

# ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΖΩΝΩΝ ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΟΤΗΤΑΣ ΔΑΣΙΚΩΝ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ: ΜΙΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΣΕ ΙΣΤΟΡΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

**Νίκος Κούτσιας,\* Μιχάλης Καρτέρης,\*\* Παναγιώτης Μπαλατσός,\*\*\*  
Κώστας Καλαμποκίδης\*\*\*\***

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται βασικές αρχές στρατηγικού σχεδιασμού ζωνών επικινδυνότητας δασικών πυρκαγιών χρησιμοποιώντας τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών ως το βασικό εργαλείο επεξεργασίας χωρικών δεδομένων, μεθόδους χωρικής ανάλυσης και ιστορικά δεδομένα έναρξης δασικών πυρκαγιών. Ειδικότερα, δίνεται έμφαση στις χωρικές ανακρίβειες των σημείων έναρξης των πυρκαγιών και παρουσιάζεται μια μεθοδολογική προσέγγιση που αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση των επιδράσεών τους. Η βασική αρχή της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι η θεώρηση ότι τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών δεν αποτελούν ακριβή χωρικά σημεία αλλά ασαφή, τα οποία προσδιορίζουν μια ευρύτερη περιοχή μέσα στην οποία βρίσκεται στην πραγματικότητα το σημείο έναρξης. Η γνώση περιοχών υψηλού κινδύνου συνιστά στρατηγικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα για τη ορθολογική λήψη αποφάσεων, αφού τέτοια προγράμματα μπορούν να εφαρμόζονται με χωρική και χρονική προτεραιότητα στις ζώνες αυτές, ελαχιστοποιώντας το κόστος υλοποίησης και μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την αποτελεσματικότητά τους.

## *A Strategic Planning Approach in Wildland Fire Danger Zoning: A Geographical Perspective with Historical Fire Observations*

**Nikos Koutsias, Michael Karteris, Panagiotis Balatsos, Kostas Kalabokidis**

## ABSTRACT

Basic principles of a strategic approach in planning wildland fire danger zones are presented based on Geographic Information Systems (GIS), methods of spatial analysis, and historical fire observations. More specifically, the study puts emphasis on the positional inaccuracies of wildland fire ignition points and proposes a methodological approach that aims at minimizing their effects. The fundamental principle of the proposed methodology is the presumption that wildland fire ignition points do not constitute exact point locations but fuzzy ones, which define a broader area where the actual point location lies inside. Fire risk zoning may offer a strategic operational advantage for the proper development of a Decision Support System, since such actions can be applied with priority (spatial and temporal) inside the zones of high risk, reducing the required cost and maximizing their efficiency.

\* Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, e-mail: koutsias@for.auth.gr, και Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Ζυρίχης, e-mail: koutsias@geo.unizh.ch

\*\* Τμήμα Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος, ΑΠΘ, e-mail: karteris@for.auth.gr.

\*\*\* Υπουργείο Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Ανάπτυξης & Προστασίας Δασών & Φυσικού Περιβάλλοντος, e-mail: pbalatso@yahoo.com.

\*\*\*\* Τμήμα Γεωγραφίας, Πανεπιστήμιο Αιγαίου, e-mail: kalabokidis@aegean.gr.

## 1. Εισαγωγή

Ιστορικά στοιχεία εμφάνισης δασικών πυρκαγιών συμπεριλαμβάνουν, μεταξύ άλλων πληροφοριών, τις συντεταγμένες  $x$  και  $y$  των σημείων έναρξης των πυρκαγιών. Αυτά τα πρωτογενή δεδομένα τα οποία καταγράφονται για κάθε επεισόδιο πυρκαγιάς αποτελούν το πιο λεπτομερειακό επίπεδο πληροφορίας. Δευτερογενή δεδομένα, τα οποία περιγράφουν το χωρικό πρότυπο των δασικών πυρκαγιών σε διάφορα ιεραρχικά επίπεδα και κλίμακες, προκύπτουν από αυτά τα πρωτογενή δεδομένα χρησιμοποιώντας εργαλεία χωρικής ανάλυσης και στατιστικές μεθόδους.

Τα πρωτογενή όμως αυτά δεδομένα, εξαιτίας διαφόρων παραγόντων, όπως π.χ. δυσκολίες επακριβούς προσδιορισμού του σημείου έναρξης λόγω χρησιμοποίησης μικρής κλίμακας χαρτογραφικού υπόβαθρου, περιέχουν χωρικές ανακρίβειες. Όταν το αντικείμενο έρευνας είναι ο προσδιορισμός και η επεξήγηση του χωρικού προτύπου των δασικών πυρκαγιών, τότε αυτά τα χωρικά ασαφή σημεία έναρξης ενδέχεται, αναλόγως της μεθόδου, να εισαγάγουν σημαντικά σφάλματα. Το πρόβλημα της χωρικής ανακρίβειας ενισχύεται όταν άλλες επεξηγηματικές μεταβλητές δημιουργούνται με τη χωρική υπέρθεση των σημείων αυτών σε διάφορα γεωγραφικά/χωρικά δεδομένα.

Η διερεύνηση και απόδοση του χωρικού προτύπου έναρξης των δασικών πυρκαγιών μπορεί να εξεταστεί σε διάφορα επίπεδα χωρικής και χρονικής κλίμακας. Χωρικά διακρίνεται σε εθνικό και σε τοπικό επίπεδο, ενώ χρονικά διακρίνεται σε βραχυπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο επίπεδο. Εθνικές ή περιφερειακές χωρικές κλίμακες υιοθετούνται προκειμένου να τεθούν γενικοί προσανατολισμοί και διαχειριστικά πλάνα, ενώ τοπικές χωρικές κλίμακες υιοθετούνται για συγκεκριμένες ενέργειες πρόληψης και καταστολής των πυρκαγιών σε μικρές περιοχές. Από την άλλη, βραχυπρόθεσμες κλίμακες απαιτούνται για την έγκαιρη λήψη αποφάσεων σε δραστηριότητες άμεσης επέμβασης και καταστολής, ενώ μακροπρόθεσμες κλίμακες στοχεύουν στη θέσπιση γενικευμένων και περισσότερο μόνιμων διαχειριστικών πλάνων αναφορικά με την πρόληψη, έγκαιρη επέμβαση και καταστολή (Chuvieco et al. 1998).

Κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις των δασικών πυρκαγιών δεν αναδεικνύουν μόνο τη σημαντικότητα του προβλήματος, αλλά επιβάλλουν την ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πληροφοριακού και διαχειριστικού συστήματος για την πρόληψη, έγκαιρη επέμβαση και καταστολή τους. Οι πυρκαγιές όμως αφ' εαυτού συνιστούν ένα πολυσύνθετο χωρικό φαινόμενο το οποίο επηρεάζεται από διάφορους βιοφυσικούς και ανθρωπογενείς παράγοντες, η αποτελεσματική διαχείριση των οποίων απαιτεί την κατανόηση των λειτουργιών του καθενός παράγοντα ξεχωριστά, καθώς και των χωροχρονικών δομών και αλληλοσυσχετίσεών τους. Η μοντελοποίηση που προκύπτει από πολυδιάστατες χωρικές αναλύσεις και η οποία βασίζεται σε ιστορικά στατιστικά δεδομένα εμφάνισης των πυρκαγιών έχει αποδειχθεί ότι μπορεί να συνεισφέρει στη χωροθέτηση ζωνών υψηλού κινδύνου εκδήλωσης πυρκαγιών (Chou 1992, Καλαμποκίδης & Κούτσιας 2000).

Συστήματα που βασίζονται στην εκ των προτέρων γνώση των πιθανών περιοχών εκδήλωσης πυρκαγιών καθώς και στη γνώση της συμπεριφοράς της φωτιάς αποτελούν ένα στρατηγικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα στην ορθολογική λήψη των αποφάσεων που αφορούν στη διάγνωση, την πρόγνωση και την ευρύτερη δράση μιας πυρκαγιάς. Η επίτευξη αυτού του στόχου προϋποθέτει τη σε

βάθος κατανόηση των παραμέτρων που επηρεάζουν την έναρξη και εξάπλωση των πυρκαγιών και συνεπώς διαμορφώνουν το βαθμό επικινδυνότητάς τους.

Η ανάπτυξη δεικτών επικινδυνότητας δασικών πυρκαγιών, καθώς επίσης και η διερεύνηση των στατιστικά σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν την έναρξη και διάδοση αυτών, απαιτεί να ληφθούν υπόψη πολλά περιβαλλοντικά δεδομένα, με συνθετότερα τα μετεωρολογικά, τοπογραφικά και τα μοντέλα καύσιμης ύλης (Deeming et al. 1978, Kalabokidis et al. 1991).

