

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ
Π.Μ.Σ. «ΓΕΩΓΡΑΦΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ - ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗ ΣΤΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΦΥΣΙΚΩΝ ΚΙΝΔΥΝΩΝ»**



Χρήση Γεωπληροφορικής για την Εκτίμηση Σφοδρότητας Πυρκαγιάς και την Ανασύσταση Πυρικού Περιβάλλοντος

Μεταπτυχιακή Διατριβή

ΓΟΥΝΑΡΙΔΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΜΥΤΙΛΗΝΗ

Σεπτέμβριος 2012

Μέλη τριμελούς επιτροπής

Καλαμποκίδης Κωνσταντίνος, Αναπληρωτής Καθηγητής (επιβλέπων)
Πετανίδου Θεοδώρα, Καθηγήτρια
Σουλακέλλης Νικόλαος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών Γεωγραφία και Εφαρμοσμένη Γεωπληροφορική – κατεύθυνση Β' Εφαρμοσμένη Γεωπληροφορική στη Διαχείριση Φυσικών Κινδύνων του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Η εκπόνησή της μου ανατέθηκε από το Εργαστήριο Φυσικών Καταστροφών του Τμήματος Γεωγραφίας με σκοπό την εκτίμηση σφοδρότητας και της ανασύστασης πυρικού περιβάλλοντος με χρήση Γεωπληροφορικής. Από το εργαστήριο παρελήφθη και όλο το κατάλληλο υλικό, όπως τεχνικά μέσα, λογισμικά και δεδομένα.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους που συνέβαλλαν ουσιαστικά, άμεσα ή έμμεσα, στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής.

Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Καλαμποκίδη Κ. για την ανάθεση της εργασίας, την υλική υποστήριξη που μου παρείχε και τη σημαντική καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Επιπλέον ευχαριστώ το φίλο και υποψήφιο διδάκτορα του Πανεπιστημίου Αιγαίου κ. Παλαιολόγου Π. για το χρόνο που μου αφιέρωσε, για τα πολύτιμα δεδομένα που μου παρείχε και για τις υποδείξεις, του οι οποίες συνέβαλαν σε μεγάλο βαθμό στην ολοκλήρωση της παρούσας διατριβής. Ευχαριστώ επίσης τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής, την Καθηγήτρια κα. Πετανίδου Θ και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σουλακέλλη Ν. για την τιμή που μου έκαναν να είναι στην επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας. Θεωρώ υποχρέωσή μου επίσης να ευχαριστήσω όλους του καθηγητές του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών του Τμήματος Γεωγραφίας για τις γνώσεις που μου μετέδωσαν και την έμμεση συμβολή τους στην εκπόνηση της παρούσας διατριβής.

Θα ήταν παράληψη να μην ευχαριστήσω θερμά τους καθηγητές μου σε προπτυχιακό επίπεδο κ. Αβτζή Ν. και κ. Ζαίμη Γ. για την έμπνευση, τις κατευθύνσεις και τις συμβουλές τους όλα αυτά τα χρόνια.

Τέλος ευχαριστώ το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών για την οικονομική ενίσχυση του Μεταπτυχιακού μου κύκλου σπουδών από το Νοέμβριο του 2010 μέχρι και την ολοκλήρωσή του.

Περίληψη

Οι δασικές πυρκαγιές ως φυσικό φαινόμενο άρρηκτα συνδεδεμένο με το Μεσογειακό περιβάλλον, αποτελούν ένα πολυσύνθετο φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται έντονα από περιβαλλοντικούς, κλιματικούς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, οι οποίοι συνδυάζονται χωροχρονικά. Οι επιπτώσεις τους στο οικοσύστημα και τον άνθρωπο είναι ποικίλες τόσο βραχυπρόθεσμα όσο και μακροπρόθεσμα. Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς είναι η σφοδρότητά της, η οποία θεωρείται θεμελιώδης παράγοντας του μεγέθους των επιπτώσεων αλλά και του ρυθμού ανάκαμψης και ανασύστασης της πληγείσας περιοχής. Με τη σημαντική εξέλιξη της γεωπληροφορικής τα τελευταία χρόνια, έχουν προταθεί μέθοδοι εκτίμησης της σφοδρότητας πυρκαγιάς, με ακριβή αποτελέσματα οι οποίες επιστρατεύονται ως επί το πλείστον για συνδυαστική προσέγγιση με επιτόπιες δειγματοληπτικές μετρήσεις. Στην παρούσα εργασία, η οποία χωρίζεται σε τρία μέρη γίνεται χρήση γεωπληροφορικής για την εκτίμηση σφοδρότητας δασικών πυρκαγιών και για την ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος. Στο πρώτο μέρος εκτιμάται η σφοδρότητα για έξι συνολικά δασικές πυρκαγιές του νομού Λέσβου με χρήση μεθόδων τηλεπισκόπησης και ΣΓΠ. Πιο συγκεκριμένα η εκτίμηση σφοδρότητας των δασικών πυρκαγιών της Λέσβου γίνεται με την εξαγωγή, από δορυφορικά δεδομένα Landsat, του δείκτη ΔNBR σε 3 μεταπυρικές περιόδους. Στην περίπτωση της πυρκαγιάς που έλαβε χώρα στο νομό Έβρου, η εκτίμηση σφοδρότητας γίνεται συνδυαστικά με επιτόπιες μετρήσεις και εξαγωγή του δείκτη CBI και με την εξαγωγή των δεικτών ΔNBR και ΔNDVI. Στη συνέχεια εξετάζεται στατιστικά η συσχέτιση των τριών δεικτών. Στο τρίτο μέρος της εργασίας εξετάζεται η ανασύσταση του πυρικού περιβάλλοντος στην καμένη το 1994 δασική περιοχή του Μεγαλοχωρίου Λέσβου. Εξετάζεται η σημερινή κατάσταση και οι τάσεις αναγέννησης του πυρικού περιβάλλοντος με μετρήσεις στο πεδίο. Παράλληλα προσομοιώνεται η πυρκαγιά με συνδυαστική χρήση των λογισμικών FARSITE και FlamMap για καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που οδήγησαν στο σημερινό αποτέλεσμα. Τα αποτελέσματα της εξαγωγής του δείκτη σφοδρότητας ΔNBR για τις 6 περιοχές της Λέσβου αποκαλύπτουν διαφορετική μεταπυρική φασματική συμπεριφορά ανάλογα

με τη σφοδρότητα της εκάστοτε πυρκαγιάς και τη μεταπυρική αναγέννηση που εμφανίζουν οι περιοχές. Στην περίπτωση της πυρκαγιάς του Έβρου οι τιμές των δεικτών ΔNBR και $\Delta NDVI$ εμφανίζουν ισχυρή θετική συσχέτιση τόσο μεταξύ τους, όσο και με τις αντίστοιχες, εξαγόμενες από το πεδίο, τιμές του δείκτη CBI. Οι επιτόπιες μετρήσεις στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου αποκαλύπτουν ένα οικοσύστημα με σαφή τάση ανασύστασης και ικανοποιητικά ποσοστά αναγέννησης. Το γεγονός αυτό εξηγείται από σημαντικούς παράγοντες αναφορικά με την πυρκαγιά, που επαληθεύουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Abstract

Forest fires, a natural phenomenon inextricably linked to the Mediterranean environment, are strongly influenced by environmental, climatic and socioeconomic factors that are combined spatio-temporally. Their effects on ecosystems and humans are diverse in both short and long term. One of the most important characteristics of wildland fire is its burn severity which is considered a fundamental factor of the magnitude of the effects and the recovery rate of the affected area. Due to recent evolutionary developments in the field of geoinformatics, several approaches utilizing remote sensing and GIS combined with in situ measurements have been proposed to accurately estimate burn severity. In this study, which is divided into three parts, geoinformatics are implemented to estimate burn severity and post fire environmental recovery. In the first part the burn severity of totally six historic forest fires occurred in Lesvos Island, is estimated implementing remote sensing and GIS methods. Particularly the widely used for burn severity assessment, NBR index, is calculated from Landsat satellite bi-temporally from pre and post fire imagery, deriving a change detection result, the ΔNBR index.

Additionally a fire occurred during the summer of 2011 in Evros prefecture is examined with a combination of the remote sensing indices ΔNBR , $\Delta NDVI$ and the in situ calculated, CBI index. The third part examines the post fire recovery of the, affected in 1994, forest ecosystem of Megalohori region, in Lesvos island. The current status of the regrowth and the regeneration trends is examined with in situ measurements.

At the same time the fire of 1994 was simulated with a combinational use of FARSITE and FlamMap software, to enhance a better understanding of the factors that led to the present status. The results of the Δ NBR index calculated for the 6 case studies of Lesvos highlight the difference of the post-fire spectral behavior that is highly attributed on the severity of each fire and the regeneration trends. In the case of Evros prefecture the values among the remote sensing derived indices Δ NBR and Δ NDVI and the in situ derived CBI, have shown strong positive correlation. The in situ measurements of Megalohori reveal satisfactory regeneration rates and clear trend to ecosystem post-fire recovery. This is explained by significant factors related to the historic fire which are verified from the simulation results.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή.....	11
2. Σκοπός της εργασίας	13
3. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας	15
3.1 Επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών	15
3.2 Ένταση και σφοδρότητα δασικών πυρκαγιών.....	16
3.3 Δείκτες εκτίμησης σφοδρότητας.....	17
3.3.1 NBR – ΔNBR.....	18
3.3.2 NDVI – ΔNDVI	19
3.3.3 CBI	20
3.3.4 Άλλοι δείκτες για την εκτίμηση σφοδρότητας.....	21
3.4 Μοντέλα καύσιμης ύλης.....	22
3.4.1 Μοντέλα καύσιμης ύλης Ευρώπης, Μεσογείου.....	24
3.5 FARSITE - FlamMap	24
4. Μεθοδολογία.....	26
4.1 Περιοχές Μελέτης.....	27
4.1.1 Εκτίμηση σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης	27
4.1.2 Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος	35
4.2 Εξαγωγή δεικτών σφοδρότητας με δορυφορικά δεδομένα	36
4.2.1 NBR – ΔNBR.....	37
4.2.2 NDVI – ΔNDVI	38
4.3 CBI.....	39
4.3.1 Έβρος	39
4.4 Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος.....	42
4.4.1 Προσομοίωση Πυρκαγιάς Μεγαλοχωρίου	42
4.4.2 Εκτίμηση ανασύστασης με δειγματοληψίες στο πεδίο	53
5. Αποτελέσματα – Συζήτηση	54
5.1 Δείκτες σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης.....	54
5.1.1 ΔNBR.....	54
5.1.2 ΔNDVI.....	59
5.2 Συσχέτιση CBI – NBR - NDVI.....	60

5.3 Προσομοίωση πυρκαγιάς Μεγαλοχωρίου	63
5.4 Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος, Μεγαλοχώρι	67
6. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	71
7. Βιβλιογραφία	78
8. Τυπολόγιο	87

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΧΑΡΤΩΝ

Χάρτης 1. Η πληγείσα περιοχή Λευκίμη στο νομό Έβρου.....	28
Χάρτης 2. Η πληγείσα περιοχή, Πασπαλάς στη νήσο Λέσβο.....	29
Χάρτης 3. Η πληγείσα περιοχή, Αμαλή στη νήσο Λέσβο.....	30
Χάρτης 4. Η πληγείσα περιοχή, Χαραμίδα στη νήσο Λέσβο.....	31
Χάρτης 5. Η πληγείσα περιοχή, Πετσοφάς στη νήσο Λέσβο.....	32
Χάρτης 6. Η πληγείσα περιοχή, Ραχώνας στη νήσο Λέσβο.....	33
Χάρτης 7. Η πληγείσα περιοχή, Νυφίδα στη νήσο Λέσβο.....	34
Χάρτης 8. Η πληγείσα περιοχή, Μεγαλοχώρι στη νήσο Λέσβο.....	35
Χάρτης 9. Περιοχές δειγματοληψίας στη Λευκίμη Έβρου για την εξαγωγή του δείκτη CBI	40
Χάρτης 10. Αρχικά αποτελέσματα μοντελοποίησης GAM, για την εξαγωγή των, προαπαιτούμενων για τις προσομοιώσεις, φυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης.....	48
Χάρτης 11. Απαιτούμενες χωρικές εισροές για την προσομοίωση της πυρκαγιάς του Μεγαλοχωρίου από το FARSITE.....	52
Χάρτης 12. Δείκτης σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης ΔNBR, για τις περιοχές της Λέσβου και του Έβρου. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ταξινομημένα σε επτά κλάσεις σφοδρότητας σύμφωνα με τους Key and Benson, 2006.....	58
Χάρτης 13. Δείκτης σφοδρότητας ΔNDVI για την πυρκαγιά της Λευκίμης Έβρου.....	60
Χάρτης 14. Χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς του Μεγαλοχωρίου, ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης με το λογισμικό FARSITE.....	65

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης.....	37
Πίνακας 2. Δελτίο καταγραφής επιπτώσεων πυρκαγιάς, για την εξαγωγή του δείκτη CBI...	41
Πίνακας 3. Χωρικά δεδομένα σε μορφή ASCII ως εισροή στο λογισμικό FARSITE.....	42
Πίνακας 4. Αντιστοιχία χρήσεων γης της περιοχής του Μεγαλοχωρίου, Λέσβου σε MKY σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης του Anderson, 1982.....	43
Πίνακας 5. Δορυφορικά δεδομένα για την ανίχνευση αλλαγών του δείκτη NDVI.....	54
Πίνακας 6. Αποτελέσματα ταξινόμησης των τιμών του ΔNBR (%)......	57

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ποσοστού κάλυψης κόμης (COVER).....	45
Σχήμα 2. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ύψους δέντρων (HEIGHT).....	46
Σχήμα 3. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ύψους έναρξης κόμης (CBH).....	46

Σχήμα 4. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ποσοστού πυκνότητας κόμης (CBD).....	47
Σχήμα 4. Μέση ημερήσια σχετική υγρασία πυρικής περιόδου	50
Σχήμα 5. Μέση ημερήσια θερμοκρασία πυρικής περιόδου.....	50
Σχήμα 6. Μέση ημερήσια διεύθυνση ανέμου πυρικής περιόδου	51
Σχήμα 7. Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου πυρικής περιόδου	51
Σχήμα 8. Διάγραμμα διασποράς για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των τιμών του CBI και του ΔNBR.....	61
Σχήμα 9. Διάγραμμα διασποράς για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των τιμών του CBI και του ΔNDVI.....	62
Σχήμα 10. Διάγραμμα διασποράς για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των τιμών του ΔNDVI και του ΔNBR.....	62
Σχήμα 11. Διάγραμμα ανίχνευσης αλλαγών σε χρονοσειρές των τιμών του δείκτη NDVI για τις 30 θέσεις δειγματοληψιών στο Μεγαλοχώρι, Λέσβου.....	70

1.Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές ως φυσικό φαινόμενο άρρηκτα συνδεδεμένο με το περιβάλλον εμφανίστηκαν πολύ πριν από τον ερχομό των ανθρώπων, τη δομή των τοπίων και εν τέλει διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στη σύνθεση των ειδών και των οικοσυστημάτων. Θεωρούνται ένα πολυσύνθετο φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται έντονα από περιβαλλοντικούς, κλιματικούς αλλά και από κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, οι οποίοι συνδυάζονται χωρο-χρονικά (Καλαμποκίδης και Κούτσιας, 2000; Kalabokidis et al., 2002). Η φωτιά αποτελεί αναπόσπαστο κομμάτι πολλών οικοσυστημάτων, συμπεριλαμβανομένων και των Μεσογειακών. Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά που κάνουν τα Μεσογειακά οικοσυστήματα να διαφέρουν από αυτά της υπόλοιπης Ευρώπης. Οι πυρκαγιές στα Μεσογειακά δάση τείνουν να εμφανίζονται του θερινούς μήνες, όπου και συνδυάζονται υψηλές θερμοκρασίες, χαμηλή συχνότητα βροχοπτώσεων και χαμηλή σχετική υγρασία αέρα. Οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με την εξαιρετικά χαμηλή διαθεσιμότητα νερού, προκαλούν ταχεία αποξήρανση, τόσο στα ποώδη φυτά του υπορόφου των οικοσυστημάτων, όσο και στις δομές των πολυετών θάμνων και δέντρων. Τα είδη αποβάλλουν μαζικά φύλλα και κλαδιά, τα οποία μαζί με τα νεκρά ποώδη φυτά συγκροτούν έναν ιδιαίτερα εύφλεκτο χλοοτάπητα. Τα ίδια φυτά εξάλλου παράγουν ουσίες που τα καθιστούν ιδιαίτερα εύφλεκτα, όπως ρητίνη και αιθέρια έλαια (Awada et al., 2003).

Στην Ελλάδα, η οποία θεωρείται κατ' εξοχήν πυριγενής χώρα, το 90% της έκτασης που καίγεται κάθε χρόνο αντιστοιχεί σε Μεσογειακά οικοσυστήματα εκ των οποίων 24% είναι πευκοδάση και 66% φρύγανα και μακία βλάστηση (Agiannoutsou, 1998).

Άρρηκτα συνδεδεμένο με το είδος, την πυκνότητα και τη χωρική διάταξη της καύσιμης ύλης είναι και το είδος των δασικών πυρκαγιών. Έτσι οι δασικές πυρκαγιές διακρίνονται σε α) Πυρκαγιές εδάφους κατά τις οποίες καίγεται η οργανική ύλη κάτω από την επιφάνεια του δασικού φυλλοστρώματος. β) Πυρκαγιές επιφάνειας ή έρπουσες κατά τις οποίες καίγεται ο ξηροτάπητας και η χαμηλή βλάστηση. Χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι η υψηλή ταχύτητα διάδοσης και συχνά αποτελούν τον προθάλαμο για τις επικόρυφες πυρκαγιές γ) Πυρκαγιές κόμης ή

επικόρυφες οι οποίες καίνε την κόμη των δέντρων και των θάμνων. Είναι συνήθως μεγάλης έντασης και επικινδυνότητας εφόσον αναπτύσσονται ταχύτατα. Τέλος η τελευταία κατηγορία δ) αφορά τις μικτές πυρκαγιές κατά τη διάρκεια των οποίων συνυπάρχουν δυο ή και περισσότερα είδη των προαναφερθέντων περιπτώσεων. Οι μικτές πυρκαγιές χαρακτηρίζονται και από τη μεγαλύτερη επικινδυνότητα λόγω της απρόβλεπτης συμπεριφοράς τους και της υψηλής έντασης που παρουσιάζουν (Alvarez et al., 2011).

Διάφορες μεθοδολογίες έχουν προταθεί όλα αυτά τα χρόνια για την εκτίμηση και τη χαρτογράφηση της σφοδρότητας και κατ'επέκταση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς. Οι δυο βασικές κατηγορίες χωρίζουν τις μεθόδους σε αυτές που περιλαμβάνουν μετρήσεις πεδίου και σε αυτές που χρησιμοποιούν τηλεπισκοπικές προσεγγίσεις και εργαλεία γεωπληροφορικής. Η πρώτη προσέγγιση ανήκει στις λεγόμενες παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης σφοδρότητας ή μεταπυρικής αναγέννησης και εμφανίζει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα. Υπερέχει σε ακρίβεια καθώς βασίζεται στη φυσική επαφή και την άμεση επιτόπια εκτίμηση των μεταπυρικών επιπτώσεων, αλλά όπως είναι φυσικό απαιτεί χρόνο, ανθρώπινο δυναμικό, όργανα μέτρησης και εμπειρία. Επίσης περιορίζεται αισθητά σε περιπτώσεις που η πληγείσα περιοχή χαρακτηρίζεται από σύνθετη βλάστηση και έντονες κλίσεις κάτι που καθιστά την προσβασιμότητα δύσκολη έως αδύνατη.

Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους βασιζόμενες στην τεχνολογία και πιο συγκεκριμένα αναλυτικές προσεγγίσεις χρησιμοποιώντας Τηλεπισκόπηση σε συνδυασμό με τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), συστήματα μοντελοποίησης και προσομοίωσης της πυρκαγιάς και μια σειρά από δείκτες. Η Τηλεπισκόπηση έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την εκτίμηση σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης (French et al., 2008). Ορίζεται ως η ανάλυση και ερμηνεία των μετρήσεων της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που αντανακλάται ή που εκπέμπεται από ένα στόχο και παρατηρείται ή καταγράφεται από έναν παρατηρητή ή μέσο χωρίς να υπάρχει επαφή με το στόχο (Mather, 2004). Οι τηλεπισκοπικές προσεγγίσεις περιλαμβάνουν α) φωτοερμηνεία αεροφωτογραφίας αμέσως μετά την πυρκαγιά β) φωτοερμηνεία αεροφωτογραφιών μιας σειράς ετών πριν και μετά την πυρκαγιά και γ) ψηφιακή ανίχνευση αλλαγών από δορυφορικά δεδομένα (Brewer et

al., 2005). Η τελευταία εκδοχή παρέχει μια μεγάλη γκάμα μεθόδων οι οποίες συνεχώς εξελίσσονται και πληθαίνουν τις τελευταίες δεκαετίες.

Σύγχρονοι αισθητήρες παρέχουν όλο και περισσότερες πληροφορίες σε πολύ ικανοποιητική χωρο-χρονική κάλυψη. Οι αισθητήρες κατηγοριοποιούνται σε ενεργούς, δηλαδή εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ενέργεια καταγράφοντας την απόκριση των αντικειμένων και σε παθητικούς οι οποίοι περιορίζονται στην ανάκτηση ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας από τα αντικείμενα, η οποία προέρχεται από μια εξωτερική πηγή όπως ο ήλιος (Mather, 2004). Η φωτιά επιφέρει μια σειρά από αλλαγές στη φασματική απόκριση των οικοσυστημάτων, γεγονός που οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην αλλαγή της πυκνότητας και της κατάστασης της βλάστησης και κατά συνέπεια στη μείωση των επιπέδων χλωροφύλλης και στις αλλαγές της υπέργεια και υπόγεια υγρασίας και θερμότητας (White et al., 1996; Escuin et al., 2008). Οι επιπτώσεις αυτές ανακλώνται ως αλλαγές στη φασματική απόκριση των αντικειμένων που καταγράφονται από τους δορυφορικούς αισθητήρες. Για όλους αυτούς τους λόγους, η τηλεπισκόπηση αποτελεί ένα πολύτιμο εργαλείο για την χαρτογράφηση των καμένων περιοχών και για την εκτίμηση της σφοδρότητας και της μεταπυρικής αναγέννησης.

2. Σκοπός της εργασίας

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν μέθοδοι γεωπληροφορικής για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και για την ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος. Τα ερωτήματα εργασίας είναι: 1. Είναι εφικτή η ακριβής εκτίμηση σφοδρότητας και επιπτώσεων της πυρκαγιάς με τη χρήση δεικτών τηλεπισκόπησης, οι οποίοι χρησιμοποιούν την ανίχνευση αλλαγών στη βλάστηση, πριν και μετά την πυρκαγιά. 2. Οι δείκτες που βασίζονται στις αλλαγές των τιμών του υπέρυθρου φάσματος ειδικεύονται στο να ανιχνεύουν με ακρίβεια τις αλλαγές στην κατάσταση της βλάστησης. Κατά συνέπεια υπολογίζοντας συγκεκριμένους δείκτες σε πολλαπλά μεταπυρικά έτη, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με την μεταπυρική αναγέννηση. 3. Οι εξαγόμενοι με μεθόδους τηλεπισκόπησης δείκτες παρουσιάζουν ισχυρή θετική συσχέτιση με τους προτεινόμενους δείκτες επίγειων οπτικών εκτιμήσεων και είναι σε θέση να τους αντικαταστήσουν σε περιπτώσεις μειωμένων

πόρων και δύσκολης προσβασιμότητας, με αποδεκτή ακρίβεια. 4. Τα επίπεδα μεταπυρικής αναγέννησης εξαρτώνται από πλήθος οικολογικών, τοπογραφικών και κλιματικών παραγόντων. Εξαρτώνται όμως πρώτιστα σε μεγάλο βαθμό και από το είδος, τη σφοδρότητα και τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς.

Η εργασία χωρίζεται σε τρία μέρη. Στο πρώτο μέρος εκτιμάται η σφοδρότητα πυρκαγιάς σε έξι πληγείσες περιοχές της νήσου Λέσβου με τη χρήση δορυφορικής τηλεπισκόπησης για την εξαγωγή του διαδεδωμένου δείκτη ΔNBR. Δεδομένα Landsat χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό των δεικτών λόγω της αποδεκτής, για το σκοπό της εργασίας, διακριτικής ικανότητας που παρέχουν (30 m), της μεγάλης χωρικής διακριτικής ικανότητας (πλήρη κάλυψη) και της διαθεσιμότητας τους. Η ανάλυση περιελάμβανε την εξαγωγή του δείκτη σε 3 μεταπυρικές περιόδους (αμέσως μετά, 1 χρόνο μετά και 2 χρόνια μετά την πυρκαγιά).

Στο δεύτερο μέρος εκτιμάται η σφοδρότητα της πυρκαγιάς του 2011 στην περιοχή της Λευκίμης, Έβρου. Η εκτίμηση έγινε με την εξαγωγή δεικτών που προήλθαν από μετρήσεις πεδίου (δείκτης CBI) και από μεθόδους τηλεπισκόπησης με δορυφορικά δεδομένα Landsat (δείκτες ΔNBR και ΔNDVI). Στη συνέχεια εξετάζεται ο βαθμός συσχέτισής τους με στατιστικές μεθόδους.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος εξετάζεται η περίπτωση της μεγάλης πυρκαγιάς που έπληξε το 1994 το Μεγαλοχώρι Λέσβου. Εξετάζεται η μεταπυρική αναγέννηση μετά από 18 χρόνια, με μετρήσεις πεδίου. Αναλύονται οι συνθήκες και οι παράγοντες που οδήγησαν στη σημερινή κατάσταση, καθώς και οι προ πυρκαγιάς επικρατούσες συνθήκες. Έπειτα, προσομοιώθηκε η πυρκαγιά με πλήρη αναπαράσταση των κλιματικών και περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούσαν κατά τη διάρκεια της για την καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που οδήγησαν στο σημερινό αποτέλεσμα.

Χρήσιμα συμπεράσματα προέκυψαν ως προς την συνεισφορά των μεθόδων γεωπληροφορικής για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης συγκριτικά με της παραδοσιακές μεθόδους πεδίου. Αναλύθηκαν τα όποια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα προέκυψαν για την κάθε προσέγγιση υπογραμμίζοντας και τα όποια προβλήματα προέκυψαν.

Τέλος οι προσομοιώσεις οδήγησαν σε συμπεράσματα αναφορικά με τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν μακροπρόθεσμα την μεταπυρική αναγέννηση και κατ'επέκταση την ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος.

3. Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

3.1 Επιπτώσεις δασικών πυρκαγιών

Μια σύντομη ανασκόπηση στη διεθνή βιβλιογραφία αποκαλύπτει την πληθώρα περιβαλλοντικών και οικολογικών επιπτώσεων που προκαλούν οι πυρκαγιές στα δασικά οικοσυστήματα. Από τις κατηγορίες των επιπτώσεων φυσικά δεν λείπουν και οι άμεσες οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις με την τελευταία κατηγορία να περιλαμβάνει δυστυχώς και ανθρώπινες απώλειες (Fowler, 2003).

Αναφορικά με τις άμεσες και έμμεσες επιρροές της πυρκαγιάς στη οικολογία των οικοσυστημάτων, ένας μεγάλος αριθμός ερευνών έχει τελεσθεί αποσαφηνίζοντας την φύση, την πολυπλοκότητα και το μέγεθος των αρνητικών αλλά και των θετικών επιπτώσεων. Οι πολύπλοκες λοιπόν αλληλεπιδράσεις μεταξύ της φωτιάς και του οικοσυστήματος κατηγοριοποιούνται ως πρωτογενείς και δευτερογενείς. Στις πρωτογενείς συγκαταλέγονται οι άμεσες επιπτώσεις που προέρχονται από την καύση ενώ οι δευτερογενείς αναφέρονται στις έμμεσες συνέπειες που προκαλούνται σε ένα οικοσύστημα ως αποτέλεσμα διαφόρων παραγόντων που ως επί το πλείστον προέρχονται από την πυρκαγιά (Key, 2006). Οι κυριότερες πρωτογενείς επιπτώσεις της καύσης σε ένα δασικό οικοσύστημα είναι η άμεση απώλεια βλάστησης και βιομάζας (Doerr et al., 2006; García-Haro et al., 2001; Lewis et al., 2006; Salgado et al., 2004), η θανάτωση ειδών άγριας πανίδας (Smith, 2000), η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου (Andreae & Merlet, 2001; Nagahamaa & Suzuki, 2007; Narayan et al., 2007) και η υπερθέρμανση και καταστροφή βασικών συστατικών και λειτουργιών του εδάφους (DeBano et al., 1998; Knoepp et al., 2005; Neary et al., 2005).

Κατά συνέπεια των προαναφερθέντων, οι μεταπυρικές επιπτώσεις, δηλαδή οι δευτερογενείς, των δασικών πυρκαγιών είναι οι δραστικές ανακατατάξεις στην οριζόντια και κατακόρυφη διάρθρωση του οικοσυστήματος (Taylor, 2000), οι σοβαρές αρνητικές επιπτώσεις στα ενδιαίτηματα της άγριας ζωής (Romme and

Knigh, 1981), στον υδρολογικό κύκλο (Johnstone and Kasischke, 2005) και στην επιφανειακή διάβρωση (DeBano et al., 1998; Robichaud et al., 2007).

Φυσικά δε λείπουν και οι μελέτες που αποκαλύπτουν τις θετικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς στο οικοσύστημα. Χαρακτηριστική είναι η έρευνα των Keane et al., 2008 στην οποία αναφέρεται μεταξύ άλλων ο ρόλος της πυρκαγιάς στην μακροχρόνια βελτίωση της υγείας και της ετερογένειας του καμένου οικοσυστήματος, στη αποσυμφόρηση πλεονάζουσας βιομάζας κάτι που αυτόματα καθιστά το οικοσύστημα λιγότερο επικίνδυνο για νέα πυρκαγιά, στην ανάπτυξη μηχανισμών ανθεκτικότητας της χλωρίδας και τέλος στην αναζωογονητική αναδιάρθρωση της οριζόντιας και κατακόρυφης διάταξης του οικοσυστήματος.

