

ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ, ΤΕΧΝΗΤΗ ΝΟΗΜΟΣΥΝΗ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ ΣΤΗΝ ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΙΝΔΥΝΟΥ ΠΥΡΚΑΓΙΩΝ

Χρήστος Βασιλάκος^{1,2}, Κώστας Καλαμποκίδης¹, Ιωάννης Χατζόπουλος², Γεώργιος Κάλλος³ και Ιωάννης Ματσίνο²

¹Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Γεωγραφίας

²Πανεπιστήμιο Αιγαίου, Τμήμα Περιβάλλοντος

³Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Φυσικής

Περίληψη

Ο προληπτικός σχεδιασμός αποτελεί ίσως το σημαντικότερο στάδιο σε ένα οργανωμένο σύστημα αντιμετώπισης φυσικών καταστροφών. Σαν βασικό εργαλείο προληπτικού σχεδιασμού παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της πρώτης προσπάθειας για την ανάπτυξη ενός ποσοτικού Ελληνικού Συστήματος Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών, με περιοχή μελέτης το νησί της Λέσβου. Το προτεινόμενο σύστημα εκτιμά χωρικά την πυρο-επικινδυνότητα σε τοπική κλίμακα, και έχει τη δυνατότητα πρόβλεψης βασιζόμενο σε μετεωρολογικά δεδομένα. Το κύριο προϊόν του συστήματος είναι ο Δείκτης Πιθανότητας Εμφάνισης Πυρκαγιάς βασιζόμενος σε τρεις άλλους επιμέρους δείκτες: το Μετεωρολογικό Δείκτη Κινδύνου, το Βλαστητικό Δείκτη Κινδύνου και τον Κοινωνικο-Οικονομικό Δείκτη Κινδύνου. Όλοι οι επιμέρους δείκτες είναι δυναμικοί, δηλαδή μεταβάλλονται στο χρόνο, και αποτελούν μια συστηματική, ποσοτική και χωρική εκτίμηση του κινδύνου. Η σχέση μεταξύ εμφάνισης της φωτιάς και των παραμέτρων-μεταβλητών που ενσωματώνονται στους παραπάνω δείκτες, βασίζεται σε ιστορικά στατιστικά στοιχεία πυρκαγιών και μοντελοποιήθηκε με τη χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα των νευρωνικών δικτύων. Το συγκεκριμένο σύστημα βασίζεται σε μια ρεαλιστική προσέγγιση, έτσι ώστε οι παράμετροι που το αποτελούν να είναι εύκολο να μετρηθούν και το σύστημα να είναι έτοιμο για επιχειρησιακή εφαρμογή σε τοπικό επίπεδο, όπου και λαμβάνονται οι κρίσιμες αποφάσεις στο στάδιο της πρόληψης και καταστολής. Κύριες πηγές για τον καθορισμό των παραμέτρων αποτελούν δορυφορικές εικόνες από τους δέκτες QuickBird και Landsat ETM καθώς και το μοντέλο πρόγνωσης καιρού SKIRON ενώ η διαχείριση, σύνθεση και χωρική ανάλυση των παραμέτρων, ως θεματικών επιφανειών, πραγματοποιείται με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Abstract

Prevention is one of the most important stages in wildfire and other natural hazards management organizations. Fire danger rating systems have been adopted by many developed countries dealing with wildfire prevention, so that civil protection agencies are able to define areas with high probabilities of fire ignition and resort to necessary actions. This paper presents the first attempt towards a quantitative Greek Fire Danger Rating System (GFDRS) in the study area of Lesbos Island, Greece. The proposed system estimates the geo-spatial fire hazard while it has the ability of risk forecasting based on meteorological data. The main output of the GFDRS is the Fire Probability Index which is based on three other indices; Fire Weather Index, Fire Hazard Index and Fire Risk Index. These indices are not just a relative probability for fire occurrence but a quantitative rate for fire danger appraisal in a systematic way. Remote Sensing data from Landsat ETM and the high resolution QuickBird satellite sensors have been utilized in order to retrieve the input parameters to the system while Remote Automatic Weather Stations and the SKIRON weather forecasting system provide real-time and forecasted meteorological data, respectively. Geographic Information Systems have been used for management and spatial analyses of the input parameters, and the relation between wildfire occurrence and the input parameters has been investigated by neural networks whose training is based on historical data. The method chosen for training of the neural network is the back-propagation algorithm.

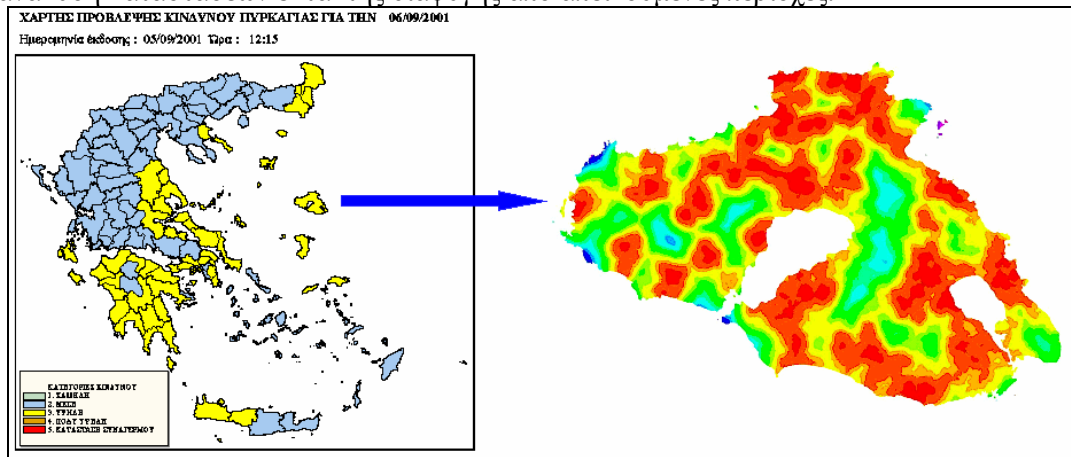
Λέξεις κλειδιά: Γεωπληροφορική, ΣΓΠ, φυσικές καταστροφές, δασικές πυρκαγιές, ανάλυση κινδύνου
Key words: Geo-Informatics, GIS, natural hazards, forest fires, risk analysis

1. Εισαγωγή

Πολλές χώρες που αντιμετωπίζουν το πρόβλημα των δασικών πυρκαγιών έχουν αναπτύξει συστήματα εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιών έτσι ώστε οι υπηρεσίες πολιτικής προστασίας να μπορούν να προσδιορίζουν τις περιοχές υψηλού κινδύνου και να σχεδιάζουν τις απαιτούμενες προληπτικές και προ-κατασταλτικές ενέργειες. Η πλειονότητα των συστημάτων αυτών βασίζεται σε μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία

