

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ  
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΑΣ



7<sup>ο</sup> Πανετήνιο  
Γεωγραφικό Συνέδριο

ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ

ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ  
ΤΟΜΟΣ Ι

ΜΥΤΙΛΗΝΗ 2004

## ΧΩΡΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΥΣΙΜΗΣ ΎΛΗΣ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ ΤΟΠΙΟΥ

Κώστας Καλαμποκίδης, Όλγα Ρούσου, Χρήστος Βασιλάκος και Διονυσία Μαρκοπούλου

Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας

### Περίληψη

Οι δασικές πυρκαγιές συνιστούν ένα πολυσύνθετο χωρικό φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται από πλήθος βιοφυσικών και ανθρωπογενών παραγόντων. Η σε βάθος ανάλυση των παραμέτρων που επηρεάζουν την έναρξη και εξάπλωση της φωτιάς και διαμορφώνουν το βαθμό επικινδυνότητάς της σε κλίμακα τοπίου, κρίνεται αναγκαία προκειμένου να καταστεί σύγχρονη και αποτελεσματική η διαχείριση των πυρκαγιών. Στόχος της εργασίας ήταν ο εντοπισμός των περιοχών που παρουσιάζουν έντονη συμπεριφορά πυρκαγιάς λόγω της υψοστάμενης φυσιογραφίας και βλάστησης. Για τη μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης και της συμπεριφοράς πυρκαγιάς χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό μοντελοποίησης πυρκαγιών BehavePlus2, όπου έγινε προσομοίωση των πυρκαγιών με βάση προκαθορισμένα μοντέλα καύσιμης ύλης που σχετίζονται με τον τύπο των υπό μελέτη οικοσυστημάτων. Η χωρική μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε με χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών, εφαρμόζοντας πέντε κριτήρια: ταχύτητα διάδοσης της φωτιάς, εκλύομενη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας, θερμική ένταση μετώπου, μήκος φλόγας και θερμική ένταση αντίδρασης, και της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης για την εξαγωγή ενός δείκτη οικολογικής συμπεριφοράς της πυρκαγιάς. Η χωρική κατανομή του βαθμού οικολογικής συμπεριφοράς δασικών πυρκαγιών παρουσιάζεται με τη μορφή ψηφιακού χάρτη ο οποίος δημιουργήθηκε με βάση τα μοντέλα καύσιμης ύλης, το ψηφιακό μοντέλο εδάφους και τις μέσες-χειριστες μετεωρολογικές συνθήκες της Λέσβου. Τα αποτελέσματα της χαρτογραφικής μοντελοποίησης και η μεθοδολογία δημιουργίας της βάσης γεωγραφικών δεδομένων παρουσιάζουν ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον για την υποστήριξη αποφάσεων όσον αφορά την πρόληψη και καταστολή των δασικών πυρκαγιών.

### Abstract

Forest fires comprise a complex spatial natural phenomenon that is influenced by many biophysical and anthropocentric factors. A deep knowledge of all crucial parameters, that affect fire initiation and propagation and form the fire danger in landscape scale, is essential for a technocratic and effective fire management. This paper focuses on identifying areas that have intense fire behavior due to physiography and vegetation in Lesvos Island. The BehavePlus2 fire behavior prediction and fuel modeling system was used for the fire simulation based on existing forest fuel models related to ecosystem types in the study area. Geographic Information Systems and multi-criteria decision analysis applied for a) the spatial modeling of fire with five criteria: rate of spread, heat per unit, fire line intensity, flame length and reaction intensity and b) the extraction of an ecological fire behavior/ flammability index. A digital map produced by forest fuel models, digital terrain model and worst-average weather conditions presents the spatial distribution of fire behavior index in Lesvos Island. The applied methodology and the results of cartographic modeling provide research and operational interest for decision support in the prevention and suppression of forest fires.

**Λέξεις κλειδιά:** Οικολογία Πυρκαγιών, Διαχείριση Πυρκαγιών, Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών, Χωρική Ανάλυση

**Key words:** Fire Ecology, Fire Management, GIS, Spatial Analysis

### 1. Εισαγωγή

Οι δασικές πυρκαγιές στην Ελλάδα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες φυσικές καταστροφές σε ένα κατεξοχήν πυριγενές φυσικό περιβάλλον από άποψη κλίματος και βλάστησης (Kozlowski and Ahlgren, 1974). Η φωτιά αν και αποτελεί αναπόσπαστη διαταραχή στα μεσογειακά οικοσυστήματα (Agee, 1993; Wright and Bailey, 1982) επηρεάζει σημαντικά τις επιμέρους λειτουργίες και πολλαπλές χρήσεις του δάσους και ασκεί καθοριστικές επιδράσεις στο φυσικό κύκλο διαδοχής της βλάστησης, καθώς και στη λειτουργία και δομή των φυσικών οικοσυστημάτων (Κούτσιας κ.α., 2001).

Οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην έναρξη, εξάπλωση και συμπεριφορά των δασικών πυρκαγιών είναι (α) τα χαρακτηριστικά της καύσιμης ύλης (υψή, μέγεθος, συσσώρευση, κατανομή), (β) η τοπογραφία (έκθεση, κλίση, υψόμετρο, διαμόρφωση εδάφους) και (γ) οι μετεωρολογικές συνθήκες (άνεμος, θερμοκρασία, σχετική υγρασία). Ως καύσιμη ύλη (Κ.Υ.) χαρακτηρίζεται όλο το ζωντανό ή νεκρό οργανικό βλαστητικό υλικό που υπάρχει είτε στο έδαφος (όπως φυλλόστρωμα, βελόνες, κλαδιά, κορμοί, χόρτα,

θάμνοι, δενδρύλλια και δέντρα) είτε πάνω στα δέντρα (όπως κλαδιά, φύλλωμα, όρθια νεκρά δέντρα) που προκαλεί ή υψίσταται ανάφλεξη και καίγεται (Pyne *et al.*, 1996).