3.2 Ένταση και σφοδρότητα δασικών πυρκαγιών

Θεμελιώδεις πληροφορίες για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς στο οικοσύστημα είναι η ένταση καύσης και η σφοδρότητα της. Οι όροι ένταση πυρκαγιάς, σφοδρότητα πυρκαγιάς και σφοδρότητα καύσης έχουν συζητηθεί αρκετά στο παρελθόν ενώ συχνά παρατηρείται σύγχυση μεταξύ των όρων από την επιστημονική κοινότητα (Jain et al., 2004; Lentile et al., 2006). Μια πρόσφατη έρευνα του Keeley, 2009 σκιαγραφεί τους τρεις αυτούς όρους, υπογραμμίζοντας την ιδιότητα και τις διαφορές τους. Σύμφωνα λοιπόν με τον Keeley, 2009 ο όρος ένταση πυρκαγιάς (fire intensity) αναφέρεται στη φυσική διεργασία παραγωγής ενέργειας από την καύση της ανόργανης ύλης. Ορίζεται ως η παραγόμενη ενέργεια ανά μονάδα όγκου καύσιμης ύλης επί την ταχύτητα παραγωγής της. Με άλλα λόγια ο όρος αντιπροσωπεύει την ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια διαφόρων φάσεων της πυρκαγιάς, από την έναρξή ως και τη λήξη της. Ως σφοδρότητα πυρκαγιάς (fire severity), ορίζεται ο βαθμός περιβαλλοντικών αλλαγών τις οποίες προκάλεσε η πυρκαγιά. Πιο συγκεκριμένα η σφοδρότητα της πυρκαγιάς είναι μια μέτρηση για το μέγεθος των απωλειών στη βιομάζα και τη θνησιμότητα των δέντρων και τη μετατροπή τους σε στάχτη, αναφερόμενη στις βραχυπρόθεσμες φυσικές, χημικές και οικολογικές αλλαγές που προκλήθηκαν από την πυρκαγιά. Όπως είναι φυσικό, σχετίζεται άμεσα με την ένταση πυρκαγιάς.

Τέλος η ένταση καύσης (burn severity) αναφέρεται τόσο βραχυπρόθεσμα, όσο και μακροπρόθεσμα στις συνολικές επιπτώσεις της πυρκαγιάς στην οριζόντια και κατακόρυφη διάρθρωση του οικοσυστήματος, στη σύσταση του εδάφους και του αέρα.

Όπως χαρακτηριστικά αναφέρουν οι Key and Benson 2006, η σφοδρότητας καύσης δεν είναι μετρήσιμη, αλλά μια υποκειμενική εκτίμηση που βασίζεται στη κρίση του ερευνητή. Επίσης λόγω της αναγέννησης και της διαδοχής των ειδών σε ένα μεταπυρικό περιβάλλον, η εκτίμηση της σφοδρότητας αποκτά έναν δυναμικό χαρακτήρα και εκτιμάται σε διάφορα στάδια. Οι πληροφορίες που παρέχονται με την εκτίμηση της σφοδρότητας εξυπηρετούν πολλαπλούς σκοπούς των δασικών υπηρεσιών. Αφενός καταγράφονται οι επιπτώσεις που προκλήθηκαν από την πυρκαγιά, αφετέρου χρησιμεύουν για το σχεδιασμό και την παρακολούθηση της ανασύστασης του περιβάλλοντος. Επίσης οι εκτιμήσεις αυτές χρησιμεύουν για την αναδιάρθρωση και την αναβάθμιση των ήδη υπάρχοντων χαρτών βλάστησης και αποτελούν τη βασική πληροφορία για τις στρατηγικές αποκατάστασης (Brewer et al., 2005).

3.3 Δείκτες εκτίμησης σφοδρότητας

Όπως προαναφέρθηκε στην εισαγωγή, η φωτιά επιφέρει μια σειρά αλλαγών στη φασματική απόκριση του οικοσυστήματος. Η πυκνότητα της βλάστησης μειώνεται δραματικά, η κομοστέγη εμφανίζει κενά, μειώνεται η εξατμισοδιαπνοή και κατ' επέκταση η υγρασία, αυξάνεται η θερμότητα του εδάφους και αλλοιώνεται η σύσταση του χώματος με την παρουσία τέφρας και τη μείωση της υπέργειας και υπόγειας βιομάζας. Οι επιπτώσεις αυτές έχει αποδειχθεί πως ανιχνεύονται μέσω των αλλαγών στη φασματική απόκριση των οικοσυστημάτων αμέσως μετά τη φωτιά (White et al., 1996; Escuin et al., 2008). Πιο συγκεκριμένα η μείωση των επιπέδων χλωροφύλλης οδηγεί σε μειωμένη ανακλαστικότητα των επιφανειών στο εγγύς υπέρυθρο ενώ η μείωση της υγρασίας ανακλάται με μια αύξηση των τιμών που καταγράφονται στο μέσο υπέρυθρο. Οι διαφορές στις τιμές πριν και μετά την πυρκαγιά όπως καταγράφονται από τους ανάλογους διαύλους (bands) του αισθητήρα, οδηγούν σε εξαγωγή δεικτών αναφορικά με τη σφοδρότητα της πυρκαγιάς.

3.3.1 NBR – ΔNBR

Ο Normalized Burn Ratio (NBR) ο οποίος προτάθηκε από τους Key and Benson, 1999, είναι ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς με δεδομένα Landsat. Ο δείκτης υπολογίζει τις κανονικοποιημένες διαφορές μεταξύ των διαύλων 4 και 7, στους αισθητήρες Thematic Mapper (TM) και Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) του Landsat και αποδίδεται ως εξής:

$$NBR = \frac{R_{NIR} - R_{SWIR}}{R_{NIR} + R_{SWIR}} \quad (1)$$

Όπου R οι τιμές ανάκλασης του εκάστοτε δίαυλου, μετά από ατμοσφαιρική διόρθωση. Ο δίαυλος 4 καταγράφει το εγγύς υπέρυθρο (Near Infra-Red - NIR) με μήκος κύματος 0,76 - 0,90 μm, ενώ ο δίαυλος 7 το μέσο υπέρυθρο (Short Wavelength Infra-Red - SWIR) με μήκος κύματος 2,08 - 2,35 μm. Ο δείκτης λαμβάνει τιμές εύρους -1 για χαμηλή σφοδρότητα έως +1 για υψηλή.

Ο differenced Normalized Burn Ratio (ΔNBR) υπολογίζει τις απόλυτες διαφορές στις τιμές του NBR πριν και μετά την πυρκαγιά και υπολογίζεται ως εξής:

$$\Delta NBR = NBR_{pre\ fire} - NBR_{post\ fire} \quad (2)$$

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές εύρους -2 έως +2 για χαμηλή και υψηλή σφοδρότητα αντίστοιχα (Key and Benson 2005).

Οι French et al., 2008 σε μια λεπτομερή βιβλιογραφική αναφορά, βρήκαν πάνω από 40 μελέτες οι οποίες χρησιμοποίησαν τον NBR ή τον ΔNBR για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης σε διάφορα οικοσυστήματα συμπεριλαμβανομένου και του Μεσογειακού (Lopez-Garcia and Caselles 1991; Diaz-Delgado et al., 2003; Ruiz-Gallardo et al., 2004; Roldan-Zamarron et al., 2006; Gonzalez-Alonso et al., 2007). Το συμπέρασμα που προκύπτει από τις πολλαπλές προσεγγίσεις είναι το ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες παρέχουν ακριβείς πληροφορίες μόνο για δασικά οικοσυστήματα κυρίως λόγω της ευαισθησίας των καναλιών του υπέρυθρου που χρησιμοποιούν.

Επίσης τα αποτελέσματα διαφέρουν ανά τύπο δασικού οικοσυστήματος. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν αναφερθεί και διάφορες παραλλαγές ή βελτιώσεις του δείκτη με κυριότερη αυτή της σχετικής τιμής των αλλαγών που προκάλεσε η πυρκαγιά (Relative delta Normalized Burn Ratio - RΔNBR) η οποία εμφανίζει καλύτερη συσχέτιση με τη σφοδρότητα πυρκαγιάς σε οικοσυστήματα με αραιότερη βλάστηση (Miller and Thode, 2007), καθώς λαμβάνει υπ όψη μεταξύ άλλων και το ποσοστό κάλυψης κόμης.

3.3.2 NDVI – ΔNDVI

Ο πιο ευρέως χρησιμοποιούμενος δείκτης βλάστησης είναι ο Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Ο δείκτης συνδυάζει τις τιμές ανακλαστικότητας στο ερυθρό ορατό (Red) κανάλι με μήκος κύματος 0,63 – 0,69 μm και στο υπέρυθρο (NIR) (Tucker, 1979). Υπολογίζεται ως εξής:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές εύρους -1 για περιοχές που δεν εμφανίζουν καθόλου βλάστηση έως +1 για περιοχές με μεγάλη πυκνότητα βλάστησης. Η ανίχνευση αλλαγών πριν και μετά την πυρκαγιά υπολογίζονται ως:

$$\Delta NDVI = NDVI_{pre\ fire} - NDVI_{post\ fire} \quad (4)$$

Ο δείκτης λαμβάνει τιμές εύρους -2 έως +2 για χαμηλή και υψηλή σφοδρότητα αντίστοιχα. Εξ αιτίας της ιδιότητας του να δίνει πληροφορίες για την υγεία, την ετερογένεια και την πυκνότητα της βλάστησης έχει χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα για την καταγραφή των αλλαγών σε πληγείσες από πυρκαγιά περιοχές. Ενδεικτικά αναφέρονται προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν τον ΔNDVI συνδυαστικά με τον ΔNBR (Rogan and Yool 2001; Miller & Yool, 2002; Cocke et al., 2005; Epting et al., 2005; Escuin et al., 2008) αλλά και με επιτόπιες μετρήσεις (Chafer et al., 2004; Hammill & Bradstock, 2006; De Santis and Chuvieco, 2007) σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης.

3.3.3 CBI

Αρκετές μέθοδοι έχουν προταθεί για την εκτίμηση της σφοδρότητας και της μεταπυρικής αναγέννησης μέσω αξιολογήσεων στο πεδίο χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών σχετικά με την απώλεια βλάστησης και βιομάζας αλλά και το εύρος των αλλαγών στο έδαφος. Λόγω της υποκειμενικότητας των εκτιμήσεων και τη σύγχυση που προκάλεσε ο μεγάλος αριθμός μεθόδων, θεωρήθηκε σκόπιμο από τους Key and Benson, 2005 να προτείνουν έναν αποδεκτό δείκτη σφοδρότητας πυρκαγιάς με εκτιμήσεις πεδίου. Ο Composite Burn Index (CBI) αναπτύχθηκε σε επιχειρησιακό επίπεδο για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς στις ΗΠΑ, στα πλαίσια του προγράμματος FIREMON (Fire Effects Monitoring and Inventory Protocol). Είναι σχεδιασμένος για την εκτίμηση των επιπτώσεων από οικολογική σκοπιά και αποδίδει καλύτερα σε δασικά οικοσυστήματα, όπως και οι προαναφερθέντες ψηφιακοί δείκτες, παρά σε λιβαδικά ή σε άλλα οικοσυστήματα. Περιλαμβάνει οπτικές μετρήσεις της κατάστασης της βλάστησης και του εδάφους σε δειγματοληπτικές επιφάνειες οι οποίες βαθμολογούνται με ένα εύρος τιμών από το 0 έως το 3 που αντιστοιχεί σε υψηλή σφοδρότητα. Για την εξαγωγή του δείκτη σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια 23 βιοφυσικές μεταβλητές, ταξινομημένες σε 5 κλάσεις (όσες και οι όροφοι βλάστησης ενός δασικού οικοσυστήματος), βαθμολογούνται σχετικά με τις επιπτώσεις που αποκόμισαν από την πυρκαγιά.

Πλήθος μελετών έχει χρησιμοποιήσει τον CBI για την εκτίμηση σφοδρότητας τόσο βραχυπρόθεσμα (μέχρι και ένα έτος μετά τη φωτιά) όσο και μακροπρόθεσμα για την εκτίμηση της μεταπυρικής αναγέννησης. Ο δείκτης σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε συνδυαστικά με τους προαναφερθέντες ψηφιακούς δείκτες (Cocke et al., 2005; Epting et al., 2005; De Santis and Chuvieco 2007; Hall et al., 2008; Alvarez et al., 2011) με τους οποίους παρουσίασε ισχυρή θετική συσχέτιση.

Τέλος οι De Santis et al., 2009 παρουσίασαν μια εξελιγμένη μορφή του δείκτη τον GeoCBI ο οποίος μεταξύ άλλων λαμβάνει υπ όψη και το ποσοστό κάλυψης για κάθε στρώμα (όροφο) βλάστησης, στις δειγματοληπτικές επιφάνειες, βελτιώνοντας έτσι τη συσχέτιση με τους δείκτες που προκύπτουν από τηλεπισκόπηση.

3.3.4 Άλλοι δείκτες για την εκτίμηση σφοδρότητας

Κατά καιρούς στη βιβλιογραφία παρουσιάστηκαν προσεγγίσεις οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση της σφοδρότητας πυρκαγιάς και του μεγέθους των αλλαγών που προκάλεσε. Οι προσεγγίσεις αυτές περιλαμβάνουν μια σειρά δεικτών που υπολογίστηκαν με μεθόδους τηλεπισκόπησης όπως ο Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) και η τροποποιημένη εκδοχή του Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) οι οποίοι ανιχνεύουν τις αλλαγές στην κατάσταση της βλάστησης και του χόματος πριν και μετά την πυρκαγιά (Rogan and Yool, 2001; Chuvieco et al., 2002; Epting et al., 2005). Οι συγκεκριμένοι δείκτες εμφανίζουν πολύ καλά αποτελέσματα σε περιοχές με αραιή βλάστηση. Άλλοι ενδιαφέροντες δείκτες για την εκτίμηση σφοδρότητας και μεταπυρκαγιάς αναγέννησης είναι οι Burnt Area Index (BAI) (Chuvieco et al., 2002), Global Environmental Index (GEMI) (Periera, 1999; Chuvieco et al., 2002), Normalized Difference Moisture Index (NDMI) (Wilson and Sader, 2002) και Leaf Area Index (LAI) ο οποίος υπολογίζει την πυκνότητα φυλλώματος ανά μονάδα έκτασης (Ceccato et al., 2002).

Επίσης δε λείπουν και οι εκδοχές όπου χρησιμοποιούνται μονοί διάυλοι ή και απλές αναλογίες ζευγαριών κυρίως του υπέρυθρου φάσματος ως δείκτες, καθώς είναι γνωστή η ευαισθησία του συγκεκριμένου καναλιού στις αλλαγές που προκαλεί η φωτιά. Πιο συγκεκριμένα οι Kushla and Ripple (1998) βρήκαν ότι η αναλογία 4/5 στους διαύλους του Landsat παρέχει ακριβή πληροφορία σχετικά με τις αλλαγές στην κάλυψη κόμης. Αντίστοιχα οι Chafer et al., 2004 απέδειξαν ότι μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της αναλογίας 7/4 πριν και μετά την πυρκαγιά παρέχει ακριβή πληροφορία σχετικά με τις επιπτώσεις της. Οι προσεγγίσεις που χρησιμοποίησαν μονούς διαύλους για την ανίχνευση επιπτώσεων της πυρκαγιάς, επικεντρώθηκαν κυρίως στους διαύλους 4, 5 και 7 οι οποίοι χρησιμοποιούνται και για την εξαγωγή των περισσότερων δεικτών, ενώ παράλληλα δεν σχετίζονται μεταξύ τους (Epting et al., 2005; Koutsias and Karteris, 1998).

Τέλος δε λείπουν οι προσεγγίσεις οι οποίες χρησιμοποιούν την μέθοδο Kauth-Thomas Tasseled Cap transformation (TC) (Epting et al., 2005) σύμφωνα με την οποία καταγράφονται οι τιμές φωτεινότητας (Brightness - TC 1) χλωροφύλλης (Greenness - TC 2) και υγρασίας (Wetness - TC 3).

Τέλος οι (Patterson and Yool 1998; Rogan and Yool, 2001; Brewer et al., 2005; Epting et al., 2005) χρησιμοποίησαν τη μέθοδο Ανάλυση Κύριων Συνιστωσών (Principal Components Analysis - PCA) κατά την οποία η πληροφορία που εμπεριέχεται σε μια πολυφασματική εικόνα διασπάται και απομονώνεται σε συνιστώσες. Μελέτες έχουν δείξει ότι η δεύτερη συνιστώσα παρέχει πληροφορία ικανή για τη χαρτογράφηση σφοδρότητας πυρκαγιάς.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων εξετάστηκε η συσχέτιση των προαναφερθέντων δεικτών με εκτιμήσεις πεδίου (CBI). Τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων εμφανίζονται ικανοποιητικά, αλλά ποτέ δεν αγγίζουν τις υψηλές τιμές συσχέτισης των NBR και NDVI στα δασικά οικοσυστήματα.

3.4 Μοντέλα καύσιμης ύλης

Για τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών θεωρείται προαπαιτούμενη η ακριβής γνώση των συνθηκών που επικρατούν αναφορικά με την διαθέσιμα καύσιμα, δεδομένου ότι αποτελεί βασικό συστατικό για την ανάφλεξη, την ταχύτητα και την εξάπλωση της φωτιάς (Chuvieco et al., 2004). Ως καύσιμα ορίζονται αναφορικά με τις φυσικές τους ιδιότητες όλα τα ζωντανά ή νεκρά συστατικά που απαρτίζουν τη βιομάζα του οικοσυστήματος και μετρώνται ως φορτίο (βάρος /μονάδα έκτασης), μέγεθος (διάμετρος) και πυκνότητα (βάρος /μονάδα όγκου) (Burgan et al., 1998; Andrews and Queen, 2001). Επειδή η περιγραφή και η εκτίμηση των φυσικών χαρακτηριστικών όλων των καυσίμων που περιέχει μια περιοχή είναι δύσκολη έως αδύνατη, οι ιδιότητες τους αναφορικά με τον κίνδυνο ανάφλεξης και διάδοσης της πυρκαγιάς βασίζεται σε ταξινομημένες μεγάλες ομάδες βλάστησης. Αυτές οι ομάδες που κατά κανόνα εμφανίζουν διαφορετικές ιδιότητες αναφορικά με την ανάφλεξη και τη διάδοση της πυρκαγιάς ονομάζονται τύποι καυσίμου. Πιο συγκεκριμένα, ως τύπος καυσίμου έχει οριστεί από τους Merrill and Alexander, 1987 ως "μια αναγνωρίσιμη ομάδα καυσίμων, διακριτών ειδών βλάστησης, μορφής, μεγέθους και συνοχής που παρουσιάζουν χαρακτηριστική συμπεριφορά της φωτιάς κάτω από καθορισμένες συνθήκες καψίματος". Στη βιβλιογραφία συχνά χρησιμοποιείται ο όρος μοντέλο πυρκαγιάς και περιγράφει τις μαθηματικές σχέσεις που περιγράφουν τα χαρακτηριστικά της φωτιάς.

Τα μοντέλα πυρκαγιάς επίσης συχνά αντιπροσωπεύονται από τους όρους μοντέλο συμπεριφοράς της πυρκαγιάς ή μοντέλο επιπτώσεων πυρκαγιάς. Σύμφωνα με τους Andrews and Queen (2001) τα μοντέλα καύσιμης ύλης (MKY) είναι οι προαπαιτούμενες ομάδες παραμέτρων για τη σύσταση ενός μοντέλου φωτιάς. Με άλλα λόγια τα μοντέλα πυρκαγιάς είναι μαθηματικές παραστάσεις ενώ τα μοντέλα καύσιμης ύλης είναι οι εισροές που τα χαρακτηρίζουν. Κατά συνέπεια τα μοντέλα καύσιμης ύλης είναι η αριθμητική αναπαράσταση των φυσικών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν κάθε τύπο καυσίμου. Η επιστήμη που μελετά τις δασικές πυρκαγιές έχει προτείνει διάφορα πιλοτικά συστήματα ταξινόμησης όλα αυτά τα χρόνια. Η αρχή έγινε με την ταξινόμηση που συστήθηκε από τους Deeming et al. 1972 προτείνοντας αρχικά 9 τύπους καύσιμης ύλης, οι οποίοι στη συνέχεια έγιναν 20 (Deeming et al., 1977). Η καύσιμη ύλη διακρίνεται αρχικά σε δύο μεγάλες ομάδες, ζωντανή και νεκρή και στη συνέχεια η ζωντανή διαχωρίζεται σε ξυλώδη και ποώδη βλάστηση. Αντίστοιχα η νεκρή βλάστηση διαχωρίζεται σε ομάδες καταγεγραμμένης υγρασίας 1,10,100 και 1000 ωρών (h). Ένα ακόμα σύστημα ταξινόμησης το οποίο έτυχε ευρείας αποδοχής και χρησιμοποιείται ακόμα και σήμερα από πλήθος λογισμικών και μοντέλων είναι αυτό που παρουσιάστηκε από τον Anderson, 1982. Τα 13 MKY που προτείνει διαχωρίζονται αυτή τη φορά σε 4 ομάδες, ξυλώδης βλάστηση και θάμνοι, ποώδης βλάστηση, φυλλόστρωμα και συσσωρευμένη νεκρή βιομάζα στο υπόστρωμα. Έκτοτε αρκετές προσεγγίσεις έγιναν για τον χαρακτηρισμό και την ταξινόμηση των MKY στην Αμερική (Sandberg et al., 2001; Scott and Burgan, 2005) αλλά και σε διαφορετικά μέρη όπως η Αυστραλία (Cheney and Gould, 1996; Marsden-Smedley and Catchpole 2001) και ο Καναδάς (Lawson et al., 1985). Ωστόσο η ακριβής εκτίμηση και χαρτογράφηση της καύσιμης ύλης κρύβει αρκετές δυσκολίες αφού αφενός είναι συνεχώς μεταβαλλόμενη αφετέρου είναι δύσκολα μετρήσιμη και χρονοβόρα. Τα συστήματα ταξινόμησης που έχουν προταθεί κατά καιρούς δεν προσφέρουν τη μέγιστη ακρίβεια για όλα τα οικοσυστήματα καθώς η βλάστηση διαφέρει από περιοχή σε περιοχή.

3.4.1 Μοντέλα καύσιμης ύλης Ευρώπης, Μεσογείου

Όλα αυτά τα χρόνια έρευνας αναφορικά με τα MKY, τη σημασία τους αλλά και την πολυπλοκότητα και τις ιδιαιτερότητες τους, δεν έλειψαν οι προσεγγίσεις για χώρες με διαφορετική βλάστηση και κλιματικές συνθήκες. Παραδείγματα αποτελούν οι προσεγγίσεις των Dimitrakopoulos (2002) για την Ελλάδα, Harvey et al., (1997) για τις Ελβετικές Άλπεις, Fernandes et al., (2006) για την Πορτογαλία, Hernando et al (1995) για την Ισπανία και Kitchen et al., (2006) για το Ηνωμένο Βασίλειο. Τέλος ενδιαφέρουσα είναι και η προσέγγιση των Riano et al., (2002) οι οποίοι ανέπτυξαν ένα νέο σύστημα ταξινόμησης ονόματι Prometheus το οποίο περιέχει 7 MKY αποκλειστικά για τα Μεσογειακά οικοσυστήματα τα οποία ως γνωστόν παρουσιάζουν πολλές ιδιαιτερότητες αναφορικά με τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς.

3.5 FARSITE - FlamMap

Τα μοντέλα διάδοσης και συμπεριφοράς της πυρκαγιάς που έχουν αναπτυχθεί όλα αυτά τα χρόνια αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για τους ερευνητές όταν ενσωματώνονται σε χωρικά συστήματα υποστήριξης αποφάσεων (ΧΣΥΑ). Τα συστήματα αυτά παρέχουν πολύτιμες πληροφορίες για τις ανάγκες διαχείρισης της πυρκαγιάς. Για παράδειγμα το BEHAVE (Fire behavior prediction and fuel modeling system) (Andrews, 1986), το FlamMap (Finney 2006) και το FARSITE (Fire area simulator) (Finney, 1998) είναι ΧΣΥΑ τα οποία είναι χρήσιμα στο σχεδιασμό της πρόληψης και μείωσης του κινδύνου δασικών πυρκαγιών, τη διαχείριση της δασικής καύσιμης ύλης, την έγκαιρη επέμβαση και την πλήρη αποκατάσταση.

Το FARSITE είναι λογισμικό σχεδιασμένο να προσομοιώνει την διάδοση και τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς. Η διάδοση της πυρκαγιάς προσομοιώνεται ως ένα επεκτεινόμενο ελλειπτικό κύμα, βασιζόμενη στον κανόνα του Huygens. Η πυρκαγιά εξαπλώνεται σε ένα καθορισμένο χρονικό βήμα χρησιμοποιώντας σημεία που ορίζουν το μέτωπο της ως ανεξάρτητες πηγές μικρών ελλειπτικών κυματισμών.

Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των δασικών πυρκαγιών, το FARSITE χρησιμοποιεί το μαθηματικό μοντέλο του Rothermel (1991) για τις πυρκαγιές κόμης, του Albin (1979) για τη διάδοση από καύτρες και των CFBPS (1992) για την ταχύτητα διάδοσης. Απαιτούνται ως εισροές χωρικά δεδομένα (ΣΓΠ) που αφορούν την τοπογραφία και την καύσιμη ύλη της περιοχής καθώς και κλιματικά δεδομένα σε χρονική ανάλυση. Χρησιμοποιώντας λοιπόν διδιάστατη επέκταση για τα μοντέλα, θεωρεί ότι οι φωτιές είναι ελλειπτικές υπό ομοιόμορφες συνθήκες και το σχήμα τους καθορίζεται από τον άνεμο και την κλίση, ενώ το μέγεθος τους από την ταχύτητα διάδοσης και τα MKY. Το FARSITE λοιπόν έχει τρεις βασικές λειτουργίες για τους διαχειριστές πυρκαγιών, την προσομοίωση παλαιών πυρκαγιών, την προσομοίωση πυρκαγιών σε πραγματικό χρόνο και τέλος την προσομοίωση πυρκαγιών (προδιαγεγραμμένη καύση) για να αποσαφηνιστεί ο κίνδυνος που διατρέχει ένα συγκεκριμένο οικοσύστημα.

Το FlamMap χρησιμοποιεί τα μαθηματικά μοντέλα του Rothermel (1972) για τη διάδοση έρπουσας πυρκαγιάς, του Van Wagner (1977) για την έναρξη πυρκαγιάς κόμης, του Rothermel (1991), όπως και το FARSITE, για τη διάδοση της πυρκαγιάς κόμης και του Nelson (2000) για τον υπολογισμό της υγρασίας της νεκρής καύσιμης ύλης. Η βασική του διαφοροποίηση από το FARSITE είναι πως υπολογίζει τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς μονοδιάστατα (χωρικά), καθώς όλοι οι υπολογισμοί συμπεριφοράς πυρκαγιών θεωρούν ότι η υγρασία καύσιμης ύλης, η ταχύτητα και η διεύθυνση του ανέμου είναι σταθερές στον χρόνο. Οι υπολογισμοί που διεξάγονται στο λογισμικό, διανέμονται αυτόνομα για κάθε κελί, γραμμικά, εξάγοντας τα χαρακτηριστικά της προσομοιωμένης πυρκαγιάς σε χωρική διάσταση.

4. Μεθοδολογία

Στην παρούσα εργασία, εξετάζονται 8 περιπτώσεις δασικών πυρκαγιών, που έλαβαν χώρα την περίοδο 1992 – 2011. Η μεθοδολογία χωρίζεται σε τρία μέρη. Στο πρώτα δυο μέρη εκτιμάται η σφοδρότητα επτά δασικών πυρκαγιών καθώς και η μεταπυρική αναγέννηση στις πληγείσες περιοχές. Η μελέτη συμπεριλαμβάνει τη μεγάλη πυρκαγιά που έλαβε χώρα στη Λευκίμη Έβρου το καλοκαίρι του 2011 και έξι επιλεγμένες δασικές πυρκαγιές που έλαβαν χώρα στο νησί της Λέσβου.

Στις έξι πληγείσες περιοχές της Λέσβου, εξήχθη ο ΔNBR από δορυφορικά δεδομένα Landsat για περιόδους αμέσως μετά την πυρκαγιά (Πασπαλάς, Νυφίδα, Ραχώνας), 1 χρόνο μετά την πυρκαγιά (Χαραμίδα, Πετσοφάς) και 2 χρόνια μετά την πυρκαγιά (Αμαλή).

Παράλληλα στην περιοχή της Λευκίμης εξήχθησαν οι δείκτες σφοδρότητας πυρκαγιάς ΔNBR και ΔNDVI από δορυφορικά δεδομένα Landsat. Τα αποτελέσματα συνδυάστηκαν με μετρήσεις πεδίου και εξαγωγή του δείκτη CBI.

Στο τρίτο και τελευταίο μέρος προσομοιώθηκε, συνδυαστικά με τα λογισμικά FARSITE και FlamMap, μια από τις μεγαλύτερες δασικές πυρκαγιές που γνώρισε το νησί της Λέσβου, το 1994 στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου και εξετάζεται η μεταπυρική αναγέννηση και η ανασύσταση του πυρικού περιβάλλοντος, 17 χρόνια μετά την πυρκαγιά.

4.1 Περιοχές Μελέτης

Το νησί της Λέσβου βρίσκεται στο βορειοανατολικό Αιγαίο (γεωγραφικό πλάτος $38^{\circ} 57' \text{ B}$ έως $39^{\circ} 23' \text{ B}$, και γεωγραφικό μήκος $25^{\circ} 49' \text{ E}$ μέχρι $26^{\circ} 36' \text{ E}$), έχει έκταση 1672 km^2 και συνολικό πληθυσμό που ανέρχεται, σύμφωνα με την απογραφή του 2001, σε 90.000 κατοίκους. Τη μεγαλύτερη έκταση καταλαμβάνουν οι ελαιώνες (30,36%) οι οποίοι εξαπλώνονται σε όλη την επιφάνεια του νησιού αλλά εμφανίζονται ως κυρίαρχος τύπος εδαφοκάλυψης κυρίως στο ανατολικό και νότιο τμήμα του. Ακολουθούν τα χορτολίβαδα (26,8%), τα οποία εμφανίζονται κυρίως στο δυτικό τμήμα, και τα δάση κωνοφόρων (16,85%). Η Λέσβος από άποψη ευφλεκτότητας και κινδύνου κατατάσσεται στην πιο υψηλή κατηγοριοποίηση της Ελληνικής Επικράτειας κυρίως λόγω του τυπικού Μεσογειακού κλίματος, των ξηροθερμικών καλοκαιρινών μηνών, των μετρίων βροχοπτώσεων και των ισχυρών ανέμων. Περισσότερες από 600 πυρκαγιές έλαβαν χώρα τις τελευταίες δεκαετίες (1970-2010) με αποτέλεσμα πάνω από 90.000 στρέμματα καμένων εκτάσεων.

