στη Ζώνη 2, παρατηρήθηκε μια γρήγορη ανάκαμψη τα πρώτα χρόνια, αλλά μια σταθεροποίηση τα επόμενα χρόνια με μικρότερη φυτοκάλυψη από ότι ήταν πριν την πυρκαγιά (Σχήμα 8).



Σχήμα 8: Διαχρονική μεταβολή του δείκτη NBR στην Κεφαλονιά.
Figure 8: Temporal change of NBR index in Kefalonia

Συζήτηση – Συμπεράσματα

Η χαρτογράφηση της καμένης έκτασης και της εκτίμησης της σφοδρότητας είναι μια σημαντική δραστηριότητα για τον μετριασμό των μετεωρικών επιπτώσεων σε οικοσυστημικές λειτουργίες (π.χ. προστασία εδαφών, βιοποικιλότητα) μέσα από τον κατάλληλο σχεδιασμό διαχειριστικών δράσεων (Mallinis κ.α. 2009). Αν και ο βαθμός της ακρίβειας ταξινόμησης των καμένων εκτάσεων διαφέρει ανάμεσα στις μέχρι τώρα εφαρμοσμένες τεχνικές (ιδιαίτερα στο ετερογενές Μεσογειακό περιβάλλον), η ακρίβεια στην αντικειμενοστραφή ταξινόμηση επηρεάζεται από το μέγεθος του αντικειμένου σε σχέση με το μέγεθος του εικονοστοιχείου, ειδικά σε εικόνες μέσης και χαμηλής ανάλυσης (Mallinis και Koutsias 2012). Παρόλα αυτά, οι Mitri και Gitas (2004) έχουν προσδιορίσει με αντικειμενοστραφή ταξινόμηση μέσης ανάλυσης εικόνες, καμένες εκτάσεις με ακρίβεια πάνω από 98%. Στην παρούσα εργασία παρουσιάσαμε μια αντικειμενοστραφή τεχνική αποτύπωσης του περιγράμματος των πυρκαγιών που είναι εύκολη και γρήγορη υλοποιήσιμη από μη ειδικούς στην τηλεπισκόπηση, που βοηθάει στην ταχεία αποτύπωση των καμένων περιοχών, για μια πρώτη εκτίμηση της κατάστασης και στη λήψη αναγκαίων διαχειριστικών δράσεων. Παράλληλα, ο NBR ως δείκτης βλάστησης - ανάμεσα σε πολλούς άλλους δείκτες - για την μεταπυρική παρακολούθηση καμένων περιοχών (ειδικά σε δασωμένες περιοχές) έχει βρεθεί να έχει την μεγαλύτερη συσχέτιση σε σχέση με την πραγματική κατάσταση (Ertling κ.α. 2005). Στη δική μας μελέτη, βρέθηκε να αποδίδει με καλό τρόπο την διαφοροποίηση της μεταπυρικής αποκατάστασης σε περιοχές με διαφορετικό βαθμό αρχικής φυτοκάλυψης και υποβάθμισης. Η διαφορετική συμπεριφορά του δείκτη ανάμεσα στις πυρκαγιές (ακόμα και στην ίδια περιοχή και χρονιά πυρκαγιάς) φαίνεται να οφείλετε στην σταδιακή υποβάθμιση δασικών περιοχών μετά από επαναλαμβανόμενες πυρκαγιές καταδεικνύοντας την αξία χρήσης του, στο σχεδιασμό των προτεραιοτήτων προστασίας και σχεδίων τεχνητής αποκατάστασης. Παγκοσμίως, λίγες χώρες έχουν εφαρμόσει επιχειρησιακά προγράμματα για τη συστηματική καταγραφή και παρακολούθηση των καμένων εκτάσεων (π.χ. Πορτογαλία, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής) είτε με οπτική ανάλυση είτε με μεθόδους ταξινόμησης (Bastarrika κ.α. 2011). Η σταδιακή ενσωμάτωση των τεχνολογιών τηλεπισκόπησης στις Δασικές Υπηρεσίες θα μπορούσε να βοηθήσει στην γρήγορη και αποτελεσματική προστασία και διαχείριση των καμένων εκτάσεων.

Ευχαριστίες

Η έρευνα αποτελεί συνέχεια του έργου που είχε υλοποιηθεί στο πλαίσιο του προγράμματος NAT-PRO (Interreg IV Ελλάδα - Ιταλία) και πολλά δεδομένα συλλέχθηκαν από τη γεωβάση του παραπάνω προγράμματος. Οι περισσότερες δορυφορικές εικόνες για την εργασία αυτή παραχωρήθηκαν δωρεάν από το διαδικτυακό ιστότοπο της U.S. Geological Society. Ευχαριστούμε την εταιρία TotalView - Innovative Technologies, για την υποστήριξη της στην παροχή δορυφορικών δεδομένων.