(α) Η ποσότητα και η ποιότητα της καύσιμης ύλης αποτελούν σημαντικούς παράγοντες που ελέγχουν τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς τόσο από άποψη εξάπλωσης όσο και εκλούμενης θερμότητας. Ας σημειωθεί ότι όλη η δασική βιομάζα δεν αποτελεί καύσιμη ύλη στο πέρασμα της φωτιάς, και περιοχές με τα ίδια είδη βλάστησης μπορούν να έχουν διαφορετικό κίνδυνο λόγω της μορφολογίας, όπως ύψος, πυκνότητα, περιεχόμενα υγρασία και ποσότητα της βλάστησης. Το είδος, η ποσότητα, η χημική σύσταση, το μέγεθος και το σχήμα καθώς και η συνέχεια της δασικής καύσιμης ύλης είναι σημαντικοί παράγοντες που συντελούν στην εμφάνιση και τη διάδοση μιας πυρκαγιάς. Γενικά στα δάση η ποσότητα σε μερικές καύσιμες ύλες ελαττώνεται με το χρόνο, σε άλλες αυξάνει και σε άλλες αφού στην αρχή έχουμε αύξηση στη συνέχεια έχουμε σταθερή ποσότητα. Όσο πιο ομοιόμορφη και συνεχόμενη κατανομή της καύσιμης ύλης υπάρχει τόσο μεγαλύτερη και γρηγορότερη ανάφλεξη και πλήρη καύση αναμένεται, ενώ όσο πιο πολλά διάκενα βλάστησης υπάρχουν τόσο περισσότερες είναι οι αλλαγές στην ταχύτητα εξάπλωσης και στην ένταση μιας πυρκαγιάς.

(β) Μεταβολές στην τοπογραφία μπορούν να προκαλέσουν δραστικές αλλαγές στη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς καθώς η φωτιά εξελίσσεται κυρίως πάνω στο έδαφος. Διαφορετική συγκέντρωση καύσιμης ύλης παρατηρείται ανάλογα με την έκθεση ως προς τον ορίζοντα. Συγκεκριμένα η καύσιμη ύλη ξεραίνεται ταχύτερα στις νότιες εκθέσεις από ό,τι στις βλαγείς άλλων εκθέσεων, καθώς οι νότιες εκθέσεις δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία περισσότερο χρονικό διάστημα. Όταν η φωτιά κινείται σε τοπογραφική αναφύρεση εξάπλώνεται με μεγάλη ταχύτητα, αφού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται στα κατώτερα τοπογραφικά σημεία, παρατηρείται ξήρανση της βλάστησης στα ανώτερα σημεία και συνεπώς διευκόλυνση της εξάπλωσης της φωτιάς. Όσο αυξάνει το υψόμετρο αυξάνει η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και μεταβάλλεται η διαμόρφωση της βλάστησης. Ακόμη, η έντονη διαμόρφωση του εδάφους (ράχες, στενά φαράγγια, κοιλάδες ανάμεσα σε κορυφογραμμές) μπορούν να δημιουργήσουν τοπικά επιτάχυνση της ταχύτητας του ανέμου με συνέπεια την πρόκληση άκρας επικίνδυνης συμπεριφοράς φωτιάς..

(γ) Οι μετεωρολογικές συνθήκες συντελούν σημαντικά στην έναρξη και εξάπλωση μιας πυρκαγιάς. Ο άνεμος είναι ο πρωταρχικός παράγοντας που καθορίζει το ρυθμό εξέλιξης και την κατεύθυνση μιας πυρκαγιάς. Η θερμοκρασία του αέρα επηρεάζει μια φωτιά καθώς επιδρά στη σχετική υγρασία και την ατμοσφαιρική αστάθεια, ενώ η θερμοκρασία και η υγρασία της καύσιμης ύλης επηρεάζουν το χρόνο ανάφλεξης και καύσης. Επιπρόσθετα, οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τις μέτριες βροχοπτώσεις δημιουργούν ξηρό κλίμα και ξηρασία που συνηγορούν στην έναρξη μιας πυρκαγιάς.

Αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας είναι η ανάλυση προσομοίωσης πυρκαγιάς για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης και τύπο βλάστησης που απαντάται στην Λέσβο, με βάση το σύστημα ταξινόμησης των χρήσεων γης του Προγράμματος CORINE, και ο εντοπισμός εκείνων των περιοχών που παρουσιάζουν έντονη συμπεριφορά πυρκαγιάς λόγω τοπογραφίας και βλάστησης. Η χαρτογραφική απεικόνιση της καύσιμης ύλης είναι ουσιαστική για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας μιας πυρκαγιάς στο χώρο και την προσομοίωση της εξάπλωσης της φωτιάς κατά μήκος του τοπίου. Για τη χωρική μοντελοποίηση των περιοχών που παρουσιάζουν έντονη πυρική συμπεριφορά έγινε χρήση των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) και της μεθόδου της πολυκριτηριακής ανάλυσης προκειμένου να εξαχθεί ένας δείκτης οικολογικής συμπεριφοράς πυρκαγιάς ή ευφλεκτικότητας της βλάστησης.

## 2. Μεθοδολογία

### 2.1 Συλλογή Δεδομένων και Προ-Επεξεργασία

Ως περιοχή μελέτης επιλέχθηκε το νησί της Λέσβου λόγω του αξιοσημείωτου φυσικού περιβάλλοντος που παρουσιάζει αναφορικά με την έντονη ποικιλομορφία σε τύπους βλάστησης (πευκοδάση, φυλλοβόλα και αειφύλλα πλατύφυλλα είδη, φρύγανα, χορτολιβάδα, ελαιώνες και αγροτικές καλλιέργειες), το ξεχωριστό μικροκλίμα και τη γεωμορφολογία. Η ποικιλομορφία και η ανομοιογένεια της βλάστησης όσον αφορά τη χωρική κατανομή και διάταξη οφείλεται μεταξύ άλλων στην ποικιλία των βιοτόπων του νησιού, την ιδιαιτερότητα των πετρωμάτων, τη μακροχρόνια επίδραση του ανθρώπου και τη γεινιάσή του με τα απέναντι παράλια της Μικράς Ασίας. Η Λέσβος είναι το μεγαλύτερο νησί του ανατολικού Αιγαίου και το τρίτο σε μέγεθος στην Ελλάδα. Καλύπτει μια περιοχή 1.672 km<sup>2</sup> με πλούσιο ανάγλυφο και ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών. Το κλίμα της περιοχής είναι τυπικό μεσογειακό με θερμά και ξηρά καλοκαίρια και ήπιους βροχερούς χειμώνες.