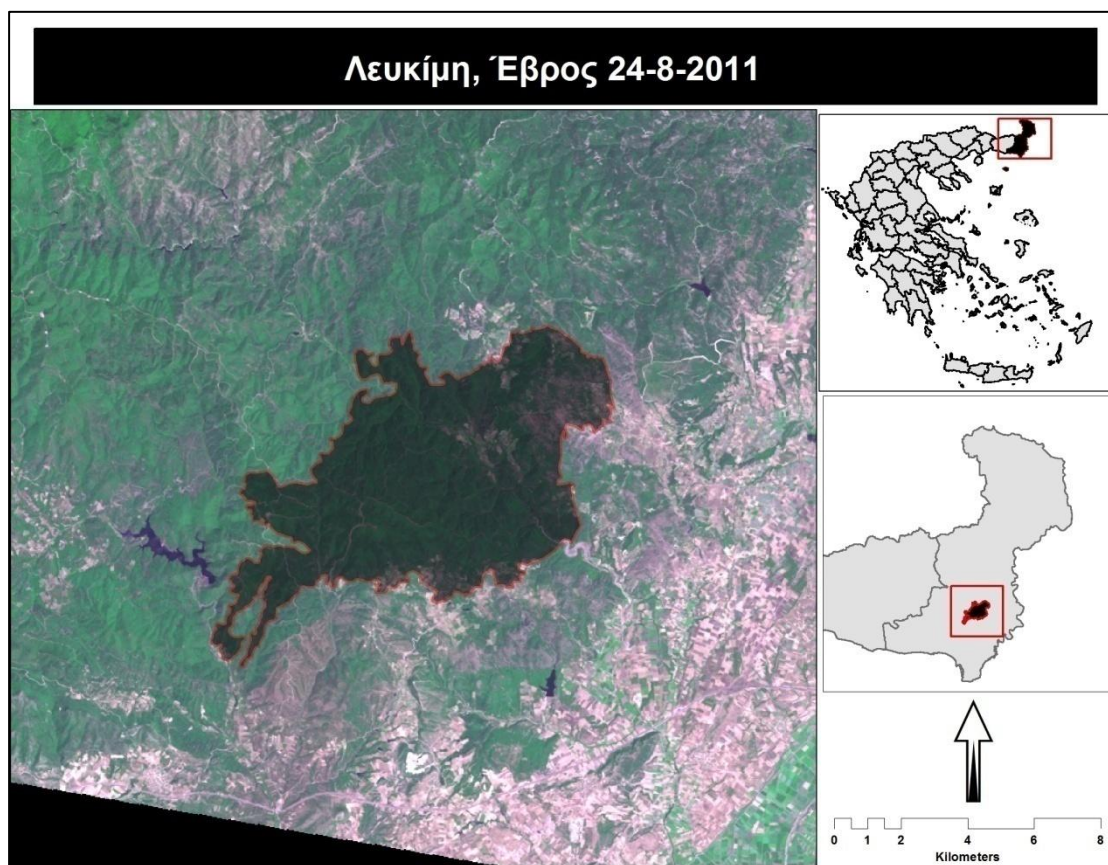
Ο νομός Έβρου, βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο της Ελλάδας (γεωγραφικό πλάτος $41^{\circ} 45' \text{ B}$ έως $40^{\circ} 28' \text{ B}$, και γεωγραφικό μήκος $26^{\circ} 38' \text{ E}$ μέχρι $25^{\circ} 37' \text{ E}$) και έχει έκταση 4242 km^2 και συνολικό πληθυσμό που ανέρχεται, σύμφωνα με την απογραφή του 2001, σε περίπου 150.000 κατοίκους. Στο μεγαλύτερο μέρος του καλύπτεται από πυκνά δάση βελανιδιάς, οξιάς και Πεύκης. Το κλίμα του Έβρου είναι ηπειρωτικό με ψυχρούς χειμώνες και ζεστά καλοκαίρια. Ως προς την γεωμορφολογία, η περιοχή χαρακτηρίζεται από ομαλό πεδινό ή ήπιο λοφώδες ανάγλυφο με λίγα κεντρικά ρέματα που εκβάλλουν στον ποταμό Έβρο στο ανατολικό μισό της περιοχής και ποικίλο ανάγλυφο με έντονες υψομετρικές διαφορές στη δυτική περιοχή του.

4.1.1 Εκτίμηση σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης

1.Λευκίμη, νομός Έβρου. 24/8/2011

Την 24^η Αυγούστου του 2011, ξέσπασε μια μεγάλη πυρκαγιά στην περιοχή Λευκίμη του νομού Έβρου. Η πυρκαγιά ξεκίνησε στην περιφερειακή ζώνη του εθνικού πάρκου

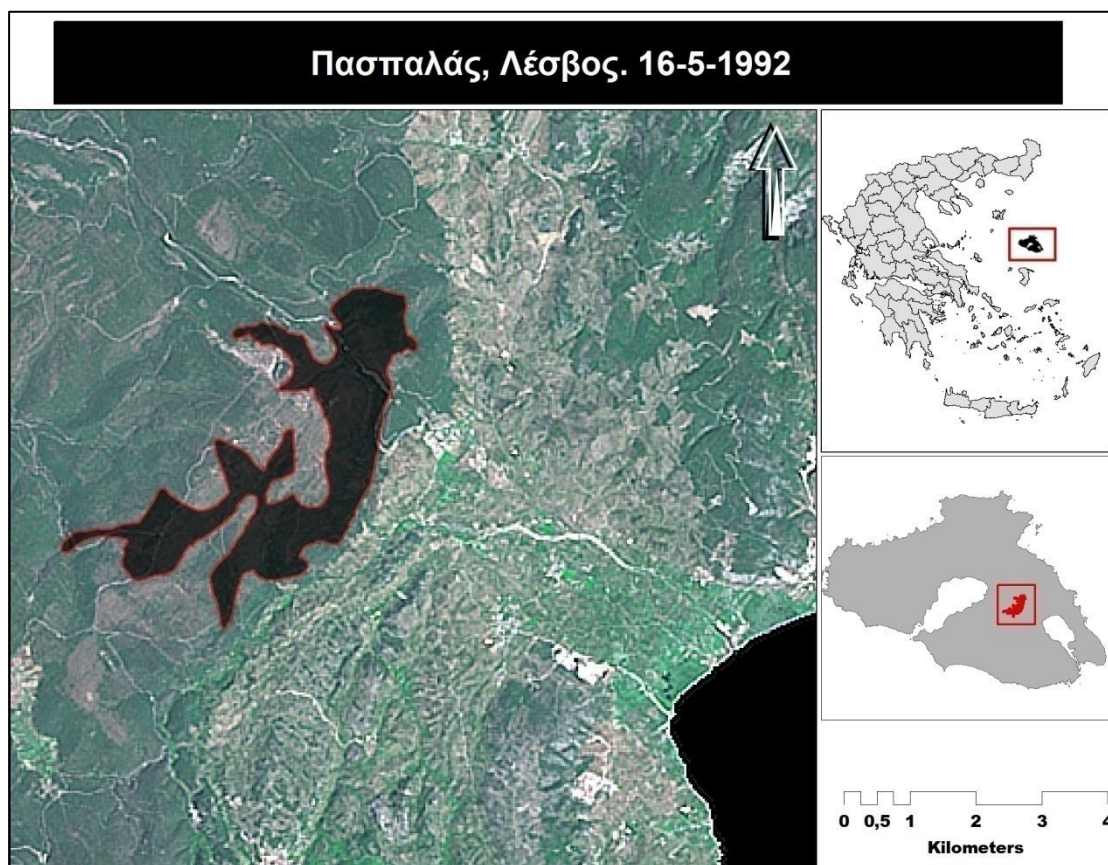
Δαδιάς – Λευκίμμης - Σουφλίου και εξελίχθηκε σε μία από τις μεγαλύτερες των τελευταίων ετών στην Ελλάδα, συνεχίζοντας το καταστροφικό της έργο για μία εβδομάδα όπου και κατέκαψε συνολικά περίπου 59.000 στρέμματα (Χάρτης 1). Η τιμή αφορά την έκταση που προκύπτει από την εξαγωγή της περιμέτρου της πυρκαγιάς και περιλαμβάνει και άκαυτες νησίδες. Στο πέρασμά της αποτεφρώθηκαν εκτάσεις δρυοδάσους, πευκοδάσους αλλά και καλλιέργειες. Τα δέντρα που κάηκαν ήταν κυρίως νεαρά μαύρη και τραχεία Πεύκη, καθώς και βαλανιδιές των τελευταίων 15-20 ετών, προερχόμενες από αναδάσωση. Το εθνικό πάρκο Δαδιάς, ένα από τα σημαντικότερα καταφύγια άγριας ζωής στον ευρωπαϊκό χώρο, κάηκε στο νότιο τμήμα του (υπολογίζεται πως η φωτιά έπληξε το 10% της έκτασης του πάρκου).



Χάρτης 1. Η πληγείσα περιοχή Λευκίμη στο νομό Έβρου.

2. Πασπαλάς, Λέσβος. 16/5/1992

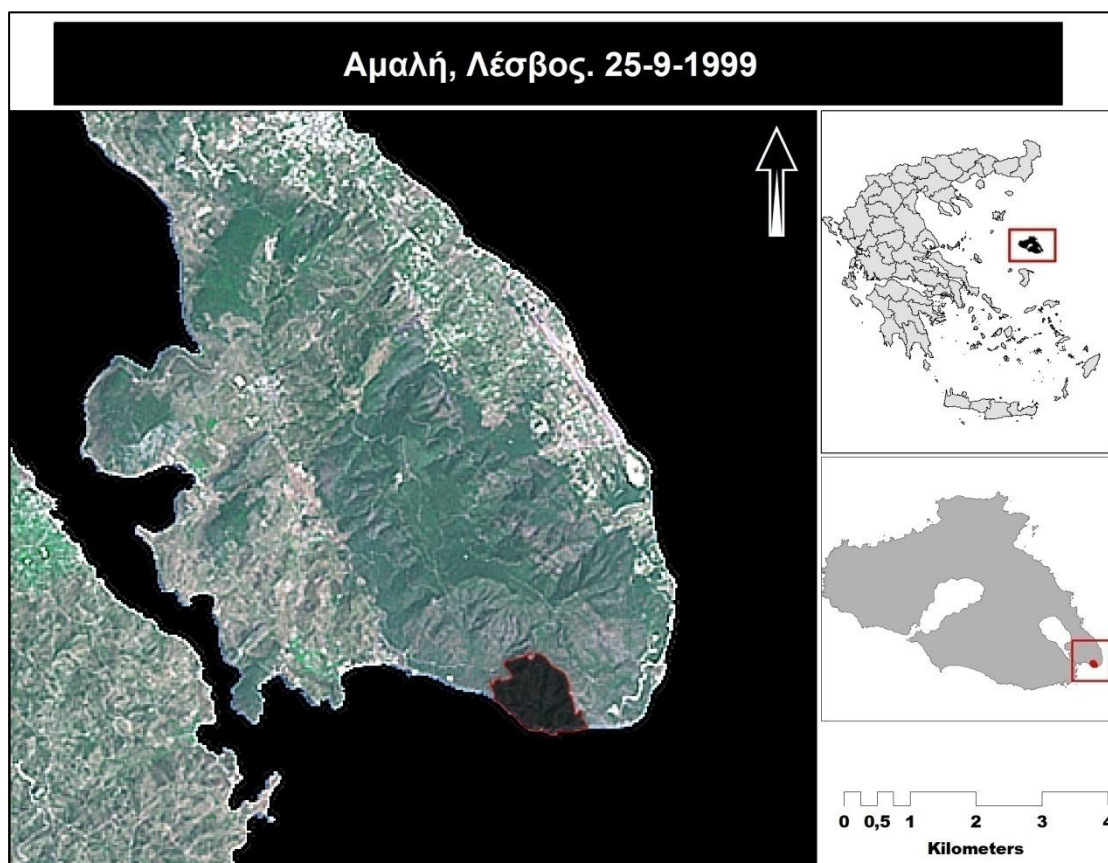
Η πυρκαγιά εκδηλώθηκε στις 16 Μαΐου 1992 και συνεχίστηκε για 6 ημέρες. Ο απολογισμός των καμένων εκτάσεων είναι περίπου 7500 στρέμματα εκ των οποίων 4000 στρέμματα ώριμου δάσους τραχείας Πεύκης (μέση ηλικίας 40 έτη), εκτάσεις φυλλοβόλων και μικτών δασών καθώς και εκτάσεις σκληρόφυλλων θάμνων (Χάρτης 2). Σύμφωνα με τα στοιχεία της Διεύθυνσης Δασών του Νομού Λέσβου, πλησίον της περιοχής μελέτης έχουν εκδηλωθεί άλλες τέσσερις πυρκαγιές μικρότερης έκτασης από το 1980 έως σήμερα.



Χάρτης 2. Η πληγείσα περιοχή, Πασπαλάς στη νήσο Λέσβο.

3. Αμαλή, Λέσβος. 25/9/1999

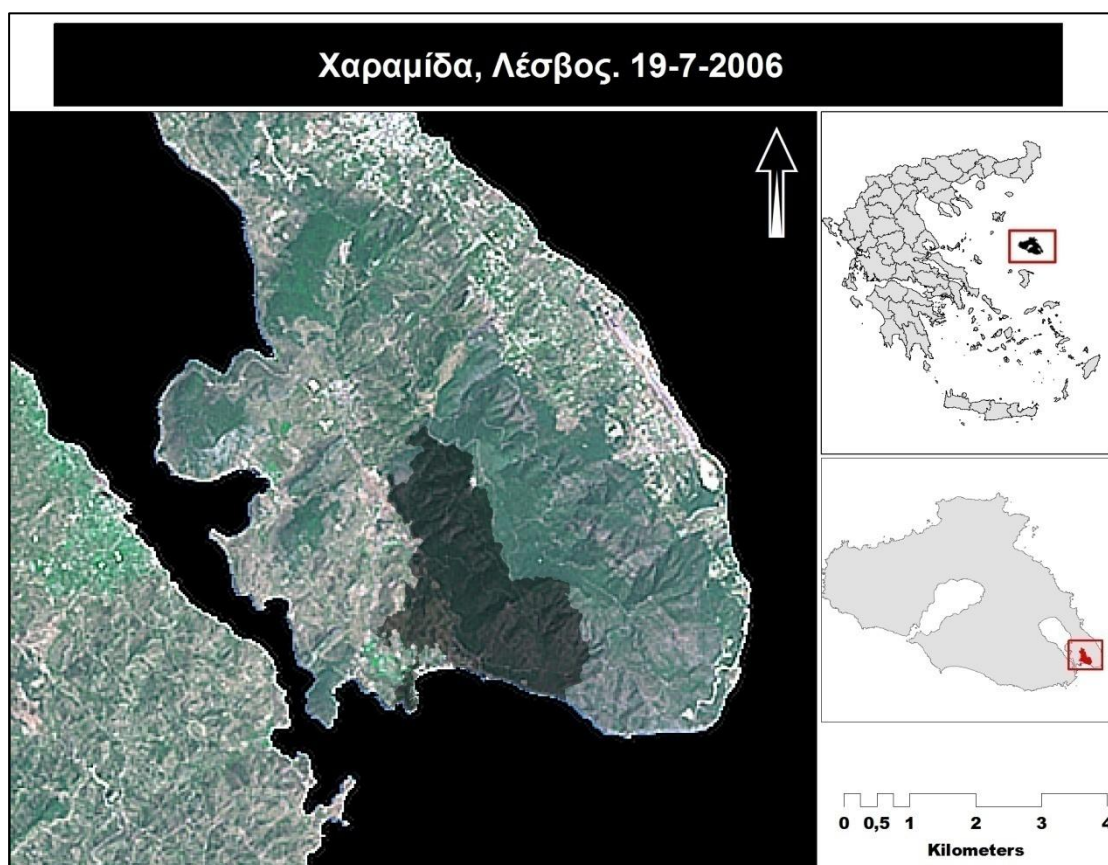
Η πυρκαγιά της 25^{ης} Σεπτεμβρίου το 1999 εκδηλώθηκε στα όρια του Δημόσιου δάσους Κρατήγου, της χερσονήσου Αμαλής, περίπου 15 χιλιόμετρα νότια της πόλης της Μυτιλήνης. Ο απολογισμός κάνει λόγο για 1000 περίπου στρέμματα. Οι καμένες εκτάσεις ήταν ως επί το πλείστον θαμνότοποι σκληρόφυλλης βλάστησης, χορτολιβαδικές εκτάσεις και πευκοδάσος (Χάρτης 3).



Χάρτης 3. Η πληγείσα περιοχή, Αμαλή στη νήσο Λέσβο.

4. Χαραμίδα, Λέσβος. 19/7/2006

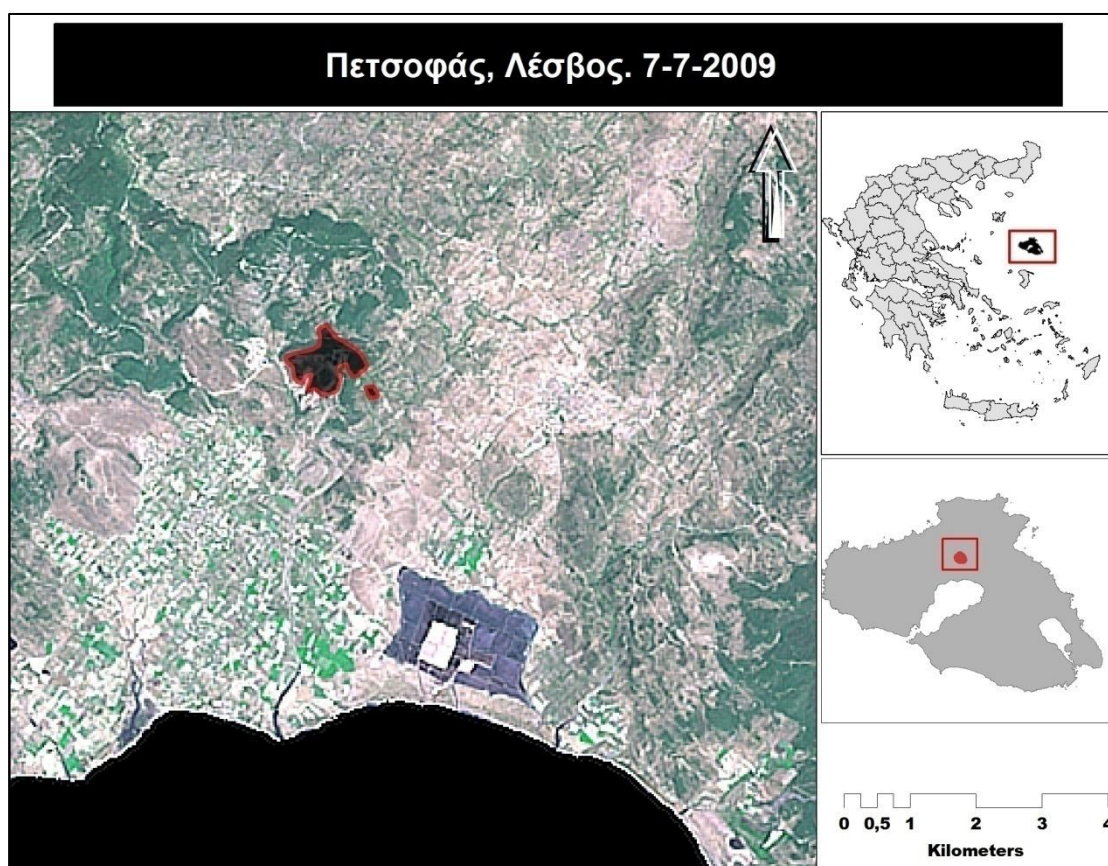
Η πυρκαγιά της 19^{ης} Ιουλίου το 2006, ξεκίνησε από την περιοχή Κουρτερή Χαραμίδα του δήμου Μυτιλήνης και η εξ ολοκλήρου κατάσβεση της έγινε στις 24 Ιουλίου (Χάρτης 4). Σύμφωνα με την έκθεση αυτοψίας της πυρκαγιάς που συντάχθηκε από τη Δασική Υπηρεσία Λέσβου η καταστροφική πυρκαγιά έκαψε περίπου 6700 στρέμματα πευκοδάσους καθώς και ελαιώνες. Αξίζει να σημειωθεί ότι η πυρκαγιά της 19^{ης} Ιουλίου το 2006, επικαλύπτεται σε ένα μέρος από την πυρκαγιά της 15^{ης} Σεπτεμβρίου το 1999.



Χάρτης 4. Η πληγείσα περιοχή, Χαραμίδα στη νήσο Λέσβο.

5. Πετσοφάς, Λέσβος. 7/7/2009

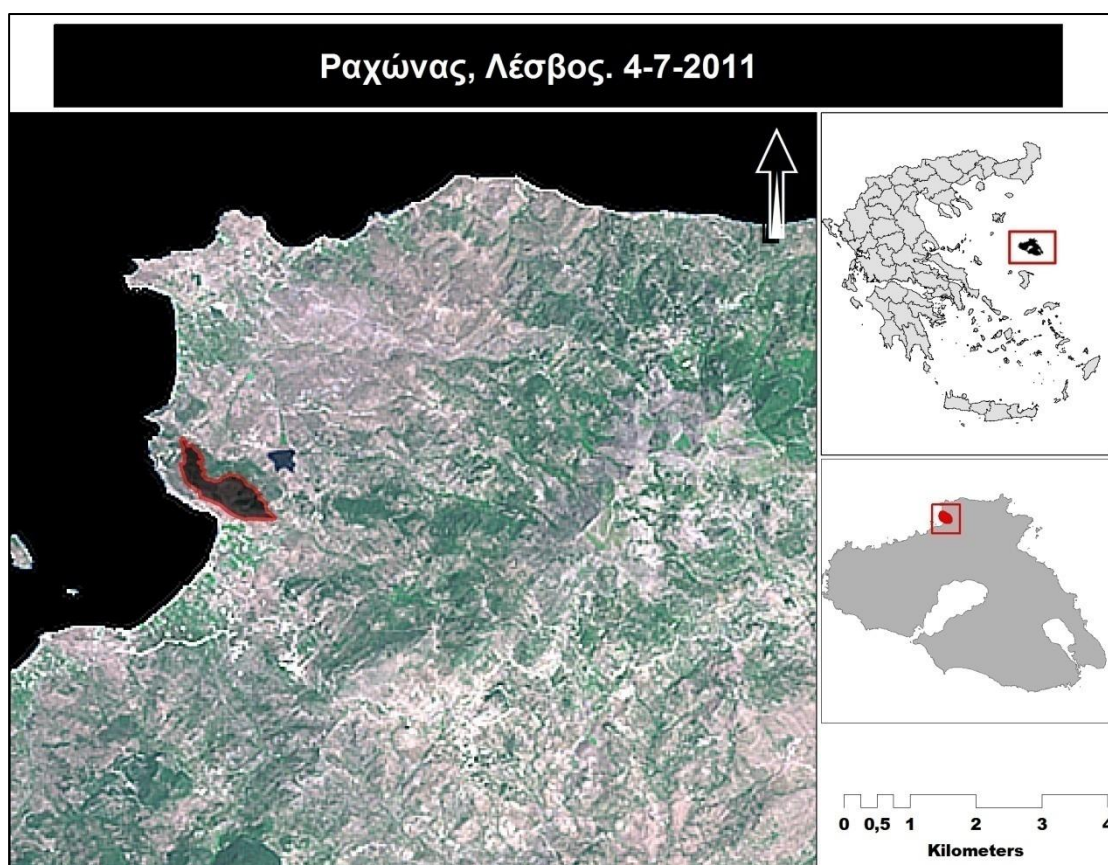
Η πυρκαγιά της 7^{ης} Ιουλίου 2009 σύμφωνα με εκτιμήσεις της πυροσβεστικής, ξεκίνησε από το δρόμο μεταξύ της χωματερής Καλλονής και του στρατοπέδου Πετσοφά στις 7:05 και μπορούσε να κάψει ολόκληρο το δάσος λόγω του ότι τη στιγμή που εκδηλώθηκαν οι φλόγες, έπνεαν τοπικά, ισχυροί άνεμοι. Ευτυχώς η πυρκαγιά τέθηκε υπό έλεγχο σε μερικές ώρες (η πλήρης κατάσβεση καταγράφηκε από το Πυροσβεστικό Σώμα στις 14/7 στις 13:05). Η αποτίμηση των καμένων εκτάσεων κάνει λόγο για 800 στρέμματα, εκ των οποίων τα 500 αντιστοιχούσαν σε δασικές εκτάσεις και τα υπόλοιπα 300 σε χορτολιβαδικές αλλά και καλλιεργήσιμες εκτάσεις (Χάρτης 5).



Χάρτης 5. Η πληγείσα περιοχή, Πετσοφάς στη νήσο Λέσβο.

6. Ραχώνας, Λέσβος. 4/7/2011

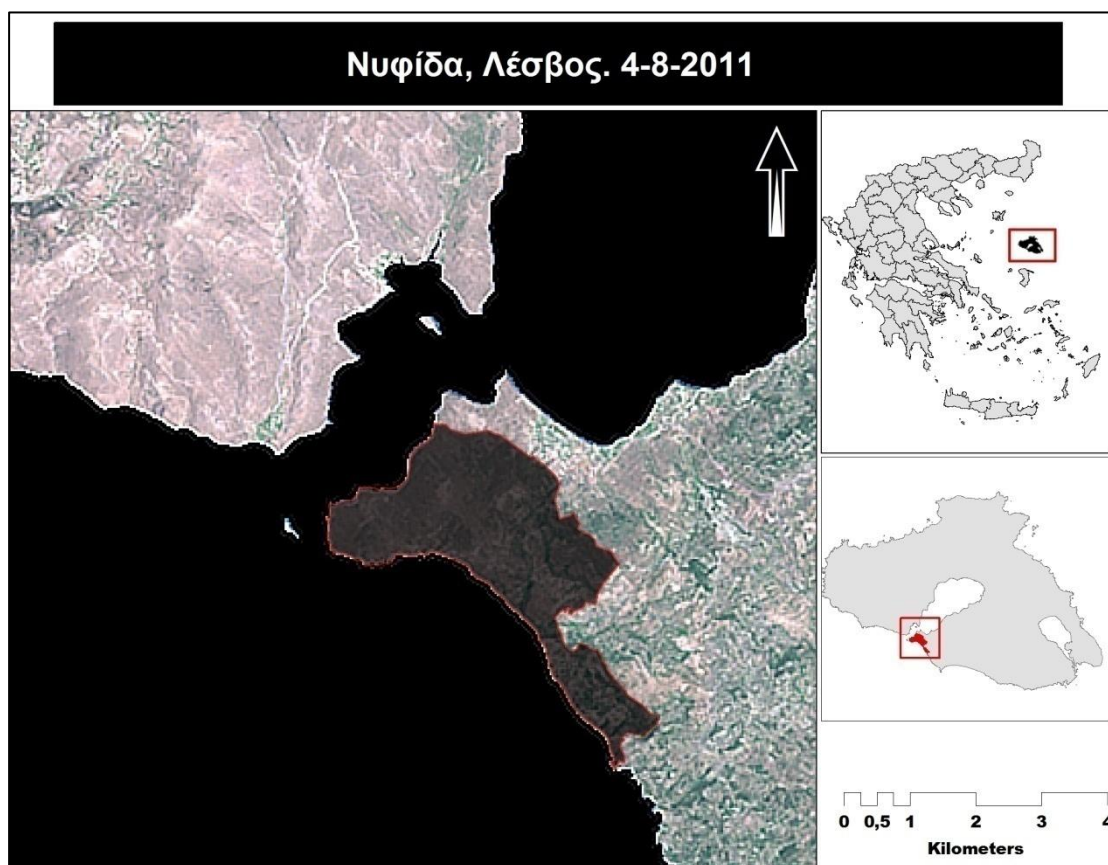
Η πυρκαγιά της 4^{ης} Ιουλίου 2011, ξεκίνησε στις 15:30 από την περιοχή Ραχώνας στο βορειοδυτικό τμήμα της Λέσβου. Σύμφωνα με τα αρχεία καταγραφής του Πυροσβεστικού Σώματος η πυρκαγιά τέθηκε υπό μερικό έλεγχο στις 20:35 της 4^{ης} Ιουλίου ενώ η πλήρη κατάσβεσή της έγινε στις 5/7 στις 8:00. Ο απολογισμός ήταν η καταστροφή 620 στρεμμάτων εκ των οποίων τα 600 αντιστοιχούσαν σε δασική έκταση ενώ τα υπόλοιπα 20 στρέμματα ήταν χορτολιβαδικές εκτάσεις (Χάρτης 6).



Χάρτης 6. Η πληγείσα περιοχή, Ραχώνας στη νήσο Λέσβο.

7. Νυφίδα. Λέσβος. 4/8/2011

Η πυρκαγιά στην περιοχή της Νυφίδας στη περιοχή του Πολιχνίτου στη νότια Λέσβο, ξεκίνησε το καλοκαίρι του 2011 από δύο μέτωπα τα οποία στη συνέχεια ενώθηκαν και διήρκεσε 5 ημέρες καίγοντας συνολικά περίπου 7000 στρέμματα (Χάρτης 7). Ως ώρα έναρξης έχει καταγραφεί από το Πυροσβεστικό Σώμα η 14:25 της 4^{ης} Αυγούστου. Η πυρκαγιά τέθηκε υπό μερικό έλεγχο στις 5/8 και ώρα 18:00 και η πλήρη κατάσβεσή της καταγράφεται στις 9/8 στις 7:20. Μεγάλες εκτάσεις ως επί το πλείστον δασικές, χορτολιβαδικές και ελαιώνες και καλλιέργειες καταστράφηκαν από την πυρκαγιά.

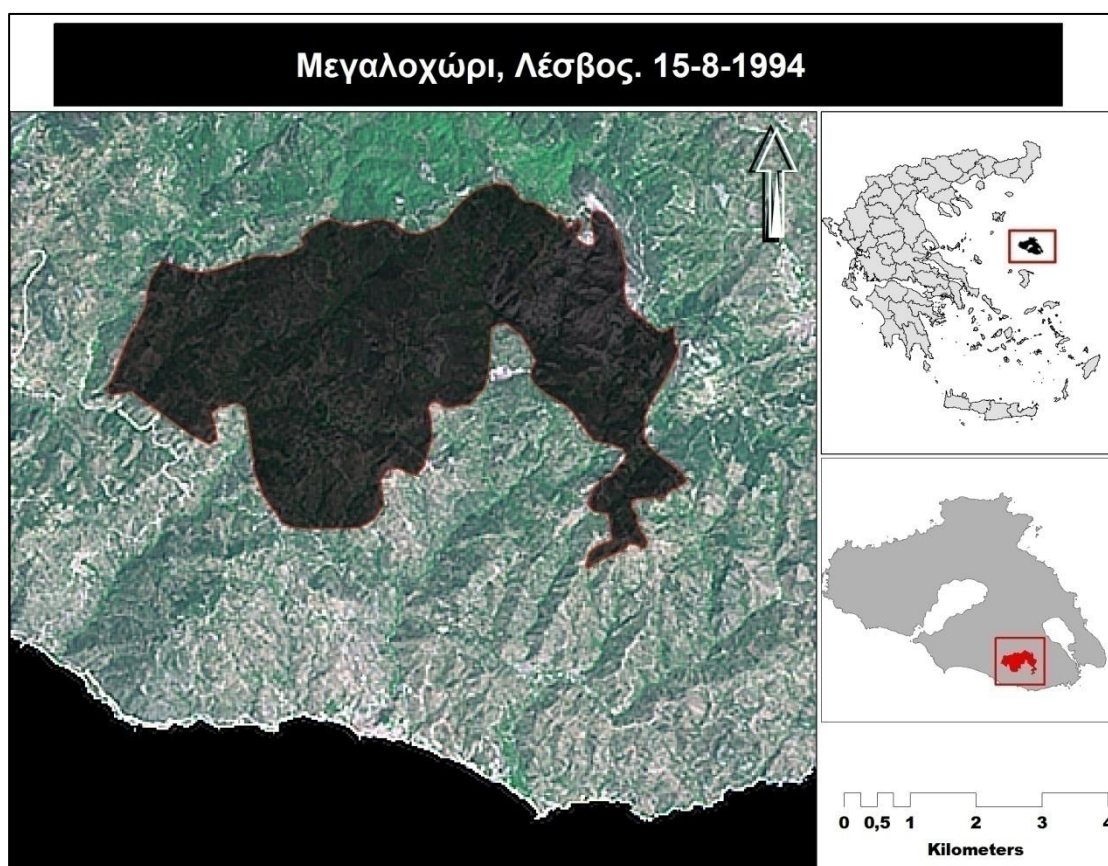


Χάρτης 7. Η πληγείσα περιοχή, Νυφίδα στη νήσο Λέσβο.