συλλέγονται από μετεωρολογικούς σταθμούς (Carrega, 1991), ενώ ακολουθούν διαφορετική προσέγγιση όσον αφορά τη χωρο-χρονική κλίμακα για την οποία εφαρμόζονται και τις σχέσεις συσχετισμού των παραμέτρων. Στόχος αυτής της έρευνας είναι να αναπτύξει ένα νέο ποσοτικό σύστημα εκτίμησης κινδύνου πυρκαγιάς το οποίο θα βασίζεται σε παραμέτρους οι οποίοι θα μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα και γρήγορα. Το σύστημα αυτό αναπτύσσεται στα πλαίσια του ευρωπαϊκού ερευνητικού προγράμματος AUTO-HAZARD PRO του Τμήματος Γεωγραφίας Πανεπιστημίου Αιγαίου και αποτελεί μια εξέλιξη του υπάρχοντος συστήματος (Σχήμα 1) το οποίο θα μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε προ-κατασταλτικές ενέργειες όπως (reference):

- πληροφόρηση του κοινού σχετικά με τον επικείμενο κίνδυνο πυρκαγιάς, ρύθμιση της πρόσβασης και των επιτρεπόμενων ενεργειών πληροφόρησης του κοινού σχετικά με τον επικείμενο κίνδυνο
- διασπορά δυνάμεων αρχικής προσβολής, επάνδρωση παρατηρητηρίων και περιπολίες
- ανάλυση καταστάσεων έκτακτης διαφυγής από απειλούμενες περιοχές.



Σχήμα 1. Εξέλιξη του συστήματος εκτίμησης κινδύνου με πιλοτική εφαρμογή στη Ν. Λέσβο

2. Περιοχή μελέτης

Ως περιοχή μελέτης έχει επιλεγθεί το νησί της Λέσβου που βρίσκεται στο βορειο-ανατολικό Αιγαίο με έκταση 1672 km², είναι το τρίτο σε μέγεθος νησί της Ελλάδος, ενώ ο μόνιμος πληθυσμός της ανέρχεται σε περίπου 100.000 κατοίκους (Σχήμα 1).

Το νησί της Λέσβου χαρακτηρίζεται από μια ποικιλία βλαστητικών ειδών, κλιματικών συνθηκών και γεωλογικών σχηματισμών. Το κλίμα είναι Μεσογειακό με ξηροθερμικά καλοκαίρια και ήπιους χειμώνες με μέτριες βροχοπτώσεις. Η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι περίπου 670 mm και η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18⁰ C, με μεγάλη διακύμανση μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης ημερήσιας θερμοκρασίας. Το ανάγλυφο είναι ημι-ορεινό με έντονες κλίσεις, ενώ η υψηλότερη κορυφή είναι αυτή του Ολύμπου στα 968 m. Σαν κυρίαρχοι τύποι βλάστησης απαντώνται οι φρυγανικοί θάμνοι, τα αειφύλλα σκληρόφυλλα, η τραχεία πεύκη, τα φυλλοβόλα πλατύφυλλα, οι ελαιώνες και άλλες αγροτικές καλλιέργειες.

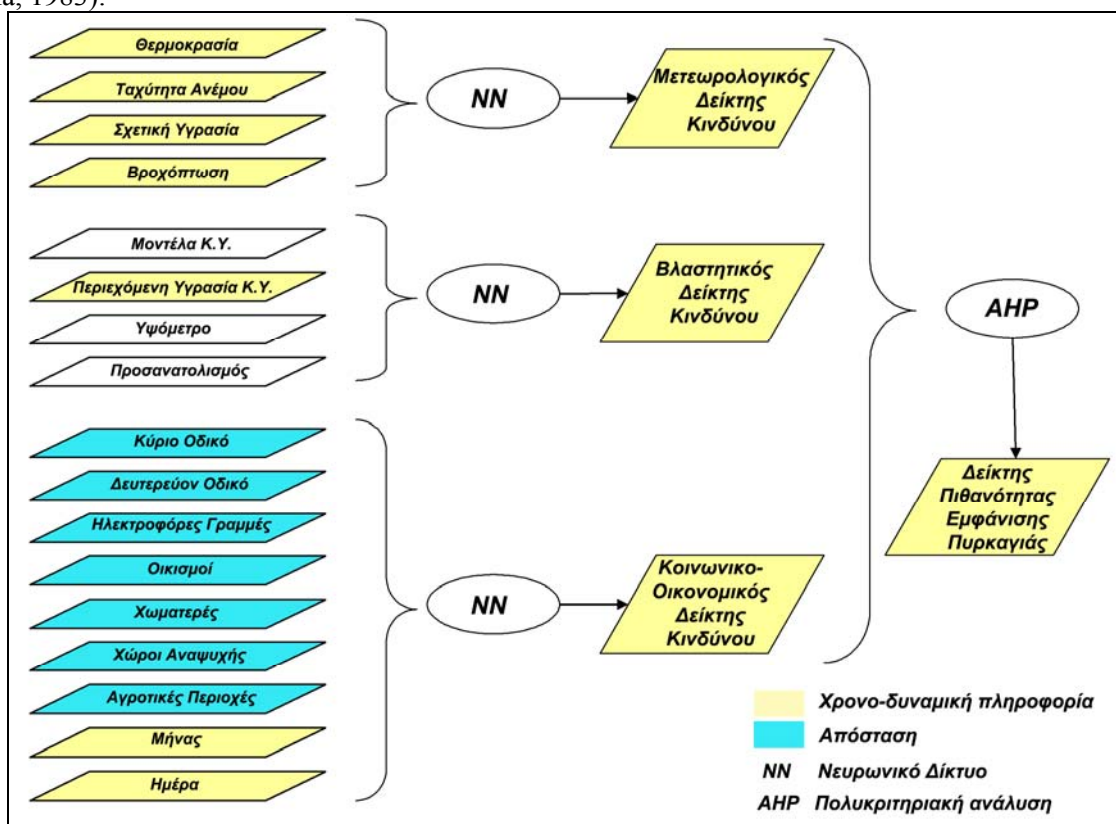
3. Δεδομένα και Μεθοδολογία

Το κύριο αποτέλεσμα του συστήματος εκτίμησης κινδύνου είναι ο Δείκτης Πιθανότητας Εμφάνισης Πυρκαγιάς βασισμένος σε τρεις άλλους δείκτες: το Μετεωρολογικό Δείκτη Κινδύνου, το Βλαστητικό Δείκτη Κινδύνου και τον Κοινωνικο-Οικονομικό Δείκτη Κινδύνου. Όλοι οι επιμέρους δείκτες είναι δυναμικοί, δηλαδή μεταβάλλονται στο χρόνο και το χώρο, ενώ η σχέση μεταξύ εμφάνισης της φωτιάς και των παραμέτρων-μεταβλητών που ενσωματώνονται στους παραπάνω δείκτες, βασίζεται σε ιστορικά στοιχεία και μοντελοποιήθηκε με τη χρήση μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης και συγκεκριμένα των νευρωνικών δικτύων. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη έχουν επιλεγθεί έτσι ώστε να είναι εύκολο να μετρηθούν και το σύστημα να είναι έτοιμο για επιχειρησιακή εφαρμογή σε τοπικό επίπεδο. Η σύνθεση του τελικού δείκτη χρησιμοποιώντας του τρεις επιμέρους δείκτες έγινε με μεθόδους πολυκριτηριακής ανάλυσης και συγκεκριμένα με τη Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process – AHP).