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

1) χρησιμοποίηση ποιοτικών κριτηρίων για τον ορισμό τιμών επικινδυνότητας σε συγκεκριμένους συνδυασμούς των μεταβλητών (Brass et al. 1983, Yool et al. 1985):

2) αποδοχή διαφόρων δεικτών επικινδυνότητας, όπως για παράδειγμα το NFDRS των ΗΠΑ (Agee & Pickford 1985) ή κάποιων συνιστωσών του BEHAVE (Woods & Gossette 1992):

3) ανάπτυξη νέων μοντέλων επικινδυνότητας, χρησιμοποιώντας συντελεστές βαρύτητας των μεταβλητών που επηρεάζουν τον κίνδυνο (Chuvieco & Congalton 1989, Vliegheer 1992):

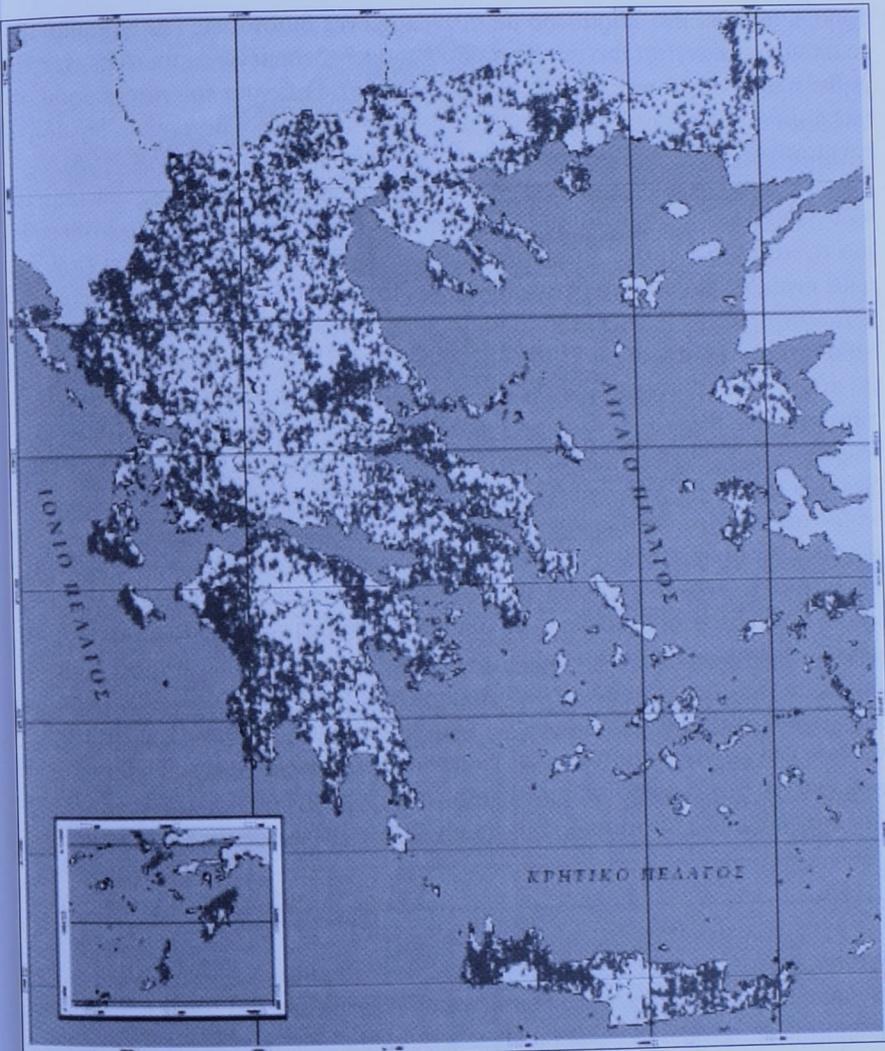
4) δημιουργία τοπικά προσανατολισμένων μοντέλων, όπου οι τιμές επικινδυνότητας της κάθε μεταβλητής εκτιμούνται από την ανάπτυξη μοντέλων παλινδρόμησης των μεταβλητών (Chou 1992).

Τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), ως ένα σύγχρονο εργαλείο χωρικής επεξεργασίας και μοντελοποίησης δεδομένων του περιβάλλοντος, έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στη γεωγραφική ανάλυση εμφάνισης πυρκαγιών και εκτίμησης του κινδύνου αυτών (Chou 1992, Καλαμποκίδης & Κούτσιος 2000). Χωρικά δεδομένα όσον αφορά στην κατανομή στο χώρο και στο χρόνο της κάλυψης δασών και δασικών εκτάσεων, μετεωρολογικών δεδομένων, της τοπογραφίας και άλλων περιβαλλοντικών παραγόντων μπορούν με ευκολία και ταχύτητα να υποστούν επεξεργασία στα πλαίσια μιας χωρικά δομημένης τράπεζας πληροφοριών, μέσω των εργαλείων που προσφέρουν τα ΓΣΠ, η επιστήμη της πληροφορικής και η ψηφιακή αυτόματη επεξεργασία.

Στην παρούσα εργασία, χρησιμοποιώντας τα ΓΣΠ ως βασικό εργαλείο επεξεργασίας χωρικών δεδομένων καθώς και μεθόδους χωρικής ανάλυσης, παρουσιάζουμε τις βασικές αρχές στρατηγικού σχεδιασμού ζωνών επικινδυνότητας δασικών πυρκαγιών. Η βασική αρχή της προτεινόμενης μεθόδου είναι η θεώρηση ότι τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών δεν αποτελούν ακριβή χωρικά σημεία αλλά ασαφή, τα οποία προσδιορίζουν μια ευρύτερη περιοχή μέσα στην οποία βρίσκεται στην πραγματικότητα το σημείο έναρξης. Αυτό επιτυγχάνεται με την τοποθέτηση μιας κανονικής διμεταβλητής συνάρτησης έντασης πιθανοτήτων σε κάθε σημειακή παρατήρηση.

## 2. Περιοχή έρευνας και δεδομένα

Τα πρωτογενή δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι συντεταγμένες  $x$  και  $y$  των σημείων έναρξης των δασικών πυρκαγιών που έχουν εκδηλωθεί το χρονικό διάστημα 1985-1995 στην Ελλάδα (Χάρτης 1). Τα σημειακά αυτά δεδομένα παρουσιάζουν χωρικές ανακρίβειες εξαιτίας της χρησιμοποίησης μόνο των μοιρών και των πρώτων λεπτών για τον προσδιορισμό του γεωγραφικού μήκους



#### Χάρτης 1.

Σημεία έναρξης δασικών πυρκαγιών που έχουν εκδηλωθεί τη χρονική περίοδο 1985-1995 στην Ελλάδα (Πηγή: Υπουργείο Γεωργίας, Γενική Διεύθυνση Ανάπτυξης & Προστασίας Δασών & Φυσικού Περιβάλλοντος, Διεύθυνση Προστασίας Δασών & Φυσικού Περιβάλλοντος, Τμήμα Πρόληψης & Καταστολής Πυρκαγιών & Λοιπών Κινδύνων)

και πλάτους των σημείων έναρξης. Η χωρική αβεβαιότητα που προκύπτει κυμαίνεται κατά προσέγγιση από  $\pm 625$  έως  $\pm 815$  μέτρα για τον άξονα συντεταγμένων x και από  $\pm 885$  έως  $\pm 985$  μέτρα για τον άξονα συντεταγμένων y, αναλόγως της θέσης του σημείου σε σχέση με το γεωγραφικό μήκος και πλάτος.

Τέλος, τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν τα έτη 1996 και 1997, και τα οποία δεν συμπεριλήφθηκαν στον αρχικό σχεδιασμό των ζωνών επικινδυνότητας, χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης.

### 3. Θεωρητικό υπόβαθρο

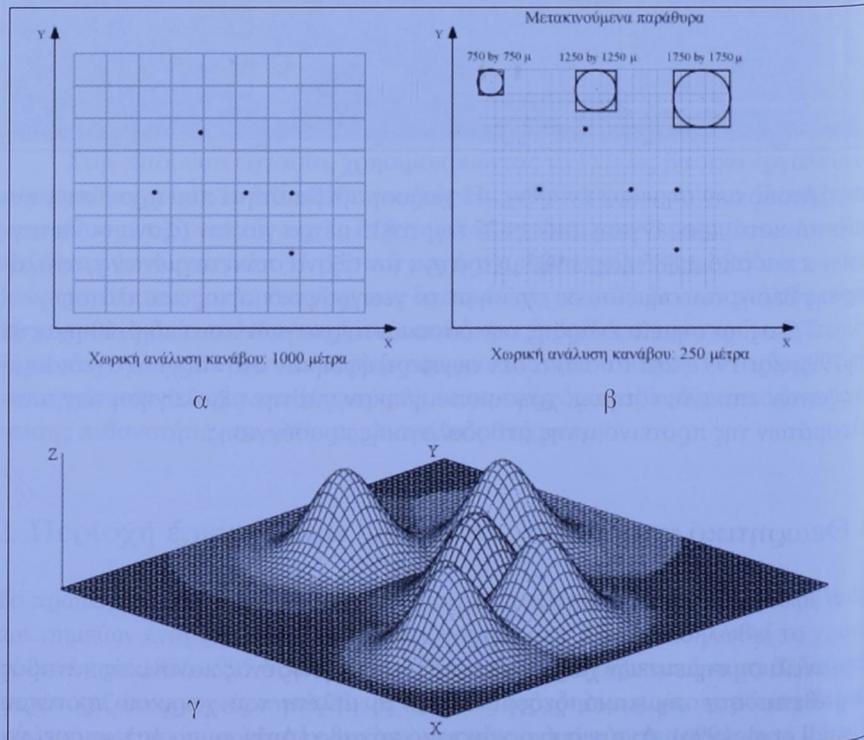
#### 3.1. Η μέθοδος πυρήνα (kernel)

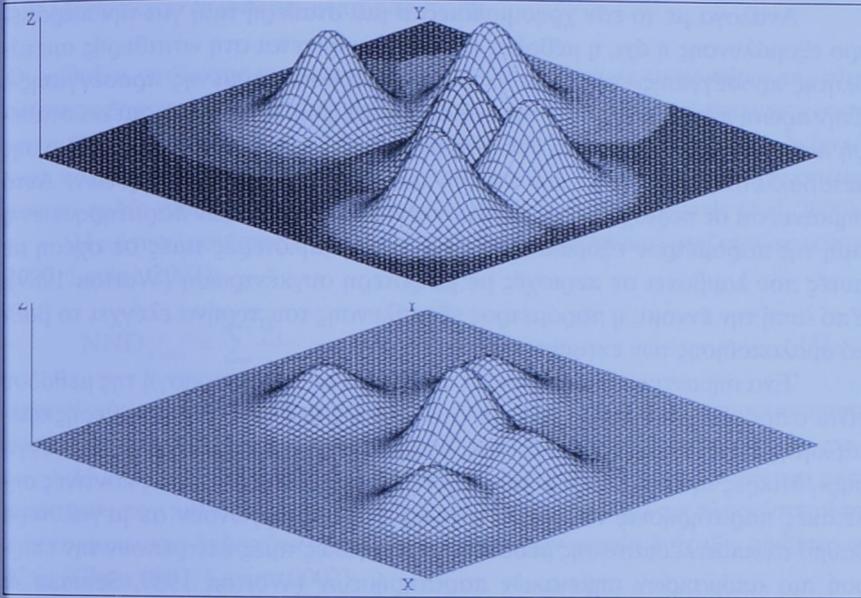
Στην ανάλυση σημειακών χωρικών προτύπων συνήθως ένας κανονικός κάναβος υπερτίθεται στα σημειακά δεδομένα για τη μελέτη του χωρικού προτύπου (Gatrell et al. 1996). Αντί για ένα κανονικό κάναβο (Διάγραμμα 1α), μπορεί να

χρησιμοποιηθεί ένα παράθυρο με συγκεκριμένες διαστάσεις (Διάγραμμα 1β), το οποίο μετακινείται στο σύνολο των σημειακών δεδομένων, έτσι ώστε να εκτιμηθεί η πυκνότητά τους (Bailey & Gatrell 1995). Η έννοια του παραθύρου συγκεκριμένων διαστάσεων μπορεί να αντικατασταθεί από τον πυρήνα, δηλαδή από μια τριών διαστάσεων συνάρτηση (Διάγραμμα 1γ) (Gatrell et al. 1996).