Για την περιοχή μελέτης πραγματοποιήθηκε συλλογή και προ-επεξεργασία των δεδομένων που απαρτίζουν την ψηφιακή βάση γεωγραφικών δεδομένων και θεωρούνται απαραίτητα για την επίτευξη του στόχου της εργασίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους (ΨΜΕ) της Λέσβου

που προέκυψε από επεξεργασία χαρτών κλίμακας 1:50000 με ισοϋείς καμπύλες των 20 m και από το οποίο προέκυψε ο χάρτης κλίσεων του εδάφους. Οι κλίσεις ταξινομήθηκαν σε πέντε κατηγορίες, καλύπτοντας όλο το εύρος: (α) 0-15%, (β) 15-30%, (γ) 30-50%, (δ) 50-100% και (ε) >100%. Επιπρόσθετα, ως χαρτογραφικό υπόβαθρο χρησιμοποιήθηκε ψηφιακός χάρτης των χρήσεων γης κλίμακας 1:100000, με βάση το σύστημα ταξινόμησης του Προγράμματος CORINE, για την εξαγωγή των μοντέλων καύσιμης ύλης/ βλάστησης που ανταποκρίνονται στο τοπίο της Λέσβου. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρουσιάζεται συνοπτικά στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας.

## 2.2 Μοντελοποίηση Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς

Η ποσότητα της κατακαείμενης νεκρής καύσιμης ύλης (δηλαδή κλαδιά διαμέτρου μέχρι 7,5 cm και φυλλοτάπητας), η χορτο-πόδης βλάστηση και οι ιστάμενοι ζωντανοί θάμνοι (βλαστοί διαμέτρου μέχρι 0,5 cm και φύλλων) ταξινομούνται σε τύπους καυσίμου, τα λεγόμενα μοντέλα καύσιμης ύλης (Andrews, 1986). Ένα μοντέλο καύσιμης ύλης προέρχεται από την ταξινόμηση των ειδών βλάστησης σύμφωνα με τις φυσικοχημικές ιδιότητές τους κατά την καύση και χρησιμοποιείται για να ταξινομηθεί η βλάστηση που είναι επιρρεπής στη φωτιά (Anderson, 1982).

Για τη διαχείριση δασικών πυρκαγιών διερευνώνται ανά τον κόσμο διάφοροι μέθοδοι μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης. Σταθμό έχουν αποτελέσει τα δεκατρία (13) μοντέλα καύσιμης ύλης (MKY) που αναπτύχθηκαν αρχικά για το Σύστημα Πρόβλεψης Συμπεριφοράς Πυρκαγιάς BEHAVE (Anderson, 1982; Burgan and Rothermel, 1984; Andrews, 1986), όπου η ταξινόμηση της βλάστησης βασίστηκε σε επιτόπια μέτρηση της καύσιμης ύλης (Πίνακας 1).

Το σύστημα BEHAVE αποτελεί ένα υπολογιστικό πρόγραμμα φιλικό προς το χρήστη και αποτελείται από μια συλλογή μαθηματικών μοντέλων (αλγορίθμων) που περιγράφουν τη φωτιά και το περιβάλλον της, και χρησιμοποιείται κυρίως για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς με σκοπό τη διαχείρισή της (Rothermel, 1972; Rothermel, 1991). Το σύστημα BehavePlus2 (Andrews *et al.*, 2003), ως βελτιωμένη εξέλιξη του BEHAVE, αποτελεί ένα πρόγραμμα μοντελοποίησης της καύσιμης ύλης και πρόβλεψης της συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ένα πλήθος από εφαρμογές όπως διαχείριση πυρκαγιών, συμπεριφορά μιας έρπουσα/ επιφανειακής πυρκαγιάς που βρίσκεται σε εξέλιξη, σχεδιασμό προδιαγεγραμμένου καπνίσματος και εκπαίδευση.

Τα μοντέλα καύσιμης ύλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση συμπεριφοράς πυρκαγιών είτε σε εφαρμογές που αφορούν προληπτικό σχεδιασμό είτε σε πραγματικές επιχειρήσεις καταστολής αυτών, λαμβάνοντας υπόψη την τοπογραφία και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Για το γεωγραφικό χώρο της Λέσβου επιτεύχθηκε μια αντιστοιχία των μοντέλων καύσιμης ύλης του BEHAVE και των τύπων χρήσεων γης από το Πρόγραμμα CORINE (Πίνακας 2).

Τα δεδομένα που εισέρχονται στο πρόγραμμα BehavePlus2 αναφορικά με τα μοντέλα καύσιμης ύλης και την προσομοίωση της πυρικής συμπεριφοράς αντιστοιχούν στις παρακάτω μέσες-χειρίστες περιβαλλοντικές τιμές κατά τη διάρκεια της καλοκαιρινής/ αντιπυρικής περιόδου:

- Περιεχόμενη υγρασία νεκρής Κ.Υ.
  - 1-h T<sub>L</sub>: 5 %
  - 10-h T<sub>L</sub>: 6 %
  - 100-h T<sub>L</sub>: 7 %
- Περιεχόμενη υγρασία ζωντανής Κ.Υ. 70 %
- Ταχύτητα ανέμου 15 km/h
- Διεύθυνση ανέμου (αναβατική διάδοση) 0°
- Κλίση 0, 15, 30, 50, 100 %

Πίνακας 1: Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που αναπτύχθηκαν για το σύστημα πρόβλεψης συμπεριφοράς πυρκαγιάς BEHAVE και η προσαρμογή τους στις συνθήκες της ελληνικής βλάστησης.