3.1 Συλλογή και προ-επεξεργασία δεδομένων

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία της εργασίας καθώς και οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για τον υπολογισμό κάθε δείκτη. Ο Μετεωρολογικός Δείκτης Κινδύνου βασίζεται σε μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία συλλέγονται από 4 αυτόματους τηλεμετρικούς μετεωρολογικούς σταθμούς (ΑΤΜΟΣ). Χρησιμοποιώντας αυτά τα δεδομένα, υπολογίζεται ο πραγματικός Μετεωρολογικός Δείκτης Κινδύνου και

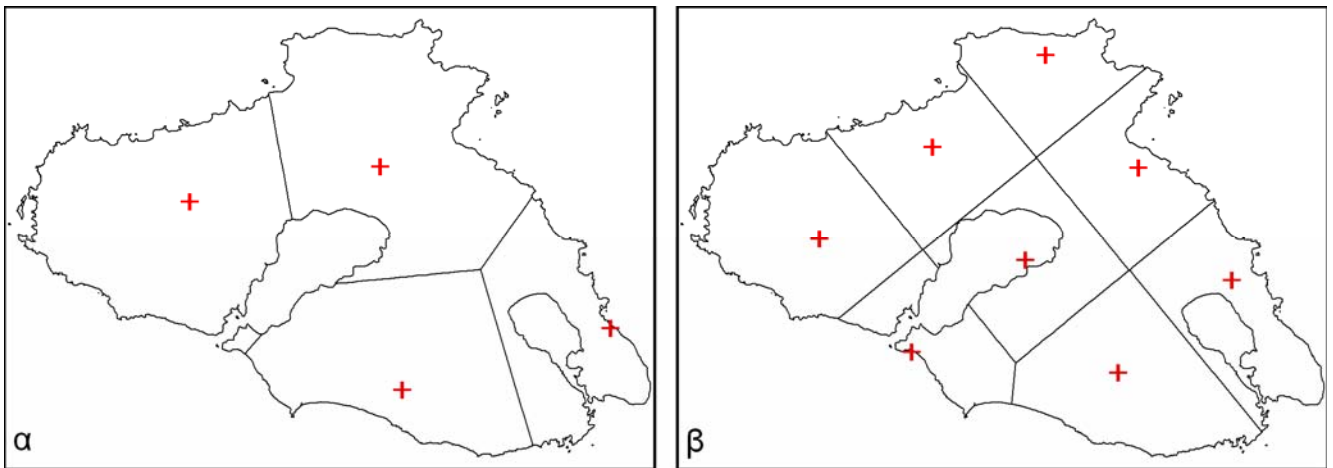
κατά συνέπεια ο πραγματικός Δείκτης Πιθανότητας Εμφάνισης Πυρκαγιάς. Επίσης, υπολογίζεται και η πρόγνωση του δείκτη βασίζομενος σε μετεωρολογικά δεδομένα τα οποία προέρχονται από το μοντέλο SKIRON με δυνατότητα πρόγνωσης 5 ημερών (Kallos *et al.*, 1997). Το κύριο πρόβλημα έγκειται στη χωρική κατανομή το μετεωρολογικών συνθηκών χρησιμοποιώντας τις παραπάνω σημειακές μετρήσεις. Για την χωρική παρεμβολή των κλιματολογικών δεδομένων χρησιμοποιούνται κυρίως 4 μέθοδοι (Carrega, 1990; Fujioka, 1983):



Σχήμα 2: Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

- Πολύγωνα Thiessen
- Μέση βαρύνουσα απόσταση
- Παρεμβολή Kriging
- Πολλαπλή παλινδρόμηση με τη χρήση και άλλων μεταβλητών π.χ. υψόμετρο, γεωγραφικό μήκος και πλάτος (Καλαμποκίδης και Κούτσιας, 2000).

Οι τρεις αρχικές μέθοδοι βασίζονται στην απόσταση, ενώ η τελευταία προϋποθέτει ότι υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των μετεωρολογικών μεταβλητών και κάποιων άλλων παραμέτρων όπως το υψόμετρο. Μεγαλύτερη δυσκολία υπάρχει στην χωρική κατανομή του ανέμου, λόγω της ροής του και της δυσκολίας να μοντελοποιηθεί σε ένα σύνθετο ανάγλυφο (McCutchan and Fox, 1986; Ross *et al.*, 1988). Για την παρούσα εργασία εφαρμόστηκε η μέθοδος των πολυγώνων Thiessen θεωρώντας ότι οι σημειακές μετρήσεις από τους μετεωρολογικούς σταθμούς και το μοντέλο SKIRON είναι ικανές να περιγράψουν τις επιφανειακές μετεωρολογικές συνθήκες σύμφωνα με την παραπάνω μέθοδο (Σχήμα 3) **Reference G Kallos**.



Σχήμα 3: Πολύγωνα Thiessen (α) των 4(+) μετεωρολογικών σταθμών και (β) των 8(+) σημείων πρόγνωσης μετεωρολογικών δεδομένων που υπολογίζονται από το μοντέλο SKIRON

Ο Βλαστητικός Δείκτης Κινδύνου αναφέρεται στην πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς λόγω της τοπογραφίας, του είδους της βλάστησης και της κατάστασής της. Περιοχές με τα ίδια είδη βλάστησης μπορούν να έχουν διαφορετικό κίνδυνο λόγω της μορφολογίας (ύψος, πυκνότητα) και της ποσότητας της βλάστησης. Αυτή η διαφοροποίηση συνοψίζεται στα διαφορετικά μοντέλα καύσιμης ύλης (Deeming *et al.*, 1977). Για την δημιουργία της χωρικής επιφάνειας μοντέλων καύσιμης ύλης στη Λέσβο, χρησιμοποιήθηκαν οι χρήσεις γης CORINE οι οποίες αντιστοιχίστηκαν σε ένα από τα 13 μοντέλα καύσιμης ύλης του BEHAVE (Anderson, 1982). Έπειτα, υπολογίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι για κάθε μοντέλο ώστε να προσδιορισθεί η ευφλεκτικότητα του καθενός για διάφορες τιμές κλίσεως του εδάφους:

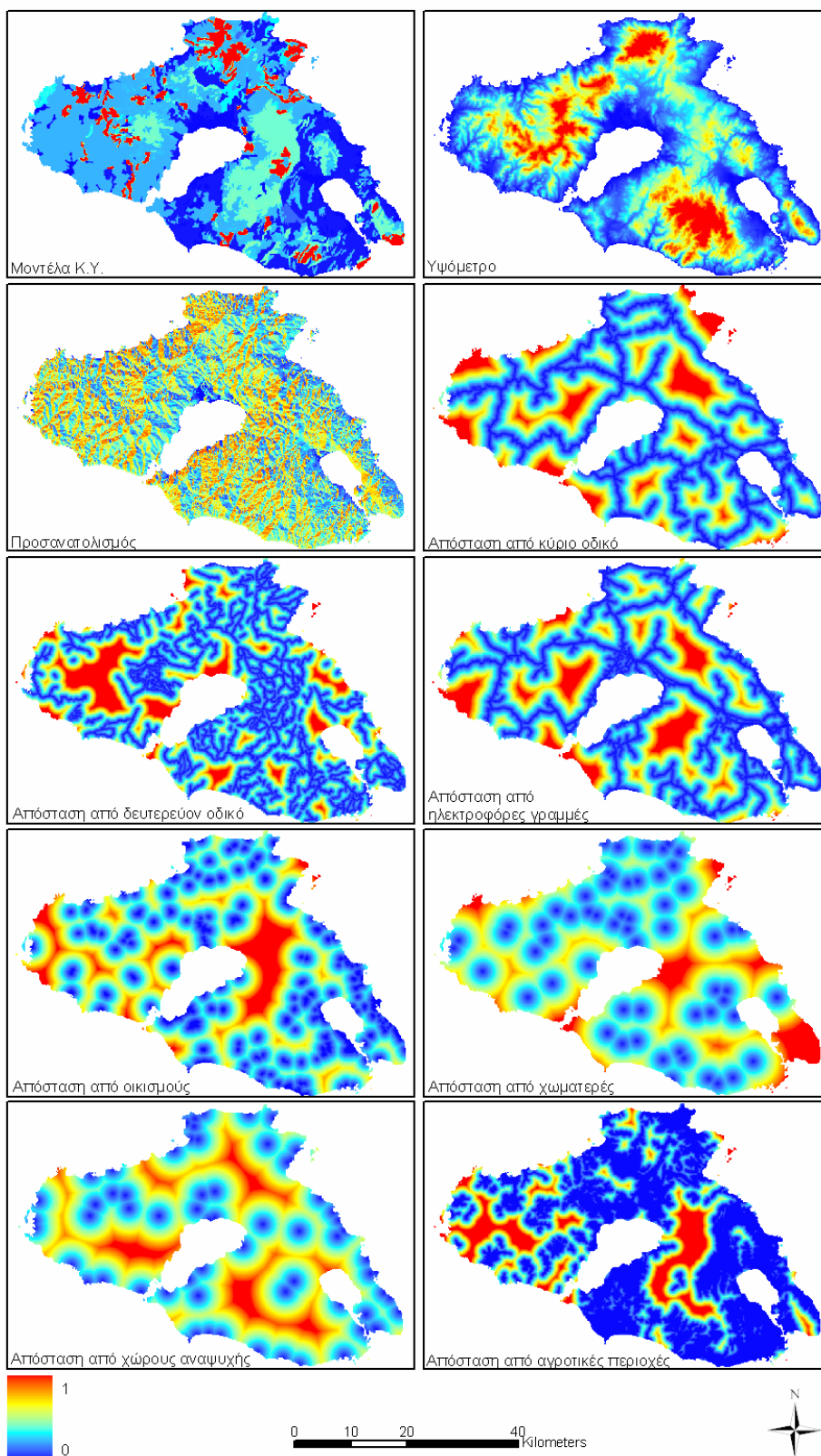
- Ταχύτητα διάδοσης
- Θερμότητα ανά μονάδα επιφανείας
- Θερμική ένταση μετώπου
- Μήκος φλόγας
- Θερμική ένταση αντίδρασης

Εκτός από το είδος και την κατάσταση της βλάστησης, ο ανθρώπινος παράγοντας έχει μεγάλη σημασία στην εκτίμηση του κινδύνου, κυρίως στις Μεσογειακές χώρες όπου είναι μια από τις κύριες αιτίες έναρξης δασικών πυρκαγιών είτε από αμέλεια είτε από εμπρησμό. Ο Κοινωνικο-Οικονομικός Δείκτης Κινδύνου αναφέρεται στην επικινδυνότητα μιας περιοχής λόγω της ανθρώπινης παρουσίας. Η χωρική ανάλυση του ανθρώπινου ρίσκου είναι αρκετά περίπλοκη λόγω της δυσκολίας να απεικονισθούν χωρικά οι ανθρώπινες δραστηριότητες (Vega-Garcia *et al.*, 1993). Η κύρια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τη χαρτογράφηση του ανθρώπινου ρίσκου είναι ο συσχετισμός της χωρικής κατανομής της έναρξης των πυρκαγιών με την εγγύτητα σε ανθρώπινες δραστηριότητες (Chuvieco and Congalton, 1989; Chuvieco and Salas, 1996; Salazar, 1990).

Στο Σχήμα 4 παρουσιάζονται οι παράμετροι του συστήματος που δεν μεταβάλλονται βραχυπρόθεσμα και βασίζονται, οι περισσότερες, στην ευκλείδεια απόσταση από ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Για τη χαρτογράφηση του οδικού δικτύου, των οικισμών και των αγροτικών περιοχών χρησιμοποιήθηκαν τηλεπισκοπικά δεδομένα υψηλής χωρικής διακριτικής ικανότητας από τον δέκτη QuickBird με μέγεθος pixel 2,8 m. Περισσότερα από 20 σκηνικά παραλήφθηκαν (στα πλαίσια του προγράμματος AUTO-HAZARD PRO) κατά την διάρκεια των αντιπυρικών περιόδων 2002 και 2003 τα οποία καλύπτανε το νησί της Λέσβου. Τα σκηνικά διορθώθηκαν γεωμετρικά με τη βοήθεια χαρτών και GPS και έπειτα συνενώθηκαν σταδιακά σε ένα ενιαίο μωσαϊκό πραγματοποιώντας παράλληλα και ραδιομετρικές διορθώσεις προκειμένου να εξαλειφθούν οι διαφορές που υπήρχαν στα ιστογράμματά τους, κυρίως λόγω της διαφορετικής ημέρας και γωνίας λήψης. Για να αντικατασταθούν οι περιοχές που είχαν νεφοκάλυψη χρησιμοποιήθηκε εικόνα Landsat ETM με μέγεθος pixel 30 m στο πολυφασματικό και 15 m στο πανχρωματικό. Από όλα τα κανάλια του Landsat ETM επιλέχθηκαν το μπλε, πράσινο, κόκκινο και κοντινό υπέρυθρο που έχουν την ίδια φασματική ζώνη με τα 4 κανάλια του QuickBird, και συνενώθηκαν με το πανχρωματικό έτσι ώστε να προκύψει εικόνα με 4 φασματικές ζώνες και 15 m γεωμετρική διαχωριστική ικανότητα.