Η εφαρμογή της μεθόδου γίνεται εκτιμώντας την πυκνότητα των σημειακών δεδομένων σε κάθε τομή του υπερτιθέμενου κανάβου, αφού τοποθετηθεί μια συνάρτηση έντασης πιθανοτήτων σε κάθε σημειακή παρατήρηση (π.χ. σημεία έναρξης δασικών πυρκαγιών). Η χαρτογράφηση της πυκνότητας των σημείων έναρξης υπολογίζεται από το άθροισμα όλων των συναρτήσεων έντασης πιθανοτήτων (Διάγραμμα 2) (Seaman & Powell 1996, Levine 2002). Είναι μια μη παραμετρική στατιστική μέθοδος η οποία έχει εκτενώς χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση περιοχών διαβίωσης πληθυσμών σε έρευνες του γνωστικού αντικείμενου της οικολογίας για την άγρια ζωή (wildlife ecology) (Worton 1989, Seaman & Powell 1996, Tufto et al. 1996). Η μέθοδος έχει την ικανότητα να εκτιμά την πυκνότητα σημειακών δεδομένων, η οποία δεν επηρεάζεται από το μέγεθος της ελάχιστης χαρτογραφικής μονάδας, το σχήμα αυτών και άλλων τοπικών διακυμάνσεων (Worton 1989, Seaman & Powell 1996, Tufto et al. 1996).

Πρόσφατα, οι Koutsias et al. (υπό δημοσίευση) εισήγαγαν με επιτυχία τη μέθοδο για την απόδοση και περιγραφή του χωρικού προτύπου εμφάνισης δασικών πυρκαγιών. Η μέθοδος πυρήνα χρησιμοποιήθηκε σε δεδομένα έναρξης πυρκαγιών στο Νομό Χαλκιδικής, και διαπιστώθηκε η χρησιμότητά της στην ανάλυση του χωρικού προτύπου της εμφάνισης δασικών πυρκαγιών. Πιο συγκεκριμένα, το χωρικό πρότυπο που προκύπτει από την εφαρμογή της μεθόδου δεν επηρεάζεται έντονα από τις χωρικές ανακρίβειες των σημείων έναρξης.





**Διάγραμμα 2.**

Σύμφωνα με τη μέθοδο πυρήνα, σε κάθε σημείο τοποθετείται μια συνάρτηση έντασης πιθανοτήτων και υπολογίζεται η πυκνότητα από το άθροισμα όλων των συναρτήσεων που συμπίπτουν σε κάθε σημείο (από Koutsias et al., υπό δημοσίευση)

Η μέθοδος η οποία ακολουθεί τις βασικές αρχές του «μετακινούμενου παραθύρου» πλεονεκτεί, διότι κατά τη διαδικασία της παρεμβολής λαμβάνει υπόψη τη σχετική θέση των σημειακών παρατηρήσεων μέσα στην ακτίνα δράσης του πυρήνα (Koutsias et al., υπό δημοσίευση).

Η μέθοδος πυρήνα ορίζεται μαθηματικά ως (Seaman & Powell 1996, Silverman 1986, Worton 1989, Tufto et al. 1996):

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n K\left\{\frac{(x - X_i)}{h}\right\} \quad [1]$$

όπου  $n$  είναι ο αριθμός των σημειακών παρατηρήσεων,  $h$  η παράμετρος εξομάλυνσης ή το εύρος ζώνης,  $K$  η συνάρτηση του πυρήνα,  $x$  ένα διάνυσμα συντεταγμένων που ορίζουν τη θέση των σημείων όπου πρόκειται να εκτιμηθεί η συνάρτηση, και  $X_i$  διανύσματα συντεταγμένων τα οποία ορίζουν κάθε σημειακή παρατήρηση  $i$ .

Εκτός από την κανονική κατανομή, η οποία είναι η πιο διαδεδομένη συνάρτηση πυρήνα (Kelsall & Diggle 1995), άλλες συναρτήσεις είναι η τριγωνική (Burt & Barber 1996), η τετάρτου βαθμού (Bailey & Gatrell 1995) και άλλες. Η κανονική κατανομή η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία ορίζεται ως εξής (Levine 2002):

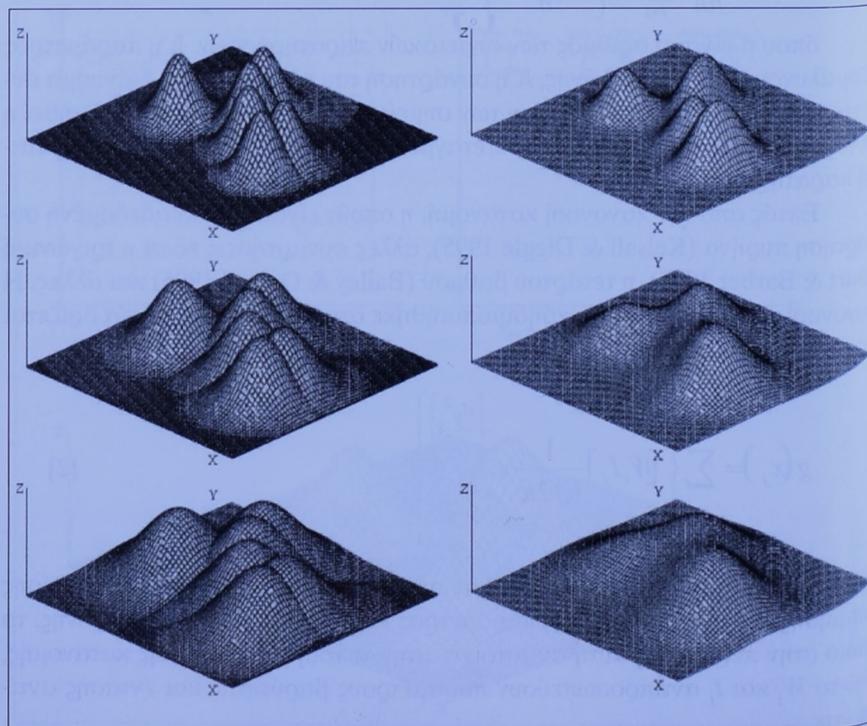
$$g(x_j) = \sum \left\{ [W_i I_i] \frac{1}{h^2 2\pi} e^{-\frac{d_{ij}^2}{2h^2}} \right\} \quad [2]$$

όπου  $d_{ij}$  είναι η απόσταση μεταξύ μιας σημειακής παρατήρησης και της θέσης εκτίμησης της συνάρτησης,  $h$  η παράμετρος εξομάλυνσης ή το εύρος ζώνης, το οποίο στην περίπτωση αυτή αντιστοιχεί στην τυπική απόκλιση της κατανομής, ενώ τα  $W_i$  και  $I_i$  αντιπροσωπεύουν παραμέτρους βαρύτητας και έντασης αντίστοιχα.

Ανάλογα με το εάν χρησιμοποιείται μια σταθερή τιμή για την παράμετρο εξομάλυνσης ή όχι, η μέθοδος πυρήνα διακρίνεται στη «σταθερής αμετάβλητης προσέγγισης» και στην «πολλαπλής προσαρμοσμένης προσέγγισης». Στην πρώτη περίπτωση η τιμή της παραμέτρου εξομάλυνσης παραμένει σταθερή και αμετάβλητη, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η παράμετρος εξομάλυνσης μεταβάλλεται ανάλογα με την ένταση των σημειακών παρατηρήσεων. Αυτό σημαίνει ότι σε περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση σημειακών παρατηρήσεων η τιμή της παραμέτρου εξομάλυνσης λαμβάνει χαμηλότερες τιμές σε σχέση με αυτές που λαμβάνει σε περιοχές με μικρότερη συγκέντρωση (Worton 1989). Υπό αυτή την έννοια, η παράμετρος εξομάλυνσης του πυρήνα ελέγχει το βαθμό ομαλοποίησης των εκτιμήσεων.

Ένα σημαντικό θέμα το οποίο σχετίζεται με την εφαρμογή της μεθόδου είναι ο προσδιορισμός της παραμέτρου εξομάλυνσης τόσο στη «σταθερής αμετάβλητης προσέγγισης» όσο και στην «πολλαπλής προσαρμοσμένης προσέγγισης». Μικρές τιμές της παραμέτρου εξομάλυνσης επιτρέπουν στις κοντινές σημειακές παρατηρήσεις να επικρατούν και να διαμορφώνουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα της μεθόδου, ενώ μεγάλες τιμές επιτρέπουν την επιρροή πιο απόμακρων σημειακών παρατηρήσεων (Worton 1989, Seaman & Powell 1996).

