

Γεωγραφική Πολυμεταβλητή Ανάλυση της Χωρικής Εμφάνισης των Δασικών Πυρκαγιών

Κώστας Καλαμποκίδης¹ και Νικόλαος Κούτοιας²

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου πιθανοτήτων εμφάνισης δασικών πυρκαγιών, με στόχο την εκτίμηση του βαθμού επικινδυνότητας των γεωγραφικών μονάδων του χώρου που ορίζονται από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνιστώσες. Η μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων που επηρεάζουν το βαθμό επικινδυνότητας έναρξης και εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών βιοίσηκε στη γεωγραφική πολυμεταβλητή ανάλυση ιστορικών στατιστικών δεδομένων των πυρκαγιών και περιβαλλοντικών παραγόντων, με βάση τη λογιστική παλινδρόμηση. Ένα πλήρες Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών το οποίο αποτελείται από περιβαλλοντικές συνιστώσες του χώρου όπως τοπογραφία, κλιματολογικά δεδομένα, κατηγορίες κάλυψης γης και ανθρώπινων δραστηριοτήτων δημιουργήθηκε για ένα εθνικό δρυμό στις ΗΠΑ, χρησιμοποιώντας το λογιστικό γεωγραφικής ανάλυσης ARC/INFO. Η πλήρως δομημένη, χωρικά και χρονικά, γεωγραφική βάση δεδομένων έδωσε τη δυνατότητα μελέτης και στατιστικής ανάλυσης της συσχέτισης μεταξύ των καμένων εκτάσεων και των περιβαλλοντικών μεταβλητών. Συνολικά τέσσερα μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης αναπτύχθηκαν για την ερμηνεία και εκτίμηση της χωρικής εμφάνισης των πυρκαγιών, τα οποία συμπεριλάμβαναν 11, 8, 6 και 3 ανεξάρτητες μεταβλητές. Σύμφωνα με τα συνολικά ποσοστά ακρίβειας, τα οποία κυμάνθηκαν πάνω από 65%, και τα τέσσερα μοντέλα παρουσίασαν ικανοποιητική απόδοση στην εκτίμηση της εξαρτημένης μεταβλητής. Η χωρική κατανομή του βαθμού επικινδυνότητας εμφάνισης δασικών πυρκαγιών στην περιοχή μελέτης παρουσιάζεται με τη μορφή θεματικού χάρτη ο οποίος δημιουργήθηκε με βάση τα λογιστικά μοντέλα. Τα αποτελέσματα και κυρίως η μεθοδολογία δημιουργίας του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών και της αντιτυπωτικής διαχείρισης παρουσιάζουν ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον για την εφαρμογή τους στην ορθολογική αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών στην Ελλάδα.

Λέξεις κλειδιά: Διαχείριση Δασικών Πυρκαγιών, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, Στατιστική Ανάλυση, Λογιστική Παλινδρόμηση.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα από τα μεγάλα οικολογικά προβλήματα σε πεγνόσημα κλίματα. Ιδιαίτερα σε περιοχές οι οποίες ανήκουν στο Μεσογειακό τύπο κλίματος, όπως είναι η Ελλάδα, η έξαρση του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών, σε συνδυασμό με ανθρωπογενείς επιδράσεις, τείνει να αποτελέσει μια από τις μεγαλύτερες αιτίες υποβάθμισης του φυσικού περιβάλλοντος. Εξαιτίας των μεγάλων οικονομικών, κοινωνικών και οικολογικών συνεπειών των δασικών πυρκαγιών πρέπει να αποκτηθεί σε βάθος γνώση των παραμέτρων που επηρεάζουν την έναρξη και διάδοση των πυρκαγιών και διαμορφώνουν το βαθμό επικινδυνότητας αυτών, ώστε αυτές οι παράμετροι να ενσωματωθούν σε ένα τεχνολογικό σύγχρονο και αποτελεσματικό διαχειριστικό δασικό σχεδιασμό. Οι πυρκαγιές των δασικών περιοχών συνιστούν ένα πολυσύνθετο χωρικό φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται από ένα πλήθος περιβαλλοντικών, ανθρωπογενών και τοπογραφικών παραγόντων. Γι' αυτό η αποτελεσματική διαχείρισή τους απαιτεί την κατανόηση των λειτουργιών του καθενός παρίγοντα ξεχωριστά αλλά και των αλληλοεπιδράσεων μεταξύ αυτών.

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών, ως ένα σύγχρονο εργαλείο διαχείρισης και επεξεργασίας

¹ Περιβαλλοντική Χαρτογραφία, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, 811 00 Μυτιλήνη, Τηλ.: 0251/36455, fax: 0251/36459, e-mail: kalabokidis@aegean.gr

² Τμήμα Δασολογίας και Φυτικού Περιβάλλοντος, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Π.Θ. 248, 540 06 Θεσσαλονίκη

χωριστών γεωγραφικών δεδομένων, βοηθούν αποτελεσματικά για τη σωστή αντιμετώπιση του φαινομένου. Ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα υποστήριξης αποφάσεων όσον αφορά τη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών, απαιτεί γνώση των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών παραγόντων του χώρου, καθώς επίσης, και των αλληλοεπιδράσεων αυτών. Η μοντελοποίηση αυτών μέσω γεωγραφικών πολυμεταβλητών χωρικών αναλύσεων, η οποία βασίζεται σε ιστορικά στατιστικά δεδομένα εμφάνισης των πυρκαγιών, έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να συνεισφέρει στη χωροθέτηση ζωνών υψηλού κινδύνου εμφάνισης πυρκαγιών (Chou κ.α. 1990).

Η σωστή αντιμετώπιση του προβλήματος κινείται σε δύο βασικές κατευθύνσεις: τη λήψη μέτρων πρόληψης, καθώς και μέτρων έγκαιρης επέμβασης και καταστολής. Ένα εξελιγμένο σύστημα πρόληψης, έγκαιρης επέμβασης και καταστολής, που θα βασίζεται στην εκ των προτέρων γνώση των πιθανών περιοχών εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών καθώς επίσης και στη γνώση της συμπεριφοράς της φωτιάς, θεωρείται ως ένα μεγάλο διαχειριστικό πλεονέκτημα. Η γνώση των περιοχών υψηλού κινδύνου θα προσανατολίσει τους αρμόδιους φορείς προς τη σωστή κατεύθυνση εφαρμογής προγραμμάτων πυροπροστασίας. Η εφαρμογή τέτοιων προγραμμάτων θα γίνεται με προτεραιότητα χωρική και χρονική στις ζώνες υψηλού κινδύνου, ελαχιστοποιώντας το κόστος και μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την αποτελεσματικότητά τους.