4.1.2 Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος

Μεγαλοχώρι, Λέσβος. 15/8/1994

Η πυρκαγιά έλαβε χώρα ξημερώματα της 15^{ης} Αυγούστου το 1994, και συνεχίστηκε για 5 ημέρες. Ο απολογισμός ήταν συνολικά περίπου 19000 στρέμματα καμένης έκτασης, περιλαμβάνοντας μεγάλες εκτάσεις τραχείας και μαύρης Πεύκης, πλατύφυλλων (καστανιόνες), χορτολιβαδικές εκτάσεις, καθώς και ελαιώνες (Χάρτης 8).



Χάρτης 8. Η πληγείσα περιοχή, Μεγαλοχώρι στη νήσο Λέσβο.

4.2 Εξαγωγή δεικτών σφοδρότητας με δορυφορικά δεδομένα

Η εξαγωγή του δείκτη σφοδρότητας NBR καθώς και η ανίχνευση αλλαγών πριν και μετά την πυρκαγιά ΔNBR, υπολογίσθηκε εξ ολοκλήρου με δεδομένα Landsat (USGS EROS <http://glovis.usgs.gov/>) για συνολικά επτά πυρκαγιές των νομών Έβρου και Λέσβου. Ο αμερικανικός δορυφόρος Landsat αποτελεί μια σειρά επιχειρησιακών δορυφόρων παρατήρησης γης της NASA και είναι αυτή τη στιγμή το μακροβιότερο διαρκές αρχείο της επιφάνειας της Γης. Αυτή τη στιγμή είναι σε τροχιά οι Landsat 5 (ημερομηνία εκτόξευσης 1/5/1984) και 7 (ημερομηνία εκτόξευσης 15/4/1999). Οι αισθητήρες Thematic Mapper (TM) του Landsat 5, ο οποίος παραμένει σε τροχιά παρά τις αρχικές προβλέψεις και Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) του Landsat 7, διαθέτουν 7 και 8 κανάλια (διάλους) αντίστοιχα. Η διακριτική ικανότητα (spatial resolution) του Thematic Mapper είναι τα 30 m για τα κανάλια του ορατού (κόκκινο, πράσινο, μπλε – διάυλοι 1,2,3) και του υπέρυθρου (εγγύς υπέρυθρο και μέσο υπέρυθρο – διάυλοι 4,5,7) και 120 m για το θερμικό κανάλι (διάυλος 6). Η χωρική του ικανότητα λήψης είναι 170 x 185 km. Η διακριτική ικανότητα του Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) είναι τα 30 m για το ορατό και υπέρυθρο κανάλι (διάυλοι 1-5 και 7), 60 m για το θερμικό κανάλι (διάυλος 6) και 15 m για το παγχρωματικό (διάυλος 8). Η χωρική τους ικανότητα λήψης είναι 170 x 185 km. Τέλος η χρονική διακριτική τους ικανότητα (temporal resolution) είναι 16 μέρες έκαστος λειτουργώντας σε κυκλική, ηλιο-σύγχρονη, σχεδόν πολική τροχιά.

Η επιλογή των δεδομένων για την εξαγωγή των δεικτών, έγινε λαμβάνοντας υπ όψη τέσσερις σημαντικές παραμέτρους. Πρώτον όπως προαναφέρθηκε επιλέχθηκαν ημερομηνίες που να επιτρέπουν τη μελέτη σφοδρότητας αμέσως μετά την πυρκαγιά και της μεταπυρικής αναγέννησης, σε σχέση με τη σφοδρότητα, ένα και δυο χρόνια μετά τη πυρκαγιά (Key and Benson 2006). Δεύτερον τα δεδομένα επιλέχθηκαν με τρόπο ώστε τα φαινολογικά χαρακτηριστικά της βλάστησης να είναι σε παρόμοιο στάδιο. Ο φαινολογικός κύκλος σε περιπτώσεις ανίχνευσης αλλαγών στη βλάστηση είναι πολύ σημαντικός καθώς επηρεάζει άμεσα την περιεκτικότητα σε υγρασία και τα επίπεδα χλωροφύλλης (Singh, 1989). Έτσι τα δεδομένα για την ανίχνευση αλλαγών μετά την πυρκαγιά, επιλέχθηκαν να ανήκουν στην ίδια εποχή.

Τρίτον τα δεδομένα επιλέχθηκαν με τρόπο ώστε να αποφευχθεί η χρήση δεδομένων Landsat 7 μετά το έτος 2003 καθώς από τον Ιούλιο του 2003 ο διορθωτής σάρωσης του αισθητήρα (Scan Line Corrector - SLC) υπέστη βλάβη, εμφανίζοντας συστηματικά κενές λωρίδες στην απεικόνιση. Τέλος μεγάλη προσοχή δόθηκε οι επιλεγμένες εικόνες να μην εμφανίζουν υψηλή νεφοκάλυψη ειδικότερα στην περιοχή ενδιαφέροντος. Αναλυτική περιγραφή των δορυφορικών δεδομένων και των χαρακτηριστικών τους απεικονίζεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1. Δορυφορικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης.

Πυρκαγιά		Ημερομηνία Λήψης	Τύπος Αισθητήρα	Δορυφόρος	Διακριτική Ικανότητα (m)
Λευκίμη	Πριν	8/8/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
	Μετά	25/9/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
Πασπαλάς	Πριν	7/8/1990	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
	Μετά	29/9/1992	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
Αμαλή	Πριν	8/8/1999	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	30
	Μετά	14/9/2001	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	30
Χαραμίδα	Πριν	24/6/2006	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	30
	Μετά	5/7/2007	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
Πετσοφάς	Πριν	24/6/2009	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
	Μετά	29/7/2010	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
Ραχώνας	Πριν	30/8/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
	Μετά	2/9/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
Νυφίδα	Πριν	30/6/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
	Μετά	17/8/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30

4.2.1 NBR – ΔNBR

Ο δείκτης NBR εξήχθη για όλες τις δορυφορικές εικόνες του Πίνακα 1. Αρχικά οι βασικές διαδικασίες προ-επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων όπως μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων σε συμβατό τύπο αρχείων, απομόνωση της περιοχής μελέτης και γεωμετρική διόρθωση, έγιναν με χρήση του λογισμικού Erdas Imagine.

Οι εικόνες διορθώθηκαν και γεωαναφέρθηκαν σε κοινό προβολικό σύστημα (Ελληνικό Γεωδαιτικό Σύστημα Αναφοράς 1987 – ΕΓΣΑ 87) με τη μέθοδο του πλησιέστερου γείτονα (Nearest Neighbour) με σφάλμα μικρότερο του ενός εικονοστοιχείου ($RMSE < 30m$).

Η ατμοσφαιρική διόρθωση των εικόνων κατά την οποία οι ψηφιακές τιμές κάθε διαύλου (0-255) μετατράπηκαν σε τιμές καταγεγραμμένης ανάκλασης, έγινε με τη μέθοδο COST (Chavez, 1996). Το μοντέλο που πρότεινε ο Chavez, 1996, χρησιμοποιεί ως παραμέτρους την απόσταση Γη – Ήλιος καθώς και τη γωνία που σχηματίζεται μεταξύ Γης – Ήλιου για την ημερομηνία λήψης της εικόνας και τις ελάχιστες ψηφιακές τιμές (Digital Numbers - DN) που εμφανίζει ο κάθε ένας από τους διαύλους 1-5 και 7.

Οι διορθωμένες ατμοσφαιρικά εικόνες χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των δεικτών NBR για πριν και μετά την πυρκαγιά. Η διαφορά τους, αντιστοιχεί στον δείκτη ΔNBR ο οποίος περιγράφει τις συνολικές αλλαγές που προκάλεσε η πυρκαγιά στην περιοχή. Οι αλγόριθμοι $NBR = \text{Band 4} - \text{Band 7} / \text{Band 4} + \text{Band 7}$ και $\Delta NBR = NBR_{pre\ fire} - NBR_{post\ fire}$ υπολογίστηκαν με το εργαλείο model builder του λογισμικού Erdas Imagine.

4.2.2 NDVI – $\Delta NDVI$

Η εξαγωγή του $\Delta NDVI$ έγινε μόνο για την περιοχή της Λευκίμης, Έβρου καθώς στη βιβλιογραφία εμφανίζεται να ανιχνεύει τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς με ακρίβεια. Βασική προϋπόθεση για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων του, είναι η εξαγωγή του αμέσως μετά την πυρκαγιά. Έτσι λοιπόν για να γίνει μια σύγκριση με τις τιμές του ΔNBR επιλέχθηκε η περίπτωση του Έβρου καθώς ο ΔNBR επιλέχθηκε να υπολογισθεί μόλις ένα μήνα μετά τη φωτιά.

Για την εξαγωγή του χρησιμοποιήθηκαν οι γεωμετρικά και ατμοσφαιρικά διορθωμένες δορυφορικές εικόνες της Λευκίμης. Οι αλγόριθμοι $NDVI = \text{Band 4} - \text{Band 3} / \text{Band 4} + \text{Band 3}$ και $\Delta NDVI = NDVI_{pre\ fire} - NDVI_{post\ fire}$ υπολογίστηκαν με το εργαλείο model builder του λογισμικού Erdas Imagine.

4.3 CBI

4.3.1 Έβρος

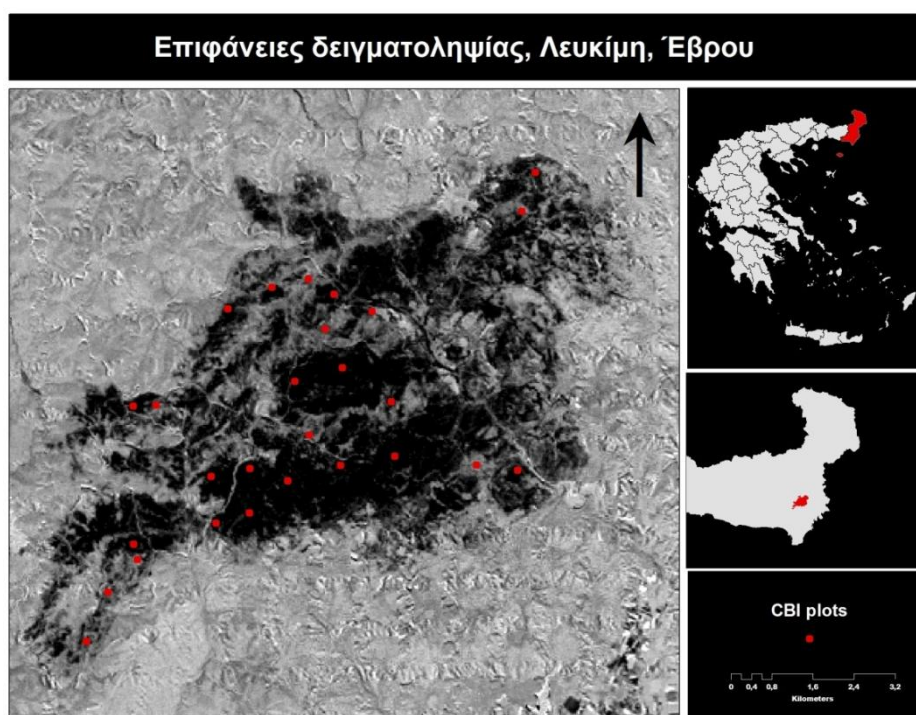
Ο δείκτης CBI όπως προαναφέρθηκε, αναφέρεται στη δειγματοληπτική επίγεια εκτίμηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς στο οικοσύστημα. Με την επιτόπια αυτοψία και την διεξαγωγή μια σειράς μετρήσεων αναφορικά με τις επιπτώσεις, η εξαγωγή του δείκτη οδηγεί σε συμπεράσματα για τη σφοδρότητα της πυρκαγιάς. Ο δείκτης χρησιμοποιείται συνδυαστικά με τις τηλεπισκοπικές προσεγγίσεις (συχνότερα με τον ΔNBR) και στη βιβλιογραφία συχνά εμφανίζεται ως απαραίτητη διαδικασία για την ακριβή εκτίμηση της σφοδρότητας. Στην παρούσα εργασία οι τιμές του CBI υπολογίστηκαν για την πυρκαγιά της Λευκίμης, Έβρου με σκοπό να εξετασθεί η συσχέτισή τους με τις τιμές των ΔNBR και ΔNDVI.

Όπως αναφέρουν οι Key and Benson, 2006 για τη σωστή αποτύπωση των αποτελεσμάτων, οι προαπαιτούμενες διεργασίες είναι δύο. Πρώτον για την επίτευξη υψηλής ακρίβειας απαιτείται ένας ικανοποιητικός αριθμός περιοχών δειγματοληψίας και δεύτερον είναι σημαντική η δειγματοληψία περιοχών ποικίλης σφοδρότητας καθώς και άκαυτων τμημάτων.

Η επιλογή των περιοχών δειγματοληψίας λοιπόν, σχεδιάστηκε με βάση τις ταξινομημένες τιμές του δείκτη ΔNBR που εξήχθη για την περιοχή της Λευκίμης. Οι τιμές σφοδρότητας ταξινομήθηκαν σε 4 κλάσεις (Άκαυτο για τιμές ΔNBR μικρότερες του -0.5271, Χαμηλή για τιμές ΔNBR μεταξύ -0.5270 και -0.06, Μέτρια για τιμές ΔNBR μεταξύ -0.05 και 0.4129 και Υψηλή για τιμές ΔNBR μεταξύ 0.4130 και 0.8819). Με τη μέθοδο της στρωματωμένης τυχαίας δειγματοληψίας σε ανισομερή δείγματα, κατανεμήθηκαν στις 4 κλάσεις οι περιοχές μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, συνολικά ο δείκτης CBI υπολογίστηκε για 27 περιοχές δειγματοληψίας, εκ των οποίων οι 10 σε περιοχή με υψηλές τιμές ΔNBR, 8 σε περιοχή με μέτρια σφοδρότητα, 7 σε χαμηλή σφοδρότητα και τέλος 2 σε άκαυτη έκταση για την καταγραφή της κατάστασης πριν την πυρκαγιά (Χάρτης 9).

Στις 27 περιοχές δειγματοληψίας, διαμέτρου 30m, ακολουθήθηκε η μέθοδος εξαγωγής των τιμών του δείκτη (0-3) όπως περιγράφεται διεξοδικά από τους Key and Benson, 2006.

Η αριθμητική βαθμολογία περιελάμβανε οπτική εκτίμηση για πλήθος παραμέτρων και για κάθε όροφο βλάστησης του δασικού οικοσυστήματος. Η πρώτη κατηγορία αφορούσε τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς στο υπόστρωμα μετρώντας το ποσοστό επιπτώσεων στη βιομάζα και τις επιπτώσεις στο έδαφος. Η δεύτερη κατηγορία αφορούσε τις επιπτώσεις στην ποώδη βλάστηση (ύψους έως 1m), καταγράφοντας το ποσοστό καμένων ή ζωντανών φυταρίων. Η τρίτη κατηγορία μετρήσεων αφορούσε τους θάμνους (ύψος 1 έως 5 m) καταγράφοντας το ποσοστό άκαυτων ατόμων, τις αλλαγές στην εξάπλωση και πιθανή παρουσία άθικτων σπορέων. Η τέταρτη κατηγορία αφορούσε την ομάδα νεαρών δέντρων και καταμετρήθηκε το ποσοστό άκαυτων ατόμων, το καψάλισμα σε κορμό και ρίζες και οι επιπτώσεις στην κόμη. Η τελευταία κατηγορία αφορούσε τις επιπτώσεις στον ανώτερο όροφο που απαρτίζεται από τα μεγάλα δέντρα και καταμετρήθηκε όπως και στην προηγούμενη κατηγορία, το ποσοστό άκαυτων ατόμων, το καψάλισμα σε κορμό και ρίζες και οι επιπτώσεις στην κόμη. Το άθροισμα των βαθμολογιών, δια του αριθμού κατηγοριών που εμφανίζει η κάθε περιοχή αντιστοιχεί στην τιμή του CBI για κάθε περιοχή δειγματοληψίας. Το δελτίο καταγραφής για την εξαγωγή του δείκτη απεικονίζεται στον Πίνακα 2.



Χάρτης 9. Περιοχές δειγματοληψίας στη Λευκίμη Έβρου για την εξαγωγή του δείκτη CBI

Πίνακας 2. Δελτίο καταγραφής επιπτώσεων πυρκαγιάς, για την εξαγωγή του δείκτη CBI

BURN SEVERITY -- COMPOSITE BURN INDEX (BI)										
PD - Abridged		Examiners:				Fire Name:				
Registration Code		Project Code		Plot Number						
Field Date mmdyyy	/ /	Fire Date mmyyyy		/ /						
Plot Aspect		Plot % Slope		UTM Zone						
Plot Diameter Overstory		UTM E plot center		GPS Datum						
Plot Diameter Understory		UTM N plot center		GPS Error (m)						
Number of Plot Photos		Plot Photo IDs								
BI - Long Form		% Burned 100 feet (30 m) diameter from center of plot =				Fuel Photo Series =				
BURN SEVERITY SCALE										
STRATA RATING FACTORS		No Effect		Low		Moderate		High		FACTOR SCORES
		0.0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0		
A. SUBSTRATES										
% Pre-Fire Cover: Litter =		Duff =		Soil/Rock =		Pre-Fire Depth (inches): Litter =		Duff =		Fuel Bed =
Litter/Light Fuel Consumed	Unchanged	--	50% litter	--	100% litter	>80% light fuel	98% Light Fuel			Σ =
Duff	Unchanged	--	Light char	--	50% loss deep char	--	Consumed			N =
Medium Fuel, 3-8 in.	Unchanged	--	20% consumed	--	40% consumed	--	>60% loss, deep ch			
Heavy Fuel, > 8 in.	Unchanged	--	10% loss	--	25% loss, deep char	--	>40% loss, deep ch			X̄ =
Soil & Rock Cover/Color	Unchanged	--	10% change	--	40% change	--	>80% change			
B. HERBS, LOW SHRUBS AND TREES LESS THAN 3 FEET (1 METER):										
Pre-Fire Cover =		%		Enhanced Growth =						Σ =
% Foliage Altered (blk-bm)	Unchanged	--	30%	--	80%	95%	100% + branch loss			N =
Frequency % Living	100%	--	90%	--	50%	< 20%	None			
Colonizers	Unchanged	--	Low	--	Moderate	High-Low	Low to None			X̄ =
Spp. Comp. - Rel. Abund.	Unchanged	--	Little change	--	Moderate change	--	High change			
C. TALL SHRUBS AND TREES 3 TO 16 FEET (1 TO 5 METERS):										
Pre-Fire Cover =		%		Enhanced Growth =						Σ =
% Foliage Altered (blk-bm)	0%	--	20%	--	60-90%	> 95%	Signifcnt branch loss			N =
Frequency % Living	100%	--	90%	--	30%	< 15%	< 1%			
% Change in Cover	Unchanged	--	15%	--	70%	90%	100%			X̄ =
Spp. Comp. - Rel. Abund.	Unchanged	--	Little change	--	Moderate change	--	High Change			
D. INTERMEDIATE TREES (SUBCANOPY, POLE-SIZED TREES)										
Pre-Fire % Cover =		Pre-Fire Number Living =		Pre-Fire Number Dead =						Σ =
% Green (Unaltered)	100%	--	80%	--	40%	< 10%	None			N =
% Black (Torch)	None	--	5-20%	--	60%	> 85%	100% + branch loss			
% Brown (Scorch/Girdle)	None	--	5-20%	--	40-80%	< 40 or > 80%	None due to torch			X̄ =
% Canopy Mortality	None	--	15%	--	60%	80%	%100			
Char Height	None	--	1.5 m	--	2.8 m	--	> 5 m			
Post Fire: %Girdled =		%Felled =		%Tree Mortality =						
E. BIG TREES (UPPER CANOPY, DOMINANT, CODOMNANT TREES)										
Pre-Fire % Cover =		Pre-Fire Number Living =		Pre-Fire Number Dead =						Σ =
% Green (Unaltered)	100%	--	95%	--	50%	< 10%	None			N =
% Black (Torch)	None	--	5-10%	--	50%	> 80%	100% + branch loss			
% Brown (Scorch/Girdle)	None	--	5-10%	--	30-70%	< 30 or > 70%	None due to torch			X̄ =
% Canopy Mortality	None	--	10%	--	50%	70%	%100			
Char Height	None	--	1.8 m	--	4 m	--	> 7 m			
Post Fire: %Girdled =		%Felled =		%Tree Mortality =						
Community Notes/Comments:		CBI = Sum of Scores / N Rated:		Sum of Scores		N Rated		CBI		
		Understory (A+B+C)								
		Overstory (D+E)								
		Total Plot (A+B+C+D+E)								

4.4 Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος

Το δεύτερο μέρος της εργασίας περιλαμβάνει την μελέτη ανασύστασης του πυρικού περιβάλλοντος στην περιοχή του Μεγαλοχωρίου Λέσβου. Η προσέγγιση χωρίζεται σε δυο υπομέρη. Το πρώτο περιλαμβάνει μια προσομοίωση της μεγάλης πυρκαγιάς που έπληξε την περιοχή το 1994 (Χάρτης 8), χρησιμοποιώντας δεδομένα που αφορούν τους κλιματικούς και περιβαλλοντικούς παράγοντες που επικρατούσαν μεταξύ 15 και 20 Αυγούστου το 1994, στην περιοχή μελέτης. Στο δεύτερο υπομέρος, η μεταπυρική αναγέννηση της βλάστησης και η τάση ανασύστασης του πυρικού περιβάλλοντος εκτιμώνται με δειγματοληψίες στο πεδίο. Τέλος εξετάζεται η συσχέτιση μεταβλητών που εξήχθησαν από το πεδίο με τιμές του δείκτη NDVI και εφαρμόζεται μια ανίχνευση αλλαγών με χρονοσειρές.

4.4.1 Προσομοίωση Πυρκαγιάς Μεγαλοχωρίου

Η προσομοίωση της πυρκαγιάς του 1994 έγινε με τα λογισμικά FARSITE και FlamMap, τα οποία απαιτούν ως εισροή τοπογραφικά και περιβαλλοντικά δεδομένα σε χωρική ανάλυση συνδυαστικά με κλιματικά δεδομένα σε χρονική ανάλυση. Οι χωρικές απαιτήσεις για την προσομοίωση περιλαμβάνουν υψόμετρο, κλίσεις, έκθεση, MKY και χαρακτηριστικά της ξυλώδους βλάστησης (Πίνακας 3). Οι διαδικασίες προετοιμασίας των χωρικών δεδομένων έγιναν με χρήση ΣΓΠ μέσω του λογισμικού Arc GIS.

Πίνακας 3. Χωρικά δεδομένα σε μορφή ASCII ως εισροή στο λογισμικό FARSITE

Δεδομένα	Μονάδες Μέτρησης
Υψόμετρο (Digital Elevation Model - DEM)	(m)
Κλίσεις (Slope)	(Degrees)
Έκθεση (Aspect)	Κατηγορία
MKY (Fuel Models - FM)	Κατηγορία
Κάλυψη Κόμης (Canopy Cover - CC)	(%)
Ύψος Δέντρων (Stand Height - SH)	(m * 10)
Ύψος Έναρξης Κόμης (Crown Base Height - CBH)	(m * 10)
Πυκνότητα Κόμης (Crown Bulk Density - CBD)	(kg / m ³ * 100)

Για το υψόμετρο χρησιμοποιήθηκε ένα ψηφιακό μοντέλο εδάφους της Λέσβου προσαρμοσμένο στην περιοχή μελέτης, από το οποίο εξήχθησαν και οι χάρτες κλίσεων και εκθέσεων με χρήση του λογισμικού Arc GIS. Για την ταξινόμηση της βλάστησης σε MKY χρησιμοποιήθηκε ο χάρτης χρήσεων γης του 1990 σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης χρήσεων γης του προγράμματος CORINE. Οι χρήσεις γης της περιοχής αντιστοιχήθηκαν κατά προσέγγιση στα 13 MKY του Anderson, 1982 με βάση τις φωτογραφικές κλείδες που παρέχονται (Πίνακας 4).

Πίνακας 4. Αντιστοιχία χρήσεων γης της περιοχής του Μεγαλοχωρίου, Λέσβου σε MKY σύμφωνα με το σύστημα ταξινόμησης του Anderson, 1982.

Κωδικός CORINE	Χρήσεις Γης	MKY (Anderson, 1982)
112	Αστική	NB
223	Ελαιώνες	8
242	Γη που καλύπτεται από γεωργία και εκτάσεις φυσικής βλάστησης	3
243	Αγροτικές δασικές περιοχές	2
311	Δάσος πλατύφυλλων	9
312	Δάσος κωνοφόρων	10
313	Μικτό δάσος	10
321	Θάμνοι και χερσότοποι	6
323	Σκληρόφυλλη βλάστηση	4
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	7

Για τη δημιουργία εισροών αναφορικά με το ποσοστό κάλυψης κόμης (CC), το μέσο ύψος δέντρων (SH), το μέσο ύψος έναρξης κόμης (CBH) και την πυκνότητα κόμης (CBD), χρησιμοποιήθηκαν ήδη υπάρχοντα σημειακά δεδομένα από παλαιότερες δειγματοληψίες (110 σημεία κανονικής κατανομής) που περιείχαν μεταξύ άλλων και μετρήσεις για τις συγκεκριμένες μεταβλητές στο νησί της Λέσβου. Το πρώτο βήμα για τη δημιουργία χαρτών με τις συγκεκριμένες 4 μεταβλητές που απαιτούνται ως χωρική εισροή για τις προσομοιώσεις, ήταν η χρήση της μεθόδου των Γενικευμένων Αθροιστικών Μοντέλων (Generalized Additive Models - GAM) για την πολυπαραγοντική παρεμβολή των τιμών σε όλο το νησί της Λέσβου. Τα μοντέλα GAM είναι μια στατιστική προσέγγιση η οποία χρησιμοποιεί συναρτήσεις παλινδρόμησης για την αναγωγή της εξαρτημένης μεταβλητής στο πεδίο.

Βασική προϋπόθεση για την ακρίβεια της μοντελοποίησης είναι η χρήση ανεξάρτητων μεταβλητών οι οποίες είναι στατιστικά σημαντικές, δηλαδή σχετίζονται επαρκώς με την εξαρτημένη μεταβλητή (Clarke et al. 2003; Wood, 2006).

Αρχικά για τη μοντελοποίηση των μεταβλητών, παράγοντες όπως η τοπογραφία της περιοχής, κλιματικοί, δείκτες βλάστησης και δορυφορικά δεδομένα εξετάστηκαν ως προς τη συσχέτισή τους με την αυξομείωση των τιμών που προήλθαν από τη δειγματοληψία. Διαθέσιμοι χάρτες, προϊόντα χωρικής παρεμβολής δεδομένων που κατέγραψαν οι μετεωρολογικοί σταθμοί της Λέσβου, χρησιμοποιήθηκαν ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Οι χάρτες αφορούσαν μέτρηση θερμοκρασίας, ταχύτητας ανέμου και ύψους βροχοπτώσεων. Από το διαθέσιμο ψηφιακό μοντέλο εδάφους χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές υψομέτρου και οι εξαγόμενες από αυτό κλίσεις και η έκθεση. Από δορυφορική εικόνα Landsat TM5 ημερομηνίας 29-9-1992 υπολογίστηκαν οι τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI, οι τιμές ηλιακής ακτινοβολίας καθώς και οι τιμές φωτεινότητας (Brightness - TC1) χλωροφύλλης (Greenness - TC2) και υγρασίας (Wetness - TC3) με την μέθοδο Kauth–Thomas Tasseled Cap transformation (TC). Επίσης εφαρμόστηκε η μέθοδος Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (Principal Component Analysis - PCA) σε 3 συνιστώσες. Τέλος απομονώθηκε ο διάυλος 4 που καταγράφει την υπέρυθη ακτινοβολία και ανιχνεύει με ακρίβεια την ύπαρξη βλάστησης.

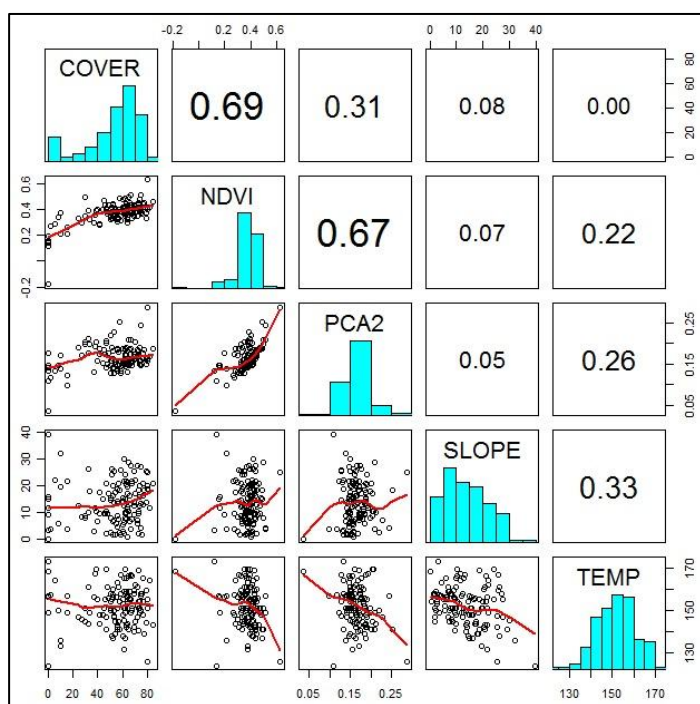
Οι παραγόμενοι χάρτες ως πιθανές μεταβλητές πρόβλεψης για χρησιμοποίηση στη μοντελοποίηση, εξετάστηκαν στατιστικά ως προς τη συσχέτισή τους με κάθε μια από τις εξαρτημένες μεταβλητές (CC), (SH), (CBH) και (CBD). Οι αναλύσεις έγιναν με το στατιστικό πακέτο R σε συνδυασμό με το Arc GIS και το εργαλείο Marine Geospatial Ecology Tools (MGET) (Roberts et al., 2008).

Τα αποτελέσματα των στατιστικών ελέγχων συσχέτισης, κατέδειξαν ως σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές οι οποίες επηρεάζουν άμεσα το ποσοστό κάλυψης κόμης, το δείκτη NDVI, το δεύτερο μέρος της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA 2), τη θερμοκρασία και τις κλίσεις (Σχήμα 1).