Αντί της επιλογής μιας αυθαίρετης τιμής της παραμέτρου εξομάλυνσης του πυρήνα, είναι προτιμότερος ο προσδιορισμός της με μια πιο μαθηματική-στατιστική προσέγγιση. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί αρκετοί τρόποι και μέθοδοι εκτίμησης της παραμέτρου εξομάλυνσης (Seaman & Powell 1996, Silverman 1986, Worton 1989, Jones et al. 1996, Grund & Polzehl 1998, Katkovnik & Shmulevich 2002). Η επίδραση της παραμέτρου εξομάλυνσης στα αποτελέσματα της μεθόδου παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.



**Διάγραμμα 3.**

Μικρές τιμές της παραμέτρου εξομάλυνσης επιτρέπουν στις κοντινές σημειακές παρατηρήσεις να επικρατούν και να διαμορφώνουν σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα της εκτίμησης έντασης πιθανοτήτων, ενώ μεγάλες τιμές επιτρέπουν την επιρροή μακρινότερων σημειακών παρατηρήσεων (από Leone et al. 2003)

### 3.2. Μέση πλησιέστερη γειτονική απόσταση

Οι μέθοδοι ανάλυσης χωρικών σημειακών προτύπων με το κριτήριο της πλησιέστερης γειτονικής απόστασης (Clark & Evans 1954) έχουν εκτενώς χρησιμοποιηθεί σε μελέτες διερεύνησης της χωρικής διάταξης σημειακών δεδομένων, καθώς και στο στατιστικό έλεγχο της τυχαίας διάταξης αυτών σε επιστημονικά πεδία όπως η οικολογία, η γεωλογία, η βιοϊατρική (Davis et al. 2000).

Η μέση πλησιέστερη γειτονική απόσταση (NND<sub>mean</sub>) ορίζεται ως (Chou 1997, Levine 2002):

$$\text{NND}_{\text{mean}} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n} \quad [3]$$

όπου  $d_i$  είναι η απόσταση μεταξύ κάθε σημειακής παρατήρησης με την κοντινότερη γειτονική και  $n$  ο συνολικός αριθμός σημειακών παρατηρήσεων.

Η μέση τυχαία απόσταση (RD<sub>mean</sub>), η οποία αντιπροσωπεύει τη μέση απόσταση που κάθε σημειακή παρατήρηση θα απείχε από την πλησιέστερή της εάν τα σημειακά δεδομένα χωρικά ακολουθούσαν τυχαία διάταξη, ορίζεται ως εξής (Chou 1997, Levine 2002):

$$\text{RD}_{\text{mean}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A}{n}} \quad [4]$$

όπου  $A$  είναι η έκταση της περιοχής και  $n$  ο συνολικός αριθμός των σημειακών παρατηρήσεων.

Τέλος, ο δείκτης πλησιέστερης γειτονικής απόστασης (NNI), ο οποίος αντιπροσωπεύει το βαθμό χωρικής διασποράς των σημειακών παρατηρήσεων, ορίζεται ως εξής (Chou 1997, Levine 2002):

$$\text{NNI} = \frac{\text{NND}_{\text{mean}}}{\text{RD}_{\text{mean}}} \quad [5]$$

Όταν ο δείκτης πλησιέστερης γειτονικής απόστασης (NNI) λαμβάνει την τιμή 1, τότε αυτό υποδηλώνει τυχαιότητα. Χαμηλότερες τιμές από την τιμή 1 υποδηλώνουν συσσώρευση, ενώ υψηλότερες τιμές από την τιμή 1 υποδηλώνουν κανονικότητα. Αν και θεωρητικά η ανεξαρτησία των κοντινότερων γειτονικών αποστάσεων είναι σημαντική, έχει βρεθεί (Diggle 1976) ότι η έλλειψή της δεν επηρεάζει έντονα το στατιστικό έλεγχο των Clark & Evans (Sinclair 1985, Boots & Getis 1988).

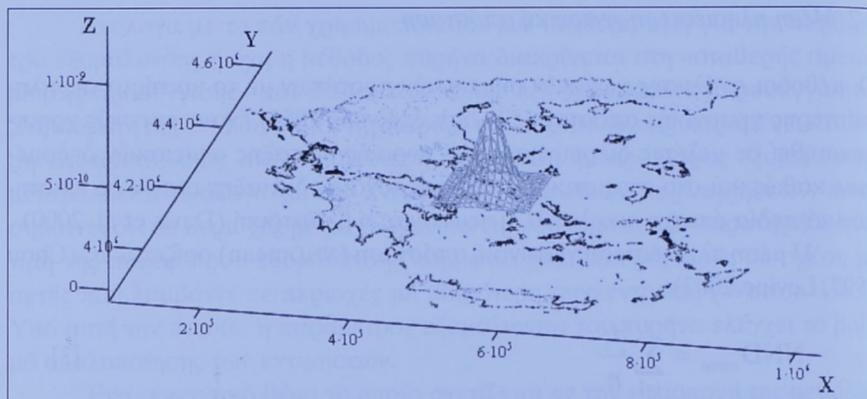
## 4. Μεθοδολογία

### 4.1. Χαρτογράφηση πυκνότητας σημείων έναρξης δασικών πυρκαγιών με τη μέθοδο πυρήνα

Στην παρούσα εργασία η μέθοδος πυρήνα που εφαρμόστηκε είναι η «σταθερής αμετάβλητης προσέγγισης» για την αποφυγή διαφορετικής μεταχείρισης περιοχών με διαφορετικό βαθμό πυκνότητας σε δασικές πυρκαγιές. Ο προσδιορισμός της παραμέτρου εξομάλυνσης βασίστηκε στη μέση πλησιέστερη γειτονική απόσταση των σημειακών παρατηρήσεων (Clark & Evans 1954), που προκύπτει όταν ο ίδιος αριθμός σημειακών παρατηρήσεων κατανέμεται τυχαία

**Διάγραμμα 4.**

Σε κάθε σημειακή παρατήρηση που αντιστοιχεί στα σημεία εκδήλωσης των πυρκαγιών τοποθετείται μια κανονική διμεταβλητή συνάρτηση έντασης πιθανοτήτων (*bivariate normal probability density function*) και υπολογίζεται η πυκνότητα σε κάθε σημείο ενός υπερτιθέμενου κανονικού κανάβου συγκεκριμένης χωρικής διακριτικής ικανότητας (π.χ. 1000 μ.)



στην περιοχή έρευνας. Η εφαρμογή της μεθόδου διεξήχθη χρησιμοποιώντας το λογισμικό Crimestat<sup>®</sup>, Version 2.0, το οποίο αναπτύχθηκε εξασχής για τη χωρική ανάλυση συμβάντων εγκλήματος τα οποία αποδίδονται ως σημειακές παρατηρήσεις (Levine 2002).

Περίληπτικά, η μέθοδος υλοποιείται με την τοποθέτηση μιας κανονικής διμεταβλητής συνάρτησης έντασης πιθανοτήτων (*bivariate normal probability density function*) σε κάθε σημειακή παρατήρηση που αντιστοιχεί στα σημεία εκδήλωσης των πυρκαγιών, όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 4. Στη συνέχεια υπολογίζεται η πυκνότητα σε κάθε σημείο ενός υπερτιθέμενου κανονικού κανάβου συγκεκριμένης χωρικής διακριτικής ικανότητας (π.χ. 1000 μ.). Η εκτίμηση της πυκνότητας με τη μέθοδο που περιγράφηκε εφαρμόστηκε τόσο στα σημεία έναρξης πυρκαγιών όσο και στα σημεία ελέγχου που δημιουργήθηκαν (βλ. παράγραφο 4.2). Στην περίπτωση των σημείων ελέγχου οι εκτιμήσεις ανήχθησαν σε αρνητική κλίμακα τιμών (πολλαπλασιασμός επί  $-1$ ), αφού αυτά αναφέρονται σε σημεία όπου δεν έχουν εκδηλωθεί δασικές πυρκαγιές. Τέλος, οι εκτιμήσεις πυκνότητας των σημείων έναρξης πυρκαγιών και των σημείων ελέγχου συνδυάστηκαν σε ένα επίπεδο με τη χωρική υπέρθεση των δύο γεωγραφικών επιπέδων (σημείων έναρξης και σημείων ελέγχου).