Abstract

Wildfires cause changes in the spread and distribution of vegetation, affecting the ecological cohesion of ecosystems and a number of ecosystem services and goods. The systematic monitoring of the burnt areas and post fire rehabilitation are essential to mitigate the impact and making the necessary management measures. This paper assesses the post-fire restoration of eleven fires from four different regions of Greece (Iliia, Evia, Zakynthos and Kefalonia) with different characteristics and severity. Presents a quick but effective technique mapping of the burnt areas and through a multi-temporal assessment of suitable vegetation indices studied their post-fire restoration. Significant differences between the different fires were observed, attributed to the gradual deterioration subsequent to repeated fires.

Βιβλιογραφία

- Bastarrika, A., Chuvieco, E., Martín, P., 2011. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment* 115: 1003–1012
- Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B., 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment* 96: 328 – 339
- Escuin, S., Navarro, R., Fernández, P., 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images, *International Journal of Remote Sensing*, 29 (4): 1053-1073

- Franks, S., Masek, J., Turner, M., 2013. Monitoring forest regrowth following large scale fire using satellite data -A case study of Yellowstone National Park, USA-. *European Journal of Remote Sensing* 46: 561-569
- Gitas, I., Mitri, G., Veraverbeke, S., Polychronaki, A., 2012. Advances in Remote Sensing of Post-Fire Vegetation Recovery Monitoring – A Review. *Remote Sensing of Biomass - Principles and Applications*: 143-176
- Gitas, I., San-Miguel-Ayanz, J., Chuvieco, E., Camia, A., 2014. Advances in remote sensing and GIS applications in support of forest fire. *International Journal of Wildland Fire* 2014, 23: 603–605
- Ireland, G., Petropoulos, G., 2015. Exploring the relationships between post-fire vegetation regeneration dynamics, topography and burn severity: A case study from the Montane Cordillera Ecozones of Western Canada. *Applied Geography* 56: 232–248
- Jia, G. J., Burke, I. C., Goetz, A. F., Kaufmann, M. R., Kindel, B. C., 2006. Assessing spatial patterns of forest fuel using AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 102(3–4): 318 - 327
- Kefalas, G., Lorilla, R., Poirazidis, K., Kalivas, D., Martinis, A., 2014. Assessing & Mapping the Risk of Desertification and its Dynamic change in the Ionian Islands, 10th International Congress of the Hellenic Geographical Society, 22-24 October 2014, Thessaloniki, Greece (book of abstracts)
- Key, C. H., Benson, N. C., 2005. Landscape assessment: Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In D. C. Lutes (Ed.), *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*. General Technical Report, RMRS-GTR-164-CD:LA1-LA51. (pp.) Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station
- Mallinis, G., Maris, F., Kalinderis, I., Koutsias, N., 2009. Assessment of post-fire soil erosion risk in fire-affected watersheds using remote sensing and GIS. *GIScience and Remote Sensing*, 46: 388–410
- Mallinis, G., Koutsias, N., 2012. Comparing ten classification methods for burned area mapping in a Mediterranean environment using Landsat TM satellite data. *International Journal of Remote Sensing* 33 (14): 4408–4433
- Mitri, G., Gitas, I., 2004. A semi-automated object-oriented model for burned area mapping in the Mediterranean region using Landsat-TM imagery. *International Journal of Wildland Fire* 13: 367–376
- Poirazidis, K., Zografou, K., Kordopatis, P., Kalivas, D., Arianoutsou, M., Kazanis, D., Korakaki, E., 2012. A GIS-based integrated approach predicts accurately post-fire Aleppo pine regeneration at regional scale. *Annals of Forest Science* 69 (4): 519-529
- Τσαγκάρη Κ., Καρέτσος, Γ., Προύτσος, Ν., 2011. Δασικές πυρκαγιές Ελλάδας, 1983-2008. Έκδ. WWF Ελλάς και ΕΘΙΑΓΕ-ΙΜΔΟ & ΤΔΠ, σελ. 112
- Χαϊδευτού, Ε., Κεφαλάς, Γ., Lorilla, R., Μαρτίνης, Α., Ποϊραζίδης, Κ., 2013. Μεταβολές στη βιοποικιλότητα δασικών οικοσυστημάτων με διαφορετική συχνότητα εμφάνισης πυρκαγιάς στη Ζάκυνθο. Πρακτικά 16ου Πανελληνίου Δασολογικού Συνεδρίου και Annual meeting of Prosilva Europe με θέμα «Προστασία – Διαχείριση των Ελληνικών Δασών σε περίοδο οικονομικής κρίσης και η πρόκληση της Φυσικής Δασοπονίας», Ελληνική Δασολογική Εταιρεία, 6-9 Οκτωβρίου 2013, Θεσσαλονίκη, 238-246.