Μοντέλο Καύσιμης Ύλης	Περιγραφή	
1	Short grasses	Ποολίβαδα
2	Timber (grass and understory)	Δασολίβαδα
3	Tall grass	Λιβάδια (υψηλή βλάστηση)
4	Chaparral	Θαμνώνες (αείφυλλα - σκληρόφυλλα)
5	Brush	Θαμνολίβαδα (φυλλοβόλα)
6	Dormant brush, hardwood slash	Θαμνότοποι (ξηροφυτικοί)
7	Southern rough	Θαμνότοποι (μερικώς δασοσκεπείς)
8	Closed timber litter	Κλειστά δάση (ξηροτάπητας)
9	Hardwood litter	Φυλλοβόλα δάση (ξηροτάπητας)
10	Timber (litter and understory)	Σύμπικνα δάση (ξηροτάπητας και υπόροφος)
11	Light logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μικρή ποσότητα)
12	Medium logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μέτρια ποσότητα)
13	Heavy logging slash	Υπολείμματα υλοτομιών (μεγάλη ποσότητα)

Πίνακας 2: Αντιστοίχιση των τύπων χρήσεων γης του CORINE με τα μοντέλα καύσιμης ύλης του BEHAVE.

Κωδικός CORINE	Περιγραφή Τύπου Βλάστησης	Μοντέλο Καύσιμης Ύλης (BEHAVE)
223	Ελαιώνες	8
243	Γη που καλύπτεται από γεωργία και εκτάσεις φυσικής βλάστησης	7
244	Αγροτικές δασικές περιοχές	2
311	Δάσος πλατύφυλλων	9
312	Δάσος κωνοφόρων	10
313	Μικτό δάσος	8
321	Φυσιικοί βοσκότοποι	1
322	Θάμνοι και χερσότοποι	6
323	Σκληρόφυλλη βλάστηση	4
324	Μεταβατικές δασώδεις και θαμνώδεις εκτάσεις	7
333	Εκτάσεις με αραιή βλάστηση	2

### 2.3 Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Χαρτογράφηση

Σύγχρονο εργαλείο ανάλυσης και μοντελοποίησης δεδομένων του περιβάλλοντος και των πυρκαγιών αποτελούν τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (ΣΓΠ) που μπορούν να διαχειριστούν με επιτυχία χωρικές και χρονικές πληροφορίες σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (Chou, 1992; Chuvieco and Salas, 1996). Στα πλαίσια της εργασίας, με τη βοήθεια των ΣΓΠ επιτυγχάνεται ο συνδυασμός και η μοντελοποίηση όλων των μεταβλητών (ανάγλυφο, βλάστηση και μετεωρολογικά δεδομένα) μέσω της πολυκριτηριακής ανάλυσης και των αποτελεσμάτων του προγράμματος BehavePlus2.

Για τον εντοπισμό των περιοχών της νήσου Λέσβου, που στην περίπτωση πυρκαγιάς θα έχουν έντονη συμπεριφορά εφαρμόστηκαν τα ακόλουθα κριτήρια, (b):

- ο Ταχύτητα διάδοσης – Rate of Spread (m/min)
- ο Εκλυόμενη θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας – Heat per Unit Area (kJ/m<sup>2</sup>)

- ο Θερμική ένταση μετώπου – Fireline Intensity (kW/m)
- ο Μήκος φλόγας – Flame Length (m)
- ο Θερμική ένταση αντίδρασης – Reaction Intensity (kW/m<sup>2</sup>).

Κριτήρια θεωρούνται τα ποιοτικά και ποσοτικά δεδομένα τα οποία προβλέπουν τη μεταβολή ή το μέγεθος των επιπτώσεων που προκαλούν ένας ή περισσότεροι παράγοντες σε ένα αποδέκτη κάτω από συνθήκες που προσδιορίζουν οι μεταβλητές τόσο του περιβάλλοντος όσο και του αποδέκτη. Με βάση τα επιλεγμένα κριτήρια μπορούν να πραγματοποιηθούν επιμέρους αξιολογήσεις που δύναται να συγκριθούν μεταξύ τους. Πριν τη χρήση του κάθε κριτηρίου (*b*) πραγματοποιήθηκε παραμετροποίηση του κάθε κριτηρίου με γραμμικό τέντωμα στο διάστημα 0 έως 1, σύμφωνα με την εξίσωση:

$$b_{stretched} = \frac{b_{input} - b_{min}}{b_{max} - b_{min}} \quad (1)$$

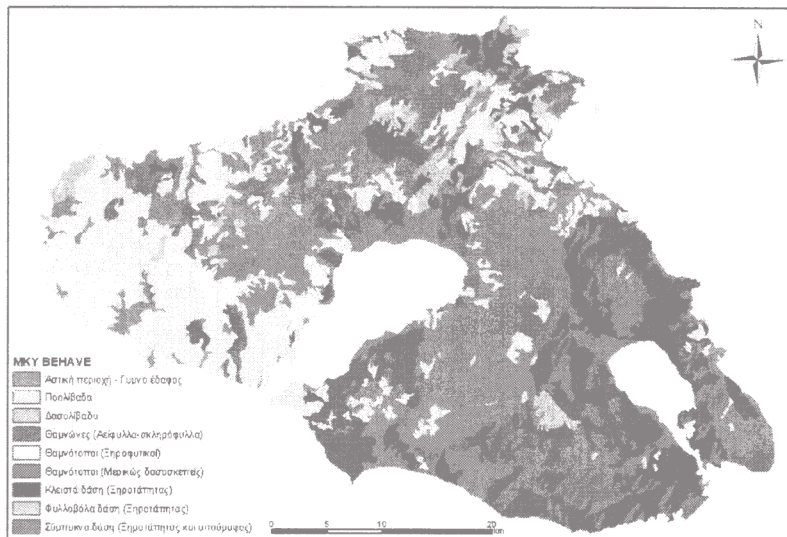
όπου:  $b_{stretched}$  = η τεντωμένη τιμή,  $b_{input}$  = η εισερχόμενη τιμή,  $b_{min}$  = η ελάχιστη εισερχόμενη τιμή, και  $b_{max}$  = η μέγιστη εισερχόμενη τιμή.