Για την εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων χρησιμοποιήθηκαν 420 πυρκαγιές οι οποίες εκδηλώθηκαν στο χρονικό διάστημα 1970-2001. Για αυτές τις πυρκαγιές συλλέχθηκαν όλα τα ιστορικά δεδομένα τα οποία χρειάζονται στην εκπαίδευση και χαρτογραφήθηκαν με τη βοήθεια συνεντεύξεων των κατοίκων, ενώ οι μεταβλητές που αναφέρονται σε αποστάσεις από κάποια παράμετρο για κάθε σημείο έναρξης

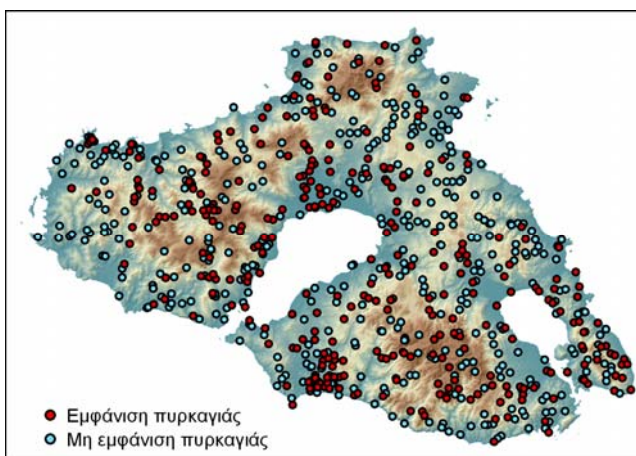
υπολογίστηκαν με τη χρήση Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών. Για τη σωστή εκπαίδευση, δημιουργήθηκαν τυχαία σημεία που προσομοίωσαν τη μη εμφάνιση πυρκαγιάς για συγκεκριμένη χρονική



Σχήμα 4: Στατικές παράμετροι του συστήματος γραμμικά τεντωμένες στο διάστημα 0-1

στιγμή κατά το έτος 2003. Αφού ελέγχθηκε ότι δεν υπήρξε πυρκαγιά στα παραπάνω σημεία τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, συλλέχθηκαν οι μετεωρολογικές συνθήκες καθώς και οι υπόλοιποι παράμετροι σύμφωνα με τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για τις πυρκαγιές στο χρονικό διάστημα 1970-2001 (Σχήμα 5).

Από το ιστορικό των πυρκαγιών, δημιουργήθηκαν δείγματα εκπαίδευσης και επαλήθευσης των νευρωνικών δικτύων για κάθε δείκτη. Λόγω μη διαθεσιμότητας ημερήσιων μετεωρολογικών συνθηκών καθώς και μικρής αξιοπιστίας μερικών από αυτών, για την εκπαίδευση του Μετεωρολογικού και του Βλαστητικού Δείκτη Κινδύνου χρησιμοποιήθηκαν πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν κατά την περίοδο 1997-2001 για τους μήνες Μάιο-Σεπτέμβριο ενώ για τον Κοινωνικο-Οικονομικό Δείκτη χρησιμοποιήθηκαν όλες οι πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν κατά τους μήνες Μάιο-Σεπτέμβριο (Πίνακας 1). Τέλος, για την προσομοίωση λειτουργίας του συστήματος και την καλύτερη επαλήθευση του, χαρτογραφήθηκαν οι 102 πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν το 2003 από το Μάιο έως και το Σεπτέμβριο και συλλέχθηκαν οι τιμές όλων των παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη στην εκπαίδευση. Οι συγκεκριμένες πυρκαγιές χρησιμοποιήθηκαν μόνο στο στάδιο της επαλήθευσης καθώς και της ερμηνείας των αποτελεσμάτων όσον αφορά τα αίτια των πυρκαγιών στο νησί της Λέσβου.



Σχήμα 5: Σημεία έναρξης δασικών πυρκαγιών στο χρονικό διάστημα 1970-2001 και σημεία μη εμφάνισης πυρκαγιών

Πίνακας 1: Αριθμός πυρκαγιών δεδομένων εκπαίδευσης και επαλήθευσης για κάθε δείκτη (ΜΔΚ: Μετεωρολογικός Δείκτης Κινδύνου, ΒΔΚ: Βλαστητικός Δείκτης Κινδύνου, ΚΟΔΚ: Κοινωνικο-Οικονομικός Δείκτης Κινδύνου, Εκ.: Εκπαίδευση, Επ.: Επαλήθευση)

	ΜΔΚ-Εκ.	ΜΔΚ-Επ.	ΒΔΚ-Εκ.	ΒΔΚ-Επ.	ΚΟΔΚ-Εκ.	ΚΟΔΚ-Επ.
Συνολικό δείγμα	64	27	91	25	263	102
Εμφάνιση πυρκαγιών	27	17	45	12	141	47
Μη εμφάνιση πυρκαγιών	37	10	46	13	122	55

3.2 Εκπαίδευση Νευρωνικού Δικτύου

Η ανάπτυξη των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων ή απλά Νευρωνικών Δικτύων (NN) ξεκίνησε πριν από 50 χρόνια περίπου λόγω της επιθυμίας του ανθρώπου να κατανοήσει καλύτερα τον ανθρώπινο εγκέφαλο και να εξομοιώσει μερικές από τις ικανότητές του. Δεν υπάρχει κάποιος ευρέως αποδεκτός ορισμός των NN. Συνοπτικά, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι ένας τρόπος επεξεργασίας δεδομένων που βασίζεται στο πρότυπο του ανθρώπινου εγκεφάλου χρησιμοποιώντας την κεντρική ιδέα της λογικής λειτουργίας του. Τα NN βασίζονται σε μία συλλογή μονάδων, αντίστοιχες προς τους νευρώνες, και προσπαθούν να επιτελέσουν τις ανάλογες διεργασίες. Τα NN είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για προβλήματα ταξινόμησης και προσέγγισης συναρτήσεων τα οποία έχουν αρκετά δεδομένα εκπαίδευσης και είναι ανεκτικά όσον αφορά την ακρίβεια (Sarle, 1997). Είναι ιδιαίτερα ικανά σε συνδυαστικά προβλήματα και σε γενικοποιήσεις, και έχουν χρησιμοποιηθεί μερικώς και για πρόγνωση χωρικής εμφάνισης πυρκαγιών (Vasconcelos *et al.* 2001).