Αντικείμενο έρευνας της παρούσας εργασίας ήταν η ανάπτυξη ενός μοντέλου πιθανοτήτων εμφάνισης δασικών πυρκαγιών, με στόχο την εκτίμηση του βαθμού πυρο-επικινδυνότητας των γεωγραφικών μονάδων του χώρου, που ορίζονται από συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνιστώσες. Η μοντελοποίηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικο-οικονομικών παραγόντων που επηρεάζουν το βαθμό επικινδυνότητας των δασικών πυρκαγιών βασίστηκε στη γεωγραφική πολυμεταβλητή ανάλυση ιστορικών στατιστικών δεδομένων των πυρκαγιών και περιβαλλοντικών παραγόντων, με βάση το στατιστικό μοντέλο Λογιστικής Παλινδρόμησης. Η ανάλυση έγινε με στοιχεία από ένα Εθνικό Δρυμό του Κολοράντο των ΗΠΑ (το Dinosaur National Monument) συνολικής έκτασης 850.000 στρεμμάτων, αλλά η όλη μεθοδολογία και τα αποτελέσματα δημιουργίας του γεωγραφικού συστήματος πληροφοριών και της αντιπροσωπικής αντιμετώπισης παρουσιάζουν ερευνητικό και πρακτικό ενδιαφέρον για την εφαρμογή τους στην ορθολογική αντιμετώπιση των δασικών πυρκαγιών στη χώρα μας. Είναι έδηλες οι γενικότερες ανάγκες της Ελλάδας για την τεζηρηρωμένη λήψη αποφάσεων και την αξιοποίηση της τεχνογνωσίας στη διαχείριση κινδύνων του φυσικού περιβάλλοντος.

ΛΟΓΙΣΤΙΚΗ ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ

Συχνά η σχέση μεταξύ ανεξάρτητων και εξαρτημένων μεταβλητών που αφορούν δεδομένα του περιβάλλοντος περιγράφεται καλύτερα μέσω μη γραμμικών μοντέλων, λόγω της πολυπλοκότητας που διέπει τις φυσικές διεργασίες (Σιάδρος 1999). Μια ιδιαίτερη περίπτωση των μη γραμμικών αυτών μοντέλων αποτελεί το λογιστικό μοντέλο αντιστάσης το οποίο περιγράφεται από την εξίσωση (Mendenhall και Sincich 1996, Sharma 1996):

$$E(y) = \frac{\exp(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k)}{1 + \exp(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k)}$$

$$\text{όπου } y = \begin{cases} 1 & \text{εαν η κατηγορία A συμβαίνει} \\ 0 & \text{εαν η κατηγορία B συμβαίνει} \end{cases}$$

$E(y)$ = πιθανότητα P (η κατηγορία A να συμβαίνει)
 X_1, X_2, \dots, X_k ποσοτικές ή ποιοτικές ανεξάρτητες μεταβλητές
 b_0, b_1, \dots, b_k εκτιμώμενοι συντελεστές.

Τα λογιστικά μοντέλα αναπτύχθηκαν για να χρησιμοποιηθούν σε μελέτες επιβίωσης (Survival Analysis) στις οποίες συνήθως η δειγματοληπτική μονάδα δέχεται μόνο δύο τιμές (δηλαδή 1 και 0), για παράδειγμα θανατηφόρα ή όχι δόση (Afifi και Clark 1984). Η λογιστική παλινδρόμηση ως στατιστικό εργαλείο προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι διαφόρων άλλων παρόμοιων μεθόδων όπως η διακριτική ανάλυση (Discriminant Analysis) ή η πολλαπλή παλινδρόμηση (Multiple Regression). Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στα εξής (Norusis 1994):

- Ποιοτικές και ποσοτικές μεταβλητές καθώς και ο συνδυασμός τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως

ανεξάρτητες μεταβλητές.

- Δεν είναι απαραίτητο οι τιμές των δεδομένων να ακολουθούν την κανονική κατανομή.

- Η εξαρτημένη μεταβλητή δέχεται μόνο δύο τιμές (ένα γεγονός συμβαίνει ή όχι) το οποίο σε πολλές περιπτώσεις αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό, για παράδειγμα όταν το ερώτημα αφορά την εκδήλωση ή όχι μιας δασικής πυρκαγιάς.

Σε αντίθεση με τη γραμμική παλινδρόμηση όπου οι συντελεστές του μοντέλου εκτιμούνται με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων, στη λογιστική παλινδρόμηση η εκτίμηση των συντελεστών γίνεται με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας. Δηλαδή οι εκτιμώμενοι συντελεστές είναι αυτοί οι οποίοι κάνουν τα αποτελέσματα πιο πιθανά (Norusis 1990).

Όπως στην περίπτωση της πολλαπλής παλινδρόμησης, έτσι και στην λογιστική παλινδρόμηση είναι αρκετά δύσκολο να ποσοτικοποιηθεί η συνεισφορά της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής για την πρόβλεψη της εξαρτημένης. Το πρόβλημα αυτό ενισχύεται ιδιαίτερα όταν ο βαθμός συσχέτισης των ανεξάρτητων μεταβλητών είναι ιδιαίτερα υψηλός (Norusis 1990). Για να αξιοποιηθούν τέτοιες δυσκολίες, που αφορούν την ερμηνεία των συντελεστών του μοντέλου, δημιουργούνται λογιστικά μοντέλα και συγκρίνονται στατιστικά τα αποτελέσματά. Έτσι, έμμεσα δίνεται η εικόνα της προσφοράς κάποιας μεταβλητής στην πρόβλεψη του γεγονότος.

Η γενική αξιολόγηση των μοντέλων λογιστικής παλινδρόμησης επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κάποιους στατιστικούς δείκτες που στην ουσία αποτελούν μέρος των αποτελεσμάτων από την ανάπτυξη και εφαρμογή της λογιστικής παλινδρόμησης. Περιληπτικά οι στατιστικοί αυτοί δείκτες είναι (Norusis 1990):

1. Πίνακας των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης

Η πρώτη στατιστική ένδειξη για την αξιολόγηση των λογιστικών μοντέλων δίνεται από τον πίνακα των αποτελεσμάτων ταξινόμησης, ο οποίος προκύπτει από τις συγκρίσεις των πραγματικών με τις προβλεπόμενες παρατηρήσεις. Επειδή από το συνολικό ποσοστό των σωστά ταξινομημένων παρατηρήσεων, το οποίο προκύπτει από το ζυγισμένο μέσο όρο των ακριβειών των δύο κατηγοριών, θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι επιμέρους ακριβείες αυτών. Ικανοποιητικά μοντέλα για την πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής θεωρούνται αυτά που παρουσιάζουν μεγάλη ποσοστά ακριβείας με την προϋπόθεση ότι και οι δύο κατηγορίες παρατηρήσεων συνεισφέρουν το ίδιο στη συνολική ακρίβεια.

2. Ιστογράμμο των πιθανοτήτων πρόβλεψης των παρατηρήσεων

Το μειονέκτημα της πρώτης στατιστικής ένδειξης, δηλαδή του πίνακα των ποσοστών ακριβείας της ταξινόμησης, είναι ότι δεν παρουσιάζεται η εικόνα της κατανομής των εκτιμώμενων πιθανοτήτων βάση των οποίων ταξινομήθηκαν οι παρατηρήσεις του δείγματος. Την αδυναμία αυτή συμπληρώνει το ιστογράμμο των πιθανοτήτων, βάση των οποίων γίνεται η πρόβλεψη της εξαρτημένης μεταβλητής. Το λογιστικό μοντέλο προβλέπει σωστά την εξαρτημένη μεταβλητή όταν οι πιθανότητες των δύο κατηγοριών της εξαρτημένης μεταβλητής συσσωρεύονται στα δύο αντίστοιχα άκρα του διαγράμματος (0-1), δημιουργώντας έτσι διακριτές συσσωρεύσεις.