Μετά τον καθορισμό των κριτηρίων προσδιορίζεται ο συντελεστής βαρύτητας. Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι οι πέντε παράμετροι επηρεάζουν εξίσου στο μέγιστο βαθμό τη συμπεριφορά μιας πυρκαγιάς (Chou *et al.*, 1990). Τελικό στάδιο της ανάλυσης είναι ο προσδιορισμός ενός δείκτη οικολογικής συμπεριφοράς πυρκαγιάς ή ευφλεκτικότητας της βλάστησης, με τη βοήθεια των ΣΓΠ και της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Ο συγκεκριμένος δείκτης είναι ένα μέσο που έχει σκοπό να συνοψίσει μια μεγάλη ποσότητα δεδομένων στην απλούστερη δυνατή μορφή, και ο οποίος με μαθηματικούς χειρισμούς καταλήγει σε ένα μοναδικό αριθμό με νόημα. Επιλέχθηκε η αθροιστική μορφή προσδιορισμού του δείκτη συμπεριφοράς πυρκαγιάς, σύμφωνα με την οποία, ο δείκτης (συνολικός βαθμός κάθε επιμέρους κριτηρίου -  $B_j$ ), προκύπτει από το άθροισμα των συντελεστών (βαθμών -  $b_{ij}$ ) του κάθε κριτηρίου (επί συνόλου  $k$  κριτηρίων), πολλαπλασιασμένων με τον αντίστοιχο συντελεστή βαρύτητας του κάθε κριτηρίου ( $w_i = 0,2$ ). Η μαθηματική εξίσωση που μας δίνει το δείκτη, ορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$B_j = \sum_{i=1}^k w_i * b_{ij} \quad (2)$$

### 3. Αποτελέσματα – Συζήτηση

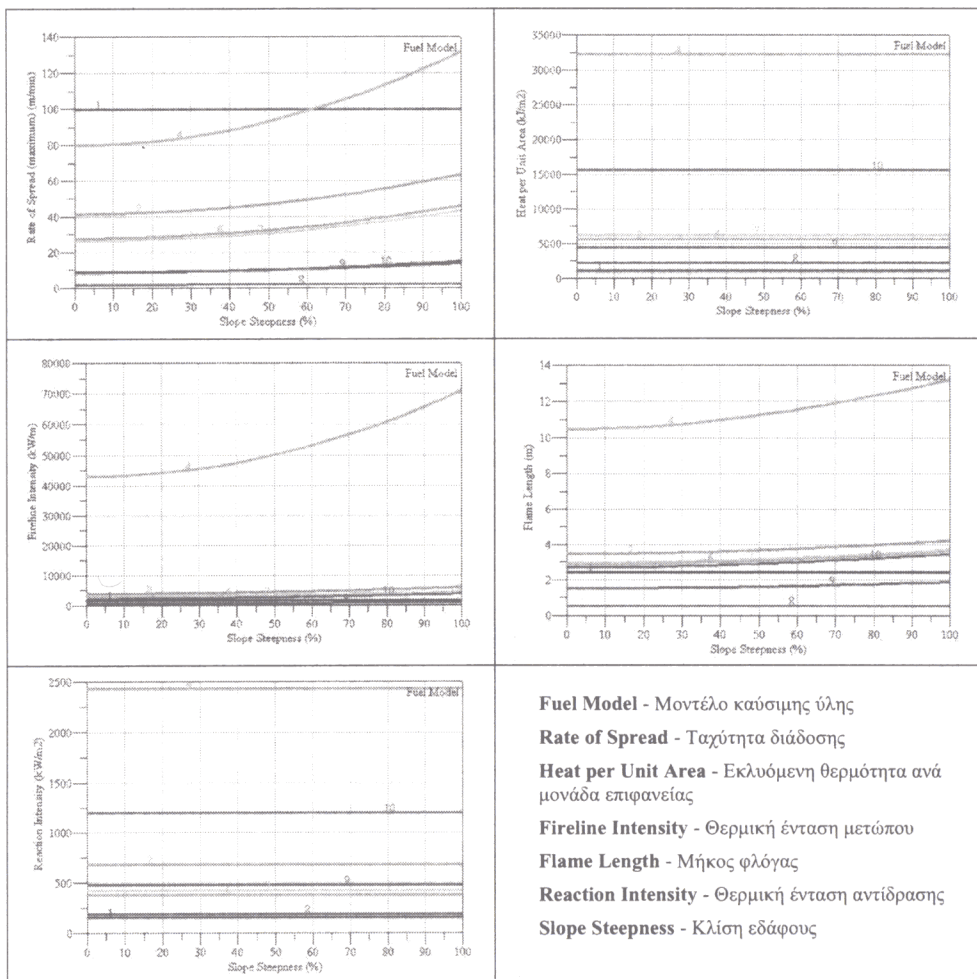
Η χαρτογραφική απεικόνιση της καύσιμης ύλης είναι ουσιαστική για τον υπολογισμό της επικινδυνότητας μιας πυρκαγιάς στο χώρο και την προσομοίωση της εξάπλωσης της φωτιάς και την έντασή της κατά μήκος του τοπίου. Βασίζόμενοι στο σύστημα ταξινόμησης των χρήσεων γης από το Πρόγραμμα CORINE και λαμβάνοντας υπόψη δεδομένα από εργασία πεδίου, πραγματοποιήθηκε ψηφιακή χαρτογράφηση της δασικής καύσιμης ύλης στη Λέσβο (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Τα μοντέλα καύσιμης ύλης που απαντώνται στη Λέσβο.