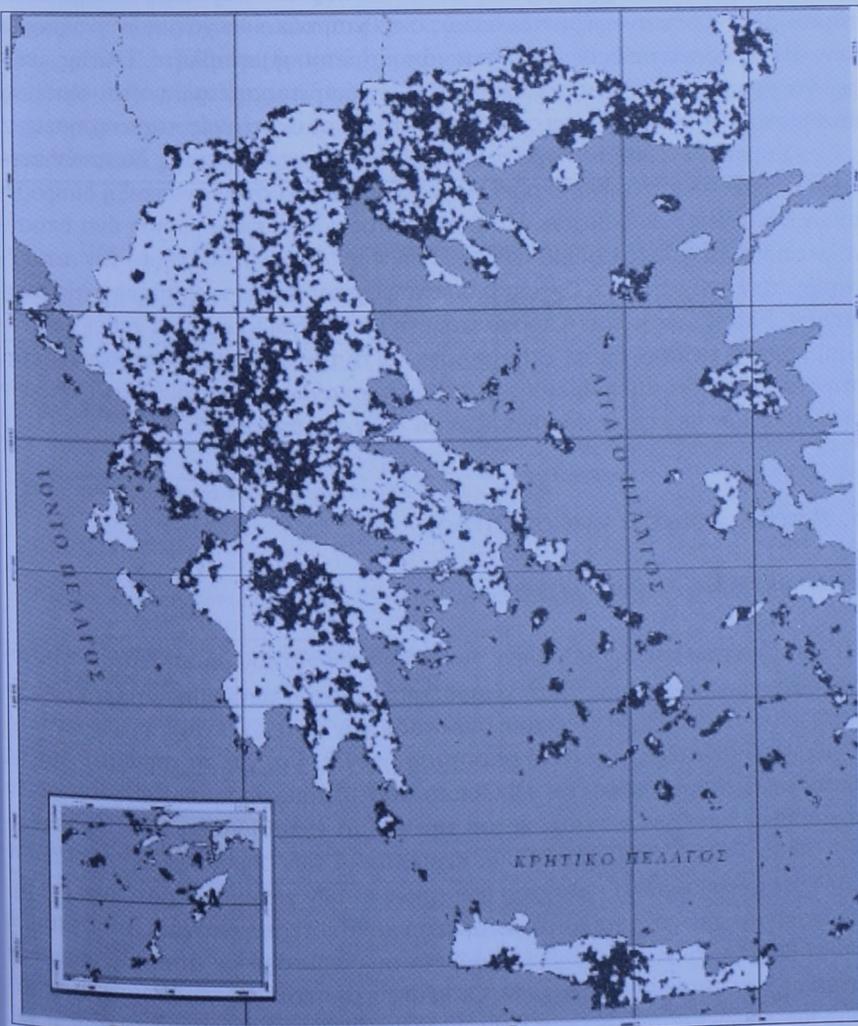
Το τελικό γεωγραφικό επίπεδο χρησιμοποιήθηκε περαιτέρω για τη δημιουργία ζωνών επικινδυνότητας, θέτοντας ως κριτήριο ζωνοποίησης την ποσοστιαία κατανομή της έκτασης της περιοχής εφαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, η κάθε κατηγορία στο προτεινόμενο σύστημα ζωνοποίησης καταλαμβάνει την ίδια ποσοστιαία έκταση. Έτσι, σε ένα σύστημα ζωνοποίησης τεσσάρων τάξεων, η κάθε ζώνη καταλαμβάνει το 25% της συνολικής έκτασης της περιοχής εφαρμογής. Η ζωνοποίηση μπορεί να διεξαχθεί με διαφορετικό σύστημα ταξινόμησης, όπως π.χ. βάση ισόποσων διαστημάτων πυκνότητας (ελάχιστη - μέγιστη / αριθμού τάξεων). Το πρώτο σύστημα ταξινόμησης είναι πιο αντικειμενικό, αφού δεν επηρεάζεται από τοπικές διακυμάνσεις οι οποίες διαφοροποιούνται έντονα από τη μέση κατάσταση.

#### 4.2. Δημιουργία διμεταβλητού χωρικού προτύπου δασικών πυρκαγιών

Γενικά, γεγονότα και παρατηρήσεις μπορούν να περιγραφούν χρησιμοποιώντας δύο σημειακά πρότυπα: 1) ένα διμεταβλητό σημειακό πρότυπο το οποίο αποτελείται από παρατηρήσεις που αντιστοιχούν στα γεγονότα και σε σημεία

ελέγχου, και 2) ένα βαθμονομημένο σημειακό πρότυπο στο οποίο σε κάθε σημειακή παρατήρηση προσάπτεται μια συνεχόμενη μετρική μεταβλητή (Gatrell et al. 1996).

Τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών, όπως αυτά που εξάγονται από βάσεις δεδομένων στατιστικών πυρκαγιών, δεν αποτελούν ένα διμεταβλητό σημειακό πρότυπο, διότι σε αυτά δεν περιλαμβάνονται σημεία ελέγχου, δηλαδή παρατηρήσεις οι οποίες αντιστοιχούν σε σημεία «μη πυρκαγιών». Για τον προσδιορισμό του χωρικού προτύπου εμφάνισης δασικών πυρκαγιών και περαιτέρω επεξήγησης πιθανών υποκείμενων αιτιών θα πρέπει να δημιουργηθεί ένα διμεταβλητό πρότυπο. Η δημιουργία του προτύπου αυτού γίνεται με την τυχαία τοποθέτηση σημείων, υπό τον περιορισμό της ελάχιστης απόστασης μεταξύ αυτών και των σημείων έναρξης των δασικών πυρκαγιών. Οι ελάχιστες αποστάσεις που θεωρήθηκαν είναι 1000, 2000 και 3000 μ. (Χάρτης 2), ενώ δημιουργήθηκαν και σημεία ελέγχου μετά από πλήρως τυχαία επιλογή. Οι αποστάσεις αυτές επιλέχθηκαν χρησιμοποιώντας ως αρχική ένδειξη τη χωρική ασάφεια των αρχικών σημειακών παρατηρήσεων και αξιολογούνται περαιτέρω με μεθόδους χωρικής ανάλυσης σημειακών χωρικών προτύπων.



**Χάρτης 2.**

Σημεία ελέγχου μετά από τυχαία επιλογή υπό τον περιορισμό της ελάχιστης απόστασης των 3000 μ. από τα σημεία έναρξης δασικών πυρκαγιών

#### 4.3. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν τα έτη 1996 (1305 γεγονότα) και 1997 (2027 γεγονότα) χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος ζωνοποίησης βάσει της προτεινόμενης μεθοδολογικής προσέγγισης. Το κριτήριο αξιολόγησης είναι η επί τοις εκατό ποσοστιαία κατανομή των σημείων έναρξης δασικών πυρκαγιών (1996) σε κάθε κατηγορία κινδύνου. Στο προτεινόμενο σύστημα ζωνοποίησης η κάθε κατηγορία κινδύνου καταλαμβάνει το 25% της συνολικής έκτασης. Επομένως, η διαφοροποίηση της ποσοστιαίας αυτής κατανομής προς όφελος των κατηγοριών υψηλότερου κινδύνου αποτελεί ένδειξη επιτυχούς σχεδιασμού, αφού μεγαλύτερο ποσοστό των δασικών πυρκαγιών εκδηλώνεται σε περιοχές υψηλότερου κινδύνου.

#### 4.4. Εναλλακτικές επιλογές εφαρμογής της μεθόδου πυρήνα

Η μέθοδος πυρήνα, ως μια γενικότερη μέθοδος παρεμβολής σημειακών παρατηρήσεων, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις όπου οι σημειακές παρατηρήσεις δεν αναφέρονται απλώς στη θέση κάποιων χωρικών γνωρισμάτων, αλλά προσάπτεται σε αυτές και κάποια μετρική μεταβλητή. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί επιλεκτικά με τη χρήση παραμέτρων, έτσι ώστε να σταθμιστούν με κάποιο συγκεκριμένο κριτήριο οι σημειακές παρατηρήσεις.

Στην περίπτωση του σχεδιασμού ζωνών επικινδυνότητας δασικών πυρκαγιών η μέθοδος πυρήνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην ανάπτυξη διαφορετικών σεναρίων και εκδοχών. Παραδείγματος χάριν, επιλέγοντας ένα υποσύνολο από το συνολικό αριθμό των δασικών πυρκαγιών με κριτήριο την αιτία έναρξης των πυρκαγιών, η ζωνοποίηση αναφέρεται σε συγκεκριμένη αιτία πυρκαγιάς. Επίσης, ως μετρική προσαπτόμενη μεταβλητή μπορεί να τεθεί η συνολική καμένη έκταση, οπότε στην περίπτωση αυτή η ζωνοποίηση αναφέρεται στην επικινδυνότητα εκδήλωσης μεγάλων πυρκαγιών. Παραδείγματα τέτοιων εναλλακτικών σεναρίων παρουσιάζονται στην παράγραφο 5.3.

## 5. Αποτελέσματα και συζήτηση

### 5.1. Δημιουργία σημείων ελέγχου

Το κριτήριο που χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία του διμεταβλητού προτύπου δασικών πυρκαγιών, με τη χωροθέτηση δηλαδή των σημείων ελέγχου, ήταν η μέση πλησιέστερη γειτονική απόσταση των σημείων έναρξης πυρκαγιών. Η μέση πλησιέστερη γειτονική απόσταση ήταν 914 μ. για τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών (Πίν. 1). Οι αποστάσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των ζωνών επιρροής και την τυχαία εγκαθίδρυση των σημείων ελέγχου ήταν 1000, 2000 και 3000 μ. περιμετρικά των σημείων των πυρκαγιών (ζώνες αποκλεισμού). Ο έλεγχος των τριών αυτών χωρικών προτύπων διεξήχθη χρησιμοποιώντας ως κριτήριο τη μέση κοντινότερη γειτονική απόσταση, η οποία θα έπρεπε να ακολουθεί παρόμοια συμπεριφορά με αυτή των σημείων έναρξης των δασικών πυρκαγιών. Οι μέσες πλησιέστερες γειτονικές αποστάσεις των τριών προτύπων ήταν 1470, 1226 και 958 μ., ενώ του σημειακού χωρικού

κού προτύπου των πλήρως τυχαίων σημειακών παρατηρήσεων ήταν 1537 μ. (Πίν. 1). Οι χαμηλότερες τιμές σε σχέση με αυτή του πλήρους τυχαίου χωρικού προτύπου υποδεικνύουν την ύπαρξη χωρικής συσσώρευσης η οποία θα πρέπει να είναι παρόμοια με αυτή των σημείων έναρξης. Από τα τρία χωρικά πρότυπα, τα σημεία ελέγχου των 3000 μ. ζωνών αποκλεισμού παρουσιάζουν παρόμοια διάταξη χωρικά με αυτή των πυρκαγιών.