3. Άλλα στατιστικά μεγέθη

Μία άλλη διαφορετική προσέγγιση για την αξιολόγηση των λογιστικών μοντέλων είναι η εκτίμηση και αξιολόγηση συγκεκριμένων στατιστικών όπως -2LL (λογαριθμός των πιθανοτήτων) και "Goodness of Fit Statistic". Γενικά, πετυχημένα μοντέλα θεωρούνται αυτά των οποίων τα παραπάνω στατιστικά μεγέθη τείνουν σε μικρές τιμές.

Λογιστικά μοντέλα έχουν ευρέως εφαρμοσθεί και αποδειχθεί χρήσιμα στη διερεύνηση στατιστικά σημαντικών συσχετίσεων που υπάρχουν μεταξύ διάφορων παραγόντων (Pereira και Itami 1991, Boxall και McFarlane 1995, Bian και West 1997, Nagumalani κ.α. 1997, van Deventer κ.α. 1997). Ειδικότερα στο χώρο των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών και των δασικών πυρκαγιών, μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης έχουν επιτυχώς αναπτυχθεί:

- για τη διερεύνηση των σχέσεων μεταξύ διαφόρων δεικτών του Αμερικάνικου Εθνικού Συστήματος Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών (NFDRS) και εμφάνισης πυρκαγιών (Loftsgaarden και Andrews 1992).
- για την πρόβλεψη πυρκαγιών που οφείλονται σε ανθρωπογενή αίτια (Martell κ.α. 1987).

- για την εκτίμηση της θνησιμότητας δασικών ειδών μετά την πυρκαγιά (Ryan και Reinhardt 1988).
- για τη μοντελοποίηση της πιθανότητας εκδήλωσης δασικών πυρκαγιών και εκτίμηση του κινδύνου αυτών (Chou 1992α).

ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών μπορούν να εμπλακούν πετυχημένα, ως ένα σύγχρονο εργαλείο χωρικής επεξεργασίας και μοντελοποίησης δεδομένων του περιβάλλοντος, στη γεωγραφική ανάλυση εμφάνισης πυρκαγιών και εκτίμησης του κινδύνου αυτών (Chou 1992β). Χωρικά δεδομένα όσον αφορά την κατανομή στο χώρο και στο χρόνο της κάλυψης δασών και δασικών εκτάσεων, μετεωρολογικών δεδομένων, της τοπογραφίας και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων μπορούν με ευκολία και τεχνητή να συνδυασθούν και επεξεργασθούν στα πλαίσια μιας καλά δομημένης τράπεζας πληροφοριών μέσω των εργαλείων και πλεονεκτημάτων που προσφέρουν τα γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών, η επιστήμη της πληροφορικής και η ψηφιακή αυτόματη επεξεργασία (Aronoff 1989).

Η ανάπτυξη ενός δεξιά επικινδυνότητας των δασικών πυρκαγιών καθώς επίσης και η διερεύνηση των στατιστικά σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν την έναρξη και διάδοση αυτών, απαιτεί να ληφθούν υπόψη ένα μεγάλο εύρος περιβαλλοντικών δεδομένων μεταξύ των οποίων τα μετεωρολογικά, τα τοπογραφικά και τα μοντέλα καύσιμης ύλης είναι από τα πιο συνηθισμένα (Deeming κ.α. 1978, Kalabokidis κ.α. 1991).

Σύμφωνα με τους Chuvieco και Salas (1994), τα κριτήρια που εφαρμόζονται για το συνδυασμό και μοντελοποίηση αυτών των μεταβλητών συνοψίζονται στα εξής:

1. Χρησιμοποίηση ποιοτικών κριτηρίων για τον ορισμό τιμών επικινδυνότητας σε συγκεκριμένους συνδυασμούς των μεταβλητών (Brass κ.α. 1983, Yool κ.α. 1985).
2. Αποδοχή διαφόρων δεικτών επικινδυνότητας, όπως για παράδειγμα το NFDRS των ΗΠΑ (Agee και Pickford 1985) ή κάποιων συνιστωσών του BEHAVE (Woods και Gossette 1992).
3. Ανάπτυξη νέων μοντέλων επικινδυνότητας, χρησιμοποιώντας συντελεστές βαρύτητας των μεταβλητών που επηρεάζουν τον κίνδυνο (Chuvieco και Congalton 1989, Vliegheer 1992).
4. Δημιουργία τοπικά προσανατολισμένων μοντέλων, όπου οι τιμές επικινδυνότητας της κάθε μεταβλητής εκτιμούνται από την ανάπτυξη μοντέλων καλνδρόμησης των μεταβλητών (Chou 1992β).

Ο συνδυασμός και μοντελοποίηση όλων των απαραίτητων μεταβλητών μέσω οποιαδήποτε μεθοδολογικής προσέγγισης, επιτυγχάνεται στα πλαίσια των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών εκφράζοντας τις γεωγραφικές μονάδες κάθε μεταβλητής είτε με τη μορφή διανυσματικών δεδομένων (vector data) είτε με τη μορφή κανάβου (raster data). Σύμφωνα με τον Chou (1992α), διανυσματικού τύπου δεδομένα είναι προτιμότερα στη διαχείριση των δασικών πυρκαγιών για δύο κυρίως λόγους: Πρώτον, πολύγωνα τα οποία σχηματίζονται από χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που σχετίζονται με τις δασικές πυρκαγιές προσδιορίζουν γεωγραφικές μονάδες κατάλληλες για τη διαχείριση των πυρκαγιών, και δεύτερον, η μοντελοποίηση των δασικών πυρκαγιών απαιτεί τον έλεγχο υποθέσεων για περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές μεταβλητές οι οποίες καταγράφονται σε διάφορες κλίμακες, που αποδίδονται καλύτερα με διανυσματικού τύπου δεδομένα.

Παρόλα αυτά, τα διανυσματικά δεδομένα μειονεκτήουν σε σχέση με τα δεδομένα σε μορφή κανάβου εξαιτίας των δυσκολιών που παρουσιάζουν κατά τη διαδικασία της προσομοίωσης και μοντελοποίησης ιδιαίτερα δεδομένων που συνθέτονται από πολλά επίπεδα πληροφοριών. Επίσης, η δυσκολία απεικόνισης λεπτομερειακών ποσοτικών δεδομένων που αφορούν συνεχόμενες μεταβλητές του χώρου, όπως π.χ. η τοπογραφία, ουσιαστικά ένα εξίσου σημαντικό μειονέκτημα.