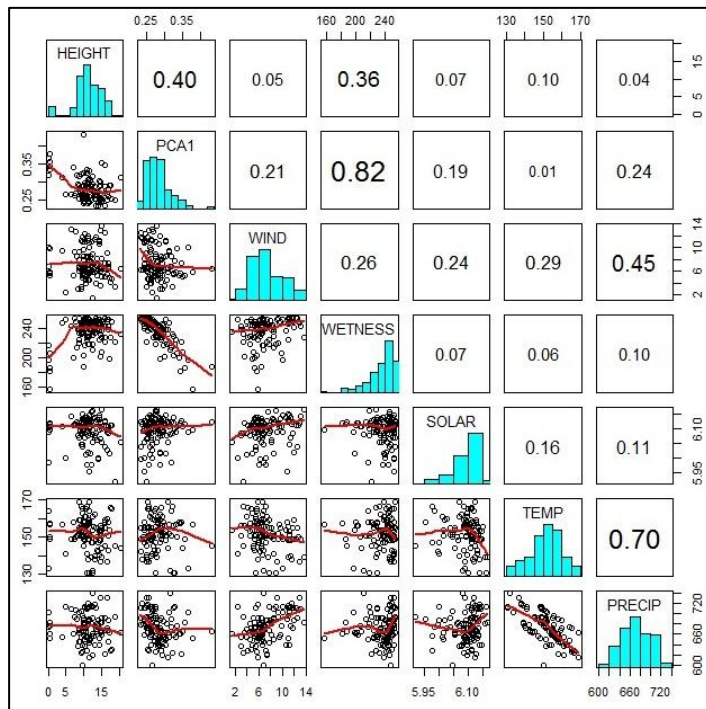
Για τη μοντελοποίηση του ύψους δέντρων η μεγαλύτερη συσχέτιση παρατηρήθηκε στο πρώτο μέρος της Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (PCA 1), στη θερμοκρασία, στην ηλιακή ακτινοβολία, στην ταχύτητα του ανέμου, στο ύψος βροχοπτώσεων και στο δείκτη υγρασίας (Wetness - TC3) του Tasseled Cap transformation (Σχήμα 2).

Αντίστοιχα το μέσο ύψος έναρξης κόμης επηρεάζεται άμεσα από την ταχύτητα του ανέμου, το δείκτη NDVI, το δείκτη υγρασίας (Wetness - TC3) και το ύψος βροχοπτώσεων (Σχήμα 3).

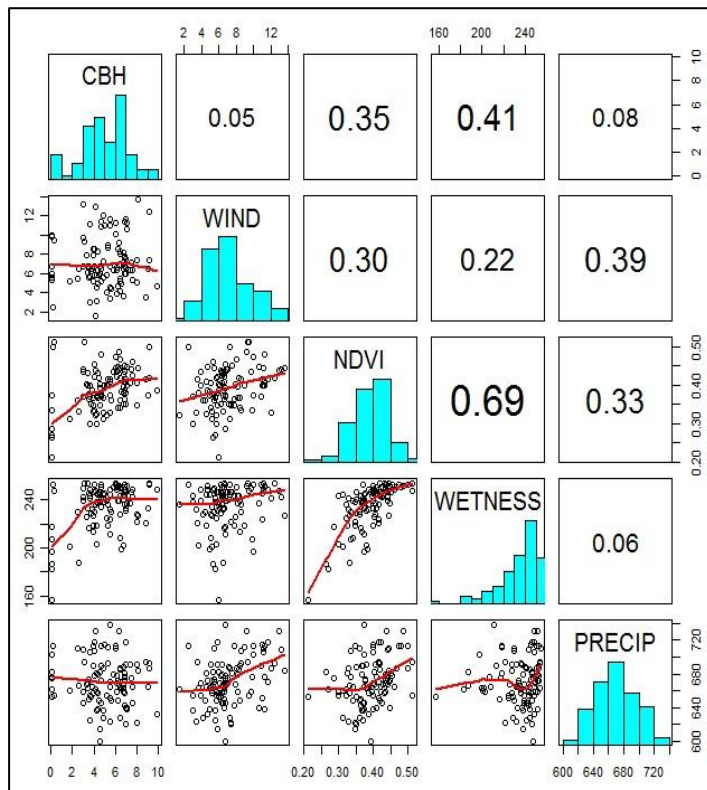
Τέλος η πυκνότητα κόμης σχετίζεται ισχυρότερα με το ύψος βροχοπτώσεων, το δείκτη υγρασίας (Wetness - TC3), τη θερμοκρασία και την ηλιακή ακτινοβολία (Σχήμα 4).



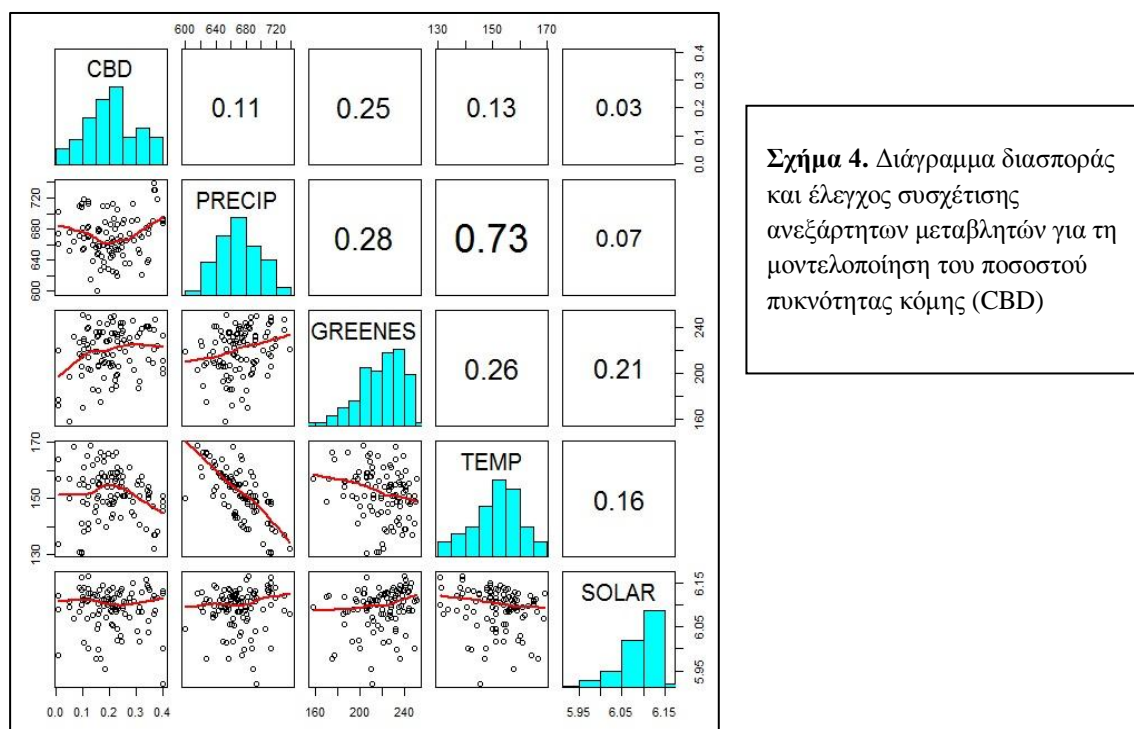
Σχήμα 1. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ποσοστού κάλυψης κόμης (COVER)



Σχήμα 2. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ύψους δέντρων (HEIGHT)



Σχήμα 3. Διάγραμμα διασποράς και έλεγχος συσχέτισης ανεξάρτητων μεταβλητών για τη μοντελοποίηση του ύψους έναρξης κόμης (CBH)

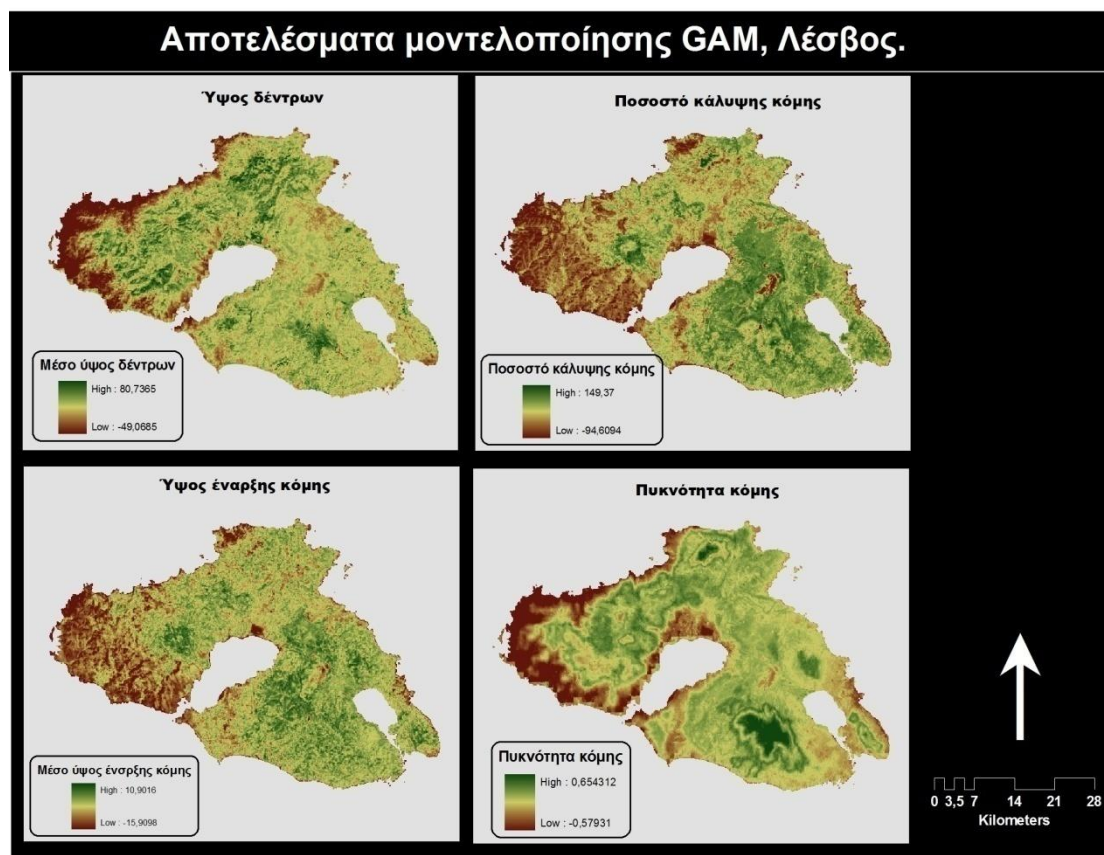


Επόμενο βήμα μετά την εύρεση των στατιστικά σημαντικών μεταβλητών ήταν η προσαρμογή του μοντέλου GAM με τη χρήση του πακέτου mgcv της R (Wood, 2006), διαμέσου του Arc GIS και του εργαλείου Marine Geospatial Ecology Tools (MGET). Η γενική μορφή της φόρμουλας των GAM είναι:

Εκτιμώμενη μεταβλητή (Response variable) = s (επεξηγηματική μεταβλητή 1) + s (επεξηγηματική μεταβλητή 2)... + s (επεξηγηματική μεταβλητή i)

όπου s (spline) = ο εξομαλυντής των τιμών και i = το πλήθος των επεξηγηματικών ανεξάρτητων μεταβλητών.

Με τη διαδικασία αυτή προέκυψαν 4 χάρτες της Λέσβου, αναφορικά με το ποσοστό κάλυψης κόμης (CC), το μέσο ύψος δέντρων (SH), το μέσο ύψος έναρξης κόμης (CBH) και την πυκνότητα κόμης (CBD) (Χάρτης 9).



Χάρτης 10. Αρχικά αποτελέσματα μοντελοποίησης GAM, για την εξαγωγή των, προαπαιτούμενων για τις προσομοιώσεις, φυσικών χαρακτηριστικών της βλάστησης

Το επόμενο βήμα για τη δημιουργία των απαιτούμενων, από το FARSITE, ASCII αρχείων, περιελάμβανε την προσαρμογή των τιμών σε ορισμένα κατώφλια και την απομόνωση της περιοχής μελέτης, με τη χρήση του Arc GIS.

Πιο συγκεκριμένα στο χάρτη μέσου ύψους δέντρων ανάλογα με το είδος του δέντρου επιλέχθηκαν τα εξής κατώφλια μέσου ύψους: ελαιώνες 6m, καστανιές 14m, δρύες 8m, σκληρόφυλλη βλάστηση 5m και θάμνοι 5m. Το ποσοστό κάλυψης κόμης για τους ελαιώνες ορίστηκε στο 43% και για τις δρύες στο 47%. Το ύψος έναρξης κόμης για τους ελαιώνες ορίστηκε στα 2m, για τις καστανιές στα 5m, για τις δρύες στα 3m, για τη σκληρόφυλλη βλάστηση στο 1m και για τους θάμνους στο 1m. Τέλος η πυκνότητα κόμης για τους ελαιώνες ορίστηκε 0.09, καστανιές 0,05, δρύες 0,06, σκληρόφυλλη βλάστηση 0.1 και θάμνοι 0.2. Προσαρμόζοντας τις τιμές στα παραπάνω κατώφλια, ελέγχονται οι ακραίες τιμές των αποτελεσμάτων.

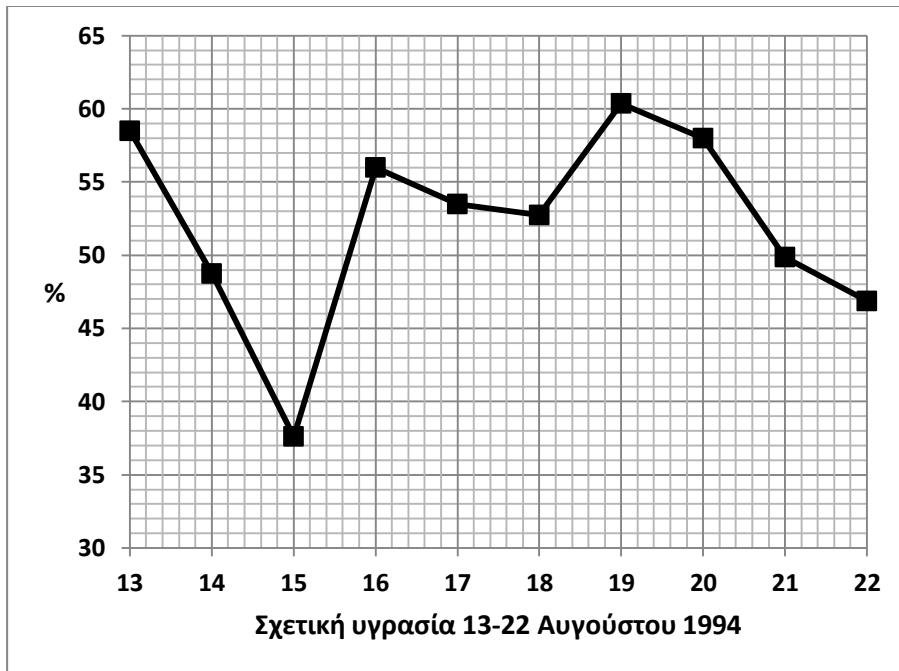
Το τελευταίο βήμα για τη δημιουργία των χωρικών εισροών που απαιτεί το FARSITE ήταν η απομόνωση (mask) της περιοχής γύρω από την περίμετρο της πυρκαγιάς της 15^{ης} Αυγούστου του 1994 (Χάρτης 10). Όλοι οι χάρτες που εισάγονται στο FARSITE, είναι σημαντικό να βρίσκονται σε κοινό προβολικό σύστημα και με πλήρη επικάλυψη. Σε περίπτωση που τα εικονοστοιχεία κάθε χάρτη δε συμπίπτουν ακριβώς με των υπολοίπων, επιβάλλεται γεωμετρική διόρθωση.

Εκτός από τα χωρικά δεδομένα το FARSITE, για την διεξαγωγή της προσομοίωσης, απαιτεί ως εισροές και κλιματικά δεδομένα σε χρονική ανάλυση. Πιο συγκεκριμένα το λογισμικό λαμβάνει υπ όψη δεδομένα καιρού (.WTR file), ανέμου (.WND file) καθώς και την περιεχόμενη υγρασία κάθε MKY (.FMS file). Για την δημιουργία τους χρησιμοποιήθηκαν καταγεγραμμένα, από το μετεωρολογικό σταθμό του αερολιμένα Μυτιλήνης, καιρικά δεδομένα για τις 15-20 Αυγούστου του 1994.

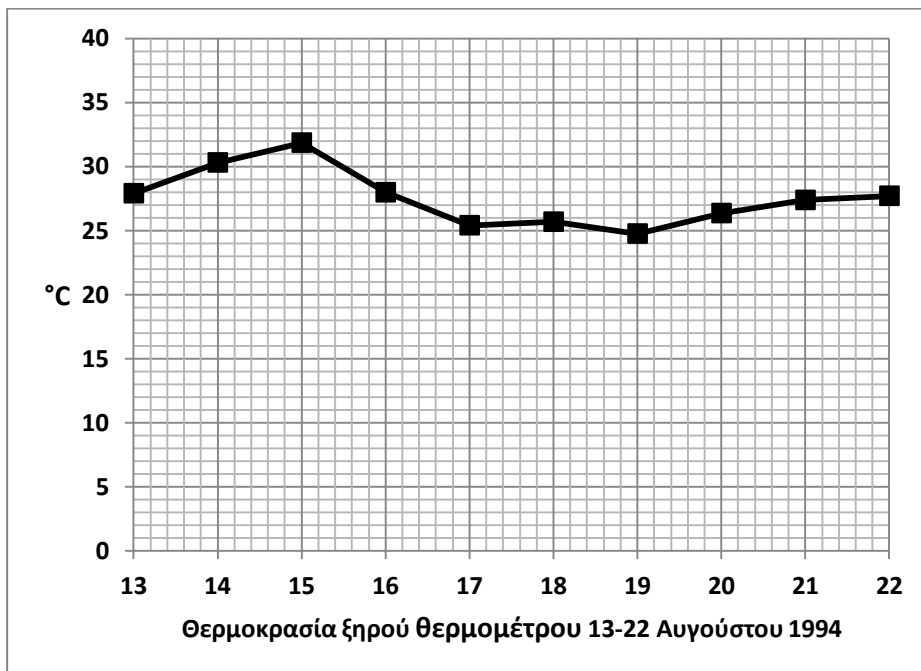
Το αρχείο καιρού (.WTR) περιέχει ημερήσιες πληροφορίες για την θερμοκρασία, την υγρασία και την βροχόπτωση. Πιο συγκεκριμένα περιέχει την ποσότητα βροχής που εισάγεται σε χιλιοστά, την ελάχιστη και τη μέγιστη θερμοκρασία στην ακριβή ώρα καταγραφής της, την υγρασία που καταγράφηκε παράλληλα με τη μέγιστη ή ελάχιστη θερμοκρασία, και το υψόμετρο του μετεωρολογικού σταθμού. Οι πληροφορίες καιρού κάθε αρχείου χρησιμοποιούνται για να γίνει παρεμβολή των τιμών υγρασίας και θερμοκρασίας για τις ώρες μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της ημέρας.

Το αρχείο ανέμου (.WND file), περιέχει την ωριαία ταχύτητα ανέμου (μίλια ανά ώρα), την ωριαία διεύθυνση του ανέμου και την ωριαία νεφοκάλυψη και ορίζεται ως ποσοστό (ακέραιος 0-100).

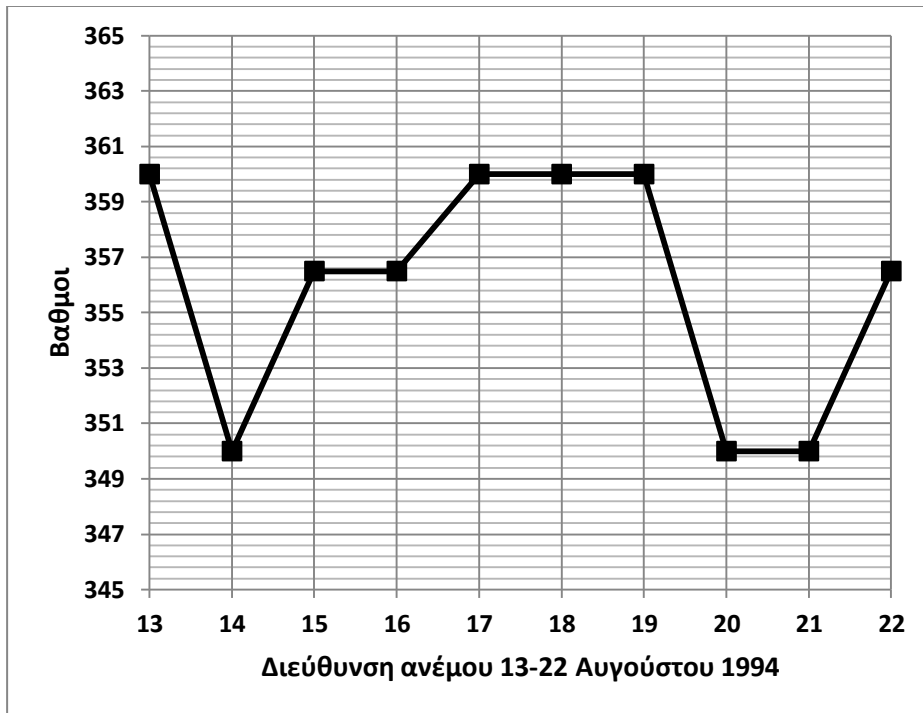
Στα σχήματα 4, 5, 6 και 7 παρουσιάζονται οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή μεταξύ 13-22 Αυγούστου το 1994.



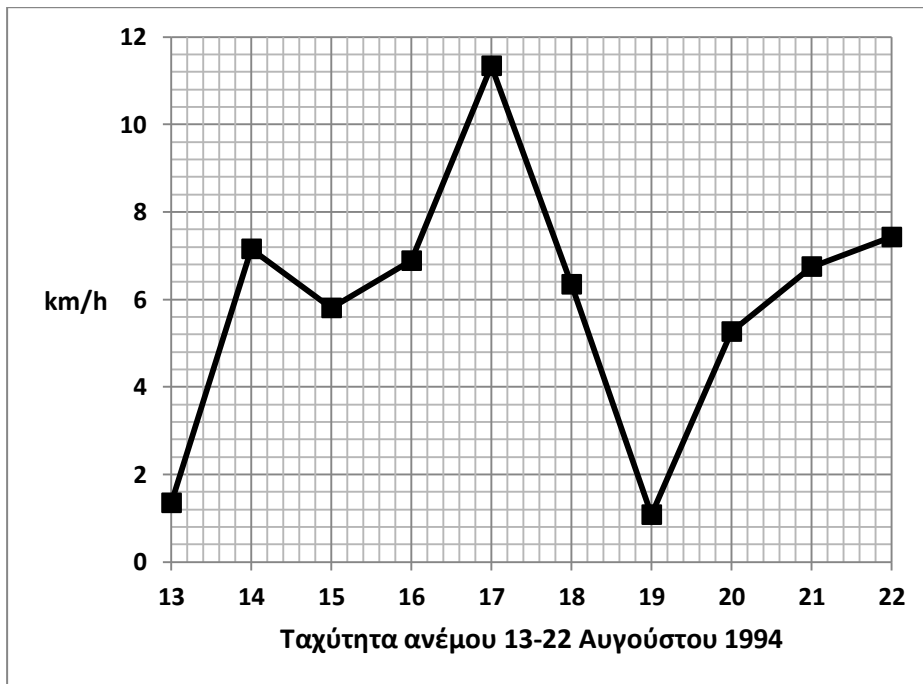
Σχήμα 4. Μέση ημερήσια σχετική υγρασία πυρικής περιόδου



Σχήμα 5. Μέση ημερήσια θερμοκρασία πυρικής περιόδου

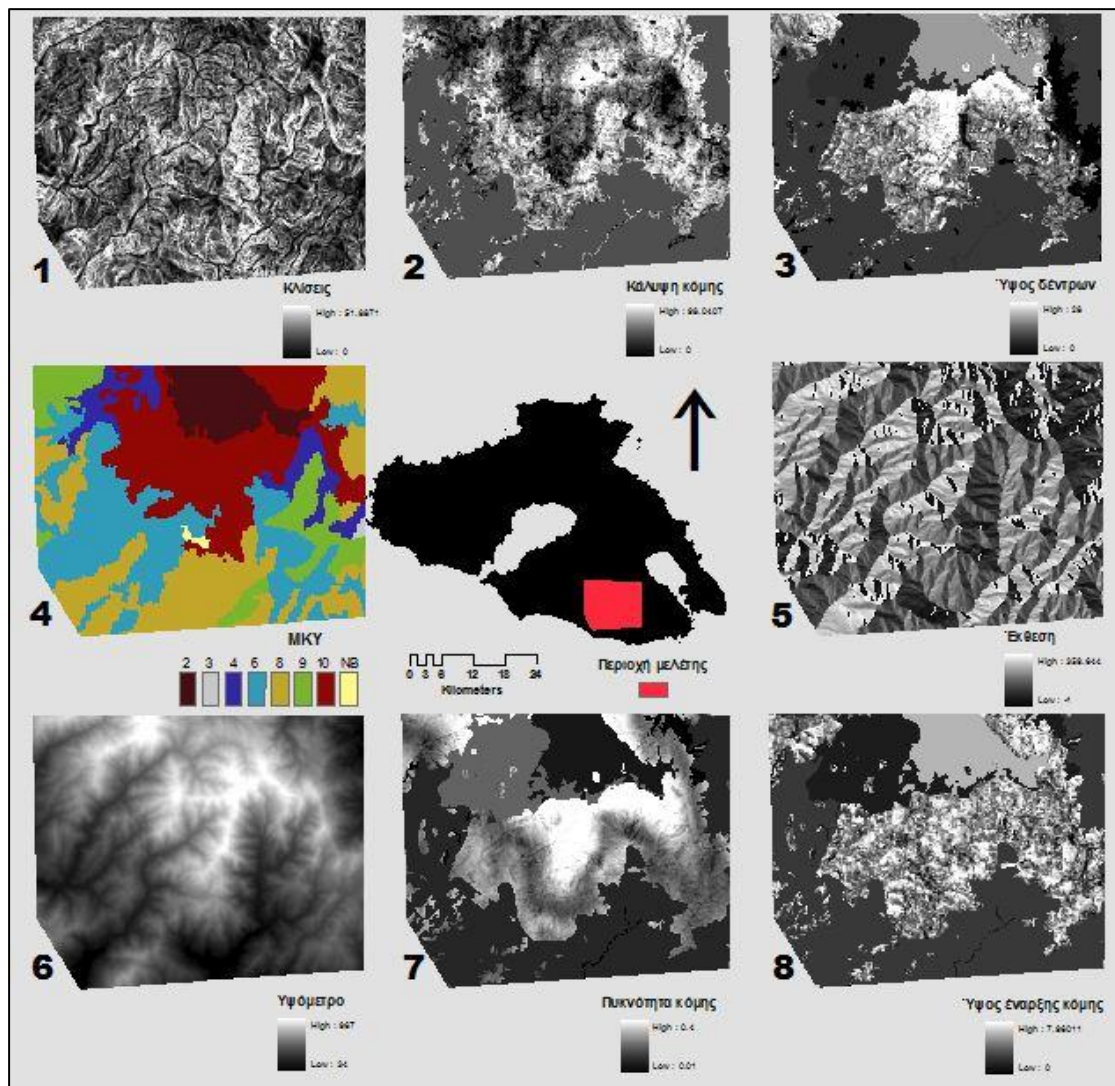


Σχήμα 6. Μέση ημερήσια διεύθυνση ανέμου πυρικής περιόδου



Σχήμα 7. Μέση ημερήσια ταχύτητα ανέμου πυρικής περιόδου

Τέλος το αρχείο περιεχόμενης υγρασίας κάθε MKY (.FMS file), περιέχει τιμές καταγεγραμμένης υγρασίας για κλαδάκι 1h, 10h και 100h καθώς και υγρασία ζωντανής ποώδους και ζωντανής ξυλώδους βλάστησης. Οι τιμές προκύπτουν από τα μετεωρολογικά δεδομένα. Στην περίπτωση μας ορίστηκαν η περιεχόμενη υγρασία νεκρής καύσιμης ύλης για 1-hr TL: 3%, για 10-hr TL: 4% και για 100-hr TL: 5%. Η περιεχόμενη υγρασία ζωντανής ποώδους βλάστησης (LH) ορίστηκε 60% ενώ η ξυλώδους 90%.



Χάρτης 11. Απαιτούμενες χωρικές εισροές για την προσομοίωση της πυρκαγιάς του Μεγαλοχωριού από το FARSITE

Με την εισαγωγή λοιπόν όλων των απαιτούμενων τοπογραφικών, περιβαλλοντικών και κλιματικών εισροών σε μορφή ASCII, η προσομοίωση ήταν έτοιμη για εκτέλεση. Ο καθορισμός των παραμέτρων του μοντέλου που ρυθμίζουν τη χωρική και χρονική ανάλυση των προσομοιώσεων ορίστηκαν ως χρονικό βήμα τα 30min, οπτικό βήμα επίσης τα 30min, ανάλυση της περιμέτρου τα 60m και ανάλυση απόστασης εξάπλωσης τα 30m.

Εν συνεχεία για να να ερευνηθεί η χωρική διαφοροποίηση της συμπεριφοράς της φωτιάς τα χωρικά δεδομένα εισήχθησαν στο λογισμικό FlamMap. Οι χωρικές απαιτήσεις για την διεξαγωγή της προσομοίωσης από το λογισμικό είναι όμοιες με αυτές του FARSITE ενώ οι μεταβλητές του καιρού, της υγρασίας καύσιμης ύλης και του ανέμου θεωρούνται για όλη την περιοχή σταθερές. Έτσι λοιπόν ως σταθερή τιμή ταχύτητας και κατεύθυνσης ανέμου ορίστηκε η πλειονότητα καταγεγραμμένων τιμών (ποσοστημόριο 95%) σε 7 mph (1 mph = 1609.344 m/h) και 340° αντίστοιχα. Οι τιμές υγρασίας καύσιμης ύλης αντλήθηκαν από το αρχείο της περιεχόμενης υγρασίας κάθε MKY (.FMS file) και η υγρασία κόμης ορίστηκε 100%.

4.4.2 Εκτίμηση ανασύστασης με δειγματοληψίες στο πεδίο

Επίγειες οπτικές μετρήσεις διενεργήθηκαν δειγματοληπτικά στην πληγείσα από την πυρκαγιά περιοχή του Μεγαλοχωρίου μεταξύ Ιανουαρίου και Ιουνίου του 2012. Σε 30 δειγματοληπτικές επιφάνειες με εμβαδόν 50 m², μετρήθηκαν μεταβλητές, οι τιμές των οποίων οδηγούν στην εκτίμηση της υπάρχουσας κατάστασης 18 χρόνια μετά την πυρκαγιά. Η σημερινή κατάσταση της βλάστησης (και κατ επέκταση η μεταπυρική αναγέννηση) εκτιμήθηκε με τη μέτρηση, σε κάθε δειγματοληπτική θέση, μεταβλητών όπως ο αριθμός νέων δενδρυλλίων, το μέσο ύψος θαμνώνων, δενδρυλλίων και φρυγάνων, στηθαία διάμετρος και ύψος δενδρυλλίων ανά θέση και τέλος μετρήθηκε και ο τύπος εδαφοκάλυψης σε 4 σημεία (με κάνναβο 0,5 m x 0,5 m). Τα αποτελέσματα καταχωρήθηκαν χωρικά μέσω ΣΓΠ και εξετάστηκε η συσχέτιση του αριθμού νεαρών φυταρίων ανά τετραγωνικό μέτρο, με τις τιμές του δείκτη βλάστησης NDVI (Μάρτιος 2012).