Η προσέγγιση των συναρτήσεων για τον υπολογισμό των τριών αρχικών δεικτών πραγματοποιήθηκε με την χρήση NN τα οποία εκπαιδεύτηκαν με την μέθοδο της ανάστροφης διάδοσης σφάλματος (Backpropagation). Η συγκεκριμένη μέθοδος χρησιμοποιείται για την επιβλεπόμενη εκπαίδευση NN ευθείας τροφοδότησης. Αποτελεί την πιο δημοφιλή μέθοδο για την εκπαίδευση ενός NN με πολλά επίπεδα επεξεργασίας. Αναπτύχθηκε σε διάφορες παραλλαγές αλλά προωθήθηκε και έγινε δημοφιλής από τους Rumelhart and McClelland (1986). Η κεντρική ιδέα είναι αρκετά απλή: Το δίκτυο ξεκινά την διαδικασία μάθησης από τυχαίες τιμές των βαρών του. Εάν δώσει λάθος απάντηση (που είναι και το πιο πιθανό) τότε τα βάρη διορθώνονται, έτσι ώστε το λάθος να γίνει μικρότερο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται πολλές φορές έτσι ώστε σταδιακά το λάθος ελαττώνεται μέχρι να γίνει πολύ μικρό και ανεκτό.

Ως συνάρτηση ενεργοποίησης, η οποία χρειάζεται για την εφαρμογή της μη-γραμμικότητας στο δίκτυο, χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω λογιστική συνάρτηση τόσο στα ενδιάμεσα επίπεδα επεξεργασίας όσο και στην έξοδο του ΝΔ, η λογιστική συνάρτηση:

$$f(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}} \quad (1)$$

Αυτή η συνάρτηση προσεγγίζει το 1, για μεγάλες και θετικές τιμές του z , και το 0 για μεγάλες και αρνητικές τιμές του z , και είναι κατάλληλη για την εμφάνιση ή μη δασικών πυρκαγιών επειδή η εξαρτημένη μεταβλητή

έχει δυαδική τιμή (0 ή 1) (Jordan, 1995; Sarle, 1997). Επίσης, η χρήση μιας τέτοιας συνάρτησης ως συνάρτησης ενεργοποίησης επιτρέπει να ερμηνευτεί το αποτέλεσμα ως πιθανότητα (Bishop, 1995).

Στόχος της εκπαίδευσης είναι να ελαχιστοποιηθεί η συνάρτηση του λάθους μέσω της διόρθωσης των βαρών w . Για την αξιολόγηση της απόδοσης του NN χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_k (t_k - d_k)^2 \quad (2)$$

όπου t_k το επιθυμητό αποτέλεσμα, d_k το πραγματικό αποτέλεσμα στο τελευταίο επίπεδο επεξεργασίας και n ο συνολικός αριθμός του δείγματος εκπαίδευσης.

3.3 Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης

Ο Δείκτης Πιθανότητας Εμφάνισης Πυρκαγιάς (ΔΠΕΠ) υπολογίζεται με τη χρήση πολυκριτηριακής ανάλυσης των τριών επιμέρους δεικτών (κριτήρια), σύμφωνα με τη μέθοδο του σταθμισμένου μέσου:

$$\Delta\text{ΠΕΠ} = \sum_{j=1}^n w_j \delta_{ij} \quad (3)$$

Το διάνυσμα των βαρών w υπολογίζεται με την Διαδικασία Αναλυτικής Ιεράρχησης (Analytic Hierarchy Process – AHP) όπως προτείνεται από τον Saaty (1980). Πιο συγκεκριμένα η AHP χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των βαρών των τριών δεικτών μετά από ανά ζεύγη σύγκριση μεταξύ των δεικτών χρησιμοποιώντας την κλίμακα σχετικής σημαντικότητας που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2. Κλίμακα σχετικής σημαντικότητας

Βαθμός σημαντικότητας	Ορισμός
1	Ίση σημαντικότητα μεταξύ δύο κριτηρίων
3	Το ένα κριτήριο είναι ελαφρώς πιο σημαντικό από το άλλο
5	Το ένα κριτήριο είναι αρκετά πιο σημαντικό από το άλλο
7	Το ένα κριτήριο είναι πολύ πιο σημαντικό από το άλλο
9	Το ένα κριτήριο είναι εντελώς πιο σημαντικό από το άλλο
2,4,6,8	Ενδιάμεσες τιμές σημαντικότητας
Αντίστροφοι αριθμοί	Εάν το κριτήριο i έχει έναν από τους παραπάνω βαθμούς σημαντικότητας έναντι του κριτηρίου j , τότε η σημαντικότητα του κριτηρίου j έναντι του κριτηρίου i είναι ο αντίστροφος αριθμός

Ο πίνακας συγκρίσεων που δημιουργείται έχει τις εξής βασικές ιδιότητες: $a_{ij}=1$ και $a_{ji} = 1 / a_{ij}$. Για τον υπολογισμό των βαρών του κάθε κριτηρίου υπολογίζεται το δεξιό κύριο ιδιοδιάνυσμα του παραπάνω πίνακα. Το ιδιοδιάνυσμα μπορεί να προσεγγιστεί χρησιμοποιώντας το γεωμετρικό μέσο της κάθε γραμμής του πίνακα δηλαδή πολλαπλασιάζονται τα στοιχεία κάθε γραμμής μεταξύ τους και έπειτα υπολογίζεται η n -οστή ρίζα όπου n ο αριθμός των στοιχείων κάθε γραμμής. Έπειτα, κανονικοποιούνται οι γεωμετρικοί μέσοι διαιρώντας τους με το άθροισμά τους (Triantaphyllou and Mann, 1995).

Στην πραγματικότητα ο πίνακας συγκρίσεων δεν είναι τέλεια συναφής. Για τον έλεγχο αξιοπιστίας του πίνακα προτείνεται από το Saaty (1980) η χρήση του δείκτη συνάφειας CI και του λόγου συνάφειας CR, διαιρώντας το δείκτη συνάφειας CI με έναν τυχαίο δείκτη RI ο οποίος είναι ίσος με 0,58 για πίνακα 3x3. Όταν ο λόγος συνέπειας είναι αρκετά μικρός τότε ο πίνακας συγκρίσεων θεωρείται συνεπής και ως κριτήριο χρησιμοποιείται η τιμή 0,1. Σε περίπτωση που $CR > 0,1$ τότε προτείνεται η επαναξιολόγηση των βαθμών σημαντικότητας που έχουν επιλεγεί στον πίνακα συγκρίσεων.

4. Αποτελέσματα – Συμπεράσματα

Πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές δοκιμές ώστε να επιλεγεί η τελική δομή των νευρωνικών δικτύων για κάθε δείκτη, παρακολουθώντας κυρίως τα ποσοστά σωστής ταξινόμησης των δειγμάτων εκπαίδευσης και επαλήθευσης καθώς και του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (MSE). Ως ρυθμός εκμάθησης επιλέχθηκε $\rho=0,1$ ενώ ο νευρώνας στην έξοδο θεωρείται ενεργοποιημένος με τιμή μεγαλύτερη από 0,5. Πιο εύκολα προσεγγίστηκε η συνάρτηση του Μετεωρολογικού Δείκτη Κινδύνου, ενώ ο Κοινωνικο-Οικονομικός Δείκτης Κινδύνου είχε καλύτερα ποσοστά ταξινόμησης των πυρκαγιών του 2003 (Πίνακας 3).