Συμπερασματικά τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα που παρουσιάζουν γενικά οι δύο αυτοί τύποι δεδομένων, και που περιγράφονται στη βιβλιογραφία (Burrough 1986, Star και Estes 1990), ισχύουν και στην περίπτωση εφαρμογών στις δασικές πυρκαγιές. Η επιλογή ενός εκ των δύο καθορίζεται κάθε φορά από το είδος της ανάλυσης που θα εφαρμοσθεί.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Ένα πλήρες γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών, το οποίο αποτελείται από περιβαλλοντικές συνιστώσες του χώρου όπως τοπογραφία, μετεωρολογικά δεδομένα, κατηγορίες κάλυψης γης και ανθρώπινων δραστηριοτήτων, δημιουργήθηκε με τη χρήση του λογισμικού ARC/INFO για ολόκληρο το National Dinosaur Monu-

ment των ΗΠΑ (συνολικής έκτασης 85.000 ha). Ιστορικά δεδομένα που αφορούν τις καμένες εκτάσεις των μεγαλύτερων από 40 στρέμματα ή 4 ha πυρκαγιών για την περίοδο 1940-1992, έχουν καταγραφεί και εισαχθεί στη γεωγραφική βάση, εξασφαλίζοντας έτσι μια ιδανική περίπτωση για τη μελέτη των παραγόντων που επηρεάζουν και διαμορφώνουν το βαθμό επωανδυνότητας τόσο της έναρξης όσο και της εξάπλωσης αυτών. Η πλήρως δομημένη, χωρικά και χρονικά, γεωγραφική βάση δεδομένων στο ARC/INFO έδωσε τη δυνατότητα μελέτης και στατιστικής ανάλυσης σημαντικών στατιστικά συσχετίσεων μεταξύ των καμένων εκτάσεων και των περιβαλλοντικών μεταβλητών.

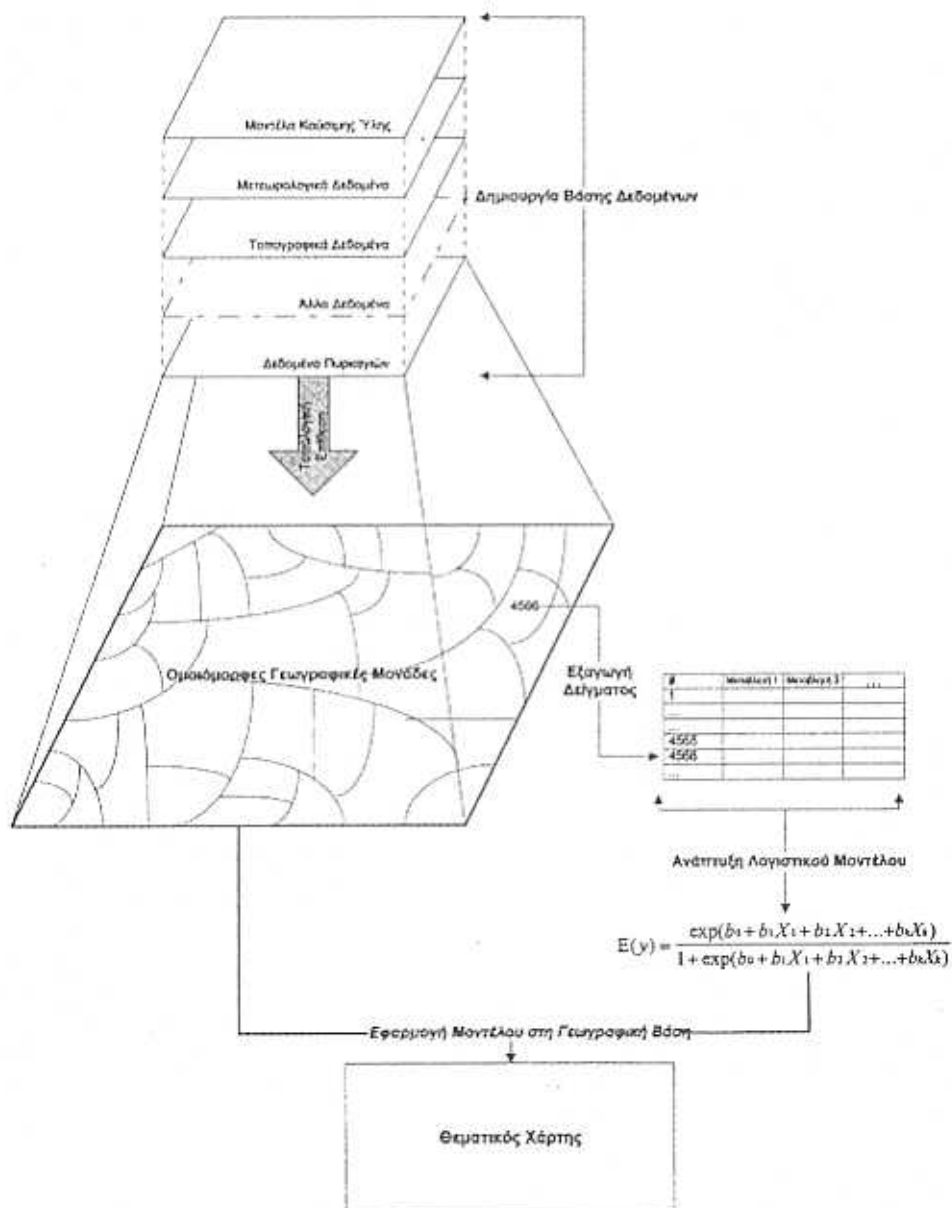
Στατιστικά εργαλεία για την ανάπτυξη μοντέλων περιγραφής εξαρτημένων μεταβλητών από μια ομάδα ανεξάρτητων ή ερμηνευτικών μεταβλητών, όπως απλή γραμμική παλινδρόμηση ή \log_{10} μοντέλα εφαρμόζονται ευρέως στις φυσικές επιστήμες (Wrigley 1976). Στην εργασία αυτή, η προσέγγιση της λογιστικής παλινδρόμησης εφαρμόστηκε ως η πλέον κατάλληλη για την ερμηνεία της εξαρτημένης μεταβλητής η οποία δέχεται μόνο δύο τιμές (καμένο, μη καμένο).

Η μοντελοποίηση της εμφάνισης δασικών πυρκαγιών, συνίσταται τόσο από την πιθανότητα έναρξης όσο και από την πιθανότητα εξάπλωσης αυτών. Οι πυρκαγιές που έχουν επεξεργασθεί για την ανάπτυξη του παρόντος μοντέλου είναι αυτές των οποίων η καμένη έκταση είναι μεγαλύτερη των 40 στρεμμάτων. Αυτό υποδηλώνει ότι στην ανάλυση έχουν συμπεριληφθεί και πυρκαγιές οι οποίες δεν έχουν ανιχνευθεί σε μεγάλες λόγω αποτελεσματικής καταστολής τους.

Επειδή το αντικείμενο έρευνας είναι η ανάπτυξη ενός λογιστικού μοντέλου ερμηνείας της χωρικής εμφάνισης πυρκαγιών βάση ιστορικών παρατηρήσεων, η εξαρτημένη μεταβλητή ήταν οι καμένες εκτάσεις. Τα όρια των καμένων εκτάσεων των πυρκαγιών που εξηλώθηκαν μεταξύ του 1940-1992 ψηφιοποιήθηκαν και αποτέλεσαν τις γεωγραφικές μονάδες της εξαρτημένης μεταβλητής. Κάθε γεωγραφική μονάδα που αντιστοιχεί σε καμένη περιοχή κωδικοποιήθηκε με την τιμή 1 ενώ αυτές που αντιστοιχούν σε μη καμένες εκτάσεις με την τιμή 0. Εκάστει οι οποίες κέρησαν περισσότερες από μια φορά κωδικοποιήθηκαν επίσης με την τιμή 1 διότι στη λογιστική παλινδρόμηση η εξαρτημένη μεταβλητή πρέπει αποκλειστικά να δέχεται μόνο δύο τιμές (0,1).