5.2. Χαρτογράφηση πυκνότητας σημείων έναρξης δασικών πυρκαγιών

5.2.1. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΠΥΡΗΝΑ

Η πυκνότητα των σημείων έναρξης των δασικών πυρκαγιών με τη χρήση της παρεμβολής πυρήνα υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας τέσσερα διαφορετικά μεγέθη της παραμέτρου εξομάλυνσης των 1000, 2000, 4000 και 6000 μ. Η παράμετρος εξομάλυνσης στην περίπτωση της κανονικής κατανομής έντασης πιθανοτήτων ήταν η τυπική της απόκλιση. Η επιλογή της παραμέτρου εξομάλυνσης βασίστηκε, πρώτον, στο μέσο χωρικό σφάλμα της θέσης των σημείων έναρξης, το οποίο ανέρχεται στα ±720 και ±935 μ. Περίπου, και δεύτερον, στη μέση πλησιέστερη γειτονική απόσταση των σημείων έναρξης η οποία ανέρχεται στα 914 μ. (Πίν. 1). Τα μεγέθη αυτά χρησιμοποιήθηκαν ως ελάχιστες τιμές της παραμέτρου εξομάλυνσης, ενώ παράλληλα χρησιμοποιήθηκαν και μεγαλύτερες τιμές με το σκεπτικό ότι το χωρικό πρότυπο της εμφάνισης των πυρκαγιών αναφέρεται σε εθνική κλίμακα και, επομένως, είναι επιθυμητός ένας σχετικός

**Πίνακας 1.**

Μέσες πλησιέστερες γειτονικές αποστάσεις των σημειακών χωρικών προτύπων

Σημειακό πρότυπο	Μέση κοντινότερη γειτονική απόσταση
Σημεία έναρξης πυρκαγιών	914
Πλήρως τυχαία σημεία	1537*
Τυχαία σημεία με ζώνες αποκλεισμού	
1000 μ.	1470*
2000 μ.	1226*
3000 μ.	958

\* Στατιστικά σημαντικά διαφορετικά από τα σημεία έναρξης

**Πίνακας 2.**

Έλεγχος κανονικότητας Kolmogorov-Smirnov των αποτελεσμάτων της παρεμβολής πυρήνα

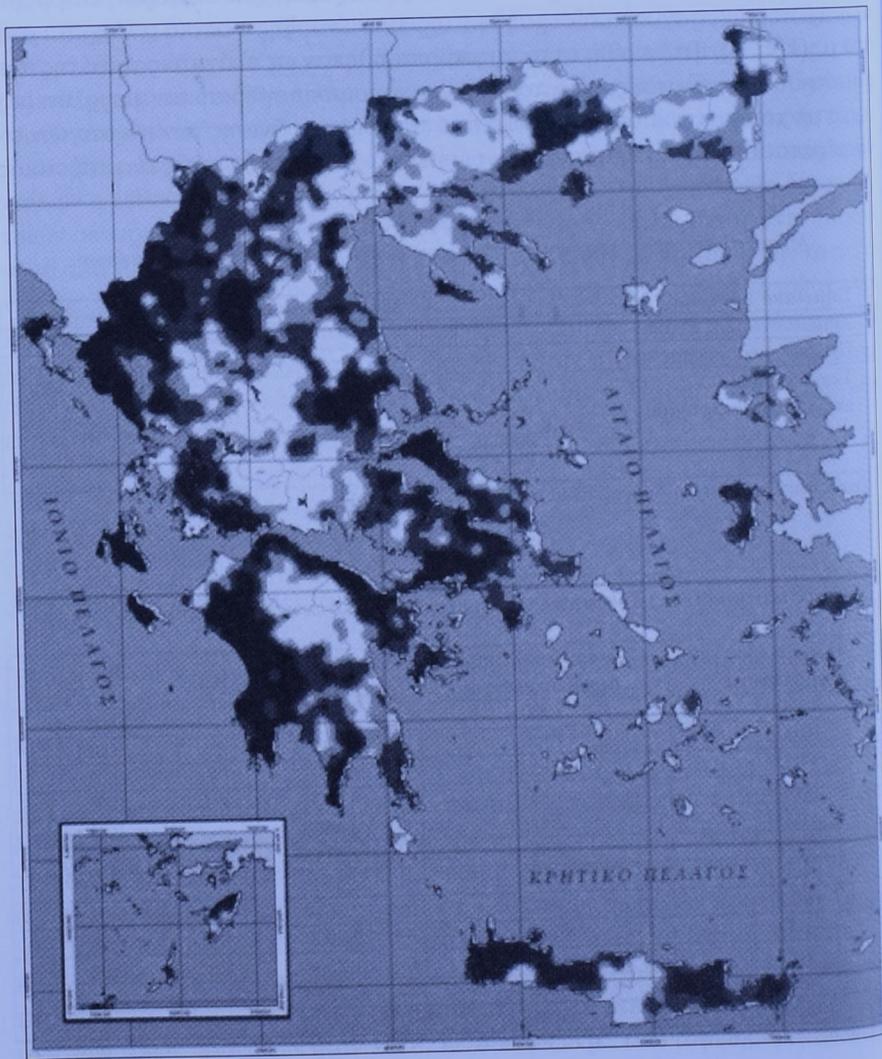
Παράμετρος εξομάλυνσης	Ζώνες αποκλεισμού σημείων ελέγχου	Στατιστικό μέγεθος D	p
1000	1000	4,0751	< 0,01
2000	1000	4,0415	< 0,01
4000	1000	4,1381	< 0,01
6000	1000	3,2701	< 0,01
1000	2000	2,4689	< 0,01
2000	2000	2,5115	< 0,01
4000	2000	2,5609	< 0,01
6000	2000	2,1840	< 0,01
1000	3000	2,8930	< 0,01
2000	3000	1,2568	< 0,01
4000	3000	0,7253	> 0,15*
6000	3000	0,6077	> 0,15*

\* Κανονική κατανομή

βαθμός ομαλοποίησης των εκτιμήσεων, ο οποίος επιτυγχάνεται με τις μεγάλες τιμές της παραμέτρου εξομάλυνσης.

Η μέθοδος πυρήνα με τη χρήση αντίστοιχων παραμέτρων εξομάλυνσης εφαρμόστηκε επίσης και στα σημεία ελέγχου, έτσι ώστε να δημιουργηθεί σχετική χωρική μεταβλητότητα εντός των περιοχών όπου δεν παρουσιάζονται δασικές πυρκαγιές. Επειδή χωρικά το πρότυπο των σημείων έναρξης των πυρκαγιών είναι έντονα συσσωρευμένο σε συγκεκριμένες περιοχές, η εφαρμογή της μεθόδου πυρήνα μόνο στα σημεία έναρξης των πυρκαγιών θα δημιουργούσε αποτελέσματα τα οποία δεν θα ακολουθούσαν κανονική κατανομή, η οποία αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη χρησιμοποίηση πολυμεταβλητών παραμετρικών στατιστικών μεθόδων.

Ο τελικός χάρτης του χωρικού προτύπου εμφάνισης των δασικών πυρκαγιών δημιουργήθηκε μετά από το συνδυασμό της πυκνότητας των δασικών πυρκαγιών και των σημείων ελέγχου, αφού τα τελευταία αντιστράφηκαν σε αρνητική κλίμακα τιμών. Τα τελικά αποτελέσματα μετά από τη χωρική υπέρθεση των δυο χαρτογραφικών προϊόντων παρουσιάζονται για την παράμετρο εξομάλυνσης των 4000 μ. στο Χάρτη 3.



**Χάρτης 3.**

Χαρτογράφηση της πυκνότητας των σημείων έναρξης των δασικών πυρκαγιών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο παρεμβολής πυρήνα με παράμετρο εξομάλυνσης τα 4000 μ. Τα σημεία ελέγχου προέρχονται από τυχαία επιλογή υπό τον περιορισμό της ελάχιστης απόστασης των 3000 μ. από τα σημεία έναρξης δασικών πυρκαγιών

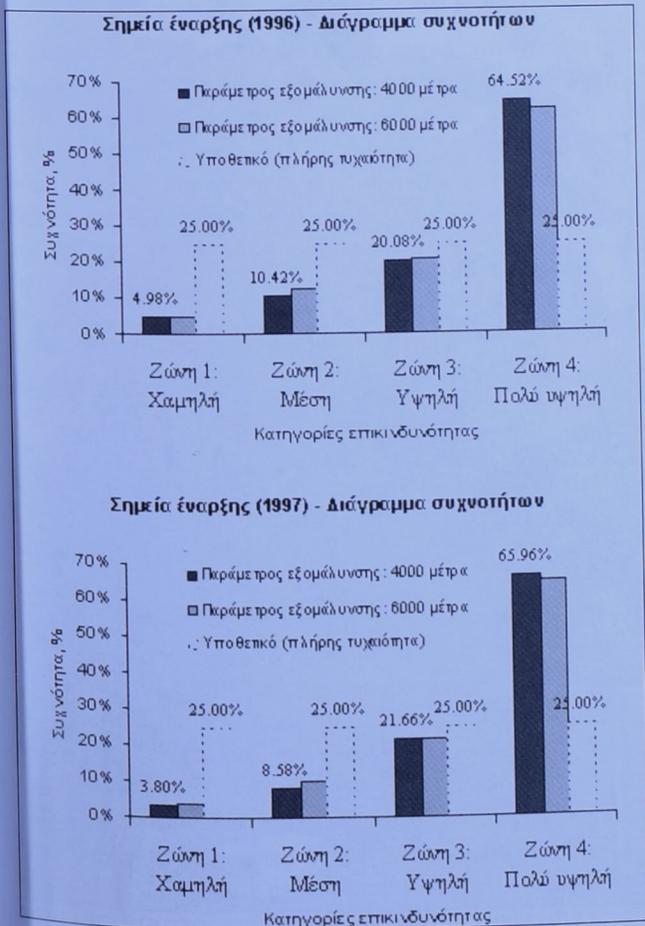
5.2.2. ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΑΝΟΝΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Για τον έλεγχο της κανονικότητας των αποτελεσμάτων με τη μέθοδο πυρήνα χρησιμοποιήθηκε ο στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov. Τα δειγματοληπτικά σημεία που χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο κανονικότητας προέκυψαν μετά από πλήρως τυχαία επιλογή 1420 σημειακών παρατηρήσεων.

Από το στατιστικό έλεγχο της κανονικότητας των αποτελεσμάτων προκύπτει ότι μόνο στις περιπτώσεις των σημείων ελέγχου με ζώνες επιρροής των 3000 μ. και μεγέθη της παραμέτρου εξομάλυνσης των 4000 και 6000 μ. τα αποτελέσματα ακολουθούσαν την κανονική κατανομή (Πίν. 2). Αυτό επιτρέπει κατ' αρχήν την εφαρμογή πολυμεταβλητών χωρικών στατιστικών αναλύσεων για τον προσδιορισμό υποκειμένων αιτιών.