Πιο συγκεκριμένα, το δίκτυο που έχει επιλεγεί να υπολογίσει το ΜΔΚ ταξινόμησε σωστά το 93% των πυρκαγιών του δείγματος εκπαίδευσης (1970-2001) και το 88% των πυρκαγιών του δείγματος επαλήθευσης (1970-2001). Πάνω από 100 εποχές περίπου στη διαδικασία εκπαίδευσης, το δίκτυο έχανε τη γενίκευση στο

δείγμα επαλήθευσης του 2003 ενώ πάνω από 700 εποχές, χανόταν η γενίκευση και στο δείγμα επαλήθευσης του 1970-2001, δηλαδή υπήρχε πλήρης προσαρμογή της συνάρτησης στο δείγμα εκπαίδευσης. Προσθέτοντας και 2ο επίπεδο επεξεργασίας, το δίκτυο έγινε πιο ευαίσθητο στα τοπικά ελάχιστα ενώ στις 400 εποχές συνήθως, υπήρχε καλύτερη ταξινόμηση των πυρκαγιών του 2003. Δεν επιλέχθηκε όμως αυτό το δίκτυο γιατί υπήρχε μια υποεκτίμηση της μη-εμφάνισης πυρκαγιών στο δείγμα εκπαίδευσης.

Το δίκτυο που χρησιμοποιείται από τον Κοινωνικο-Οικονομικό Δείκτη Κινδύνου εκπαιδεύτηκε σε 1000 εποχές ενώ για παραπάνω εποχές έχανε τη γενίκευση στο δείγμα επαλήθευσης του 1970-2001. Τα ποσοστά σωστής ταξινόμησης κρίνονται ικανοποιητικά αν και υπάρχει μια υπερεκτίμηση λόγω του χαμηλού ποσοστό σωστής ταξινόμησης της μη-εμφάνισης πυρκαγιάς στο δείγμα επαλήθευσης του 1970-2001. Αξιοσημείωτο είναι το μεγάλο ποσοστό σωστής ταξινόμησης του δείγματος επαλήθευσης των πυρκαγιών τους έτους 2003 με 91%. Αυτό σημαίνει ότι το 91% των πυρκαγιών που εκδηλώθηκαν στη Λέσβο την περίοδο Μάιο-Σεπτέμβριο του 2003, εκδηλώθηκαν σε περιοχές όπου το δίκτυο που έχει επιλεγεί έδινε πιθανότητα εμφάνισης πυρκαγιάς πάνω από 50% δηλαδή οι πυρκαγιές του 2003 είχαν ως κύρια αιτία την ανθρώπινη παρουσία και δραστηριότητα. Κάτι τέτοιο επιβεβαιώνεται και από τα ανακριτικά και αιτιολογικά δεδομένα της Πυροσβεστικής Υπηρεσίας για τις πολλές ανθρωπογενείς πυρκαγιές που εκδηλώθηκαν στη Λέσβο κατά το έτος 2003.

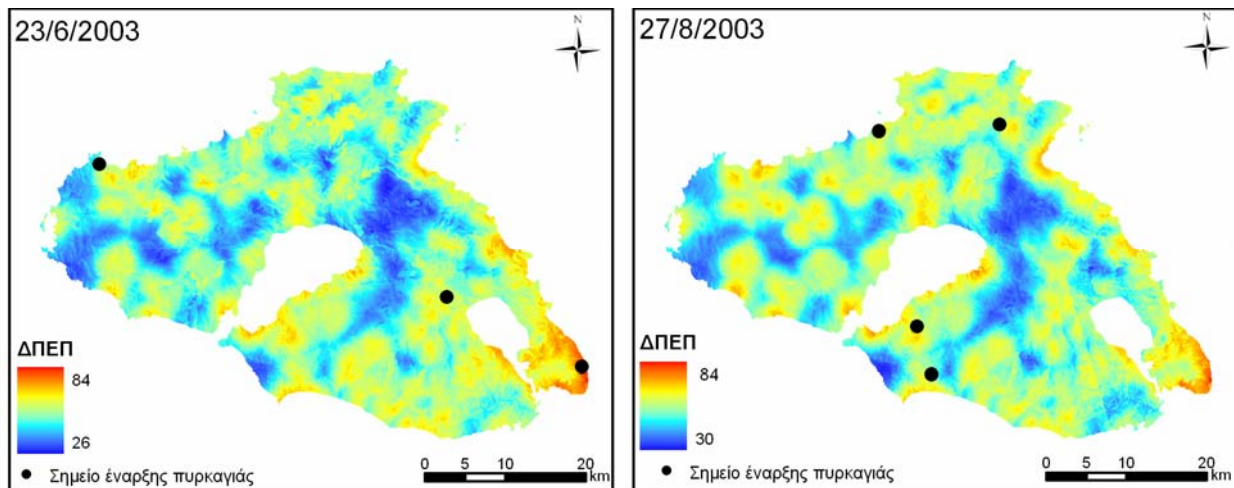
Πίνακας 3: Αποτελέσματα εκπαίδευσης και επαλήθευσης των νευρωνικών δικτύων

	ΜΔΚ	ΚΟΔΚ	ΒΔΚ
Επίπεδα επεξεργασίας	1	1	1
Αριθμός νευρώνων	6	8	4
Εποχές	100	1000	1500
MSE δείγματος εκπαίδευσης (1970-2001)	0,122	0,121	0,091
MSE δείγματος επαλήθευσης (1970-2001)	0,130	0,157	0,120
MSE δείγματος επαλήθευσης (2003)	0,177	0,073	-
Σωστή ταξινόμηση πυρκαγιών δείγματος εκπαίδευσης	93%	87%	91%
Σωστή ταξινόμηση πυρκαγιών δείγματος επαλήθευσης (1970-2001)	88%	89%	75%
Σωστή ταξινόμηση πυρκαγιών δείγματος επαλήθευσης (2003)	65%	91%	-

Η διαδικασία εκπαίδευσης του Βλαστητικού Δείκτη Κινδύνου ισχυροποίησε το παραπάνω συμπέρασμα γιατί το MSE του δείγματος επαλήθευσης (2003), παρουσίασε πολύ υψηλές τιμές ενώ και το ποσοστό σωστής ταξινόμησης των πυρκαγιών ήταν χαμηλό. Έτσι, η εκπαίδευση βασίστηκε αποκλειστικά στις πυρκαγιές της περιόδου 1970-2001 και τερματίστηκε πριν χαθεί η γενίκευση στο δείγμα επαλήθευσης (1970-2001). Για τον υπολογισμό του Δείκτη Πιθανότητας Εμφάνισης Πυρκαγιάς (ΔΠΕΠ), δημιουργήθηκε ο πίνακας συγκρίσεων ο οποίος είχε δείκτη συνάφειας CI=0,0268 και λόγο συνάφειας CR=0,0462. Συνεπώς με το διάλυμα των βαρών που προέκυψε, ο ΔΠΕΠ υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta\Pi\epsilon\Pi=0,1311*\text{M}\Delta\text{K}+0,2081*\text{B}\Delta\text{K}+0,6608*\text{K}\text{O}\Delta\text{K} \quad (4)$$