Επίσης τα όρια των μεταβλητών του περιβάλλοντος όπως για παράδειγμα η τοπογραφία (από ψηφιακά μοντέλα εδάφους), τα μετεωρολογικά δεδομένα (από 30-ετή κλιματολογικά στοιχεία 25 μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής), οι κατηγορίες βλάστησης καθώς και οι ανθρώπινες δραστηριότητες (περιοχές βόσκησης) ψηφιοποιήθηκαν και αποτέλεσαν τις γεωγραφικές μονάδες των ανεξάρτητων ή ερμηνευτικών μεταβλητών. Στην περίπτωση όπου η ανεξάρτητη μεταβλητή δέχεται ποιοτικές τιμές αντί για ποσοτικές, όπως στην περίπτωση των κατηγοριών της καύσιμης ύλης, οι ονομαστικές μεταβλητές τροποποιήθηκαν σε ποσοτικές βάσει συγκεκριμένων κριτηρίων. Στην περίπτωση των κλίμακων βλάστησης χρησιμοποιήθηκε ως δείκτης συμπεριφοράς της φωτιάς η ποσοστιαία ιεράρχηση της υψυλευκότητας (με συνδυασμό τεχνίτητας εξάπλωσης και εκλυόμενης θερμότητας) κάθε τύπου καύσιμης ύλης-βλάστησης σε σχέση με τα 13 μοντέλα καύσιμης ύλης του συστήματος BEHAVE (Burgan και Rothermel 1984), δέχεται ο οποίος καμάνθηρα μεταξύ του εύρους 0-1. Η κατανομή των μετεωρολογικών δεδομένων (πλην του ανέμου) στον τεράστιο χώρο του εθνικού δρυμού έγινε με γραμμική παλινδρόμηση στο ARC/INFO, βασισμένη στο υψόμετρο και τα γεωγραφικά μήκη και πλάτη εκάστης γεωγραφικής μονάδας. Το σύστημα TAPAS (Topographical Air Pollution Analysis System) χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ενός 2-D πεδίου ανέμων στην υπό μελέτη περιοχή. Στον Πίνακα 1 περιγράφονται περιληπτικά οι ανεξάρτητες μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν.

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα γεωγραφικής ανάλυσης ARC/INFO, τα 11 επίπεδα πληροφοριών που συνιστούν τη βάση δεδομένων συνδυάστηκαν χωρικά για την δημιουργία ενός και μόνου επιπέδου στο οποίο τα αρχικά πολύγωνα διασπάστηκαν έτσι ώστε να συνθέσουν μικρότερες γεωγραφικές μονάδες οι οποίες διέφεραν από γεγονικές τουλάχιστον σε μία από τις αρχικές μεταβλητές. Στο νέο αυτό επίπεδο, το οποίο περιελάμβανε το χωρικό συνδυασμό όλων των ανεξάρτητων μεταβλητών, δημιουργήθηκαν συνολικά 138.169 ομοιογενείς γεωγραφικές μονάδες εκ των οποίων 10.424 έχουν και τουλάχιστον μία φορά. Οι παρατηρήσεις που συμπεριλαμβάνονταν στις ομοιογενείς αυτές γεωγραφικές μονάδες επεξεργάστηκαν στη συνέχεια από το στατιστικό πακέτο SPSS για την ανάπτυξη του μοντέλου. Εξαιτίας του μεγάλου και μη αναλογικού δείγματος των μη καμένων παρατηρήσεων σε σχέση με τις καμένες, κάρθηκε μέσω του SPSS ένα τυχαίο δείγμα (που αναλογούσε στο 10% του συνολικού δείγματος των μη καμένων παρατηρήσεων) και χρησιμοποιήθηκε στην περαιτέρω ανάλυση. Διαιροματικά η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε παρου-



Σχίμα 1. Διαγραμματική απεικόνιση της μεθοδολογίας, με τη δημιουργία της βάσης δεδομένων, την ανάπτυξη του λογιστικού μοντέλου και την εφαρμογή του μοντέλου στη γεωγραφική βάση.

αόζεται στο Σχίμα 1.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Συνολικά τέσσερα μοντέλα λογιστικής παλινδρόμησης αναπτύχθηκαν για την ερμηνεία και εκτίμηση της εμφάνισης των πυρκαγιών στο National Dinosaur Monument τα οποία συμπεριλαμβάνουν 11, 8, 6 και 3

Πίνακας I. Ανεξάρτητες ή ερμηνευτικές μεταβλητές οι οποίες συνδυάστηκαν χωρικά για την ανάπτυξη του λογιστικού μοντέλου ερμηνείας εμφάνισης πυρκαγιών.

Όνομα Μεταβλητής	Περιγραφή Μεταβλητής
ΕΤΗ_BPOX	Ετήσια βροχόπτωση, mm
ΒΟΣΚΗ	Μέση τιμή μηνιαίων ζωικών μονάδων
ΣΥΜΠΕΡΙ	Ποσοστιαίος δείκτης συμπεριφοράς της φωτιάς (ταχύτητα εξάπλωσης και εκλυόμενη θερμότητα) για κάθε κατηγορία καύσιμης ύλης ή τύπου βλάστησης σε σχέση με τα 13 μοντέλα του BEHAVE
ΑΠ_BPOX	Μέση τιμή βροχόπτωσης κατά τη διάρκεια της αντισυρτικής περιόδου, mm
ΑΠ_ΥΓΡ	Μέση τιμή σχετικής υγρασίας κατά τη διάρκεια της αντισυρτικής περιόδου, %
ΑΠ_ΘΕΡΜ	Μέση τιμή θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της αντισυρτικής περιόδου, °C
ΑΠ_ΑΝΕΜ	Μέση τιμή έντασης ανέμου κατά τη διάρκεια της αντισυρτικής περιόδου, m/s
07ΜΕΓ_ΑΝΕΜ	Μέγιστη τιμή έντασης ανέμου του μήνα Ιουλίου, m/s
07ΜΕΓ_ΘΕΡΜ	Μέγιστη τιμή θερμοκρασίας του μήνα Ιουλίου, °C
07_ΑΝΕΜ	Μέση τιμή έντασης ανέμου του μήνα Ιουλίου, m/s
ΚΑΙΣΗ	Τοπογραφικές κλίσεις των γεωγραφικών μονάδων

ανεξάρτητες μεταβλητές, όπως περιληπτικά παρουσιάζονται στον Πίνακα II. Σύμφωνα με τα συνολικά ποσοστά ακρίβειας, τα οποία κυμάνθησαν πάνω από 65%, και τα τέσσερα μοντέλα παρουσίασαν ικανοποιητική απόδοση στην εκτίμηση της εξαρτημένης μεταβλητής.