5.2.3. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΖΩΝΟΠΟΙΗΣΗΣ

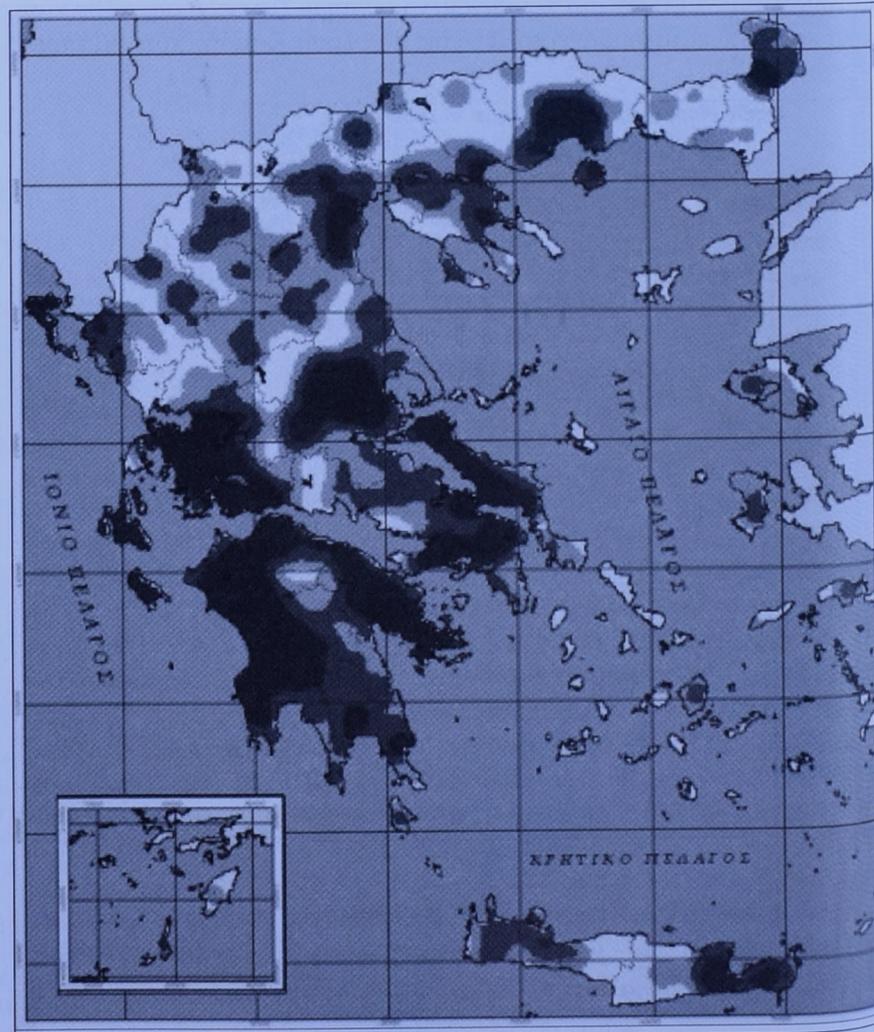
Στο Διάγραμμα 5 παρουσιάζονται γραφικά τα αποτελέσματα της ανάλυσης συχνοτήτων των δασικών πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν τα έτη 1996 και 1997, χρονιές οι οποίες δεν συμπεριλήφθηκαν στον αρχικό σχεδιασμό των ζωνών επικινδυνότητας. Εφόσον στο προτεινόμενο σύστημα ζωνοποίησης κάθε κατηγορία κινδύνου καταλαμβάνει το 25% της συνολικής έκτασης, τότε θα έπρεπε



**Διάγραμμα 5.**  
 Αποτελέσματα ανάλυσης συχνοτήτων των δασικών πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν το 1996 και το 1997. Το 64,52% και το 65,96% των δασικών πυρκαγιών αντίστοιχα για τα έτη 1996 και 1997 εκδηλώθηκαν στη ζώνη του υψηλότερου κινδύνου (παραμέτρος εξομάλυνσης 4000 μ.), ποσοστό που διαφέρει σημαντικά από το αναμενόμενο υπό συνθήκες πλήρους τυχειότητας (περίπου 25%)

και η κατανομή των συχνοτήτων έναρξης των δασικών πυρκαγιών να ακολουθεί παρόμοιο πρότυπο υπό συνθήκες πλήρους τυχειότητας και ανεξαρτησίας, δηλαδή τα σημεία έναρξης των δασικών πυρκαγιών θα έπρεπε να ισοκατανέμονται σε κάθε κατηγορία (περίπου 25%). Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρείται ότι το 64,52% (1996) και 65,96% (1997) των δασικών πυρκαγιών εκδηλώθηκαν στη ζώνη του υψηλότερου κινδύνου, η οποία καταλαμβάνει το 25% της έκτασης της Ελλάδας (παράμετρος εξομάλυνσης 4000 μ.). Τα ποσοστά αυτά διαφέρουν σημαντικά από τα αναμενόμενα ποσοστά υπό συνθήκες πλήρους τυχειότητας (25%). Επίσης, το 20,08% και το 21,66% των πυρκαγιών εκδηλώθηκαν στη δεύτερη υψηλότερου βαθμού επικινδυνότητας ζώνη. Αθροιστικά δηλαδή, το 84,6% και το 87,62% των σημείων έναρξης των ετών 1996 και 1997 αντίστοιχα εκδηλώθηκαν σε ζώνες επικινδυνότητας υψηλού και πολύ υψηλού κινδύνου.

Το σύστημα ζωοποίησης που προκύπτει από τη χρησιμοποίηση των 6000 μ. στην παράμετρο εξομάλυνσης δίνει επίσης παρόμοια αποτελέσματα. Το 62,07% και 20,38% για το έτος 1996 και το 64,78% και 21,26% για το έτος 1997 των δασικών πυρκαγιών εκδηλώνονται στις δύο πλέον επικίνδυνες ζώνες



**Χάρτης 4.**

Εναλλακτικά σενάρια σχεδιασμού ζωνών επικινδυνότητας σύμφωνα με αίτια πυρκαγιών: π.χ. κακόβουλοι εμπρησμοί

Η παράμετρος εξομάλυνσης των 6000 μ. ομαλοποιεί σε μεγαλύτερο βαθμό τα αποτελέσματα της χωρικής παρεμβολής και υπό αυτή την έννοια δημιουργεί πιο γενικευμένες ζώνες επικινδυνότητας.

### 5.3. Εναλλακτικά σενάρια σχεδιασμού ζωνών επικινδυνότητας

Η μέθοδος πυρήνα εφαρμόστηκε επίσης χρησιμοποιώντας εναλλακτικά σενάρια τα οποία προκύπτουν με την επιλεκτική χρήση παραμέτρων, έτσι ώστε οι σημειακές παρατηρήσεις να σταθμιστούν με κάποιο συγκεκριμένο κριτήριο. Συγκεκριμένα, εξετάστηκαν τέσσερα σενάρια, εκ των οποίων τα δύο προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου πυρήνα στα σημεία έναρξης πυρκαγιών προσάπτοντας ως μετρική μεταβλητή έντασης: α) τη συνολική καμένη δασική έκταση, και β) τη συνολική καμένη μη δασική έκταση (κυρίως αγροτικές εκτάσεις). Τα άλλα δύο σενάρια προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου μόνο στα σημεία έναρξης των πυρκαγιών που οφείλονται: α) σε κακόβουλο εμπρησμό, και β) σε κεραυνούς, χωρίς την προσάρτηση κάποιας μετρικής μεταβλητής. Στο Χάρτη 4 παρουσιάζονται μόνο τα αποτελέσματα ζωνοποίησης που οφείλονται σε κακόβουλο εμπρησμό για λόγους οικονομίας και μεγιστοποίησης της ευκρίνειας των χαρτών.

## 6. Συμπερασματικές επισημάνσεις - μελλοντικά σχέδια

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια αυξητική τάση εκδήλωσης ακραίων φαινομένων και φυσικών καταστροφών μέρος των οποίων σχετίζεται άμεσα ή έμμεσα με την εκδήλωση πυρκαγιών σε δάση, δασικές εκτάσεις και γεωργικές καλλιέργειες. Επίσης, δασικές πυρκαγιές συναντώνται πολύ συχνά στις ζώνες διασύνδεσης του αστικού και δασικού χώρου στην Ευρώπη ως αποτέλεσμα της διασποράς του πληθυσμού και των ανθρώπινων υποδομών μέσα στις δασικές ζώνες και ειδικότερα στα περικόρα αστικών κέντρων και τουριστικών θερέτρων. Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση ατυχημάτων με απώλειες ανθρώπινων ζωών, τόσο μεταξύ του προσωπικού κατάσβεσης όσο και μεταξύ ιδιωτών που ήρθαν αντιμέτωποι με μεγάλες δασικές πυρκαγιές [παραδείγματα από ΗΠΑ, Καναδά, Ελλάδα (2000), Αυστραλία (2002-2003) και πιο πρόσφατα από τις μεγάλες πυρκαγιές στην Ιβηρική Χερσόνησο και τη Γαλλία (2003)].