Τέλος εφαρμόστηκε η μέθοδος ανίχνευσης αλλαγών για μια χρονοσειρά εξαγόμενων NDVI για την περιοχή, ούτως ώστε να εξεταστεί η όποια πορεία ανάκαμψης της πληγείσας περιοχής μετά το συμβάν.

Ο δείκτης εξήχθη από δορυφορικά δεδομένα Landsat TM 5 για πέντε ημερομηνίες [Πίνακας 5] οι οποίες αντικατοπτρίζουν την κατάσταση της βλάστησης στην περιοχή πριν και μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Για κάθε μια από τις πέντε εξαγόμενες εικόνες, απομονώθηκαν οι τιμές του δείκτη στις θέσεις που διενεργήθηκαν οι δειγματοληψίες στο πεδίο.

Πίνακας 5. Δορυφορικά δεδομένα για την ανίχνευση αλλαγών του δείκτη NDVI

Ημερομηνία Λήψης	Τύπος Σένσορα	Δορυφόρος	Διακριτική ικανότητα (m)
29/9/1992	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
8/8/1999	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)	Landsat 7	30
14/10/2003	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
24/8/2008	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30
30/8/2011	Thematic Mapper (TM)	Landsat 5	30

5. Αποτελέσματα – Συζήτηση

5.1 Δείκτες σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης

5.1.1 ΔNBR

Τα αποτελέσματα του δείκτη σφοδρότητας ΔNBR, περιλαμβάνουν τιμές για τις έξι πληγείσες περιοχές της Λέσβου καθώς και για την πυρκαγιά της Λευκίμης Έβρου. Η εκτίμηση σφοδρότητας με χρήση του ΔNBR από δορυφορικά δεδομένα Landsat έγινε για περιόδους αμέσως μετά την πυρκαγιά (Πασπαλάς, Νυφίδα, Ραχώνας, Λευκίμη), 1 χρόνο μετά την πυρκαγιά (Χαραμίδα, Πετσοφάς) και 2 χρόνια μετά την πυρκαγιά (Αμαλή).

Σύμφωνα με τους Key and Benson, 2006, ο υπολογισμός του δείκτη ΔNBR αμέσως μετά την πυρκαγιά, ανιχνεύει της άμεσες επιπτώσεις της στη βλάστηση και κατ'επέκταση είναι μια καίρια εκτίμηση της σφοδρότητάς της.

Ο υπολογισμός του δείκτη 1 χρόνο μετά το περιστατικό, ανιχνεύει την τάση της βλάστησης για μεταπυρική αναγέννηση, ενώ 2 χρόνια μετά το περιστατικό ο δείκτης ανιχνεύει τη διαδοχή της βλάστησης, την πορεία της μεταπυρικής αναγέννησης και εν γένει την τάση για ανασύσταση του πυρικού περιβάλλοντος.

Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Χάρτη 12, είναι οι ταξινομημένες τιμές σε κλάσεις σφοδρότητας 1-7 σύμφωνα με τις τιμές ταξινόμησης που προτείνουν οι Key and Benson, 2006. Για καλύτερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, παρέχονται στον Πίνακα 5, τα ποσοστά της σφοδρότητας επί του συνόλου της καμένης έκτασης για την εκάστοτε περίπτωση.

Αρχικά όπως φαίνεται στο Χάρτη 12, είναι εμφανής η διαφορά στις τιμές ΔNBR της Αμαλής, με τις τιμές του Πασπαλά, της Νυφίδας, του Ράχωνα και της Λευκίμης. Εμφανίζονται χαμηλές, κάτι που προσδιορίζει τη σφοδρότητα της πυρκαγιάς μέτρια έως χαμηλή ή την αρχή της μεταπυρικής αναγέννησης και της διαδοχής του πυρικού περιβάλλοντος 2 χρόνια μετά την πυρκαγιά. Στην περίπτωση της πυρκαγιάς του 1999 στην Αμαλή λοιπόν, παρατηρείται ότι η σφοδρότητα είναι η χαμηλότερη όλων, κάτι που φωτογραφίζει πως το 2001 (η χρονολογία της δορυφορικής λήψης) ήδη η αναγέννηση (φυσική και τεχνητή) είναι αισθητή, με αποτέλεσμα να αλλοιώνεται η μεταπυρική φασματική απόκριση της περιοχής.

Αντιθέτως στις περιπτώσεις του Πασπαλά, της Νυφίδας και της Λευκίμης, οι οποίες εξετάζονται αμέσως μετά την πυρκαγιά, οι τιμές σφοδρότητας είναι αρκετά υψηλές. Ιδιαίτερα η περίπτωση του Πασπαλά, εμφανίζει μια ομοιογένεια σε υψηλές τιμές σφοδρότητας. Ο λόγος είναι ότι αφενός μεν ήταν μια καταστροφική πυρκαγιά με υψηλή ένταση και σφοδρότητα, αφετέρου δε κατέκαψε αμιγώς δασικές εκτάσεις (εξ ου και το όνομα Καμένο Δάσος που αποδόθηκε στην περιοχή) τραχείας Πεύκης, μέσης ηλικίας 40 ετών. Οι αλλαγές λοιπόν στη φασματική απόκριση της περιοχής (ιδιαίτερα στο υπέρυθρο μήκος κύματος) ήταν ραγδαίες αμέσως μετά την πυρκαγιά, με εμφανή αντίκτυπο στις τιμές του ΔNBR, που ειδικεύεται στην ανίχνευση αλλαγών

της βλάστησης. Αντίθετα στις περιπτώσεις της Λευκίμης και της Νυφίδας κήκαν εκτός των δασικών και αγροτολιβαδικές εκτάσεις, καθώς και καλλιέργειες.

Αλλωστε όπως ρητά αναφέρει και η υπάρχουσα βιβλιογραφία, η ανίχνευση αλλαγών στη βλάστηση μέσω του δείκτη ΔNBR, έχει μεγαλύτερη ακρίβεια σε αμιγώς δασικά οικοσυστήματα.

Η περίπτωση της πυρκαγιάς του 2006 στη Χαραμίδα είναι ιδιαίζουσα. Παρόλο που εξετάζεται ένα χρόνο μετά την πυρκαγιά και κανείς θα περίμενε η αναγέννηση και η τάση διαδοχής της βλάστησης να είναι σε αρχικό στάδιο, παρατηρείται πολύ μεγάλο εύρος υψηλών τιμών σφοδρότητας, κάτι που υποδηλώνει το αντίθετο. Αυτό αποδίδεται σε τρεις παράγοντες. Πρώτον η πυρκαγιά του 2006 στη Χαραμίδα ήταν ιδιαίτερα σφοδρή και με μεγάλη ένταση. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα την ολοσχερή αποτέφρωση της βλάστησης και κατ'επέκταση δεν έμειναν καθόλου σπορείς και τη σε μεγάλο βαθμό υποβάθμιση του εδάφους κυρίως λόγω διάβρωσης. Δεύτερον αμέσως μετά την πυρκαγιά έγιναν αμυδρές προσπάθειες για τεχνητή αναγέννηση, η οποίες όμως δεν καρποφόρησαν καθώς στην περιοχή δραστηριοποιείται παράνομη βόσκηση. Τρίτον η πληγείσα περιοχή το 2006 είχε ξανακαεί στο παρελθόν (1977), κάτι που οριστικά εκμηδένισε τις πιθανότητες φυσικής αναγέννησης καθώς πιθανοί σπόροι Πεύκης καταστράφηκαν εκ νέου. Αυτοί λοιπόν είναι και οι λόγοι που εμφανίζονται οι τιμές του δείκτη ΔNBR σαν να πρόκειται για "φρεσκοκαμένη" περιοχή, με μηδενική σχεδόν αναγέννηση.

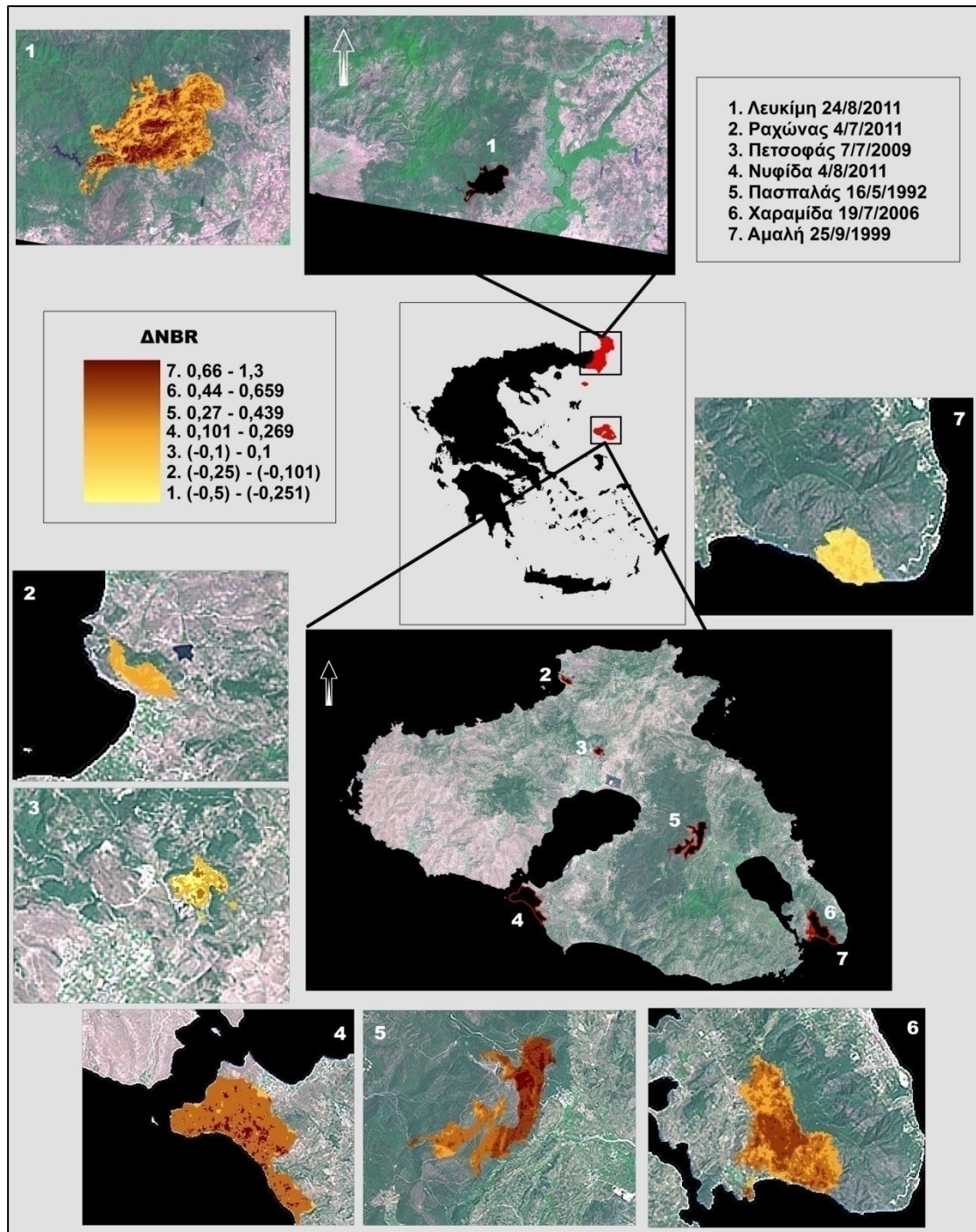
Αξίζει να σημειωθεί ότι η περιοχή είναι υποβαθμισμένη ακόμα και σήμερα, έξι χρόνια μετά την πυρκαγιά, με σχεδόν μηδενικό ανώροφο και νεαρά άτομα Πεύκης, το έδαφος εμφανώς έχει υποστεί διάβρωση (η περιοχή έχει έντονη κλίση) και ο υπόροφος κυριαρχείται από παρασιτικά φυτά (Φωτο. 1 και 2).



Φωτο. 1.2. Η πληγείσα περιοχή της Χαραμίδας έξι χρόνια μετά την πυρκαγιά.

Πίνακας 6. Αποτελέσματα ταξινόμησης των τιμών του ΔNBR (%)

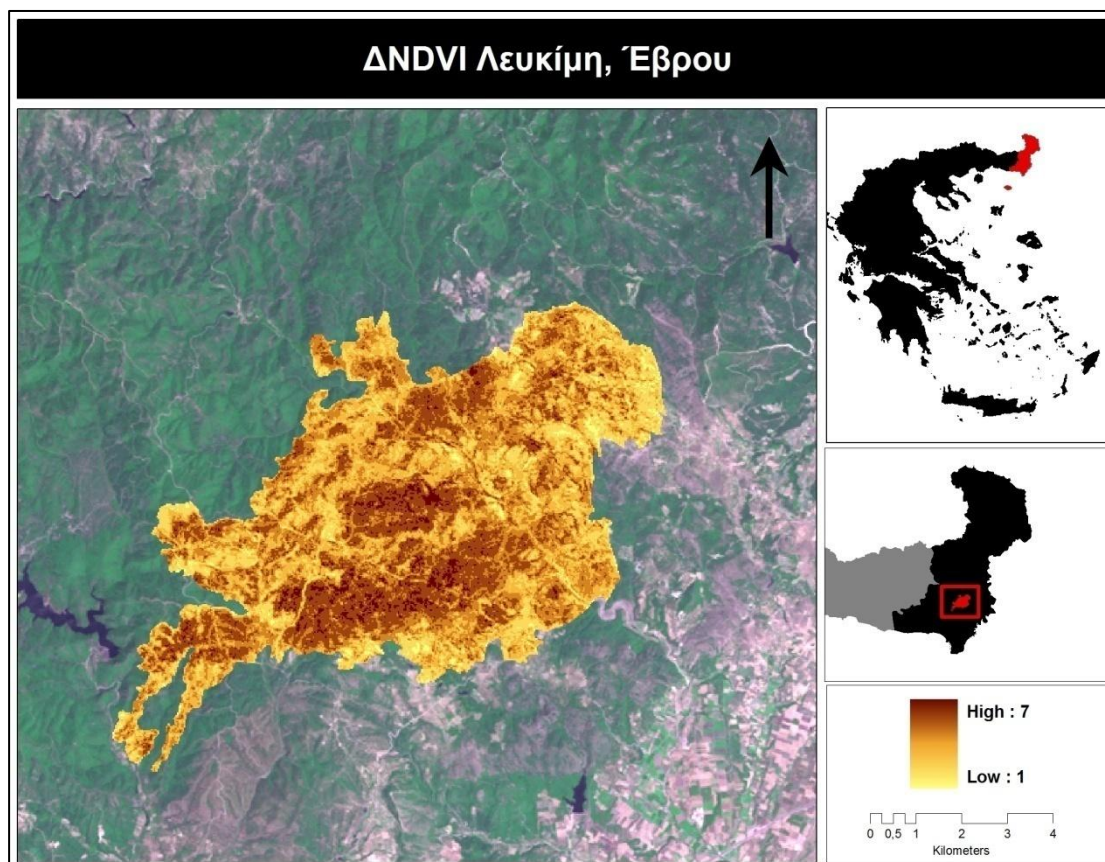
ΔNBR CLASS	Πυρκαγιά						
	Λευκίμη	Ραχώνας	Πετσοφάς	Νυφίδα	Πασπαλάς	Χαραμίδα	Αμαλή
1	0,01%	-	40,37%	0,67%	-	-	7,37%
2	0,25%	2,29%	0,14%	4,76%	-	0,57%	74,44%
3	13,87%	25,23%	11,49%	83,76%	-	1,04%	18,02%
4	29,90%	72,48%	31,61%	10,82%	6,51%	28,59%	0,17%
5	25,30%	-	15,95%	-	40,03%	43,60%	-
6	22,41%	-	0,43%	-	42,21%	25,66%	-
7	8,27%	-	-	-	11,25%	0,53%	-



Χάρτης 12. Δείκτης σφοδρότητας και μεταπυρικής αναγέννησης ΔNBR, για τις περιοχές της Λέσβου και του Έβρου. Τα αποτελέσματα εμφανίζονται ταξινομημένα σε επτά κλάσεις σφοδρότητας σύμφωνα με τους Key and Benson, 2006.

5.1.2 ΔNDVI

Ο κανονικοποιημένος δείκτης βλάστησης ΔNDVI, εμφανίζει σημαντικές ομοιότητες με τον δείκτη ΔNBR καθώς και οι δυο ανιχνεύουν αλλαγές της ανακλώμενης ακτινοβολίας στο εγγύς υπέρυθρο κανάλι κάτι που τους καθιστά ευαίσθητους στις αλλαγές της βλάστησης. Η μόνη διαφορά τους είναι ότι ο ΔNBR συνδυάζει το εγγύς υπέρυθρο με το μέσο υπέρυθρο, ενώ ο ΔNDVI με το ορατό ερυθρό. Αυτό καθιστά τον ΔNBR εξειδικευμένο για την ανίχνευση επιπτώσεων πυρκαγιάς στη βλάστηση των δασικών οικοσυστημάτων. Ωστόσο έχει αναφερθεί σε ορισμένες περιπτώσεις πως ο ΔNDVI ανιχνεύει με σχετική ακρίβεια και αλλαγές σε περιοχές με πιο αραιή βλάστηση. Εν τούτοις δεν είναι λίγες οι περιπτώσεις που οι δύο δείκτες έχουν χρησιμοποιηθεί συνδυαστικά για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση της πυρκαγιάς που έλαβε χώρα το καλοκαίρι του 2011 στη Λευκίμη, Έβρου, υπολογίστηκαν οι τιμές των αλλαγών του δείκτη NDVI για περιόδους πριν και αμέσως μετά την εκδήλωση της πυρκαγιάς. Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Χάρτη 13 εμφανίζονται παρόμοια με αυτά του Χάρτη 12. Το εύρος τιμών μπορεί να εμφανίζεται κάπως μικρότερο και με μια τυπική απόκλιση της τάξης του 0.15, όμως ανιχνεύει τις επιπτώσεις της πυρκαγιάς σε περιοχές με αραιότερη βλάστηση, σε σημεία δηλαδή περιμετρικά του πυρήνα της καμένης δασικής έκτασης, όπου ο ΔNBR εμφανίζει χαμηλή τιμή. Αυτό είναι απόρροια της χρησιμοποίησης του ορατού ερυθρού μήκους κύματος από τον ΔNDVI.



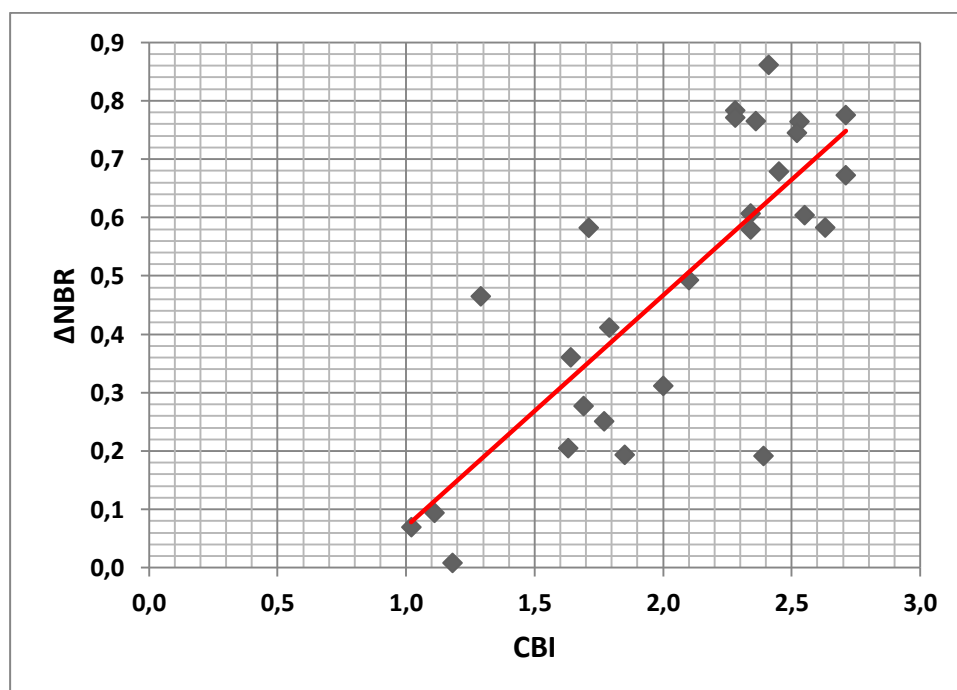
Χάρτης 13. Δείκτης σφοδρότητας ΔNDVI για την πυρκαγιά της Λευκίμης Έβρου.

5.2 Συσχέτιση CBI – NBR - NDVI

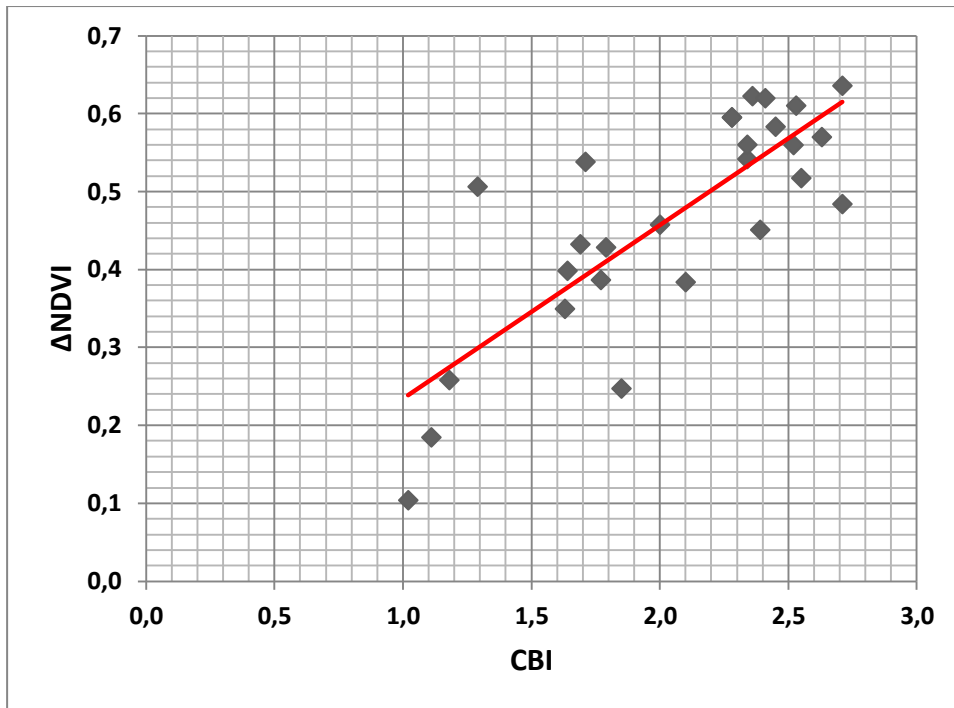
Πλήθος μελετών όπως προαναφέρθηκε, έχουν παρουσιάσει προσεγγίσεις οι οποίες χρησιμοποιούν συνδυαστικά επίγειες οπτικές μετρήσεις και δείκτες εξαγόμενους από δορυφορικά δεδομένα για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης. Ο έλεγχος συσχέτισης που γίνεται μεταξύ των επίγειων και των δορυφορικών δεικτών, εμφανίζει υψηλές τιμές σε πληγέντα δασικά οικοσυστήματα στις περισσότερες των περιπτώσεων. Μάλιστα δε λείπουν και οι αναφορές που θεωρούν το συνδυασμό επίγειων οπτικών εκτιμήσεων και μεθόδων τηλεπισκόπησης, αναγκαίο και προαπαιτούμενο για την ακριβή εκτίμηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς.

Έτσι λοιπόν η περίπτωση της πυρκαγιάς το καλοκαίρι του 2011 στη Λευκίμη, Έβρου, εξετάστηκε συνδυαστικά με την εξαγωγή των ΔNBR και $\Delta NDVI$ καθώς και με την επίγεια μέτρηση των επιπτώσεων της πυρκαγιάς και την εξαγωγή του δείκτη CBI. Η συσχέτιση Pearson μεταξύ των τριών εξαγόμενων δεικτών εξετάστηκε, για τις 27 δειγματοληπτικές επιφάνειες που εκτιμήθηκε ο CBI, με την απομόνωση των αντίστοιχων τιμών για κάθε εικονοστοιχείο των ΔNBR και $\Delta NDVI$.

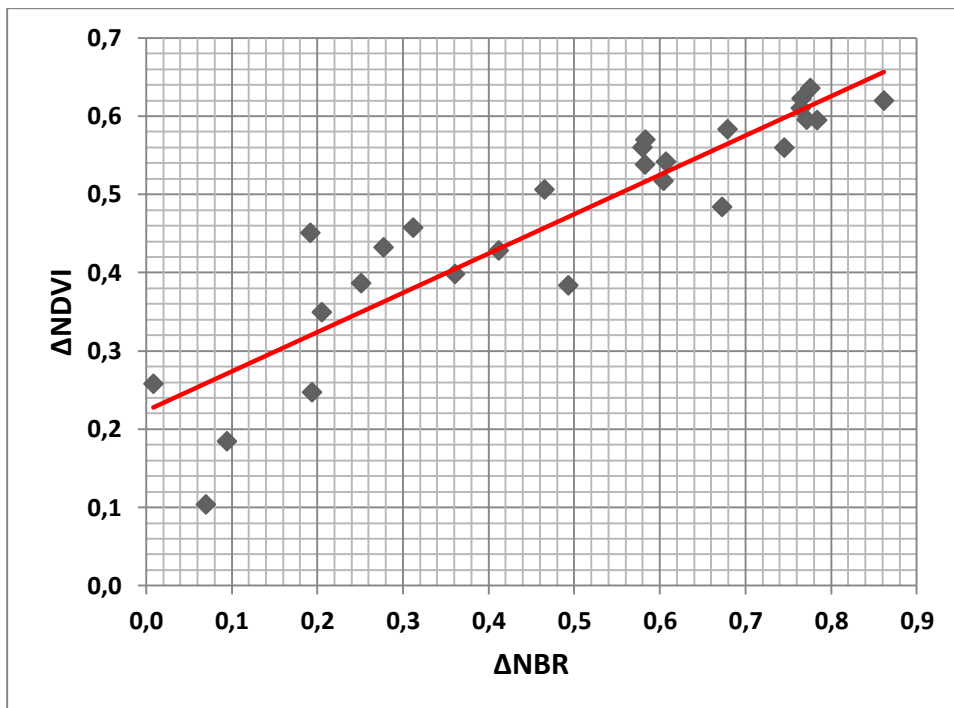
Τα αποτελέσματα του έλεγχου συσχέτισης μεταξύ των τριών δεικτών συμβαδίζουν απόλυτα με αυτά των ανάλογων προσεγγίσεων καθώς εμφανίστηκε πολύ υψηλή. Πιο συγκεκριμένα οι 27 τιμές μεταξύ του CBI και των ΔNBR και $\Delta NDVI$ παρουσίασαν ισχυρά θετική συσχέτιση 0.79 και 0.80 αντίστοιχα (Σχήμα 5 και 6). Επίσης ισχυρή θετική συσχέτιση εμφάνισαν και οι τιμές των δεικτών ΔNBR και $\Delta NDVI$ η οποία έφτασε το 0.91 (Σχήμα 7)



Σχήμα 8. Διάγραμμα διασποράς για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των τιμών του CBI και του ΔNBR



Σχήμα 9. Διάγραμμα διασποράς για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των τιμών του CBI και του ΔNDVI



Σχήμα 10. Διάγραμμα διασποράς για τον έλεγχο συσχέτισης μεταξύ των τιμών του ΔNDVI και του ΔNBR

5.3 Προσομοίωση πυρκαγιάς Μεγαλοχωρίου

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της πυρκαγιάς του Μεγαλοχωρίου, με τα λογισμικά FARSITE και FlamMap, περιλαμβάνουν τη γεωγραφική αποτύπωση των χαρακτηριστικών της. Οι προσομοιώσεις λαμβάνοντας υπόψη τους τρεις παράγοντες που επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά της φωτιάς που είναι η καύσιμη ύλη, οι μετεωρολογικοί παράγοντες και η τοπογραφία της περιοχής απέδωσαν πληροφορίες σχετικά με τη χωρική ποικιλομορφία της. Για την ακριβή απόκτηση πληροφορίας σχετικά με τις συνθήκες που επικρατούσαν στην περιοχή μεταξύ 15-20 Αυγούστου του 1994, χρησιμοποιήθηκαν κλιματικά δεδομένα σε τρίωρη χρονική ανάλυση για τις ημέρες της πυρκαγιάς. Ως χρονικό βήμα ορίστηκαν τα 30 min, οπτικό βήμα επίσης τα 30 min, ενώ η ανάλυση της περιμέτρου τα 60 m και η ανάλυση απόστασης εξάπλωσης επίσης τα 30 m. Τα εξαγόμενα περιγραφικά δεδομένα συμπεριφοράς της πυρκαγιάς, απεικονίζουν λεπτομερώς την ταχύτητα διάδοσης (m/min), τη θερμική ένταση μετώπου (kW/h), το μήκος φλόγας (m), το χρόνο άφιξης (h), την ένταση πυρκαγιάς κόμης (category) και την εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας (kJ/m²).