Πιο συγκεκριμένα το μοντέλο 4, το οποίο συμπεριλαμβάνει μόνο τρεις μεταβλητές i) θερμοκρασία ii) άνεμο iii) κλίση, παρουσίασε τη μέγιστη τιμή ακρίβειας (68,10%), αν και θεωρείται ως μη στατιστικά διαφορετική σε σχέση με το ποσοστό 67,92% του τρίτου μοντέλου. Ερμηνεία των αποτελεσμάτων του μοντέλου επιβεβαιώνει αυτό που θεωρητικά αναφέρεται σχετικά με τους παράγοντες που επηρεάζουν την εξάπλωση των

Πίνακας II. Εκτιμώμενοι συντελεστές (b_0, b_1, \dots, b_k) των μοντέλων της λογιστικής παλινδρόμησης με έλεγχο σημαντικότητας 5% και ποσοστά ακρίβειας των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης.

Μεταβλητή	Μοντέλο 1	Μοντέλο 2	Μοντέλο 3	Μοντέλο 4
ΕΤΗ_BPOX	0,0065	-0,0177	-0,0162	
ΒΟΣΚΗ	-4,2726		0,9719*	
ΣΥΜΠΕΡΙ	0,1077*	0,3560	0,4207	
ΑΠ_BPOX	0,0174	-0,0077	-0,0077	
ΑΠ_ΥΓΡ		0,0194	0,0190	
ΑΠ_ΘΕΡΜ		-0,3179	-0,2921	-0,3385
ΑΠ_ΑΝΕΜ			0,0383*	
07ΜΕΓ_ΑΝΕΜ	-0,1279	-0,1606	-0,1634	-0,1496
07ΜΕΓ_ΘΕΡΜ		-0,2764	-0,2526	
07_ΑΝΕΜ			0,0123*	
ΚΑΙΣΗ	-0,5519	-0,6404	-0,6525	-0,5227
ΣΤΑΘΕΡΑ	-1,5235	24,8579	22,7762	11,7571
Συνολική Ακρίβεια	65,30%	67,77%	67,92%	68,10%

* Μη σημαντικές σε επίπεδο 5%

δασιών πυρκαγιών, ότι δηλαδή από τους πλέον σημαντικούς παράγοντες που εννοούν τη διάδοση των δασιών πυρκαγιών είναι η ένταση του ανέμου, οι υψηλές θερμοκρασίες που συνδέονται με την περιεχόμενη υγρασία του καυσίμου, και οι κλίσεις του εδάφους.

Τα μοντέλα 2 και 3 τα οποία συμπεριλαμβάνουν αντίστοιχα 8 και 11 μεταβλητές, εκ των οποίων οι 8 είναι κοινές και για τα δύο μοντέλα και αποτελούν τις στατιστικά σημαντικές, έδωσαν παρόμοια αποτελέσματα. Η διαφορά του τρίτου μοντέλου σε σχέση με το δεύτερο είναι ότι συμπεριλαμβάνει τρεις μεταβλητές οι οποίες

σύμφωνα με τα αποτελέσματα της λογιστικής παλινδρόμησης αποτελούν μη στατιστικά σημαντικές μεταβλητές, κάτι το οποίο επαληθεύεται εξετάζοντας τις συνολικές ακριβείες των δύο. Το μοντέλο 2 έδωσε συνολική ακρίβεια 67,77% ενώ το μοντέλο 3 είχε 67,92% ακρίβεια, κάτι το οποίο δεν συνιστά στατιστικά σημαντική διαφορά. Τέλος το μοντέλο 1 το οποίο συμπεριλαμβάνει 6 συνολικά ανεξάρτητες μεταβλητές επεξηγεί το 65,30% των αρχικών παρατηρήσεων και αποδεικνύεται εκ των τεσσάρων το λιγότερο αποτελεσματικό.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι συντελεστές στα μοντέλα της λογιστικής παλινδρόμησης συμπεριλαμβανομένου και του πρόσημου τους δεν καταγράφουν την πραγματική σχέση της ανεξάρτητης μεταβλητής με την εξαρτημένη. Έτσι για ευνόητους λόγους δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διεξαγωγή γενικών συμπερασμάτων, το πως δηλαδή επηρεάζει στην πραγματικότητα κάποια ανεξάρτητη μεταβλητή την εξαρτημένη. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η συμπεριφορά κάποιας ανεξάρτητης μεταβλητής σε ένα πολυμεταβλητό λογιστικό μοντέλο καθορίζεται και από την ύπαρξη των υπολοίπων μεταβλητών. Ιδιαίτερα δε, όταν μεταξύ των ανεξάρτητων μεταβλητών υπάρχει υψηλή συσχέτιση τότε η εξαγωγή τέτοιων συμπερασμάτων κρίνεται πρακτικά αδύνατη.

Από τα τέσσερα αρχικά λογιστικά μοντέλα το δεύτερο (8 μεταβλητές) και τέταρτο (3 μεταβλητές) χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για την ανάπτυξη του δείκτη επικινδυνότητας στο National Dinosaur Monument. Εξηγώντας τα αποτελέσματα ταξινόμησης από την ανάπτυξη των μοντέλων, όπως παρουσιάζονται στους Πίνακες III και IV, είναι φανερό ότι το μοντέλο 4 παρουσιάζει σαφώς καλύτερη αποτελεσματικότητα σε σχέση με το μοντέλο 2 κάτι το οποίο δεν αποτυπώνεται στη συνολική ακρίβεια των δύο. Η διαφορά των συνολικών ακριβειών των δύο μοντέλων ανέρχεται μόλις στο 0,33%, το οποίο ως αποτέλεσμα δίνει την εντύπωση ότι μεταξύ των δύο αυτών μοντέλων δεν υπάρχει σημαντική διαφορά. Εξετάζοντας όμως τις επιμέρους ακριβείες των δύο κατηγοριών μέσα σε κάθε μοντέλο γίνεται φανερό ότι το μοντέλο 4 παρουσιάζει καλύτερη αποτελεσματικότητα αφού η ακρίβεια των “καμένων” παρατηρήσεων ανέρχεται στο 63,96% σε αντίθεση με το μοντέλο 2 στο οποίο ανέρχεται στο 57,73%, δημιουργώντας μία διαφορά 6,23 εκατοστιαίων μονάδων. Επιβεβαιώνεται δηλαδή αυτό που έχει ήδη αναφερθεί ότι για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των μοντέλων της λογιστικής παλινδρόμησης θα πρέπει να εξετάζονται διάφορα στατιστικά μεγέθη. Στην περίπτωση όπου το κριτήριο αξιολόγησης είναι τα ποσοστά ακριβείας των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, τότε η προϋπόθεση η οποία θα πρέπει να ισχύει είναι ότι και οι δύο κατηγορίες παρατηρήσεων θα πρέπει να συνεισφέρουν το ίδιο στη συνολική ακρίβεια.

Πίνακας III. Αποτελέσματα ταξινόμησης του λογιστικού μοντέλου 2 όπως προκύπτουν από τις συγκρίσεις των πραγματιζών με τις προβλεπόμενες παρατηρήσεις.