Με τη βοήθεια του συστήματος πρόβλεψης συμπεριφοράς της φωτιάς BehavePlus2 πραγματοποιήθηκε ανάλυση των πυρκαγιών για όλο το νησί της Λέσβου, χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές εισροής τις φυσικοχημικές ιδιότητες των συγκεκριμένων μοντέλων καύσιμης ύλης για κάθε περιοχή, τις διαβαθμίσεις των κλίσεων εδάφους και τις μέσες-χειρίστες μετεωρολογικές συνθήκες (ταχύτητα και διεύθυνση ανέμου, περιεκτικότητα υγρασία καύσιμης ύλης, κ.λ.π.).

Συγκεκριμένα, για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης υπολογίστηκαν οι κρίσιμοι παράμετροι συμπεριφοράς (ταχύτητα διάδοσης, μήκος φλόγας, θερμική ένταση μετώπου, θερμότητα ανά μονάδα επιφάνειας, θερμική ένταση αντίδρασης) μιας ενδεχόμενης πυρκαγιάς (Σχήμα 3). Με βάση τα αποτελέσματα παρατηρούμε ότι στις χορτο-πούδεις εκτάσεις (MKY '1) η μέγιστη ταχύτητα διάδοσης δεν επηρεάζεται από την κλίση του εδάφους, καθώς έχει πιάσει το όριο της ολικής επίδρασης του διανύσματος ανέμου-κλίσης. Στα υπόλοιπα μοντέλα η ταχύτητα διάδοσης αυξάνεται αναλογικά με την κλίση του εδάφους, γεγονός που οφείλεται στο φαινόμενο της γρηγορότερης θέρμανσης της καύσιμης ύλης που υπάρχει μπροστά από τη γραμμή του μετώπου της φωτιάς. Στις εκτάσεις με πώδη βλάστηση η φωτιά εξαπλώνεται με μεγάλη μέγιστη ταχύτητα (99,7 m/min) καθώς ο άνεμος και η λεπτή καύσιμη ύλη συμβάλουν θετικά, ενώ η μικρότερη εξάπλωση της πυρκαγιάς παρατηρείται στα μικτά κλειστά δάση με ξηροτάπητα και στους ελαιώνες (MKY 8) με ταχύτητα 1,7 m/min, λόγω του ότι συγκρατούν περισσότερη υγρασία και έχουν ελεγχόμενα μικρή καύσιμη ύλη.



Σχήμα 3: Αποτελέσματα του προγράμματος BehavePlus2 για τα μοντέλα καύσιμης ύλης που απαντώνται στη Λέσβο.

Η θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας καθώς και η θερμική ένταση αντίδρασης δεν επηρεάζονται από την κλίση του εδάφους, παρά μόνο από την ποσότητα της διαθέσιμης καύσιμης ύλης. Για το λόγο αυτό οι τιμές των δύο αυτών παραμέτρων παραμένουν σταθερές για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης. Είναι λογικό η μεγαλύτερη θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας ( $32.266 \text{ kJ/m}^2$ ) να εμφανίζεται στους θαμνώνες (MKY 4) καθώς υπάρχει συσσώρευση μεγάλης ποσότητας και χημικά εύφλεκτης καύσιμης ύλης που κατανομείται οριζόντια και κάθετα, δίνοντας γρήγορη ανάφλεξη και πλήρη καύση στην περίπτωση εμφάνισης πυρκαγιάς.

Ανάλογα με την αύξηση της κλίσης παρατηρείται στους θαμνώνες (MKY 4) αύξηση της μέγιστης ταχύτητας διάδοσης (από 79,9 σε  $132.1 \text{ m/min}$ ) που οδηγεί σε αύξηση του μήκους φλόγας (από 10,5 σε  $13.2 \text{ m}$ ) και συνεπώς αύξηση της θερμικής έντασης μετώπου (από 42.985 σε  $71.018 \text{ kW/m}$ ). Από τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων η μεγαλύτερη εκλούμενη θερμότητα παρατηρείται τόσο στους θαμνώνες (MKY 4) όσο και στα δάση κωνοφόρων (MKY 10), καθώς υπάρχει συνεχόμενη και ομοιόμορφη κατανομή της εύφλεκτης καύσιμης ύλης. Στα κωνοφόρα δάση που υπάρχει υπόροφος, η επιφανειακή πυρκαγιά μπορεί να μετατραπεί εύκολα σε επικόρυφη, δημιουργώντας το δικό της μικρο-περιβάλλον που επηρεάζει και τη διάδοσή της. Στις περιοχές που επικρατούν ελαιώνες και μικτά δάση (MKY 8) παρατηρείται σε περίπτωση πυρκαγιάς χαμηλή θερμική ένταση του μετώπου (από 65 έως  $72 \text{ kW/m}$ ). Η χαμηλή ένταση οφείλεται στο γεγονός ότι στον ξηροτάπητα η ποσότητα της καύσιμης ύλης είναι περιορισμένης και ελεγχόμενης ποσότητας, και καθώς αυξάνει η κλίση η επιφανειακή πυρκαγιά εξαπλώνεται με αργούς ρυθμούς ανάμεσα στα δέντρα.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το πρόγραμμα BehavePlus2 για κάθε μοντέλο καύσιμης ύλης και για κάθε κριτήριο ενσωματώθηκαν σε ένα ΣΓΠ για τη χωρική επεξεργασία των δεδομένων. Συγκεκριμένα με τη βοήθεια της πολυκριτηριακής ανάλυσης πραγματοποιήθηκε κανονικοποίηση του κάθε κριτηρίου και διεξαγωγή ενός δείκτη οικολογικής συμπεριφοράς πυρκαγιάς. Έτσι, για την περιοχή μελέτης δημιουργήθηκε ένας σύνθετος ψηφιακός χάρτης που περιέχει το σύνολο των παραμέτρων που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη συμπεριφορά πυρκαγιάς και απεικονίζει την κατανομή της ευφλεκτικότητας στο γεωγραφικό χώρο της Λέσβου (Σχήμα 4).