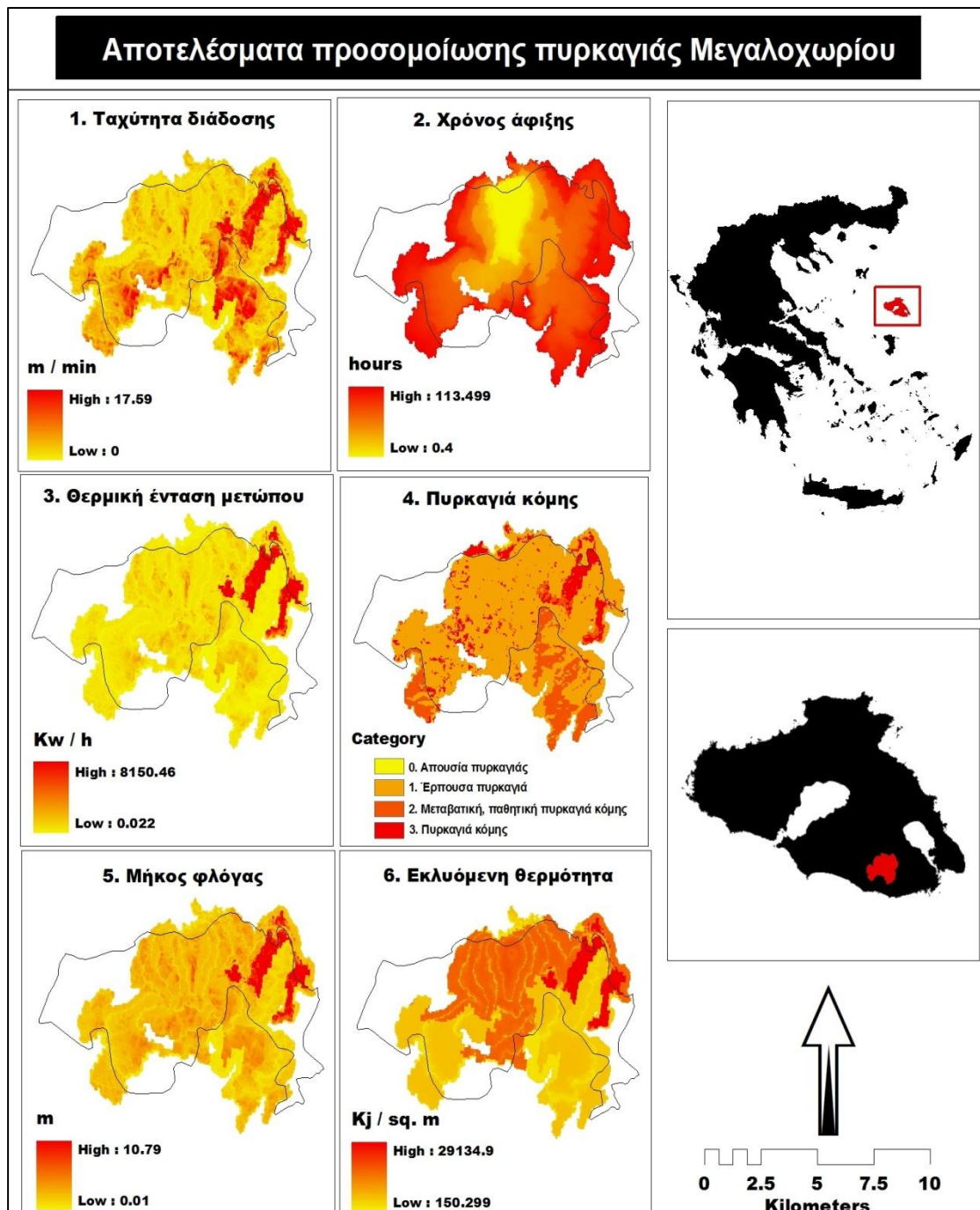
Οι εξαγόμενοι από την προσομοίωση χάρτες (Χάρτης 14 και 15) περιγράφουν μια πυρκαγιά με μεγάλη σφοδρότητα και ταχύτατη διάδοση. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στο συνδυασμό υψηλών θερμοκρασιών και αρκετά ισχυρών ανέμων, παράλληλα με τη μηδενική βροχόπτωση και κατ'επέκταση υγρασία που επικρατούσαν από 15-20 Αυγούστου του 1994 στην περιοχή. Επίσης μέγιστη συμβολή για την έκταση και την σφοδρότητά της είχε και η πυκνή και συνεχής καύσιμη ύλη που παρουσίαζε η περιοχή.

Πιο συγκεκριμένα όπως αποκαλύπτουν τα αποτελέσματα, η πυρκαγιά ήταν ιδιαίτερα σφοδρή στο βορειοανατολικό της τμήμα, καθώς εκεί παρατηρούνται οι μέγιστες τιμές θερμικής έντασης, ταχύτητας διάδοσης και εκλυόμενης θερμότητας (Χάρτης 14 και 15). Γνωρίζοντας του παράγοντες που λαμβάνουν υπ όψη οι αλγόριθμοι των προσομοιώσεων γίνονται εύκολα αντιληπτοί, οι λόγοι που το τμήμα αυτό παρουσιάζει υψηλές τιμές στα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς.

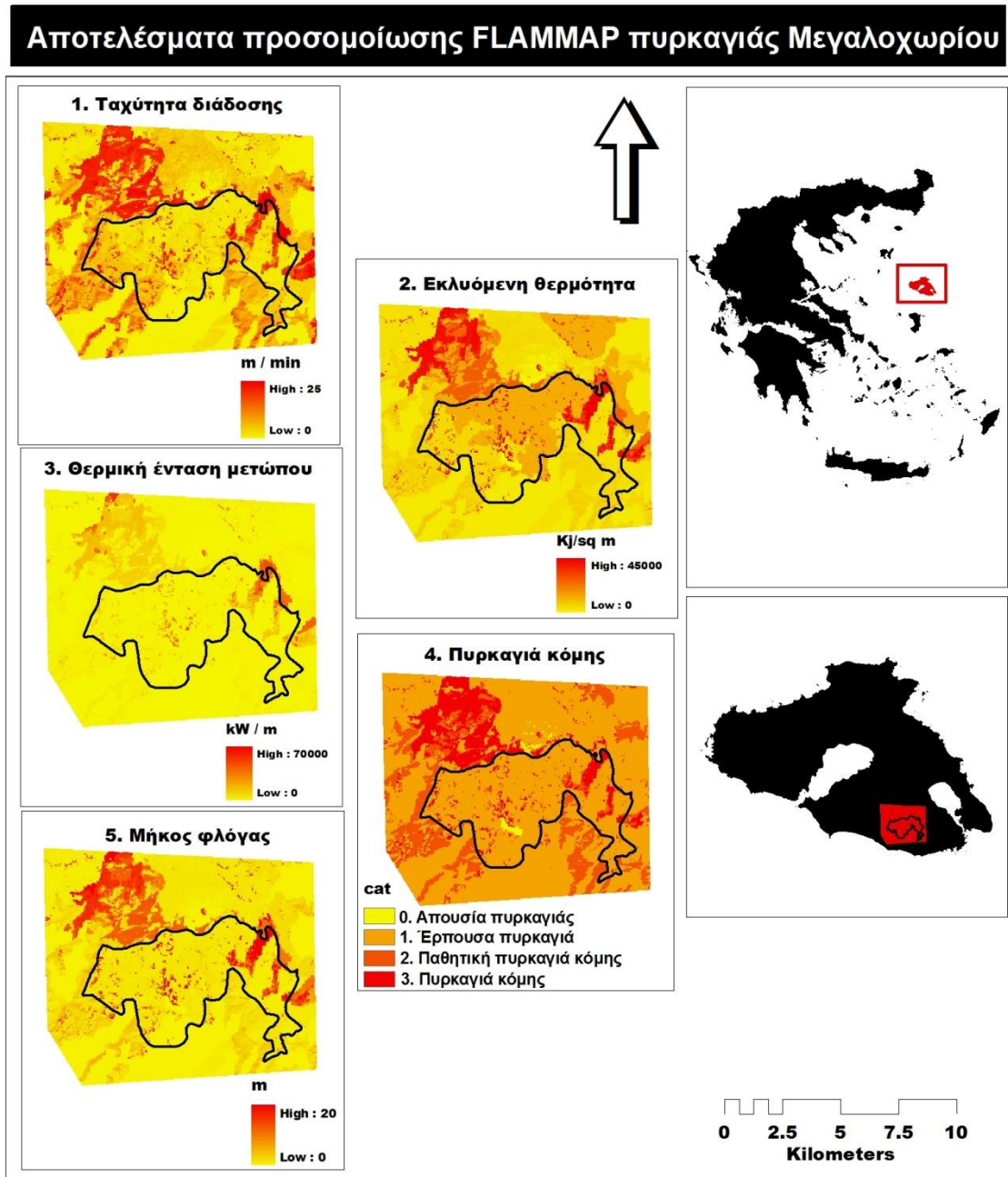
Πρώτον η κατεύθυνση του ανέμου καθ όλη τη διάρκεια της πυρκαγιάς, κυμάνθηκε από 340 – 360 μοίρες (βόρεια) όπως προκύπτει και από το γράφημα 6. Δεύτερον το βορειοανατολικό τμήμα της περιοχής καλυπτόταν από σκληρόφυλλη πυκνή και συνεχή βλάστηση (MKY 4) όπου όπως αναφέρει ο Anderson 1982, προκαλεί ταχύτερη διάδοση και μεγάλη ένταση πυρκαγιάς και από πλατύφυλλα φυλλοβόλα δάση με πλούσιο υπόροφο (MKY 9) τα οποία ευθύνονται για τη ταχεία διάδοση της έρπουσας πυρκαγιάς (Πίνακας 4, Χάρτης 10.4). Ο συνδυασμός των δυο αυτών MKY σε συνδυασμό με την πυκνή κάλυψη προφανώς οδήγησε σε μικτή πυρκαγιά και κατ επέκταση σε αυξημένη θερμική ένταση μετώπου, εκλυόμενη θερμότητα και μήκος φλόγας. Τρίτον η περιοχή εμφανίζει ευνοϊκές κλίσεις οι οποίες σε συνδυασμό με το υψηλό ποσοστό κάλυψης κόμης και πυκνότητας κόμης (Χάρτης 10.1.2.7), συνέβαλαν στην υψηλή ταχύτητα διάδοσης.

Η θερμική ένταση μετώπου καθώς και το μήκος φλόγας παρέμειναν σε χαμηλότερα επίπεδα για την υπόλοιπη περιοχή (Χάρτης 14.3.6 και 15.3.5) κυρίως λόγω της κατεύθυνσης των ανέμων, της ασυνεχούς (οριζόντια και κατακόρυφα) βλάστησης και της τοπογραφίας. Παρά τα άκρως εύφλεκτα MKY που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της περιοχής (πχ κωνοφόρα δάση MKY 10), όπως φαίνεται στο Χάρτη 10.4, το ποσοστό κάλυψης κόμης (Χάρτης 10.2) εμφανίζεται χαμηλότερο στο κεντρικό και το ανατολικό τμήμα, ενώ το ύψος έναρξης κόμης εμφανίζεται αρκετά υψηλό (Χάρτης 10.8). Αυτό ουσιαστικά συμβάλει στην αποτροπή της εμφάνισης πυρκαγιάς κόμης και κατ επέκταση μικτής πυρκαγιάς (Χάρτης 14.4 και 15.4).

Τέλος ο χάρτης 14.2 που περιγράφει το χρόνο άφιξης φωτογραφίζει την 5ήμερη πορεία της καύσης. Κεντρικά εμφανίζεται πολύ χαμηλός (40 λεπτά) καθώς εκεί είναι το σημείο ανάφλεξης (στα όρια του οικισμού του Μεγαλοχωρίου), ενώ όσο μεγαλώνει η περίμετρος διάδοσης, ο χρόνος άφιξης αυξάνει.



Χάρτης 14. Χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς του Μεγαλοχωρίου, ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης με το λογισμικό FARSITE



Χάρτης 15. Χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς του Μεγαλοχωρίου, ως αποτέλεσμα της προσομοίωσης με το λογισμικό FlamMap

5.4 Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος, Μεγαλοχώρι

Οι επιτόπιες μετρήσεις στην πληγείσα περιοχή του Μεγαλοχωρίου, έγιναν για την εκτίμηση της ανασύστασης του πυρικού περιβάλλοντος 17 χρόνια μετά την πυρκαγιά, σε συνολικά 30 δειγματοληπτικές επιφάνειες, ως επί το πλείστον στο ορεινό πευκοδάσος της περιοχής. Μετρήθηκαν το μέσος ύψος, οι μέσες στηθιαίες διαμέτροι, η έναρξη και η κάλυψη κόμης του νεοσύστατου δάσους, τα ποσοστά αναγέννησης και ο αριθμός νεαρών δενδρυλλίων ανά δειγματοληπτική επιφάνεια. Επιπλέον, καταγράφηκε η παρουσία κτηνοτροφικών μονάδων, υλοτόμησης, αναβαθμίδων, η τοπογραφική θέση και η απόσταση από άκαυτους θύλακες.

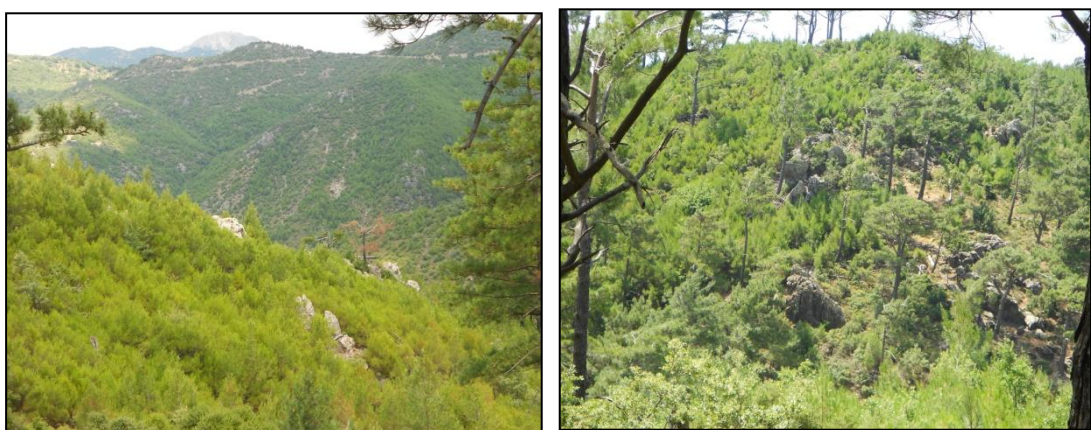
Η εικόνα της σημερινής κατάστασης στην πληγείσα περιοχή, αποκαλύπτει μια επιτυχημένη ανασύσταση του πυρικού περιβάλλοντος, με το νεοσύστατο δάσος να εμφανίζει πολύ μεγάλα ποσοστά αναγέννησης και διαδοχής. Ο ανώροφος αποτελείται ως επί το πλείστον από νεαρά άτομα μαύρης και τραχείας Πεύκης ηλικίας 10-20 ετών. Το μωσαϊκό της νεοσύστατης βλάστησης συμπληρώνεται από σκληρόφυλλους θάμνους (κυρίως πουρνάρι) και από μεγάλη ποικιλία φρύγανων.

Μάλιστα η πυκνότητα και η συνοχή της βλάστησης είναι μεγάλη σε βαθμό που καθιστά την πρόσβαση δύσκολη. Φυσικά από κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια δεν έλειπαν και οι νεκροί, από την πυρκαγιά, κορμοί οι οποίοι μαρτυρούν τη φυσική καταστροφή που υπέστη το οικοσύστημα το καλοκαίρι του 1994 (φωτο 3).

Για την επιτυχημένη ανασύσταση του δασικού οικοσυστήματος που παρατηρείται στην περιοχή, συνέβαλε πλήθος οικολογικών ή μη παραγόντων. Αρχικά ύψιστης σημασίας είναι το γεγονός πως κατά τη διάρκεια της πυρκαγιάς το ανάγλυφο, οι άνεμοι και η φυσιολογία των δέντρων άφησαν ανέπαφες αρκετές σποραδικές συστάδες σε όλη σχεδόν την καμένη έκταση του πευκοδάσους. Τα άτομα που επέζησαν της καταστροφής, λειτούργησαν ως σπορείς για τη μετέπειτα αναγέννηση και τη διαδοχή της βλάστησης (φωτο 4). Δεύτερον, πληροφορίες αναφέρουν (επικοινωνία με εθελοντές κατοίκους της περιοχής), πως έγιναν ενέργειες τεχνητής αναγέννησης σε αρκετά σημεία, κατά το πρώτο μεταπυρικό έτος.



Φωτο 3.4. Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος στο Μεγαλοχώρι.



Φωτο 5.6. Ανασύσταση πυρικού περιβάλλοντος στο Μεγαλοχώρι.

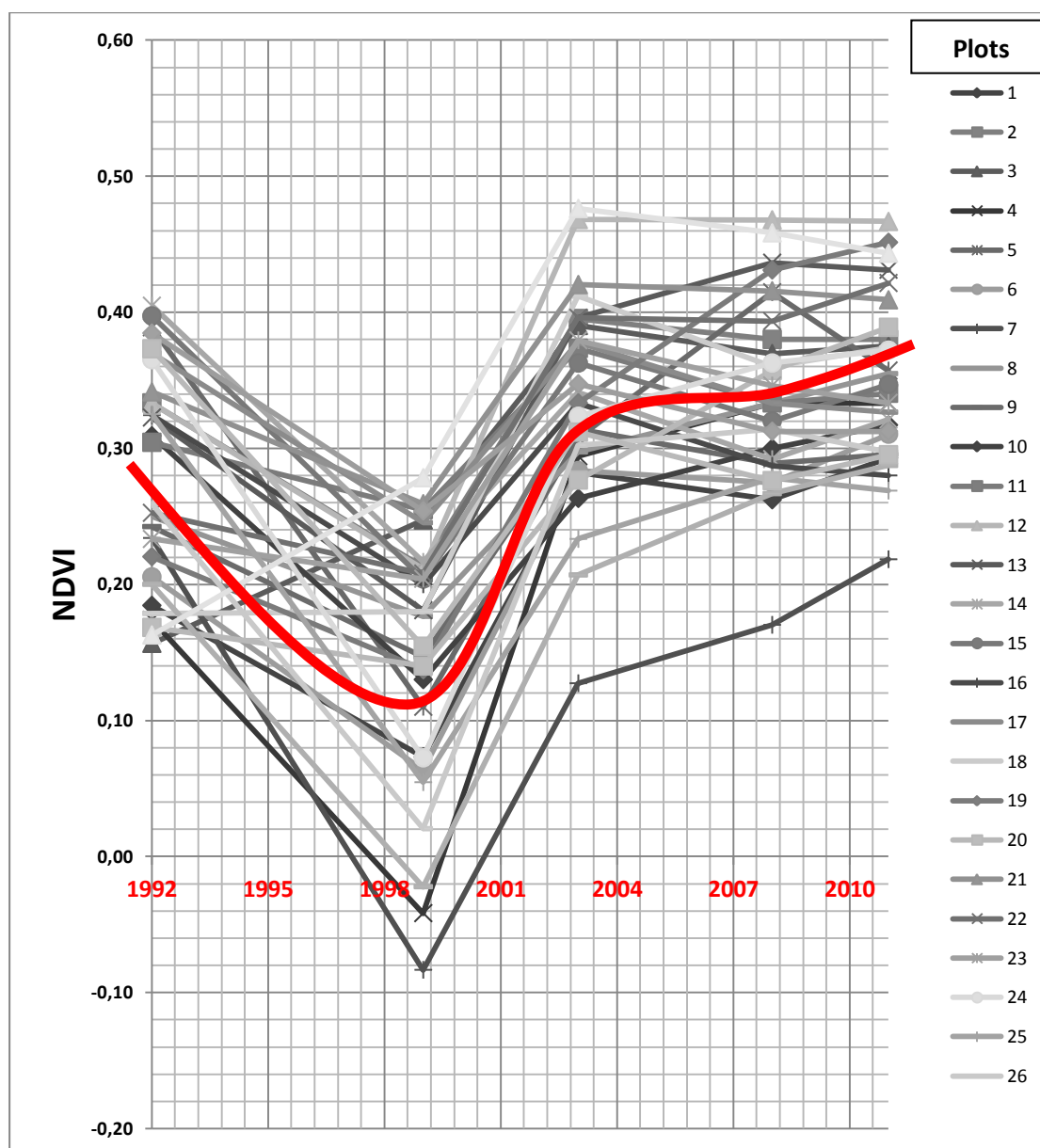
Το αποτέλεσμα της σποράς κρίνεται πετυχημένο καθώς τα τεχνητά αναγεννημένα άτομα είναι σήμερα 15-20 ετών με ικανοποιητική ανάπτυξη και συμβάλλουν στη φυσική διαδοχή (φωτο 5, 6). Επίσης η επιτυχημένη τεχνητή αναγέννηση συνέβαλε σε μεγάλο βαθμό στην αποτροπή της επιφανειακής διάβρωσης και της υποβάθμισης των εδαφών. Τρίτον η περιοχή δεν ξανακάηκε, γεγονός που θα επιβάρυνε κατά πολύ της όποιες διαδικασίες ανασύστασης. Τέταρτον τα οικολογικά χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς, όπως προκύπτουν και από τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, επαληθεύονται ως επί το πλείστον από τις επίγειες οπτικές εκτιμήσεις. Η ύπαρξη σπορέων μαρτυρά την απουσία μικτής πυρκαγιάς και κατ'επέκταση τη μέτρια ένταση που έπληξε την περιοχή.

Τέλος η φαινομενικά, από την προσομοίωση, χαμηλή ένταση του θερμικού μετώπου επέτρεψε τους ήδη υπάρχοντες σπόρους του εδάφους να τεθούν σε λειτουργία και εκίνησε τη φυτρωτικότητα τους.

Όλα τα παραπάνω επαληθεύονται και με τη συνδρομή της ανίχνευσης αλλαγών στις τιμές του δείκτη NDVI. Στο σχήμα 11 είναι εμφανής η κάμψη που παρουσιάζει η κατάσταση της βλάστησης το 1999, μόλις πέντε χρόνια μετά την πυρκαγιά και εξίσου εμφανής είναι και η ανάκαμψη από το 2003 και έπειτα.

Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων μεταξύ μεταβλητών από επίγειες μετρήσεις και μεταβλητών που προέρχονται από δορυφορικά δεδομένα, δεν εμφάνισαν ισχυρή συσχέτιση.

Πιο συγκεκριμένα ο συνολικός αριθμός ζώντων ξυλωδών ατόμων που καταμετρήθηκε σε κάθε δειγματοληπτική επιφάνεια εμφάνισε συσχέτιση 0.25 με τις αντίστοιχες τιμές του δείκτη NDVI που εξήχθη για το Μάρτιο του 2012. Παρόλο της φαινομενικά χαμηλής συσχέτισης το αποτέλεσμα κρίνεται αποδεκτό για δυο λόγους. Πρώτον ο δείκτης NDVI είναι οι κανονικοποιημένες διαφορές τιμών φασματικής απόκρισης, που αποδειγμένα καταγράφει την παρουσία βλάστησης. Η τιμή που καταγράφει κάθε κελί, σε πλήρη αντίθεση με τη λογική των επιτόπιων μετρήσεων, αναφέρεται στο μέσο όρο φασματικών αποκρίσεων όλων των σωμάτων που βρίσκονται σε περιοχή μεγέθους 900 m². Ο δεύτερος λόγος είναι η διαφορά κλίμακας των δυο παραμέτρων που εξετάζονται. Ο εξαγόμενος δείκτης κατέγραψε την κατάσταση της βλάστησης σε μεγάλη κλίμακα και με διακριτική ικανότητα 30x30 m, ενώ αντιθέτως οι επίγειες μετρήσεις κατέγραψαν δειγματοληπτικά 30 θέσεις μεγέθους 50 m². Φυσικά οποιαδήποτε αναγωγή (παρεμβολή ή παρέκταση) θα μεγάλωνε το σφάλμα και θα οδηγούσε σε περεταίρω μείωση ακρίβειας.



Σχήμα 11. Διάγραμμα αντίχενσης αλλαγών σε χρονοσειρές των τιμών του δείκτη NDVI για τις 30 θέσεις δειγματοληψιών στο Μεγαλοχώρι, Λέσβου.

6. Συμπεράσματα – Προτάσεις

Οι πυρκαγιές, ως φυσικό φαινόμενο, αποτελούν αναπόσπαστο στοιχείο των Μεσογειακών δασικών οικοσυστημάτων και θα συνεχίσουν να υπάρχουν και στο μέλλον. Οι επιπτώσεις τους στον άνθρωπο και στο περιβάλλον, ποικίλουν και αποτελούν αντικείμενο έρευνας για πολλές δεκαετίες.

Η πυρκαγιά πρέπει να γίνει κατανοητή σε όλες τις πτυχές της (εμφάνιση πυρκαγιάς, συμπεριφορά πυρκαγιάς, οικολογία πυρκαγιάς, κοινωνικές προεκτάσεις) προκειμένου να αναπτυχθούν ισχυρές, βιώσιμες και μακροπρόθεσμες ολοκληρωμένες πολιτικές και στρατηγικές διαχείρισής της. Η αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών απαιτεί τη συνεχή χρήση ενός μεγάλου αριθμού πληροφοριών που μεταβάλλονται δυναμικά, δημιουργώντας την ανάγκη και την ευκαιρία μαζί της μηχανοργάνωσης των εργασιών. Τα τελευταία χρόνια νέες τεχνολογίες όπως τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ), η δορυφορική Τηλεπισκόπηση και η χωρική ανάλυση, χρησιμοποιούνται συστηματικά για την ιδανική πρόληψη, εκτίμηση του κινδύνου εμφάνισης και εξάπλωσης μιας πυρκαγιάς, την έγκαιρη αντιμετώπιση του φαινομένου και τέλος την πλήρη αποκατάσταση των επιπτώσεων.

Στην παρούσα εργασία εκτιμήθηκε η σφοδρότητα και η μεταπυρική αναγέννηση για 6 πυρκαγιές του νομού Λέσβου και 1 του νομού Έβρου, με την εξαγωγή του ευρέως αποδεκτού δείκτη ΔNBR από δορυφορικά δεδομένα Landsat. Ο αμερικανικός δορυφόρος Landsat εκτοξεύτηκε τις αρχές της δεκαετίας του 70 κάτι που τον καθιστά το μακροβιότερο αρχείο καταγραφής της επιφάνειας της γης. Η μελέτη των επιπτώσεων των δασικών πυρκαγιών με δεδομένα Landsat παρουσιάζει πλεονεκτήματα αλλά και μειονεκτήματα έναντι άλλων δορυφόρων. Στα πλεονεκτήματά του συγκαταλέγονται κατ' αρχήν η άμεση και εύκολη προσβασιμότητα στα αρχεία καταγραφής του, για μεγάλος εύρος χρονολογιών, κάτι που κατέστησε εφικτή τη μελέτη φαινομένων που συνέβησαν πριν από 2 δεκαετίες (π.χ. πυρκαγιά στην περιοχή Πασπαλάς το 1992).

Δεύτερον τα δεδομένα που παράγονται από τους αισθητήρες Thematic Mapper (TM) και Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), παρέχουν φασματική ανάλυση σε 7 και 8 διαύλους αντίστοιχα, κάτι που καθιστά εφικτή την χρησιμοποίηση αλγορίθμων που λαμβάνουν υπ όψη μήκη κύματος πέρα από το ορατό φάσμα. Τρίτον οι δυο δορυφόροι Landsat που βρίσκονται σε λειτουργία αυτή τη στιγμή, παρέχουν πολύ μεγάλη χρονική διακριτική ικανότητα 8 ημερών (16 μέρες έκαστος). Μια πολύ σημαντική παράμετρος, της χρησιμοποίησης δεδομένων Landsat, σε αυτή την εργασία, αλλά και γενικότερα ο λόγος που είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα, είναι ότι τα δεδομένα που προσφέρονται στον ιστότοπο της Εθνικής Αμερικανικής Γεωλογικής Υπηρεσίας (<http://glovis.usgs.gov/>), απ όπου και αποκτήθηκαν συνολικά πάνω από 15 δορυφορικές εικόνες για την περαιώση αυτής της μελέτης, είναι δωρεάν. Όπως είναι κατανοητό οι προσεγγίσεις που απαιτούν μεγάλο όγκο δορυφορικών δεδομένων και μάλιστα σε χρονοσειρές, είναι οικονομικά εφικτές μόνο με τη χρησιμοποίηση δεδομένων Landsat. Με την τακτική αυτή όμως ελλοχεύει και ένα μειονέκτημα. Το διαθέσιμο δωρεάν αρχείο καταγραφής δεν παρουσιάζει πάντα χρονική συνέχεια, εμφανίζοντας πολλά κενά, που στην περίπτωση της ελληνικής επικράτειας αγγίζουν τη δεκαετία (1990-1999). Παρόλα αυτά για την περάτωση της παρούσας μελέτης βρέθηκε η σωστή φόρμουλα ημερομηνιών και διαθέσιμων δορυφορικών εικόνων, σύμφωνα με τα κριτήρια που ορίστηκαν αναφορικά με το φαινολογικό κύκλο της βλάστησης, την αποφυγή του Landsat 7 μετά το 2003 και του γνωστού σφάλματος του διορθωτή σάρωσης. Τέλος μια πολύ σημαντική παράμετρος άμεσα σχετιζόμενη με το κόστος είναι και η διακριτική ικανότητα που προσφέρουν τα δεδομένα Landsat (μέγεθος εικονοστοιχείου 30 m). Ως γνωστόν οι δορυφορικοί αισθητήρες καταγράφουν την εκλυόμενη ενέργεια των αντικειμένων που βρίσκονται στη γη. Κάθε δορυφορική εικόνα λοιπόν είναι ένα αρχείο φασματικών υπογραφών, που μεταφράζονται από τους χρήστες ως πληροφορία για τα αντικείμενα. Άρα κάθε εικονοστοιχείο του δορυφόρου Landsat αναπαριστά τα φασματικά χαρακτηριστικά όλων των αντικειμένων που βρίσκονται σε μια επιφάνεια της γης μεγέθους 900 τετραγωνικών μέτρων. Όπως είναι φυσικό χάνεται μεγάλο μέρος της πληροφορίας καθώς η τιμή που λαμβάνει το εικονοστοιχείο είναι ο μέσος όρος όλων των φασματικών υπογραφών, κάτι που επηρεάζει άμεσα την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Η σχέση τιμής όμως και διακριτικής ικανότητας είναι αντιστρόφως ανάλογη. Για το λόγο αυτό απαιτείται η ανάλογη παραδοχή πως η σχέση διακριτική ικανότητα, κόστος και φαινόμενο μελέτης είναι συμπληρωματικές. Για παράδειγμα η παρούσα μελέτη με τη χρησιμοποίηση άνω των 15 δορυφορικών εικόνων διακριτικής ικανότητας 30 μέτρων, θα απαιτούσε πολλούς οικονομικούς πόρους αν γινόταν με δορυφορικά δεδομένα μεγαλύτερης διακριτικής ικανότητας π.χ. 1 m. Επίσης το φαινόμενο που μελετήθηκε, είναι μεγάλης κλίμακας και η διακριτική ικανότητα των 30 m, προσφέρει ακρίβεια η οποία κρίνεται αποδεκτή.