Σε αυτό το γενικότερο πλαίσιο, οι υπηρεσίες αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών σχεδιάζουν και υλοποιούν επιχειρησιακά προγράμματα αντιμετώπισης δασικών πυρκαγιών σε επίπεδο πρόληψης, πρόβλεψης και καταστολής. Περιοριστικοί παράγοντες που σχετίζονται με τη διάθεση των απαραίτητων κονδυλίων, το δυναμικό προσωπικό και τα μέσα δρουν πολλές φορές ανασταλτικά για την αριστοποίηση τέτοιων επιχειρησιακών προγραμμάτων. Από την άλλη, η γνώση περιοχών υψηλού κινδύνου προσφέρει τη δυνατότητα να προσανατολίσει *a priori* τους αρμόδιους φορείς προς τη σωστή κατεύθυνση εφαρμογής προγραμμάτων πολιτικής προστασίας. Αυτό μπορεί να αποτελέσει ένα στρατηγικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα για την ορθολογική λήψη αποφάσεων σε επίπεδο διάγνωσης, πρόγνωσης και ευρύτερης δράσης αντιμετώπισης πυρκαγιών, αφού τέτοια προγράμματα μπορούν να εφαρμόζονται με χωρική και χρονική προτεραιότητα στις ζώνες υψηλού κινδύνου, ελαχιστοποιώντας το κόστος υλοποίησης και μεγιστοποιώντας ταυτόχρονα την αποτελεσματικότητά τους (βελτιστοποίηση της σχέσης κόστους/οφέλους).

Η προτεινόμενη μέθοδος δημιουργεί καλύτερες προϋποθέσεις ορθολογικότερης και αποτελεσματικότερης χρήσης των διατιθέμενων πόρων, αλλά και τεκμηριωμένης κατανομής αυτών με τη θέσπιση ζωνών επικινδυνότητας βάσει ιστορικών παρατηρήσεων. Η διαχρονική αξία αυτών των ζωνών επικινδυνότητας αποτελεί μια πρόκληση-απαίτηση, ώστε να αναδειχθεί σε ένα πραγματικό στρατηγικό επιχειρησιακό πλεονέκτημα σε προγράμματα πρόληψης, έγκαιρης επέμβασης και καταστολής. Πιο συγκεκριμένα, με βάση την εν λόγω ζωνοποίηση:

1) Τα προληπτικά προγράμματα μπορούν να αναθεωρηθούν και να επικεντρωθούν περισσότερο στις διακριβωμένες βαρύτητας ζώνες υψηλού και πολύ υψηλού κινδύνου, αναλόγως.

2) Είναι εφικτή η δημιουργία χαρτών ημερησίας ή μεγαλύτερης διάρκειας (μεσοπρόθεσμης) πρόβλεψης κινδύνου δασικών πυρκαγιών στην προσπάθεια για πιο αξιόπιστη χωρική και χρονική πρόβλεψη.

3) Είναι δυνατή από την πλευρά όλων των εμπλεκόμενων φορέων η τεκμηριωμένη διαφοροποίηση (κλιμάκωση) της κατανομής πόρων για προληπτικά μέτρα, αλλά και η ανάλογη διαμόρφωση του σχεδιασμού επιτήρησης (περιοποιίες) με αυξημένη ένταση στις ζώνες υψηλού κινδύνου.

4) Μπορεί να υποστηριχθεί η δημιουργία κριτηρίων για την αξιολόγηση της μέχρι τώρα εφαρμοζόμενης πολιτικής σχεδιασμού, αλλά και η μελλοντική αξιολόγηση και παρακολούθηση νέων πολιτικών με στόχο τη μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα με το κατά το δυνατόν λιγότερο κόστος.

5) Παρέχονται νέα στοιχεία (κριτήρια) για την ανάπτυξη νέων σχεδίων διασποράς των δυνάμεων καταστολής.

6) Δίνεται το έναυσμα για σκέψεις εναλλακτικών σεναρίων ή δημιουργία νέων παραμέτρων ανάλυσης των δεδομένων των δασικών πυρκαγιών με στόχους τον εντοπισμό και τη βελτίωση διαχείρισης ειδικών προβλημάτων.

## Ευχαριστίες

Ο Νίκος Κούτσιας εκφράζει τις ειλικρινείς ευχαριστίες του στο Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) για την παροχή οικονομικής υποστήριξης στα πλαίσια χορήγησης υποτροφίας για μεταδιδακτορική έρευνα του προγράμματος υποτροφιών 2001-2002, η οποία διεκπεραιώθηκε στο Εργαστήριο Δασικής Διαχειριστικής και Τηλεπισκόπησης του Τμήματος Δασολογίας και Φυσικού Περιβάλλοντος του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Agee, J. K., Pickford, S. G. (1985), *Vegetation and Fuel Mapping of North Cascades National Park*. Final Report, Seattle: College of Forest Resources.
- Bailey, T. C., Gatrell, A. C. (1995), *Interactive Spatial Data Analysis*, Burnt Mill, Essex: Longman Scientific & Technical.
- Boots, B. N., Getis, A. (1988), *Point Pattern Analysis*, Newbury Park, CA.: Sage Publications.
- Brass, J., Likens, W. C., Thornhill, R. R. (1983), *Wildland Inventory for Douglas and Carson Counties, Nevada, Using Landsat and Digital Terrain Data*, NASA Technical Paper 2137, Moffet Field.
- Burt, J. E., Barber, G. M. (1996), *Elementary Statistics for Geographers*, New York: The Guilford Press.

- Chou, Y. H. (1992), «Management of Wildfires with a Geographical Information System», *International Journal of Geographical Information Systems*, 6: 123-140.
- Chou, Y. H. (1997), *Exploring Spatial Analysis in Geographic Information Systems*, Santa Fe: OnWord Press.
- Chuvieco, E., Congalton, R. G. (1989), «Application of Remote Sensing and Geographic Information Systems to Forest Fire Hazard Mapping», *Remote Sensing of Environment*, 29: 147-159.
- Chuvieco, E., Salas, J., Barredo, J. I., Carvacho, L., Karteris, M., Koutsias, N. (1998), «Global Patterns of Large Fires Occurrence in the European Mediterranean Basin: A GIS Analysis», στο Viegas, D. X. (επιμ.), *III International Conference on Forest Fire Research. 14th Conference on Fire and Forest Meteorology*, Luso, Portugal: ADAI, University of Coimbra, σ. 2447-2462.
- Clark, P. J., Evans, F. C. (1954), «Distance to Nearest Neighbor as a Measure of Spatial Relationships in Populations», *Ecology*, 35: 445-453.
- Davis, J. H., Howe, R. W., Davis, G. J. (2000), «A Multi-Scale Spatial Analysis Method for Point Data», *Landscape Ecology*, 15: 99-114.
- Deeming, J. E., Burgan, R. E., Cohen, J. D. (1978), *The National Fire-Danger Rating System*, General Technical Report INT-39, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest & Range Experiment Station.
- Diggle, P. J. (1976), «Note on the Clark & Evans Test of Spatial Randomness», στο Hodder, I., Orton, C. (επιμ.), *Spatial Analysis in Archaeology*, New York: Cambridge University Press, σ. 246-248.
- Gatrell, A. C., Bailey, T. C., Diggle, P. J., Rowlingson, B. S. (1996), «Spatial Point Pattern Analysis and Its Application in Geographical Epidemiology», *Transactions of the Institute of British Geographers*, 21: 256-274.
- Grund, B., Polzehl, J. (1998), «Bias-Corrected Bootstrap Bandwidth Selection», *Journal of Nonparametric Statistics*, 8: 97-126.
- Jones, M. C., Marron, J. S., Sheater, S. J. (1996), «Progress in Data-Based Bandwidth Selection for Kernel Density Estimation», *Computational Statistics*, 11: 337-381.
- Καλαμποκίδης, Κ. Δ., Κούτσιας, Ν. (2000), «Γεωγραφική πολυμεταβλητή ανάλυση της χωρικής εμφάνισης δασικών πυρκαγιών», *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα*, 11(II): 37-47.
- Kalabokidis, K. D., Hay, C. M., Hussin, Y. A. (1991), «Spatially Resolved Fire Growth Simulation», *Proceedings*, 11th Conference on Fire and Forest Meteorology, 16-19 Απριλίου 1991, Missoula, MT, Society of American Foresters, Bethesda, MD., σ. 188-195.
- Katkovnik, V., Shmulevich, I. (2002), «Kernel Density Estimation with Adaptive Varying Window Size», *Pattern Recognition Letters*, 23: 1641-1648.
- Kelsall, J. E., Diggle, P. J. (1995), «Kernel Estimation of Relative Risk», *Bernoulli*, 1: 3-16.
- Koutsias, N., Kalabokidis, K. D., Allgower, B. (υπό δημοσίευση), «Fire Occurrence Patterns at Landscape Level: Beyond Positional Accuracy of Ignition Points with Kernel Density Estimation Methods», *Natural Resource Modeling*.
- Leone, V., Koutsias, N., Martinez, J., Vega-Garcia, C., Allgower, B., Lovreglio, R. (2003), «The Human Factor in Fire Danger Assessment», στο Chuvieco, E. (επιμ.), *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping: The Role of Remote Sensing Data*, World Scientific, σ. 143-196.
- Levine, N. (2002), *CrimeStat II: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations (Version 2.0)*, Annandale, VA: Ned Levine & Associates / Washington, DC: The National Institute of Justice.
- Seaman, D. E., Powell, R. A. (1996), «An Evaluation of the Accuracy of Kernel Density Estimators for Home Range Analysis», *Ecology*, 77: 2075-2085.
- Silverman, B. W. (1986), *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*, London: Chapman & Hall.
- Sinclair, D. F. (1985), «On Tests of Spatial Randomness Using Mean Nearest Neighbor Distance», *Ecology*, 66: 1084-1085.
- Tufto, J., Andersen, R., Linnell, J. (1996), «Habitat Use and Ecological Correlates of Home Range Size in a Small Cervid: The Roe Deer», *Journal of Animal Ecology*, 65: 715-724.
- Woods, J. A., Gossette, F. (1992), «A Geographic Information System for Brush Fire Hazard Management», *Proceedings*, ACSM-ASPRS Symposium, Washington, σ. 56-65.
- Worton, B. J. (1989), «Kernel Methods for Estimating the Utilization Distribution in Home-Range Studies», *Ecology*, 70: 164-168.
- Yool, S. R., Eckhardt, D. W., Estes, J. E., Cosentino, M. J. (1985), «Describing the Brushfire Hazard in Southern California», *Annals of the Association of American Geographers*, 75: 417-430.