Στο σχήμα 5 παρουσιάζεται ο ΔΠΕΠ για τις ημερομηνίες 23/6/2003 και 27/8/2003 όπου εκδηλώθηκαν 3 και 4 πυρκαγιές αντίστοιχα στο νησί της Λέσβου. Για τη δημιουργία των χαρτών χρησιμοποιήθηκαν οι πραγματικές καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν τις συγκεκριμένες ημέρες. Όλες οι πυρκαγιές εμφανίστηκαν σε περιοχές όπου η πιθανότητα εμφάνισης ήταν μεγαλύτερη από 50% ενώ και ο συγκριτικός κίνδυνος σε σχέση με άλλες περιοχές ήταν πολύ μεγαλύτερος.



Σχήμα 5: ΔΠΕΠ στις ημερομηνίες 23/6/2003 και 27/8/2003

Έχοντας τους παραπάνω χάρτες-αποτελέσματα θα μπορούσαν οι τοπικές πυροσβεστικές και πολιτειακές αρχές να τους χρησιμοποιήσουν ως ένα σημαντικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για την πρόληψη και καταστολή των δασικών πυρκαγιών. Στόχος της παρούσας εργασίας ήταν να αναπτυχθεί για πρώτη φορά ένα ποσοτικό σύστημα εκτίμησης του κινδύνου πυρκαγιών μεγάλης κλίμακας με δυνατότητα βραχυπρόθεσμης πρόγνωσης. Με την υιοθέτηση ενός τέτοιου συστήματος είναι εφικτός ο εντοπισμός περιοχών με υψηλό δείκτη κινδύνου/ επικινδυνότητας έτσι ώστε να πραγματοποιείται αποτελεσματικότερη διασπορά των δυνάμεων φύλαξης και πρώτης προσβολής, ενώ δίνεται η δυνατότητα για την έγκαιρη λήψη αποτρεπτικών μέτρων.

Ευχαριστίες

Οι συγγραφείς θα ήθελαν να ευχαριστήσουν το προσωπικό του Εργαστηρίου Γεωγραφίας Φυσικών Καταστροφών του Τμήματος Γεωγραφίας Πανεπιστημίου Αιγαίου: Ι. Μακρή και Κ. Τζατζόγλου (φοιτητές Γεωγραφίας), Α. Βαγενά (απόφοιτο Περιβαλλοντικής Χαρτογραφίας), Ο. Ρούσσου (υποψήφια διδάκτορα Γεωγραφίας). Επίσης, ευχαριστούμε τη Γενική Γραμματεία Πολιτικής Προστασίας του Υπουργείου Εσωτερικών, την Πυροσβεστική Υπηρεσία Μυτιλήνης και τη Διεύθυνση Δασών Λέσβου για την ευγενή παροχή δεδομένων και τη διαρκή συνεργασία. Η έρευνα για την ανάπτυξη του πρώτου Ελληνικού Συστήματος Εκτίμησης Κινδύνου Πυρκαγιών χρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση στα πλαίσια του προγράμματος “Automated Fire and Flood Hazard Protection System / AUTO-HAZARD PRO”, με Υπεύθυνο Συντονιστή τον Κώστα Καλαμποκίδη, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Γεωγραφίας Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Βιβλιογραφία

- Καλαμποκίδης Κ. και Ν. Κούτσιας, 2000: Γεωγραφική Πολυμεταβλητή Ανάλυση της Χωρικής Εμφάνισης Δασικών Πυρκαγιών. *Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα* **11**, 37-47.
- Andrews P.L., 1986. BEHAVE. *Fire behavior prediction and fuel modelling system. Burn subsystem*, USDA Forest Service. Ogden, UT, USA.
- Bishop C.M., 1995: *Neural Networks for Pattern Recognition*, Oxford University Press, Oxford.
- Carrega P., 1990: *Climatology and index of forest fire hazard in Mediterranean France*. International Conference Forest Fire research, Coimbra, Portugal.
- Carrega P., 1991: A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France. *International Journal of Wildland Fire*, **1** (2), 79-86.
- Chuvieco E. and R.G. Congalton, 1989: Application of Remote Sensing and Geographic Information System to Forest Fire Hazard Mapping. *Remote Sensing of Environment*, **29**, 147-159.
- Chuvieco E. and J. Salas, 1996: Mapping the spatial distribution of forest fire danger using GIS. *International Journal of Geographic Information System*, **10**(3), 333-345.
- Deeming J.E., R.E. Burgan and J.D. Cohen, 1977: *The national fire-danger rating system - 1978*. Gen. Tech. Rep. INT-39, Ogden, UT, USA.
- Fujioka F., 1983: *Weighted interpolation as an interpretive tool. Implications for meteorological network design*. 7th Conference on Fire and Forest Meteorology, Fort Collins (Colorado), USA.
- Jordan M.I., 1995: *Why the logistic function? A tutorial discussion on probabilities and neural networks*. MIT Computational Cognitive Science Report 9503, <http://www.cs.berkeley.edu/~jordan>.

- Kallos G., S. Nickovic, D. Jovic, O. Kakaliagou, A. Papadopoulos, N. Misirlis, L. Boukas and N. Mimikou, 1997: *The ETA model operational forecasting system and its parallel implementation*. 1st Workshop on Large-Scale Scientific Computations, Varna, Bulgaria, 7-11 June 1997.
- McCutchan M.H. and D.G. Fox, 1986: Effect of Elevation and Aspect on Wind, Temperature and Humidity. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **25**, 1996-2013.
- Rumelhart D.E and J.L. McClelland, 1986: *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. The MIT Press, MA, USA.
- Saaty T., 1980: *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, USA.
- Sarle W.S., ed., 1997: *Neural Network FAQ*. Periodic posting to the Usenet newsgroup comp.ai.neural-nets. <ftp://ftp.sas.com/pub/neural/FAQ.html>.
- Triantaphyllou, E., and S.H. Mann, 1995: Using the Analytic Hierarchy Process For Decision Making in Engineering Applications: Some Challenges. *International Journal of Industrial Engineering: Applications and Practice*, **2(1)**, 35-44.
- Vasconcelos M.J.P., S. Silva, M. Tome, M. Alvim and J.M.C. Pereira, 2001: Spatial Prediction of Fire Ignition Probabilities: Comparing Logistic Regression and Neural Networks. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **67 (1)**, 73-81.