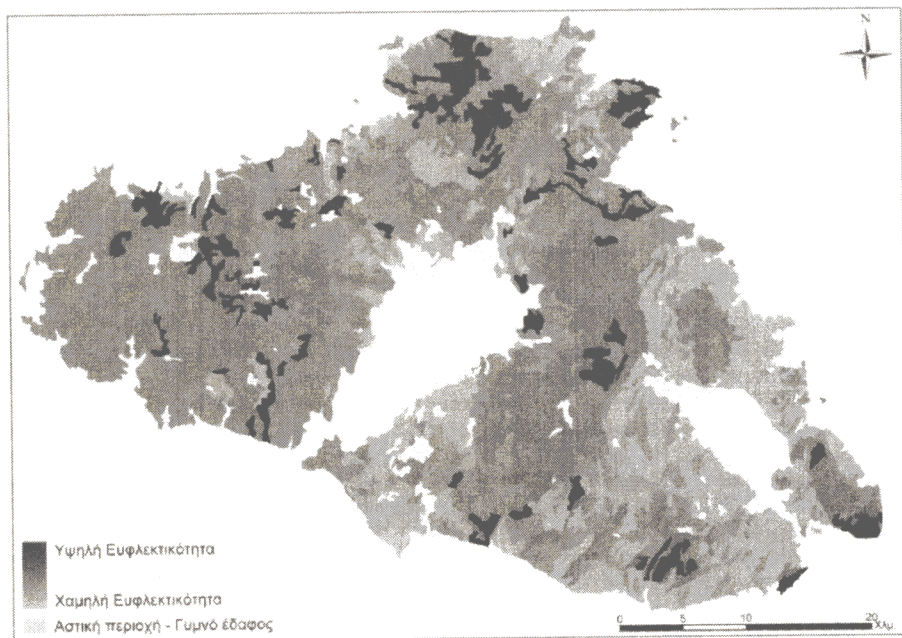
Οι δασικές εκτάσεις των αειφύλλων σκληρόφυλλων παρουσιάζουν υψηλή ευφλεκτικότητα που οφείλεται στη μεγάλη πυκνότητα και συνέχεια της καύσιμης ύλης, όπως και στη χαμηλή περιεκτικότητα της σε υγρασία κατά τους καλοκαιρινούς μήνες σε συνδυασμό με την εύφλεκτη χημική της σύσταση. Τα είδη που κυριαρχούν στις περιοχές αυτές (πουρνάρι, σχίνος και άλλοι πυρόφιλοι θάμνοι) έχουν αναπτύξει μηχανισμούς προσαρμογής στη φωτιά που καθιστούν τις συνέπειες της πυρκαγιάς σχετικά μη επιβλαβείς για την εξέλιξή τους. Τα δάση της τραχείας πεύκης (*Pinus brutia*) εμφανίζουν υψηλή πιθανότητα ανάφλεξης και χαρακτηρίζονται ως από τα πλέον επικίνδυνα δασικά οικοσυστήματα από άποψη πυρκαγιάς. Τα κυρίαρχα είδη στον υπόροφο (θάμνοι, φρύγανα και μικρά πεύκα), καθώς και η οριζόντια και κάθετη διάταξη της Κ.Υ. μεταβάλλουν σημαντικά τη συμπεριφορά της πυρκαγιάς και καθορίζουν τον τύπο της. Η επιφανειακή φωτιά μπορεί να εξαπλωθεί σε μεγάλες αποστάσεις με το πέταγμα κωνών (spotting), και να επεκταθεί στις κόμεις των δέντρων οπότε γίνεται επικόρυφη ή και μικτή. Είναι γεγονός ότι κάτω από δυσμενείς καιρικές συνθήκες (υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή υγρασία καύσιμης ύλης και ισχυρούς ανέμους) μπορούν να δημιουργηθούν στα συγκεκριμένα δάση σημαντικά προβλήματα αντιμετώπισης πυρκαγιών και οικολογικών ζημιών.

Τα χορτολίβαδα και τα φρύγανα που καταλαμβάνουν κυρίως το δυτικό τμήμα της Λέσβου και χρησιμοποιούνται ως φυσικοί βοσκότοποι παρουσιάζουν μέτρια ως υψηλή ευφλεκτικότητα ανάλογα με τις γεωμορφολογικές και μετεωρολογικές συνθήκες. Οι χορτο-πόδιες εκτάσεις έχουν σχετικά μικρή ποσότητα καύσιμης ύλης δίνοντας έρπουσες πυρκαγιές μικρής θερμικής έντασης αλλά μεγάλης ταχύτητας διάδοσης. Κάτω από δυσμενείς καιρικές συνθήκες οι πυρκαγιές αυτές εξελίσσονται πολύ γρήγορα σε επικίνδυνες πυρκαγιές τόσο για την ανθρώπινη ζωή όσο και την όλη επιχείρηση κατάσβεσης, ενώ μπορούν να προκαλέσουν έντονες και μη ανατρέψιμες οικολογικές βλάβες όπως ερημοποίηση και εξαφάνιση ενδημικών φυτών και ζώων.

Στους ελαιώνες και τα μικτά κλειστά δάση με ξηροτάπητα, ο βαθμός ευφλεκτικότητας είναι χαμηλός λόγω της μικρής ποσότητας διαθέσιμης καύσιμης ύλης. Οι πυρκαγιές στις περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται ως έρπουσες με μικρή ταχύτητα διάδοσης και χαμηλή θερμική ένταση μετώπου. Στην περίπτωση που οι εκτάσεις με ελαιώνες παύσουν να καλλιεργούνται εντατικά, όπως και όπου συμβαίνει σήμερα, η πιθανότητα ανάφλεξης θα είναι μεγαλύτερη και η συμπεριφορά της φωτιάς θα μεταβληθεί ανάλογα.