		Προβλεπόμενες		Ποσοστό Ακρίβειας
		Μη καμένο	Καμένο	
Πραγματιζές		0	1	
Μη καμένο	0	9806	3118	75,87%
Καμένο	1	4406	6018	57,73%
Συνολικό Ποσοστό				67,77%

Πίνακας IV. Αποτελέσματα ταξινόμησης του λογιστικού μοντέλου 4 όπως προκύπτουν από τις συγκρίσεις των πραγματιζών με τις προβλεπόμενες παρατηρήσεις.

		Προβλεπόμενες		Ποσοστό Ακρίβειας
		Μη καμένο	Καμένο	
Πραγματιζές		0	1	
Μη καμένο	0	9234	3690	71,45%
Καμένο	1	3757	6667	63,96%
Συνολικό Ποσοστό				68,10%

όπου το κριτήριο αξιολόγησης είναι τα ποσοστά ακριβείας των αποτελεσμάτων της ταξινόμησης, τότε η προϋπόθεση η οποία θα πρέπει να ισχύει είναι ότι και οι δύο κατηγορίες παρατηρήσεων θα πρέπει να συνεισφέρουν το ίδιο στη συνολική ακρίβεια.

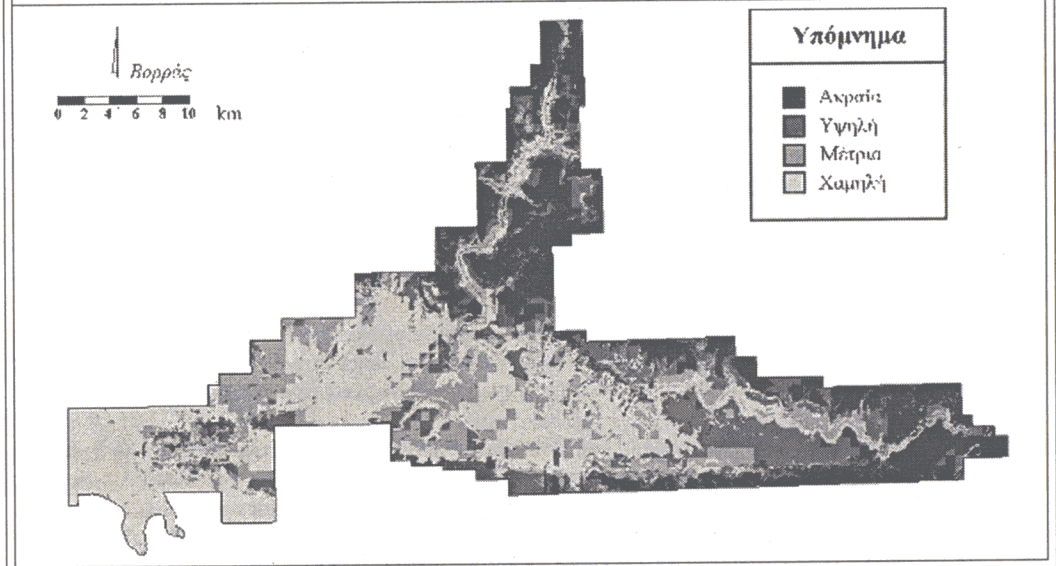
Τέλος η χαρακτηριστική του βαθμού επικινδυνότητας διασικών πυρκαγιών στην περιοχή μελέτης, μέσω της μοντελοποίησης εμφάνισης πυρκαγιών της περιόδου 1940-1992, βασίστηκε στις πιθανότητες εμφάνισης των πυρκαγιών. Το διάστημα των πιθανοτήτων εμφάνισης πυρκαγιών (0-1) χωρίστηκε σε τέσσερα ισόποσα διαστήματα, εκ των οποίων σε καθένα αποδόθηκε μια ονομαστική κατηγορία κινδύνου από χαμηλό (πιθανότητα εμφάνισης <25%), μέτριο (πιθανότητα εμφάνισης 25%-50%), υψηλό (πιθανότητα εμφάνισης 50%-75%) και ακραίο (πιθανότητα εμφάνισης >75%). Η χωρική κατανομή του βαθμού επικινδυνότητας εμφάνισης διασικών πυρκαγιών, σύμφωνα με το τέταρτο μοντέλο, παρουσιάζεται με τη μορφή θεματικού χάρτη στο Σχήμα 2. Οι περισσότερες από τις ιστορικές πυρκαγιές των τελευταίων 50 ετών έζησαν στις περιοχές υψηλού-ακραίου βαθμού επικινδυνότητας, πι-

στοποιώντας και τα μεγάλα ποσοστά ακριβείας των λογιστικών μοντέλων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το κύριο αντικείμενο της μελέτης αυτής ήταν η ανάδειξη της χρησιμότητας των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών, τα οποία με τη βοήθεια κατάλληλων στατιστικών εργαλείων μπορούν να συνεισφέρουν πρώτον στην καλύτερη κατανόηση του φαινομένου των δασικών πυρκαγιών και δεύτερον στην προσφορά νέων πληροφοριών κατάλληλων για την αποτελεσματική διαχείριση αυτών. Επίσης η μελέτη αυτή ανέδειξε

Χάρτης Επικινδυνότητας Δασικών Πυρκαγιών (Dinosaur National Monument, ΗΠΑ)



Σχήμα 2. Χωρική κατανομή του βαθμού επικινδυνότητας εμφάνισης και εξάπλωσης των δασικών πυρκαγιών σε ολόκληρη την έκταση των 850.000 στρεμμάτων του εθνικού δρυμού.

την αξία της λογιστικής παλινδρόμησης στην ερημνεία και μοντελοποίηση φαινομένων τα οποία μπορούν να εκφραστούν με ένα δυαδικό τρόπο.

Οι δασικές πυρκαγιές αποτελούν ένα πολυσύνθετο χωρικό φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται έντονα από περιβαλλοντικούς και κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες, καθώς επίσης και από τη χωρική αλληλοεπίδραση αυτών. Στα πλαίσια ενός καλοσχεδιασμένου συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών, οι αναγκαίοι παράγοντες για την ερημνεία φαινομένων όπως στην περίπτωση αυτή οι δασικές πυρκαγιές, μπορούν αποτελεσματικά να συνδυαστούν σε χωρικό επίπεδο δημιουργώντας έτσι τις αναγκαίες δομές και χωρικές συσχετίσεις για την ανάπτυξη μοντέλων. Η τεχνολογία των Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών μπορεί να στηρίξει την ανάπτυξη στρατηγικών, σε χωρική και χρονική κλίμακα, για την αποτελεσματική αντιμετώπιση του προβλήματος των δασικών πυρκαγιών.

Η γνώση των περιοχών υψηλού κινδύνου θα προσανατολίσει τους αρμόδιους φορείς προς τη σωστή κατεύθυνση εφαρμογής προγραμμάτων πυροπροστασίας. Η εφαρμογή τέτοιων προγραμμάτων θα τεκμηριώνεται ποσοτικά με καθορισμό χωρικών και χρονικών προτεραιοτήτων στις ζώνες υψηλού κινδύνου, ελαχιστοποιώντας το κόστος και μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την αποτελεσματικότητά τους.