Ο δείκτης υπολογίστηκε σε 3 μεταπυρικές περιόδους (αμέσως μετά, 1 χρόνο μετά και 2 χρόνια μετά την πυρκαγιά). Όπως αναφέρουν οι Key and Benson (1999, 2006) ο υπολογισμός του δείκτη ΔNBR αμέσως μετά την πυρκαγιά επιφέρει συμπεράσματα για την εκτίμηση της σφοδρότητας της πυρκαγιάς, 1 χρόνο μετά την πυρκαγιά, επιφέρει συμπεράσματα για την τάση διαδοχής της βλάστησης και την έναρξη της αναγέννησης, ενώ 2 χρόνια μετά την πυρκαγιά, ο δείκτης είναι ικανός να δώσει πληροφορίες για την οικολογική αντίδραση του πυρικού περιβάλλοντος και την τάση για την ανασύσταση του οικοσυστήματος. Οι Key and Benson (1999) επίσης αναφέρουν πως η βέλτιστη προσέγγιση για κάθε περιστατικό δασικής πυρκαγιάς, είναι ο υπολογισμός του ΔNBR σταδιακά και για τις 3 μεταπυρικές περιόδους. Αυτό δεν ήταν εφικτό για την παρούσα μελέτη λόγω του προβλήματος που προαναφέρθηκε με τη συνέχεια των δορυφορικών δεδομένων. Παρόλα αυτά η συνδυαστική προσέγγιση που έγινε για 6 συνολικά περιοχές του νομού Λέσβου, αποκάλυψε τη χρησιμότητα της εξαγωγής του δείκτη σε πολλαπλές μεταπυρικές περιόδους. Επίσης υπογραμμίστηκε ένα σφάλμα που πιθανότατα θα είχε γίνει (περίπτωση πυρκαγιάς Χαραμίδας), αν δε συνδυαζόταν η προσέγγιση με την επιτόπια εκτίμηση της κατάστασης και τη γνώση του πυρικού ιστορικού της περιοχής. Όπως ρητά αναφέρουν πολλές μελέτες, είναι απαραίτητος ο συνδυασμός επιτόπιων μετρήσεων και μεθόδων τηλεπισκόπησης για την εκτίμηση σφοδρότητας πυρκαγιάς και μεταπυρικής αναγέννησης. Έτσι λοιπόν η περίπτωση της πυρκαγιάς του 2011 στη Λευκίμη, Έβρου μελετήθηκε συνδυαστικά μέσω μεθόδων τηλεπισκόπησης και επίγειων μετρήσεων.

Οι εξαγόμενοι με μεθόδους τηλεπισκόπησης δείκτες ΔNBR και ΔNDVI παρουσίασαν ισχυρή συσχέτιση με τον εξαγόμενο από μετρήσεις πεδίου CBI, καθώς και μεταξύ τους. Το συμπέρασμα είναι πως όντως η συνδυαστική προσέγγιση είναι η καταλληλότερη καθώς οι, εξαγόμενοι με μεθόδους τηλεπισκόπησης, δείκτες πολλές φορές επιφέρουν σφάλματα ακρίβειας (λόγω ατμοσφαιρικού θορύβου, διαφορετικής φαινολογίας, επίδραση της στάχτης, επίδραση σκιάς, αδυναμία εκτίμησης του υπορόφου σε περιπτώσεις πλούσιας κομοστέγης κ.α). Οι μετρήσεις πεδίου όμως έχουν ορισμένα μειονεκτήματα, καθώς απαιτούν οικονομικούς πόρους, διαθέσιμο αλλά και εκπαιδευμένο προσωπικό, όργανα μέτρησης, είναι σαφώς χρονοβόρες και τέλος, εξαρτώνται συχνά από τοπογραφικούς και κλιματικούς παράγοντες. Βασιζόμενοι λοιπόν στην ισχυρή συσχέτιση, σε περίπτωση που η συνδυαστική προσέγγιση δεν είναι εφικτή, η χρήση αμιγών μεθόδων γεωπληροφορικής δίνει τη δυνατότητα διαχείρισης μεταπυρικών φαινομένων με σχετική ακρίβεια. Βασική επισήμανση όμως, που προκύπτει από τη βιβλιογραφία, είναι ότι οι συγκεκριμένοι δείκτες σχετίζονται τόσο ισχυρά σε περιπτώσεις που αφορούν μόνο δασικά οικοσυστήματα.

Στο δεύτερο μέρος της εργασίας παρουσιάστηκε μια προσέγγιση εκτίμησης της ανασύστασης του πυρικού περιβάλλοντος της πληγείσας το 1994 περιοχής του Μεγαλοχωρίου, Λέσβου. Στις εκτάσεις του καμένου ορεινού πευκοδάσους διενεργήθηκαν δειγματοληπτικά μετρήσεις, αναφορικά με την σημερινή κατάσταση της βλάστησης και τις ενδείξεις αναγέννησης και διαδοχής της. Τα αποτελέσματα περιγράφουν μια περιοχή που έχει ανταποκριθεί πλήρως και που στα επόμενα 10-15 χρόνια θα επανέλθει πλήρως στην προπυρική της κατάσταση. Για την πλήρη κατανόηση των παραγόντων που οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα, προσομοιώθηκε η πυρκαγιά με τη χρήση των λογισμικών FASRITE και FlamMap. Το FASRITE θεωρείται το πιο ολοκληρωμένο σύστημα υποστήριξης λήψης αποφάσεων στο πεδίο της διαχείρισης δασικών πυρκαγιών, χρησιμοποιώντας δισδιάστατα πολλαπλούς αλγόριθμους αναφορικά με τη διάδοση και τη συμπεριφορά του φαινομένου. Οι προσομοιώσεις μέσω του FASRITE, δίνουν τη δυνατότητα απόκτησης πληροφορίας για παρελθοντικά γεγονότα, για μελλοντικά (κίνδυνος - ελεγχόμενη καύση διαχείρισης βιομάζας) αλλά και για προσομοιώσεις σε πραγματικό χρόνο

(συμπεριφορά, κατεύθυνση πυρκαγιάς, καταστολή). Στην παρούσα μελέτη η προσομοίωση με το λογισμικό FASRITE χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την εξαγωγή συμπερασμάτων αναφορικά με την εξάπλωση και τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς λαμβάνοντας υπ όψη τις μεταβολές σε καιρό και άνεμο. Η χωρική σύγκριση με την πραγματική περίμετρο της καμένης έκτασης, αποτελεί ταυτόχρονα και έναν δευτερογενή έλεγχο των εισροών. Παράλληλα οι προσομοιώσεις με το λογισμικό FlamMap, επικεντρώθηκαν στην παροχή πληροφορίας για τα πιθανά χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς μονοδιάστατα και για όλη την περιοχή μελέτης. Το FlamMap παρέχει πληροφορία για κάθε εικονοστοιχείο αυτόνομα και μονοδιάστατα.

Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιεί δεν λαμβάνουν υπόψη τη μεταβλητότητα στις καιρικές μεταβολές και κατά συνέπεια δεν παρέχει πληροφορία για τη συνολική εξάπλωση της προσομοίωσης, παρά μόνο για το ρυθμό της (αυτόνομα για κάθε εικονοστοιχείο). Εν τούτοις δεν αποτελεί υποκατάστατο του FASRITE, καθώς συνήθως χρησιμοποιείται συνδυαστικά για καλύτερη ανάλυση των προσομοιώσεων.

Οι δασικές πυρκαγιές ως γνωστόν, είναι ένα πολυμεταβλητό φυσικό φαινόμενο, που επηρεάζεται άμεσα από πλήθος παραγόντων. Για την όσο το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση των χαρακτηριστικών τους, το FASRITE χρησιμοποιεί πλήθος περιγραφικών παραγόντων ως εισροές. Ο μεγάλος όγκος των απαιτούμενων εισροών όμως σε πολλές περιπτώσεις είναι δυσπρόσιτος και με αρκετά ερωτηματικά ως προς την ακρίβειά του. Για το λόγο αυτό είναι αναγκαίο να γίνονται ορισμένες παραδοχές, όπως έγινε και στην παρούσα προσομοίωση. Κατ αρχήν τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται συλλέχθηκαν από το μετεωρολογικό σταθμό του αεροδρομίου Μυτιλήνης. Δυστυχώς με μόνη εξαίρεση την Αττική υπάρχει έλλειψη επαρκούς δικτύου μετεωρολογικών σταθμών και κατ επέκταση δεδομένων για τέτοιου είδους μελέτες. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα αισθητό σε περιπτώσεις μελετών που αφορούν της παρελθούσες δεκαετίες. Η πρώτη παραδοχή λοιπόν για την εν λόγω προσομοίωση ήταν ότι την περίοδο 15-20 Αυγούστου το 1994, οι κλιματικές συνθήκες που επικρατούσαν είναι όμοιες με αυτές του αεροδρομίου Μυτιλήνης. Η δεύτερη σημαντική παραδοχή αφορά τα MKY που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως προαναφέρθηκε τα MKY επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό, την εξάπλωση και τα χαρακτηριστικά της πυρκαγιάς και αποτελούν μια από τις βασικές μεταβλητές που χρησιμοποιεί το λογισμικό.

Ωστόσο η ακριβής εκτίμησή τους είναι πολύπλοκη και δύσκολο να περιγραφεί με ακρίβεια. Πλήθος μελετών έχει προτείνει διάφορα συστήματα ταξινόμησης, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν σε πολλές μελέτες έως τώρα. Ωστόσο τη χρησιμοποίηση των μέχρι τώρα προταθέντων MKY συνοδεύουν 3 σημαντικές παράμετροι. Πρώτον όπως αναφέρουν οι Chuvieco and Salas (1996), οι τύποι καυσίμων είναι δυνατόν να εμφανίζονται όμοιοι σε διαφορετικές περιοχές, αλλά μπορεί να ανήκουν σε διαφορετικά μοντέλα καύσιμης ύλης, καθώς αλλάζει το ποσοστό υγρασίας, τα δασοπονικά είδη, ακόμα και η διαχείριση της βιομάζας από χώρα σε χώρα.

Επίσης τα MKY επηρεάζονται άμεσα και από το κλίμα και την τοπογραφία μιας περιοχής (Καλαμποκίδης κ.α., 2004). Δεύτερον τα MKY είναι αντιπροσωπευτικά για συγκεκριμένες περιοχές, με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά βλάστησης και συνήθως έχουν φτιαχτεί και για συγκεκριμένο σκοπό (Arroyo et al., 2008). Τρίτον και πολύ σημαντικό, είναι η δυναμική τους φύση και η συνεχής αυξομείωσή τους. Αυτό επιφέρει μεγάλες δυσκολίες στη χαρτογράφησή τους και η ακριβής και ανανεωνόμενη εκτίμησή τους απαιτεί πόρους. Η ορθότερη προσέγγιση θα ήταν κάθε επικράτεια να έχει το δικό της σύστημα ταξινόμησης, με συχνά ανανεωνόμενους χάρτες MKY. Η χρήση γεωπληροφορικής έχει κάνει βήματα προς αυτή την κατεύθυνση τα τελευταία χρόνια και με την επιστράτευση νέων τεχνολογιών και μεθόδων αναμένονται λιγότερα προβλήματα στο μέλλον.

Με βάση λοιπόν της παραπάνω παραδοχές, καθώς ήταν αδύνατον να αποσαφηνιστούν οι μετεωρολογικές συνθήκες και να χαρτογραφηθούν τα ακριβή MKY που επικρατούσαν στο Μεγαλοχώρι τον Αύγουστο του 1994, έγινε η προσομοίωση αποκαλύπτοντας πτυχές των χαρακτηριστικών της πυρκαγιάς, τα οποία συμβαδίζουν σε μεγάλο βαθμό με το πραγματικό αποτέλεσμα.

Στην παρούσα εργασία δόθηκε έμφαση στη δυνατότητα των αναλυτικών μεθόδων γεωπληροφορικής να παρέχουν σημαντική βοήθεια στη διαχείριση των φυσικών καταστροφών. 1. Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης περιλαμβάνει πρωτίστως μια σωστή περιβαλλοντική εκπαίδευση και ανάπτυξη περιβαλλοντικής συνείδησης των πολιτών. 2. Νομοθετικές τροποποιήσεις και κυρώσεις.

3. Αειφορική διαχείριση των δασικών πόρων, έλεγχος βιομάζας, συνεχή καταγραφή αυξομειώσεων και ολοκληρωμένη βάση δεδομένων. 4. Εκπαίδευση του προσωπικού. 5. Συνεχής συνεργασία δασικών και πυροσβεστικών υπηρεσιών με τον επιστημονικό τομέα και υιοθέτηση νέων μεθόδων και τεχνολογιών σε επιχειρησιακό επίπεδο. 6. Συνεχής εκτίμηση κινδύνου, δραστικά μέτρα για τη μείωσή του, αλλά και για την ετοιμότητα επέμβασης. 7. Έγκαιρη καταστολή με το δυνατόν λιγότερους πόρους και απώλειες. 8. Άμεση αποκατάσταση των επιπτώσεων.

7. Βιβλιογραφία

Albini F.A. (1979) Spot fire distance from burning trees - A predictive model. Gen.Tech. Rep. INT-56. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Research Station.

Alvarez A., Gracia M., Retana J. (2011) Fuel types and crown fire potential in *Pinus halepensis* forests. *European Journal of Forest Research*. doi 10.1007/s10342-011-0520-6

Anderson H.E. (1982) Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. Rep. No. GTR INT-122. USDA, Forest Service, Ogden, UT.

Andreae M.O., Merlet P. (2001) Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles* **15**(4), 955–966.

Andrews P.L. (1986) BEHAVE: Fire behavior prediction and fuel modeling system. Burn subsystem. Part 1. Rep. No. GTR INT-194. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.

Andrews P.L., Queen L.P. (2001) Fire modeling and information system technology. *International Journal of Wildland Fire* **10**, 343–352.

Arianoutsou M. (1998) Aspects of demography in post-fire Mediterranean plant communities of Greece. In: Landscape Degradation in Mediterranean-Type Ecosystem. P.W. Rundel, G. Montenegro and F. Jaksic (Eds), *Ecological Studies* **136**, Springer - Verlag, 273-295.

Arroyo A.L., Pascual C., Manzanera A.J. (2008) Fire models and methods to map fuel types: The role of remote sensing. *Forest Ecology and Management* **256**, 1239–1252.

Awada T., Radoglou E., Fotelli M.N., Constantinidou H. (2003) Ecophysiology of three Mediterranean pine species under contrasting light regimes. *Tree Physiology* **23**, 33-41.

Brewer K.C., Winne J.C., Redmond R.L., Opitz D.W., Mangrich M.V. (2005) Classifying and mapping wildfire severity: a comparison of methods. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **7**, 1311–1320.

Burgan R., Klaver R., Klaver J. (1998) Fuel model and fire potential from satellite and surface observations. *International Journal of Wildland Fire* **8**, 159–170.

Ceccato P., Gobron N., Flasse S., Pinty B., Tarantola S. (2002) Designing a spectral index to estimate vegetation water content from remote sensing data: Part 1 Theoretical approach. *Remote Sensing of Environment* **82**, 188–197.

Chafer C.J., Noonan M., Macnaught E. (2004) The post-fire measurement of fire severity and intensity in the Christmas 2001 Sydney Wildfires. *International Journal of Wildland Fire* **13**, 227–240.

Chavez P. (1996) Image-based atmospheric corrections – revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* **62**, 1025–1036.

Cheney N.P., Gould J.S. (1996) Development of fire behaviour models for high intensity forest fires. In: Conference of Natural Disaster Reduction, Gold Coast, Australia, 165–170.

Chuvieco E., Salas J. (1996) Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Science* **10**, 333–345.

Chuvieco E., Martin M.P. Palacios A. (2002) Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing* **23**, 5103–5110.

Chuvieco E., Cocero D., Riano D., Martin P., Martinez-Vega J., Riva J., Perez F. (2004) Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment* **92**, 322–331.

Clarke E.D., Spear L.B., Mc Cracken M.L., Marques F.F.C., Borchers D.L., Buckland S.T., Ainley D.G. (2003) Validating the use of generalized additive models and at-sea surveys to estimate size and temporal trends of seabird populations. *Journal of Applied Ecology* **40**, 278–292.

Cocke A.E., Fule P.Z., Crouse J.E. (2005) Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 189–198.

DeBano L.F. (2000) The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: A review. *Journal of Hydrology* **231**, 195–206.

Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D. (1977) The National Fire Danger Rating System. Rep. No. GTR INT-39. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.

Deeming J.E., Lancaster J.W., Fosberg M.A., Furman R.W., Schroeder M.J. (1972) The National Fire-Danger Rating System. Rep. No. RM-84. USDA Forest Service, Ogden, UT.

De Santis A., Chuvieco E. (2007) Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment* **108**, 422–435.

Diaz-Delgado R., Lloret F., Pons X. (2003) Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing* **24**, 1751–1763.

Dimitrakopoulos A.P. (2002) Mediterranean fuel models and potential fire behavior in Greece. *International Journal of Wildland Fire* **11**, 127–130.

Doerr S.H., Shakesby R.A., Blake W.H., Chafer C.J., Humphreys G.S., Wallbrink P.J. (2006) Effects of differing wildfire severities on soil wettability and implications for hydrological response. *Journal of Hydrology* **319**, 295–311.

Epting J., Verbyla D.L., 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., Fernandez 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.

Fernandes P., Luz A., Loureiro C., Ferreira-Godinho P., Botelho H. (2006) Fuel modelling and fire hazard assessment based on data from the Portuguese National Forest Inventory. *Forest Ecology and Management* **234S**.

Finney M.A. (1998) FARSITE: fire area simulator—model development and valuation. Rep. No. Paper RMRS-RP-4. USDA Forest Service, Ogden, UT.

Finney M.A. (2006) An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Fuels management—how to measure success: conference proceedings. 2006 March 28-30; Portland, Oregon. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station: 213-220.

Forestry Canada Fire Danger Group. (1992) Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Inf. Rep. ST-X-3. Ottawa, Canada: Forestry Canada Science and Sustainable Development Directorate.

Fowler C.T. (2003) Human Health Impacts of Forest Fires in the Southern United States: A Literature Review. *Journal of Ecological Anthropology* 7, 39-63.

French H.F.N., Kasischke S.E., Hall J.R., Murphy A.K., Verbyla L.D., Hoy E.E., Allen L.J. (2008) Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results. *International Journal of Wildland Fire* 17, 443–462.

García-Haro F.J., Gilabert M.A., Meliá J. (2001) Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* 22(4), 533–549.

Gonzalez-Alonso F., Merino-De-Miguel S., Roldan-Zamarron A., Garcia-Gigorro S., Cuevas J.M. (2007) MERIS full resolution data for mapping level-of-damage caused by forest fires: the Valencia de Alcantara event in August 2003. *International Journal of Remote Sensing* 28, 797–809.

Hall R.J., Freeburn D.J.T., de Groot W.J., Pritchard J.M., Lynham T.J., Landry R. (2008) Remote sensing of burn severity: experience from western Canada boreal fires. *International Journal of Wildland Fire* 17, 476–489.

Hammill K.A., Bradstock R.A. (2006) Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: Influence of vegetation type and inferring fire intensity. *International Journal of Wildland Fire* 15, 213–226.

Harvey S., Ruesegger M., Allgower B. (1997) Fuel Models for Switzerland (Swiss National Park). Rep. No. BBW Nr. 94.0177, EC Nr. EV5VCT-0570. Department of Geography, Zurich.

Hernando C., Guijaro M., De Los Sandos A. (1995) Determination de la relation superficie/volumen de las acículas muertas. *Investigacion Agraria Sistemas y Recursos Forestales* 4(1), 73-85.

Jain T, Pilliod D, Graham R. (2004) Tongue-tied. *Wildfire* 4, 22–36.

Johnstone J.F., Kasischke E.S. (2005) Stand-level effects of burn severity on post-fire regeneration in a recently burned black spruce forest. *Canadian Journal of Forest Research* 35, 2151–2163.

Καλαμποκίδης Δ.Κ., Κούτσιας Ν. (2000) Γεωγραφική Πολυμεταβλητή Ανάλυση της Χωρικής Εμφάνισης Δασικών Πυρκαγιών. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα* **11**, 37-47.

Kalabokidis K.D., Gatzogiannis S., Galatsidas S. (2002) Introducing wildfire into forest management planning: towards a conceptual approach. *Forest Ecology and Management* **158**, 41-50.

Καλαμποκίδης Κ., Ρούσσου Ο., Βασιλάκος Χ., Μαρκοπούλου Δ. (2004) Χωρική μοντελοποίηση καύσιμης ύλης και συμπεριφοράς πυρκαγιών τοπίου. Στα Πρακτικά 7ου Πανελληνίου Γεωγραφικού Συνεδρίου. 14-17 Οκτωβρίου 2004, Ελληνική Γεωγραφική Εταιρεία και Τμήμα Γεωγραφίας Πανεπιστημίου Αιγαίου, Μυτιλήνη. Τόμ. Ι, 486-49.

Keane R.E., Agee J.K., Fule P., Keeley J.E., Kitchen S.G., Miller R., Schulte L.A. (2008) Ecological effects of large fires on US landscapes: benefit or catastrophe? *International Journal of Wildland Fire* **17**, 696–712.

Keeley J.E. (2009) Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire* **18**, 116–12.

Key C.H. (2006) Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity. *Fire Ecology* **2**(2), 34–59.

Key C., Benson N. (1999) The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing. U.S. Geological Survey.

Key C.H, Benson N.C. (2006) Landscape Assessment (LA). In ‘FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System’. (Eds D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, S. Sutherland, L.J. Gangi) USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-164-CD, p. LA-1-55 (Fort Collins, CO).

Kitchen K., Marno P., Legg C., Bruce M., Davies G.M. (2006) Developing a fire danger rating system for the United Kingdom. *Forest Ecology and Management* **234S**, S21.

Kushla J.D., Ripple W.J. (1998) Assessing wildfire effects with Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing* **19**, 2493– 2507.

Knoepp J.D., DeBano L.F., Neary D.G. (2005) Soil chemistry. In D.G. Neary, K.C. Ryan, L.F. DeBano (Eds.), *Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4 (pp. 5–17). Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Koutsias N., Karteris M. (1998) Logistic regression modelling of multitemporal Thematic Mapper data for burned area mapping. *International Journal of Remote Sensing* **19**, 3499–3514.

Lawson B.D., Stocks B.J., Alexander M.E., van Wagner C.E. (1985) A system for predicting fire behaviour in Canadian forest. In: Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology. Society of American Foresters, Detroit.

Lentile L.B., Holden Z.A., Smith A.M.S., Falkowski M.J., Hudak A.T., Morgan P., Lewis S.A., Gessler P.E., Benson N.C. (2006) Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire* **15**, 319–345.

Lewis S.A., Wu J.Q., Robichaud P.R. (2006) Assessing burn severity and comparing soil water repellency, Hayman fire, Colorado. *Hydrological Processes* **20**, 1–16.

Lopez-Garcia M.J., Caselles V. (1991) Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data. *Geocarto International* **6**, 31–37.

Markham B.L., Barker J.L. (1986) Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectance and at-satellite temperatures. EOSAT Technical Notes, August 1986.

Marsden-Smedley J.B., Catchpole W.R. (2001) Fire behaviour modelling in Tasmanian buttongrass moorlands. III Dead fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire* **10**, 241–253.

Mather M.P. 2004. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images* 3rd Edition. John Wiley & Sons Ltd.

Merrill D.F., Alexander M.E. (1987) *Glossary of Forest Fire Management Terms*, 4th Ed. National Research Council of Canada, Canadian Committee on Forest Fire Management, Ottawa, Ontario.

Miller H.J., Yool S.R. (2002) Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment* **82**, 481–496.

Miller J.D., Thode A.E. (2007) Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* **109** (1), 66–80.

Moran M.S., Jackson R.D., Slater P.N., Teillet P.M. (1992) Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. *Remote Sensing of Environment* **41**, 169–184.

Nagahama Y., Suzuki K. (2007) The influence of forest fires on CO, HCN, C₂H₆, and C₂H₂ over northern Japan measured by infrared solar spectroscopy. *Atmospheric Environment* **41**, 9570–9579.

Narayan C., Fernandes P.M., van Brusselen J., Schuck A. (2007) Potential for CO₂ emissions mitigation in Europe through prescribed burning in the context of the Kyoto Protocol. *Forest Ecology and Management* **251**, 164–173.

Neary D.G., Ryan K.C., DeBano L.F. (Eds.) (2005) Wildland fire in ecosystems: Effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol.4 (pp. 5–17). Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Nelson R.M. (2000) Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research* **30**, 1071–1087.

Patterson M.W., Yool S.R. (1998) Mapping fire-induced vegetation mortality using Landsat Thematic Mapper data: A comparison of linear transformation techniques. *Remote Sensing of Environment* **65**, 132–142.

Pereira J.M. (1999) A comparative evaluation of NOAA AVHRR vegetation indices for Burned Surface Detection and Mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* **37**, 217–226.

Riano D., Chuvieco E., Salas F.J., Palacios-Orueta A., Bastarrica A. (2002) Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* **32**, 1301–1315.

Romme W.H., Knight D.H. (1981) Fire frequency and subalpine forest succession along a topographic gradient in Wyoming. *Ecology* **62**, 319–326.

Roberts J.J., Best B.D., Dunn D.C., Treml E.A., Halpin P.N. (2010) Marine Geospatial Ecology Tools: An integrated framework for ecological geoprocessing

with ArcGIS, Python, R, MATLAB, and C++. *Environmental Modelling & Software* **25**, 1197-1207.

Robichaud P.R., Lewis S.A., Laes D.Y.M., Hudak A.T., Kokaly R.F., Zamudio J.A., (2007) Postfire soil burn severity mapping with hyperspectral image unmixing. *Remote Sensing of Environment* **108**, 467–480.

Rogan J., Yool S.R. (2001) Mapping fire-induced vegetation depletion in the Peloncillo Mountains Arizona and New Mexico. *International Journal of Remote Sensing* **22**, 3101– 3121.

Roldan-Zamarron A., Merino-De-Miguel S., Gonzalez-Alonso F., Garcia-Gigorro S., Cuevas J.M. (2006) Minas de Riotinto (south Spain) forest fire: burned area assessment and fire severity mapping using Landsat 5-TM, Envisat-MERIS, and Terra-MODIS post-fire images. *Journal of Geophysical Research* **111**, G04S11.

Rothermel R.C. (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. Gen. Tech. Rep. INT–115. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

Rothermel R.C. (1991) Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Res. Pap. INT–438. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station.

Ruiz-Gallardo J.R., Castaño S., Calera A. (2004) Application of remote sensing and GIS to locate priority intervention areas after wildland fires in Mediterranean systems: a case study from south-eastern Spain. *International Journal of Wildland Fire* **13**, 241–252.

Salgado J., Mato M.M., Vázquez-Galiñanes Paz-Andrade M.I., Carballas T. (2004) Comparison of two calorimetric methods to determine the loss of organic matter in Galician soils (NW Spain) due to forest wildfires. *Thermochimica Acta* **410**, 141–148.

Sandberg D.V., Ottmar R.D., Cushon G.H. (2001) Characterizing fuels in the 21st Century. *International Journal of Wildland Fire* **10**, 381–387.

Scott J.H., Burgan R. (2005) Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel’s surface fire spread model. Rep. No. RMRS GTR-153. Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO.

Smith, J.K. (ed.) (2000) Wildland fire in ecosystems: effects of fire on fauna. General Technical Report RMRS-GTR-42-vol.1, 83 pp. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Singh A. (1989) Digital change detection techniques using remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing* **10**, 989–1003.

Taylor A.H. (2000) Fire regimes and forest changes in mid and upper montane forests of the southern Cascades, Lassen Volcanic National Park, California, USA. *Journal of Biogeography* **27**, 87–104.

Tucker C.J. (1979) Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment* **8** (2), 127-150.

Van Wagner C.E. (1977) Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research* **7**(1), 23-34.

White J.D., Ryan K.C., Key C.C., Running S.W. (1996) Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire* **6**, 125– 136.

Wilson E., Sader S. (2002) Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment* **80**, 385–396.

Wood, S.N. (2006) Generalized Additive Models: An Introduction with R. Chapman & Hall/CRC.

8. Τυπολόγιο

Ραδιομετρική διόρθωση

Μετατροπή ψηφιακών τιμών σε τιμές ακτινοβολίας - Landsat

$$L_{min} = L_{MIN\lambda} + \frac{QCAL * (L_{MAX\lambda} - L_{MIN\lambda})}{QCAL_{max}}$$

L_{min} = Ψηφιακή τιμή ακτινοβολίας

$QCAL$ = Ψηφιακή τιμή (DN) για κάθε διάυλο 1-5 και 7

$QCAL_{max}$ = μέγιστο (DN = 255)

$L_{MAX\lambda}$ = Σταθερά για $QCAL = 0$ (Table 2 Markham and Barker 1986)

$L_{MIN\lambda}$ = Σταθερά για $QCAL = QCAL_{max}$ (Table 2 Markham and Barker 1986)

$$L_{\lambda 1\%} = \frac{0.01 * d^2 * \cos^2\theta}{\pi * E_{sun\lambda}}$$

$L_{\lambda 1\%}$ = Θεωρητική ακτινοβολία μέλανος σώματος = 1% της συνολική ακτινοβολίας

d^2 = Απόσταση γης ηλίου

θ = Γωνία γης ηλίου στο ζενίθ (90 – ύψος ηλίου)

$E_{sun\lambda}$ = Μέση ακτινοβολία ηλίου εκτός ατμόσφαιρας (Table 4. Markham and Barker 1986)

$$L_{haze} = L_{\lambda \min} - L_{\lambda 1\%}$$

L_{haze} = Διόρθωση ομίχλης

$$\rho = \frac{\pi * d^2 * (L_{\lambda sat} - L_{haze})}{E_{sun\lambda} * \cos^2\theta}$$

ρ = Ακτινοβολία (0-1)

$L_{\lambda sat}$ = Τιμές αισθητήρα

GAM formulas

Οικογένεια: **gaussian**

Συνάρτηση σύνδεσης: **identity**

HEIGHT ~ s(PCA1, bs = "ts") + s(TEMP, bs = "ts") + s(WIND, bs = "ts") + s(WETNESS, bs = "ts") + s(SOLAR, bs = "ts") + s(PRECIP, bs = "ts")

HEIGHT = Μέσο ύψος δέντρων

PCA1 = Ανάλυση κύριων συνιστωσών 1

TEMP = Θερμοκρασία

WIND = Άνεμος

WETNESS = Υγρασία Tasseled Cap Transformation

SOLAR = Ηλιακή ακτινοβολία

PRECIP = Βροχόπτωση

R-sq.(adj) = 0.581 Deviance explained = 69.2%

GCV score = 9.0743 Scale est. = 6.6007 n = 110

CBD ~ s(PRECIP, bs = "ts") + s(GREENES, bs = "ts") + +s(TEMP, bs = "ts") + s(SOLAR, bs = "ts")

CBD = Πυκνότητα κόμης

PRECIP = Βροχόπτωση

GREENESS = Χλωροφύλλη Tasseled Cap Transformation

TEMP = Θερμοκρασία

SOLAR = Ηλιακή ακτινοβολία

R-sq.(adj) = 0.449 Deviance explained = 51.9%

GCV score = 0.0056873 Scale est. = 0.0049098 n = 104

CBH ~ s(WIND, bs = "ts") + s(NDVI, bs = "ts") + s(WETNESS, bs = "ts") + s(PRECIP, bs = "ts")

CBH = Ύψος έναρξης κόμης

WIND = Άνεμος

WETNESS = Υγρασία Tasseled Cap Transformation

PRECIP = Βροχόπτωση

R-sq.(adj) = 0.471 Deviance explained = 57.9%

GCV score = 3.1426 Scale est. = 2.4768 n = 104

COVER ~ s(NDVI, bs = "ts") + s(PCA2, bs = "ts") + s(SLOPE, bs = "ts") + s(TEMP, bs = "ts")

COVER = Ποσοστό κάλυψης κόμης

PCA2 = Ανάλυση κύριων συνιστωσών 2

SLOPE = Κλίσεις

TEMP = Θερμοκρασία

R-sq.(adj) = 0.679 Deviance explained = 72.7%

GCV score = 174.26 Scale est. = 146.94 n = 128