Συνεπώς, μεγάλες πιθανότητες ανάφλεξης/ επικινδυνότητας πυρκαγιών παρουσιάζονται διάσπαρτα σε ολόκληρο το τοπίο της Λέσβου σε μικρότερες ή μεγαλύτερες εκτάσεις (π.χ., γύρω από τα βουνά Λεπέτυμος και Ολυμπος, στους θαμνώνες της δυτικής Λέσβου, στα ανατολικά των δήμων Μανταμάδου και Πολιχνίτου, και νότια της Μυτιλήνης στη χερσόνησο της Αμαλής). Τα πευκοδάση και οι θαμνότοποι καλύπτουν ένα μεγάλο μέρος του νησιού δημιουργώντας ένα πυριγενές οικοσύστημα, που όχι μόνο στηρίζεται υπό προϋποθέσεις στη φωτιά για την αναγέννηση και εξέλιξή του, αλλά ευνοεί και τη συχνή εμφάνιση δασικών πυρκαγιών.





Σχήμα 4: Ευφλεκτικότητα των μοντέλων καύσιμης ύλης που απαντώνται στη Λέσβο.

#### 4. Συμπεράσματα

Η μοντελοποίηση της καύσιμης ύλης και η ανάλυση της χωρικής της κατανομής παρουσιάζουν ιδιαίτερο επιστημονικό ενδιαφέρον για την υποστήριξη αποφάσεων όσον αφορά την πρόληψη και την καταστολή των δασικών πυρκαγιών. Η γνώση των παραμέτρων συμπεριφοράς μιας πυρκαγιάς (ταχύτητα διάδοσης, μήκος φλόγας, θερμοότητα ανά μονάδα επιφάνειας, θερμική ένταση μετώπου, θερμική ένταση αντίδρασης) πριν από και κατά την πυρκαγιά συμβάλλει τόσο στην αντιμετώπιση των δυσκολιών ελέγχου της πυρκαγιάς (κατασκευή αντιπυρικών ζωνών, αποστολή ή όχι συνεργείων στο μέτωπο της φωτιάς, απαιτήσεις σε προσωπικό και εξοπλισμό, νέες εστίες, ασφάλεια) όσο και στην αντιμετώπιση των προκαλούμενων συνεπειών στα διάφορα οικοσυστήματα.

Τα μοντέλα καύσιμης ύλης μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην εκτίμηση συμπεριφοράς πυρκαγιών είτε σε εφαρμογές που αφορούν προληπτικό σχεδιασμό είτε σε πραγματικές επιχειρήσεις καταστολής αυτών, λαμβάνοντας υπόψη την τοπογραφία και τις μετεωρολογικές συνθήκες. Στα πλαίσια ενός ΣΓΠ οι αναγκαίοι παράγοντες για την ερμηνεία του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών τοπίου μπορούν να συνδυαστούν αποτελεσματικά σε χωρικό επίπεδο δημιουργώντας έτσι τις αναγκαίες δομές και χωρικές συσχετίσεις για την ανάπτυξη μοντέλων επικινδυνότητας. Η ψηφιακή χαρτογράφηση ευφλεκτικότητας της δασικής καύσιμης ύλης (όπως παρουσιάζεται στην παρούσα εργασία) μαζί με όλα τα σύγχρονα εργαλεία της γεωπληροφορικής θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα αντιπυρικής προστασίας της χώρας μας, προκειμένου να επιτευχθεί αποτελεσματική διαχείριση των δασικών πυρκαγιών τόσο σε τοπική κλίμακα όσο και σε περιφερειακό επίπεδο.

#### Βιβλιογραφία

- Κούτσας Ν., Μ. Καρτέρης και Κ. Καλαμποκίδης, 2001: Χωρική πολυμεταβλητή εκτίμηση μακροπρόθεσμης δασικής πυρο-επικινδυνότητας σε εθνική γεωγραφική κλίμακα. *Επιστημονική Επετηρίδα του Τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος*, Τόμος ΜΑ/1998.
- Agee J.K., 1993: *Fire Ecology of Pacific Northwest forests*. Island Press. Washington, D.C.
- Anderson H.E., 1982: *Aids to determining fuel models for estimating fire behavior*, USDA Forest Service.
- Andrews P.L., 1986: *BEHAVE. Fire behavior prediction and fuel modelling system. Burn subsystem*, Part I U.S.D.A. Forest Service, General Technical Report INT-260.

- Andrews P.L., C.D. Bevens, and R.C. Seli., 2003: *Behave Plus fire modeling system user's Guide, version 2.0.*, USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-106WWW.
- Burgan R. E., and R. C. Rothermel, 1984: *BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system—Fuel subsystem.* U.S.D.A. Forest Service, Intermountain Research Station, Gen. Tech. Rep. INT- 167. Ogden, Utah. 126 p.
- Chou Y.H., 1992: Management of wildfires with a geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems* 6(2):123-140.
- Chou Y.H., R.A. Minnich, L.A. Salazar, J.D. Power, and R.J. Dezzani, 1990: Spatial autocorrelation of wildfire distribution in the Idyllwild Quadrangle, San Jacinto Mountain, California. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 56(11):1507-1513.
- Chuvieco, E., and J. Salas, 1996: Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 10(3):333-345.
- Kozlowski T.T. and C.E Ahlgren, 1974: *Fire and Ecosystems.* Academic Press, New York, USA
- Pyne S.J., P.L. Andrews, and R.D. Laven, 1996: *Introduction to Wildland Fire*, second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Rothermel R.C., 1972: *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels.* USDA Forest Service, General Technical Report INT-115.
- Rothermel R.C., 1991: *Predicting behavior and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains.* USDA Forest Service Research Paper INT-438. 46 p.
- Wright H.A. and A.W. Bailey, 1982: *Fire Ecology.* John Wiley & Sons, Inc. New York.