Geographic Multivariate Analysis of Spatial Fire Occurrence

K.D. Kalabokidis¹ and N. Koutsias²

ABSTRACT

A geographic information system containing basic environmental variables such as topography, climatic data, land cover and human activities has been established for Dinosaur National Monument, Colorado, USA. Historical data regarding the burned areas of 4-hectare and larger wildfires for the period 1940-1992 were recorded and introduced into an ARC/INFO geographical database, providing thus an ideal case to study a probabilistic fire danger model. This well-structured geographical database offered the opportunity to study and analyze statistically significant correlations between burned areas and environmental variables. Significance of all parameters was detected by multivariate statistical analysis (i.e., logistic regression) and spatial analytical schemes. Four models were tested containing 3 to 11 independent variables to explain fire spatial occurrence. All models showed high estimations of precision with levels of correctness over 65%. The model with 8 variables explained more than 2/3 of fire activity with the least number—but a wide spectrum—of relative variables; the model with the highest percentage correct classification used only 3 environmental variables (i.e. temperature, wind, and slope) to address fire danger. Logistic models were utilized to map probabilistic fire danger in the area with high precision levels.

Key words: Forest Fire Management, Geographic Information Systems, Logistic Regression.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Affi, A.A. and V. Clark, 1984. Computer-aided multivariate analysis (Belmont, California: Lifetime Learning Publications), 458 p.
- Agee, J.K. and S.G. Pickford, 1985. Vegetation and fuel mapping of North Cascades National Park. Final Report. College of Forest Resources, University of Washington, Seattle.
- Aronoff, S., 1989. Geographic Information Systems: a management perspective (Ottawa, Canada: WDL Publications), 294 p.
- Bian, L., and E. West, 1997. GIS Modeling of Elk Calving Habitat in a Prairie Environment with Statistics. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63:161-167.
- Boxall, P.C., and B.L. McFarlane, 1995. Analysis of discrete, dependent variables in human dimensions research: participation in residential wildlife appreciation. *Wildlife Society Bulletin*, 23(2):283-289.
- Brass, J., W.C. Likens, and R.R. Thornhill, 1983. Wildland Inventory for Douglas and Carson City Countries, Nevada, Using Landsat and Digital Terrain Data. NASA Technical Paper 2137, Moffet Field.
- Burgan, R.E., and R.C. Rothermel, 1984. BEHAVE: fire behavior prediction and fuel modeling system – FUEL subsystem. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest & Range Experiment Station, General Technical Report INT-167. 126 p.
- Burrough, P.A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment (New York: Oxford University Press), 193 p.
- Chou, Y.H., 1992α. Status report USFS/UCR joint research on wildland fire management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 58(8):1245-1248.
- Chou, Y.H., 1992β. Management of wildfires with a geographical information system. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6:123-140.
- 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*, 56:1507-1513.
- Chuvieco, E., and R.G. Congalton, 1989. Application of remote sensing and Geographic Information Systems

¹ *Environmental Cartography, University of the Aegean, GR- 811 00 Mytilene, Greece, e-mail@ kalabokidis@ageean.gr*

² *Department of Forestry and Natural Environment, Aristotle University, GR-540 06, Thessaloniki, Greece.*

- to forest fire hazard mapping. *Remote Sensing of Environment*, 29:147-159.
- Chuvieco, E., and J. Salas, 1994. Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographic Information Systems*, 10(3):333-345
- Deeming, J.E., R.E. Burgan, and J.D. Cohen, 1978. The National Fire-Danger Rating System, US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest & Range Experiment Station, General Technical Report INT-39. 63 p.
- Kalabokidis, K.D., C.M. Hay, and Y.A. Hussin, 1991. Spatially resolved fire growth simulation. *In Proceedings 11th Conference on Fire and Forest Meteorology*, April 16-19, 1991, Missoula, MT. Society of American Foresters, Bethesda, Maryland. Pp. 188-195.
- Loftsgaarden, D.O., and P.L. Andrews, 1992. Constructing and Testing Logistic Regression Models for Binary Data: Applications to the National Fire Danger Rating System. US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest & Range Experiment Station, General Technical Report INT-286. 36 p.
- Martell, D.L., S. Otakel, and B.J. Stocks, 1987. A logistic model for predicting daily people-caused fire occurrence in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 17:394-401.
- Mendenhall, W., and T. Sincich, 1996. *A second course in statistics: regression analysis* (New Jersey: Prentice-Hall, Inc.), 899 p.
- Narumalani, S., J.R. Jensen, J.D. Althausen, S. Burkhalter, and H.E. Mackey, Jr., 1997. Aquatic Macrophyte Modeling Using GIS and Logistic Multiple Regression. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63:41-49.
- Norusis, M.J., 1990. *SPSS/PC+ Advanced Statistics™ 4.0 for the IBM PC/XT/AT and PS/2* (SPSS Inc.).
- Norusis, M.J., 1994. *SPSS Professional Statistics 6.1* (Chicago Press: SPSS Inc.).
- Pereira, J.M.C., and R.M. Itami, 1991. GIS-Based Habitat Modeling Using Logistic Multiple Regression: A Study of the Mt. Graham Red Squirrel. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57:1475-1486.
- Ryan, K.C., and E.D. Reinhardt, 1988. Predicting postfire mortality of seven western conifers. *Canadian Journal of Forest Research*, 18:1291-1297.
- Sharma, S., 1996. *Applied Multivariate Techniques* (New York: John Wiley & Sons, Inc.), 493 p.
- Σιάρδος, Γ.Κ., 1999. Μέθοδοι πολυμεταβλητής στατιστικής ανάλυσης (Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Ζήτη), 232 p.
- Star, J. and J. Estes, 1990. *Geographic Information Systems : An Introduction* (New Jersey: Prentice-Hall, Inc.), 303 p.
- van Deventer, A.P., A.D. Ward, P.H. Gowda, and J.G. Lyon, 1997. Using Thematic Mapper Data to Identify Contrasting Soil Plains and Tillage Practices. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 63:87-93.
- Vlieghe, B.M. de, 1992. Risk assessment for environmental degradation caused by fires using remote sensing and GIS in a Mediterranean region (South Euboea, Central Greece), *IGARSS'92*, Houston, 44-47.
- Woods, J.A. and F. Gossette, 1992. A Geographic Information System for brush fire hazard management, *Proc. ACSM-ASPRS Symposium*, Washington, 56-65.
- Wrigley, N., 1976. An introduction to the use of logit models in geography. *Concepts and Techniques in Modern Geography*, Vol. 10 (Norwich: Geo Abstracts).
- Yool, S.R., D.W. Eckhardt, J.E. Estes and M.J. Cosentino, 1985. Describing the brushfire hazard in southern California. *Annals of the Association of American Geographers*, 75:417-430.

*Η παρούσα εργασία χρηματοδοτήθηκε από το Υπουργείο Εσωτερικών των ΗΠΑ (United States Department of Interior, Fire Research Committee, Grant No. K910 A1 0001), σε ερευνητικό πρόγραμμα με επιστημονική συν-
 ευθυνότητα του πρώτου συγγραφέα και τμήμα του οποίου ολοκληρώθηκε στην Ελλάδα. Ευχαριστούμε τα
 εποικοδομητικά σχόλια των 2 ανωνύμων κριτών του περιοδικού, που συνέβαλλαν στη βελτίωση του κειμένου.*